

KEK Proceedings 2012-10

January 2013

M

# 第2回コンパクト ERL サイエンスワークショップ



2012年7月30日(月)–31日(火)  
高エネルギー加速器研究機構  
研究本館 小林ホール

実行委員会：野澤 俊介（委員長）、河田 洋（ERL計画推進室長）、  
足立 伸一、帯名 崇、平野 馨一、兵藤 一行（KEK）、木村 真一（分子研）

© High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 2012

KEK Reports are available from:

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1 Oho, Tsukuba-shi  
Ibaraki-ken, 305-0801  
JAPAN

Phone: +81-29-864-5137

Fax: +81-29-864-4604

E-mail: [irdpub@mail.kek.jp](mailto:irdpub@mail.kek.jp)

Internet: <http://www.kek.jp>

# 目 次

1. プログラム .....	1
2. 講演要旨	
2-1. 光源について	
「全体趣旨説明」	河田 洋 (KEK) ..... 3
「cERL の進捗状況」	中村 典雄 (KEK) ..... 6
「レーザー・コンプトン散乱」	羽島 良一 (JAEA) ..... 12
「THz-ICS による軟 X 線発生」	島田 美帆 (KEK) ..... 16
「極短周期アンジュレータの ERL への応用」	山本 樹 (KEK) ..... 21
「利用研究ビームライン概要」	野澤 俊介 (KEK) ..... 25
2-2. フェムト秒時間分解、レーザー・電子ビーム相互作用	
「X 線回折・散乱を用いたダイナミクス研究」	一柳 光平 (東大新領域) ..... 29
「コヒーレントフォノンダイナミクス」	中村 一隆 (東工大応セラ研) ..... 34
「DXAFS を用いた fs ダイナミクス研究」	阿部 仁 (KEK) ..... 38
「強レーザー場中の分子挙動の cERL による研究」	足立 純一 (KEK) ..... 44
「円偏光レーザーコンプトン散乱ガンマ線による動的スピン磁気計測」	坂井 信彦 (兵庫県大) 49
「EEHG によるアト秒パルス放射光」	大見 和史 (KEK) ..... 53
2-3. THz 光	
「THz 光を用いた分光研究と cERL への期待」	木村 真一 (分子研) ..... 57
「高強度テラヘルツパルスで誘起する非線形光学現象」	廣理 英基 (京大) ..... 61
「大強度 THz 光源の現状と応用展開」	谷 正彦 (福井大) ..... 67
「超伝導テラヘルツ波検出器の開発と応用」	大谷 知行 (理研) ..... 73
「理科大 FEL の利用実験と大強度 THz 光源への期待」	築山 光一 (東理大) ..... 77
「赤外領域における近接場分光実験」	岡村 英一 (神戸大) ..... 81
「THz 光による protein folding 研究」	木原 裕 (立命館大) ..... 85
2-4. X 線イメージング	
「cERL での X 線イメージングについて」	兵藤 一行 (KEK) ..... 91
「SOI Pixel 検出器による X 線イメージング」	新井 康夫 (KEK) ..... 94
「放射光の臨床応用の可能性について」	鶴嶋 英夫 (筑波大学) ..... 98
「レーザーコンプトン X 線へのタルボ干渉計の応用」	百生 敦 (東北大学) ..... 104
「次世代光源を用いた糖尿病性微小循環障害の低侵襲・早期診断法の開発」	盛 英三 (東海大学) ..... 108
3. 「第 2 回コンパクト ERL サイエンスワークショップ」の報告 .....	113

# 第2回コンパクト ERL サイエンスワークショップ プログラム

(敬称略)

7月30日(月)

12:30- 受付開始

## 1. 光源について【13:00-15:00】

13:00-13:20	全体趣旨説明	河田 洋(KEK)
13:20-13:40	cERL の進捗状況	中村 典雄(KEK)
13:40-14:00	レーザー・コンプトン散乱	羽島 良一(JAEA)
14:00-14:20	THz-ICS による軟 X 線発生	島田 美帆(KEK)
14:20-14:40	極短周期アンジュレータの ERL への応用	山本 樹(KEK)
14:40-15:00	利用研究ビームライン概要	野澤 俊介(KEK)

— 休憩・写真撮影 —【15:00-15:30】

## 2. フェムト秒時間分解、レーザー・電子ビーム相互作用【15:30-】

15:30-15:50	X 線回折・散乱を用いたダイナミクス研究	一柳 光平(東大新領域)
15:50-16:10	コヒーレントフォノンダイナミクス	中村 一隆(東工大応セラ研)
16:10-16:30	DXAFS を用いた fs ダイナミクス研究	阿部 仁(KEK)
16:30-16:50	強レーザー場中の分子挙動の cERL による研究	足立 純一(KEK)
16:50-17:10	円偏光レーザーコンプトン散乱ガンマ線による動的スピン磁気計測	坂井 信彦(兵庫県大)
17:10-17:30	EEHG によるアト秒パルス放射光	大見 和史(KEK)

17:30-18:00 cERL 見学 ERL 開発棟



—懇親会(小林ホール ラウンジ)—【18:00-20:00】



7月31日(火)

### 3. THz 光【09:00-11:15】

09:00-09:20	THz 光を用いた分光研究と cERL への期待	木村 真一(分子研)
09:20-09:45	高強度テラヘルツパルスで誘起する非線形光学現象	廣理 英基(京大)
09:45-10:05	大強度 THz 光源の現状と応用展開	谷 正彦(福井大)
10:05-10:25	超伝導テラヘルツ波検出器の開発と応用	大谷 知行(理研)
10:25-10:45	理科大 FEL の利用実験と大強度 THz光源への期待	築山 光一(東理大)
10:45-11:00	赤外領域における近接場分光実験	岡村 英一(神戸大)
11:00-11:15	THz 光による protein folding 研究	木原 裕(立命館大)

— 休憩 —【11:15-11:35】

### 4. X 線イメージング【11:35-14:15】

11:35-11:45	cERL での X 線イメージングについて	兵藤 一行(KEK)
11:45-12:05	SOI Pixel 検出器による X 線イメージング	新井 康夫(KEK)
12:05-12:30	放射光の臨床応用の可能性について	鶴嶋 英夫(筑波大学)

— 昼食 —【12:30-13:30】

13:30-13:50	レーザーコンプトン X 線へのタルボ干渉計の応用	百生 敦(東北大学)
13:50-14:15	次世代光源を用いた糖尿病性微小循環障害の低侵襲・早期診断法の開発	盛 英三(東海大学)

### 5. まとめ【14:15-14:35】

14:15-14:35	まとめ・今後に向けて	河田 洋(KEK)
-------------	------------	-----------

## 全体趣旨説明

河田洋

ERL 計画推進室、KEK

### Outline of the workshop

Hiroshi Kawata

ERL Project Office, KEK

#### <Synopsis>

Compact ERL (cERL) will start the operation from the march of 2013. Accelerator technologies for ERL should be developed in the cERL, but also the cERL promises unique light sources such as THz CSR and laser inversed Compton X-ray sources for X-ray imaging and femto-second X-ray sciences. We will focus the science case of the cERL at the present workshop.

KEK では、以前より放射光施設の次期計画をエネルギー回収型ライナック (3GeV-ERL) と定めて進めています。その実現を目指して2009年から加速器要素技術の実証器としてcERLの建設を進め、今年度末には電子ビーム運転を開始する予定です。一方、cERLは加速器の実証器と言う位置付けだけではなく、テラヘルツ領域(meV)からX線領域(keV)に至る幅広いエネルギー領域に跨る新しい量子ビーム科学のプラットフォームとして、優れた光源性質を有しています。特に、レーザー逆コンプトン散乱X線、コヒーレントテラヘルツ光、フェムト秒短パルスX線としての光源特性を、単一の加速器を用いて実現することができることから、X線位相イメージング、医療用X線イメージング、テラヘルツ分光、テラヘルツイメージング、フェムト秒X線超高速ダイナミクス研究などを複合的に組み合わせた、新しい学術研究が可能となることを期待され、またそのような研究を是非活性化していきたいと思っています。この研究会でそのような複合的に組み合わせた学術研究が新たになることを期待しています。

# 全体趣旨説明

## ERL Project

KEK/IMSS

Hiroshi Kawata  
ERL Project Office, KEK

30-31/July/2012 第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ

1

## ワークショップの趣旨説明

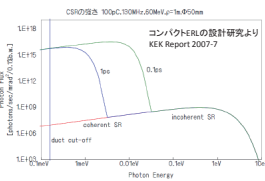
- KEKでは、放射光施設の次期計画をエネルギー回収型ライナック (3GeV-ERL)と定めて進めています、その実現を目指してcERLの建設を進め、今年度末には電子ビーム運転を開始する予定
- 一方、cERLは加速器の実証器と言う位置付けだけではなく、テラヘルツ領域(meV)からX線領域(keV)に至る幅広いエネルギー領域に跨る新しい量子ビーム科学のプラットフォーム
- レーザー逆コンプトン散乱X線、コヒーレントテラヘルツ光、フェムト秒短パルスX線としての光源特性を、単一の加速器を用いて実現
- X線位相イメージング、医療用X線イメージング、テラヘルツ分光、テラヘルツイメージング、フェムト秒X線超高速ダイナミクス研究などを複合的に組み合わせ、新しい学術研究

2

## THzビームライン

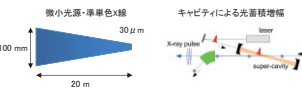
- CSRを用いた高強度コヒーレントTHz光源
  - meV領域における電子状態変化の観測
  - コヒーレント性を利用したイメージング
  - フォノン励起用フェムト秒光源

光源	パルス幅	パルス率	繰り返し	平均電力	パルスエネルギー	ピーク電圧
Table-top lasers	5 THz	100 fs	1 kHz	nW to uW	nJ to uJ	10 kV/cm
cERL (13mA)	5 THz	100 fs	260 MHz	1 kW	10 uJ	1 MV/cm



## レーザー逆コンプトンX線ビームライン

- 微小焦点イメージング
  - 空間分解能の向上、DEI等に比較して屈折効果の方向性がない、輪郭強調
- タルボ干渉計等による位相イメージング
  - コヒーレントX線でかつ1/10程度のバンド幅のX線に対しては機能
  - 大きな照射面積、準単色X線、エネルギー可変
  - 装置の小型化の可能性



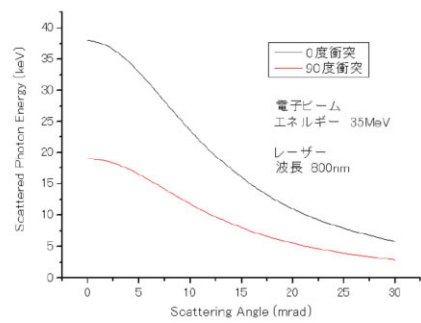
電子ビーム	レーザー
エネルギー 60 MeV	波長 1064 nm
電荷 0.01 nC	パルス 1.8 uJ/ps
繰り返し 130 MHz	繰り返し 130 MHz
パルス長 3 ps	パルス長 1 ps
サイズ 30 um	サイズ 30 um
エミッタンス 1 mm-mrad	光量増倍率 3000

レーザーコンプトンX線
X線平均フラックス 2.7 x 10 <sup>14</sup> photons/s * 100% bw
X線パルス長 3ps
コレクターサイズ 5mrad
エネルギー幅 ΔE/E = 10%

3

## 運転開始時(35MeV)でのレーザー逆コンプトン散乱X線

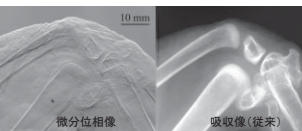


4

## cERL高輝度光源による高精度X線イメージング

レーザー逆コンプトン散乱による微小サイズ(数10ピコメートル)のX線源

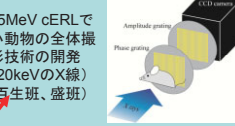
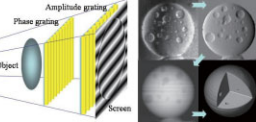
X線位相コントラストイメージングに最適光源(コヒーレントビームによる大視野も備えた)



現在放射光を用いて得られているX線Talbot干渉計で撮影した鶏手羽 (@PF)

教育の描出能力が認められる。しかし視野、および撮影場所(放射光施設)は限られる。

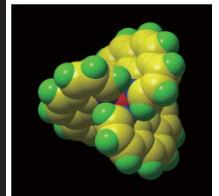
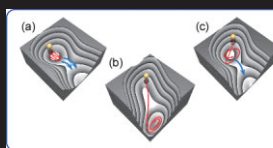
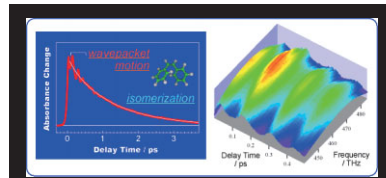
cERLで15cm x 15cmの大視野、かつ高精度X線イメージング技術の確立



30~60keVの医学応用に展開(盛研究班)

5

## フェムト秒分子イメージング動画測定技術の確立



レーザー光が作る一瞬の磁石 News@KEK 2009.12.17

フェムト秒X線により分子反応過程の構造変化を直接的に観測できる。

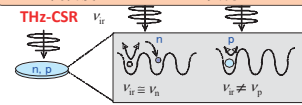
分子科学の分野では、超短パルスレーザーを使ってフェムト秒分が実現している。しかし直接的に分子構造を見ることができない。

6

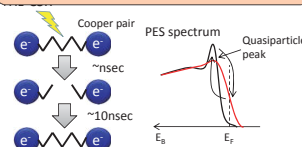
## cERLのテラヘルツCSRで行う研究

### 励起源としての新しい研究

原子種を選択した拡散現象の実証とその応用  
高密度CMOSデバイスの実現へ



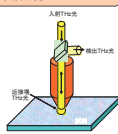
共振テラヘルツ励起による超伝導物質のCooper pairの崩壊と再結合  
-THzポンプ-レーザー光電子分光によるプローブ-



### プローブ線源としての研究

THz 近接場顕微鏡

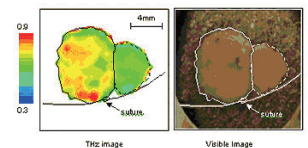
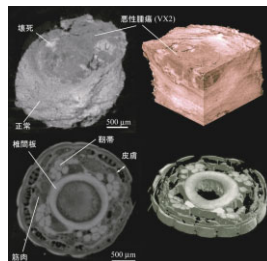
• サブmmからnmサイズの空間分解能  
•  $\Delta\lambda/\lambda = 10^{-3} \sim 10^{-5}$   
• 生きたままの細胞のTHzイメージング



大視野のTHzイメージング  
• cm<sup>2</sup>からm<sup>2</sup>:サイズの大視野イメージング: 人体のその場観察  
• 共鳴線を利用した種々のイメージング。

7

## X線屈折イメージングとTHzイメージングの組み合わせ



THzイメージングによる皮膚癌の観測例  
<http://www.teraview.com/terahertz/id/33>

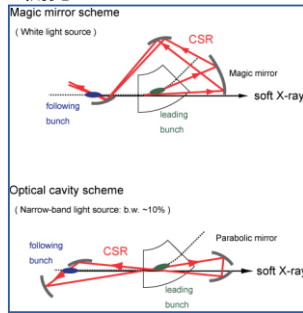
X線Talbot干渉計による位相トモグラフィで撮影したウサギ肝臓組織(上段)およびマウス尻尾(閉鎖部) (下段) (@SP8)。本線源を用いて生体標本の三次元観察が可能とされる。

軟部組織の密度情報(X線イメージング)と化学状態情報(THzイメージング)。ただし、系統的に測定が必要。

8

## 新光源に向けた開発項目

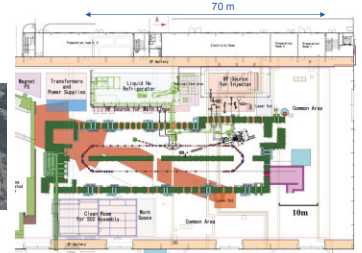
- 同期技術(10フェムト秒)
- フィードバックシステム開発
- レーザー蓄積技術
- 軟X線・X線源開発



9

## Compact ERL (cERL)

- Demonstrating reliable operations of our ERL components (guns, SC-cavities, ...)
- Demonstrating generation and recirculation of ultra-low emittance beams at high currents
- 1<sup>st</sup> target : 1 mm-mrad for 10mA @ 35 MeV



10

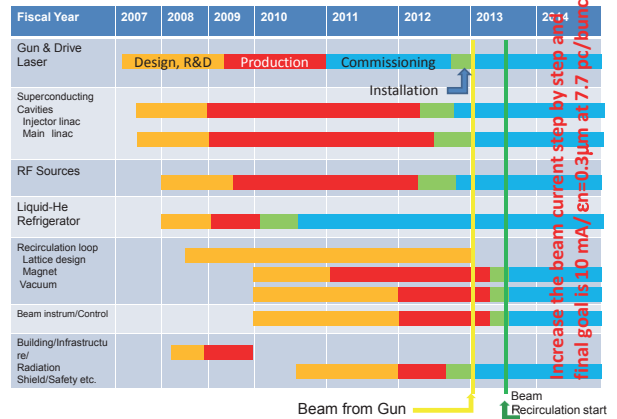
## Radiation Shield for cERL



Construction of the radiation shield is on going and will be completed in the end of this September

11

## Construction schedule of the Compact ERL



12

## プログラム(1)

7月30日(月)

### 1. 光源について【13:00-15:00】

- |             |                     |              |
|-------------|---------------------|--------------|
| 13:00-13:20 | 全体趣旨説明              | 河田 洋 (KEK)   |
| 13:20-13:40 | cERLの進捗状況           | 中村 典雄 (KEK)  |
| 13:40-14:00 | レーザー・コンプトン散乱        | 羽島 良一 (JAEA) |
| 14:00-14:20 | THz-ICSによる軟X線発生     | 島田 美帆 (KEK)  |
| 14:20-14:40 | 極短周期アンジュレータのERLへの応用 | 山本 樹 (KEK)   |
| 14:40-15:00 | 利用研究ビームライン概要        | 野澤 俊介 (KEK)  |

### 2. フェムト秒時間分解、レーザー・電子ビーム相互作用 【15:30-】

- |             |                                |                 |
|-------------|--------------------------------|-----------------|
| 15:30-15:50 | X線回折・散乱を用いたダイナミクス研究            | 一柳 光平 (東大新領域)   |
| 15:50-16:10 | コヒーレントフォノンダイナミクス               | 中村 一隆 (東工大応セラ研) |
| 16:10-16:30 | DXAFSを用いたfsダイナミクス研究            | 阿部 仁 (KEK)      |
| 16:30-16:50 | 強レーザー場中の分子挙動のcERLによる研究         | 足立 純一 (KEK)     |
| 16:50-17:10 | 円偏光レーザーコンプトン散乱ガンマ線による動的スピン磁気計測 | 坂井 信彦 (兵庫県大)    |
| 17:10-17:30 | EEHGIによるアト秒パルス放射光              | 大見 和史 (KEK)     |
| 17:30-18:00 | cERL見学 ERL開発棟                  |                 |

懇親会(小林ホール ラウンジ)【18:00-20:00】

13

## プログラム(2)

7月31日(火)

### 3. THz光【09:00-11:15】

- |             |                          |             |
|-------------|--------------------------|-------------|
| 09:00-09:20 | THz光を用いた分光研究とcERLへの期待    | 木村 真一 (分子研) |
| 09:20-09:45 | 高強度テラヘルツパルスで誘起する非線形光学現象  | 廣理 英基 (京大)  |
| 09:45-10:05 | 大強度THz光源の現状と応用展開         | 谷 正彦 (福井大)  |
| 10:05-10:25 | 超伝導テラヘルツ波検出器の開発と応用       | 大谷 知行 (理研)  |
| 10:25-10:45 | 理科大FELの利用実験と大強度THz光源への期待 | 築山 光一 (東理大) |
| 10:45-11:00 | 赤外領域における近接場分光実験          | 岡村 英一 (神戸大) |
| 11:00-11:15 | THz光によるprotein folding研究 | 木原 裕 (立命館大) |

### 4. X線イメージング【11:35-14:15】

- |             |                                  |              |
|-------------|----------------------------------|--------------|
| 11:35-11:45 | cERLでのX線イメージングについて               | 兵藤 一行 (KEK)  |
| 11:45-12:05 | SOI Pixel検出器によるX線イメージング          | 新井 康夫 (KEK)  |
| 12:05-12:30 | 射光の臨床応用の可能性について                  | 鶴崎 英夫 (筑波大学) |
| 12:30-13:30 | 昼食                               |              |
| 13:30-13:50 | レーザーコンプトンX線へのタルボ干渉計の応用           | 百生 敦 (東北大学)  |
| 13:50-14:15 | 次世代光源を用いた糖尿病性微小循環障害の低侵襲・早期診断法の開発 | 盛 英三 (東海大学)  |

### 5. まとめ【14:15-14:35】

14:15-14:35まとめ・今後に向けて

河田洋 (KEK)

14

## まとめ

- cERLは加速器の実証器と言う位置付けだけではなく、テラヘルツ領域(meV)からX線領域(keV)に至る幅広いエネルギー領域に跨る新しい量子ビーム科学のプラットフォーム
- レーザー逆コンプトン散乱X線、コヒーレントテラヘルツ光、フェムト秒短パルスX線としての光源特性を、単一の加速器を用いて実現
- X線相イメージング、医療用X線イメージング、テラヘルツ分光、テラヘルツイメージング、フェムト秒X線超高速ダイナミクス研究などを複合的に組み合わせた、新しい学術研究

ぜひ、活発な議論をお願いします。

15

## cERL の進捗状況

中村 典雄

高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設

### Present status of the cERL

Norio Nakamura

Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

The compact ERL (cERL) is under construction at KEK in order to demonstrate generation and recirculation of low-emittance and high-current beams toward the future ERL light source. R&D on key components such as high-current superconducting (SC) cavities and high-brightness electron gun is in progress. The cERL will initially comprise a 5-MeV injector with a photocathode DC gun and three 2-cell SC cavities, a main linac with two 9-cell SC cavities and a single return loop with two arc sections. The first target of the cERL is the normalized emittance of 1 mm·mrad for the beam current of 10 mA at the beam energy of 35 MeV. The commissioning is scheduled to start in 2013. This presentation will describe the present status of the cERL.

コンパクト ERL (cERL)は、将来の ERL 放射光源に向けて高輝度放射光発生に必要な低エミッタンスで大電流ビームの生成と周回を実証するために、現在、KEK において建設中である。cERL は、主に光陰極電子銃と 3 台の 2 セル超伝導空洞から成る 5MeV の入射器、2 台の 9 セル超伝導空洞から成る主ライナック、2 つのアーク部を持つ周回部から構成される。当面の目標は、電子エネルギー 35MeV で規格化エミッタンス 1mm·mrad を電流 10mA で実現することであり、2013 年春にビーム試験を入射器から開始する予定である。cERL の建設場所は、ERL 開発棟 (旧東カウンターホール) で、cERL 設置のために改造が行われた。図 1 に、cERL を含む ERL 開発棟の配置予定図を示す。既に超伝導空洞に必要な冷凍機システムや高周波電源が設置され、コンクリート製ブロックによる放射線シールドの建設もかなり進んでいる。また、入射器用超伝導空洞のクライオモジュールが完成して、入射ビームラインに据え付けられた。図 2 に、それらの写真を示す。この他、主ライナックの超伝導空洞と光陰極電子銃もビーム試験に向けた準備を進めていて、今秋には設置する予定である。周回部については、2013 年の夏に設置を開始することになる。発表では、cERL の現状について述べる予定である。



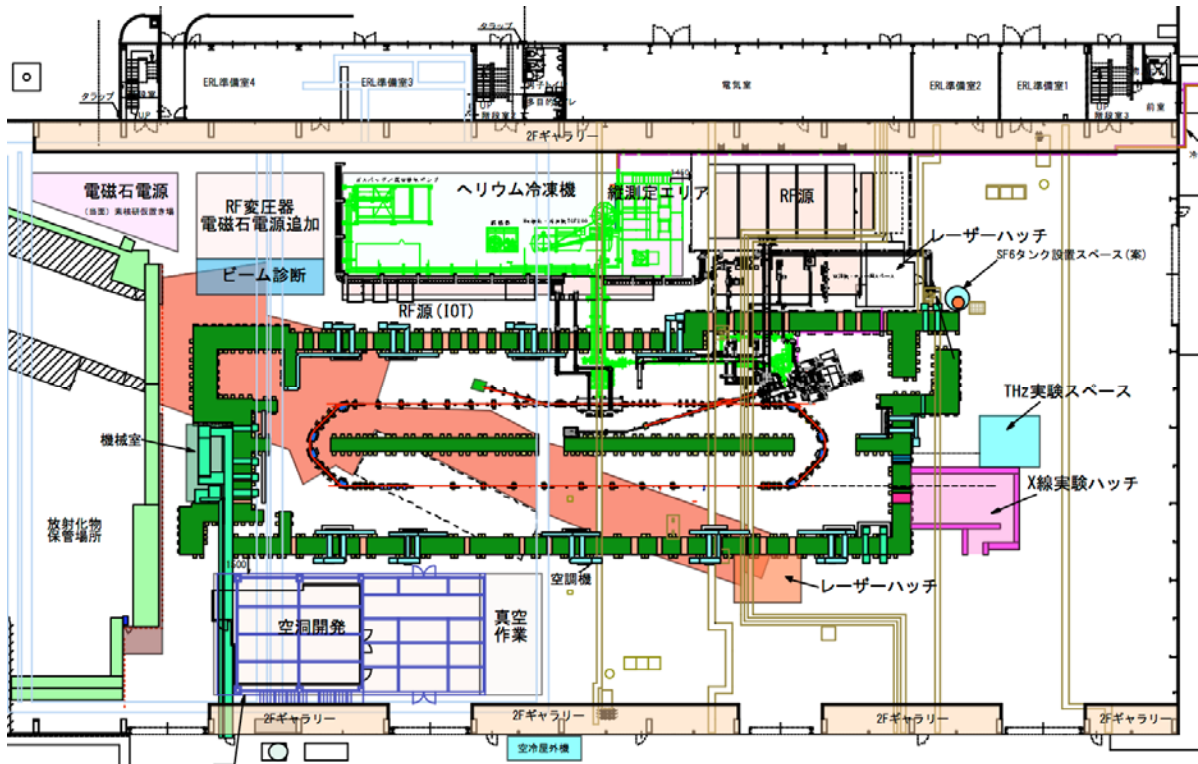


図1：ERL 開発棟の配置予定図



図2：ERL 開発棟内で建設が進むコンクリート製の cERL 用放射線シールド（左の写真）とシールド内の入射器ビームラインに設置された入射器用超伝導空洞モジュール及び 2K 液体ヘリウムタンク（右の写真）。

# cERLの進捗状況

高エネルギー加速器研究機構(KEK)  
加速器研究施設  
中村 典雄

中村 典雄, 第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ, 2012年7月30日

1

# ERL共同開発チーム

- High Energy Accelerator Research Organization (KEK)**  
S. Adachi, M. Akemoto, T. Aoto, D. Arakawa, S. Asaoka, K. Endo, A. Enomoto, S. Fukuda, K. Furukawa, T. Furuya, K. Haga, K. Hara, K. Harada, T. Honda, Y. Honda, H. Honma, T. Honma, K. Hosoyama, M. Isawa, E. Kako, Y. Kamiya, H. Katagiri, H. Kawata, Y. Kobayashi, Y. Kojima, T. Kume, T. Matsumoto, H. Matsumura, S. Michizono, T. Mitsuhashi, T. Miura, T. Miyajima, H. Miyauchi, N. Nakamura, S. Nagahashi, H. Nakai, H. Nakajima, E. Nakamura, K. Nakanishi, K. Nakao, T. Nogami, S. Noguchi, S. Nozawa, T. Obina, S. Ohsawa, T. Ozaki, H. Sageshima, H. Sakai, S. Sakanaka, H. Sasaki, S. Sasaki, Y. Sato, K. Satoh, M. Satoh, T. Shidara, K. Shinoe, M. Shimada, T. Shioya, T. Shishido, T. Takahashi, R. Takai, T. Takenaka, Y. Tamimoto, M. Tobiyama, K. Tsuchiya, T. Uchiyama, A. Ueda, K. Umemori, K. Watanabe, M. Yamamoto, Y. Yamamoto, S. Yamamoto, Y. Yano, M. Yoshida
- Japan Atomic Energy Agency (JAEA)**  
R. Hajima, R. Nagai, N. Nishimori, M. Sawamura, T. Shizuma, S. Matsuba
- Institute for Solid State Physics (ISSP), University of Tokyo**  
I. Ito, H. Kudo, T. Shibuya, H. Takaki
- UVSOR, Institute for Molecular Science**  
M. Katoh, M. Adachi
- Hiroshima University**  
M. Kuriki, H. Iijima
- Nagoya University**  
Y. Takeda, Xiuguang Jin, T. Nakanishi, M. Kuwahara, T. Ujihara, M. Okumi
- National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)**  
D. Yoshitomi, K. Torizuka
- JASRI/Spring-8**  
H. Hanaki
- Yamaguchi University**  
H. Kurisu

中村 典雄, 第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ, 2012年7月30日

2

# cERLについて

## cERLの目的

- ERL光源実機に向けて、高輝度光発生に必要な低エミッタンスかつ大電流の電子ビームの生成、加速、周回の実証
- ERLコンポーネント(電子銃, 超伝導空洞, ...)の安定な運転の実現
- 第1目標: 規格化エミッタンス1 mm-mrad @7.7pC/bunch (10mA), 35 MeV

### cERLパラメータ

パラメータ	値
ビームエネルギー	35 MeV 125 MeV (空洞増強) 245 MeV (2ループ)
入射エネルギー	5 MeV (10 MeV)
平均電流	10 mA (100 mA)
規格化エミッタンス (パンチ電荷)	0.3 mm-mrad (7.7 pC) 1 mm-mrad (77 pC)
パンチ長(ms)	1-3 ps
加速勾配(主空洞)	15 MV/m
RF周波数	1.3 GHz



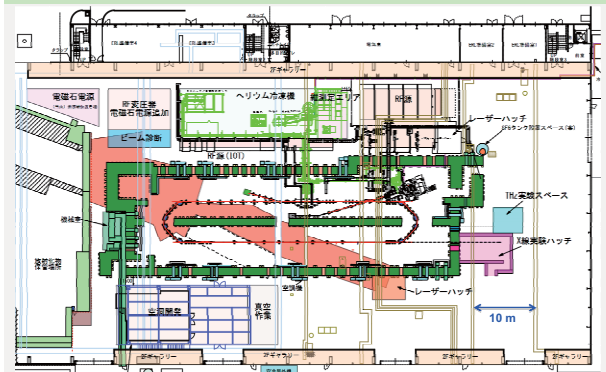
cERL建設場所@KEK

2013年春からコミッショニング開始予定。

中村 典雄, 第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ, 2012年7月30日

3

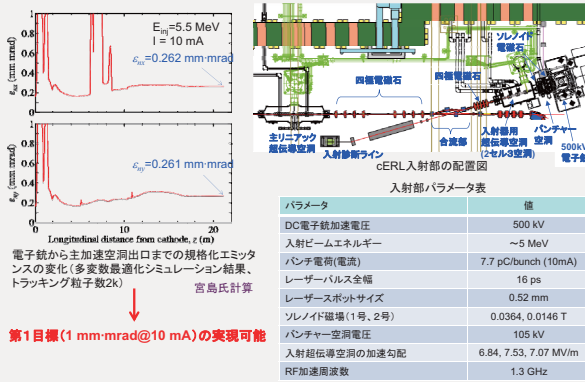
# ERL開発棟配置図



中村 典雄, 第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ, 2012年7月30日

4

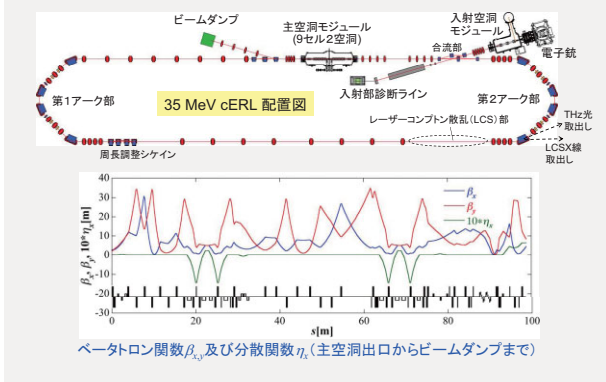
# 入射部の設計



中村 典雄, 第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ, 2012年7月30日

5

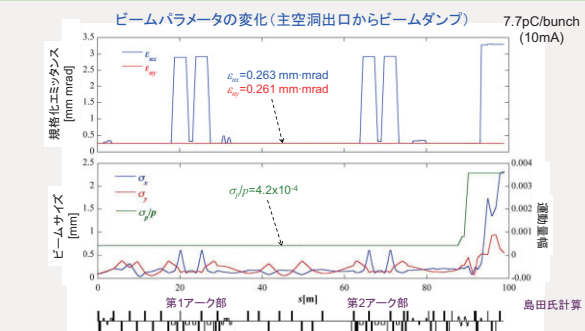
# 周回部の設計(1)



中村 典雄, 第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ, 2012年7月30日

6

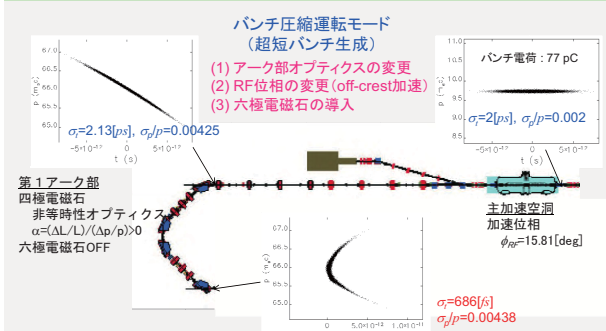
# 周回部の設計(2)



中村 典雄, 第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ, 2012年7月30日

7

# 周回部の設計(3)

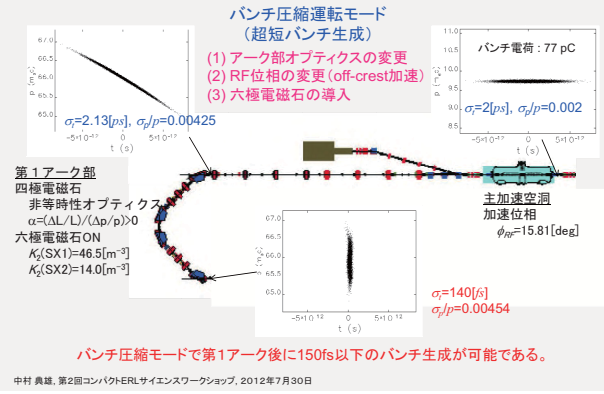


中村 典雄, 第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ, 2012年7月30日

8

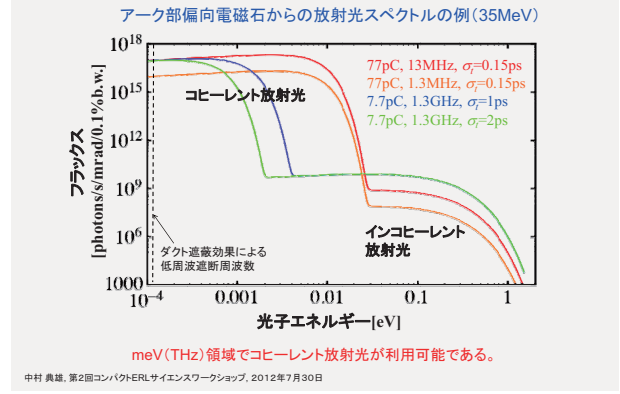


### 周回部の設計(3)



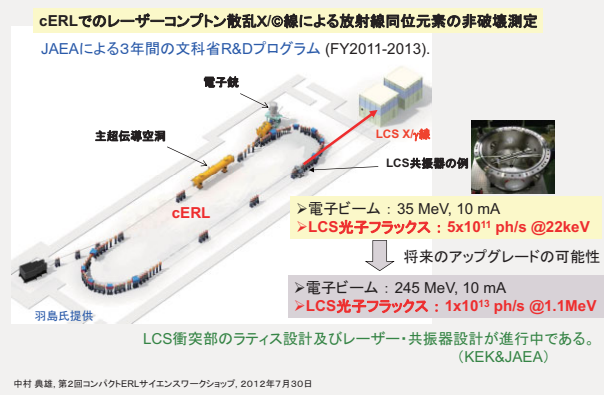
9

### コヒーレント放射光 (THz領域)



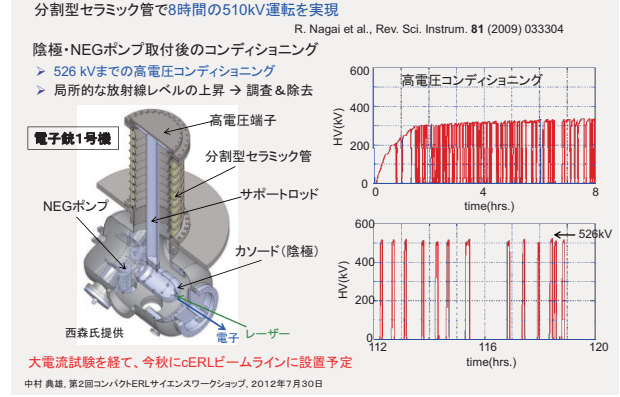
10

### レーザーコンプトン散乱 (LCS) X線実験



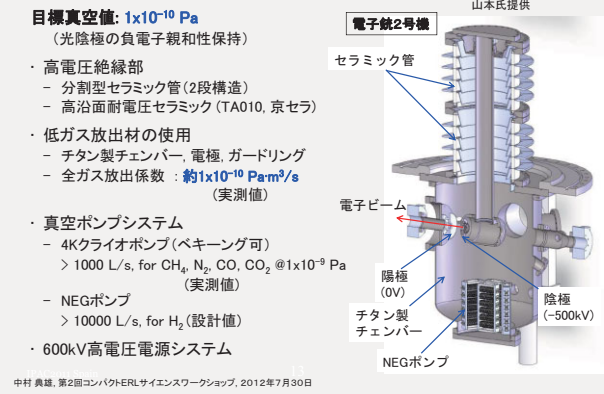
11

### 電子銃1号機の開発 (@JAEA)



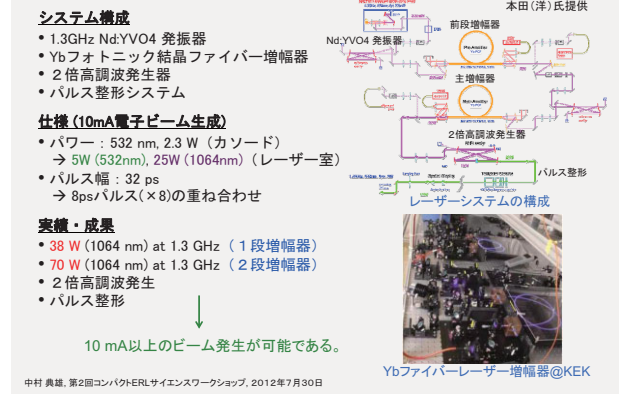
12

### 電子銃2号機の開発 (@KEK)



13

### 電子銃励起用レーザーシステムの開発



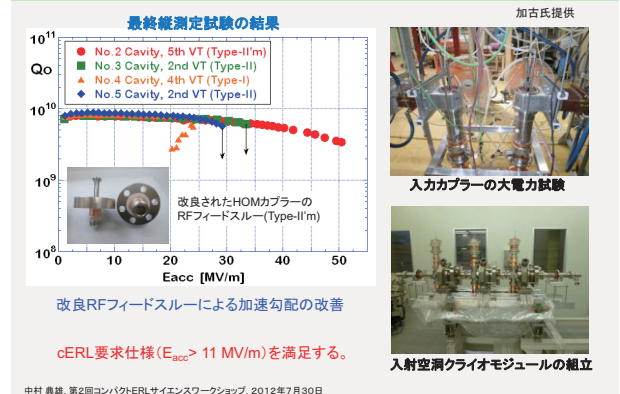
14

### 入射器用超伝導加速空洞の開発 (1)



15

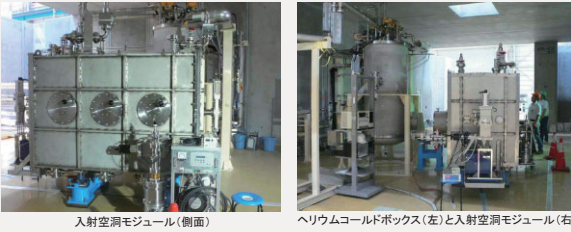
### 入射器用超伝導加速空洞の開発 (2)



16

## 入射器用超伝導加速空洞の設置

cERL入射部ビームライン上に入射空洞(モジュール)が設置された。



入射空洞モジュール(側面)      ヘリウムコールドボックス(左)と入射空洞モジュール(右)

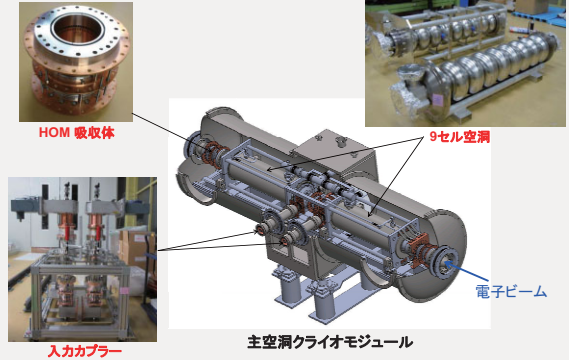
8月の完成検査を経て、9月から各種試験・調整を行う予定である。

中村 典雄, 第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ, 2012年7月30日

17

## 主リニアック用超伝導加速空洞の開発(1)

梅森氏提供



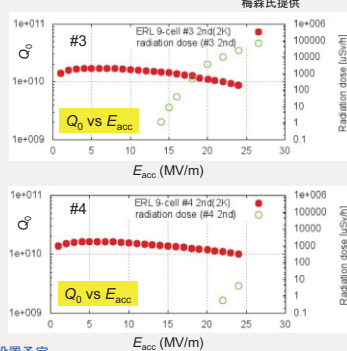
中村 典雄, 第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ, 2012年7月30日

18

## 主リニアック用超伝導加速空洞の開発(2)

### 最終測定試験の結果

- 加速勾配  $E_{acc} > 25$  MV/m を達成
- cERL要求仕様を満足する。  
( $Q_0 > 10^{10}$  @ 15 MV/m)
- 空洞放射線の立ち上がり  
14 MV/m (#3), 22 MV/m (#4)



梅森氏提供



ヘリウムジャケット付き主空洞

クライオモジュール組立を経て、今秋に設置予定

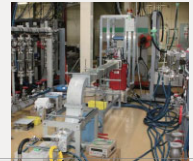
中村 典雄, 第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ, 2012年7月30日

19

## 加速空洞用RF電源



入射空洞用300kWクライストロン



入射空洞用30kWクライストロン



主空洞用30kW IOT

ERL開発棟に設置完了

三浦氏提供



バンチャー空洞用20kW IOT

中村 典雄, 第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ, 2012年7月30日

20

## 液体ヘリウム冷凍機システム



ERL開発棟に設置完了

仲井氏提供

冷凍能力: 600 W @ 4K, 250 L/h



3000L 液化ヘリウム貯槽



2Kコールドボックスとエンドボックス



TCF200 ヘリウム液化冷凍機

中村 典雄, 第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ, 2012年7月30日

21

## 電磁石システム

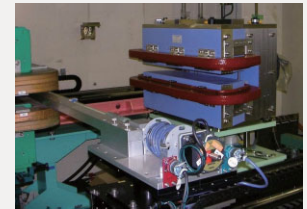
原田氏提供



四極電磁石(20cm)



四極電磁石(10cm)



磁場測定中のアーク部偏向電磁石

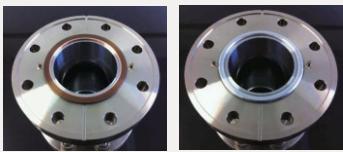
電磁石システムの現状

- アーク部偏向電磁石8台製作完了
- 四極電磁石(20cm)44台製作完了
- 四極電磁石(10cm)12台製作完了、残り今年度製作予定
- バンパー電磁石(入射、取出し、周長補正)は今年度製作予定
- 四極電磁石架台は来年度製作予定
- 偏向/四極電磁石(20cm, 10cm)各1台の磁場測定試験

中村 典雄, 第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ, 2012年7月30日

22

## 真空システム



“ゼロギャップ”フランジの開発  
- 銅ガスケットタイプ(左)  
- U-light sealタイプ(右)  
真空試験結果  
- リークなし  
- ベーキング後TMPのみで  
 $2 \times 10^{-8}$  [Pa]を達成



谷本, 本田(融)氏提供



主な真空ダクトは今年度末までに製作予定

中村 典雄, 第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ, 2012年7月30日

23

## ビームモニタ



ストリップライン型ビーム位置モニタ



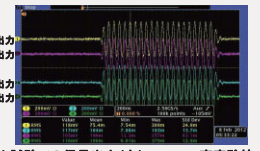
スクリーンモニタ



エミッション測定用スリット



入射部用ビーム位置モニタ(左)と実ビーム試験での信号出力(右)@PF-AR南実験棟

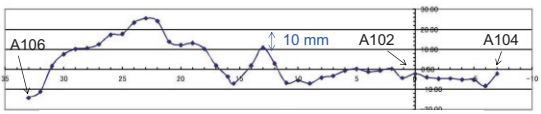
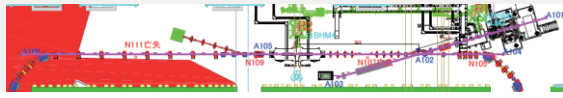


高井, 帯名, 本田(洋)氏提供

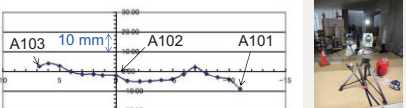
中村 典雄, 第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ, 2012年7月30日

24

## 測量作業



周囲部ヶガキ線上床面高さ[mm]-交差点(A102)を位置原点として示す、横軸は[m]



入射部ヶガキ線上床面高さ[mm]-交差点(A102)を位置原点として示す、横軸は[m]

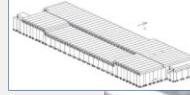
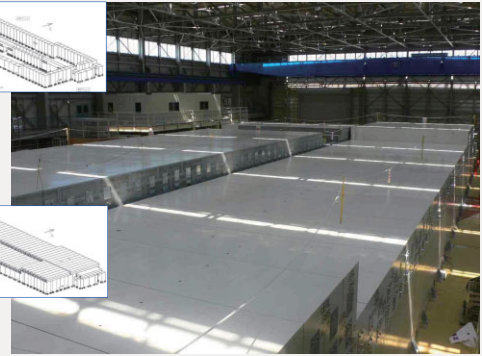


久米氏提供

中村 典雄, 第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ, 2012年7月30日

25

## 放射線シールド



芳賀氏提供

放射線シールドの建設が出入口等の一部を除いて終了。

中村 典雄, 第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ, 2012年7月30日

26

## スケジュール

年度	2012年度												2013年度											
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
電子銃	電子銃調整・試験						搬入・設置・調整						ビーム調整・運転											
入射部	入射部製作・設置												ビーム調整・運転						ビーム調整・運転					
入射空洞	製作			設置			完成検査			各種試験・調整						ビーム調整・運転								
主空洞	製作												設置・完成検査・各種試験・調整						ビーム調整・運転					
周囲部	設計・製作・試験												設置						ビーム調整・運転					
施設	放射線シールド建設												空調・電気・排水工事						施設検査 放射線申請手続き					

注) 現状でのおよその予定。今後変更の可能性あり。

中村 典雄, 第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ, 2012年7月30日

27

## まとめ

- 高輝度光発生に必要な低エミッタンス・大電流電子ビームの生成・加速・周回を実証するためにcERLを建設している。
- 入射部及び周囲部の設計及び最適化が行われ、レーザーコンプトン散乱X線やコヒーレントTHz放射光の利用も検討されている。
- 電子銃や超伝導空洞などのcERLコンポーネントの開発が進められていて、要求仕様を満足しつつある。
- cERL棟(ERL開発棟)にRF電源とヘリウム冷凍機システムが設置され、放射線シールドの建設が進行している。また、入射空洞が他のコンポーネントに先駆けてビームライン上に設置された。
- 2013年春からコミッションングを開始する予定である。

中村 典雄, 第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ, 2012年7月30日

28



# レーザー・コンプトン散乱

羽島 良一

日本原子力研究開発機構

## Laser Compton Scattered Photon Sources

Ryoichi Hajima

Japan Atomic Energy Agency

### <Synopsis>

Generation of high-energy photons via laser Compton scattering (LCS) is becoming a practical radiation source due to the recent progress of advanced laser and accelerator technologies. The spectral brightness of LCS photons is a function of emittance and beam current similar to undulator radiation. The electron beam of small emittance and high-average current available in the Compact ERL, therefore, can provide high-brightness LCS photons. Ultrafast photon pulses in femtosecond duration are also available in a LCS photon source. We overview the characteristics of LCS photon sources at the Compact ERL.

レーザー・コンプトン散乱 (LCS) は、高エネルギー電子とレーザーの衝突散乱により高エネルギーの光子ビーム (X 線、ガンマ線) を発生するものである。近年の加速器とレーザーの技術の高度化に従って、LCS 光源も発展しつつある。LCS 光源の輝度は、アンジュレータ放射と同様、電子ビームのエミッタンス、電流の関数である。したがって、低エミッタンスかつ大電流の電子ビームが得られるコンパクト ERL は、優れた LCS 光源となりうる。LCS 光源は、また、フェムト秒の超短パルスが発生も可能である。本講演では、コンパクト ERL における LCS 光源の特長と性能を述べる。

## レーザー・コンプトン散乱

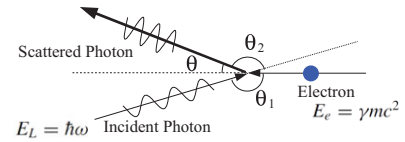
Laser Compton Scattered X-ray and  $\gamma$ -ray

羽島 良一  
日本原子力研究開発機構

2012年7月30日  
第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ

1

## レーザー・コンプトン散乱による高エネルギー光子ビームの発生



$$E_X \approx \frac{4\gamma^2 E_L}{1 + (\gamma\theta)^2}$$

正面衝突の場合の近似式

- 単色 (狭帯域)
- エネルギー可変
- ビーム状
- 短パルス
- 偏光 (偏極)

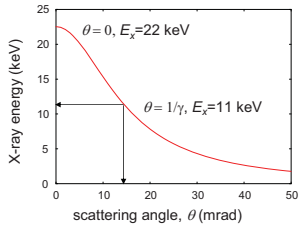
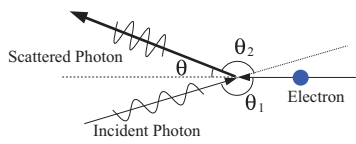
cERL (運転開始時) のパラメータでは、  
レーザー波長 = 1  $\mu$ m  
電子エネルギー = 35 MeV

散乱光子の最大エネルギー  
= 22.5 keV @ 正面衝突  
= 11.3 keV @ 90度衝突

2

## レーザー・コンプトンX線の単色化

$$E_X \approx \frac{4\gamma^2 E_L}{1 + (\gamma\theta)^2}$$



光子の散乱角度とエネルギーに相関

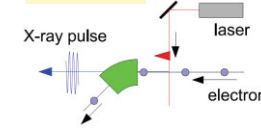
↓  
コリメータで軸上の光子を切り出せば  
狭帯域 (単色) のX線が得られる

3

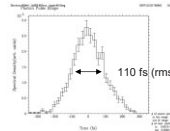
## cERLにおけるレーザー・コンプトン散乱

コンパクトERLの設計研究(2008)

ultrafast mode

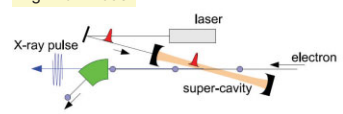


laser = 50 fs (rms), electron = 1 ps  
collision spot  $\sigma = 20 \mu$ m  
X-ray = 110 fs (rms)



laser = 100 mJ x 1 kHz  
electron = 100 pC x 130 MHz  
X-ray =  $3.5 \times 10^6$  phs/3%BW

high-flux mode



レーザー光子の一部のみが散乱

レーザーを繰り返し再利用=レーザー蓄積装置

レーザー光	電子ビーム
波長: $\lambda = 1064$ nm	エネルギー: $E = 60$ MeV
パルス幅: $E_p = 1.8$ $\mu$ J/pulse	電流: $i = 61.1$ $\mu$ C
繰り返し: $f = 120$ MHz	繰り返し: $f = 130$ MHz
パルス長 (RMS): $\sigma_L = 300$ $\mu$ m (1 ps)	パンチ長 (RMS): $\sigma_e = 900$ $\mu$ m (3 ps)
サイズ (RMS): $\sigma_x = 30$ $\mu$ m	サイズ (RMS): $\sigma_y = 30$ $\mu$ m
光蓄積効率: 3000	エミッタンス: $\epsilon_n = 1$ mm-mrad

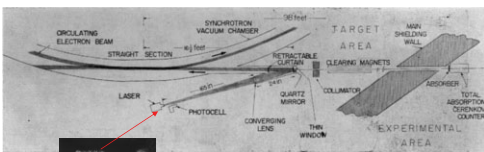
(レーザー蓄積パワー = 700 kW)

X-ray: flux =  $1.2 \times 10^{12}$  phs/3%BW  
 $B \sim 5 \times 10^{14}$  (c.u.)

4

## レーザー・コンプトン散乱光源の歴史

PHYSICAL REVIEW VOLUME 134, NUMBER 6B 21 JUNE 1965  
High-Energy Photons from Compton Scattering of Light on 6.0-GeV Electrons\*  
CAROL BOESSEL, RICHARD H. MILLER, AND SHUNICHI TAKEDA  
Department of Physics, Tufts University, Medford, Massachusetts  
AND  
MASA FUKUDA  
Cambridge Electron Accelerator, Harvard University, Cambridge, Massachusetts  
(Received 28 January 1965; revised manuscript received 14 March 1965)



T.H. Maiman によるルビレーザーの発明(1960)  
から5年後にレーザー・コンプトン散乱の実験

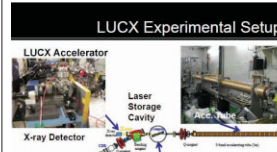
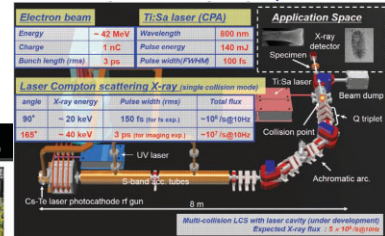
5

## 代表的なレーザー・コンプトン光源

X線領域 ( $E < 100$  keV)

競争する光源との差別化  
→ 点光源=位相コントラスト  
→ フェムト秒光源=高速現象

産総研 LCS-X 光源45 MeV リニアック  
 $E_x = 20-40$  keV Courtesy of R. Kuroda



KEK LUCX 30-40 MeV リニアック  
 $E_x = 15-28$  keV  
Courtesy of K. Sakaue

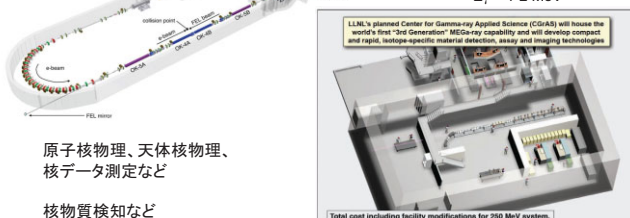
6

## 代表的なレーザー・コンプトン光源

$\gamma$ 線領域 ( $E > 1$  MeV) エネルギー可変、単色光源として唯一の実用光源

H<sub>ν</sub>S @ Duke Univ.  
核物理実験用施設  
1.2 GeV 蓄積リング、FEL  
 $E_\gamma = 1-158$  MeV

MEGa-ray @ Lawrence Livermore  
核セキュリティ用試験機  
250 MeV リニアック  
 $E_\gamma = 1-2$  MeV



原子核物理、天体核物理、  
核データ測定など

核物質検知など

7

## レーザー・コンプトン光源の高輝度化

フラックス

$$F_{total} = \frac{16}{3} N_e N_L f \frac{r_0^2}{w_0^2}$$

電子数  $N_e$ , レーザ光子数  $N_L$ , 衝突周波数  $f$ , 電子古典半径  $r_0$ , 衝突スポットサイズ  $w_0$

輝度

$$B \approx F_{total} \frac{\gamma^2}{\epsilon_n^2} \times 0.1\%$$

高輝度化

衝突密度を高くする  
衝突繰り返しを増やす  
エミッタンスを小さくする

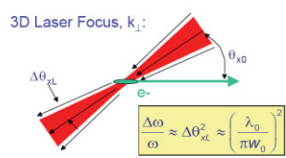
8

### レーザー・コンプトン光源の単色度を決める要因

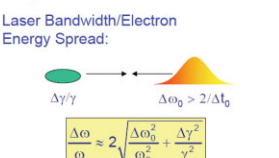
D. Moncton, FLS-2006 WS. MIT Center for Accelerator Science and Technology

#### Bandwidth and Divergence Effects

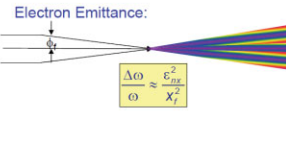
3D Laser Focus,  $k_L$ :



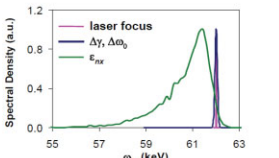
Laser Bandwidth/Electron Energy Spread:



Electron Emittance:



Spectral Density (a.u.)



MIT Massachusetts Institute of Technology 15 May 2006 22 9

### 蓄積リングを用いたレーザー・コンプトン光源

シンクロトン放射、アンジュレータ放射と同様に「放射減衰」と「量子励起」の平衡状態で運転。(光子放出は直線部で起こるので、周回軌道の設計によらない。)

Z. Huang and R. Ruth, PRL 80, 976 (1998)

平衡エミッタンス  $(\epsilon_{x,y}^n)_{\min} = \frac{3}{10} \frac{\lambda_c}{\lambda_L} \beta_{x,y}^*$

平衡エネルギー広がり  $(\sigma_E)_{\min} \equiv \left(\frac{\sigma_E}{E}\right)_{\min} = \sqrt{\frac{7}{5} \frac{\lambda_c}{\lambda_L} \gamma}$

$\lambda_L = 1\mu\text{m}, \beta_{x,y}^* = 1\text{cm}, \gamma = 200$

$\epsilon_{x,y}^n = 7 \times 10^{-9}\text{m}$

$\frac{\sigma_E}{E} = 2.6\%$

蓄積リング=フラックスを大きくできるが、単色性に限界 (特に、高エネルギーほど)

10

### エミッタンスを小さくする → レーザー・コンプトン光源の単色性向上

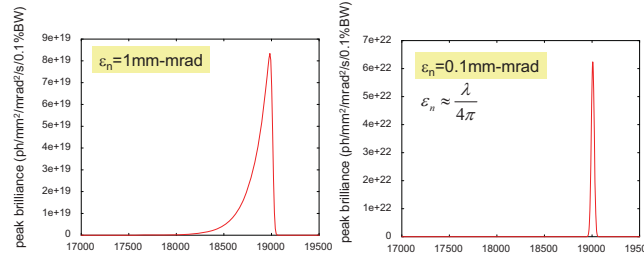
#### 1-GeV ERLの軸上ガンマ線輝度の計算値(解析式)

$\epsilon_n = 1\text{mm-mrad}$

$\epsilon_n = 0.1\text{mm-mrad}$

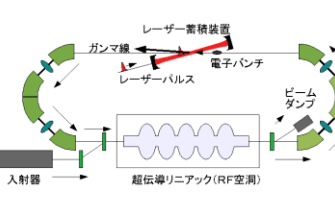
$\epsilon_n \approx \frac{\lambda}{4\pi}$

peak brilliance (ph/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/s/0.1%BV)

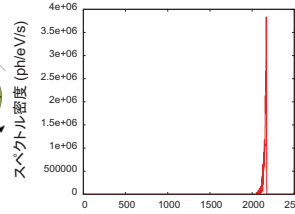


calculation by using a formula in [1].  
[1] F.V. Hartemann et al. Phys. Rev. ST AB 8, 100702 (2005). 11

### ERLを用いたレーザー・コンプトン光源



スペクトル輝度 (ph/eV/s)



- ✓ LCS発生に利用した電子は、減速して捨てる
- ✓ 新しい電子が常に加速するので、電子の品質劣化がない
- ✓ エネルギー回収により、大電流電子ビームが連続的に加速可能に

優れた単色性と高い輝度を併せ持つ光源

R. Hajima et al., NIMA608 (2009). 12

### コンパクトERLにおけるレーザー・コンプトン光源の実証

核セキュリティ強化等推進事業費 (文科省補助金、H23~H25)

LCS散乱実験設備(H25)

電子銃、入射器

超伝導加速器

LCS散乱部設備(H25)

周回軌道(H23, H24)

ERL開発棟 (KEKつくば)

Illustration by Rey Hori

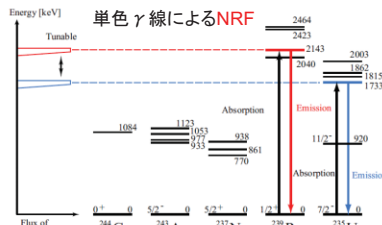
13

### ガンマ線の利用:ガンマ線は原子核と相互作用する

#### 同位体に固有の原子核共鳴蛍光散乱(Nuclear Resonance Fluorescence)

入射ガンマ線 2143 keV Pu-239

単色γ線によるNRF



fingerpint

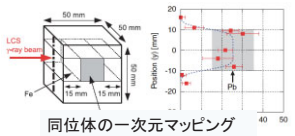
WANTED

エネルギー可変、単色ガンマ線ビーム → 原子核反応を選択的に実行

R. Hajima, T. Hayakawa, N. Kikuzawa, E. Minehara, J. Nucl. Sci. Tech. 45, 441 (2008). 14

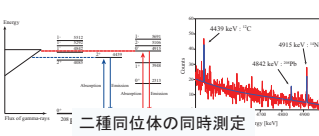
### NRF実験-産総研TERAS

同位体の一次元マッピング



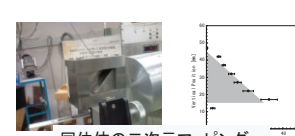
N. Kikuzawa et al., APEX 2, 036502 (2009).

二種同位体の同時測定



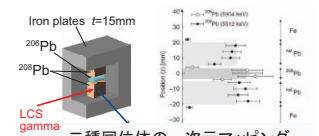
T. Hayakawa et al., RST 80, 045110 (2009).

同位体の二次元マッピング



H. Toyokawa et al., JJAP 50, 100209 (2011).

二種同位体の一次元マッピング



T. Shizuma et al., RSI 83, 015103 (2011).

15

### 散乱法による核物質の非破壊測定

測定試料

スキャン

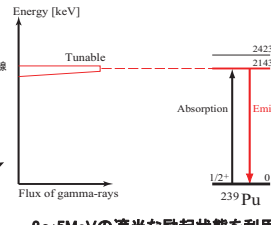
LCSガンマ線 直径2mm~2cm

Pu-239の散乱ガンマ線

検出器1, 検出器2, 検出器3, 検出器4

深さ方向の測定

Energy [keV]



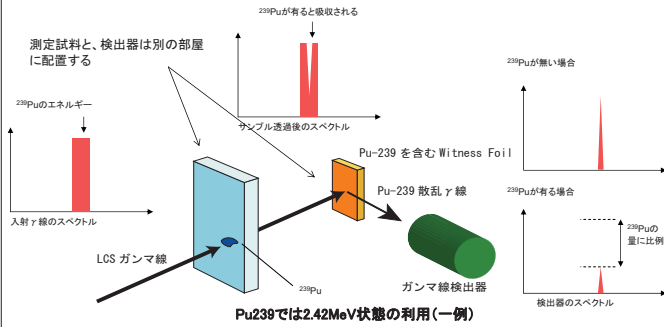
Flux of gamma-rays

2~5MeVの適当な励起状態を利用

・試料からのバックグラウンドは鉛(アプゾーバ)で減衰させる

T. Hayakawa et al. Nucl. Instr. Meth. A 621, 695 (2010). 16

## 吸収法による核物質の非破壊測定



- ・同位体濃度が正確にわかっている標準試料を witness foil として用いる
- ・測定試料からのバックグラウンドに影響されにくい

17

## まとめ

- ・ **レーザー・コンプトン光源(LCS)**:  
レーザー、加速器の技術進展 → 実用化へ
- ・ **X線領域**: 微小光源、短パルス性を生かして、他の光源との差別化
- ・ **γ線領域**: 波長可変かつ単色性をもつ唯一の光源
- ・ **ERL**: 低エミッタンス大電流ビームはLCSにも有利
- ・ **cERL**: LCS光源の実証実験、文科省補助金にて実施中(H23~H25)

18



# THz-ICS による軟 X 線発生

島田 美帆

高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設

## Generation of soft X-ray by the technique of THz-ICS

Miho Shimada

Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

One of the features of ERL is the short electron bunch operation with a high repetition rate. If the bunch length is much shorter than the cutoff wavelength, the intense Coherent Synchrotron Radiation (CSR) is emitted at the bending magnet. From this point of view, we proposed the Inverse Compton Scattering (ICS) using CSR in THz region to produce a short pulse soft X-ray at the MeV class ERL. In the proposal, THz-CSR collected by the magic mirror or the optical cavity is focused on the following electron bunch for ICS. The expected pulse duration of the soft X-ray is almost the same with the bunch length; 100 fs - 1 ps. At a 60 – 200 MeV ERL,  $10^{4-5}$  phs./pulse can be expected with the energy range of 0.04 – 4 keV.

ERL のひとつの大きな特徴は短バンチ運転を高い繰り返しで可能なことであり、通常の運転で数 ps である。バンチ圧縮時では 100fs 程度のバンチ長を想定しており、将来計画の 3 GeV ERL では 100fs 程度の短パルス X 線光源としての検討が進んでいる。これらのバンチ長は真空チャンバーのカットオフ周波数に相当する波長より十分短いため、テラヘルツ領域で大きな強度のコヒーレント放射光(CSR)が得られることも期待されている。そこで、この THz-CSR を逆コンプトン散乱に用いた短パルス光源を提案した[1]。エネルギーが 60-200 MeV のコンパクト ERL では軟 X 線領域の生成が可能である。

CSR は偏向電磁石で前方に放射されるため、放出した電子自身に衝突させることは困難である。そこで、ミラーを用いて後続の電子バンチに衝突させる。本発表では、マジックミラーを用いて広い範囲の CSR を取り込む方法と、光学結晶の高反射率ミラーを用いた Optical Cavity (光共振器) に溜めて衝突させる方法について紹介する (図 1)。マジックミラーを用いた方法は ICS で生成された光子はほぼ白色光であり、図 2 に放射光(CSR を含む)および ICS で生成した光子スペクトルを示す。Optical Cavity で期待される軟 X 線は表 1 にまとめた。X 線のエネルギーはおおよそ 0.04 – 4 keV、パルス当たりの光子数は  $10^{4-5}$  phs./pulse である。

[1] M.Shimada and R. Hajima, Phys. Rev. STAB, **13**, 100701 (2010)

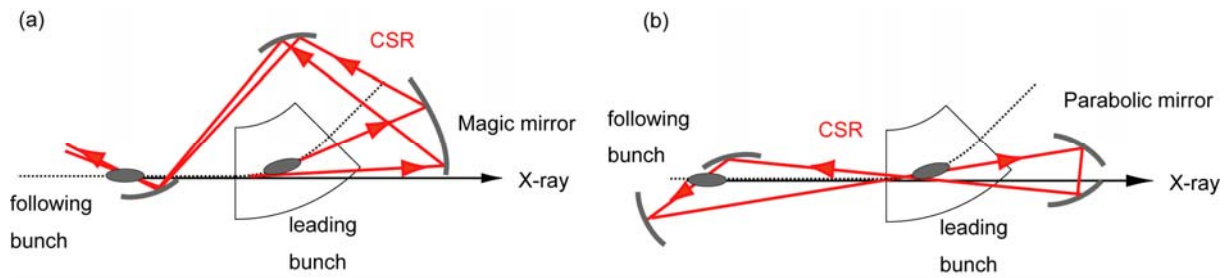


図 1: CSR による逆コンプトン散乱の模式図; (a) マジックミラー、(b) Optical Cavity

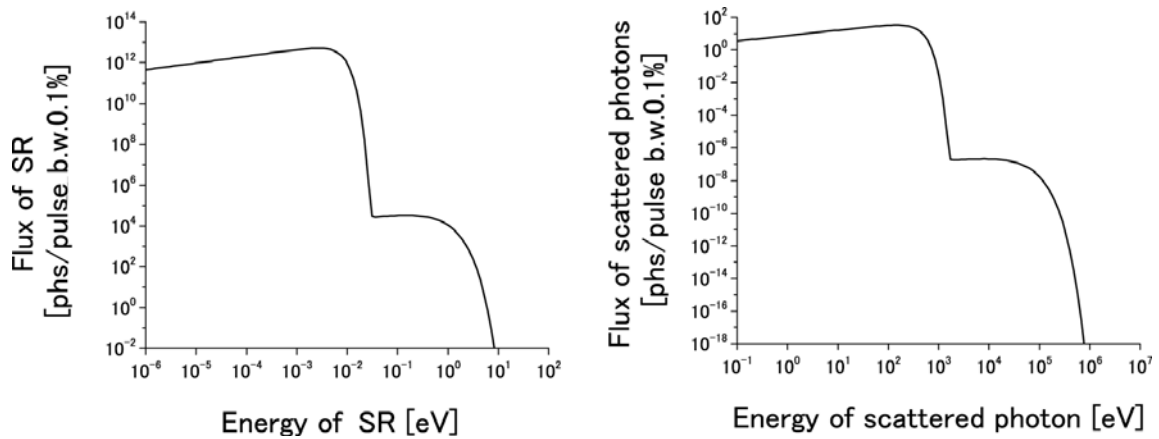


図 2: (左) 偏向電磁石からの放射光スペクトル、(右) マジックミラーによる逆コンプトン散乱で期待される光子のスペクトル。ここで真空チャンバーによる遮蔽効果は考慮していない。

Electron energy [MeV]	Charge [nC]	$\sigma_z/c$ [ps]	Spot size [mm $\times$ mm]	CSR energy [mJ]	$K$	X ray energy [keV]	$N_X$ [phs/pulse]
60	0.077	0.1	0.3 $\times$ 0.3	0.14	0.013	0.4	1 $\times$ 10 <sup>4</sup>
60	0.5	1	3 $\times$ 3	0.6	0.009	0.04	4 $\times$ 10 <sup>4</sup>
200	0.2	0.1	0.3 $\times$ 0.3	1.0	0.034	4	2 $\times$ 10 <sup>5</sup>
200	1	1	3 $\times$ 3	2.5	0.017	0.4	3 $\times$ 10 <sup>5</sup>

表 1: バンチ圧縮可能なパラメータおよび Optical Cavity の ICS で期待される軟 X 線パルス

# THz-ICSによる軟X線発生

第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ  
2012年7月30日(月)  
小林ホール

高エネルギー加速器研究機構  
島田 美帆

# Outline

1. THzのCSRを用いた逆コンプトン散乱とは
  - コヒーレント放射光(CSR)、逆コンプトン散乱(ICS)とは
  - CSRなどを用いたICSの実証例
2. Magic mirrorを用いた短パルス白色光(長波長~軟X線)の生成
  - Magic mirrorとは
  - Compact ERLで期待されるスペック
3. Optical cavityを用いた準単色・短パルス軟X線の生成
  - レーザーコンプトン散乱との違い
  - Compact ERLで期待されるスペック
4. まとめ

# Coherent Synchrotron Radiation (CSR)とは

Total radiation power :  $P(k)$

$$P(k) = Np(k) + F(k)N(N-1)p(k)$$

$$F(k) = \left| \int \rho(z) e^{ikz} dz \right|^2$$

$P(k)$  : Total radiation power  
 $N$  : Number of electron  
 $p(k)$  : Radiation power per an electron  
 $\rho(z)$  : Longitudinal electron density distribution  
 $F(k)$  : Form factor

Gaussian beam with bunch length  $\sigma_z$

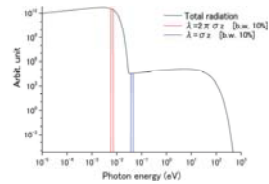
$$\rho(z) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right]$$

$$P(k) \approx \exp\left[-\sigma_z^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2\right]$$



パッチ長よりも長い波長の放射光強度は $N^2$ に比例して大きくなる。

通常の電子バンチには $N \sim 10^9 \sim 10^{11}$ の電子があるので、桁違いの強度に!!

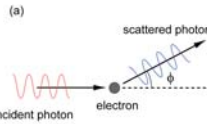


# 逆Compton散乱とは

Compton Scattering

電子と散乱した後、長い波長の光となる。

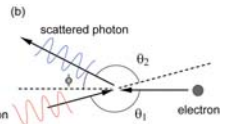
$$E_X = \frac{E_i}{(1 - \cos\phi)(E_i/mc^2) + 1}$$



Inverse Compton Scattering (ICS)

相対論的な運動をする電子と散乱した後、短い波長の光となる。

$$E_X = \frac{4\gamma^4 E_i}{1 + (\gamma\phi)^2 + 4\gamma E_i/mc^2}$$



散乱光の光子数 :  $N_X$

$$N_X = \sigma_T \frac{N_e N_p}{A}$$

入射光の光子数 :  $N_p$   
電子数 :  $N_e$   
散乱断面積 :  $\sigma_T = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{e^2}{mc^2}\right)^2 = \frac{8\pi}{3} r_e^2$   
衝突面積 :  $A$

# CSRによる逆コンプトン散乱(ICS)

Compact ERLでは、レーザー逆コンプトン散乱による硬X線やγ線の利用が検討されている。

Photon energy due to inverse Compton scattering

$$E_X = 4\gamma^2 E_L$$

$E_X$  : Energy of scattered photon  $E_L$  : Energy of laser  $\gamma$  : Lorentz factor

波長の長いテラヘルツ領域のCSRを当てれば、軟X線ができるのでは？

laser- ICS



CSR - ICS

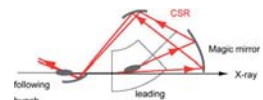
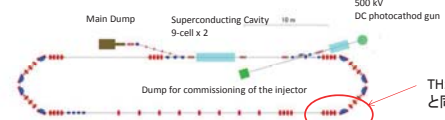


ミラーを用いて、後続の電子バンチに当てる。

M. Shimada and R. Hajima, PRSTAB 13, 100701, (2010)

# cERLのどこでやるのか？

Compact ERL

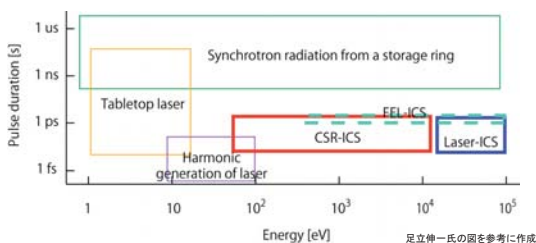


1. CSRを取り出すために、偏向電磁石にミラーを設置。
2. 逆コンプトン散乱は直線部で。

Optical cavityを使った別の光学系も基本的と同じ

# Compact ERLのCSR-ICS

X-ray expected by the inverse Compton scattering of cERL



cERLでは、ピコ秒~サブピコ秒のパルス長の軟X線が期待

# Comparison CSR-ICS with conventional ICS

	Laser-ICS	FEL-ICS	CSR-ICS
Equipment*	External laser	Undulator	Only mirror
Synchronization	Difficult	Easy	Easy
Spot size of laser (depends on wavelength)	Smaller	Smaller	Larger
Bandwidth	Narrow	Narrow	Relatively narrow ~ white light
Electron energy*	Lower	Lower	Higher
Bunch compression	Difficult	Difficult	Easy
Emitance	Larger	Larger	Smaller

## CSRやCDRを使った逆Compton散乱の実測例

似た手法はすでに提案・実証済みです。

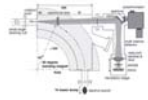
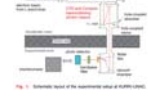


Fig. 1. A schematic view of the electron spectrometer with the central detector of the ICS.

N. Sei et al, APEX 1, 087003,(2008)



N. Sei and T. Takahashi, APEX 3, 052401,(2010)

- 目的はreal timeのTHz Spectroscopy。
- ICSで測定の容易な可視光に変換。
- 光量は非常に小さい。

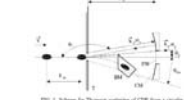
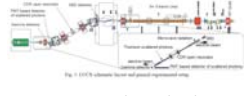


Fig. 1. Schematic for the detection of THz wave in a vacuum chamber of an electron spectrometer.

A. P. Porlyitsyn et al, PRE 60, 2272,(1999)



A. Anyshev et al, IPAC'10, 196,(2010)

- Coherent Diffraction RadiationによるICS
- コンパクトなX線光源として提案。

9/22

9

## Outline

1. THzのCSRを用いた逆コンプトン散乱とは
  - コヒーレント放射光(CSR)、逆コンプトン散乱(ICS)とは
  - CSRなどを用いたICSの実証例
2. Magic mirrorを用いた短パルス白色光(長波長~軟X線)の生成
  - Magic mirrorとは
  - Compact ERLで期待されるスペック
3. Optical cavityを用いた準単色・短パルス軟X線の生成
  - レーザーコンプトン散乱との違い
  - Compact ERLで期待されるスペック
4. まとめ

10/22

10

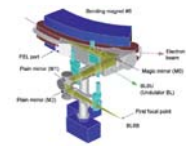
## Magic mirror

軌道に沿った放射光を一点に集める特殊な形状のミラー

R. Lopez-Delgado and H. Szwarc, Opt. Commun., 19, 286,(1976)

国内では、  
Spring-8のBL43B2  
UVSORのBL6B  
に設置

広い取り込み角度で放射光を集めることが可能  
UVSOR, BL6Bのmagic mirrorの  
取り込み角度は215[H] x 80[V] mrad<sup>2</sup>



S. Kimura et al, Infrared Phys. & Tech 49, 147,(2006)

仮定 真空チャンバーによるカットオフの影響を小さくと仮定すると、  
集光サイズは電子バッチのサイズと同じにすることが可能。

取り込み角度はできる限り広いほうがいいのか？

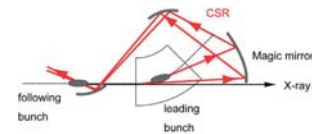
電子バッチの長い飛行距離

- 長い距離に渡って小さく集光することは困難になる。
- ビームサイズがCSRの波長を超えると、CSRの強度が減る。

というジレンマがある。11/22

11

## Magic mirrorを使った逆コンプトン散乱



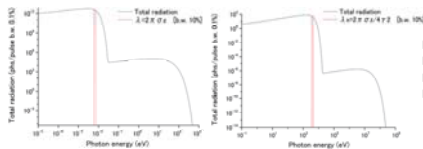
1. 集光サイズはビームサイズを同じとする。
2. ビームサイズは分散関数、電子の飛行距離を考慮に入れて算出。
3. ビームサイズがCSRの波長を超えないことを確認。

Electron Beam 200 MeV, 77 pC  
Acceptance angle of magic mirror  
300 mrad [H] x 20 mrad [V]  
Transverse electron beam size  
70 um [H] x 30 um[V]

12/22

12

## Magic mirror scheme for white light source



Example :  
Electron charge : 77pC/bunch  
Electron energy : 200 MeV,  
Bunch length : 100 fs

CSR (190μm) : 3 x 10<sup>14</sup> phs/pulse 10%BW, 4 x 10<sup>23</sup> phs/s 10%BW (1.3 GHz)  
X-rays (4 keV) : 5 x 10<sup>3</sup> phs/pulse 10%BW, 6 x 10<sup>12</sup> phs/s 10%BW (1.3 GHz)  
散乱光全体 : 4 x 10<sup>5</sup> phs/pulse, 5 x 10<sup>14</sup> phs/s (1.3 GHz)  
Pulse duration : 100 fs

いくつかの問題点

- 白色光を分光すると、パルス長が伸びる。
- 電子のジッターがパルス長以上の場合、衝突のタイミングが合わない。
- カットオフがない、という仮定が妥当性。

13/22

13

## Outline

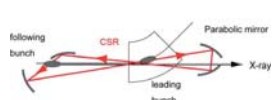
1. THzのCSRを用いた逆コンプトン散乱とは
  - コヒーレント放射光(CSR)、逆コンプトン散乱(ICS)とは
  - CSRなどを用いたICSの実証例
2. Magic mirrorを用いた短パルス白色光(長波長~軟X線)の生成
  - Magic mirrorとは
  - Compact ERLで期待されるスペック
3. Optical cavityを用いた準単色・短パルス軟X線の生成
  - レーザーコンプトン散乱との違い
  - Compact ERLで期待されるスペック
4. まとめ

14/22

14

## Optics 2 : Optical Cavity scheme for narrow bandwidth

CSR - ICS



- Incoherent stacking because the fluctuation of longitudinal position (a few hundreds um) is larger than wavelength of CSR.
- Electron bunch emits CSR inside a cavity.
- Four mirrors is necessary for two focus points. One is for collection of CSR and another is collision point.

$$P_{CAV} = \frac{P_{in}}{1-R^n}$$

P<sub>CAV</sub>: Power in a cavity, P<sub>in</sub>: Input power, R: Reflectance, T: Transmittance, n: Number of mirrors

In both cases, pulse power is stacked by 1000 times with reflectivity of mirrors 99.97% .

15/22

15

ICS by an external laser



- Coherent stacking
- External laser is injected from outside a cavity. It passes through a multilayered mirror with low transmittance.
- Two mirrors are enough for single focus point.

$$P_{CAV} = TF^2 P_{in} / \pi^2$$

E.R.Crosnon et al, Rev. Sci. Instrum. 70, p.4 (1999)

$$Finesse: F = \pi \sqrt{R^n} / (1-R^n)$$

## Wavelength of CSR for pulse stacking in an optical cavity

Total radiation power : P(k)

$$P(k) = \underbrace{Np(k)}_{\text{Incoherent}} + \underbrace{F(k)N(N-1)\rho(k)}_{\text{Coherent}}$$

$$F(k) = \left| \int \rho(z) e^{ikz} dz \right|^2$$

P(k) : Total radiation power

N : Number of electron

p(k) : Radiation power per an electron

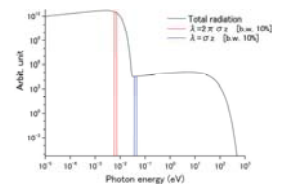
ρ(z) : Longitudinal electron density distribution

F(k) : Form factor

Gaussian beam with bunch length σ<sub>z</sub>

$$\rho(z) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right]$$

$$P(\lambda) \approx \exp\left[-\sigma_z^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2\right]$$



Wavelength of CSR stacked in an optical cavity is chose as follows,

$$\lambda \equiv 2\pi\sigma_z$$

16/22

16

## Mode matching

Acceptance angle is limited for Mode matching

$$\sigma_x^{CSR} \sigma_{x'}^{CSR} \leq \frac{\lambda}{4\pi}$$

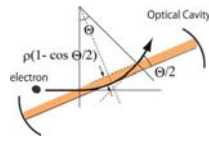
$\lambda$ : wavelength of CSR  
 $\sigma_x^{CSR}$ : Horizontal spread of CSR source  
 $\sigma_{x'}^{CSR}$ : Horizontal divergence of CSR source

$$\Delta\theta_c = \left(\frac{3\lambda}{2\pi\rho}\right)^{1/3} = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{2\lambda}{\lambda_c}\right)^{1/3}$$

$\Delta\theta_c$ : divergence of CSR

$$\sigma_x^{CSR} = \sqrt{\sigma_z^2 + \left[\rho \left(1 - \cos\frac{\Theta}{2}\right)\right]^2}$$

$$\sigma_{x'}^{CSR} = \sqrt{\sigma_z'^2 + \Delta\theta_c^2 + \left(\frac{\Theta}{2}\right)^2}$$



Acceptance angle  $\Theta$  is determined to satisfy the mode matching.

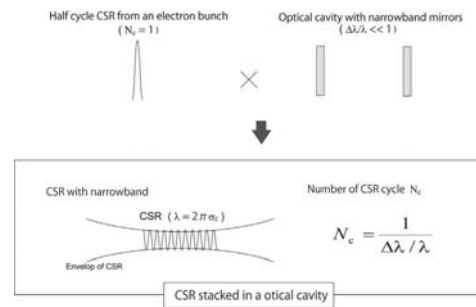
17/22

17

## Optimization of collision area : 1

- Half cycle of CSR is destroyed by a narrow band mirror.

In the case of bandwidth  $\Delta\lambda/\lambda$ , pulse duration of CSR is lengthened by a factor  $1/(\Delta\lambda/\lambda)$ .

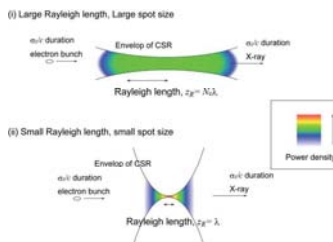


18/22

18

## Optimization of collision area : 2

- CSR in optical cavity is assumed to be Gaussian beam.
- Hour glass effect is considered at the collision.



Beam size  $w(z)$  of Gaussian beam

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2}, \quad \pi w_0^2 = \lambda z_R$$

小さい $z_R$  → 集光サイズが小さい。しかし、すぐに広がる。

$z_R < \lambda N_c$ では、 $N_c$ は $z_R$ に依存しない。

$$N_x = \sigma_x \frac{N_c}{\pi w_0^2} \left(\frac{z_R}{\lambda} \frac{1}{N_c} N_p\right) = \sigma_x \frac{N_c N_p}{N_c \lambda^2}$$

衝突面積が大きく、 $z_R$ が長い方が非線形効果や電子の到着時間の揺らぎの影響が少ないため、(i)を採用。

19/22

19

## High reflectivity mirror

In the wavelength range of a few 10 nm ~ a few 100 nm,

- Reflectivity of metal is lower than 98 %.
- It is difficult to fabricate multilayered mirror with larger than 99% reflectivity by conventional method.

Development of high reflectivity mirror for terahertz region

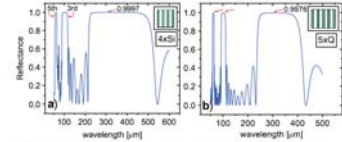


FIG. 2. (Color online) (a) Four layers of 23 nm thick Si, and in (b) four layers of 36 nm thick SiO<sub>2</sub>, each separated by 75 nm vacuum gap, create high reflectivity bands centered at  $\lambda_c \sim 100$ –300 nm. The harmonic band centers are located at  $\sim 100$  and  $\sim 60$  nm, respectively.

M.Tecimer et al, PRSTAB 13, 030703,(2010)

- Stacking up photonic crystal separated by vacuum layer.
- Bandwidth is narrow at the higher order wavelength.
- Wavelength, which depends on thickness of the layers, is controllable without losing the high-reflectivity.

20/22

20

## X-ray at 60-200 MeV ERL

TABLE I: Optical cavity scheme in the Compact ERL. Horizontal acceptance angle are 50 mrad for  $\lambda = 190$  nm and 110 mrad for  $\lambda = 1900$  nm for mode matching. Bandwidth of the on-axis X-ray is considered to be  $\Delta\lambda/\lambda \sim \Delta\lambda/\lambda \sim 0.1$  (10%). Pulse duration of the X-ray is same as  $\sigma_x/c$ .

Electron energy [MeV]	Charge [nC]	$\sigma_x/c$ [ps]	Spot size [mm × mm]	CSR energy [mJ]	K	X-ray energy [keV]	$N_x$ [phs./pulse]	$N_x'$ [phs./s]
60	0.077	0.1	0.3 × 0.3	0.14	0.013	0.4	$1 \times 10^4$	$2 \times 10^{13}$
60	0.5	1	3 × 3	0.6	0.060	0.04	$4 \times 10^5$	$0.7 \times 10^{13}$
200	0.2	0.1	0.3 × 0.3	1.0	0.034	4	$2 \times 10^5$	$1 \times 10^{13}$
200	1	1	3 × 3	2.5	0.017	0.4	$3 \times 10^5$	$3 \times 10^{13}$

- Number of photons of X-ray (b.w.10%)
  - Number of photons per pulse:  $\sim 10^{4-5}$  phs/pulse.
  - Flux:  $\sim 10^{13-14}$  phs/s.
- Energy range of X-ray
  - From 0.04 to 4 keV.
  - 10 keV X-ray is possible at electron energy of 200 MeV and bunch length 50 fs, which is accomplished in tracking simulation.
- Pulse duration of X-ray is 100 fs – 1 ps.
- Electron transverse beam size is much smaller than the focus size of focused CSR.

21/22

21

## Summary

- We proposed the inverse Compton scattering of CSR.
  - ERL is a nice platform for both high-intensity CSR source and inverse Compton scattering.
- Two optical schemes
  - Magic mirror: White light with pulse duration of 100 fs.
  - Optical cavity: Narrow bandwidth. Power amplification by pulse stacking is estimated almost 1000 times.
- Scattered photon expected in ERL (Optical cavity)
  - Generation of soft X-ray with energy range of 0.04-4keV is expected at 200 MeV ERL. Pulse duration is from 100 fs to 1 ps.
  - Number of photon per pulse is  $10^{4-5}$  phs/pulse, Flux  $10^{13-14}$  phs/s.

22/22

22

# 極短周期アンジュレータの ERL への応用

山本 樹

高エネルギー加速器研究機構・放射光研究施設

## Application of very short period undulators to ERLs

Shigeru Yamamoto

Photon Factory, High Energy Accelerator Research Organization, KEK

### <Synopsis>

Very short period undulators are useful, since they are capable of producing higher energy photons in lower energy light source accelerators. Although these undulators operate at intrinsically short gaps between undulator magnets and require very low emittance of an electron beam in the accelerators, ERLs satisfy naturally this condition. Here we describe generation of a very short period undulator field and characterization of the measured undulator field achieved so far. We also report spectral properties of synchrotron radiation when a very short period undulator is installed into a “compact ERL” which is under construction in KEK, and when it is installed into the “3-GeV ERL” which is expected in future.

極短周期アンジュレータは、比較的低エネルギーの光源加速器を用いて比較的高エネルギーの放射光を生成できる点で有用である。このアンジュレータは本質的に狭い磁石間ギャップを必要とするため、これを設置すべき光源加速器には電子ビームの高輝度特性において非常に高い性能が要求されるが、ERLはこの条件を自然に満足させる。ここでは、極短周期アンジュレータ磁気回路の生成法、および現状で実現できた実測磁場の特性評価に就いて述べる。また、極短周期アンジュレータを、建設中の compact ERL および将来の実現が期待される 3-GeV ERL に導入した場合に期待される放射光スペクトルについて報告する。

極短周期アンジュレータのERLへの応用  
Application of very short period undulators to ERLs

1. What is a very short period undulator?
2. Formation of a "very short period" undulator field
3. Field measurement & characterization
4. Application to ERLs
5. Conclusion

Photon Factory, KEK  
Shigeru YAMAMOTO  
山本 樹

1

1. What is a very short period undulator?

Hard x rays by shorter  $\lambda_u$  @ lower energy LS (~3GeV)

We proposed:

In-vac Us ( $\lambda_u=4\text{cm}$ ) @ 6.5PF-AR

In-vac SGUs ( $\lambda_u=1-2\text{cm}$ ) @ 2.5PF

In other institutes:

3G LS (ESRF, APS & SPring-8):

In-vac Us ( $\lambda_u\sim\text{several cm}$ )

Compact 3G LS (SLS, NSLS-II, MAX-IV, etc):

In-vac Us ( $\lambda_u\sim 2\text{cm}$ )

2

1. What is a very short period undulator?

Short Gap Undulators @ PF

Name	Make	$iH_c^*$	$\lambda_u$	N	12-keV photon	$K_{\text{max}}^{**}$
SGU#17	2003	25kOe	16mm	29	5 <sup>th</sup>	1.374
SGU#03	2005	30kOe	18mm	26	5 <sup>th</sup>	1.684
SGU#01	2008	28kOe	12mm	39	3 <sup>rd</sup>	0.781

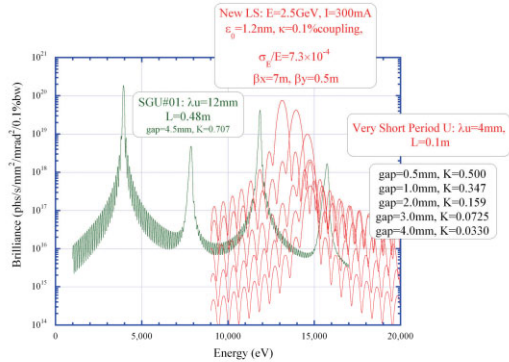
\* Magnet: NEOMAX TiN coated  
\*\* @  $\text{Gap}_{\text{min}}=4.0\text{mm}$

What is the shortest  $\lambda_u$ ?  
What is the shortest undulator length?

3

1. What is a very short period undulator?

Very short period U @ 2.5GeV LS



4

1. What is a very short period undulator?

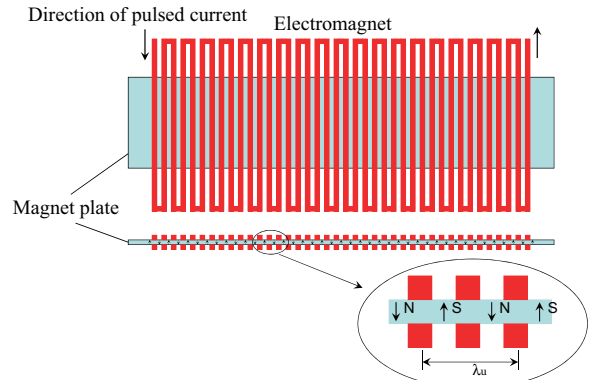
High quality LS accelerator  
low  $\epsilon$ , high  $B$ , sharp  $e^-$ , etc



Very short period undulator  
short  $G$ , short  $L$ , high energy phs, etc

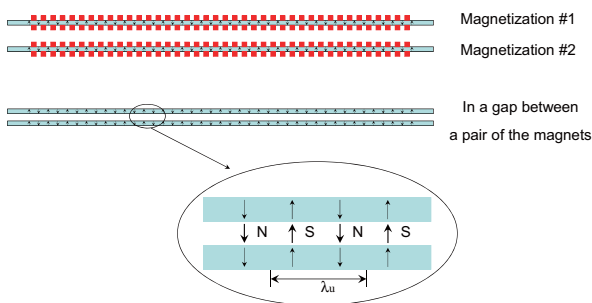
5

2. Formation of a "very short period" undulator field:  
perpendicular geometry



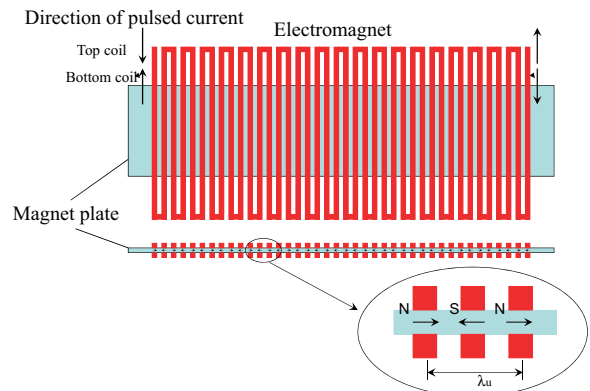
6

2. Formation of a "very short period" undulator field:  
perpendicular geometry



7

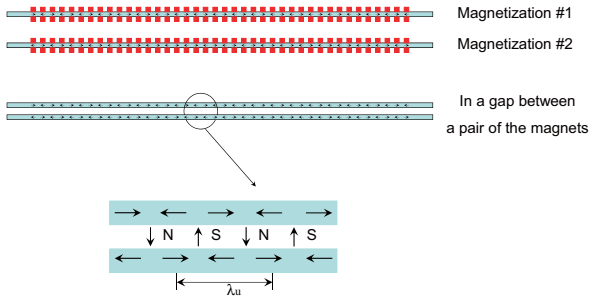
2. Formation of a "very short period" undulator field:  
longitudinal geometry



8

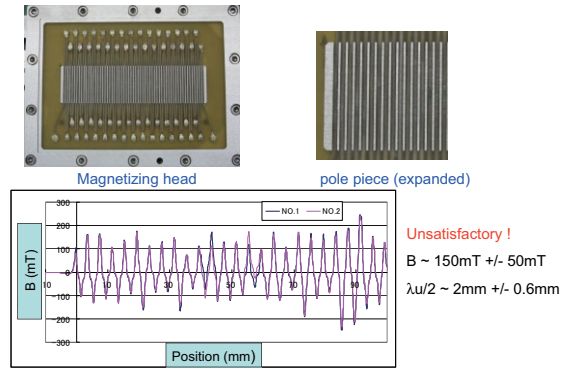


2. Formation of a "very short period" undulator field:  
longitudinal geometry



9

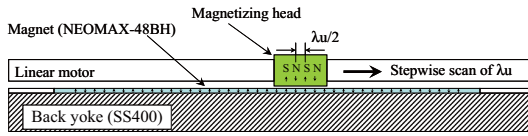
2. Formation of a "very short period" undulator field:  
A result of early stage attempts



10

2. Formation of a "very short period" undulator field:

Stepwise scan of the magnetizing head  
In the perpendicular geometry



Accuracy in  $\lambda_u$ : Wire spacing & step width  
Accuracy in B:  $\lambda_u$  & e<sup>-</sup> charge to the head

The head is cnt'd by a closed loop scheme on the linear motor (+/- 3μm)

11

2. Formation of a "very short period" undulator field:

Nd-Fe-B plate 100mm long, 20mm wide, 2mm thick  
was magnetized



12

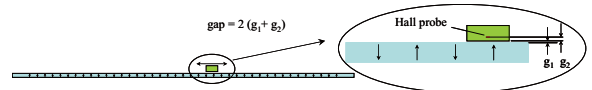
2. Formation of a "very short period" undulator field:

Field pattern can be seen through a magnetic fluid sheet

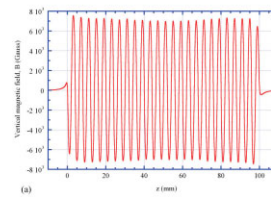


13

3. Field measurement & characterization



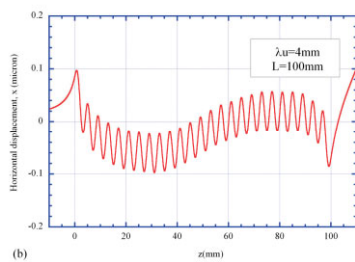
We use  $2 \times B_y$  as a measure of "virtual undulator field"  
 $2 \times B_y$  = superposition of  $B_y$  and its mirror image field  
at a "virtual gap"  $g = 2(g_1 + g_2) = 2 \times 0.6\text{mm}$



"virtual field" = 7000G  
at  
"virtual gap" = 1.2mm

14

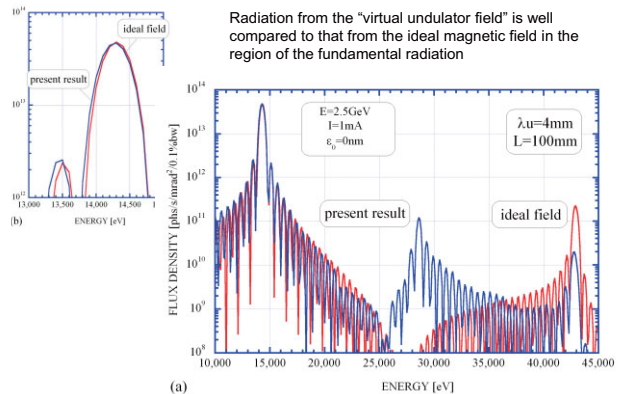
3. Field measurement & characterization



Undulator orbit @ 2.5GeV:  
compensation is not sufficient at both ends  
the orbit in this "virtual undulator" may be satisfactory

15

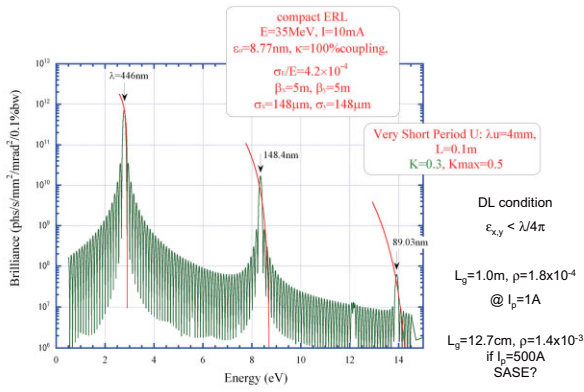
3. Field measurement & characterization



Radiation from the "virtual undulator field" is well compared to that from the ideal magnetic field in the region of the fundamental radiation

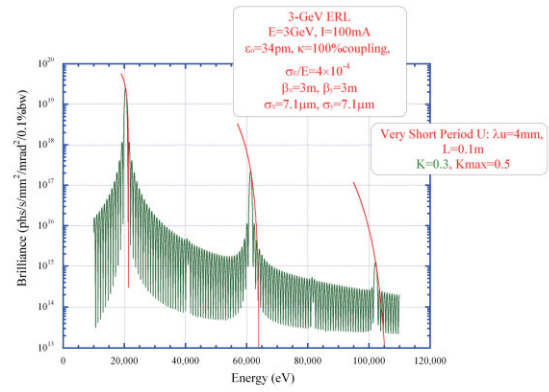
16

#### 4 . Application to ERLs



17

#### 4 . Application to ERLs



18

#### 5 . Conclusion

We are in the right direction for the development of the very short period undulators.

Application to cERL & 3GeV ERL seems promising.

Further we have:

- improvements in the magnetization intensity and accuracy,
- developments of magnetization method at the both ends of undulators,
- and
- developments of precise field measurement methods at a very short gap, etc.

Also we have to investigate light-source accelerators which are able to accept this type of undulators with very short gaps intrinsically.

However, we believe that the very short period undulators give large degrees of freedom to pursue "ultimate" light sources, since the length of these undulators required for the accelerators are very short totally as a matter of course.

19

# 利用研究ビームライン概要

野澤 俊介

高エネルギー加速器研究機構・放射光科学研究施設

## Outline of Beamlines at cERL

Shunsuke Nozawa

Photon Factory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

In order to demonstrate required accelerator technologies in the 3 GeV ERL light source, cERL is starting an operation with 35MeV and 10 mA during 2012. Along with the operation, the quantum beam obtained from cERL is providing to user experiments.

Due to an inverse Compton scattering (ICS) of laser pulses on relativistic electron bunches in a ring of the cERL, ultra-short hard x-ray is produced. The 100 fs hard x-ray beam from cERL is significantly benefit for researches in the field of ultrafast science. On the other hand, high-flux x-ray, which is generated by the ICS using an optical build-up cavity and high-frequency laser pulses, is an ideal light source for an x-ray imaging. Furthermore, the coherent synchrotron radiation (CSR) from electronic bunch in cERL can be used as a novel light source for researches of physical properties, because it has high intensity in a THz region.

現在建設中の cERL では、3GeV ERL 型放射光源で必要な加速器技術の実証を行うため、2012 年度中に 35MeV, 10mA の電子ビーム運転開始が予定されている。このビーム運転に伴い cERL から得られる光をユーザー利用実験用の提供することも検討されており、2013 年度にはまず先だつて硬 X 線とテラヘルツ光の先端的な利用研究を想定して各々のビームライン建設が開始される予定である。

cERL のリング内において超短パルスレーザーと、電子バンチを衝突させると、レーザーコンプトン散乱により 10-50keV の硬 X 線が発生する[1]。従来の放射光 X 線のパルス幅は 100 ピコ秒程度だが、フェムト秒レーザーを用いたコンプトン散乱では X 線のパルス長を 100 フェムト秒程度にすることが可能となる。この超短パルス X 線光源は超高速現象の実時間観測実験において極めて有用である。一方、光蓄積共振器により光子密度電子を 2-3 桁増幅させたレーザーを、高繰り返しで電子と衝突させることにより、高フラックスの X 線発生が可能となり、この光源を用いた X 線イメージングも検討されている。現在、これら cERL か

ら発生する硬 X 線を用いた X 線利用実験を想定し、レーザーコンプトン励起用レーザー、X 線集光ミラー、X 線シャッター、および X 線実験ハッチを備えた、ビームラインの設計を行っている。さらに、cERL の軌道を周回する電子バンチから発生する位相が揃ったコヒーレントシンクロトロン放射光は、テラヘルツ領域に大きな強度を持つため、物性研究を始めとした利用実験における有用な光源として利用できる。したがって cERL では先述の硬 X 線のビームラインに加えて、マジックミラーにより大きな取り込み角で CSR 放射光を集光し、ビームダクトと光輸送系で構成されたテラヘルツ光ビームラインの設計も現在行われている。

[1] コンパクト ERL の設計研究, 編集 羽島良一, 中村典雄, 坂中章悟, 小林幸則, KEK Report 2007-7

# 利用研究ビームライン概要

高エネルギー加速器研究機構

野澤俊介

1

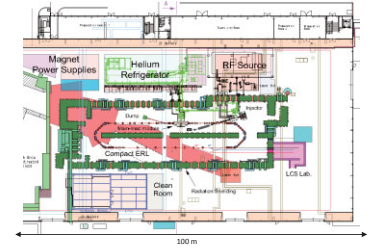
# Compact ERL A test facility of 3GeV ERL

■ 本機3GeVERL型放射光源において必要な加速技術の実証を行う



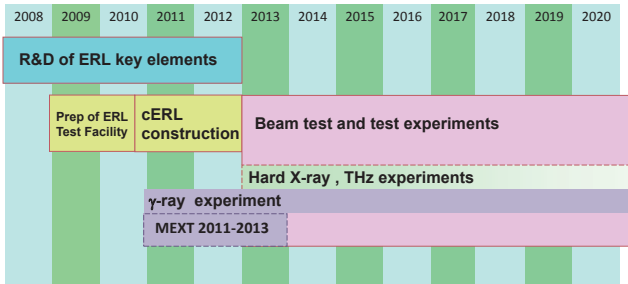
Parameters of the Compact ERL	
Parameters	
Beam energy (upgradability)	35 MeV 125 MeV (single loop) 245 MeV (double loops)
Injection energy	5 MeV
Average current (main linac)	10 mA (100 mA in future)
Acc. gradient (main linac)	15 MV/m
Normalized emittance	0.1 mm-mrad (7.7 pC) 1 mm-mrad (77 pC)
Bunch length (rms)	1 - 3 ps (usual) ~ 100 fs (with B.C.)
RF frequency	1.3 GHz

(2013年3月の試運転における目標値)



2

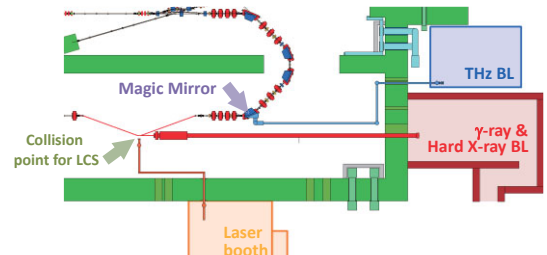
## cERLにおけるスケジュール



- ビーム運転に伴いcERLから得られる光をユーザー利用実験用の提供
- 2013年度より硬X線とテラヘルツ光の先端的な利用研究を想定して各々のビームライン建設が開始される予定
- 2011-2013年レーザーコンプトンγ線を用いた核共鳴蛍光散乱実験(JAEA)

3

## 2つのビームラインにおける利用研究



### レーザーコンプトンX線ビームライン

- 共振器によるLCSを用いた高flux光源
- 広視野と共振器による高fluxイメージング
- 90度衝突LCS散乱を利用したフェムト秒光源
- 100fs準単色光を用いた時間分解X線実験

### テラヘルツ光ビームライン

- CSRを用いた高強度コヒーレントTHz光源
- meV領域における電子状態変化の観測
- コヒーレント性を利用したイメージング
- フォノン励起用フェムト秒光源

4

# テラヘルツ光ビームライン

- CSRを用いた高強度コヒーレントTHz光源

5

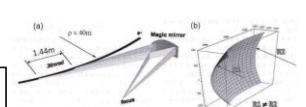
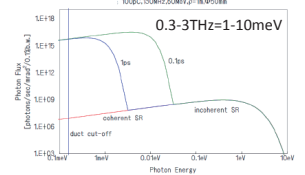
## THz beamline

バンチ圧縮による100フェムト秒電子バンチからのCSRを利用し、テラヘルツ領域の光を取り出す



Bending Magnetにおける大きな発散角でのテラヘルツ光の取り込み

軌道面内・軌道面垂直方向の集光を考慮した非球面・非対称のMagicMirrorによる集光

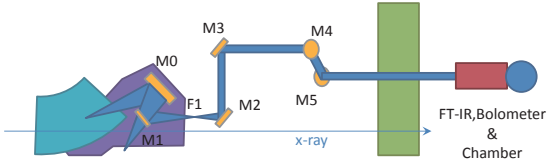


S. Kimura, J. Vac. Soc. Jpn., 53 (2010) 399-405

Light source	Band width	Pulse width	Frequency	Averaged power	Pulse energy	Electric field at peak
Table-top lasers	5 THz	100 fs	1 kHz	nW to uW	nJ to uJ	10 kV/cm
cERL(13mA)	5 THz	100 fs	260 MHz	1 kW	10 uJ	1 MV/cm

6

## THzビームライン概要



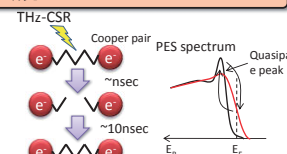
カテゴリ	品目
M0	マジックミラー
M1,M3,M4,M5	平面鏡一式
M2	放物面鏡
M0,M1調整機構	真空ステージ
M0,M1,偏向電磁石用チャンバー	真空チャンバー
F1より下流	光学系調整,真空箱,ポンプ,真空ゲージ,バルブ等
FT-IR, Bolometer(Si, MCT)	Bruker VERTEX70V, 30-15000cm <sup>-1</sup> , dE=0.16cm <sup>-1</sup>
試料槽	クライオスタット・真空ポンプ・真空ゲージ

7

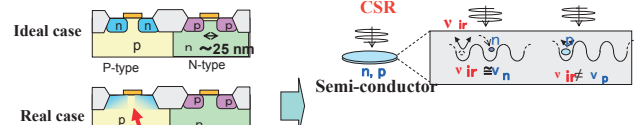
## Science cases (THz)

### 物性研究

- meV領域の分光研究
- THz励起光源 (クーバー対の解離、局在フォノンモード)
- コヒーレントTHzイメージング



### 半導体デバイスプロセス技術への応用



High temperature process makes a damage  
Schematic view of intersection of CMOS

局在フォノンモードのTHz励起  
選択性を持った不純物拡散  
→高集積化

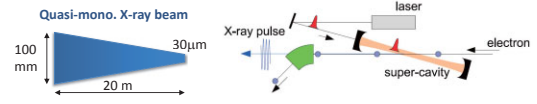
8

## レーザーコンプトン散乱(LCS) X線ビームライン

- High-flux mode  
共振器によるLCSを用いた高flux光源
- Ultrafast mode  
90度衝突LCS散乱を利用したフェムト秒光源

9

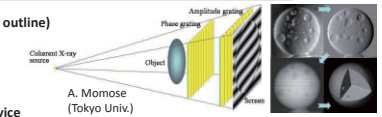
## X-ray beamline – High-flux mode



Laser		Electron beam	
Wavelength	1064 nm	Energy	60 MeV
Pulse energy	1.8 μJ	Charge	0.1 nC
Frequency	130 MHz	Frequency	130 MHz
Pulse width	1 ps	Bunch width	3 ps
Beam size	30 μm	Bunch size	30 μm
Multi. Factor : Q	3000	Emittance	1 mm-mrad

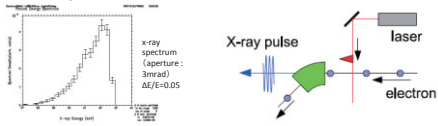
Laser-Compton X-ray	
Averaged X-ray flux	$2.7 \times 10^{13}$ phs/s · 100% bw
X-ray pulse width	3 ps

- Micro-focus imaging (high space resolution, highlight of outline)
- X-ray Phase imaging by Talbot Interferometry
- Large irradiation area, Variable energy
- R&D for Downsizing of imaging device



10

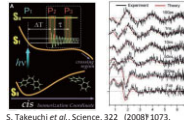
## X-ray beamline – Ultrafast mode



Laser		Electron bunch	
Wavelength	800 nm	Energy	60 MeV
Pulse energy	10 mJ	Charge	0.1 nC
Frequency	1 kHz	Bunch width	1 ps
Pulse width	50 fs	Bunch size	20 μm
Beam size	20 μm	Emittance	1 mm-mrad

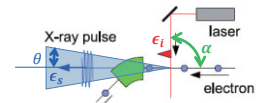
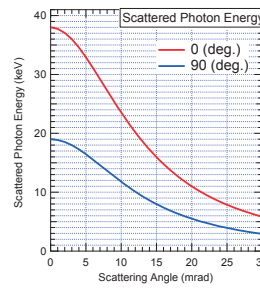
Laser-Compton X-ray	
Averaged X-ray Flux	$3.9 \times 10^7$ phs/s · 100% bw
X-Ray pulse width	110 fs

- Laser pump - X-ray probe fs time resolved X-ray measurement  
Direct structural visualization of photoreaction intermediate by WAXS with 100 fs quasi-monochromatic X-Ray  
Photoisomerization reaction in stilbene (cis → trans < 1ps)  
Observation of the structural change as fs molecular movie



11

## レーザーコンプトンX線のエネルギー



$$\epsilon_s = \frac{2\gamma^2 \epsilon_l (1 + \cos \alpha)}{1 + (\gamma\theta)^2 + 2\gamma\epsilon_l / mc^2}$$

試運転時(2013/3~)のパラメーター

- 電子ビーム  
エネルギー: 35 MeV (γ=68.5)
- レーザー  
波長: 800 nm

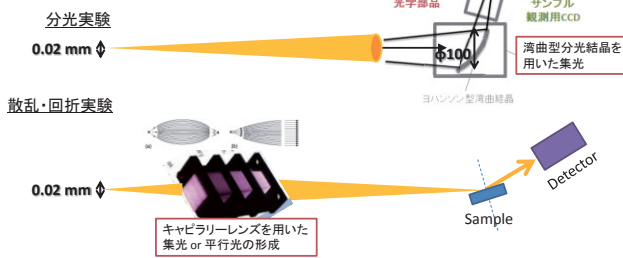
0 deg.: ~ High Flux mode  
90 deg.: Ultrafast mode

12

## 準単色コーンビームの集光方法

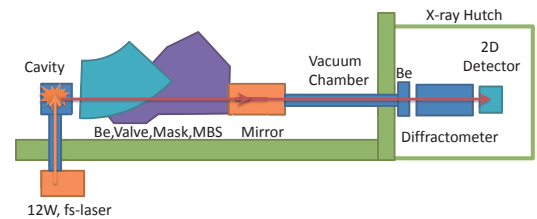
衝突点とサンプルの間(20m)に  
5mradのコリメーターを設置

- 発光点の大きさ: 0.02 mm
- 準単色化 (ΔE/E ~ 0.1)
- Φ100のビームサイズ
- 光子密度: ~  $5 \times 10^6$  photons/sec



13

## X線ビームライン(High flux-, Ultrafast-mode)概要



カテゴリ	品名
レーザー	助起用レーザー1式
共振器	共振器 130MHz
フロントエンド	バルブ、マスク、MBS、Be
ミラー	集光ミラー調整機構
	集光ミラー
真空槽	ポンプ、ゲージ、バルブ、真空槽、Be
インターロック	インターロックシステム一式
ユーティリティ	電気、冷却水、圧空一式
実験装置	2次元検出器
	回折計

14

## まとめ

- cERLにおける利用研究を目指し、CSRによるTHz光ビームライン、LCSによるX線ビームラインを建設する
- CSRによって発生する大強度THz光により、分光学的手法、THzコヒーレントイメージングを使った分光学的物性研究や、プロセス技術への応用研究、等が期待される。
- 光共振器を用いたLCSによって発生するX線は、微小光源、高Flux、広視野という特徴を持ちX線イメージング等への利用が期待される
- 90度衝突LCSによって発生する超短パルスX線は、パルス幅100fs、ジッターフリーという特徴を持ち、超高速ダイナミクス研究への利用が期待される。

15

# X線回折・散乱を用いたダイナミクス研究

一柳光平

東京大学大学院新領域創成科学研究科

## Study of structural dynamics using time-resolved X-ray diffraction and scattering

Kouhei Ichiyanagi

Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

### <Synopsis>

Single-shot time-resolved X-ray diffraction and scattering measurements capabilities for observing the shock wave induced structural changes has been developed using multilayer X-ray optics. Using the middle bandwidth ( $\Delta E/E=1-5\%$ ) of X-ray source, shock-wave induced structural change of amorphous and polycrystalline materials can be obtained under laser-induced shock wave loading. In this talk, we will present our recent studies and expected application using cERL.

動的高圧下における構造ダイナミクスや衝撃波による破壊現象など極限短時間現象の X 線を用いた実時間観測は、高圧科学や材料力学の分野において重要な測定技術である。これまで我々は、衝撃圧縮下における構造状態を PF-AR のビームライン NW14A のエネルギーバンド幅  $\Delta E/E=15\%$  の白色 X 線パルスを用いて CdS 単結晶の一軸変形を観測してきた[1]。しかしながら白色 X 線パルスはエネルギーバンド幅が広くスペクトルが非対称であるため詳細な衝撃圧縮下の構造変化を議論する場合や、アモルファス材料や多結晶体の衝撃圧縮状態を測定するのは困難であった。そこで実験条件に合わせた多層膜光学系を用い  $\Delta E/E=1-5\%$  の対称的なエネルギースペクトルに制御した準単色の 100 ps の X 線パルスをプローブ光源とし、[2]。1 J/pulse、パルス幅 8 ns の Nd:YAG レーザーパルスにより誘起された数万気圧の衝撃波進展による圧縮・膨張過程を観測するシングルショット時間分解 X 線回折・散乱法を確立した。上記の観測方法によりシリカガラスのアモルファス構造や準安定構造を持つ 3% イットリアドープしたジルコニアセラミックスの衝撃圧縮状態における構造変形と相転移の直接観測の結果を報告する[3]。

本講演では、シングルショット時間分解 X 線回折・散乱を用いた衝撃圧縮の実験例を紹介



するとともに、ERL などフェムト秒 X 線パルスを用いた動的圧縮下における研究への応用について述べる。

[1] K. Ichiyangi, S. Adachi, S. Nozawa, Y. Hironaka, K.G. Nakamura, T. Sato, A. Tomita, S. Koshihara, and S. Adachi, *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 231918, (2007).

[2] K. Ichiyangi, T. Sato, S. Nozawa, K.H. Kim, J.H. Lee, J. Choi, A. Tomita, H. Ichikawa, S. Adachi, and S. Koshihara, *J. Synchrotron. Rad.*, **16**, 391, (2009).

[3] J. Hu, K. Ichiyangi, H. Takahashi, H. Koguchi, T. Akasaka, N. Kawai, S. Nozawa, T. Sato, Y.C. Sasaki, S. Adachi, and K.G. Nakamura, *J. Appl. Phys.*, **111**, 053526 (2012).

## X線回折・散乱を用いたダイナミクスの研究

シングルショット時間分解X線回折・散乱測定  
を使ったレーザー衝撃圧縮実験

東京大学大学院新領域創成科学研究科

一柳 光平



第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ

1

## Outline

1. 衝撃圧縮について
2. シングルショット時間分解X線回折・散乱
3. 熔融石英の衝撃圧縮下における中間距離構造変化
4. 3%イットリアドーパジルコニアセラミックスの相転移ダイナミクス
5. ビスマス多結晶フィルムの相転移ダイナミクス
6. cERLを用いた衝撃実験

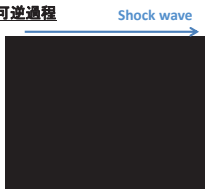
2

## 衝撃圧縮について

媒質中を伝搬する非線形な圧力波  
(断熱圧縮)

X線パルスを使った衝撃圧縮状態の観測

- ✓ 圧力-体積-時間 (相転移ダイナミクス、短寿命の中間構造)
- ✓ 衝撃破壊のメカニズム解明 (圧縮-膨張-破砕) 不可逆過程
- ✓ 超高压力における物理、状態方程式 (EOS)



K. Kadau, et al., PRB (2005).

3

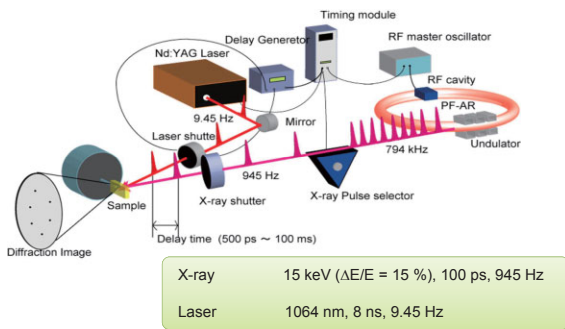
## 放射光X線パルスを用いた衝撃実験

多層膜を用いたX線スペクトルの制御

- White X-ray pulse ( $\Delta E/E = 15\%$ ) → Single crystals (semiconductors and metals)  
シリコン単結晶  
硫化カドミウム単結晶
- High-flux X-ray pulse ( $\Delta E/E = 1-5\%$ ) → Polycrystal and amorphous (fused quartz and metal)  
(擬似的な単色光源)  
熔融石英  
セラミックス  
金属多結晶  
複合材料系

4

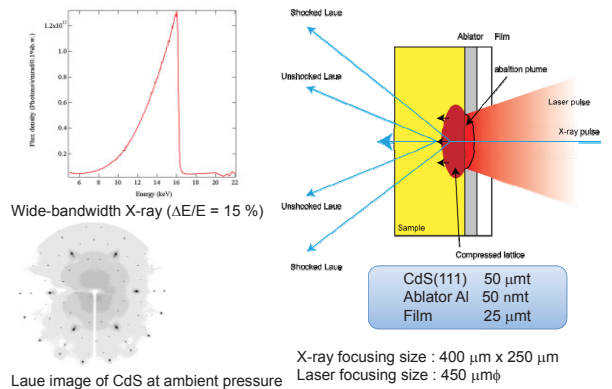
Laser-pump X-ray-probe experimental setup @NW14A, KEK



- 時間分解能 : 1 ns
- 遅延時間 : 1 ns - 100 ms

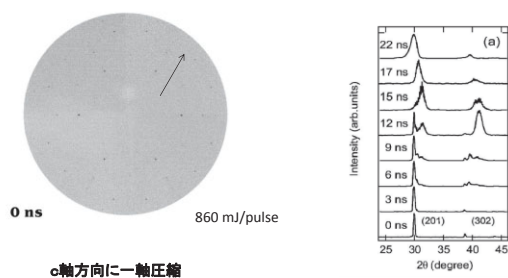
5

Laue images of CdS single crystal at ambient condition



6

Structural dynamics of CdS single crystal under shock wave loading

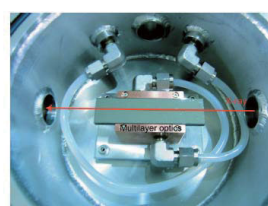


The 15 % bandwidth X-ray

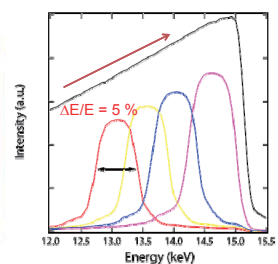
K. Ichiyana, et al., Appl.Phys.Lett, (2007).

7

## Multilayer optics



The depth-graded Ru/C multilayer X-ray optics



K. Ichiyana, et al., J. Synchrotron. Rad, (2009).

8

溶融石英の衝撃圧縮下における中間距離構造変化

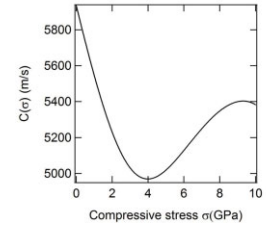
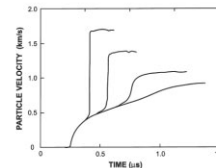
3%イットリアドープジルコニアセラミックス  
の相転移ダイナミクス

ビスマスの相転移ダイナミクス

9

溶融石英の非線形弾性応答

ramp-wave front up to 4 GPa.



Pressure profile of Soda-lime glass (Grady, Mech Mat, (1998))

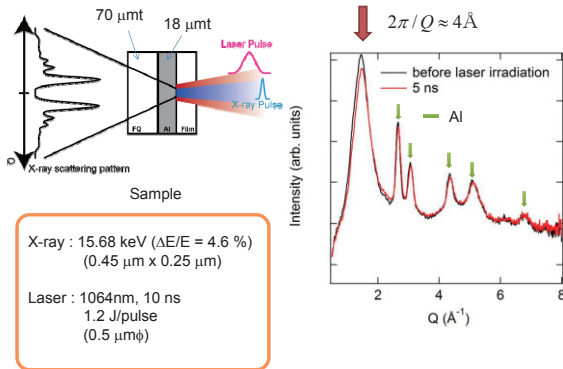
Nonlinear elastic response below 9.8 GPa  
Barker and Hollenbach, J.Appl.Phys. (1970).

Fourth-order stress-strain relation of fused quartz in elastic region

10

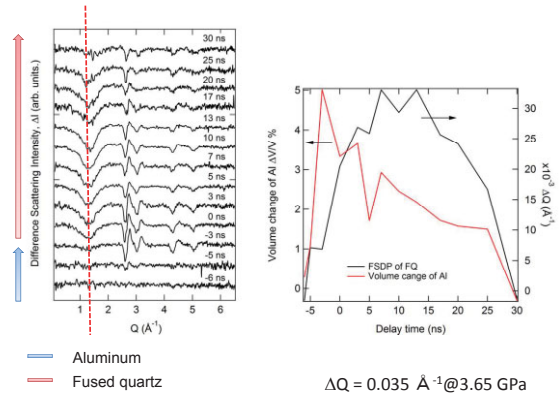
石英ガラスのシングルショット時間分解X線散乱

First Sharp Diffraction Peak (FSDP)



11

Differential X-ray scattering curves



12

イットリア安定化ジルコニアの高圧構造相転移

3%-doped-YSZ  
Shocked at 11 GPa

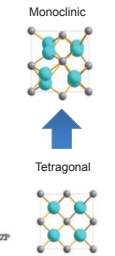
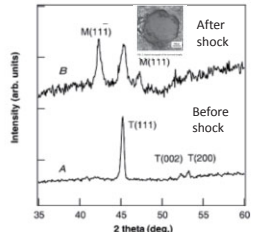
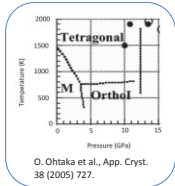


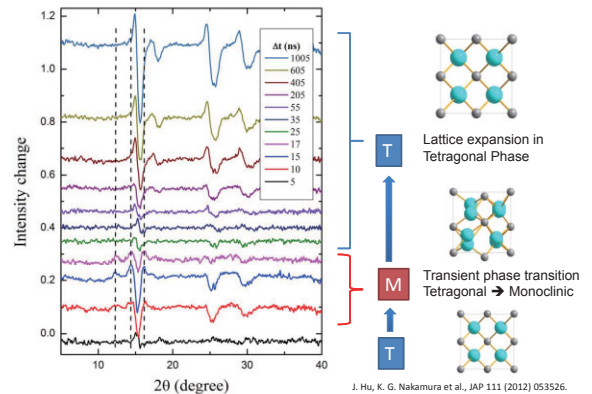
Fig. 7. X-ray diffraction patterns from pitazine 3Y-TZP (A) and the 3Y-TZP recovered after pressure-pulse loading at 11 GPa (B).  
A. Matsuda, K. G. Nakamura et al., STAM 5 (2004) 511

変位型構造転移

準安定相の高圧構造転移のダイナミクス

13

Time evolution of the differential rocking curves

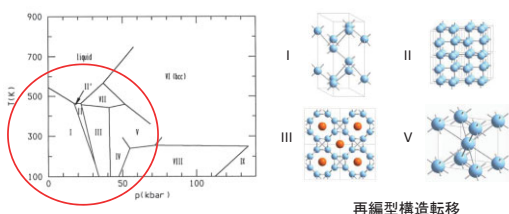


J. Hu, K. G. Nakamura et al., JAP 111 (2012) 053526.

14

ビスマスの高圧構造相転移ダイナミクス

ビスマスは10GPa以下の圧力で多様な構造相をもち、高圧力基準物質のひとつ



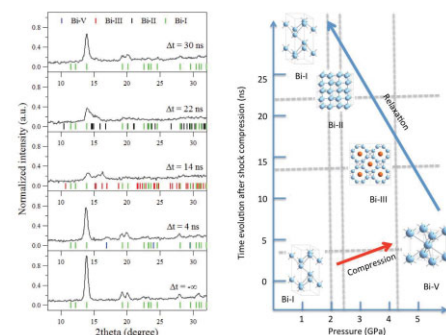
再編型構造転移

再編型の構造相転移のダイナミクス  
(転移の時間スケールはどの位か?)

15

ns-TRXRD of Bi polycrystal under shock compression

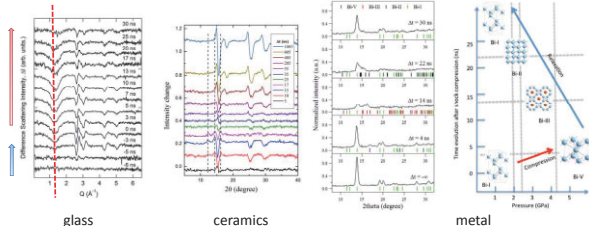
Reconstructive phase transition occurs within 5 ns!



16

## Summary

白色X線 ( $\Delta E/E = 15\%$ ) と擬似単色X線 ( $\Delta E/E = 1 \sim 5\%$ ) を使い分けることで多くの材料系のレーザー衝撃圧縮実験が可能になった。



✓非線形弾性域におけるアモルファスの中間距離構造変化はナノ秒で応答するが、静水圧実験と比べて構造変化が小さい。

✓3Y-TZPでは短寿命の低圧相 (Monoclinic) が観測された。

✓BiIはV相に高圧相転移をし、その後中間相を経てI相に戻ると示唆される。

17

## cEERLを用いた衝撃実験例

短X線パルスを用いた時間分解X回折による衝撃実験  
弾性・塑性変形ダイナミクス、psオーダーの相転移ダイナミクス

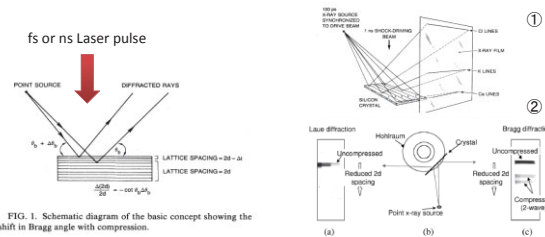


FIG. 1. Schematic diagram of the basic concept showing the shift in Bragg angle with compression.

図はレーザー誘起X線を用いた衝撃実験例 (時間分解ではないです)

FIG. 1. A schematic diagram of the experimental setup is shown in (b), along with time integrated (a) Laue and (c) Bragg x-ray diffraction signals (see text for details).

A. Loveridge-Smith, et al., PRL (2001)

18

## Acknowledgements

東京大学  
佐々木裕次

JASRI

関口博史

KEK (NW14A スタッフ)

足立伸一

野澤俊介

佐藤篤志

富田文菜

東工大

星野学

東京工業大学  
中村一隆

Jainbo Hu

JAXA

川合伸明

19

# コヒーレントフォノンダイナミクス

中村一隆

東京工業大学 応用セラミックス研究所

## Coherent Phonon Dynamics

Kazutaka G. NAKAMURA

Materials and Structures Laboratory, Tokyo Institute of Technology

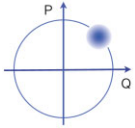
Coherent phonons are quasi-coherent states of phonons. Rich information on dynamics of atomic motions (lifetime, initial phase, and frequency chirp) in solids can be obtained by using ultrafast spectroscopy with laser or X-ray pulses. Furthermore, atomic motions in coherent phonons can be manipulated using the controlled laser pulses. In this paper, I present our recent research achievements of the coherent phonon dynamics.

格子振動の振動周期よりも短いパルス幅のレーザー光を照射することで、物質内にコヒーレントフォノンを発生することが出来る。コヒーレントフォノンは、擬似的にはあるがフォノンの巨視的量子状態であるコヒーレント状態であり、通常の熱平衡状態とは異なり多くの原子が位相をそろえて運動しているため、原子変位のダイナミクスを直接観測することができる。フェムト秒レーザーパルスを用いた過渡反射率・透過率計測での研究が多く行われ、フォノンの寿命の計測だけでなく、フォノン振動の初期位相情報や振動数の時間変化など周波数領域分光では得る事の出来ない動的な情報が得られている。こうした分光学的な研究だけでなく、コヒーレントフォノンでは励起パルスの位相を制御することで、振動をコヒーレントに制御することができる。これによって選択的な振動励起や、原子変位の光制御などの研究が進められている。さらには、コヒーレント状態だけでなく純量子状態であるスキューズド状態を発生させることで、原子変位の量子ゆらぎの計測や制御を行うことも可能となってきた。こうした研究は、光による結晶構造制御やフォノンを使った量子情報などへの応用が期待されている。また、近年では短パルス X 線を用いたコヒーレントフォノンダイナミクスの研究も進められている。本講演では、レーザー計測を用いたコヒーレントフォノンダイナミクス研究の最近の研究成果を紹介するとともに、短パルス X 線を用いた研究への展望を述べたい。



# コヒーレントフォノンダイナミクス —フォノン波束の量子制御—

中村一隆  
東京工業大学応用セラミクス研究所  
JST-CREST



## Outline

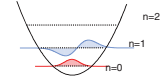
1. コヒーレントフォノンとは？
2. フェムト秒レーザーによる計測と制御
3. 時間分解X線回折による計測
4. まとめ

1

## コヒーレントフォノンとは？

- コヒーレントフォノンとは
  - 幾つかの振動量子状態の重ね合わせで構成された、フォノンの波束
  - 振動周期よりも十分短いパルス照射で励起される
  - 位相を揃えて運動する

$$|\varphi(t)\rangle = \sum_{n=0}^L C_n |n(t)\rangle$$



調和振動子で良い近似ができて、Poisson分布を持つ場合

$$|\varphi^{coh}(t)\rangle = e^{-|\alpha|^2/2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha^n}{\sqrt{n!}} |n(t)\rangle$$

フォノンのコヒーレント状態  
最小不確定性状態

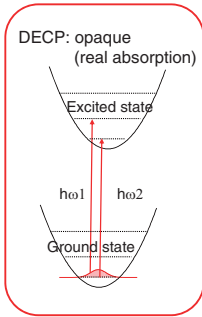
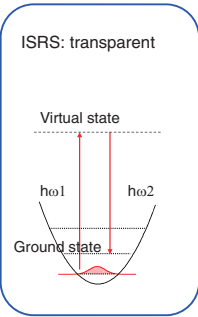
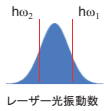


• A. V. Kuznetsov and C. J. Stanton (PRL 73 (1994) 3243).

2

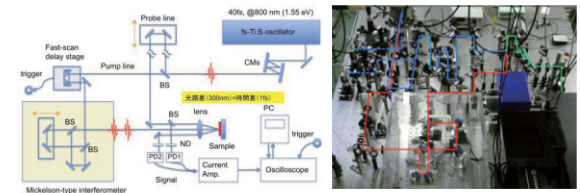
## コヒーレントフォノンの発生

パルス幅が振動周期よりも短い = レーザーエネルギー幅が振動エネルギーよりも大きい  
 $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$



3

## フェムト秒時間領域分光(FTDS)



この計測法で分かること

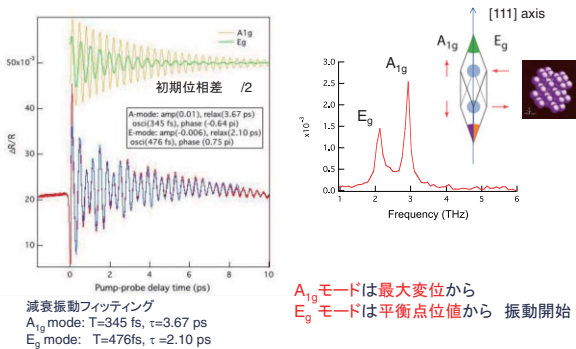
- 電子状態
- キャリアの濃度
- フォノン振動
- スピン偏極

$$\Delta R(t) = \frac{\partial R}{\partial N} \Delta N(t) + \frac{\partial R}{\partial \chi} \frac{\partial \chi}{\partial Q} \Delta Q(t) + \dots$$

の時間発展の直接観測と制御

4

## フェムト秒時間分解過渡反射測定 Bi(111)

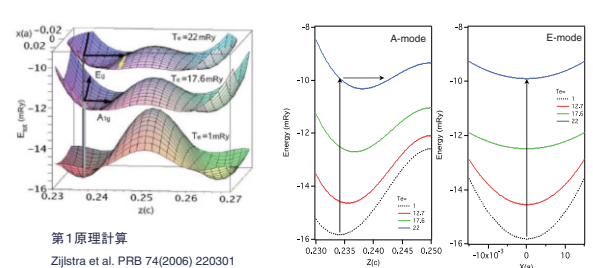


$A_{1g}$ モードは最大変位から  
 $E_g$ モードは平衡点位値から 振動開始

Ultrafast Phenomena (2009)

5

## Bi ポテンシャルエネルギー曲面



第1原理計算  
Zijlstra et al. PRB 74(2006) 220301

カッセル大学との共同研究

$$\frac{\partial(\Delta R/R)}{\partial z} = 0.0164 / pm$$

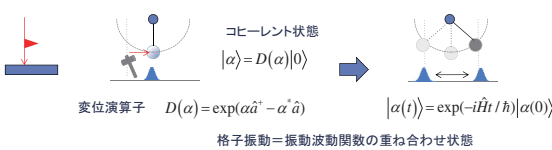
反射率 → 原子変位量

Zijlstra et al. (2011)

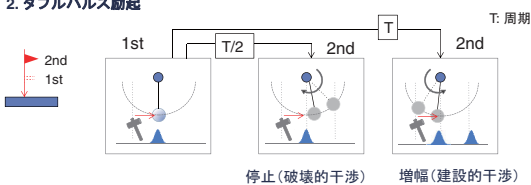
6

## 原子運動の制御

### 1. シングルパルス励起

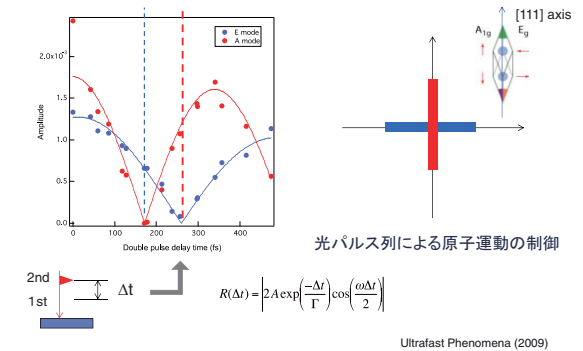


### 2. ダブルパルス励起



7

## Bi 結晶中の原子運動の制御



Ultrafast Phenomena (2009)

8

## 鉄系超伝導体のキャリアフォノン相互作用

1つの指数関数減衰(キャリア減衰)  
3つの減衰振動(フォノン)

SmFeAsO<sub>1-x</sub>F<sub>x</sub>(x=0.075): T<sub>c</sub>=51K

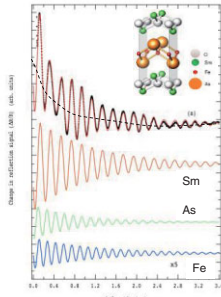
mode	Amp (1E-6)	Lifetime (ps)	Freq. (THz)	Softening (THz)
Sm	1.04	1.10	5.0	-0.06
As	0.37	0.84	5.9	
Fe	0.09	1.19	6.3	
Carrier	1.74	0.47		

- Sm, As, Feモードの振動数と寿命の決定
- Smモード振動数が時間とともに増加
- キャリア寿命が470fs

Smモードフォノンの電子的ソフトニング

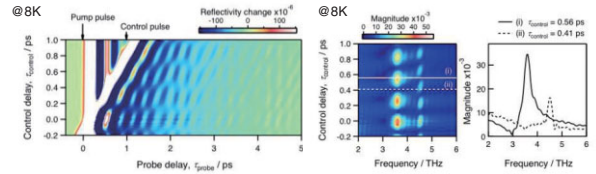
振動数の減少 = キャリア密度増加による結合力の減少

H. Takahashi, K. G. Nakamura et al., JPSJ 80 (2011) 013707



## 酸化物超伝導体のフォノン制御

YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>



光パルスによるフォノン振動振幅の選択的励起

Faraday Discussion 153 (2011) 375.

フォノン制御による電気伝導性の制御へ

(時間分解THz分光: 超伝導ギャップ、ジョセフソンプラズマ振動の計測)

9

10

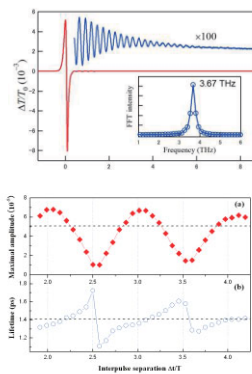
## スクイズドフォノンによる量子ゆらぎ計測/制御

フォノンのスクイズド状態

- # 非古典状態
- # 最小不確定性状態よりも小さい量子ゆらぎ
- # 2次ラマン過程で生成

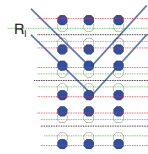
ZnTe crystal (110) cut  
2TA(X) modelによるスクイズドフォノンの生成と制御

J. Hu et al., PRB (2011)



11

## パルスX線によるコヒーレントフォノン計測



X線回折では:  
構造因子の変調 回折強度変調

$$|F|^2 = FF^* \approx |F_0|^2 + \sum_i iQ \exp(i\omega t + \theta)$$

K. Sokolowski-Tinten et al., Nature 422 (2003) 287.  
P. Beaud et al., PRL 99 (2007) 174801.

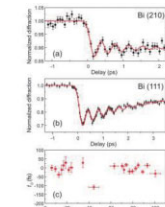
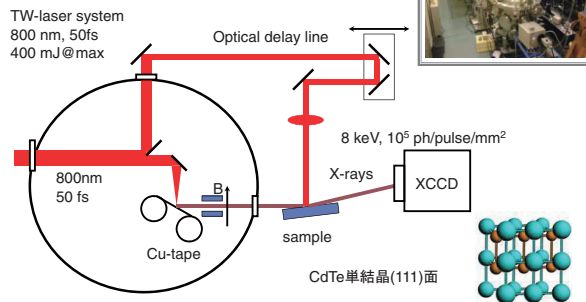


FIG. 4 (color online). Normalized integrated diffracted intensity from the bulk (a) B(210) and (b) B(111) reflections at 7.15 kV as a function of pump-probe delay for excitation fluences of 1.17 and 2.34 mJ/cm<sup>2</sup>, respectively. The scans are fits to the data. (c) Measured line widths during 5 days of consecutive scans. The horizontal error bars indicate the length of the scans.

12

## Femtosecond-TRXRD with LPX

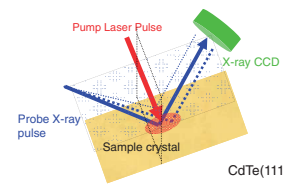
Laser plasma X-rays:  
1keV-10keV characteristic X-rays, pulse width < 1ps



13

## CdTeのコヒーレントフォノン

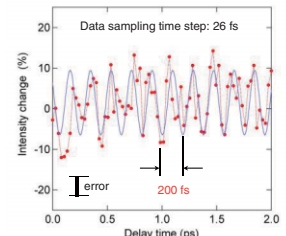
レーザープラズマX線を用いたコヒーレント  
フォノン振動計測の実証



Symmetric Bragg diffraction geometry  
 $2d \sin \theta = \lambda$

弱励起条件: 0.6 mJ/cm<sup>2</sup>

K.G. Nakamura et al., Appl. Phys. Lett. 93 (2008) 061905.



原子変位: 3 pm  
(格子定数の0.8%)

14

## ERLとの関連

High-intensity modes		High-flux mode		Ultimate mode		Ultra short-pulse mode		SFEL-G
Beam energy (GeV)	3	3	3	3	3	3	3	3
Average current (mA)	10	100	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Charge per bunch (pC)	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7
Repetition rate (Hz)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Bunch length (ps)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Beam size (mm)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Energy spread (%)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Beam divergence (mrad)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Beam length (mm)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

パルス幅: 100fs, 1ps の計測

Energy Recovery Linac Preliminary Design Report

- 低振動数モード (~1THz) のコヒーレント光学フォノンのダイナミクス  
— 誘電体相転移のソフトモードなど
- コヒーレント音響フォノンのダイナミクス
- 光励起過渡状態でのポテンシャル変形とフォノンダイナミクス  
— 光相変化材料(光メモリ)Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> など
- # ERLからのTHz光によるフォノンのコヒーレント励起

15

## Low-frequency coherent optical phonons

Share mode in graphite

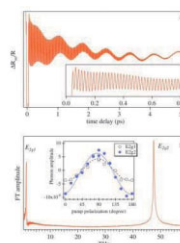


FIG. 1. (Color online) (a) Anisotropic reflectivity change  $\Delta R/R$  at pump-probe delay of 50 fs. The inset shows an enlargement of the trace to show the high-frequency modulation. (b) FT spectrum of the time-domain trace in (a). The trace shows the pump-probe dependence of the amplitude of the first-order phonon mode. The 420 cm<sup>-1</sup> phonon mode is measured at 120° of scattering. The probe beam is polarized at 90°. Solid and broken curves are fits to cos(2 $\pi$ ft) and sin(2 $\pi$ ft), respectively.

K. Ishioka et al., PRB 77 (2008) 121402R.

Soft mode phonons in SrTiO<sub>3</sub>

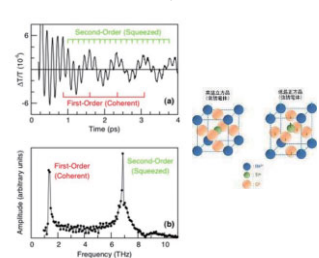


Fig. 2. (a) Normalized transmitted intensity of the probe pulse as a function of the delay for the A<sub>g</sub> symmetry configuration. (b) Fourier transform of the time-domain data.

G. A. Garrett et al., Opt. Exp. 12 (1997) 385.

16

## まとめ

- フォノンの動的情報(寿命、初期位相、振動数シフト)を得ることができる
- パルス列を用いことで、フォノンの振幅制御、選択励起ができる  
→ フォノン誘起の構造や電子状態の制御の可能性
- 時間分解X線回折の組み合わせで原子変位の絶対値や構造変化を求められる

### 要望:

コヒーレントフォノンダイナミクスの研究:  
レーザーとジッターフリーで100fs以下(~50fs)のX線光源が望ましい

17

## Acknowledgement

- J. Hu, T. Akasaka, H. Takahashi, H. Koguchi, MSL
- O.V. Misochko: Russian Academy of Science
- K. Ohmori, H. Takei, H. Katsuki, Y. Okano: IMS
- Y. Kayanuma: Osaka Prefecture Univ.
- M. Kitajima: National Defense Academy
- J. Takeda, I. Katayama, Yokohama National Univ.
- Y. Kamihara, Keio Univ.



This work was supported by

- JST-CREST, XFEL utilization project of MEXT
- Collaborative work of MSL, Collaborative work of IMS

18

# DXAFS を用いた fs ダイナミクス研究

阿部 仁

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光

## Prospects of dynamics studies in the scale of fs by DXAFS

Hitoshi Abe

Photon Factory, IMSS, KEK

### <Synopsis>

The DXAFS (Dispersive X-ray Absorption Fine Structure) technique is a powerful method to perform time-resolved XAFS experiments. Laser Compton x-ray, which is generated by the collision between Laser and an electron bunch, will be a suitable light source to carry out DXAFS at cERL because of the sufficient energy spread and the jitter free condition. We would expect to capture local structures and electronic states of some metal complexes in transient excited states. In addition, soft x-ray as well as hard x-ray will be generated as the Laser Compton x-ray. A BL, where we can use both soft and hard x-rays, is desired to detect behaviors both of molecules and metals in chemical reactions.

XAFS (X-ray Absorption Fine Structure)は、様々な物質の局所構造や電子状態などを調べられる実験手法として、触媒や電池材料、地球・環境物質など幅広い分野で利用されている。この XAFS に時間分解能を持たせた手法の 1 つとして、DXAFS (Dispersive XAFS)がある[1]。DXAFS は白色 X 線を利用して測定エネルギー範囲の X 線を試料に一度に照射し、1 次元検出器を用いて測定する。これにより、エネルギー掃引することなく、one shot で XAFS スペクトルを得ることができる手法であり、時間分解 XAFS 測定に利用されてきた。

今回は、cERL におけるレーザーコンプトン散乱で発生する X 線を利用した DXAFS 研究の展開について考えてみたい。レーザーコンプトン X 線は、90 度衝突の場合、~40 keV までの硬 X 線が 1 kHz 程度の繰り返しで得られる[1]。また、ある条件では 10%程度のエネルギー広がりを持った X 線が得られる。例えば Pt  $L_3$  吸収端あたりの 11-12 keV では 1 keV 程度のエネルギー幅の、DXAFS 測定に使い易い X 線となる。

超高速時間分解能の Laser Pump – DXAFS Probe 実験を考えた時、通常、ジッターの問題が避けて通れない。ところが、レーザーコンプトン X 線を発生させるレーザーを励起光に用い

ることで、原理的に Pump 光と Probe 光との間ではジッターフリーが実現する。このような環境を利用する事で、ある種の金属錯体の光励起状態の局所構造、電子状態を綺麗に捉えられるのではないかと期待している。

また、レーザーコンプトン X 線が軟 X 線領域から硬 X 線領域まで幅広く発生することにも注目したい。軟 X 線と硬 X 線と両方を同時に利用できる BL が実現できないだろうか。エネルギー領域の異なる 2 つの X 線をうまく試料上に導ければ、例えば、Pt 金属上での CO 酸化反応など金属表面での化学反応に対し、金属の L 吸収端、反応種の K 吸収端の両方で DXAFS 測定が可能になる。DXAFS に限らず、対応する準位の fast XPS 測定も可能である。これには、反応種を分光法で直接観察できる環境で、金属の L 吸収端 XAFS 等でその構造、電子状態を直接観察できるという利点がある。さらに、軟 X 線 Pump-硬 X 線 Probe の実験も考えられ、有機金属錯体の配位子を励起させた際の中心金属まわりの構造変化の追跡などが候補となる。

[1] T. Matsushita and R. P. Phizackerley, *Jpn. J. Appl. Phys.* 20, 2223 (1981).

[2] KEK Report 2007-7, JAEA-Research 2008-032, “コンパクト ERL の設計研究”, 2008.



# DXAFSを用いたfsダイナミクス研究 を目指して

阿部 仁  
Photon Factory, IMSS, KEK

1

## Outline

- Intro: XAFS, DXAFS
- A DXAFS study at NW2A, PF-AR
- Toward Laser Pump – DXAFS Probe experiments
- NW2A, PF-AR => Laser Compton Scattered X-ray, cERL
- Prospects for studies at cERL & 3-GeV ERL
- Summary

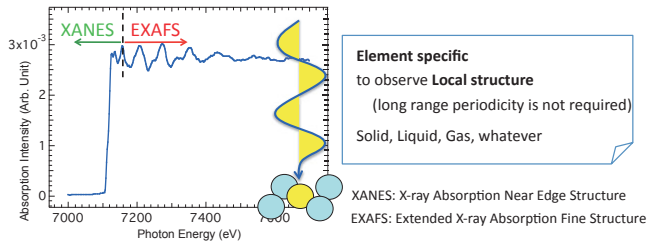
2

## What is XAFS?

XAFS: X-ray Absorption Fine Structure

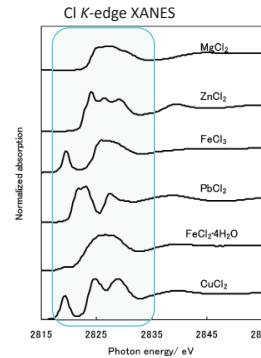
electronic state (valence)  
Symmetry

Bond length  
Number of surrounding atoms (Coordination number)  
Distribution, Thermal vibration



3

## XANES tells us what your sample is.

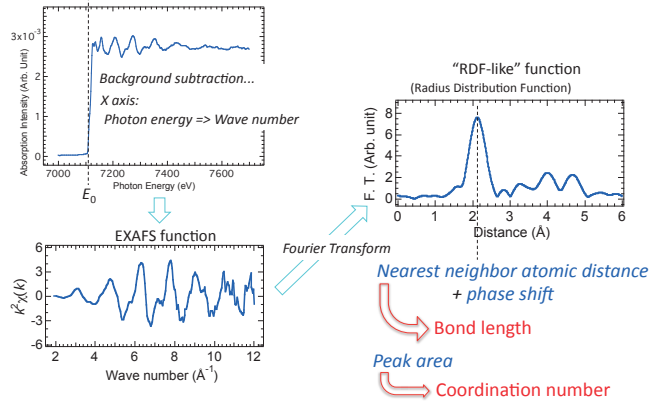


All these are metal chlorides.  
But you can see some specific features in each spectrum.  
So you would recognize what your sample is.

F. Zhu, et al., Environ. Sci. Technol. 42, 3932 (2008)

4

## How to Obtain Bond Length by EXAFS



5

## Eq. of single scattering EXAFS

$$\chi(k) = -S_0^2 \sum_j \frac{N_j}{kR_j^2} F_j(k) \exp(-2\sigma_j^2 k^2) \sin(2kR_j + 2\delta_{A,j}(k) + \varphi_j(k))$$

Amplitude      Oscillation (phase)

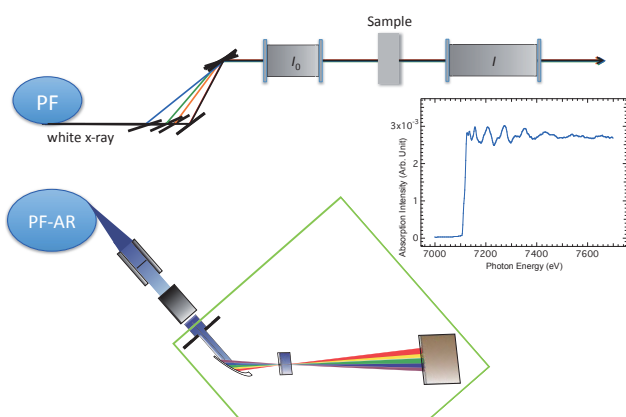
“Round trip” of the wave      Phase shift of absorbing atom of scattering atom

Fourier Transform...  
Bond length  $R_j$ , etc.,

(Parameters high-lightened by yellow are fitting parameters.)

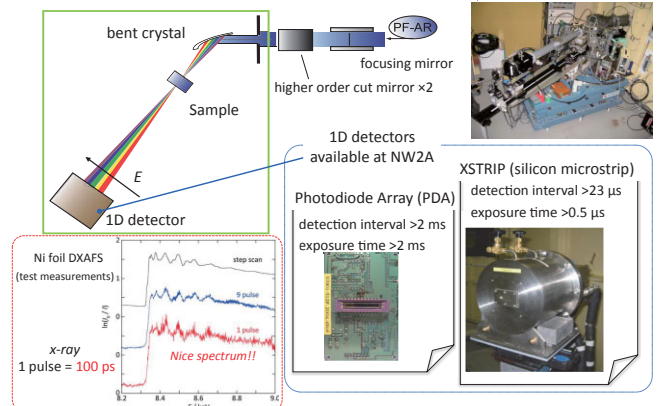
6

## Step scan XAFS & DXAFS



7

## DXAFS at PF-AR NW2A



8

DXAFS測定

湾曲結晶  
試料  
一次元検出器

PF-AR NW2A

ポリクロメーター 湾曲半径0.9 m  
Si(511)  
Laue配置

吸収端 Pd K (24.350 keV)

一次元検出器 蛍光体付フォトダイオードアレイ  
時間分解能 10 ms

9

試料  $\gamma$ -アルミナ担持パラジウム (Pd担持量3 wt%)

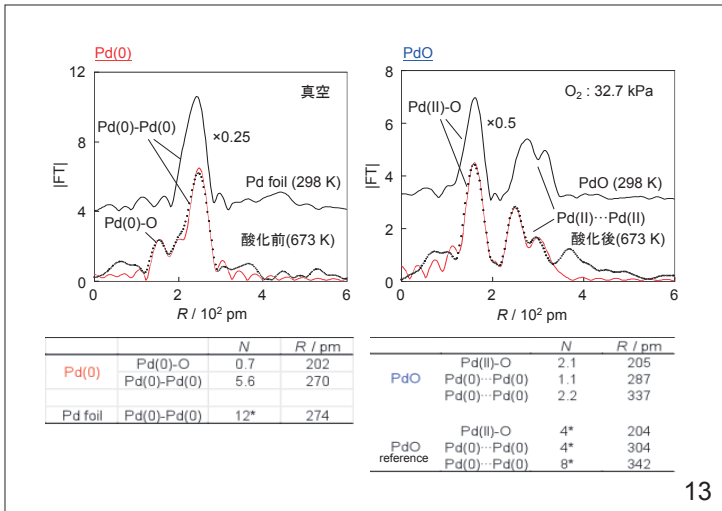
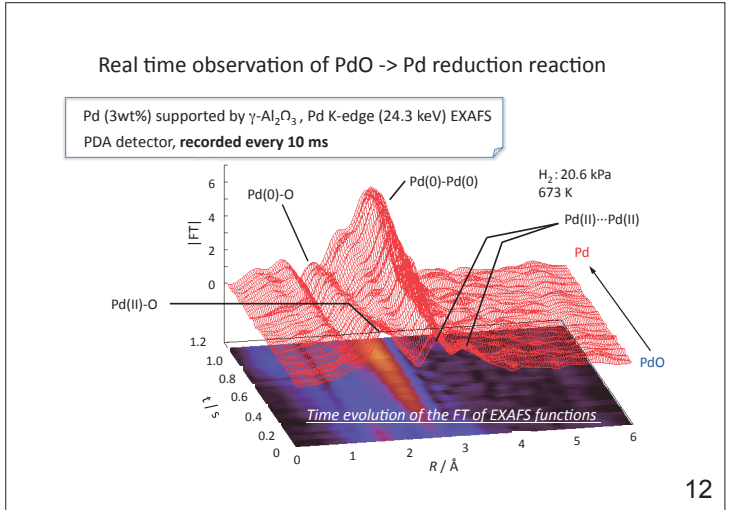
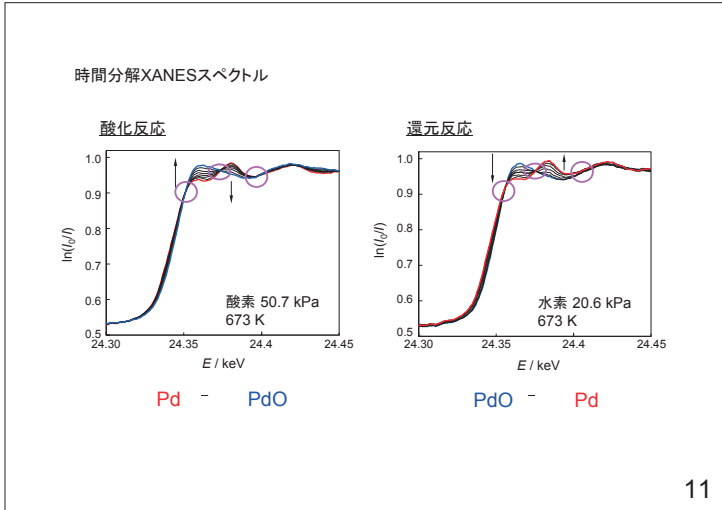
還元反応 水素 (4.0~49.5 kPa) 試料温度 573, 623, 673 K  
一酸化炭素 (4.5~49.1 kPa) 試料温度 673, 723, 773 K

酸化反応 酸素 (4.1~61.8 kPa)、 試料温度 573, 623, 673, 723, 773 K

in situセル

電磁弁1 電磁弁2  
ロータリーポンプ 反応ガス

10



Laser Pump – DXAFS Probe experiments

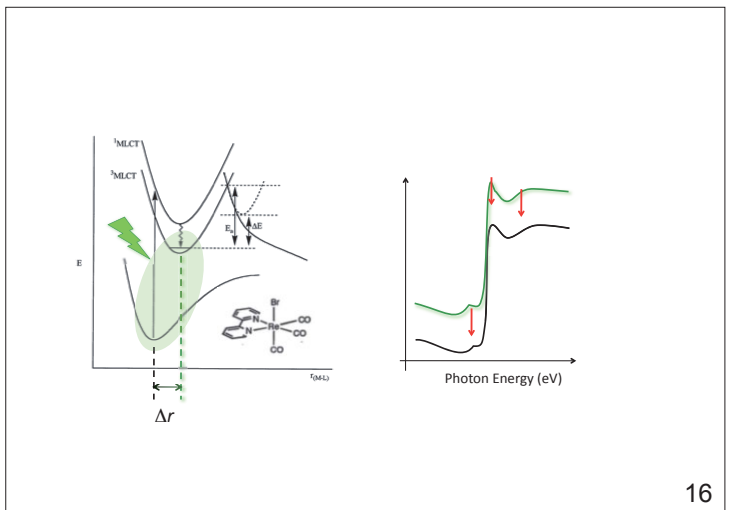
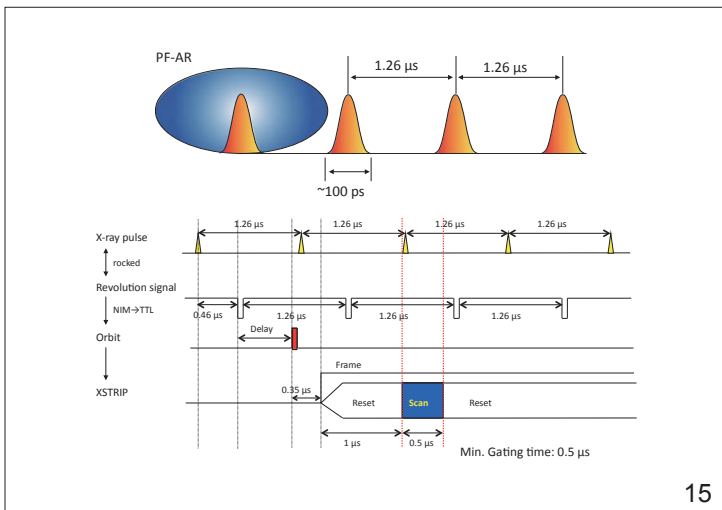
We've just started to try to measure this experiment as to capture a transient state.

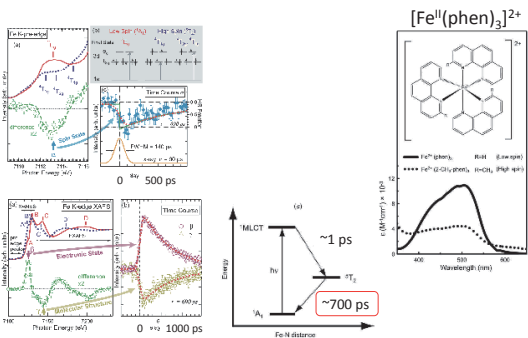
X-ray (DXAFS) Laser

courtesy of Prof. Ishitani's group, TIT

H. Takeda, et al., JACS 130, 2008 (2008)

14





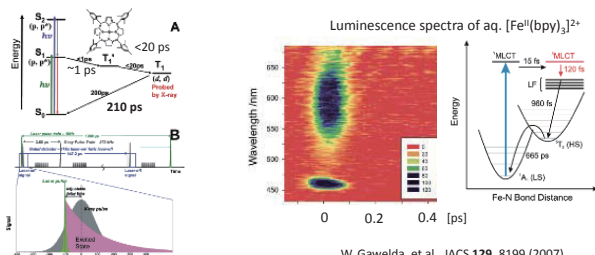
S. Nozawa, et al., JACS 132, 61 (2010)

T. Sato, et al., J. Synchrotron Rad. 16, 110 (2009)

## Limitations at NW2A, PF-AR

- Phenomena faster than the pulse duration of PF-AR (~100 ps) cannot be detected.
- The jitter between laser & x-ray always exists, and would be more serious when we go shorter time resolution.
- Many experimental apparatuses are put in the hatch one after another.

## Some TR experiments in the world



Lin X. Chen, et al., JACS 129, 9616 (2007)

W. Gawelda, et al., JACS 129, 8199 (2007)

## What's the suitable sources for DXAFS?

Source	Photons/pulse/ 0.1%BW	Photn Flux /s	Duration	Rep rate
3rd generation SR	10 <sup>14</sup> -6	10 <sup>10</sup> -12	~100 ps	< ~500 MHz
Laser slicing at BM	10 <sup>11</sup> -3	10 <sup>14</sup> -7	~100-1000 fs	1-10 kHz
Laser Compton Scattered X-ray, cERL	10 <sup>13</sup> -4	10 <sup>16</sup> -7	~100 fs	1 kHz
ERL	10 <sup>15</sup> -6	10 <sup>14</sup> -15	~100 fs – 1ps	1.3 GHz
XFEL	10 <sup>11</sup> -12	10 <sup>13</sup> -15	~10-100 fs	~100 Hz

DXAFS should be equipped and performed at the cERL, and then the 3-GeV ERL.

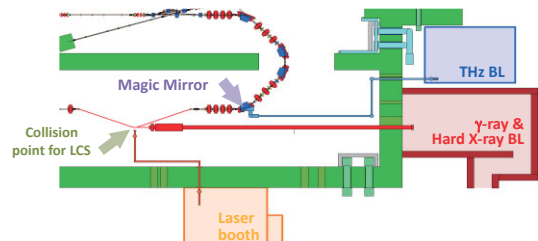
\*This table may contain incorrect data.

cf. C. Bressler and M. Chergui, Chem. Rev. 104, 1781 (2004)

## NW2A, PF-AR => LC x-ray, cERL; what are the merits?

- Faster phenomena down to ~100 fs will be targeted and detected.
- The jitter could be excluded, and the delay will be exactly sure as set in principle.
- The larger emittance gives us a wider range of DXAFS per shot.

## 2つのビームラインにおける利用研究



### レーザーコンプトン線ビームライン

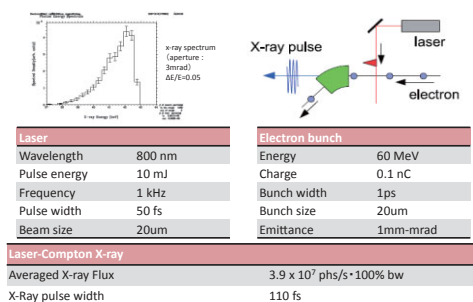
- 共振器によるLCSを用いた高flux光源
- 高視野と共振器による高fluxイメージング
- 90度衝突LCS散乱を利用したフェムト秒光源
- 100fs準単色光を用いた時間分解X線実験

### テラヘルツ光ビームライン

- CSRを用いた高強度コヒーレントTHz光源
- meV領域における電子状態変化の観測
- コヒーレント性を利用したイメージング
- フォノン励起用フェムト秒光源

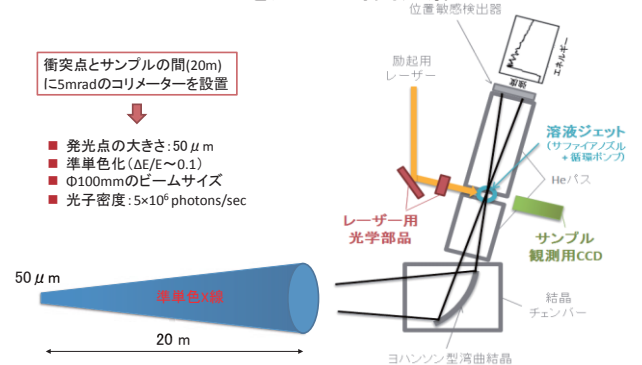
courtesy of Prof. Nozawa

## X-ray beamline – ultrafast mode

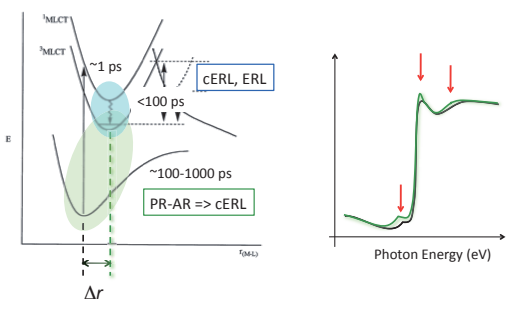


courtesy of Prof. Nozawa

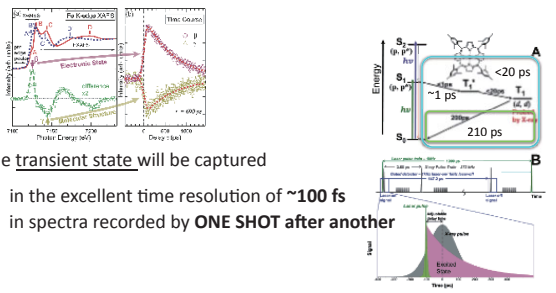
## コーンビームを用いた時間分解DXAFS



courtesy of Prof. Nozawa



### DXAFS at LC x-ray, cERL



The transient state will be captured  
 in the excellent time resolution of **~100 fs**  
 in spectra recorded by **ONE SHOT** after another

S. Nozawa, et al., JACS 132, 61 (2010)      Lin X. Chen, et al., JACS 129, 9616 (2007)

### What we can do at LC x-ray of cERL

- Time-resolved, **Transient X-ray Absorption** spectroscopy by **DXAFS** with  $\Delta t = \sim 100$  fs
- In principle, the **jitter free** measurements will be performed.
- The larger emittance, the larger size of the beam enables us to measure a wider range of XAFS per shot.

### Then, do we need 3-GeV ERL? YES!!!!

- **Higher photon energy**
- **Much more flux**: huge repeated measurements are not required.
- Higher frequency of the ring, **1.3 GHz**: photons come **every 0.8 ns**, and **“movies”** of reactions will be captured in realistic conditions.
  - Not only Pump – Probe experiments
  - But also **Real time evolution** experiments

### Current status of our time-resolved experiment

Disp-NEXAFS

several min/spectrum  
 → 33 ms/spectrum

位置敏感型  
 イオン  
 測定用真空槽

BL16Aのダクト

反応が速い室温以上でも  
 追跡可能に!      [\*]

Dispersive NEXAFS法を用いて室温以上での  
 反応を表面分光法で調べる

[\*] 小宇佐友香(慶應大、近藤研), 修士論文発表スライド

### Available time resolution & possible study

	Acquisition Rep rate	Period of real time observable reaction	Ratio (Period/Rep rate)
Current status: 16A at PF	33 ms (Video rate of the camera)	~100 s	~10 <sup>-4</sup>
Future: ERL	0.8 ns (Pulse interval)	(~100 ns)- 1-10 μs	~10 <sup>-4</sup>

#### Real time observations of catalysts at very working temperature

For example...      How suitable!! Perfect!!!      ...maybe (^.^)

CO oxidation on Pt(111)  
 $E_a = 0.5 - 0.7$  eV      RT => 600 - 900 K      (Ratio of  $k$ ) = 10<sup>4</sup> - 10<sup>8</sup>

### Summary

- Prospects of DXAFS at LCS X-ray station, cERL are presented.
  - **Laser Pump – DXAFS Probe** experiments are strongly recommended to perform.
  - $\Delta t = \sim 100$  fs, **Jitter free**, The wider range of XAFS
- cERL is a fancy machine, but 3-GeV ERL must be established
  - as to **shine mysteries of transition states** and to capture **real time “movies”** of chemical reactions.

### Acknowledgments

- Dr. S. Pascarelli, Dr. O. Mathon @ESRF
- Prof. Ishitani & his group @ Tokyo Inst. of Tech.
- Prof. S. Adachi, Prof. S. Nozawa and Dr. T. Sato
- Prof. H. Kondoh, Ms. Y. Kousa @Keio Univ.
- Prof. Nomura, Prof. Nitani and Mr. Niwa

# 強レーザー場中の分子挙動の cERL による研究

足立純一

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光

## Investigation of the molecules in the intense laser fields with the cERL

ADACHI, Jun-ichi

Photon Factory, IMSS, KEK

### <Synopsis>

Molecules in the intense laser fields have been studied recently, since the molecular systems which are coupled strongly coupled with the radiation fields are novel few-body quantum ones, and also are interesting from a viewpoint of the application to manipulate the molecules. In order to utilize the soft x-ray spectroscopic methods, we develop the experimental techniques to investigate the molecules in the intense laser fields with the synchrotron radiation. Here we present possible experiments to investigate for the molecules in the intense laser fields with the cERL and show our future plan.

### 〈要旨〉

強レーザー場中にある原子分子は、レーザー場が原子分子系に結合した少数多体系であり、原子分子物理学において新奇なアンサンブルとして研究が行われてきている[1-3]。また、強レーザー場過程は、光による分子の操作の素過程としても注目されている[4-6]。そのような強レーザー場は、短パルスレーザー光を集光することにより実現でき、これまで、主にレーザーをプローブとした実験が進められている。

我々のグループは、強レーザー場中の原子分子の挙動を調べるため、分光学的に優れた特性を持つ放射光をプローブとして活用する実験手法の開発を行っている。研究の目標は、強レーザー場中での分子の空間的配列および幾何構造変化・電子的構造変化を、また光電子の着衣 (dressed) 状態を、VUV・SX 領域の放射光を利用して調べる手法を確立することである。対象とするレーザー場は、パワー密度が  $10^{12}$  W/cm<sup>2</sup> 程度のものである。これは、レーザー場との相互作用が摂動論的に扱うことができる領域よりも高く、分子の断片化や光電離が支配的に起きる領域よりも低いパワー密度の領域である[5]。

PF からの放射光は、60 ps 程度の幅のパルスである。また、アンジュレータから得られる



光は、標準的な光学系でのスポットサイズは垂直方向が 0.05 mm 程度である。対象とするレーザー場は、これより充分長い持続時間を持ち、これより大きなスポットサイズにおいても必要とするパワー密度を持つことが要求される。TW/cm<sup>2</sup> オーダーのレーザー場中の分子挙動を PF からの放射光により明らかにする実験の試みでは、入手可能なレーザー装置の繰り返し周波数と放射光のスポットサイズにおける制限から、これまでのところ有用な結果が得られていない。

一方、cERL あるいは ERL にて高輝度かつ 100 fs 幅程度のプローブ光パルスが得られると、強レーザー場を生成するために利用可能なレーザーの選択肢が増えるとともに、調べられる動的挙動の時間スケールが広がる。

これまで PF シングルバンチ運転にて行ってきた、強レーザー場による分子配列・屈曲を放射光により観測する実験[7]、および、強レーザー場中原子の光電離過程を測定することによる着衣連続状態の観測についての試みを発表する。そして、cERL を利用することにより、これまでの実験がどのように改善されるか説明する。さらに、ERL により実現可能となると期待できる今後の研究計画を紹介する。

#### [参考文献]

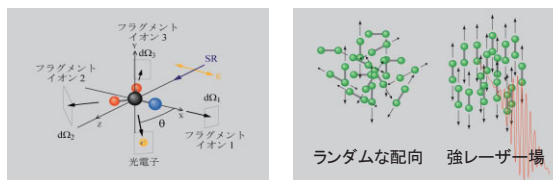
- [1] B.H. Bransden and C.J. Joachain: “*Physics of Atoms and Molecules*” 2nd Ed., Sect. 15.3 (2003).
- [2] C.J. Joachain et al.: “*Atoms, Solids, and Plasmas in Super-Intense Laser Fields*” (2001).
- [3] J. Posthumus ed.: “*Molecules and Clusters in Intense Laser Fields*” (2001).
- [4] H. Stapelfeldt and T. Seideman: *Rev. Mod. Phys.* **75**, 543-557 (2003).
- [5] K. Yamanouchi: *Science* **295**, 1659-1660 (2002) and references therein.
- [6] H. Sakai et al.: *J. Chem. Phys.* **110**, 10235-10238 (1999).
- [7] T. Teramoto, J. Adachi, K. Yamanouchi and A. Yagishita: *AIP Conf. Proc.* **879**, 1805-1808 (2007).

## cERL による強レーザー場中の分子挙動の研究

Photon Factory 足立純一

1

## 光電離の立体ダイナミクスの解明



- 4重コインシデンス [ $e^- + frag^+_1 + frag^+_2 + frag^+_3$ ]: 信号強度非常に弱い
- レーザーによる配向/援用
- レーザーポンプ-ERLプローブ
  - 非 Franck-Condon 領域・振動波束の生成

2

## 空間配向分子の光電離

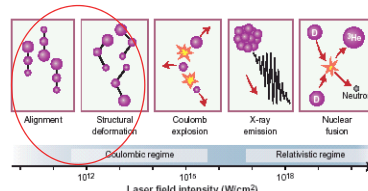
- 夢: 分子をある配向で静止
  - 基板に固定して観測 ← 満足できない
  - 量子力学的純粋状態の観測ではない
- “選択” または “制御”, “制御 & 選択”
  - 選択 ← 内殻過程の特徴 + コインシデンス法
- 分子の空間配向の制御・選択 + ERL
  - DC 電場・AC 電場による制御・選択
  - レーザー場による制御
  - ERL の短パルス性 ( $\approx 0.1$  ps)

3

3

## 強レーザー場中の原子・分子・クラスター

- 新奇な対象: 強レーザー場中にある原子分子
- 中程度のパワー密度:  $10^{11}$ - $10^{12}$  W cm $^{-2}$ 
  - 分子の配列あるいは変形
  - Coulomb 爆発が起こる領域よりも低いパワー密度

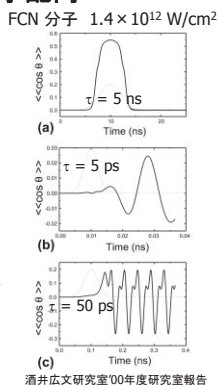


K. Yamanouchi, Science **295**, 1659 (2002).

4

## レーザー場による分子配向

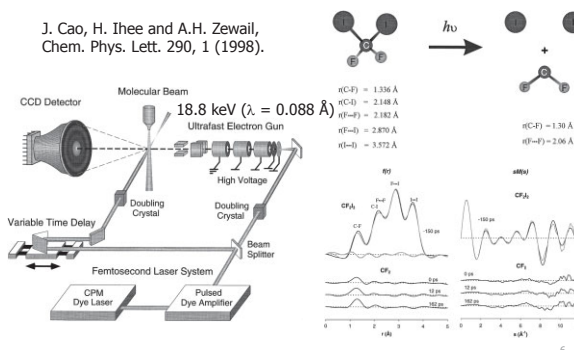
- 3つのタイプに分類できる
  - H. Stapelfeldt and T. Seideman, *Rev. Mod. Phys.* **75**, 543 (2003).
  - 断熱的配向  $\tau \gg \tau_{rot}$
  - 非断熱的配向  $\tau \ll \tau_{rot}$
  - 急激遮断  $\tau_{on} > \tau_{rot}, \tau_{off} \ll \tau_{rot}$
- 断熱的配向
  - 時間同期はすでに実現できている
  - 完全な自由場での実験にはならない
- 非断熱的配向
  - プローブも短パルスである必要性



5

## 電子線回折による高速現象の解明の例

J. Cao, H. Ihee and A.H. Zewail, *Chem. Phys. Lett.* **290**, 1 (1998).



6

6

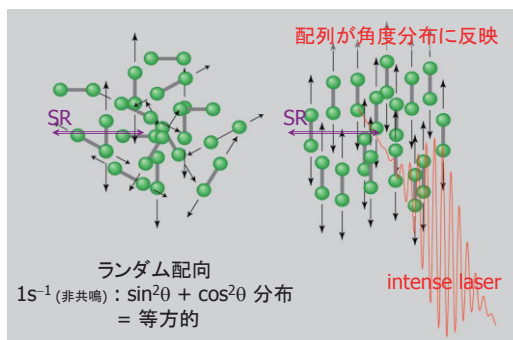
## 気相分子の光電子回折パターン測定

- 電子線回折よりも局所的な情報が得られる可能性
- 一般的な光電子回折パターン
  - 前方散乱方向への強度の集中
  - 解析の手法が確立されている?
- 低速光電子回折 ( $KE \leq 250$  eV)
  - 後方散乱方向での強度の大きな変動  $\Rightarrow$  EXAFS 変動
  - 化学シフトの大きさの違いによるサイト選択性
  - 振動準位分離

7

7

## 第一歩: レーザー配列した分子のアンジュレタ光によるプローブ

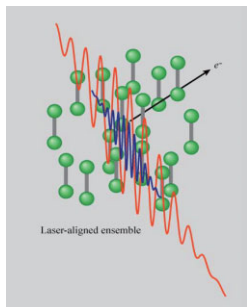


8



## 測定スキーム2 非断熱的レーザー配列・配向させた分子からの 光電子角度分布測定

- 非共鳴過程による分子配列
  - 非断熱過程 (sub ps)
    - 高強度フェムト秒レーザー
  - 断熱-非断熱中間領域
    - 高強度フェムト秒レーザー + パルス伸長
- “着衣”分子についての新しい情報が得られる可能性?
- 非解離性電離過程についての MFPAD 測定に適用?



17

## まとめ

- 時間コヒーレント性なしでは本質的に異なる研究は困難
- 強レーザー場中原子分子の挙動・電子的構造
  - 試みの実験からは有効なデータが得られてない
  - ナノ秒パルスレーザー場 + 100 ps SR プローブ
- CSR-ICS による軟 X 線は利用可能
  - 10%BW でも pulse あたりはアンジュレータ光と同程度
  - 光学レーザーのより早い繰返しが必要
  - 新しい情報を得るためには異なる測定スキーム
- ERL実機で時間分解光電子回折実験を展開

18

18

## 謝辞: これまでの実験・計算

- |  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• 実験           <ul style="list-style-type: none"> <li>- 柳下明 教授</li> <li>- 山内薫 教授</li> <li>- 寺本高啓 博士</li> </ul> </li> <li>• 実験アドバイス           <ul style="list-style-type: none"> <li>- 酒井広文 准教授</li> <li>- 峰本紳一郎 博士</li> <li>- 岩崎純史 博士</li> </ul> </li> <li>• PFスタッフの皆様</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 散乱理論計算           <ul style="list-style-type: none"> <li>- 藤川高志 教授</li> <li>- 篠塚寛志 博士</li> <li>- 風間美里 氏</li> </ul> </li> <li>• 研究助成           <ul style="list-style-type: none"> <li>- 松尾学術振興財団</li> <li>- 科研費</li> <li>- 特定領域研究<br/>“強光子場分子制御”</li> </ul> </li> </ul> |
|--|--|

この他多くの方々の協力により  
研究を進めることができました  
ありがとうございました

19

19

# 円偏光レーザーコンプトン散乱ガンマ線による動的スピン磁気計測

坂井 信彦

兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 客員研究員

## Dynamic Spin Magnetization Measurements using Circularly Polarized Laser Compton Scattered $\gamma$ rays

Nobuhiko SAKAI

*Laboratory of Advanced and Technology for Industry, University of Hyogo*

It is possible to obtain circularly polarized  $\gamma$  rays by colliding circularly polarized Laser photons with an energetic electron beam. Following a brief report on a recent experiment of spin-dependent Compton scattering using 1.7 MeV circularly polarized Laser Compton Scattering (LCS)  $\gamma$  rays, a new technique for dynamic magnetization measurements with LCS  $\gamma$  rays will be proposed, which can be useful to examine spin-dependent dynamic magnetic phenomena.

はじめに

コンプトン散乱の磁気散乱は、その散乱強度が電子スピン成分にのみ依存して、軌道磁気成分には因らないという特徴がある。また、コンプトン散乱した光子は、散乱前の電子の運動量のドブラー効果を受けて、エネルギーに広がりを持つので、そのエネルギー分布測定から、個体内電子の運動量密度分布が判る。このようなコンプトン散乱の特色は磁性体の電子状態を研究する一手法として利用されてきた。全コンプトン散乱強度から、電子スピンの依存する成分（磁気成分）を分離するには、試料の強磁性体の磁化を反転させ、その前後の変化を差分として得る手法が採られてきた（Magnetization Reverse: MR 法）。他方、円偏光の左右廻りを切替える手法（Helicity Reverse: HR 法）も原理的には可能であったが、シンクロトロン放射光の発生装置を含む光源の制約などから、現実的ではなかった。そのため、一定磁場下での温度変化にともなう磁気相転移、初期磁気ヒステリシス曲線、あるいは時間変化する現象などの測定はなされていない。

現状

最近、Spring-8 地区の New SUBARU 放射光施設で円偏光させた炭酸ガスレーザー（ $\lambda =$

10.6 $\mu$ m) を 1-GeV の放射光用の 200 mA 蓄積電子ビームに照射して、1.7 MeV のガンマ線を得ることが出来た。さらにこのガンマ線を磁化させた鉄で磁気コンプトン散乱させることにより、このガンマ線が円偏光していることが確認できた。スリットで切り出されたガンマ線のエネルギー分解能  $\Delta E/E$  は約 5 %、試料位置での光子数は  $10^7$  個/秒と見積もられた。今回の実験では、レーザー光の偏光切り替えを、 $\lambda/4$  波長板を手動で回転させて行い、磁気コンプトン散乱成分の分離は、MR 法で行った。あわせて、HR 法を試みたが、差分としての磁気成分が正常に得られなかった。原因は  $\lambda/4$  波長板による円偏光切り替えに伴い、直線偏光パラメータもわずかに変化したためと推察している。

#### 今後の展望

HR 法の不備を補うための LCS ガンマ線の直線偏光パラメータの測定は、別途検出器を設置すれば可能であるので、近日中に HR 法を実施する予定である。今後、円偏光切り替えを、たとえば Pockels Cell により電動化すれば、100 kHz までの高速反転が期待できる。こうした LCS 光源の特徴を活用すれば、従来の MR 法ではできなかった磁性現象が測定可能となり、またガンマ線光子数をさらに高めれば、交流磁場に伴う磁化の遅れなどが検出される、いわゆる交流磁化に対応するスピン成分磁化の交流特性も測定可能であると考えられる。この高速偏光切替え技法はコンプトン散乱実験に限らず、他の X 線散乱・吸収実験にも有効と思われる。



円偏光レーザーコンプトン散乱ガンマ線による動的スピンの磁気計測

坂井 信彦

兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所

レーザーコンプトン散乱(LCS)=レーザー誘起コンプトン散乱  
=逆コンプトン散乱

1

レーザーコンプトン散乱 (LCS)  
ガンマ線の円偏光の確認実験

共同研究者：宮本修治, 小泉昭久, 堀川賢

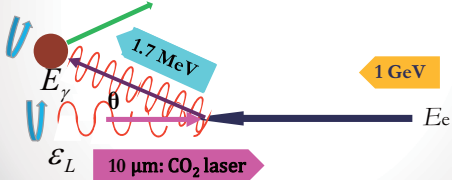
- 1/4 板によりCO<sub>2</sub> レーザーを円偏光にする。
- ニュースパル蓄積リングの1-GeV 電子線により LCS ガンマ線を放射させる。
- Fe試料での磁気コンプトン散乱測定によりLCS ガンマ線の円偏光の確認をする。
4. 将来展望

2

Laser Compton Scattered (LCS)  $\gamma$  rays

$$E_\gamma = \frac{4\gamma^2 \varepsilon_L}{1 + (\gamma\theta)^2 + 4\gamma\varepsilon_L(mc^2)}, \quad \gamma = \frac{E_e}{mc^2}$$

Spin Dependent Compton Scattering



3

コンプトン散乱断面積の偏光依存性

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{e^2}{mc^2}\right)^2 \frac{mc}{hK} (\Phi_0 + \Phi_{spin})$$

$$\Phi_0 = 1 + \cos^2\theta + P_1 \sin^2\theta + \frac{E_0 - E}{mc^2} (1 - \cos\theta)$$

$$\Phi_{spin} = -(1 - \cos\theta) P_3 \frac{h}{mc} \frac{1}{K} [\vec{n} \cdot (\vec{k}_0 \cos\theta + \vec{k})]$$

$$K = |\vec{k}_0 - \vec{k}|$$

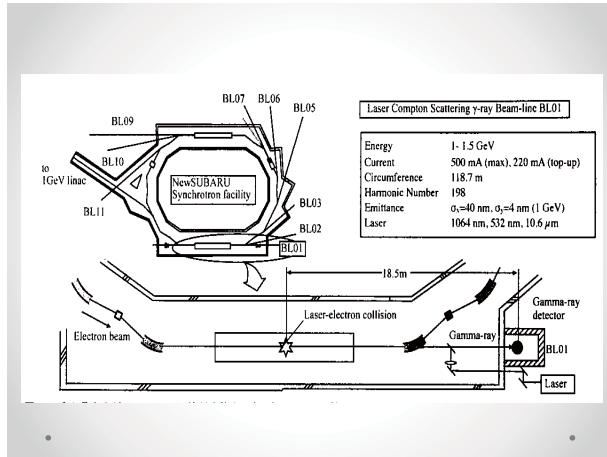
Stokes parameters

- $P_1$ : relating to linear polarization of photons
- $P_3$ : circular polarization of photons
- $n$ : unit vector denoting spin direction

4



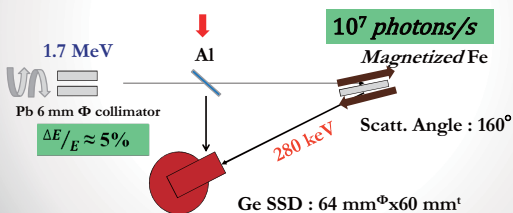
5



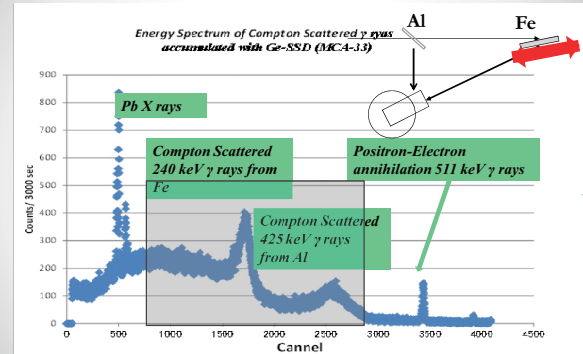
6

Photons at New SUBARU BL-1B in Spring-8

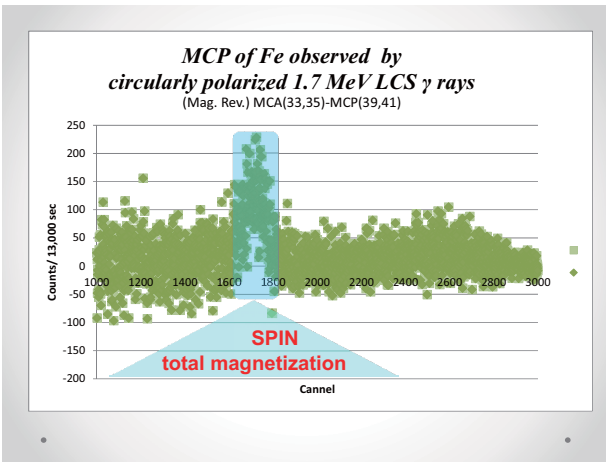
$E_e = 974$  MeV, 200 mA  
 $\varepsilon_L = 10$  μm (CO<sub>2</sub>-CW laser) 4W  
 $E_\gamma \approx 1.7$  MeV (for  $\theta = 0$ )



7



8



9

## LCS ガンマ線の利点

- ・ 確立したレーザー光技術が容易に利用可能
- ・ (a) ガンマ線の偏光切替えが迅速に行える  
現状の放射光では極めて困難  
100 kHz (Pockels Cell) 利用
- (b) 短パルスガンマ線の発生

時間に依存する動的現象の研究に有効であろう。

10

## Laser Compton Scattered (LCS) $\gamma$ rays

$$E_\gamma = \frac{4\gamma^2 \varepsilon_L}{1 + (\gamma\theta)^2 + 4\gamma\varepsilon_L (mc^2)}, \quad \gamma = \frac{E_e}{mc^2}$$

11



12

## CdTe Pockels Cell for CO<sub>2</sub> laser

- ・ 製造元例：米国 II-VI Japan Co.
- ・ CdTe 結晶：3 x 3 mm
- ・ 入力仕様：直線/円偏光ビーム up to 10W
- ・ 偏光切替： 1,500V for  $\lambda/4$  wave shift.  
**Up to 100 kHz**  
(rectangle wave form acceptable)

13

## 応用実験 (案)

産業利用：  
磁気コンプトン散乱実験による、交流電源変圧トランスの実機の磁気ヒステリシス曲線の直接測定

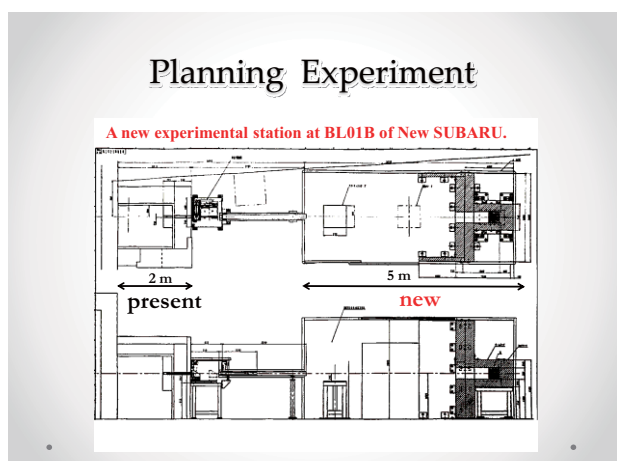
14

L/R Circularly Pol. LCS  $\gamma$  rays 50 Hz transformer

100 channels/cycle  
Compton 散乱強度計測

50 x 2 分割

15



16

# EEHG によるアト秒パルス放射光

大見 和史

KEK, 加速器研究施設

## Attosecond pulse generation using Echo-Enabled Harmonic Generation

Kazuhito Ohmi

KEK, Accelerator Lab.

### <Synopsis>

EEHG is proposed to produce higher harmonics generation of a seed laser than several 10-th order by G. Stupakov in SLAC. Beam is modulated by the seed laser, smeared by a slippage and is modulated again by another seed laser. A high frequency component of the beam distribution is produced by the similar way like “Somen cooking”. D. Xiang (SLAC) et al. shows that the method is also useful for attosecond pulse generation. Beam, which is modulated by femtosecond laser, now generates attosecond pulse. In this presentation, mechanism of the pulse generation is explained by using 1 dimensional simulation in  $(z, \Delta p/p)$  phase space. An attosecond pulse system using EEHG is being designed for ERL Parameters of beam and laser-undulator system and possible specification of the output pulse are discussed.

EEHG はシードレーザーでビームに密度変調をつけ、シードレーザーの数十分の1の波長のコヒーレント光を発生させる手法を SLAC の G. Stupakov が提案した。ビームの進行方向位相空間 $(z, \Delta p/p)$ 内での分布を、ソーメン作りのようにのぼし、たたみ、高周波成分を作っていく。その後 D.Xiang (SLAC)らによりアト秒パルス生成に EEHG が有効であることが示された。フェムト秒レーザーでビームを加工することでアト秒パルスを生成する。本発表ではパルス発生メカニズムを、1次元シミュレーションを使って解説する。ERL に導入した場合の、発生装置を構成する、レーザー、アンジュレータのパラメータ、それに対してどのようなパルスが作れるか論じる。

# Attosecond X ray pulse generation using EEHG

K. Ohmi (KEK)  
Compact ERL Science workshop  
July 30-31, 2012

Acknowledge to S. Kamada, S. Adachi

1

## Introduction

- 10 asec =  $10^{-17}$  sec, ct=3nm,  $\lambda < 3$ nm
- バンチ長3nmは難しい
- それでバンチ内の~nmの領域に微少密度構造を作り、パルス長~nmコヒーレント光を放出させる。
- バンチのそれ以外の部分からはインコヒーレント光が出るが弱い。

2

どのようにして微少構造を作るか

### 1. 短パルスレーザー

例えば Ti-Sapphire laser 800nm,  $\sigma_t < 10$  fsec,

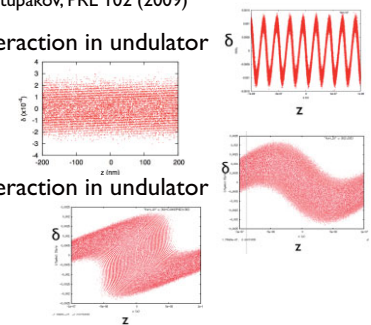
### 2. Beam Echo, Echo Enabled Harmonic Generation

3

## Echo Enabled Harmonic Generation

G. Stupakov, PRL 102 (2009)

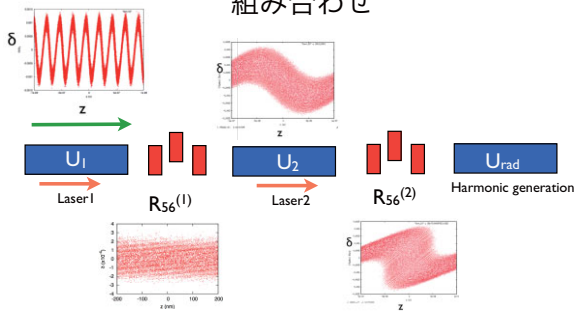
1. Laser beam interaction in undulator
2. Large Slippage
3. Laser beam interaction in undulator
4. Short Slippage
5. Harmonic generation



点は各電子の進行方向位相空間位置( $z, \delta = \Delta p/p$ )

4

アンジュレータと slippage section  $R_{56}$  の組み合わせ

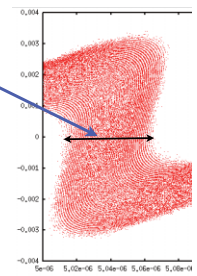


5

## Atto-sec pulse generation

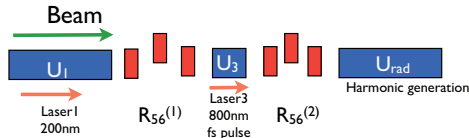
D. Xiang et al., PRST-AB12 (2009)

- パルス長として使う。
- EEHGでは長パルスレーザーを用いるためレーザー周波数のコヒーレント光のマイクロパルスの繰り返し。
- 短パルス高強度レーザーにより単パルス発生



6

## Parameters ERL



- E=3 GeV
- $N_e = 6.25 \times 10^8$ ,  $z = 0.1$ mm, I=300A
- $\sigma = 1$  mm mrad
- Energy spread  $E = 600$  keV,  $E/E = 2 \times 10^{-4}$
- U1 and U2:  $U = 25$ cm 10 period
- U3:  $U = 20$ cm 2 period

7

## Laser beam interaction at $U_1$

- E=3GeV,  $\lambda_L = 200$  nm
- $\lambda_u = 0.25$ m,  $a_u = 7.36$ ,  $B_u = 0.315$ T,  $L_u = 1.5$ m

$$\frac{cB_{u,y}}{E_0} = \frac{1}{\gamma} \frac{\partial a_{u,x}}{\partial s} = -\frac{a_u k_u}{\gamma} \sin k_u s \quad a = \frac{e}{mc} \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \end{pmatrix}$$

- z- $\delta$  運動  $H = \frac{1}{2\gamma^2} \delta^2 + \frac{a_u a_L}{2\gamma^2} \cos(k_L z + \phi)$   
 $\Delta\delta \sim \frac{a_u a_L}{2\gamma^2} k_L L_u$

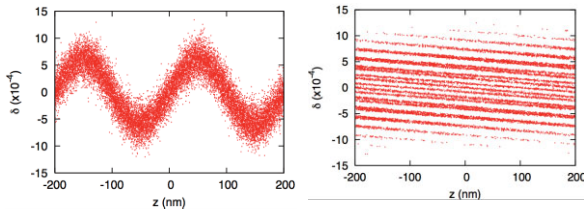
- $\frac{\Delta\delta}{\sigma_\delta} = 3$  になるようレーザーでモジュレーションをかける。  $a_L = 7.2 \times 10^{-5}$   
 $\frac{\Delta\delta}{\sigma_\delta} \gg 1$  以上だが  $\Delta\delta$  を大きくしたくない。最終的にパルス長に効く

8

## Beam distribution after $U_1$

- $a_{L1}=7.2 \times 10^{-5}$ ,  $\Delta\delta/\sigma_\delta=3$  Slippage  $R_{S6}^{(1)}=1.1\text{mm}$
- $P=0.26\text{mJ}$ ,  $260\text{MW}$   $k_L \Delta\delta R_{S6}^{(1)} = 22$  にとる。

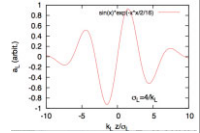
~縞の数  $\pi$ などの振数あり



9

## 極短パルス発生

- 上述の方法でバンチ内に横縞(エネルギー方向)を作る。



- 短パルス(~10 fs)高強度レーザーを使い、ビームの一部に大きなChirpを作る。

$$H = \frac{1}{2\gamma^2} \delta^2 + \frac{a_u a_L}{2\gamma^2} e^{-z^2/2\sigma_L^2} \cos(k_L z + \phi)$$

- Slippageにより縦縞に変換、attosecパルス発生

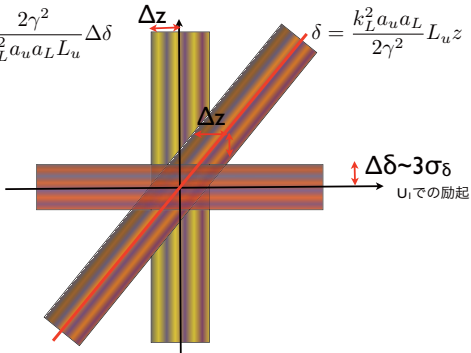
10

## パルス長 $\Delta z$

- Energy spread  $6 \times 10^{-4}$  のビームを位相空間内で立てる

$$\Delta z = \frac{2\gamma^2}{k_L^2 a_u a_L L_u} \Delta\delta$$

$$\delta = \frac{k_L^2 a_u a_L L_u z}{2\gamma^2}$$



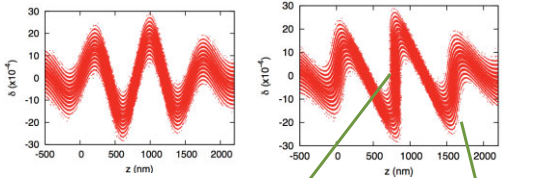
11

## パルス発生パラメータ

- ビームエネルギー広がり  $\sigma_\delta=2 \times 10^{-4}$ .
- 高強度レーザーとして  $\lambda_L=800\text{nm}$  (Ti-sapphire).  
パルス長  $\sigma_L=500\text{nm}=1.7\text{fs}$ ,  $\sigma_{rL}=0.18\text{mm}$
- アンジュレータ  $\lambda_u=20\text{cm}$ , 2極, 長さ  $40\text{cm}$
- 100asec,  $a_L=0.0033$ ,  $P=0.19\text{mJ}$ ,  $19\text{GW}$ ,  $R_{S6}^{(2)}=0.075\text{mm}$
- 30asec,  $a_L=0.011$ ,  $P=2.2\text{mJ}$ ,  $216\text{GW}$ ,  $R_{S6}^{(2)}=0.022\text{mm}$
- 10asec,  $a_L=0.034$ ,  $P=19\text{mJ}$ ,  $1.9\text{TW}$ ,  $R_{S6}^{(2)}=0.01\text{mm}$
- 10asec,  $\sigma_\delta=0.5 \times 10^{-4}$ ,  $a_L=0.01$ ,  $P=1.2\text{mJ}$ ,  $122\text{GW}$ ,  $R_{S6}^{(2)}=0.025\text{mm}$

12

## Simulation Example: 100 asec



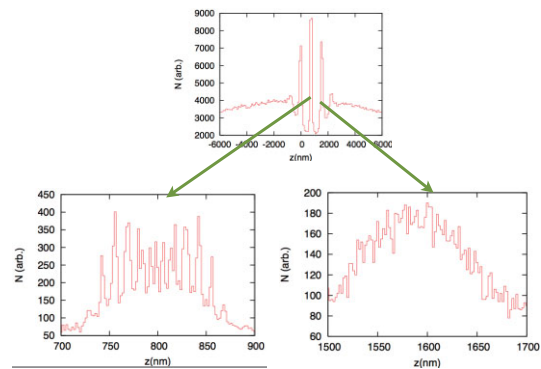
- Single asec pulse is generated.

Coherent radiation

No coherence

13

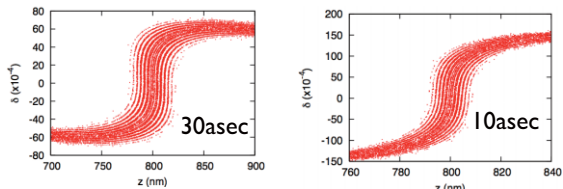
## Longitudinal profile



14

## 30 asec, 10 asec

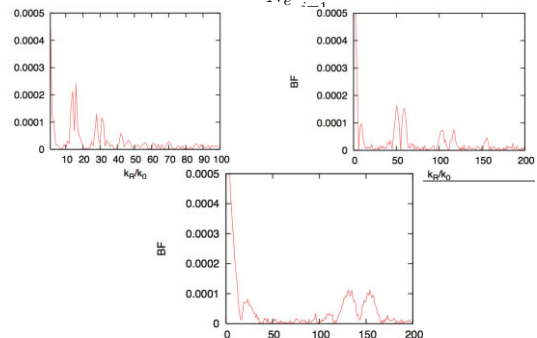
- 帯の幅は  $\Delta\delta$ 、帯の縞模様は  $R_{S6}^{(1)}$  で決まる。  $k_L \Delta\delta R_{S6}^{(1)} = 22$
- あまり模様を多くすると、最終アンジュレータで光が出せるかが問題になる。
- $a_{L3}$  を大きくしてエネルギー方向に引き延ばせば、パルス長は短くなる。



15

## Bunching factor

$$BF(h) = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} e^{-ihk_L^{(1)} z_i}$$



16

## 電磁場の変化(1次元モデル)

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial s^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) a_{L,x} = -\frac{e\mu_0}{mc} j_x \quad \frac{\partial}{\partial x}(\nabla \cdot \mathbf{a}) = 0$$

$$a_{L,x}(s) = \int \hat{a}_L(s, \omega) \exp(k_L s - \omega t) d\omega$$

$$\frac{\partial^2 \hat{a}(s)}{\partial s^2} \approx 0 \quad k_L = \omega/c$$

- Source: beam motion

$$j_x(s, t) = \sum_i e^{-\frac{a_u c}{\gamma}} \cos k_u s \delta(s - s_i(t))$$

$$2i \int k_L \frac{\partial \hat{a}(s, \omega)}{\partial s} e^{i(k_L s - \omega t)} d\omega \approx - \sum_i \frac{e^2 \mu_0 a_u}{2\gamma} (e^{ik_u s} + e^{-ik_u s}) \delta(s - s_i(t))$$

- Integral over  $e^{i\omega t} dt$

$$2ik_L \frac{\partial \hat{a}(s, \omega)}{\partial s} \approx - \sum_i \frac{e^2 \mu_0 a_u}{2\gamma} (e^{-i(k_L s - \omega t_i - k_u s)} + e^{-i(k_L s - \omega t_i + k_u s)})$$

$$2ik_L \frac{\partial \hat{a}(s, \omega)}{\partial s} \approx - \frac{e^2 \mu_0 a_u}{2\gamma} \sum_i e^{-ik_L z_i} \quad z = s - ct + \frac{k_u}{k_L} s$$

17

## Radiation power

$$P(t) = \frac{e^2 c^2 Z_0^2 a_{u,R}^2 (J_0(\xi) - J_1(\xi))^2 k_R^2}{32\pi \sigma_x^2 \gamma^2 k_u^2} \left| \sum_j e^{ik_R c(t_j - t)} \right|^2$$

$$\xi = \frac{a_{u,R}}{4 + 20 \frac{a_{u,R}^2}{R}} \quad Z_0 = 377\Omega$$

$$e^{ik_R c(t_j - t)} = e^{-ik_R z_j + ik_u c t} \quad z_i = s \left(1 + \frac{k_u}{k_L}\right) - ct_i$$

- Undulator  $\lambda_R = 2\text{nm}$ ,  $\lambda_u = 4\text{cm}$ ,  $a_u = 1.6$ ,  $N_{\text{per}} = 12$
- $P = 110\text{MW}$ .

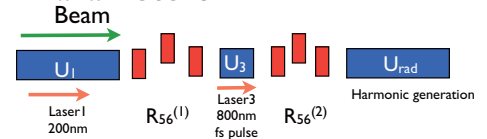
18

## まとめ

- EEHGとcoherent radiationを使ったアト秒パルス生成は原理的に可能である。
- エネルギー広がり  $\sigma_\delta$  をパルス長に変換するので、 $\sigma_\delta$  が小さい方が得。
- 空間電荷、3次元効果の影響は調べなければならない。ビーム強度は可変だが、パワーは自乗。インコヒーレント放射光効果は小さい。

19

## Parameters ERL



- $U_1$ :  $\lambda_u = 0.25\text{m}$ ,  $a_u = 7.36$ ,  $B_u = 0.315\text{T}$ ,  $L_u = 1.5\text{m}$
- Laser 1:  $\lambda_L = 200\text{nm}$ ,  $a_{L,1} = 7.2 \times 10^{-5}$ ,  $P = 0.26\text{mJ}$ ,  $260\text{MW}$
- $R_{56}^{(1)} = 1.1\text{mm}$
- $U_2$ :  $\lambda_u = 0.2\text{m}$ ,  $L_u = 0.4\text{m}$
- Laser 3:  $\lambda_L = 800\text{nm}$ ,  $\sigma_L = 500\text{nm} = 1.7\text{fs}$ ,  $\sigma_{r,L} = 0.18\text{mm}$ ,  $a_L \sim 0.01$ ,  $P_{dt} > 1\text{mJ}$ ,  $P > 100\text{GW}$
- $R_{56}^{(2)} < 0.1\text{mm}$
- $U_{\text{rad}}$ :  $\lambda_u = 0.04\text{m}$ ,  $L_u = 0.5\text{m}$

20

Thank you for your  
attention

21



# THz 光を用いた分光研究と cERL への期待

木村 真一

分子科学研究所 UVSOR 施設

## THz spectroscopy using Compact ERL

Shin-ichi KIMURA

UVSOR Facility, Institute for Molecular Science

### <Synopsis>

Terahertz coherent synchrotron radiation (THz-CSR) from the Compact Energy Recovery Linac (cERL) is expected to be  $10^9$  times higher average intensity than conventional incoherent IR/THz synchrotron radiations and  $10^2$  times higher peak power in 0.1 % band width than laser THz radiation. In this talk, expected applications using THz-CSR from cERL are described.

コンパクト ERL (cERL) から発せられるテラヘルツ (THz) コヒーレント放射 (CSR) は、従来のインコヒーレントな赤外・THz 放射光に比べて平均強度で  $10^9$  倍強いことが予想されており、かつ、0.1%バンド幅でのピーク強度もパルスレーザーを使った THz 放射に比べて 2 桁程度強いことが予想されている。そこで、この THz-CSR を利用したまったく新しい研究が期待される。

我々は、UVSOR で開発してきたレーザーสライスによる THz-CSR を利用した研究を展開するため、文科省委託事業「量子ビーム基盤技術開発プログラム」のサポートにより、THz-CSR 専用ビームラインを建設した。そこで展開する研究の 1 つは、THz-CSR と同じ電子バンチから発生する真空紫外コヒーレント高次高調波 (VUV-CHG) と組み合わせた THz ポンプ・光電子プローブ分光による低エネルギー電子構造の研究である。このビームラインは現在建設・調整中であり、年度内には何らかの結果が求められている。

本講演では、UVSOR で展開している THz-CSR 研究について紹介すると共に、cERL で展開することが期待される研究について述べる。

Shin-ichi KIMURA [kimura@ims.ac.jp]  
UVSOR Facility, Institute for Molecular Science, JAPAN

# THz光を用いた分光研究と cERLへの期待

**Shin-ichi KIMURA**

UVSOR Facility, Institute for Molecular Science, and School of Physical Sciences, The Graduate University for Advanced Studies, Okazaki 444-8585, Japan

第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ  
Compact ERL Science Workshop II July 30th-31st, 2012, KEK Tsukuba  
2012年7月30日(月) ~ 31日(火), 研究本館小林ホール

1

Shin-ichi KIMURA [kimura@ims.ac.jp]  
UVSOR Facility, Institute for Molecular Science, JAPAN

## Outline

- IR/THz Synchrotron Radiation to Coherent Synchrotron Radiation (CSR)
  - What's THz?
  - IR/THz-SR
  - Present status of THz-CSR at UVSOR-III
- CSR from cERL
  - Expected average/peak intensity
  - Proposal scientific program
  - Other intense THz source project in the world
- Conclusion

3

Shin-ichi KIMURA [kimura@ims.ac.jp]  
UVSOR Facility, Institute for Molecular Science, JAPAN

## Terahertz

1 THz = 4.13 meV = 52 K = 300 μm = 33.3 cm<sup>-1</sup>

BL6B @ UVSOR-II  
The highest-flux IR/THz BL  
[SK et al., Infrared Phys. Tech. 49, 147 (2006).]

3-dimensional magic mirror  
[SK et al., NIMA 467-468, 437-440 (2001).]

5

Shin-ichi KIMURA [kimura@ims.ac.jp]  
UVSOR Facility, Institute for Molecular Science, JAPAN

## Bursting emission at UVSOR-II

Time structure of THz bursting detected by YBCO detector.  
[P. Petra, SK et al., submitted to IEEE Trans. THz Sci. Tech.]

several 100 ps

LN<sub>2</sub>-cooled YBCO detector  
[P. Probst et al., APL 98, 043504 (2011).]

[Y. Takahima, SK et al., JJAP 44, L1131 (2005).]

8

Shin-ichi KIMURA [kimura@ims.ac.jp]  
UVSOR Facility, Institute for Molecular Science, JAPAN

## Acknowledgments

M. Katoh, M. Adachi, H. Zen, M. Shimada, Y. Taira, K. Imura @ UVSOR Facility since 2012

C. Evain, C. Szwarz, S. Bielawski, T. Tanikawa @ Université des Sciences et Technologies de Lille, FRANCE

M. Hosaka, N. Yamamoto, Y. Takashima @ Nagoya University

T. Takahashi @ Kyoto University

P. Probst, A. Scheuring, K. Il'in, S. Wunsch, M. Siegel @ KIT, GERMANY

Financial support  
Quantum Beam Technology Program (FY2008-2012) of MEXT, Japan.

2

Shin-ichi KIMURA [kimura@ims.ac.jp]  
UVSOR Facility, Institute for Molecular Science, JAPAN

## Terahertz

No intense light source in THz

1 THz = 4.13 meV = 52 K = 300 μm = 33.3 cm<sup>-1</sup>

Radio wave ← "THz gap" → Optics

Microwave millimeter wave sub-mm wave infrared visible ultraviolet X-ray

0.001 0.01 0.1 1 10 100 1000 10000 [THz]

SC gap RT molecule Si gap many elementary excitations ...

4

Shin-ichi KIMURA [kimura@ims.ac.jp]  
UVSOR Facility, Institute for Molecular Science, JAPAN

## What's coherent synchrotron radiation (CSR) ?

Electromagnetic wave Wavelength (λ)

Bunch length ≫ λ [ normal synchrotron radiation ] → incoherence

Bunch length ≤ λ [ linac, energy recovery linac, ... ] → full coherence

In storage ring, → partial coherence

6

Shin-ichi KIMURA [kimura@ims.ac.jp]  
UVSOR Facility, Institute for Molecular Science, JAPAN

## THz CSR via Laser Bunch Slicing at UVSOR-II

[Y. Takahima, SK et al., Jpn. J. Appl. Phys. 44 (2005); M. Shimada, SK et al., Jpn. J. Appl. Phys. 46, 7939 (2007); M. Shimada, SK et al., Phys. Rev. Lett. 103 (2009).]

CSR Intensity (a. u.) vs Wave number (cm<sup>-1</sup>)

SR Power emitted by an electron bunch

$$P = P_0 (N_e + N_e^2 F_e)$$

$$F_e = \left( \int \cos(2\pi z / \lambda) S(z) dz \right)^2$$

P<sub>0</sub>: SR power from a single electron  
N<sub>e</sub>: Number of electrons in a bunch  
F<sub>e</sub>: Form factor of electron bunch  
S(z): Longitudinal density distribution of electron bunch

CSR

8

### Quasi-monochromatic CSR generated by amplitude-modulated pulse laser

[S. Bielawski, SK et al., Nature Physics, 4, 390 (2008).]

Electron bunch  
Amplitude modulated pulse laser  
Undulator  
Modulated electron bunch  
Quasi-monochromatic light is emitted from a flat field in a bending magnet.

Power spectral density (arb. units)  
Frequency (cm<sup>-1</sup>)

1) Chirp  
2) make two delayed copies → recombine

- Peak power => 10,000 times of "normal" SR
- Peak wavenumber : controlled by Michelson delay → Tunable

### Combination of THz-CSR and Coherent Harmonic Generation (CHG) in the VUV region

Electron bunch  
Amplitude modulated pulse laser  
Modulator  
Modulated electron bunch  
Radiator  
THz-CSR  
VUV-CHG

Power spectral density (arb. units)  
Frequency (cm<sup>-1</sup>)

Wave length 267nm  
3<sup>rd</sup> Harmonics of Undulator Radiation  
Coherent 9<sup>th</sup> Harmonic Radiation  
700 ps

[M. Labat et al., Euro. Phys. J. D, 44, 187 (2008);  
T. Tanikawa et al., Appl. Phys. Express 3, 122702 (2010).]

### Photon flux and peak power of THz-CSR

(Calculated by M. Hosaka)

Average photon flux  
Photon energy (meV)

Peak power  
BL1B

Photon flux (ph/s/0.1% b.w.)  
@100mA b.c.

Frequency (THz)

Peak power  
Pulse Energy (nJ)  
Frequency (THz)

BL1B CSR  
BL6B SR  
BL1B SR

$2 \times 10^{17}$  ph/s/0.1% b.w. = 3.1 mW/cm<sup>2</sup>  
 $\sim 10^4$

$0.3 \mu\text{J/pulse}/0.1\% \text{ b.w.}$   
 $I_{\text{peak}} = 3.6 \mu\text{J}/\text{cm}^2$

cf.) Highest peak power of laser THz source:  
**2  $\mu\text{J/pulse}$  ← white light**  
[H. Hiroi et al., APL 98, 091106 (2011);  
Nature Commun. 2, 594 (2011).]  
 $\sim 0.005 \mu\text{J/pulse}/0.1\% \text{ b.w. @ 1 THz}$

### Compact Energy Recovery Linac @ KEK

First beam injection: 4th Quarter 2013  
First light: in 2014 (?)

By M. Shimada

	horizontal acceptance	300mrad			
current		10mA			
	electron energy [MeV]	electron charge [pC]	bunch length [ps]	CSR pulse energy [J/pulse]	CSR pulse peak power [W]
case 1	60	77	0.1	5.89E-06	2.50E+07
case 2	60	500	1	1.12E-05	4.74E+06
case 3	200	200	0.1	4.00E-05	1.70E+08
case 4	200	1000	1	4.47E-05	1.90E+07
					CSR average power [W]
					7.65E+02
					2.24E+02
					2.00E+03
					4.47E+02

### Terahertz

Output power (mW)  
Frequency (THz)

IMPATT  
Gunn  
RTD  
Multiplexer  
QCL  
III-V laser  
Lead-salt laser

1 THz = 4.13 meV = 52 K = 300  $\mu\text{m}$  = 33.3 cm<sup>-1</sup>

BL6B @ UVSOR-III  
The highest-flux IR/THz BL  
[SK et al., Infrared Phys. Tech. 49, 147 (2006).]

3-dimensional magic mirror  
[SK et al., NIMA 467-468, 437-440 (2001).]

3D magic mirror  
Magic mirror  
focus  
-0.5m  
215mrad

### THz pump-PES probe (TP<sup>3</sup>S) beamline at UVSOR-III

VUV-CHG [6-th CHG ( $h\nu = 9 \text{ eV}$ ) is expected.  $\Delta h\nu \leq 10 \text{ meV}$ ]

Ti:Sa laser  
(1 kHz, 10 mJ/pulse, 130 fs by Legend-Cryo)

PES analyzer  
Delay line  
Radiation shield wall  
Radiator  
Modulator  
UHV chamber  
Sample  
FTIR  
THz-CSR (288 x 80 mrad<sup>2</sup>)  
3D-magic mirror  
634 mm  
288 mrad  
focus

Quasi-monochromatic CSR. (Monochromator is not needed.)  
Band width  $\geq 1 \text{ GHz}$

Power spectral density (arb. units)  
Frequency (cm<sup>-1</sup>)

[S. Kimura et al., NIMA 467-468, 437 (2001).]

### Previous THz/IR pump experiments

#### THz-pump – THz-TDS probe

THz-induced Josephson plasma of LSCO  
[D. Fausti et al., Science 331, 189 (2011).]

$\Delta R/R (\%)$   
Frequency (cm<sup>-1</sup>)  
 $\tau = 5 \text{ ps}$   
Light-induced LESCO

Pump: 16  $\mu\text{m}$  (12 THz, 40 meV)

#### THz-pump – transport probe

THz-induced MIT of Pr<sub>0.7</sub>Ca<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub>  
[M. Rini et al., Nature 449, 72 (2007).]

Conductivity ( $\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ )  
Delay (ns)  
Vibrational excitation

Pump: 17 THz (71 meV)

### CSR @ J-lab. ERL

[Nature 420, 153 (2002).]

#### High-power terahertz radiation from relativistic electrons

G. L. Carr\*, Michael C. Martin†, Wayne R. McKinney‡, K. Jordan‡, George R. Nell§ & G. P. Williams‡

\* National Synchrotron Light Source, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York 11973, USA  
† Advanced Light Source Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California 94720, USA  
‡ Free Electron Laser Facility, Jefferson Laboratory, 12000 Jefferson Avenue, Newport News, Virginia 23606, USA

Electron gun  
Injector  
High voltage power supply  
2nd Recirculation Arc  
1/4 Cryomodule  
1/2 Cryomodule  
3/4 Cryomodule  
4th Cryomodule  
5th Cryomodule  
6th Cryomodule  
7th Cryomodule  
8th Cryomodule  
9th Cryomodule  
10th Cryomodule  
11th Cryomodule  
12th Cryomodule  
13th Cryomodule  
14th Cryomodule  
15th Cryomodule  
16th Cryomodule  
17th Cryomodule  
18th Cryomodule  
19th Cryomodule  
20th Cryomodule  
21st Cryomodule  
22nd Cryomodule  
23rd Cryomodule  
24th Cryomodule  
25th Cryomodule  
26th Cryomodule  
27th Cryomodule  
28th Cryomodule  
29th Cryomodule  
30th Cryomodule  
31st Cryomodule  
32nd Cryomodule  
33rd Cryomodule  
34th Cryomodule  
35th Cryomodule  
36th Cryomodule  
37th Cryomodule  
38th Cryomodule  
39th Cryomodule  
40th Cryomodule  
41st Cryomodule  
42nd Cryomodule  
43rd Cryomodule  
44th Cryomodule  
45th Cryomodule  
46th Cryomodule  
47th Cryomodule  
48th Cryomodule  
49th Cryomodule  
50th Cryomodule  
51st Cryomodule  
52nd Cryomodule  
53rd Cryomodule  
54th Cryomodule  
55th Cryomodule  
56th Cryomodule  
57th Cryomodule  
58th Cryomodule  
59th Cryomodule  
60th Cryomodule  
61st Cryomodule  
62nd Cryomodule  
63rd Cryomodule  
64th Cryomodule  
65th Cryomodule  
66th Cryomodule  
67th Cryomodule  
68th Cryomodule  
69th Cryomodule  
70th Cryomodule  
71st Cryomodule  
72nd Cryomodule  
73rd Cryomodule  
74th Cryomodule  
75th Cryomodule  
76th Cryomodule  
77th Cryomodule  
78th Cryomodule  
79th Cryomodule  
80th Cryomodule  
81st Cryomodule  
82nd Cryomodule  
83rd Cryomodule  
84th Cryomodule  
85th Cryomodule  
86th Cryomodule  
87th Cryomodule  
88th Cryomodule  
89th Cryomodule  
90th Cryomodule  
91st Cryomodule  
92nd Cryomodule  
93rd Cryomodule  
94th Cryomodule  
95th Cryomodule  
96th Cryomodule  
97th Cryomodule  
98th Cryomodule  
99th Cryomodule  
100th Cryomodule

Wavelength (cm<sup>-1</sup>)  
Frequency (cm<sup>-1</sup>)

THz 1 2 3 4  
JLab FEL Lasing (schematic)  
400 fsec  
300 fsec  
200 fsec

NLSL 800 mA 90XQV  
JLab 5mA 100pC 400 fsec FWHM 90XQV  
2000K Black Body 10 nm



**Terahertz**

CSR from Compact ERL

1 THz  
= 4.13 meV  
= 52 K  
= 300 μm  
= 33.3 cm<sup>-1</sup>

Laser-slicing CSR

BL6B @ UVSOR-III  
The highest-flux IR/THz BL

3D magic mirror

17

**Expected scientific programs**

**THz pump- ??? probe**  
(QP, Phonon,,)

- LCS X/SX probe
  - Diffraction
  - XANES/DXAFS
  - Imaging
  - (AR)PES
- THz-TDS probe
  - Absorption/reflection
- Laser probe
  - Absorption/reflection
  - ARPES
- + Laser pump + LCS X probe (by Nakamura)

**THz-probe**

- SNOM
- Wide region imaging
- Combination with x-ray imaging (absorption, phase contrast)

18

**Other CSR source projects**

**CIRCE @ ALS**  
Coherent InfraRed Center  
[http://circe.lbl.gov/]

**FLUTE: A Test Experiment**

- Allow small scale tests of THz generation, compression, radiation transport and instrumentation...
- Outline:
  - Photo injector (CTF 3 type)
  - S band normal conducting linac
  - Chicane compressor
  - THz beamline
  - Use existing bunker

[http://www.isa.au.dk/meetings/esls2011/talks/ses6/2011-ESLS-Schuh.pdf]

**TBONE @ ANKA**  
[http://ankaweb.fzk.de/conferences/TBONE/Home.html]

19

**Conclusion**

IR/THz-SR and THz-CSR activities at UVSOR-III, and expected intense THz from cERL are introduced.

- THz-CSR from cERL can bridge the THz gap.
- THz-pump PES-probe spectroscopy (TP<sup>3</sup>S) was desired at UVSOR-III.
  - The beamline was constructed and the test experiment will be performed.
- New experiments can be desired using cERL.

20

# 高強度テラヘルツパルスで誘起する非線形光学現象

廣理 英基

京都大学 物質-細胞統合システム拠点

## Nonlinear optical phenomena induced by intense terahertz pulses

Hideki Hirori

Institute for Integrated Cell-Material Sciences, Kyoto University

### <Synopsis>

We demonstrate that a 1-MV/cm terahertz pulse can generate a substantial number of electron-hole pairs forming excitons in GaAs that emit near-infrared luminescence.

ごく最近、1MV/cm を超える電場振幅を持つ THz パルスの発生が可能になり、従来の THz 線形分光に加えて THz 非線形分光研究への応用が期待されている[1]。広く使われているフェムト秒再生増幅器からの光パルス (1mJ/パルス) を典型的な非線形結晶 ZnTe を励起子したときに得られる THz パルスの電場振幅は 10kV/cm 程度であり実に 100 倍程度の高強度化である[2]。1 THz を中心周波数とする THz パルスは、比較的高い共鳴周波数を持つ物質に対してピコ秒 (10-12 秒) の間だけ持続する DC 電場としてみなせる。このため高強度 THz パルスを使えば、固体物理学における中心課題である強電場下でのブロッホ粒子の運動の詳細を明らかにすることが可能になる。また 1MV/cm の電場は 10nm の間隙を持つ電極間に 1V の電圧を加えたときに生じる値に相当し、現実的な電子デバイスでも簡単に到達しうる。このため高強度 THz パルスによる研究は、ナノ構造化・高周波化が進む半導体デバイスにおける非平衡多電子系の非線形ダイナミクスについて全く新しい知見を与え、THz 帯域で動作する新たな光デバイス開発に重要な指針をもたらすと期待される。また最近では銅酸化物高温超伝導体においては THz パルス電場によりクーパ対の数を変えずに超伝導状態の制御が実現されており、物性制御の新たなパラメーターとなることを実証している[3]。

本発表では、まずここ最近大きな進展のあったニオブ酸リチウム LiNbO<sub>3</sub>(LN)結晶を使った高強度 THz パルスの発生法について我々の実験結果とともに紹介する[1]。次に、GaAs/AlGaAs 多重量子井戸において 1MV/cm の電場振幅を持つ THz パルス励起がバンド間電子励起を可能にし、励起子発光観測を実現した最新の研究成果を紹介する[4]。

[1] H. Hirori, A. Doi, F. Blanchard, and K. Tanaka: Appl. Phys. Lett. 98, 091106 (2011).

- [2] J. R. Danielson, Y.-S. Lee, J. P. Prineas, J. T. Steiner, M. Kira, and S.W. Koch: Phys. Rev. Lett. 97, 237401 (2007).
- [3] A. Dienst, M. C. Hoffmann, D. Fausti, J. C. Petersen, S. Pyon, T. Takayama, H. Takagi, and A. Cavalleri: Nature Phys. 5, 485 (2011).
- [4] H. Hirori, K. Shinokita, M. Shirai, S. Tani, Y. Kadoya, and K. Tanaka: Nature Commun. 2, 594



# 高強度テラヘルツパルスで誘起する 非線形光学現象

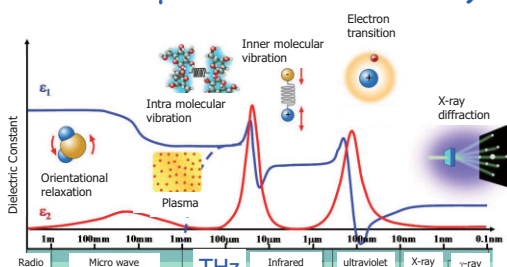
廣理 英基

京都大学  
物質-細胞統合システム拠点

## Contents

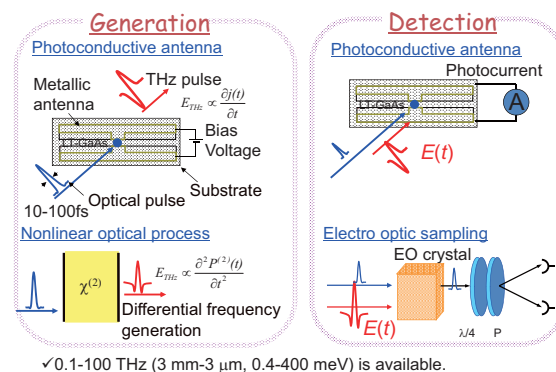
- THz time-domain spectroscopy
- Intense THz pulse generation
  - Tilted-pulse front scheme with a LiNbO<sub>3</sub> crystal
  - H. Hirori, et al., Appl. Phys. Lett. 98, 091106 (2011)
- Nonlinear THz phenomena
  - Carrier multiplication (GaAs/AlGaAs multiple quantum wells)
  - H. Hirori, et al., Nature Comms. 2, 594(2011)

## THz region (0.1-10 THz) (1THz ≅ 300μm ≅ 33cm<sup>-1</sup> ≅ 4.1meV)



Superconducting gap, Soft phonon modes in ferroelectrics, Excitonic resonance, subband transition, Intra molecular vibration of bio-molecules, Rotational mode of gases, etc.

## THz generation and detection



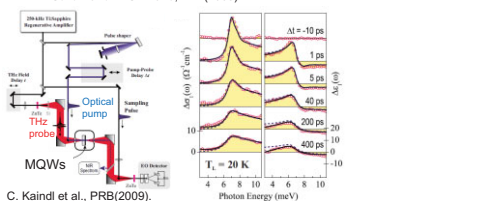
## THz Time-domain spectroscopy

✓ Electric field measurement ⇒ Complex dielectric constants.

$$E(\omega), \phi(\omega) \rightarrow \text{Sample}$$

✓ Allowing for ultrafast time-resolved measurement. Ultrafast phenomena in semiconductors, phase-transition and superconducting materials.

R. Huber et al., Nature (2001). C. Kaindl et al., Nature (2003).  
T. Suzuki and R. Shimano, PRL(2009).



C. Kaindl et al., PRB(2009).

## Contents

- THz time-domain spectroscopy
- Intense THz pulse generation
  - Tilted-pulse front scheme with a LiNbO<sub>3</sub> crystal
  - H. Hirori, et al., Appl. Phys. Lett. 98, 091106 (2011)
- Nonlinear THz phenomena
  - Carrier multiplication (GaAs/AlGaAs multiple quantum wells)
  - H. Hirori, et al., Nature Comms. 2, 594(2011)

## Nonlinear phenomena in solids with intense THz pulse

### • Resonantly THz-Driven Systems

Rabi oscillations, dressed states, the AC (or optical) Stark effect, the Autler-Townes effect, electromagnetically-induced transparency, gain without inversion, ..., etc.

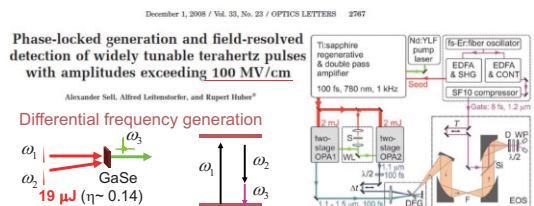


### • Nonlinear transport phenomena

Bloch oscillation, Inter-valley scattering (Gunn's effect), Impact ionizations (carrier multiplication)

### • Available for inducing phase transition phenomena

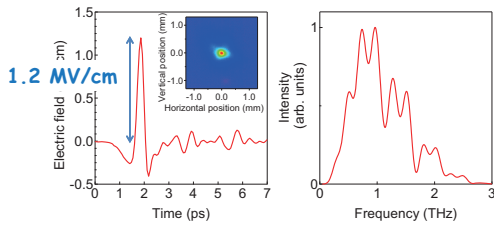
## Intense THz pulse generation (10-80 THz)



- Field strengths that outer-shell electrons in atoms experiences.
- Higher frequency region (10-80 THz) has a GOOD source! (19 μJ, η ~ 0.14).  $e/4\pi\epsilon_0 q_0^2 \sim 100 \text{ M/cm-1GV/cm}$
- Lower frequency ???

## Tilted-pulse front scheme with LiNbO<sub>3</sub> crystal (below 3 THz)

**Temporal profile and spectra** H. Hirori, et al., APL (2011)



- Nearly half-cycle sub-picosecond pulse with a maximum peak field of 1.2 MV/cm ( $3 \mu\text{J}$ ,  $\eta \sim 10^{-3}$ , spot diameter  $\sim 300 \mu\text{m}$ ).
- Around 1 THz of center frequency.
- Optical rectification of femtosecond lasers.

## Characteristic of LiNbO<sub>3</sub> for THz generation

### Good point

- High second order nonlinear susceptibility
- Large band-gap energy (3.7 eV) (less multi-photon absorption)

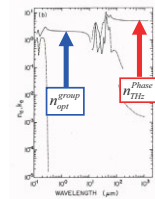
### Bad point

- Large difference between  $n_{\text{THz}}^{\text{phase}} (= 5)$  and  $n_{\text{opt}}^{\text{group}} (= 2.2)$

$\Rightarrow v_{\text{THz}}^{\text{phase}} \ll v_{\text{opt}}^{\text{group}}$   
Velocity (phase) mismatching

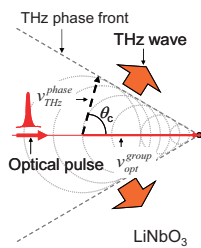
Appl. Phys. B 78, 593 (2004)

Material	$d$ (pm/V)
CdTe	81.8
GaAs	65.6
GaP	24.8
ZnTe	68.5
GaSe	28.0
LiTaO <sub>3</sub>	161
LiNbO <sub>3</sub>	168



D. Palik, Academic Press (1985).

## THz Cherenkov wave



$$v_{\text{THz}}^{\text{phase}} \ll v_{\text{opt}}^{\text{group}}$$

$\Rightarrow$  The condition necessary for the shock (or Cherenkov) wave radiation of a supersonic aircraft or bullet.

### Direction of THz wave

$$v_{\text{THz}}^{\text{phase}} = v_{\text{opt}}^{\text{group}} \cos \theta_c$$

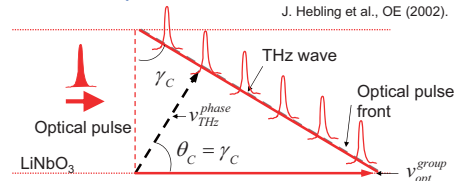
$$\cos \theta_c = n_{\text{opt}}^{\text{group}} / n_{\text{THz}}^{\text{phase}}$$

$$\Rightarrow \theta_c = 62 \text{ deg}$$

D. H. Auston et al., PRL 53, 1555 (1984).

## Velocity matching by the tilted-pulse-front scheme

J. Hebling et al., OE (2002).



### Phase velocity of THz wave

$$v_{\text{THz}}^{\text{phase}} = v_{\text{opt}}^{\text{group}} \cos \theta_c$$

### Noncollinear velocity of tilted optical pulse

$$v_{\text{opt}}^{\gamma_c} = v_{\text{opt}}^{\text{group}} \cos \gamma_c$$

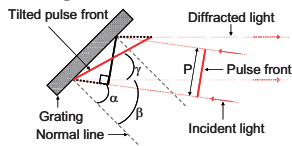
When  $\gamma_c = \theta_c$ ,

$$\Rightarrow v_{\text{THz}}^{\text{phase}} = v_{\text{opt}}^{\gamma_c}$$

Phase matching condition can be satisfied.

## How to tilt the pump pulse front?

### Grating

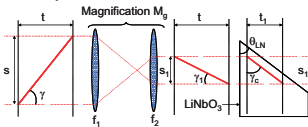


$$\tan \gamma = \frac{\cos \beta}{\sin \alpha + \sin \beta}$$

$$\sin \alpha + \sin \beta = m p \lambda_0$$

$m$ : diffraction order  
 $p$ : groove density of a grating  
 $\lambda_0$ : the central wavelength

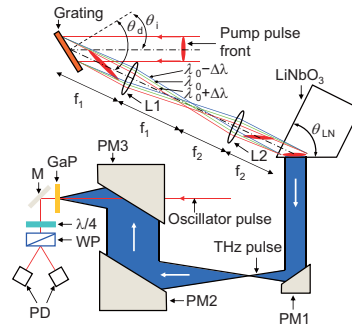
### Lens pair



$$\tan \gamma_c = \frac{m \lambda_0 p}{n_g M_g \cos \beta}$$

$n_g$ : group refractive index of LN crystal  
 $\gamma_c = \theta_c = 62^\circ$

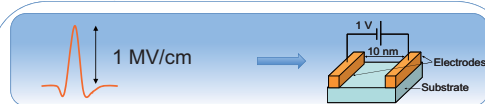
## THz pulse generation setup



- Laser source
- Ti: sapphire
  - 4 mJ/pulse
  - 1 kHz
  - 780 nm
  - 85 fs (FWHM)

- Key factors
- Good phase matching condition
  - High nonlinear susceptibility
  - High pumping power
  - Tight focusing the collimated THz beam

## Strong picosecond DC electric field



- Achieved in actual electric devices
- Useful for characterization of electric devices

### Nonlinear transport phenomena

- Bloch oscillations
- Inter-valley scattering
- Impact ionization
- Zener tunneling

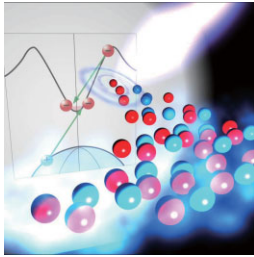
## Contents

- THz time-domain spectroscopy
- Intense THz pulse generation
  - Tilted-pulse front scheme with a LiNbO<sub>3</sub> crystal
- Nonlinear THz phenomena
  - Carrier multiplication (GaAs/AlGaAs multiple quantum wells)

H. Hirori, et al., Appl. Phys. Lett. 98, 091106 (2011)

H. Hirori, et al., Nature Comms. 2, 594(2011)

## Extraordinary carrier multiplication in GaAs MQWs gated by intense terahertz pulse



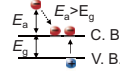
H. Hirori, et al., Nature Commun. 2, 594(2011)

## Nonlinear Transport Phenomena in Semiconductors

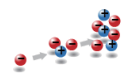
### Carrier multiplication in high electric field

• Electron accelerated by electric field can gain a kinetic energy and excite other electrons.

#### Impact ionization

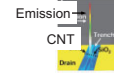


#### Carrier multiplication



### Various applications

- Avalanche photodiodes
- Electroluminescent and photovoltaic nano-devices



J. Chen et al., Science (2005).

### Fundamental

- Important for nonlinear transport phenomena.
- ➔ The elementary scattering process has been unclear.

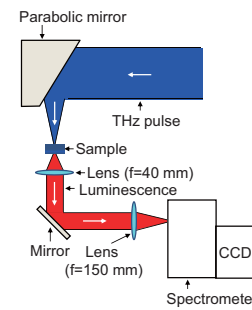
## Purpose

Clarifying carrier multiplication process of GaAs under high electric field

- THz pulse with an amplitude exceeding 1 MV/cm
  - ➔ Sufficient carrier multiplication.
- Luminescence measurement
  - ➔ Direct evidence of carrier generation.

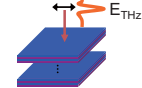
## Experimental setup for THz induced luminescence

### Setup



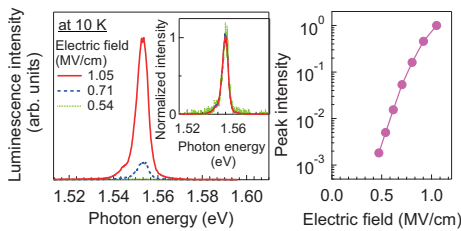
### GaAs quantum wells

- GaAs 11.9 nm
- Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As 10 nm
- Nominally non-doped (Residual dominant impurity donors are Sulfur.)
- Low temperature measurement (10 -150 K)
- The polarization of electric field is in plane and along the (100) direction of the sample



## THz induced luminescence without photoexcitation

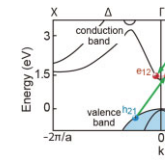
### Electric field dependence



- Luminescence centered around 1.55 eV.
- Electric field dependence shows extremely nonlinear ( $\propto \mathcal{E}^6$ ).
- The number of carriers increases by about three orders of magnitude.

## Carrier multiplication process in GaAs

### Single impact ionization



- Electrons seeded from residual impurity donors by the field ionization
  - Doubling the number of electrons.
- $$e_{11} \rightarrow e_{12} + e_{22} + h_{21}$$
- $e_y, h_y$ : electron and hole

### Carrier multiplication

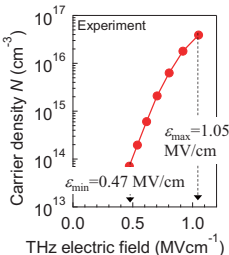
Carrier density  $N(\mathcal{E})$  after  $\langle n_i \rangle$  times impact ionization events:

$$N(\mathcal{E}) = N_0 \times 2^{\langle n_i \rangle} \quad N_0: \text{initial electron density}$$

$$\langle n_i \rangle: \text{number of impact ionization events}$$

## Impact ionization number derived from experimental result

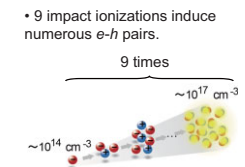
### Carrier density



### Increment of impact ionization number $\langle \Delta n_i \rangle$

$$N(\mathcal{E}) = N_0 \times 2^{\langle n_i \rangle}$$

$$\langle \Delta n_i \rangle = \log_2(N(\mathcal{E}_{\max})/N(\mathcal{E}_{\min})) \sim 9$$



## How many times do impact ionization occur?

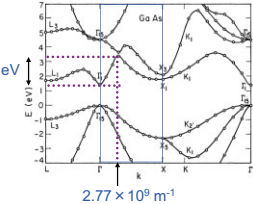
### Changing $k$ with electric field $\mathcal{E}(t)$

$$\hbar \frac{dk(t)}{dt} = -e\mathcal{E}(t)$$

- $k(t)$ : average electron wavenumber
- $\mathcal{E}(t)$ : electric field
- $e$ : elementary charge
- $\hbar$ : Planck's constant

The GaAs dispersion relation yields the  $E_{th}$  of 1.7 eV at a wavenumber  $k$  of  $2.77 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ .

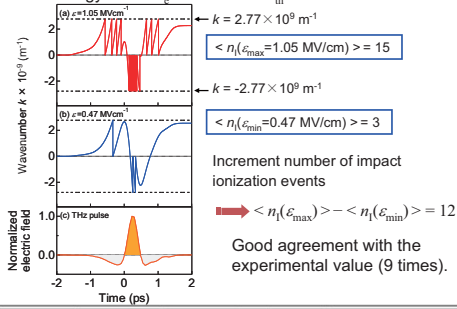
M. L. Cohen et al. Phys. Rev. 141, 789 (1966).



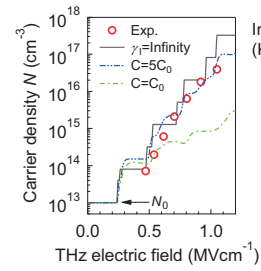
- ➔ The number of times the  $k$  exceeds  $2.77 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$  in electric field of THz pulse should be calculated.

## Calculated number of impact ionization events

- Assumption that the accelerated electrons lose all kinetic energy when  $K_e$  achieve the  $E_{th}$ .



## Experiment v.s. calculation



Impact ionization rate (Keldysh formula):

$$\gamma_i = C(E - E_{th})^2, \quad E > E_{th}.$$

$$C = C_0 = 870 \text{ ps}^{-1} \text{eV}^2 \text{ and } E_{th} = 1.7 \text{ eV}.$$

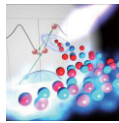
M. V. Fischetti and S. E. Laux, *Phys. Rev. B* **38**, 9721 (1988).

Good agreement of impact ionization numbers and carrier densities between the experimental and calculated results.

## Summary

### Result

- Generating the world's strongest THz pulse. (Achieving at electric field of 1 MV/cm.)
- Observation of bright luminescence by irradiating 1-MV/cm THz pulse to GaAs MQWs ( $E_g \sim 400 \text{ h}\nu_{\text{THz}}$ ).



### Outlook

- Further increasing up the THz generation efficiency.
- Studying Zener tunneling and Bloch oscillations with higher electric field.
- Applying new materials showing phase transitions.

# 大強度 THz 光源の現状と応用展開

谷 正彦

福井大学・遠赤外領域開発研究センター

## High Power THz Sources and Their Applications

Masahiko Tani

Research Center for Development of Far-Infrared Region, University of Fukui

### <Synopsis>

Recent development of high power/ high intensity terahertz radiation sources is summarized. Such high intensity terahertz sources enable us to carry out interesting researches and spectroscopies, which are not possible until recently. Some applications are illustrated and discussed.

近年、テラヘルツ(THz)波の光源技術が格段に進歩し、高強度、高出力の THz 波光源を利用した応用展開が始まっている。THz 帯発振の自由電子レーザー(FEL)、コヒーレントシンクロトロン放射光など、大規模な施設を要する光源だけではなく、フェムト秒レーザーを励起源とするパルス THz 波の発生技術が進歩したおかげで、比較的小規模な研究室レベルの装置で、ピーク電界で数 MV/cm もの高強度の THz 波電界を利用できるようになってきた。またコンパクト ERL(cERL)は自由電子レーザーやシンクロトロン放射光(CSR)などと同様、相対論的な電子ビームを用いるが、装置規模は従来のこの種の装置にくらべて格段に小型化され、かつこれまでになく高出力の THz 波を提供することができると期待されている。このような現状をかんがみ、本講演では高出力・高強度の THz 波光源を概観し、その応用例あるいは期待される応用について述べる。さらに筆者が最近取り組んでいる金属導波路構造における超集束効果（波長限界以下に電磁波を集束させる効果）を用いた THz 波の電場増強法についても触れる。

### <THz 波高出力光源>

光源は一般に広帯域光源、単色（コヒーレント）光源、パルス発振、連続発振など様々な発振特性を持ち現在、高出力光源といっても一概に定義することが難しいが、ここでは 1kW 以上の出力を平均的あるいは瞬間的に得られるものを考えることにする。この場合、現在 THz 帯の高出力光源として利用できるのは主として 2 種類の光源である。一つは相対論的速度に加速した電子ビームバンチからの電磁波放射を利用した光源であり、THz 帯 FEL, CSR, THz

発振ジャイロトロンなどであり、cERLもこの種類の光源であるといえる。FELやジャイロトロンは単一波長発振する光源であるが、CSR、cERLは広帯域なパルス状のTHz波を放射する。cERLは通常のCSRよりも格段に強い強度が得られるとされており、 $1\text{ cm}^{-1}$ あたりのピークパワーは1 MW以上と予想されている。もう一つのTHz帯高出力光源は再生増幅器などで増幅されたフェムト秒レーザーを非線形光学結晶などの媒質に照射し、非線形な波長変換過程により高ピーク強度のパルス状THz波を発生させるものである。ピーク電界ですでに数MV/cm(数MW/cm<sup>2</sup>)のTHzパルスの発生が報告されている。ただしパルス幅はピコ秒前後で数kHz繰り返しのものが多く、平均出力としては数mW(数μJ/pulse)程度である。平均出力は低いもののcERLと並んで現在もっとも高いTHz波のピーク強度が得られる光源であるといえる。またフェムト秒レーザーのほうが、装置規模が小さいという利点もある。

#### <高強度THz波の応用>

FELはさまざまな波長で発振可能なので、汎用性が高いと言えるがTHz帯発振のFEL施設は世界的にも数か所しかない。一方サブTHz発振のジャイロトロンは日本においては福井大の遠赤外領域開発センターなどが主導して開発を行っており、DNP-NMR(動的核偏極により核磁気共鳴信号を増強する手法)、セラミックのシンタリング(焼結)、THz帯ESRの光源として応用が展開されている。

cERLおよびフェムト秒レーザー励起による高ピーク強度のTHz波の応用として考えられるものを、すでに報告されているものを含め以下に列挙する。

#### (1) THz波による多光子励起

ピークパワーが大きく、平均パワーの低いTHzパルスを用いて、熱的な影響を極力抑えて、半導体中のキャリアを多光子励起し、その後の緩和過程を時間分解で調べることができる。フェムト秒レーザー励起のTHzパルスを利用して、InSb[1]とGaAs[2]について電子の多光子励起・イオン化を観測した例が報告されている。

#### (2) THz波による Ponderomotive force

振動電磁界中に置かれた電荷は電磁波の強度の勾配に比例した力を受ける(Ponderomotive force)。この力は波長の自乗に比例するため、高強度THz波により非常に強いPonderomotive forceを自由電子や半導体中のキャリアに作用させることができる。

#### (3) THz非線形物性

そのほか、高強度のTHz波を用いた分子や結晶の非線形応答の時間分解観測、THz波によるホールバーニング分光など、可視や近赤外域で行われているさまざまな非線形分光がTHz帯でも可能になると予想される。

[1] Hoffmann, *et al*, Phys. Rev. B **79**, 161201(R) (2009).

[2] Hirori, *et al*, Nature Comm. **2**, 594 (2011).



## 大強度THz光源の現状と応用展開

谷 正彦 (福井大学・遠赤外領域開発研究センター)

7月31日(火) 9:45~10:05

1

## 講演概要

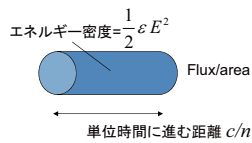
1. はじめに
2. THz帯の高強度・高出力光源  
電子ビーム型  
電子管型  
フェムト秒レーザー励起
3. 電界増強法
4. cERLからのTHz波の応用

2

## 光強度と電場の関係

光強度と電場の関係:

$$I = \frac{c}{n} \frac{1}{2} \epsilon E^2$$



光強度と電場の換算式

$$I [\text{W/cm}^2] = 1.33 \times 10^{-3} E^2 [\text{V/cm}]$$

物質の破壊電界  $E = 10^{10}$  V/cm  
 $= 10$  GV/cm

~ MV/cm (~GW/cm<sup>2</sup>)の電界においても様々な非線形現象が観測される。

→  $I \sim 10^{17}$  [W/cm<sup>2</sup>]  
 この強度に達する前に摂動論的な扱いができなくなる。

3

## THz帯での主な光源または発振器

	単一波長型	広帯域型
固体発振器	ガンダイオード, インパットダイオード, 共鳴トンネルダイオード	
レーザー	CO <sub>2</sub> レーザー励起分子気体レーザー, 半導体(p-Ge)レーザー, 量子カスケードレーザー	
電子ビーム, 電子管型	クライストロン, ジャイロトロン, 後進波管, 自由電子レーザー	コヒーレントシンクロトロン放射光
熱放射型		黒体炉, グローバー, 高圧水銀灯
光エレクトロニクス型	差周波ビートによる光混合, 光パラメトリック発振, 差周波発生	超短パルスレーザーによる光スイッチング, 過渡的光整流効果

4

## 自由電子レーザー(FEL)

どのような波長でも発振できる強力なオールマイティなレーザー。ただし、大規模な施設を要する。

現在テラヘルツ帯で発振しているのはUCSB(カリフォルニア州立大学サンタバーバラ校)のFELほかごく少数

出力 500 W - 5 kW  
 発振周波数: 120 GHz to 4.8 THz (可変)  
 パルス幅: 1-20 μsecs, 繰り返し 1 Hz

5

## コヒーレントシンクロトロン放射

インコヒーレント放射  $\propto N_e$

コヒーレント放射  $\propto N_e^2$  (Ne: 電子ビームバッチの電子数)

$$P_{coh} = \{Ne(1-f(\omega)) + f(\omega)(Ne)^2\} \quad a: \text{加速度}, c: \text{光速}$$

$$\times \frac{a^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \gamma^4 \quad \leftarrow \gamma = \sqrt{1-v^2/c^2} : \text{電子の相対論的質量と静止質量の比} \sim 100$$

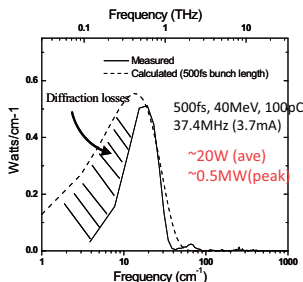
( $\gamma=1$  の極限ではLarmorの公式と一致)

コヒーレント放射効果+高エネルギー電子ビームにより非常に強いTHz電磁波放射が得られる。

Jefferson Lab  
 Brookhaven National Laboratory  
 阪大自由電子レーザー研  
 → Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol. 528, pp.152-156 (2004)

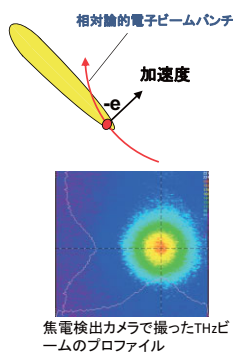
6

## コヒーレントシンクロトロン放射の報告例



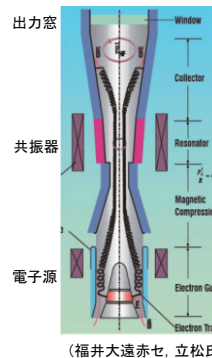
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol. 507, pp.537-540 (2003)

(アメリカ, Jefferson研究所)



7

## サブテラヘルツ発振ジャイロトロン



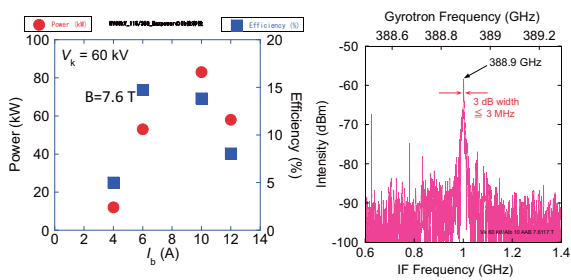
磁場中の電子のサイクロトロン運動を利用  
 →高周波発振には高磁場~10Tが必要

ジャイロトロン発振(電子の集群化)には相対論的効果が本質的  
 →相対論的速度の電子ビーム  
 共振器設計が発振周波数を定める  
 →シミュレーション技術とumオーダーの精密加工が必要(波長可変は困難)  
 通常, 空間モードは多モードなので, ガウシアンビームへのモード変換が必要  
 →モード変換技術が重要

8

## 福井大遠赤での300~400GHz帯高出力Gyrottronの開発

2次高調波パルス389GHz発振で、最高83kW



山田他, 遠赤セH23年度研究成果報告書より

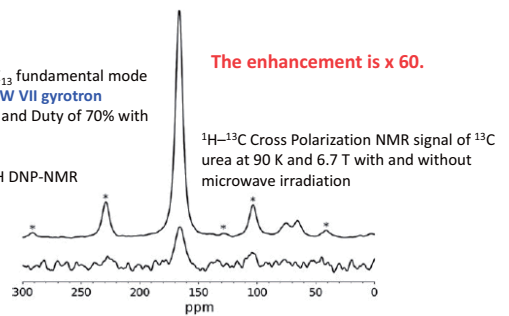
9

## DNP(Dynamic Nuclear Polarization)-NMR測定

A spectrometer designed for 6.7 and 14.1 T DNP-enhanced solid-state MAS NMR using quasi-optical microwave transmission  
Pike et al, J. Magnetic Resonance, Vol.215 (2012) p.1-9 (University of Warwick)

187 GHz TE<sub>13</sub> fundamental mode of the FU CW VII gyrottron  
1W at 2 Hz and Duty of 70% with 15 s.

284 MHz <sup>1</sup>H DNP-NMR



10

## その他の高出力Sub-THz発振 Gyrottron応用

- ◆ セラミックス(ジルコニア, アルミナなど)の焼結
  - 電磁波加熱の特殊効果(非ボルツマン的温度, コヒーレント効果?)
  - 周波数(マイクロ波・ミリ波・サブミリ波)による違い
- ◆ ESR測定
  - ESRエコー測定
  - 150 GHz (ESR共鳴磁場 5-6 T) 数百W
  - 計測温度 2 K - 300 K
  - $\pi$  and  $\pi/2$  パルス(~10nsパルス)を利用
- ◆ 飽和プラズマ発生による放射性物質のリモート検出  
(Nusinovichの提案, Nusinovich et al, JAP 109, 083303 (2011))  
400GHz帯の周波数が適している  
MWクラス(~100nsパルス)の出力が必要

11

## フェムト秒レーザーによる高ピーク強度THz波発生

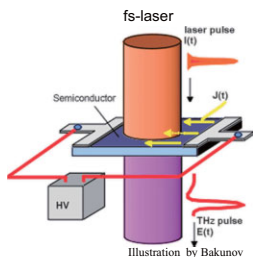
近年, フェムト秒レーザーを用いた高強度(高ピークパワー)テラヘルツ電磁波の発生研究が活発になっている。すでに数 MV/cm(~GW/cm<sup>2</sup>)レベルのTHz波電界が発生されている。

フェムト秒レーザー励起によるTHz発生法

- (1) 大口径光伝導アンテナ
- (2) 光整流( $\chi^{(2)}$  process)
- (3) レーザー誘起プラズマ( $\chi^{(3)}$  process)

12

## 大口径光伝導アンテナによるTHz波発生



E. Budiarto et al, IEEE J Quantum Electron 32, 1839 (1996)  
3cm gap on GaAs, 1 kHz with 45 kV, 0.5mJ/pulse  
→ 400 nJ THz pulse  
D You et al, OL 18, 290 (1993)  
1 cm gap, on GaAs  
40uJ/cm<sup>2</sup>, 10 Hz with 11 kV  
→ 800 nJ THz pulse

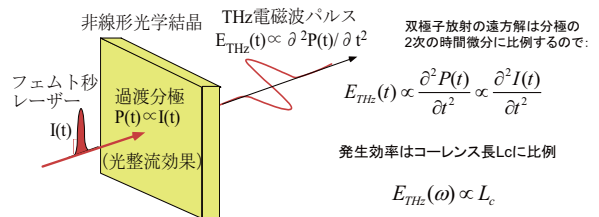
- 欠点
- ✓スペクトルピークは1THz以下
  - ✓光源サイズが大きい
  - ✓発生時の電気ノイズが大きい
  - ✓バイアス電界以上のTHz電界を発生することが難しい

13

## 光整流効果( $\chi^{(2)}$ process)を用いたTHz電磁波発生

光整流効果THz波発生

$$P(t) = \frac{1}{cn} \chi^{(2)} I(t) \quad \text{レーザー強度プロファイル}$$



高効率なTHz波発生には波数不整合 $\Delta k$ をできるだけ小さくし, コヒーレンス長 $L_c$ をできるだけ大きくすることが必要。

$$E_{THz}(t) \propto \frac{\partial^2 P(t)}{\partial t^2} \propto \frac{\partial^2 I(t)}{\partial t^2}$$

発生効率はコヒーレンス長 $L_c$ に比例

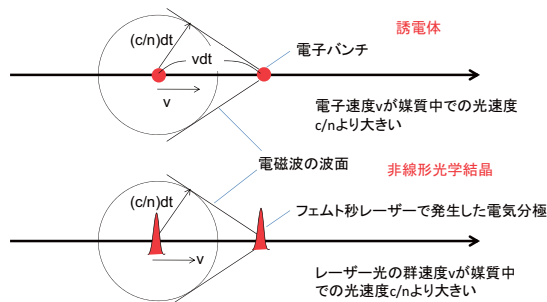
$$E_{THz}(\omega) \propto L_c$$

$$L_c(\omega) = \frac{\pi}{\Delta k(\omega)}$$

14

## Cherenkov型位相整合とは?

もともとは電子ビームバンチからの下記のような電磁波放射についてCherenkov放射という言葉を用いていた。



15

## Nizhny Novgorod大のBakunovらのグループによる報告

S. B. Bodrov, A. N. Stepanov, M. I. Bakunov, B. V. Shishkin, I. E. Ilyakov, and R. A. Akhmedzhanov: "Highly efficient optical-to-terahertz conversion in a sandwich structure with LiNbO<sub>3</sub> core" Optics Express Vol.17, No. 3, 1871 (2009).

Siプリズム(8mm)+LN結晶(50um)+BK7ガラスの構造でパワー変換効率0.1%, THz帯域~3THzを達成。

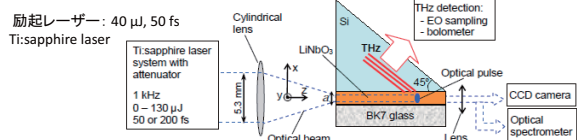


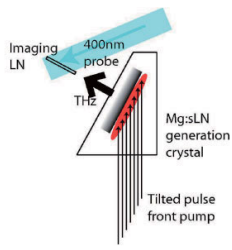
Fig. 1. Schematics of the sandwich structure and experimental setup.

16

## Tilted optical pulse frontによる高強度THz波パルスの発生

Yeh, et al, APL **90**, 171121 (2007)  
 Hebling et al, IEEE J. Sel. Topics in QE, **14**, 345 (2008)  
 Hebling et al, JOSA B **25**, B8 (2008)

✓LiNbO<sub>3</sub>結晶からの10uJ/pulseを観測(周波数ピーク0.5THz)



~MV/cmのTHz波発生  
 (ただし平均パワーは~1mW)  
 光子変換効率>50%

- 励起レーザー: 10Hz~1kHz  
 のチタンサファイア再生増幅器
- 帯域~3THz

17

## 空気・気体プラズマからのTHzパルス放射のこれまでの報告

Hamster et al, PRL **71**, 2725 (1993) ~50mJ, He gas, ponderomotive  
 Hamster et al, PRE **49**, 671 (1994) フルペーパー

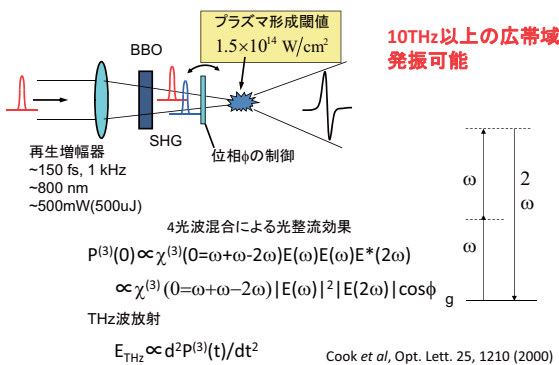
Cook et al, Opt. Lett. **25**, 1210 (2000) FWM(f+f-2f)による最初の論文

Kreß et al, Nature Physics, **2**, 327 (2006) CEPの影響  
 Kim et al, Opt. Express, **15**, 4577 (2007) transient photocurrent mode  
 (ドリフト電流モデル)

レーザー誘起プラズマTHz放射についての一連の論文  
 Xie et al, PRL **96**, 075005 (2006) FWMの位相制御性を確認  
 Zhong, et al, APL **88**, 261103 (2006) 放射パターン  
 Dai, et al, PRL **97**, 103903 (2006) 逆過程による検出  
 Xie et al, APL **90**, 141104 (2007) Pre-pulseによるプラズマ生成の影響  
 Karpowicz and Zhang, PRL **102**, 093001(2009) トンネルイオン化の計算  
 Silaev and Vvedenskiĭ, PRL **102**, 115005(2009) 量子力学的計算  
 Dai et al, PRL **103**, 023001(2009) 偏光制御  
 Babushkin et al, PRL **105**, 053903 (2010) pumpパルスのreshaping効果  
 Wen and Lindenberg, PRL **103**, 023902 (2009).

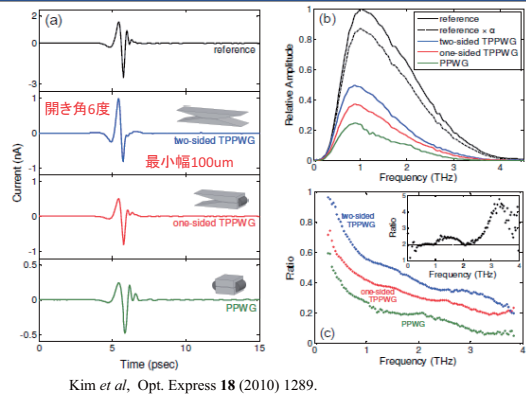
18

## レーザー誘起空気プラズマ中の4光波混合(Four Wave Mixing)によるTHz電磁波放射



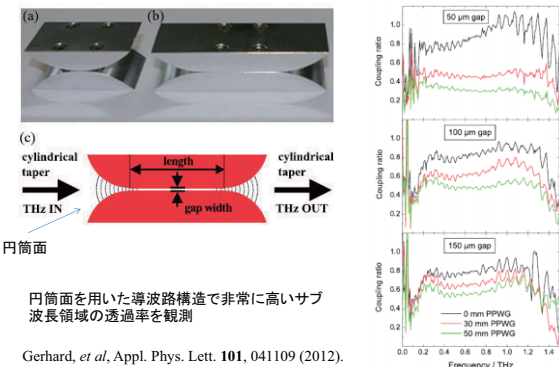
19

## Tapered parallel-plate waveguide (TPPWG)によるサブ波長領域へのTHz波集束



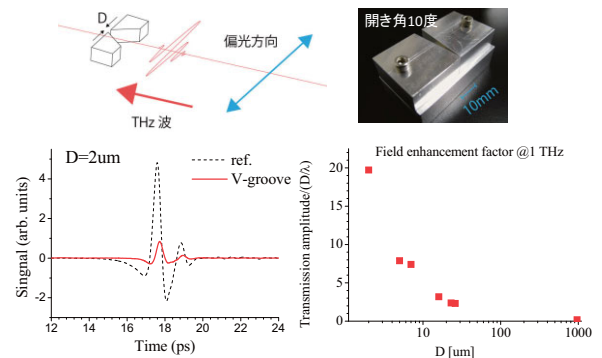
20

## Tapered parallel-plate waveguide (TPPWG)によるサブ波長領域へのTHz波集束



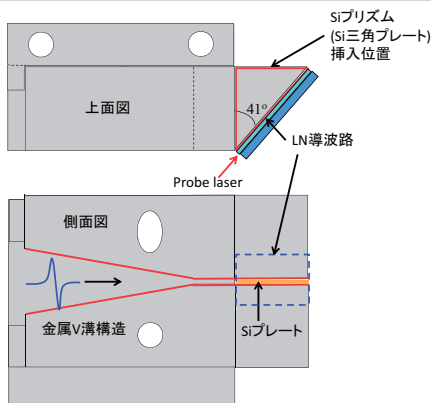
21

## 金属V溝を利用したTHz波の超集束



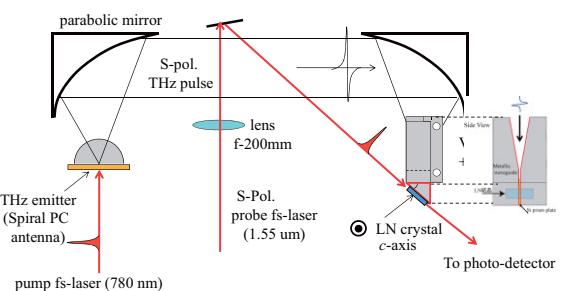
22

## Cherenkov位相整合と金属導波路を用いたEOサンプリング素子



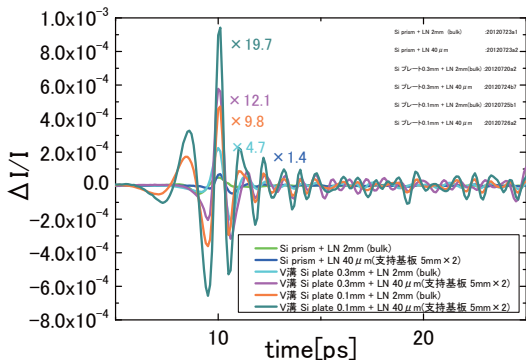
23

## Cherenkov位相整合と金属導波路を用いたTHz波の高感度EOサンプリング



24

金属V溝による感度増強: 導波路幅0.3mmおよび0.1mmの場合



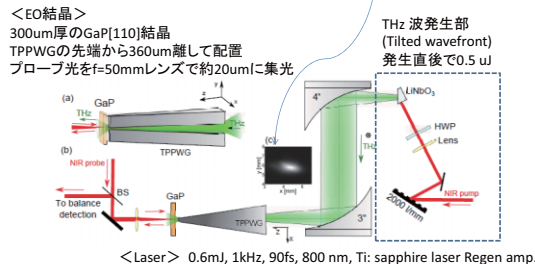
25

Denmarkのグループによる実験

Iwaszczuk, et al, Opt. Express, 20 (2012) 8344

<TPPWG>  
 材質: アルミ  
 入口幅: x=3mm, 出口幅: x=49μm,  
 プレート間隔入口: 1mm, 出口0~500μm  
 長さ: 25.4mm

<Focusing>  
 TPPWGの入口でx方向FWHM幅  
 1.6mm, Y方向FWHM幅0.7mm  
 (有効径250μmの焦電検出器で測定)



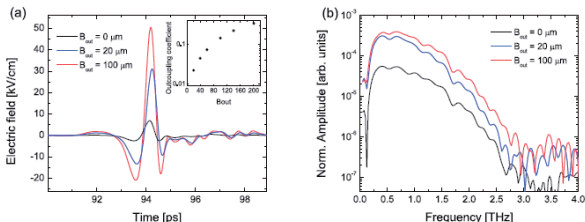
26

GaPによるEOサンプリングの測定結果

$$E_{THz} = \frac{\Delta I}{I_0} \frac{c}{\omega n_0^2 r_{41} L}$$

EO信号

$r_{41}=0.88$  pm/V  
 $L=0.3$ mm  
 $n_0$ : GaPの屈折率@800nm  
 $\omega$ : サンプリング光の角周波数



内挿図はCST Microwave Studioを用いて計算したプレート間隔Boutに依存した結合係数C=GaPでのピークTHz電界(平均値)/TPPWG先端での電界

✓ 入射端での電界69 kV/cmとGaP結晶への結合効率を考慮して、先端幅Bout=20μmのときのピーク電界は1.4MV/cmを超え、約20倍の増強と結論。

27

高強度THz波パルスの応用

- ✓ 多光子電離
- ✓ クーパー対消滅
- ✓ フォノン励起
- ✓ THz帯非線形物理

レーザーの電界が $10^{10}$  V/cm( $\sim 10^{17}$  W/cm<sup>2</sup>) (破壊電界)程度になると摂動論的な非線形光学は破綻する。  
 →非摂動論的**高次高調子発生**

**ponderomotive potential**  $U_p = e^2 E^2 / (4m\omega^2) \propto$  **波長の自乗!**

→ Ponderomotive force  $F_p = -dU_p/dx$ による**電子加速**

→ 磁場による効果が無視できなくなる。→ **Lorentz force**による**SHG発生**

さらに強くなると相対論的効果を考慮する必要がある。

28

まとめ

- (1)フェムト秒レーザー励起によりピークで1MV/cmのTHz波電界が発生できるようになった。
- (2) CSR放射, THz帯発振FEL, サブTHz発振ジャイロトロンなど高出力THz光源が利用できるようになってきた。
- (3) 金属導波路の超集束効果を利用してTHz波の強度を数10~数100倍さらに増強することができる。
- (4) Compact-ERL電子ビームバンチによるCSRは高出力かつ高ピーク強度のTHz波光源であり, その特徴を活かした学術研究と応用を目指す必要がある。

例: ●1.3GHzの高強度THzパルスを用いた, シングルショット高時間分解(~0.8ns)分光およびイメージング  
 ●THz波とX線同時測定

29

# 超伝導テラヘルツ波検出器の開発と応用

大谷 知行

独立行政法人理化学研究所 テラヘルツイメージング研究チーム

## Development and applications of superconducting terahertz detectors

Chiko OTANI

Terahertz Sensing and Imaging Team, RIKEN Advanced Science Institute

### <Synopsis>

We have developed superconducting terahertz detectors using superconducting tunnel junctions (STJ) and microwave kinetic inductance detectors (MKIDs). The detectors are expected to apply not only the experiments for observing primordial galaxies and Cosmic Microwave Background (CMB), but also multi-purpose detectors for various THz applications.

テラヘルツ(THz)波は周波数 0.3-30 THz(波長 3 mm-30  $\mu\text{m}$ )の電磁波であり、赤外線と電波の中間領域のため両者の性質を備える。電波的側面ではソフトマテリアルに対する物質透過性が挙げられ、その中でも最短波長域のため回折が小さく波長程度(サブ mm)の空間分解能のイメージングが可能である。また、分子間相互作用に起因する特徴的な吸収スペクトル構造(指紋スペクトル)が結晶性物質に見られ、それを活用した物質弁別や物質研究も行われている。この分野において超伝導検出器は宇宙観測や極限環境実験などに用いられることが多いが、実用的な利用も検討されている。つまり、常温検出器の感度は限られるため、より広範な応用目的として低温検出器へのニーズが存在する。感度は宇宙用の検出デバイスで  $\text{NEP} < 10^{-19} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$  (@ 0.1K) である一方、地上利用では 300K 輻射があるために  $\text{NEP} \sim 10^{-14} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$  で十分であり、機械式冷凍機で動作する小型・簡便・安価なシステムが模索されている。

検出デバイスでは、新たな超高感度検出器としてマイクロ波力学インダクタンス検出器(MKIDs)が注目されている。MKIDsは、ミリ波・THz波などの吸収でマイクロ波共振周波数に変化する検出部と数 GHzの信号を伝送させる信号読み出し伝送線路とで構成され、1系統のリードアウトで 100-1000画素の信号を同時読み出しが可能である。このため、大規模アレイ化が容易であり数年以内に1メガピクセル級の極低温検出器が登場することが確実視されている。また、MKIDsは薄膜に特定のパターンを刻むだけで検出器として動作するため作製が容易であり開発スピードが速いことも大きな利点である。国内では、理研のほか、高エネ研、国立天文台、岡山大、埼玉大、名工大、山形大などで研究が進められており、今後の広がりが注目される。



## 超伝導検出器による テラヘルツ波検出と応用

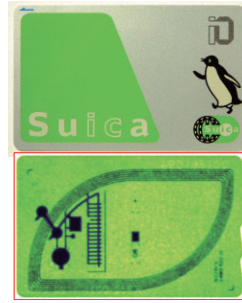
独立行政法人理化学研究所  
テラヘルツイメージング研究チーム  
大谷知行

### 研究の背景

STJによるテラヘルツ波検出  
MKIDsによるミリ波・テラヘルツ波検出  
(テラヘルツ分光と応用について)

1

## テラヘルツ波による物質透視イメージング



周波数: 0.6 THz (波長0.5mm)  
空間分解能: 0.5 mm

Dobroiu et al., Applied Optics 43, 5367 (2004)



可視光のイメージ THz波イメージ  
周波数: 1.0 THz (波長0.3 mm)  
空間分解能: 0.4 mm

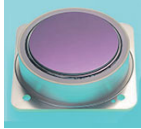
Kawase, Optics & Photonics News 15, 34 (2004)

新たなイメージング応用の可能性

2

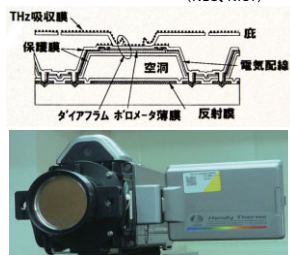
## 常温イメージング検出器

常温の赤外線ホモメータアレイ  
<http://www.nec.co.jp/geo/en/products/hx3100.html>



320x240画素  
10μm帯  
30 frame/sec

THz波用に改造



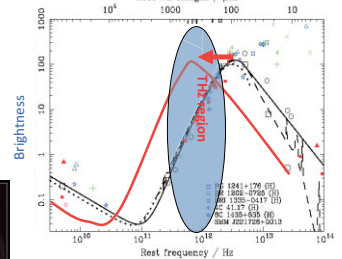
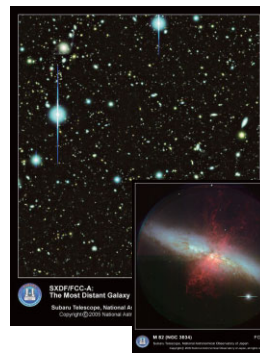
常温で高速 (ビデオレート) の  
テラヘルツイメージングを実現

小田直樹, 實迫巖 「テラヘルツ波の産業応用と課題」 シンポジウム テキスト (2008)

3

## Astronomical Application

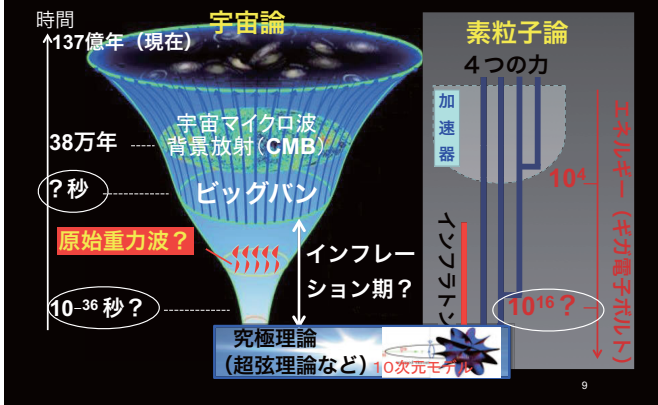
~ Search for primordial galaxies ~



Distant star-forming galaxies are  
the brightest in THz region  
→ Survey observation by Array

4

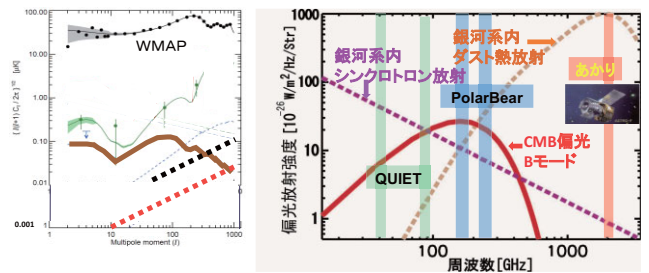
## インフレーションと自然界の究極理論



5

## A02:初期宇宙探査のための超高感度アレイデバイスの研究開発

参加機関: 理研, KEK, 国立天文台, 岡山大



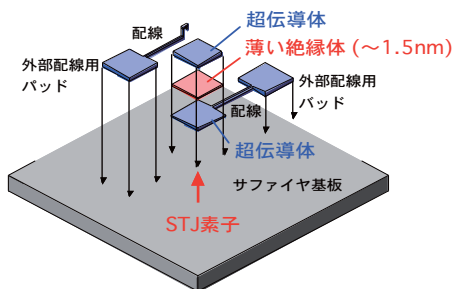
“検出器を制するのはCMBを制する”

6

## 超伝導トンネル接合素子 (STJ)

ジョセフソン素子

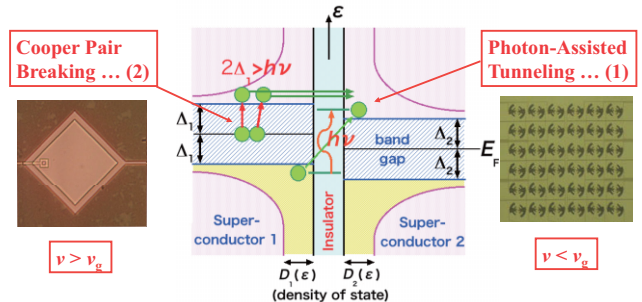
超伝導体-絶縁体-超伝導体 (SIS素子)



12

7

## Tunneling Processes in quantum detection

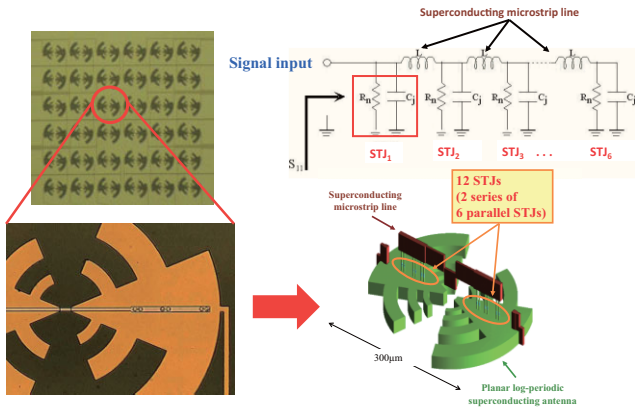


$$v_g = 2\Delta/h = 0.7 \text{ THz for Nb } (h\nu_g = 3.1 \text{ meV})$$

8

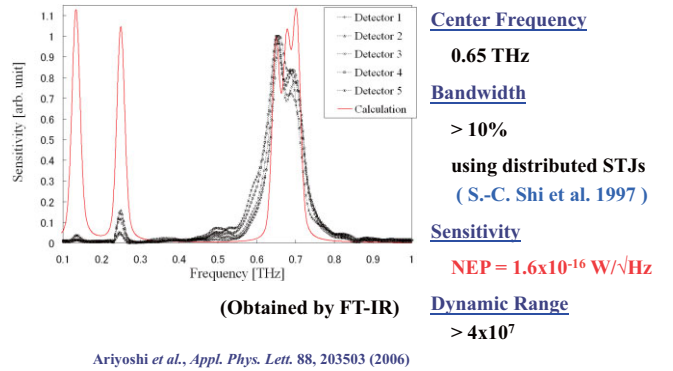


### Photon-Assisted Tunneling Detector Array



9

### Measured Spectral Response

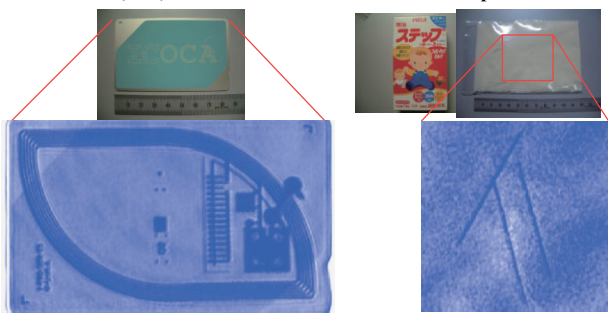


10

### THz imaging with one-pixel detector

Railway Payment IC Card

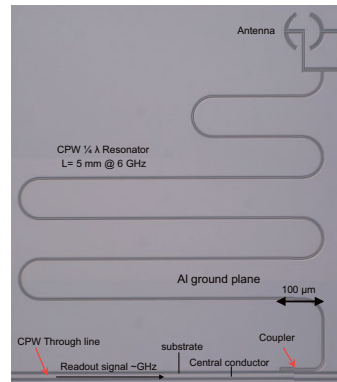
Needles in powder milk



Ariyoshi et al., Appl. Phys. Lett. 88, 203503 (2006)

11

### MKIDs (Microwave Kinetic Inductance Detectors)



超伝導体のインダクタンス  
= 磁気インダクタンス  
+ 量子インダクタンス  
超伝導電子の慣性力に起因

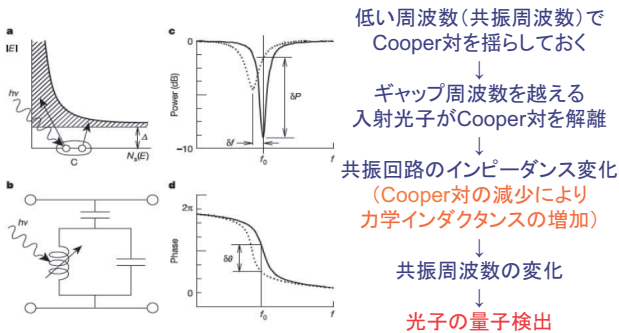
$$L_k = \frac{m}{nq^2} \frac{l}{S}$$

m: Cooper対の質量  
q: Cooper対の電荷  
n: Cooper対の密度  
l: マイクロストリップの長さ  
S: 断面積

量子インダクタンスは  
Cooper対の密度に反比例

12

### 検出原理



<sup>13</sup> Day et al. Nature 425, 817-821, 2003

13

### MKIDs (Microwave Kinetic Inductance Detectors)

- ・構造がシンプルで作製が容易 (トンネルバリア不要)
- ・大規模な多チャンネル並列読み出し ( $10^4$ - $10^6$  ピクセル) が可能
- ・高感度・広帯域 (CPB-STJと同等)
- ・大ダイナミックレンジ
- ・作製の開発要素は STJ と共通

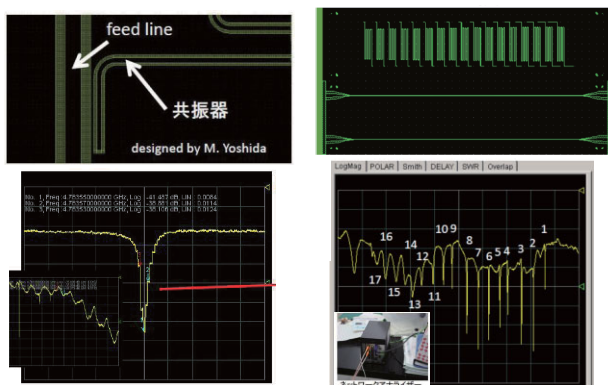
大規模アレイを容易に早期に実現可能

↓  
強力なイメージング検出器

14

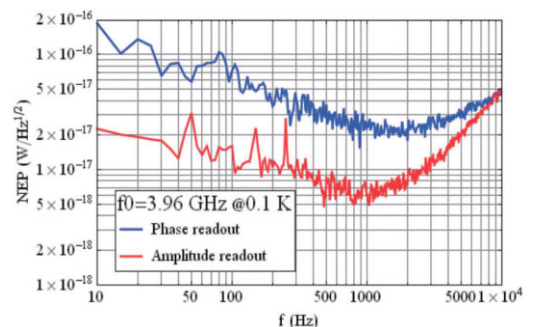
14

### 実際のデバイス (KEK-MKIDs)



15

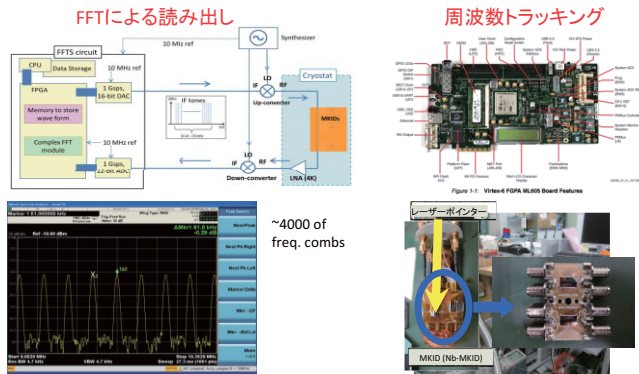
### MKIDsの感度



AI-MKIDs: NEP ~  $5 \times 10^{-18}$  W/√Hz

16

## 信号読み出し系

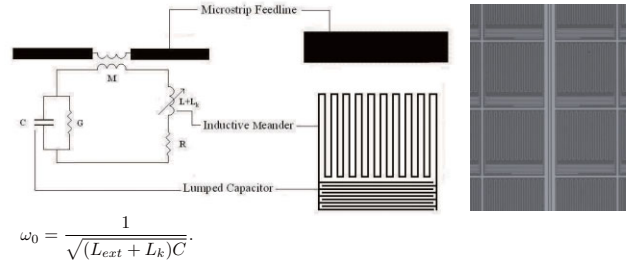


H. Kiuchi *et al.*, in preparation

Kibe *et al.*, in preparation

17

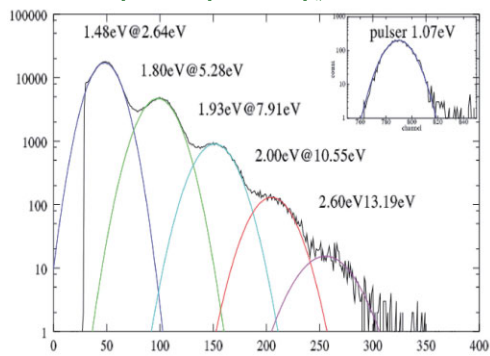
## KIDsによる放射線検出 (LEKIDs)



Doyle *et al.*, *Proceedings of SPIE* 7020, 70200T (2008)

18

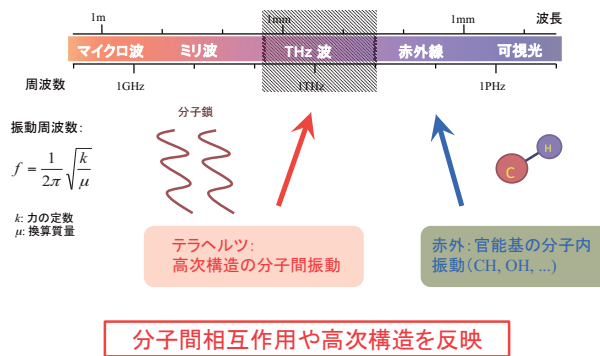
## X-ray, soft X-ray, EUV and optical one photon spectroscopy with STJ



Shiki *et al.*, *NIMA* 520, 530 (2004)

19

## テラヘルツ分光からわかるもの



20

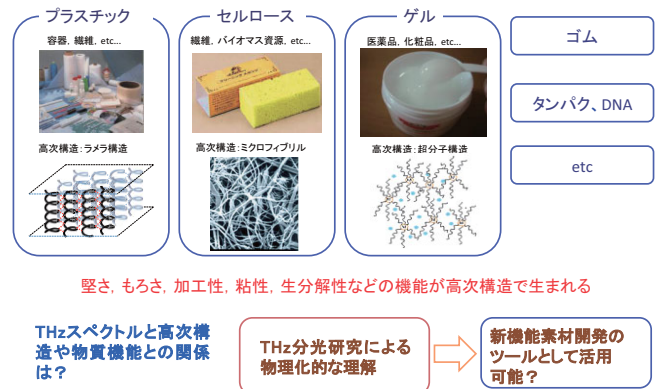
## 分子間/高次構造の違いによる機能の違い



Hoshina *et al.*, unpublished (2010)

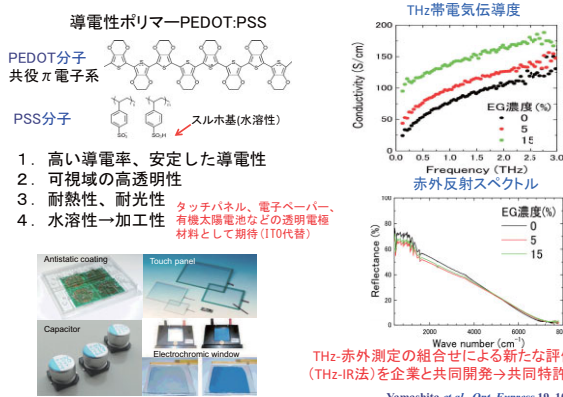
21

## 高分子の機能と高次構造



22

## 導電性ポリマーの電気伝導特性の非破壊計測



Yamashita *et al.*, *Opt. Express* 19, 10864 (2011)

23

## Acknowledgements



24

# 理科大 FEL の利用実験と大強度 THz 光源への期待

築 山 光 一

東京理科大学理学部第一部化学科・総合研究機構赤外自由電子レーザー研究センター

## Present status of FEL-TUS (Free Electron Laser at Tokyo University of Science)

Koichi TSUKIYAMA

Chemistry Department & IR-FEL Research Center, Tokyo University of Science


Two beam lines have been equipped at FEL-TUS, one for MIR and another for FIR. The former has been operated under stable conditions and provided for the experiments in various research fields. The latter is under arrangement towards oscillation. The present status of FEL-TUS will be presented.

東京理科大学総合研究機構赤外自由電子レーザー研究センター(略称:FEL-TUS)は、科学研究費学術創成研究による研究プロジェクト「赤外自由電子レーザーの高性能化とそれを用いた光科学」の拠点として、1999年野田キャンパスに設置された。FEL-TUSは高輝度赤外光源としてのFELの特長を生かした光利用研究を最重点課題として遂行する数少ない施設の一つである。中赤外(MIR)用と遠赤外(FIR)用には別個のビームラインが設置されている。現在MIR-FELについては順調な発振が継続しており、内部および外部(企業、大学、独立行政法人等)ユーザーによる光利用研究が活発に推進されている。FEL-TUSの有する次のような特徴、(1)中赤外領域での周波数可変性、(2)直線偏光性、(3)パルス発振による高い光子密度等を利用すると、従来の光源では遂行できなかった多種多様な光科学実験が可能となる。

当施設は平成19年度文部科学省「先端研究施設共用イノベーション創出事業【産業戦略利用】」に採択された。平成22年度からは継続して研究開発施設共用等促進費補助金(先端研究施設共用促進事業)の交付を受けている。本事業では、当研究センターがこれまで培ってきた学術的知的資産およびFEL光利用の技術的ノウハウを学外に提供することにより、産業界、大学・独立行政法人等への共用を促進し、1. 新規計測技術の開発、2. 化学、物理学、分子科学分野、3. 材料科学・物性科学分野、4. 生物科学分野における基礎および応用研究を推進することにより、これらの分野における赤外光利用研究拠点の形成を目的としている。

一方、THz領域の高性能光源となり得るFIR-FEL装置については、「加速器科学総合支援事業」等でKEKの支援を受け、現在発振に向けた開発研究を並行して行っている。

本研究会においては、MIR-FELを利用する基礎及び応用研究の一端と、FIR-FELの発振に向けた加速器要素技術の開発について紹介したい。



東京理科大学 総合研究機構  
赤外自由電子レーザー研究センター (FEL-TUS)

築山 光一

東京理科大学理学部第一部化学科  
&  
東京理科大学総合研究機構  
赤外自由電子レーザー研究センター

1



Free-Electron Laser Research Center  
at  
Tokyo University of Science (FEL-TUS)




Noda campus  
理工学部  
基礎工学部  
薬学部  
生命科学研究所  
FEL-TUS

Tokyo campus  
理学部  
工学部

2



Free-Electron Laser Research Center  
at  
Tokyo University of Science (FEL-TUS)



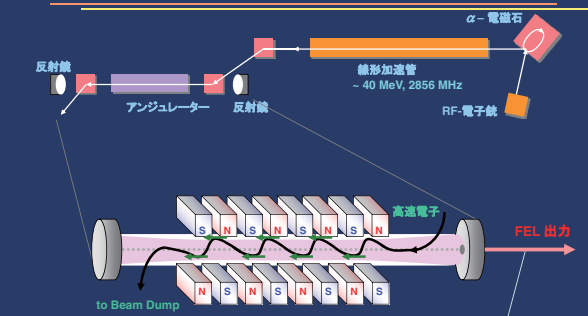

Noda campus  
理工学部  
基礎工学部  
薬学部  
生命科学研究所  
FEL-TUS

東京キャンパス

1時間

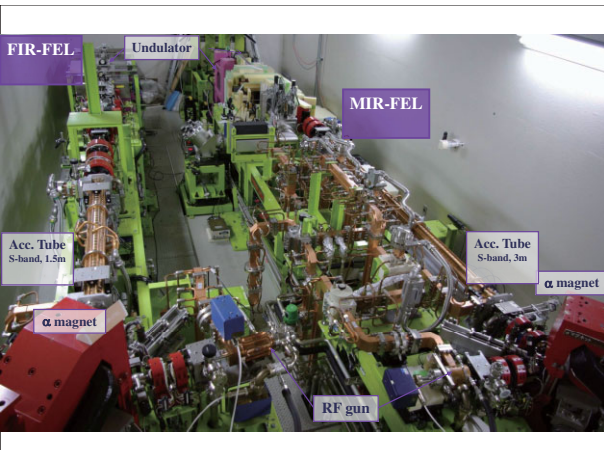
3

FEL-TUSの構造



4.5 - 12  $\mu\text{m}$  (中赤外領域)で周波数可変 完全な直線偏光性  
特異なパルス時間構造

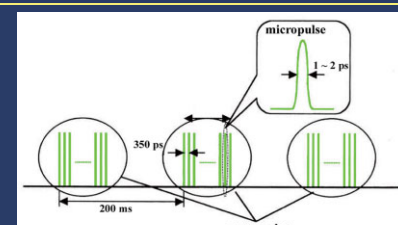
4



FIR-FEL, Undulator, MIR-FEL, Acc. Tube S-band, 1.5m,  $\alpha$  magnet, RF gun, Acc. Tube S-band, 3m,  $\alpha$  magnet

5

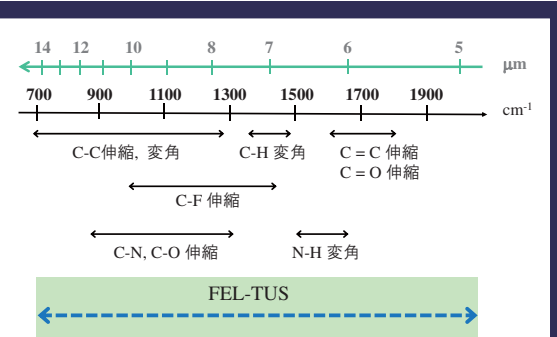
FEL-TUSのパルス時間構造



Macropulse (マクロパルス)  
5 Hzで発振、パルス幅は約2 マイクロ秒

Micropulse(ミクロパルス)  
350 ピコ秒間隔で発振、パルス幅は数ピコ秒

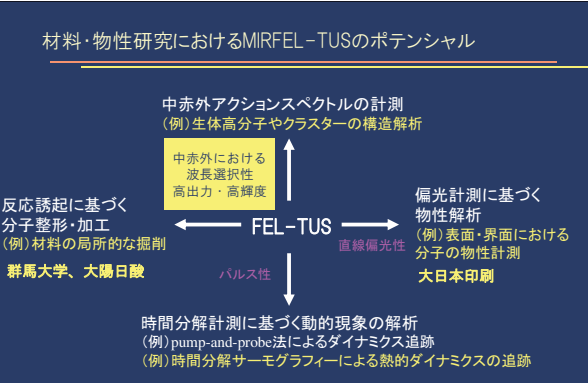
6



ほとんどの分子の振動スペクトル領域をカバー  
気相、表面・界面、凝縮相に関わらず  
ほとんどすべての物質が研究対象

7

材料・物性研究におけるMIRFEL-TUSのポテンシャル



中赤外アクションスペクトルの計測  
(例) 生体高分子やクラスターの構造解析

中赤外における  
波長選択性  
高出力・高輝度

反応誘起に基づく  
分子整形・加工  
(例) 材料の局所的な掘削  
群馬大学、大嶋日敏

FEL-TUS

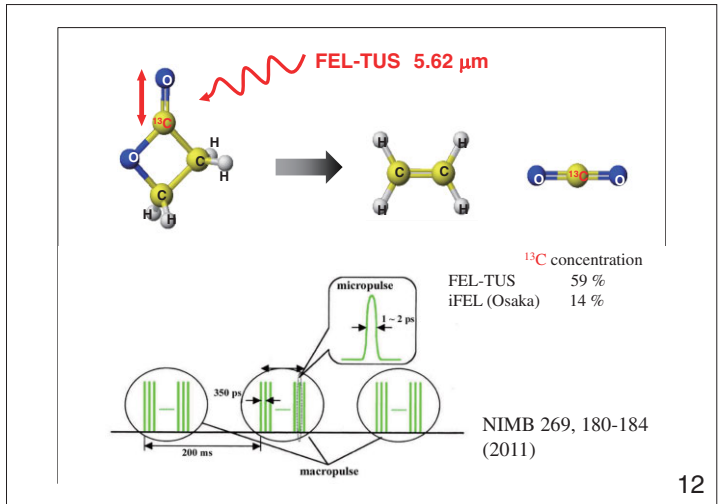
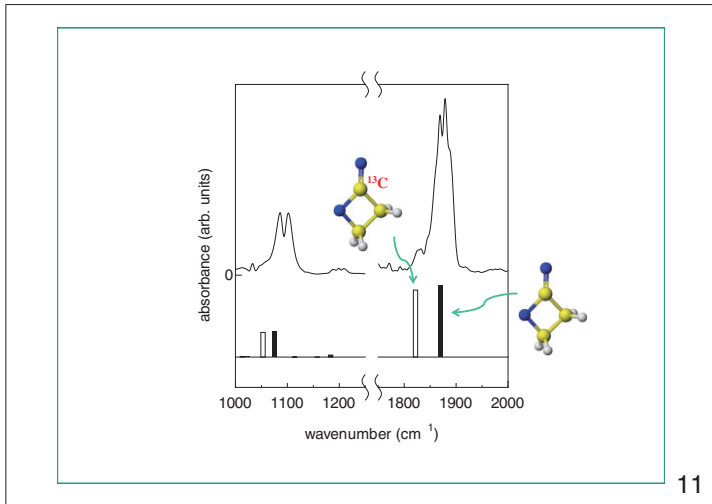
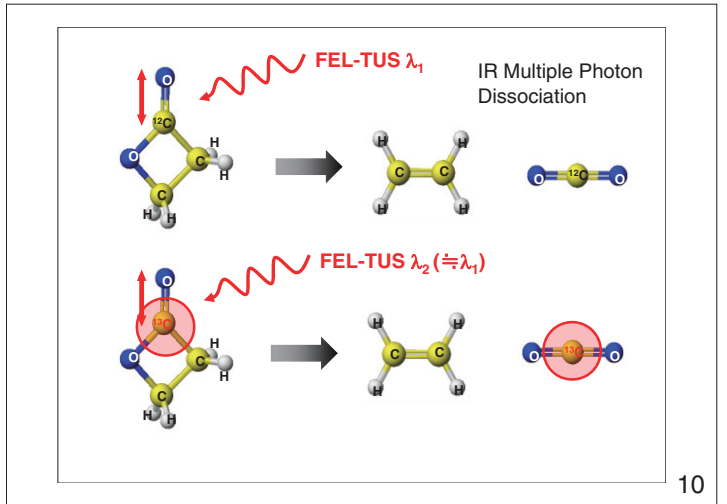
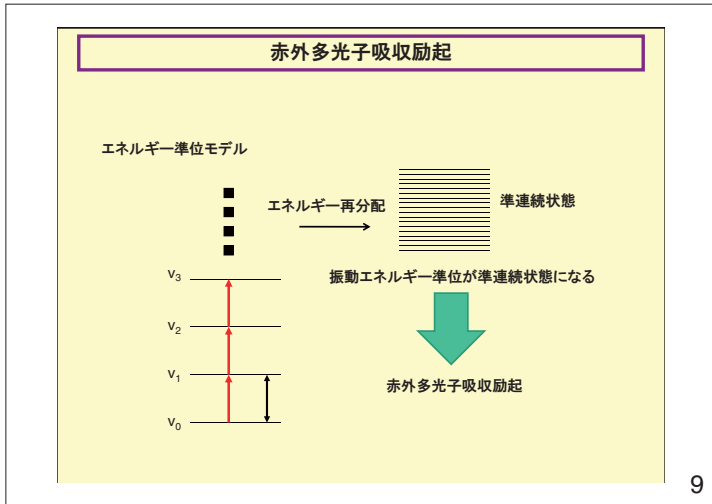
直線偏光性

偏光計測に基づく  
物性解析  
(例) 表面・界面における  
分子の物性計測  
大日本印刷

時間分解計測に基づく動的現象の解析  
(例) pump-and-probe法によるダイナミクス追跡  
(例) 時間分解サーモグラフィーによる熱的ダイナミクスの追跡

8





**IRFELによる赤外多光子吸収の途中段階を観ることはできないか？**

$\text{NH}_3 + \text{FEL} (\sim 950 \text{ cm}^{-1}) \rightarrow \text{NH}_3(v=1, J, K)$

$\text{NH}_3(v=1, J, K) + \text{FEL} (\sim 950 \text{ cm}^{-1}) \rightarrow \text{NH}_3(v=2, J', K')$

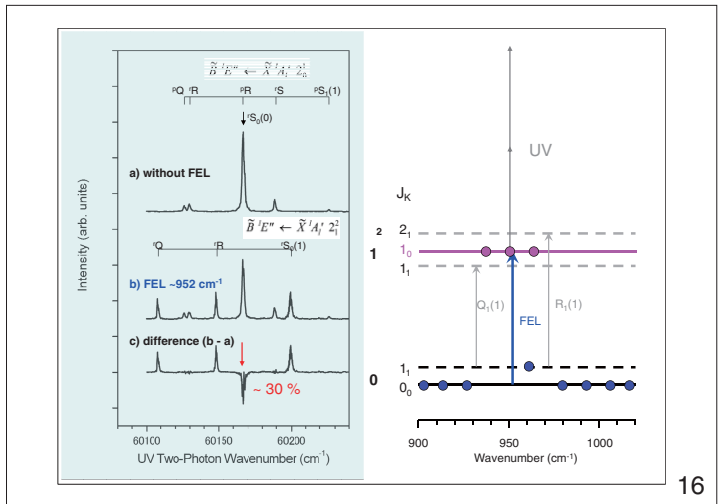
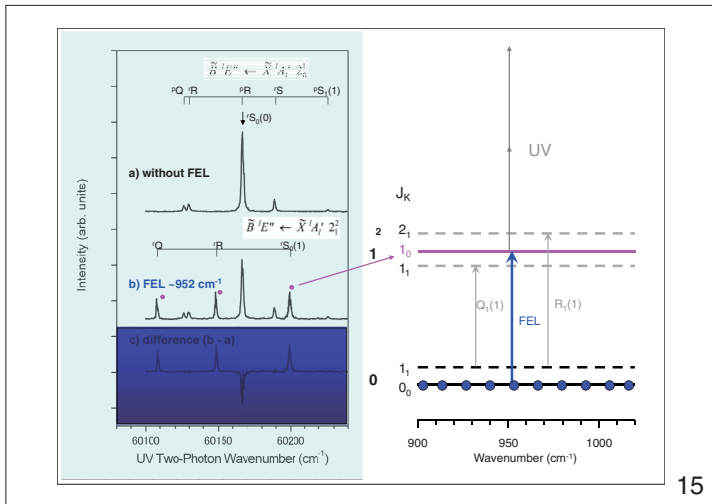
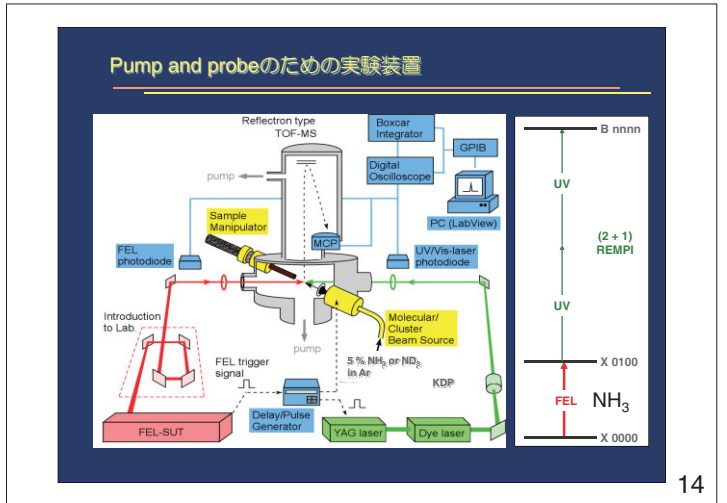
PUMP and PROBE experiment

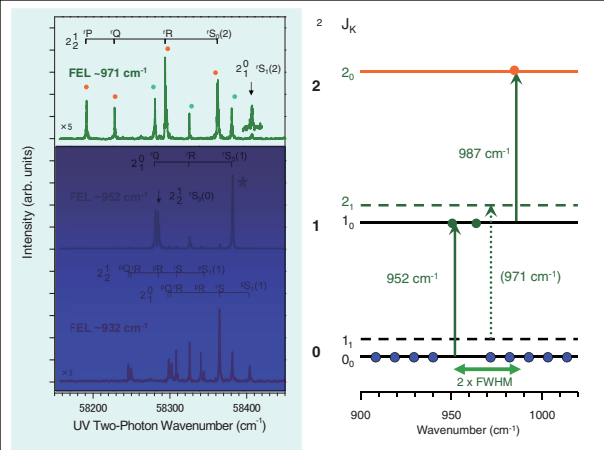
PUMP: Vibrational excitation of molecules by IRFEL

PROBE: Real time investigation of excited levels by synchronized vis/UV tunable lasers

多光子吸収過程の機構や反応のダイナミクスの追跡

13





17

FEL-TUS

先端的分析計測手法  
質量分析法、イメージング法、顕微分光法、……

東京理科大学総合研究機構      企業、大学、独立行政法人等

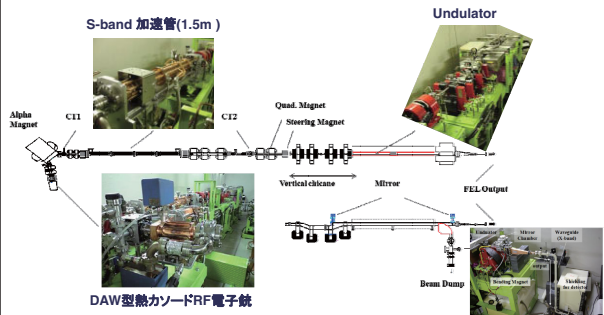
これまでに測定できなかった物質の構造や機能を測る

高強度赤外光利用研究拠点の形成

18

### FIR-FEL (Far-infrared FEL)

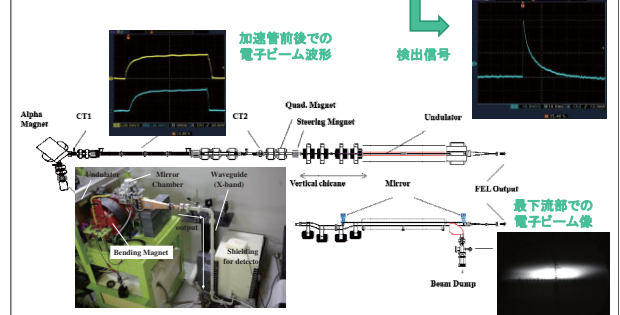
- ・発振波長 300 μm ~ (テラヘルツ領域)
- ・15 MeV S-band リニアック + 導波管共振器



19

### FIR-FEL (Far-infrared FEL)

- ・発振に向けて現在開発研究中
- ・現状では、電子ビーム加速、自発放射光検出まで成功



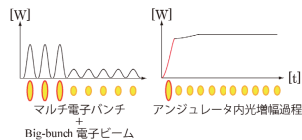
20

### 発振を目指すための方策

#### 熱・光複合陰極による電子ビーム生成

現状・RF電子銃カソード: LaB<sub>6</sub> 熱電子ビーム生成、加速  
⇒ カソード面にレーザー照射し、光電子ビームも同時生成、加速

◎マルチバンチ電子ビーム (熱電子) の一部のピーク電流量を増やす  
⇒ Big-bunch 電子ビーム



#### 利点

- ◇種光が従来に比べ高強度  
→ 検出器信号の検出、すなわち発振調整が容易
- ◇飽和状態までの時間の短縮

21

電子ビーム

電子銃

### 熱・光複合陰極による電子ビーム生成に成功

光電子ビーム 200fmA

電子ビーム M 400ns A 7.1 74.40%

Nd:YAGレーザー第4 高調波( =266nm)

今後、光電子ビーム電流量の増加を図り発振に向けた共振器調整に取り組んでいく

22

### 謝辞

FIR-FELの開発研究については、KEK加速器・入射器グループ、本学理工学研究科、当研究センターが共同して実施している。また、当施設での光利用研究にあたり必要な、MIR-FELの運転、維持管理、加速器の高性能化等については、KEK加速器・入射器グループ、及び三菱電機システムサービス株式会社から協力、貢献いただいている。関係者各位に御礼申し上げます。

23



## 赤外領域における近接場分光実験

岡村英一<sup>1</sup>、池本夕佳<sup>2</sup>、森脇太郎<sup>2</sup>、木下豊彦<sup>2</sup>、石川迪雄<sup>3</sup>、中嶋悟<sup>3</sup>

<sup>1</sup>神戸大院理、<sup>2</sup>JASRI-SPring-8、<sup>3</sup>阪大院理

### Near-field spectroscopy in the infrared range

H. Okamura<sup>1</sup>), Y. Ikemoto<sup>2</sup>), T. Moriwaki<sup>2</sup>), T. Kinoshita<sup>2</sup>), M. Ishikawa<sup>3</sup>), S. Nakashima<sup>3</sup>)

Kobe University<sup>1</sup>), JASRI-SPring-8<sup>2</sup>), Osaka University<sup>3</sup>)

#### <Synopsis>

We will first review the infrared near-field scanning optical microscopy (IR-NSOM) experiments in the literature, done with various IR sources such as lasers, synchrotron radiation (SR), and thermal (black body) sources. We will then describe recent results on the FT-IR-based, broadband IR-NSOM experiments using SR by Ikemoto et al., and those using a thermal source by Ishikawa et al.

波動光学の回折限界を超える空間分解能（超解像）が得られる近接場光学（NSOM）が近年急速に進歩しており、波長よりもずっと小さな空間スケールで固体試料のキャラクタリゼーションが行われている[1]。赤外・THz 分光は固体の低エネルギー励起をプローブできる有用な手法だが、分子振動の指紋領域で 5-10  $\mu\text{m}$  程度（波数 1000-2000  $\text{cm}^{-1}$  に対応）、THz 領域ではサブ mm 程度と波長が長いため、NSOM 技術の併用により従来の空間分解能を向上させようという研究が行われてきた。赤外 NSOM 研究では、微弱な NSOM 信号を十分な S/N 比で得るため、各種の赤外レーザー光源による研究が多く行われている。特に Keilmann らは様々なテーブルトップ赤外レーザーを用い、金属チップ先端からの近接場光を利用する、散乱型 NSOM 配置を用いて多くの研究を行ってきた[2]。彼らは波長 10  $\mu\text{m}$ （波数 1000  $\text{cm}^{-1}$ ）程度のレーザー光源を用い、SiC や Si などの半導体に基づくナノ構造や生体試料などに対して 20 nm という高い空間分解能で、キャリア密度や特定の分子振動などのマッピングを成功させている[2]。（彼らが開発した赤外 NSOM 装置は商品化されている[3]）またレーザーに基づく光源としては他にも、赤外自由電子レーザー[4]や、時間領域 THz 分光装置による NSOM 実験[5]も報告されている。一方、分子振動の指紋領域や半導体デバイスにおけるキャリアのプラズマ振動数に対応する波数 700-2000  $\text{cm}^{-1}$ （波長 5-13  $\mu\text{m}$ ）程度の領域をカバーするためには、白色光源を用いたブロードバンドな実験が望ましい。そこで非線形結晶によるレーザー差周波発生を用いた幅 200  $\text{cm}^{-1}$  程度の準白色赤外光による実験[2]や、黒体輻射に基づく熱光源による実験[6-8]、そして赤外放射光（IR-SR）による実験[9,10]などが行われている。特に IR-SR

による実験では、赤外全域をカバーするブロードバンドかつ高輝度な光源である特長が生かされると期待される。

本発表では以上の進展をレビューした後、最近 SPring-8 と阪大で行われている、フーリエ変換赤外分光法 (FTIR) と NSOM を組み合わせた、ブロードバンドな赤外近接場分光について紹介する。SPring-8 での研究は池本ら[9,10]によりビームライン BL43IR にて放射光を用いて行われ、阪大での研究は石川、中嶋ら[6,8]により通常の熱光源を用いて行われている。いずれの場合も SR や熱光源からの赤外光を、市販の FTIR のマイケルソン干渉計経路で散乱型 NSOM のチップ先端へ集光している。そして発生した近接場光から得られる干渉波形 (インターフェログラム) をフーリエ変換することでスペクトルを得ている。ここで微弱な近接場光を非常に強い単純散乱光のバックグラウンドと区別するため、チップと試料間の距離をピエゾ素子で変調してロックイン検出している。これにより IR-SR でも熱光源でも、チップ先端直径である 100 nm 程度の空間分解能で、700-2000  $\text{cm}^{-1}$  程度の領域をカバーするブロードバンド近接場分光を行えることが示された[6,8-10]。講演では cEERL における赤外・THz 近接場分光の可能性についても言及したい。

- [1] 例えば“Nano-Optics and Near-Field Optical Microscopy” (A. Zayats and D. Richards, ed., Artech House, Boston, 2009).
- [2] レビューとして F. Keilmann and R. Hillenbrand, “Near-Field Nanoscopy by Elastic Light Scattering from a Tip”, Chapter 11 in Ref. [1].
- [3] URL: <http://www.neaspec.com/>.
- [4] 例えば S. C. Kehr, M. Cebula, O. Mieth, T. Hartling, J. Seidel, S. Grafstrom, L. M. Eng, S. Winnerl, D. Stehr, M. Helm: Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 256403.
- [5] 例えば H.-G. von Ribbeck, M. Brehm, D. W. van der Weide, S. Winnerl, O. Drachenko, M. Helm, F. Keilmann: Opt. Express **16** (2008) 3430.
- [6] M. Ishikawa, M. Katsura, S. Nakashima, K. Aizawa, T. Inoue, H. Okamura, Y. Ikemoto: Opt. Express **19** (2011) 12469.
- [7] F. Huth, M. Schnell, J. Wittborn, N. Ocelic, R. Hillenbrand: Nat. Mater. **10** (2011) 352.
- [8] M. Ishikawa, M. Katsura, S. Nakashima, Y. Ikemoto, H. Okamura, Opt. Express **20** (2012) 11064.
- [9] Y. Ikemoto, T. Moriwaki, T. Kinoshita, M. Ishikawa, S. Nakashima, H. Okamura: e-J. Surf. Sci. Nanotech **9** (2011) 63.
- [10] Y. Ikemoto, M. Ishikawa, S. Nakashima, H. Okamura, Y. Haruyama, S. Matsui, Y. Moriwaki, T. Kinoshita: Opt. Commun. **285** (2012) 2212.

# 赤外領域における近接場分光 (レビュー)

岡村英一 (神戸大理工)  
池本夕佳, 森脇太郎, 木下豊彦 (JASRI/SPring-8)  
石川迪雄, 中嶋悟 (阪大院理)

1

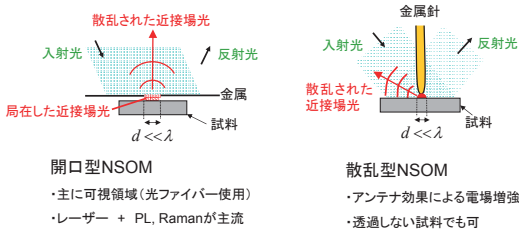
# アウトライン

- 近接場光学技術を用いた超解像赤外顕微分光
- 単色赤外レーザーによる実験
  - Table top lasers (Keilmann et al.)
  - FEL (Dresden FELBE)
- ブロードバンド赤外光による実験
  - 擬似ブロードバンドレーザー (Keilmann et al.)
  - Globar: 石川, 中嶋ら (阪大)
  - (Incoherent) SR: 池本ら (SPring-8 BL43IR)
  - テラヘルツ領域の実験 (THz TDS, CSR)

2

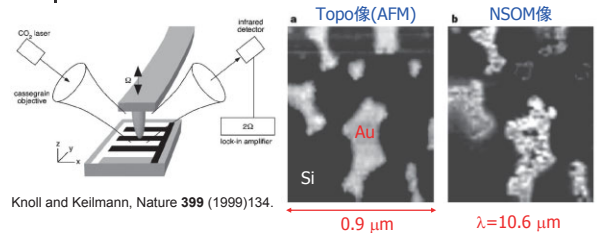
# 近接場光学の応用による顕微分光

- 近接場光学 (Near-field optics)
  - 局在した (伝播しない) 近接場光 (エバネッセント光)
  - 回折限界に依らない空間分解能 ( $\sim \lambda/100$  or higher)
  - 近接場走査プローブ顕微鏡 (NSOM)



3

# 単色レーザーによる赤外NSOM

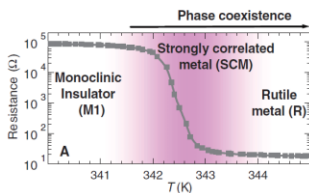


- 原子間力顕微鏡 (AFM) プローブ先端にCO<sub>2</sub>レーザー (10.6 μm)
- プローブのタッピング振動数でロックイン検出 (2倍波)
  - プローブ先端-試料間の距離に強く依存する近接場光を抽出
- 振幅情報のみ (位相は得られない)

4

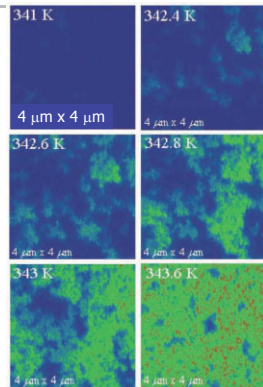
# 単色赤外NSOMの例(1)

VO<sub>2</sub>の金属絶縁体相分離・共存



CO<sub>2</sub>レーザー: λ=10.6 μm (hv~0.11 eV)

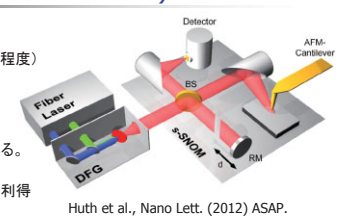
Basov et al., Science 318, 1750 (2007).



5

# 擬似ブロードバンドレーザーによる実験 (Hillenbrand, Keilmann et al)

- 差周波中赤外レーザー
  - 中心波長10 μm程度 (1000 cm<sup>-1</sup>程度)
  - バンド幅200 cm<sup>-1</sup>程度
  - チューナブル
- 非対称FT-IRの採用
  - 干渉計内部→位相情報が得られる。(原理はTHz-TDSと同じ)
  - 近接場光と参照光の干渉→信号利得

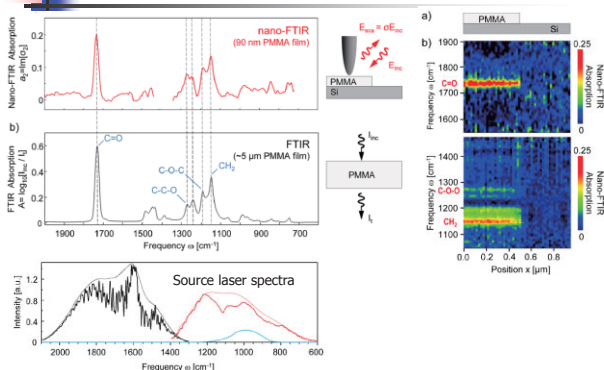


→ 近接場光の電場 =  $\alpha E_0$  とすると ( $\alpha \ll 1$ )

$$\begin{cases} \text{対称FTIRの信号強度: } \alpha^2 E_0^2 \\ \text{非対称FTIRの振動強度: } \left( \frac{E_0}{2} + \alpha \frac{E_0}{2} \right)^2 = \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\alpha + \frac{1}{4}\alpha^2 \right) E_0^2 \end{cases}$$

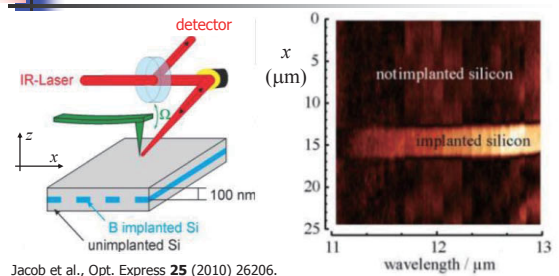
6

# ブロードバンドレーザーによる実験例 Huth et al., Nano Lett. (2012) ASAP.



7

# IR-FELによる実験 (Dresden, FELBE)

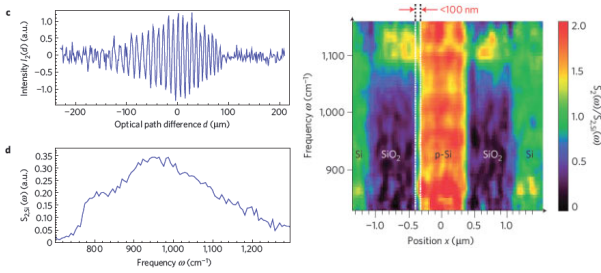


・FELBEでは他にも多くのNSOM実験が行われている。  
(L. Eng, M. Helmらによる)

8

## 熱光源による実験

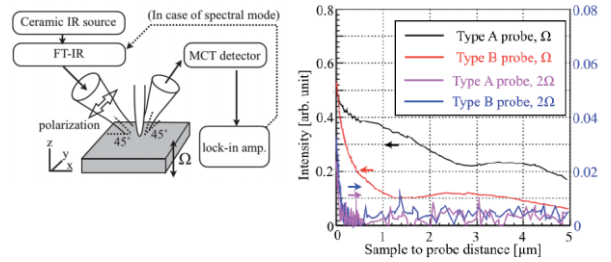
- Hillenbrandらのグループ(2011)
  - Huth et al., Nat. Mater. **10** (2011) 352.
  - 熱光源(黒体輻射光源)+Neasom



9

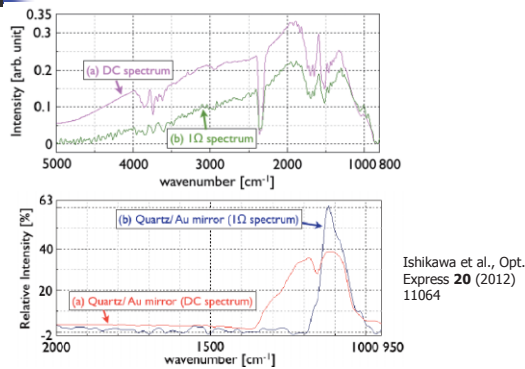
## 熱光源による実験: 通常FTIR+AFM

- 石川、中嶋(阪大)ら
  - Ishikawa et al., Opt. Express **19** (2011) 12469.
  - Ishikawa et al., Opt. Express **20** (2012) 11064.
  - 熱光源(黒体輻射光源)+通常のFTIR/AFM + ロックイン検出



10

## 熱光源+通常FTIRによる実験(2)

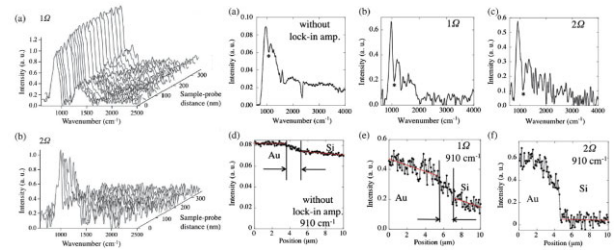


Ishikawa et al., Opt. Express **20** (2012) 11064

11

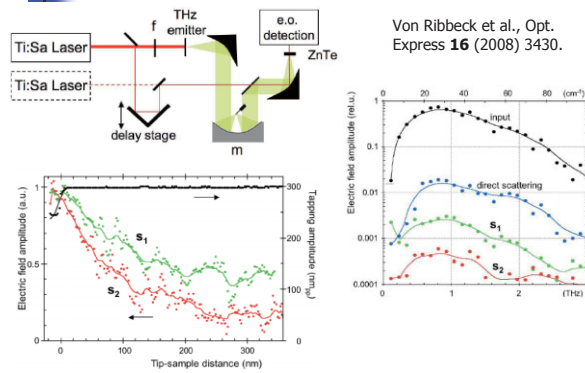
## 赤外放射光+通常FTIRによる実験

- 池本ら(SPring-8 BL43IRでの実験)
  - Ikemoto et al., Opt. Commun. **285** (2012) 2212.



12

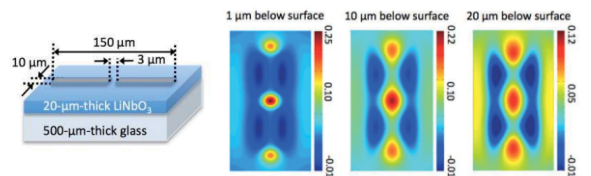
## THz-TDSによる実験



Von Ribbeck et al., Opt. Express **16** (2008) 3430.

13

## 大強度THz光源による実験(京大グループ)

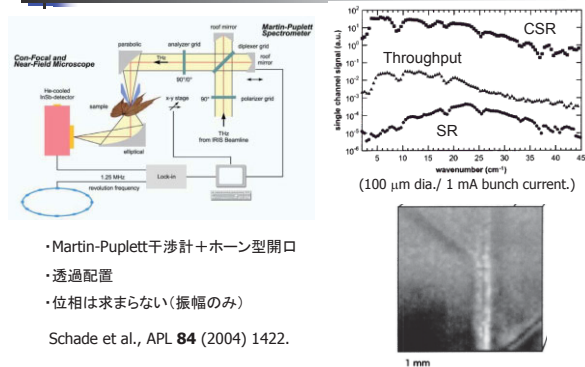


Blanchard et al., Opt. Express **19** (2011) 8277.

14

## THz-CSRによる実験(BESSY)

Schade et al., APL **84** (2004) 1422.



- Martin-Puplett干渉計+ホーン型開口
- 透過配置
- 位相は求められない(振幅のみ)

Schade et al., APL **84** (2004) 1422.

15

## まとめとTHz-CSRへの応用

- 中赤外(分子振動の指紋領域)
  - 非対称FTIR配置の装置が市販されており、高い性能を發揮。
  - 市販ブロードバンドレーザーだと、バンド幅200 cm<sup>-1</sup>程度。
  - レーザーの進歩→指紋領域全体をカバー
- THz領域のブロードバンドNSOMに向けて
  - CSR or レーザー・ベース大強度THz?
  - NSOMの光源は輝度だけでなく、安定性が特に重要。
  - 位相も求まる方が良い→干渉法 (THz TDS方式 or FTIR方式)
  - 透過で測れない試料→散乱型NSOM
  - センシング・イメージング→透過型

16

# THZ 光による protein folding 研究

木原 裕

立命館大学 SR センター

## Study on protein folding by THZ

Name Hiroshi Kihara

Affiliation SR center, Ritsumeikan University

### <Synopsis>

We propose two projects with terahertz light. The first aim is to investigate protein conformation with terahertz light. Low frequency mode of protein dynamics is crucially important for the understanding of protein structure-function relationship. The second aim is to investigate protein folding, particularly focused on the role of bound water in the intermediate of protein on the foolding pathway.

蛋白質の構造研究にテラヘルツ光が重要な役割を果たすのは間違いない。我々は、そのための予備的実験を行ってきた。蛋白質が立体構造を保持するのが、テラヘルツ領域の信号としてどのようにとらえられるか。それを解明するために、我々は、分子研のテラヘルツ・赤外光のラインで、種々の蛋白質のテラヘルツ領域の吸収スペクトルを測定した。用いた蛋白質は、主に $\alpha$ ヘリックスからなるもの、主に $\beta$ 構造からなるもの、 $\alpha/\beta$ の混在したもの、構造を取らないもの、の4分類を行い、それぞれ1種以上の蛋白質を測定した。結果は、違いがあると思われるが、理論的な解析がされていなく、発表に至っていない。もっとS/N比の高い測定をすべく準備をしている。

我々は、蛋白質のフォールディング時にどのようなステップを取ってフォールドするかを主に変性剤希釈法を用いて解明してきた。明らかになってきたストーリーは、「(1) 蛋白質は折り畳みの最初の過程で、コンパクトで、 $\alpha$ ヘリックスに富んだ初期中間体を生成する。この過程は、nativeな状態で $\alpha$ ヘリックスの多い蛋白質だけでなく、nativeでは $\alpha$ ヘリックスを全く持たない蛋白質でも同じである。(2) 初期中間体から、次の中間体（あるいは最終的なnativeな構造）への転移は、一般にあまり速くない。」であった。蛋白質は、当初変性しているときには、多くの水（プラス変性剤）に取り巻かれている。この水が、最初のコンパクト化の時にどれだけ蛋白質の外に排出されるかは、全く実験データがない。また最後の構造形

成のときにもある程度の構造水が外に排出されるのが予測されているが、実験検証はない。これらの水の移動をモニターするのに、テラヘルツは非常に重要なプローブとなりうることが予測されている。これこそ、cERL に最も期待するところである。

最後にもう一つの可能性について言及したい。強力な THZ 光であれば、蛋白質の構造情報を得るためのモニタープローブとして用いるだけでなく、蛋白質分子の特別なモードを活性化する可能性がある。例えば、蛋白質分子の大きな動きを励起する、などといったことが可能になる可能性がある。是非このようなプロジェクトを行いたいと思い、提案する次第である。



# テラヘルツ光と蛋白質

木原 裕

立命館大学SRセンター

第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ

2012年7月30, 31日

於: KEK 研究本館小林ホール

1

## 1. 蛋白質の動的構造

## 2. 蛋白質のフォールディング

## 3. THz-induced dynamics

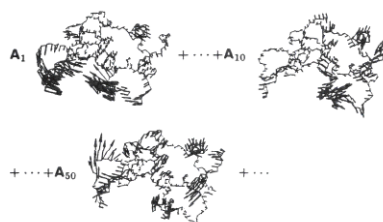
2

## 1. 蛋白質の動的構造

- 蛋白質の基準振動と生理的に意味のある振動
- 水和水の挙動
- 測定手法: 中性子非弾性散乱  
ホールバーニング  
テラヘルツ

3

fluctuations =



第2図 ヒトリゾチームのゆらぎは基準振動モードの和として表現される。最低振動モードから順に1, 10, 50番目のモードを主鎖原子の運動を表す矢印で表示した。基準振動的因子法でモードの振幅  $A_n$  を変数として実験データに合うゆらぎを推す。

木寺詔記 (1992) 日本結晶学会誌, 34, 186-191.

4

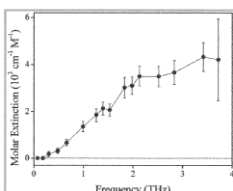


Figure 3. The terahertz molar extinctions of solvated lysozyme (along with its hydration shell) provide a measure of its low-frequency vibrational dynamics. Above ~0.2 THz, we observe a broad spectrum with an initial fast rise in absorption, and a high-frequency plateau/saturation above ~2 THz.

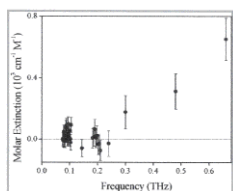


Figure 4. We see no evidence of vibrational dynamics below ~0.2 THz in solvated lysozyme. Instead, we observe a critical onset of extinction between 0.2 and 0.3 THz. This low-frequency cutoff may simply arise from the finite size of the protein.

Xu, Plaxco & Allen (2006) J. Phys. Chem. B, 110, 24255-24259.

5

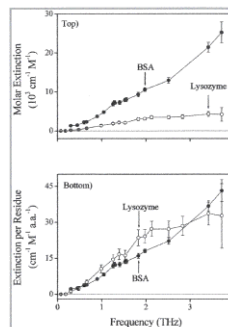
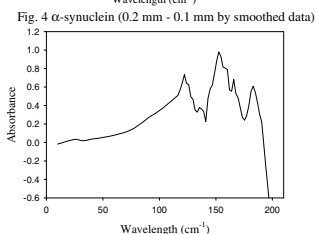
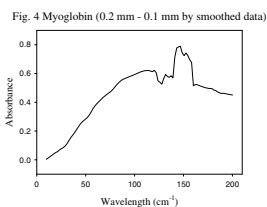
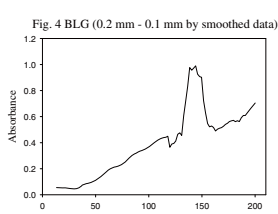
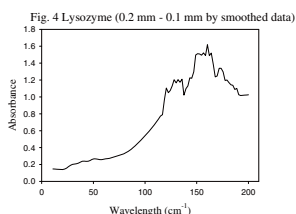
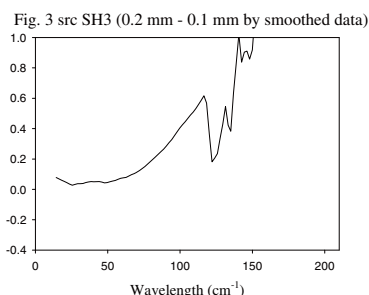


Figure 5. (Top) The absolute terahertz spectra of solvated lysozyme (○) and BSA (●) differ significantly. For example, the monotonic increase in extinction observed for BSA tapers off and saturates above ~2 THz for lysozyme. (Bottom) The apparent greater overall absorption of the BSA is largely mitigated by normalizing the spectra by the number of amino acid residues.

6



7



8

**An extended dynamical hydration shell around proteins**  $\lambda^*6-85$

Simon Ebbinghaus, Seung Joong Kim, Matthias Heyden, Xin Yu, Udo Heugen, Martin Gruebele, David M. Leitner, and Martina Havenith

PNAS December 26, 2007 vol. 104 no. 52 20749-20752

$I(d) = I_0 \exp(-\alpha d) + C$ , with  $I_0$ ,  $\alpha$ ,  $d$ , and  $C$  corresponding to the intensity before the probe, the absorption coefficient of the probe, the layer thickness of the probe, and the detector offset, respectively.

9

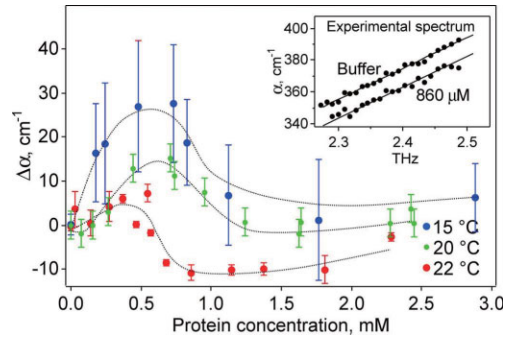
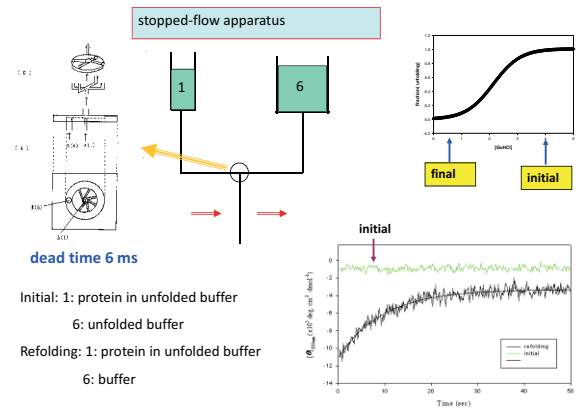


Fig. 1. Difference in the THz absorption coefficient at 2.25 THz relative to bulk water plotted against concentration to 3 mM at 15 °C, 20 °C, and 22 °C. The absorbance depends nonlinearly on concentration in this region. Note that the THz absorption for bulk water (zero point) increases with increasing temperature. (Inset) The frequency dependence of the absorption coefficient is linear between 2.25 and 2.55 THz (22 °C: comparison of buffer and at a protein concentration of 860 M).

10

**2. 蛋白質のフォールディング**



dead time 6 ms

Initial: 1: protein in unfolded buffer

6: unfolded buffer

Refolding: 1: protein in unfolded buffer

6: buffer

11

12

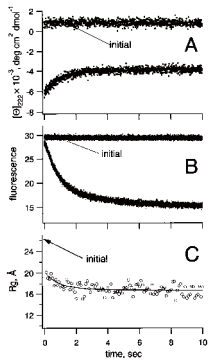
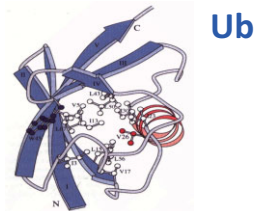


figure 3



CD amplitude is indep. of T or EGOH concentration.

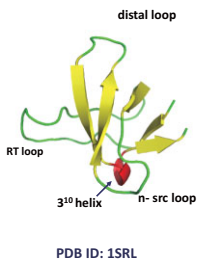
Ub is already compact after the burst phase.

Qin et al. (2002) JPC  
Larios et al. (2004) JMB

13

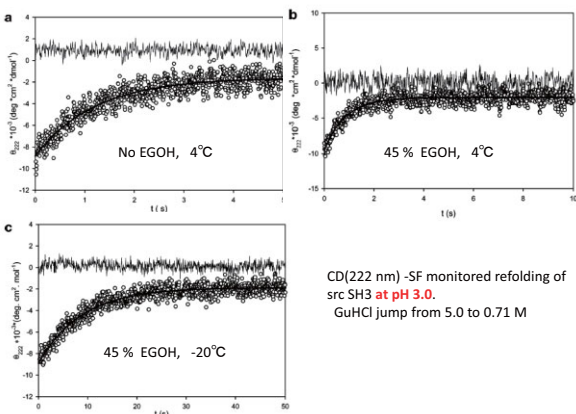
**src SH3 domain**

The SH3-fold consists of two small orthogonal three stranded  $\beta$ -sheets with an associated irregular two-stranded sheet packing against each other in a sandwich form.



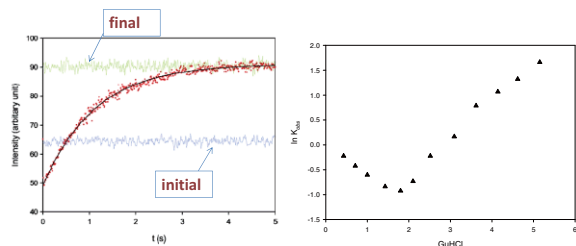
PDB ID: 1SRLL

14



CD(222 nm) -SF monitored refolding of src SH3 at pH 3.0. GuHCl jump from 5.0 to 0.71 M

15



Fluorescence -monitored folding of src SH3 at pH3.0, 4 °C  
Excitation at 295 nm.  
Fluorescence above 325 nm was collected.

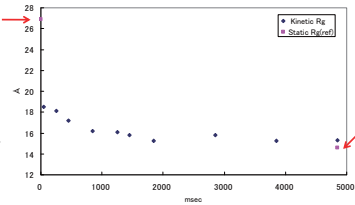
Chevron plot of SH3 folding rate observed by fluorescence at 4 °C in 50mM PBS, pH 3.0

16

X-ray Scattering Study

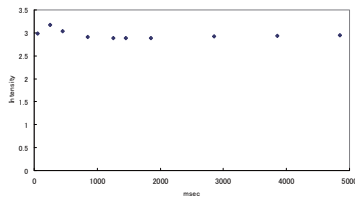
R<sub>g</sub> value vs. time

■ show static unfolding and native state value.

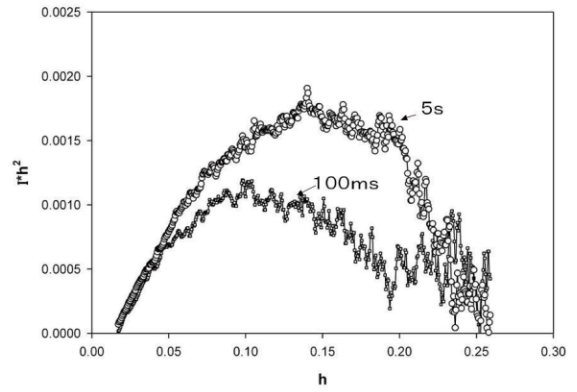


I<sub>0</sub> value vs. time

I<sub>0</sub> show almost no change. There are no association effect in this refolding process.



17



18

At which step does hydration occur?

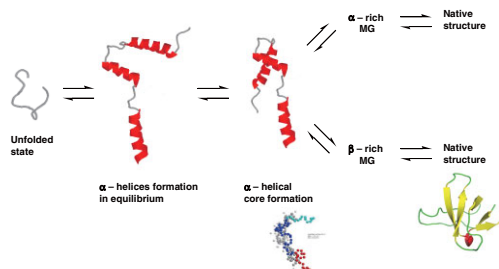


Figure 4. A proposed scheme of the initial events of protein folding, suggesting the importance of  $\alpha$ -helical core formation in case of  $\beta$ -rich proteins as well as  $\alpha$ -helical rich proteins. (Qin et al. (2001) FEBS)

19

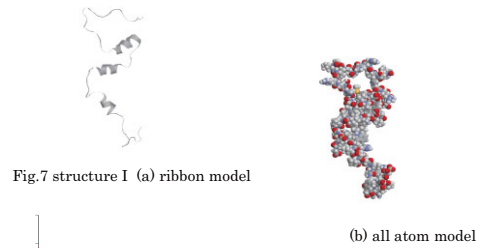


Fig.7 structure I (a) ribbon model

(b) all atom model

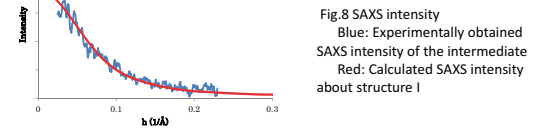


Fig.8 SAXS intensity  
Blue: Experimentally obtained SAXS intensity of the intermediate  
Red: Calculated SAXS intensity about structure I

20

Real-Time Detection of Protein–Water Dynamics upon Protein Folding by Terahertz Absorption Spectroscopy\*\*

Seung Joong Kim, Benjamin Born, Martina Havenith, and Martin Gruebele\*

Angew. Chem. Int. Ed. 2008, 47, 6486–6489

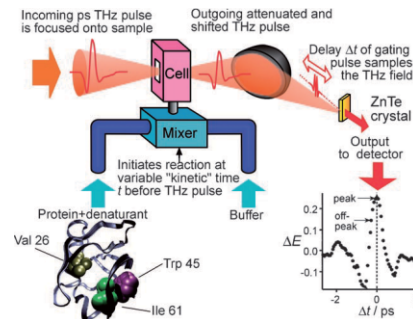


Figure 1. KITA setup: THz pulses pass through a stopped-flow cell, where a mixer combines denatured ubiquitin with denaturant-free buffer to start refolding. The shape of the transmitted THz electric field is detected using a ZnTe crystal and an 800 nm gating pulse delayed by  $\Delta t$ . The difference  $\Delta E$  of the electric field between denaturant-free 1.5 mM protein solution and buffer is shown. For kinetics, the THz pulse is detected near the maximum electric field, and the mixer is scanned in time  $t$  with respect to the THz pulse.

21

22

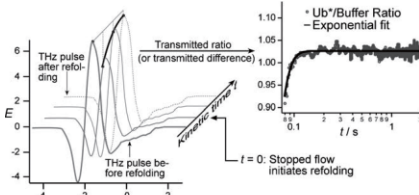


Figure 3. Left: electric field  $E$  of THz pulses. As the mixer is scanned in time  $t$  with respect to the THz pulse, the field changes because the folded protein solution has different THz absorbance and refractive index than the unfolded protein solution. Right: the ratio of protein to buffer signal reflects the refolding kinetics of Ub\* (208C, water/ethylene glycol buffer).

23

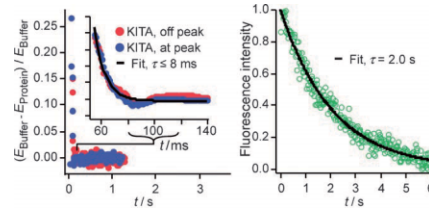


Figure 4. Ub\*V26A kinetics. Left: Terahertz transmission on and off the transmitted electric field peak yields identical millisecond kinetics at 208C. Right: Fluorescence-detected kinetics are much slower.

24

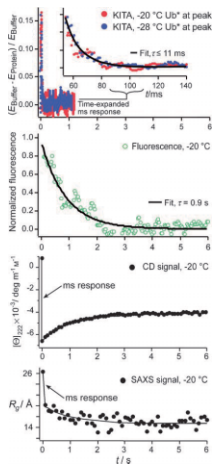
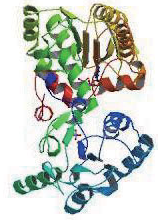


Figure 5. KITA, fluorescence, CD, and SAXS refolding kinetics of Ub\*. The bottom two panels are adapted from reference [17]. Because of the dead time, the KITA fit is an upper limit.

25

### 3. THZをトリガー・プローブとして蛋白質の動きを見る

蛋白質の柔らかさは、機能と直接関係する重要な因子であると考えられている。THZ光は、それを誘起して柔らかさと機能の因果関係を研究する重要な tool となることが期待される。



pig muscle PGK complexed with ATP (from PDB)

26

### まとめ

- 1-1. 蛋白質の低周波内部振動は、蛋白質の生理的機能と重要な関係がある。THZ 測定は、それを測定する重要な手段である。
- 1-2. THZは、蛋白質の水和構造の研究に重要な手段である。
2. 蛋白質のフォールディング時には、水和水がどの過程でリリースされるかが重要である。THZ はそれに重要な測定手段を与える。
3. 強い THZ の光源は、蛋白質の特定の内部振動を強くさせる（共鳴）。それにより蛋白質の機能と蛋白質の柔らかさとの関係を直接関係する重要な Tool を提供できる。

27

### Acknowledgements

#### Kansai Medical University

Zhijie Qin, Jinsong Li, Xianju Jin

M. Shinjo, Y. Matsumura

T. Matsumoto

#### SAXS-MD

M. Kojima (Tokyo Pharm. U.)

#### Stopped-flow

T. Nagamura & T. Nakagawa (UNISOKU)

#### src SH3 domain

S. Vyas & A.L. Fink (UCSC)

D. Baker (U. Washington)

#### Ub, fyn SH3

M. Gruebele, E. Larios (UIUC)

Special Acknowledgment to PF, APS, UVSOR, SSRL

2001.12.24

28

## cERL での X 線イメージングについて

兵藤 一行

高エネルギー加速器研究機構

物質構造科学研究所 放射光科学研究施設

### X-ray imaging at the cERL

Kazuyuki HYODO

Photon Factory, KEK

The contrast of X-ray imaging depends on the X-ray energy spectrum. Inverse Compton scattering X-rays available at the cERL is designed to produce a photon flux on sample that is comparable to the flux available at Photon Factory. This would enable us to develop practical X-ray imaging methods with a small X-ray spot and narrow bandwidth X-rays, such as micro-angiography and phase-contrast imaging used for diagnosing cancer.

cERLでは、大型放射光光源から得られる放射光に匹敵する高輝度・高強度逆コンプトン散乱X線を発生させることができると期待される。このX線は、直径数十 $\mu\text{m}$ 程度の大きさの微小焦点であること、準単色X線であること、エネルギー可変であることなどが特徴であり、イメージングに利用する場合には、従来の通常X線発生装置を用いたイメージングと比較して、得られる画像の空間分解能、濃度分解能の大幅な向上が期待される。

このことは、たとえば医学X線イメージングにおいて、現在、大型放射光施設で放射光単色X線を用いて実現されている高空間分解能、高濃度分解能イメージング法やその応用研究に関連して、臨床応用も視野に入れた実用的な応用に関する分野の研究を推進することができると考えられる。準単色X線であることを利用した吸収コントラストイメージング法、微小焦点であることを利用した位相コントラストイメージング法、タルボ干渉計などによる位相コントラストイメージング法などの適応が実現できるであろう。たとえば高性能X線検出器と組み合わせた微小血管系イメージングでは、放射光単色X線による研究の知見の蓄積を最大限に活かしながら、生活習慣病に対する革新的診断方法の開発研究、革新的治療方法の評価研究やそれらの知見を考慮した産業界への提言なども期待される。

さらに、cERLで実現できる各種イメージング法の相互連携による新しいイメージングプラットフォームの構築も期待される。

# cERLによるX線イメージング

高エネルギー加速器研究機構  
物質構造科学研究所、放射光科学研究施設  
兵藤 一行

第2回 cERLサイエンスワークショップ

1

# cERLによるイメージング

cERLの光源特性:高輝度・フェムト秒短パルス

- X線イメージング (医学応用、産業利用など)
- 高強度テラヘルツ光イメージング
- フェムト秒X線時間分解イメージング

マルチモダリティ・イメージング法の開発

X線イメージング: 試料内部構造の高精度観察 (形態)  
テラヘルツ光イメージング: 特定の分子種分布の観察 (化学状態)

骨格など生体組織の成長過程の観測  
高分子材料の構造形成過程の観測



2

## 医学応用の立場から

—大型放射光施設の社会的役割—  
—cERLによるX線イメージングの社会的役割—  
トランスレーション・メディスン

1. 先駆的、先進的診療法の提唱  
診断: 単色X線の利用  
吸収コントラスト、位相コントラストの利用  
治療: MRT (Microbeam Radiation Therapy)や  
PAT (Photon Activation Therapy)など
2. 基礎医学、臨床医学に関する新しい知見の獲得
3. 得られた知見の臨床応用による実証
4. 得られた知見の産業分野への応用 > 小型装置
5. 各種教育への貢献  
医学物理士、診療放射線技師、生涯教育

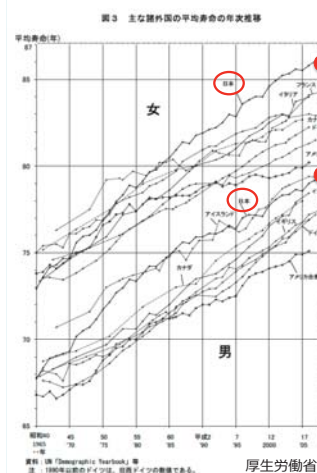
3

## 社会的背景

高齢化社会対策

キーワード  
生活の質の向上

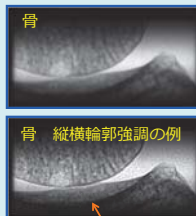
悪性腫瘍  
発生機序や進行過程の解明  
各種治療に関する評価  
血管系、リンパ管系  
骨格系  
機序の解明  
疾患の機序の解明  
各種治療に関する評価



4

## cERLによるX線イメージングの特性

発光点の大きさ: 30μm  
光子密度:  $1.3 \times 10^{16}$  photons/mm<sup>2</sup>/sec  
照射面積: 直径100 mm 程度



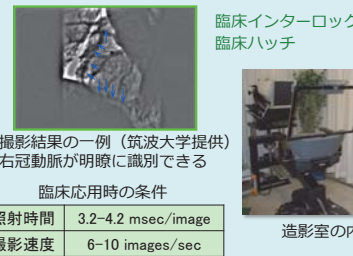
大きな照射面積、準単色X線、エネルギー可変

- 微小焦点イメージング  
空間分解能の向上  
輪郭強調、DEI等に比較して屈折効果の方向性がない
- タルボ干渉計等による位相イメージング
- 放射光研究、放射光臨床応用における知見の応用
- 装置の小型化の可能性



5

## 臨床用放射光二次元動画画像診断システム



- 知見の応用 (血管造影)
- 造影剤のK吸収端上側のエネルギーのX線のみを利用
  - X線エネルギー幅の有効利用
  - 単色X線の人体透過の状況
  - 単色X線での二次元検出器の利用
  - 臨床に関する準備

撮影結果の一例 (筑波大学提供)  
右冠動脈が明瞭に識別できる

臨床応用時の条件

照射時間	3.2-4.2 msec/image
撮影速度	6-10 images/sec

6

## 臨床応用

$5.0 \times 10^{10}$  photons/mm<sup>2</sup>/sec (at 33 keV)  
直径 1 mm、造影剤濃度 1 %

1. 体厚: 200 mm  $5.0 \times 10^7$  photons/mm<sup>2</sup>/sec
  2. 空間分解能: 200 μm  $2.0 \times 10^6$  photons/pixel/sec
  3. 照射時間: 6 msec  $1.2 \times 10^4$  photons/pixel/exp.
- 統計的 S/N ≒ 100 EGS4シミュレーション

## 動物実験

$1.0 \times 10^9$  photons/mm<sup>2</sup>/sec (at 33 keV)  
直径 50-100 μm、造影剤濃度 30 %

1. 体厚: 20 mm  $5.0 \times 10^8$  photons/mm<sup>2</sup>/sec
2. 空間分解能: 20 μm  $2.0 \times 10^5$  photons/pixel/sec
3. 照射時間: 30 msec  $6.0 \times 10^3$  photons/pixel/exp.

7

## cERLによるX線イメージング

光源	装置の大きさ	実効焦点の大きさ	エネルギー分解能	時間分解能	照射面積	時間軸応用を想定
cERL利用	△	○	○	○	○	○
放射光	×	◎	◎	○	△	○
小型専用放射光	△	○	◎	○	△	△
微小焦点X線発生装置	○	○	×	×	○	△
X線発生装置	○	△	×	○	○	○
準単色X線発生装置	○	△	○	△	○	△

放射光の知見 > cERLの利用 > 医学応用、臨床応用

8





午前

新井先生：新しいX線検出器 SOI

鶴嶋先生：医学応用、脳外科  
診断、治療、DDS

午後

百生先生：X線光学

ターボ干渉計など

盛 先生：医学応用、循環器内科  
微小血管造影

# SOI Pixel 検出器による X 線イメージング

新井 康夫

高エネルギー加速器研究機構、素粒子原子核研究所

## X-ray Imaging with SOI Pixel detector

Name Yasuo Arai

Affiliation High Energy Accelerator Research Organization (KEK),  
Institute of Particle and Nuclear Studies

### <Synopsis>

In KEK Detector Technology Project, we have been developing SOI Pixel detectors (SOIPIX) where both radiation sensors and readout electronics are implemented on a Silicon-On-Insulator (SOI) wafer. The SOI wafer has a thin layer of integrated-circuit electronics and high-purity thick Si substrate, and these are separated by a thin oxide layer. The SOIPIX can achieve high resolution X-ray imaging since it is fabricated with fine semiconductor process only. Furthermore, each pixel has CMOS integrated circuit, so in-pixel data processing such as time resolved measurement, energy discriminated detection etc. can be realized.

Recent results and future prospect of this technology are reported.

KEK の測定器開発室では、放射線センサーと読み出しエレクトロニクスを一体化させた SOI Pixel 検出器 (SOIPIX) の開発を行っている。Silicon-On-Insulator (SOI) ウエハーとは集積回路を搭載する薄い Si 層と高純度の厚い Si 層を、絶縁膜を間に張合わせたものである。SOIPIX は、半導体微細加工技術のみで製造される為、非常に高精細な X 線画像が得られる。また各画素に集積回路が搭載される事から、従来不可能であった時分割測定やエネルギー弁別測定等が実現出来る。

最近の測定結果や、今後の開発見通しについて報告する。

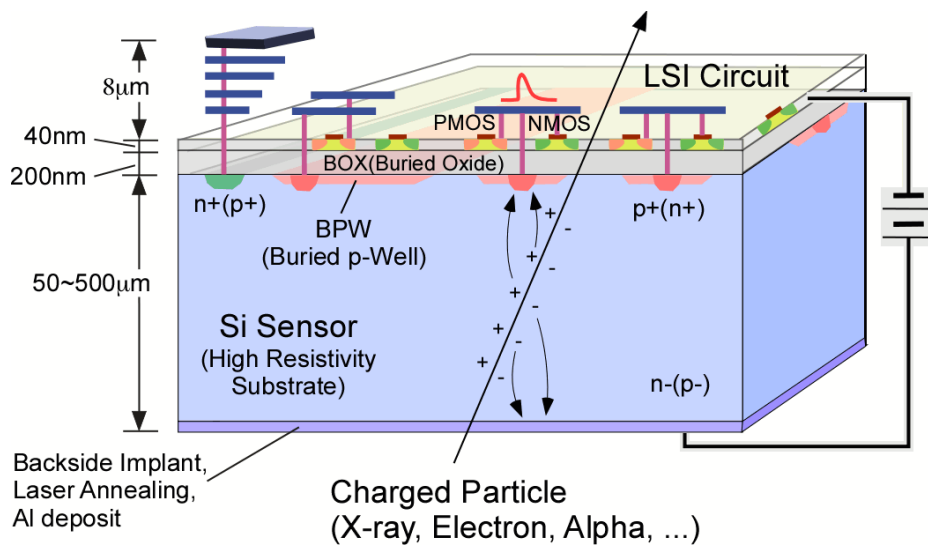


Fig. Cross-section of the SOIPIX detector.

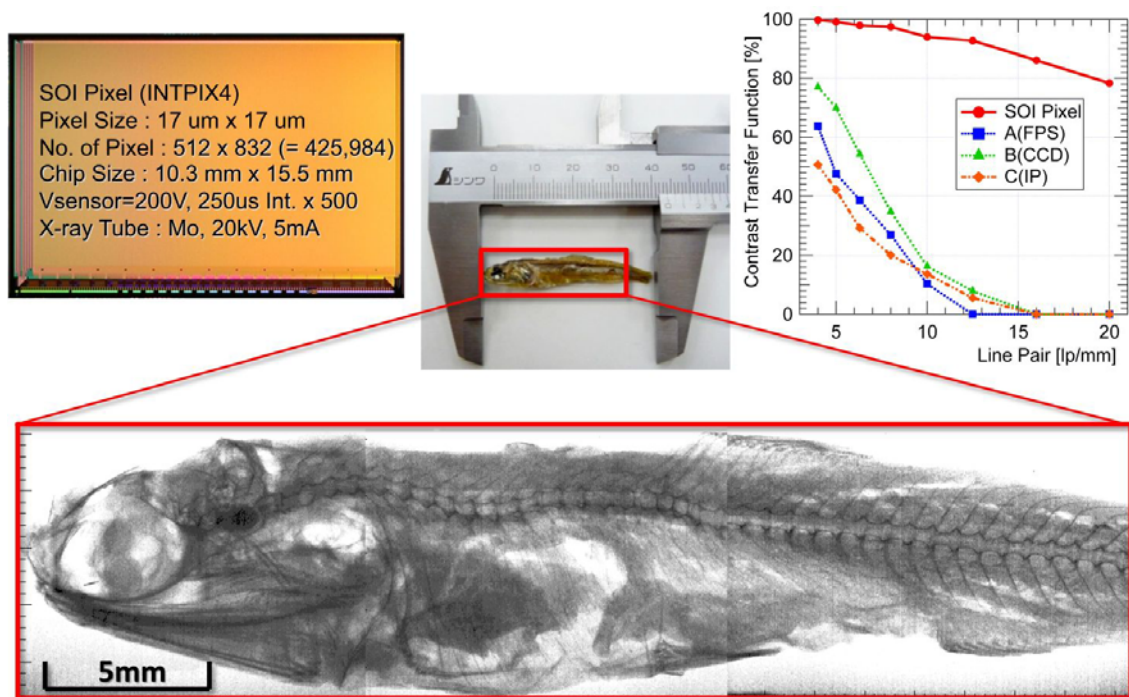


Figure. X-ray image of a dried fish taken by the SOI based sensor, INTPIX4. Photograph of the sensor is shown at the upper left corner with basic parameters. Contrast Transfer Function (CTF) of the sensor, which indicates ability of resolving fine structure, is shown in the upper right graph. The graph also includes CTF of commercial X-ray sensors (A: X-ray flat panel sensor of 50  $\mu\text{m}$  square, B: Fiber-coupling X-ray CCD with effective pixel size of 23  $\mu\text{m}$  square, C: X-ray Imaging plate of  $\sim$ 50  $\mu\text{m}$  resolution). SOI sensor shows superb resolution especially for fine object.



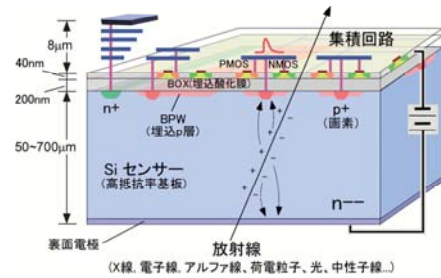
# SOI Pixel検出器による X線イメージング

2012年7月31日 @cERL W.S.  
新井康夫  
高エネルギー加速器研究機構  
yasuo.arai@kek.jp  
http://rd.kek.jp/project/soi/

1

## Silicon-On-Insulator Pixel Detector (SOIPIX)

半導体放射線センサの高分解能と、集積回路の高機能を併せ持つ、3次元構造のイメージング検出器。

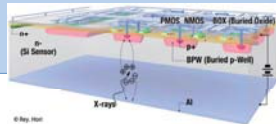


2005~ KEK測定機開発室プロジェクト  
JST 先端計測分析技術・手法開発事業(2007~2011)で最高評価(S)。

2

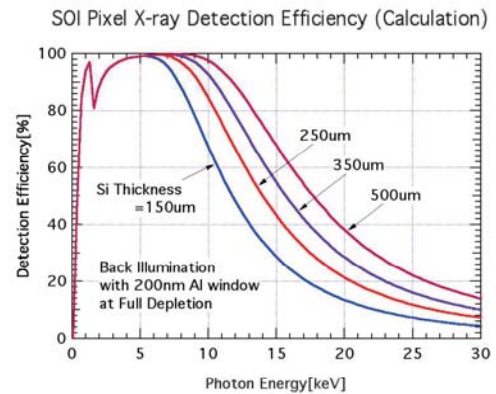
## SOI Pixel検出器の特徴

- 機械的接合がなく、半導体微細加工のみ。高信頼性、高分解能、低価格が望める。
- センサーが薄くても充分なS/N。逆に厚くする事で、高エネルギーX線に高い感度。
- 高度信号処理回路やメモリーを持つインテリジェント・ピクセルが可能に。
- 過酷な環境(極低温、放射線)への耐性。
- 基本技術は産業界の標準。技術発展の取り込みが容易。



3

## SiによるX線の検出効率



4

## 主な参加研究機関

- 高エネルギー加速器研究機構(素核研、物構研)、筑波大学、京都大学、大阪大学、東北大学、京都教育大学、東京大学、...
- 宇宙航空研究開発機構、宇宙科学研(JAXA/ISAS)、産総研、高輝度光科学研究センター(Spring-8, JASRI)、理化学研究所
- Lawrence Berkeley National Laboratory
- Fermi National Accelerator Laboratory
- Univ. of Hawaii, BNL, Univ. of Heidelberg
- IHEP, China

- JST 先端計測分析技術・手法開発事業(要素技術プログラム)(2007.10~2011.3) 評価S。
- 科研費基盤A(2009.4~2013.3)
- 日米科学技術協力、アジア加速器検出器協力、他
- (株)Lapis Semiconductor、(株)リガク等の企業と共同研究。

5

SOIPIX技術は、日本が世界をリードし、国際的にも注目されている

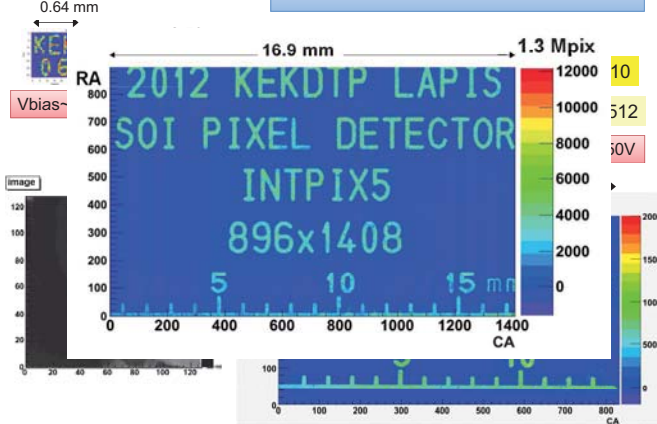
0.2 µm Fully-Depleted SOI Pixel Process (ラピスセミコンダクタ社と共同開発)

- 海外では研究所内プロセスに留まる。
- 量産ラインを利用した信頼性の高いプロセスは我々のみ。
- 現在、国内外を含めたユーザー数は~150名。
- 海外から多数のビジター、共同研究申込。



6

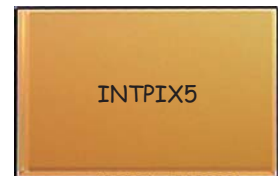
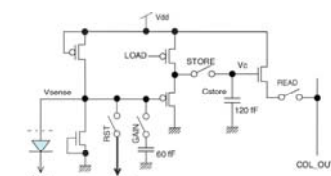
## 2006 32x32 KEKでのSOI Pixel 検出器開発



7

## 積分型SOI検出器

	INTPIX4	INTPIX5	FPIX1(*)
ピクセルサイズ	17 µm 角	12 µm 角	8 µm 角
画素数	512 x 832	896 x 1408	512 x 512
チップサイズ	10.2mm x 15.4mm	12.2mm x 18.4mm	6mm x 6mm
シャッター機能 (STORE Switch)	有り	有り	無し
Correlated Double Sampling (CDS)	ピクセル内蔵	コラムに内蔵	無し
ゲイン調整	無し	x1, x1/7	無し
最大電荷量	80 ke-	~70 or 490 ke-	~40ke-
ウェハータ입	n型 CZ, FZ	n型 CZ	n及びp型 CZ
センサー厚さ	260 µm(CZ), 500 µm(FZ)	260 µm	260 µm

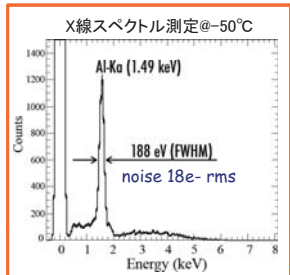
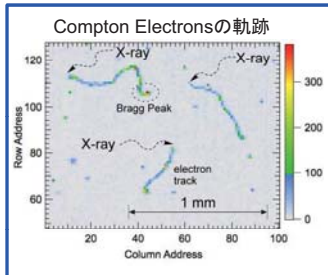
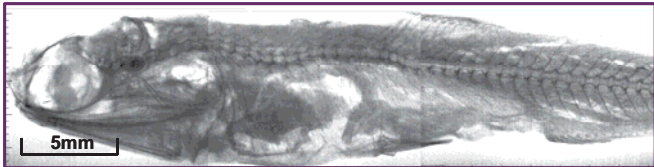


8



### SOIPIXによる測定例

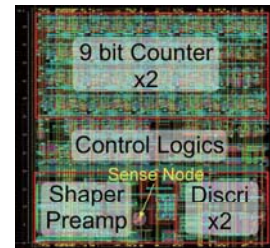
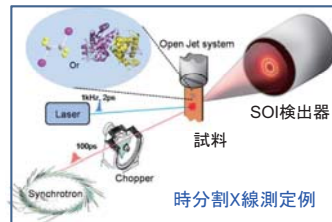
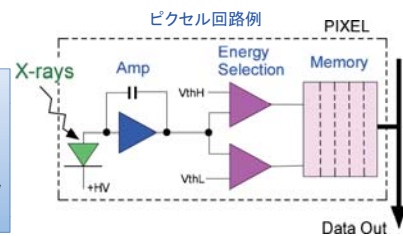
煮干しX線線像 (3 イメージ合成)



9

### 計数形ピクセル

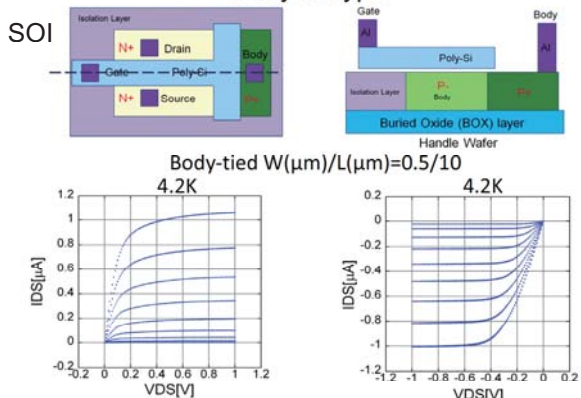
- ピクセル内にアンプやカウンタを内蔵。
- 画素毎に複数メモリを内蔵させる事で、外場からの刺激と同期させた、ダイナミクスの撮影が可能に。



10

### IV characteristics at cryogenic temperature

Body tie type

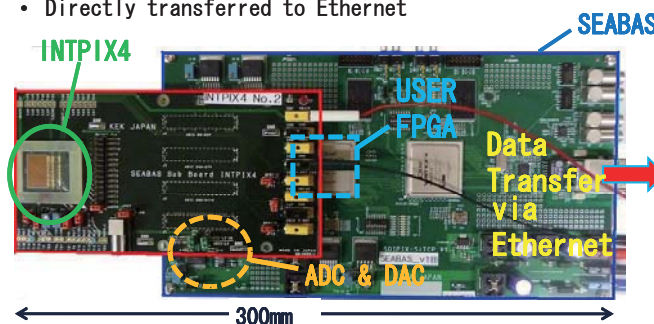


The kink effects do not occur for  $|VDS| \leq 1.0V$  ( $L=10 \mu m$ )

11

### Data Acquisition Board

- SoI Evaluation Board with Sitcp (SEABAS)
- A FPGA controls the SOI Pixel chip
- Directly transferred to Ethernet



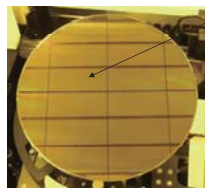
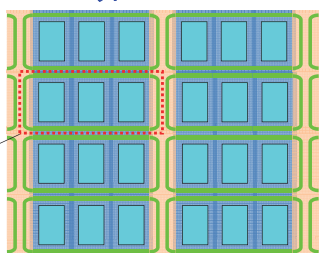
12

### 大面積検出器の開発: スティッチング露光

#### ◆マスクレイ



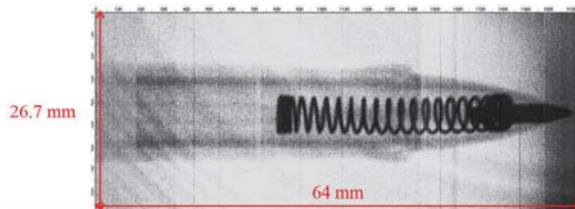
#### ◆露光レイアウト



13

### 大面積検出器 (SOPHIAS, 理研)

Preliminary!



Very primitive image quality, yet important step toward realization of SOPHIAS

14

### Summary

- SOI センサーは、半導体プロセスで製造する新しいタイプの放射線イメージセンサー。
- 回路の工夫により、従来不可能だった超小型、高精細、広ダイナミックレンジ、Photon Counting、時分割、エネルギー弁別等の新たな特徴をもった測定が可能となる。
- 国内外の大学・研究所、さまざまな分野の研究者の参加を得て、年2回程度の相乗りプロセスを行っている。
- SOIPIXではセンサーや回路をカスタム設計する事により、従来の検出器では実現出来なかったような測定を可能にします。
- 逆に、実験に携わる方のフィードバックがないと検出器の設計が行えません。
- ご興味のある方は、ぜひ開発に参加して下さい。

15

## 放射光の臨床応用の可能性について

鶴嶋英夫 1)、Alexander Zaboronok1)、黒田隆之助 2)、小池正記 2)、  
山田家和勝 2)、兵藤一行 3)、松下昌之助 4)、松村明 1)

1 : 筑波大学医学医療系脳神経外科、2 : 産業技術総合研究所計測フロンティア研究部門、  
3 : 高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所放射光科学研究施設、  
4 : 筑波大学医学医療系循環器外科、

## Clinical Application of Synchrotron X-Rays

Hideo Tsurushima1), Alexander Zaboronok1), Ryunosuke Kuroda2), Masaki Koike2),  
Kawakatsu Yamada2), Kazuyuki Hyodo3), Shonosuke Matsushita4), Akira Matsumura1)

1: Department of Neurosurgery, Faculty of Medicine, University of Tsukuba, 2: Research Institute of Instrumentation Frontier, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3: Photon Factory, High Energy Accelerator Research Organization, 4: Department of Cardiovascular Surgery, Faculty of Medicine, University of Tsukuba,

### <Synopsis>

It has been reported that a combined treatment involving radiation and anticancer agents including platinum is useful for the anticancer treatment, because of the platinum absorbing the X-rays and releasing secondary electrons. However, platinum can absorb only an X-rays with a specific energy, whereas the X-rays used in clinical medicine are white X-rays. Moreover, the dose of anticancer agents is limited owing to their unpleasant side effects. We are attempting to develop a novel chemoradiation treatment system with high specificity and high cytotoxicity, by replacing white X-rays with monochromatic X-rays, and using an active targeting drug delivery system to increase the platinum concentration in cancer tissue. And then I will talk about the potential of synchrotron X-ray in the imaging machine.





## 単色X線と金・白金製剤DDSの 癌治療に関する研究

筑波大学医学医療系  
脳神経外科  
鶴嶋 英夫

筑波大学脳神経外科

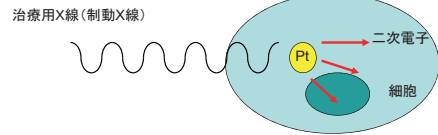
1



放射線と金・白金複合体抗癌剤の組み合わせ治療には**相加的治療効果**がある。  
by Richmond RC. et al. Radiat. Res. 1976

これ以後、基礎研究・臨床研究で放射線療法と白金化合物であるシスプラチン  
化学療法の相加的治療効果が報告されてきた。  
by Dewit L. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 1987

この相加的治療効果はシスプラチンが含む**白金**に放射線があたり**二次電子**が  
癌細胞内で発生しているためと考えられている。  
by Zheng Y. et al. Phys. Rev. Lett. 2008



筑波大学脳神経外科

2



この相加的効果を強め相乗的にするために

- 1) 白金に対して吸収されやすいエネルギーレベルの**単色X線**を使用する。  
現在の治療用X線は広いエネルギーレベルのX線を含んでおり、白金  
に吸収されるのはその一部だけ
- 2) **active targeting DDS**を使用して癌組織における白金の濃度を上げる。  
DDSを使用して癌組織に特異的に金・白金製剤をデリバリーして、  
癌組織中の濃度を上げる。

### 目的

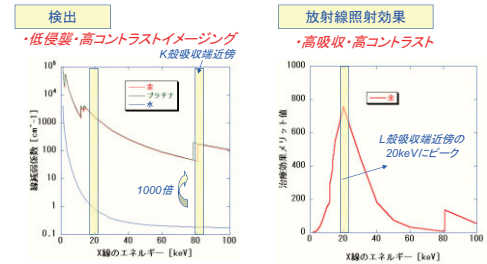
**単色X線とactive targeting DDS**を組み合わせることにより、  
従来にない強力かつ安全で理想的線量分布を持つ放射線・  
化学複合療法を開発することにある。

筑波大学脳神経外科

3



### 金・白金元素とX線の相互作用



- 癌検出には** 低エネルギー・高いコントラスト  
..... K殻吸収端近傍を利用 約80keVの単色X線が有用
- 癌治療には** 高吸収・高いコントラスト(10μm厚での吸収率×水との吸収比)  
..... L殻吸収端近傍を利用 約20keVの単色X線が有用

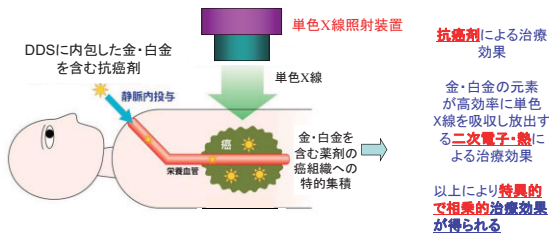
筑波大学脳神経外科

4



### 悪性新生物に対する単色X線療法

- 1) 金・白金の元素又はこれら元素を含む抗癌剤を効果的に腫瘍組織へデリバリー  
させるためのactive targeting DDSの研究
- 2) 単色X線照射装置の開発研究



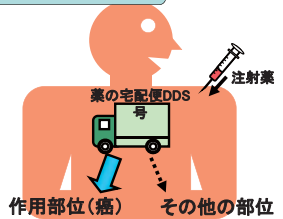
筑波大学脳神経外科

5



### Drug Delivery System (DDS)は『薬の宅配便』

クスリを分解させずに  
...プロテクション  
目的部位に送り届け  
...**ターゲティング**  
その放出を制御する  
...コントロールリリース



病巣部に薬物を集積させれば  
・薬効が上がる。  
・投与量を減らして副作用を抑えられる。

### ターゲティングには

**Passive targeting DDS:**  
病巣血管の透過性亢進など物理  
的作用によりDDS粒子を病巣部  
に集積させる。数倍~10倍の集積  
——現在実用化されつつある

**Active targeting DDS:**  
分子の親和性を利用して積極的に  
DDS粒子を病巣に集積させる。  
in vivoにおける成功例は少ない。50倍以上の集積  
——次世代DDSとして研究中

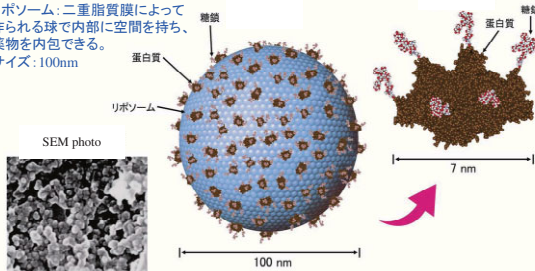
筑波大学脳神経外科

6



### Active targeting機能を持つ糖鎖修飾リボソーム

**糖鎖修飾リボソームの構造**  
リボソーム・二重脂質膜によって  
作られる球で内部に空間を持ち、  
薬物を内包できる。  
サイズ: 100nm



糖鎖は**レクチン蛋白質**と特異的親和性  
を持っている。体内でレクチン蛋白質が発見  
した部位に粒子を集積させることができる。

筑波大学脳神経外科

7

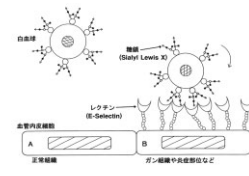


糖鎖とレクチン蛋白質の親和性は体内で既に機能している。

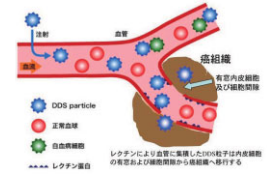
### 白血球の炎症組織、癌組織への集積である。

産総研DDSは白血球と同様に炎症や癌により血管内皮細胞に発現した**レクチン**蛋白質を糖鎖が認識し、結合する。DDS粒子は血管内皮に集積し、血管内皮細胞の隣  
んだ細胞間隙及び内皮細胞の有窓部から**組織中へ移動**すると思われる。

### 白血球の場合



### 産総研DDSの場合

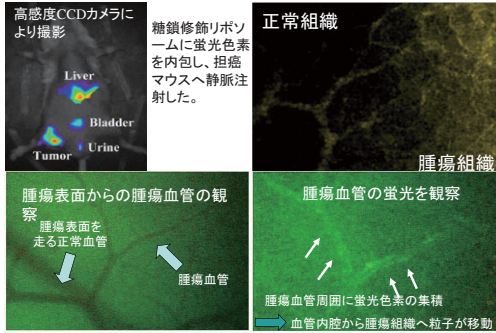


筑波大学脳神経外科

8



### 癌移植マウスでの癌組織へのDDS粒子の集積



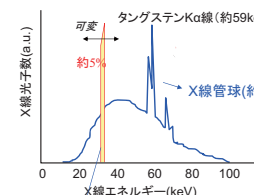
⇒ 本提案により金コロイド・シスプラチン等を癌細胞に集積させるDDSの開発を行う

筑波大学脳神経外科

9

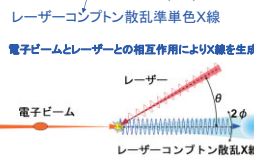


### レーザーコンプトン散乱による準単色X線



X線管球のカーブに各エネルギーにおける吸収率を乗じたものの総和がLineacなどによる放射線療法の治療線量になっている。

つまり金・白金元素と相互作用をおこす20keVのX線は従来線源では全体の数%しかない



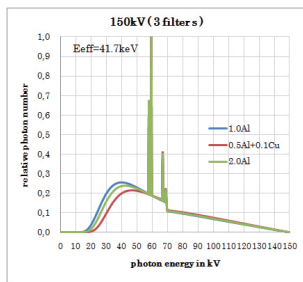
レーザーコンプトンを用いれば準単色・波長可変・小型X線源が可能

筑波大学脳神経外科

10



### Filters for X-ray tube



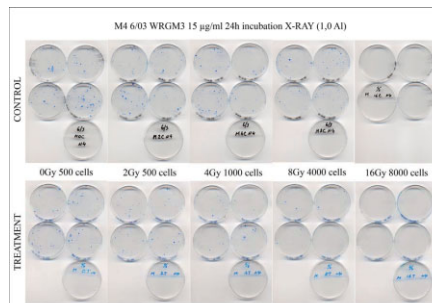
With the adjustment of the correct filter for X-rays (in our case it was 1,0 mm Aluminum filter) it was possible to achieve best results in colony forming assays using U251 glioma cells and WRHG3 (8nm) gold nano-particles with the initial concentration of 30 µg/ml in the medium.

筑波大学脳神経外科

11



### Results with 1,0 mm Al filter



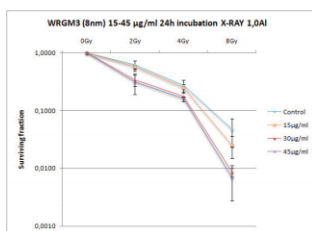
Starting with the first trial using 1,0mm Al filter we could see adequate results of colony formation in all experiments.

筑波大学脳神経外科

12



### Results: colony forming assays using 45µg/ml WRGM3 (8nm) particles



Further increase in the concentration of gold didn't show the significant decrease in the survival fraction.

Theoretically, there could be the limit of gold absorption by U251 glioma cells in the given conditions of the experiment.

筑波大学脳神経外科

13



### 放射線療法に対する癌細胞の生物学的評価方法

- Real time PCRによる遺伝子発現の定量化  
放射線照射によって発現亢進する遺伝子(ケモカイン等)を検出、放射線照射効果を評価
- EGR-1 promoter-GFP 又は -Luciferase遺伝子導入細胞を用いた評価方法  
EGR-1 promoterは放射線によって発生するfree radicalに反応して転写を開始するpromoterである。この評価方法ではfree radicalの量に従ってGFPやLuciferaseが産生され、細胞内で検出できる。
- 細胞生存率による細胞傷害性評価  
MTT assay, CVIによる放射線照射後の生存細胞数の評価
- colony forming assayによる細胞viabilityの評価
- apoptosis誘導性に関する評価
- 癌細胞移植動物を用いた治療効果の評価

引用: Tsurushima H et al. Cancer Lett 2007, 246: 319-323.  
Tsurushima H et al. Cancer Gene Ther 2007, 14(8): 706-716.  
Tsurushima H et al. Int J Radiation Oncology Biol Phys 2008, 71(2): 517-525.

筑波大学脳神経外科

14



### これまでの同類の研究報告

Biston MC. Et al. Cure of Fisher rats bearing radioresistant F98 glioma treated with cis-platinum and irradiated with monochromatic synchrotron X-rays. Cancer Res 2004; 64: 2317-2323

Rousseau J. et al. Enhanced survival and cure of F98 glioma-bearing rats following intracerebral delivery of carboplatin in combination with photon irradiation. Clin Cancer Res 2007; 13: 5195-5201

Adam JF. Et al. Heavy element enhanced synchrotron stereotactic radiotherapy as a promising brain tumour treatment. Physica Medica. 2008; 24: 92-97

筑波大学脳神経外科

15



### 次世代Drug Delivery System (DDS)の臨床応用への研究

筑波大学脳神経外科

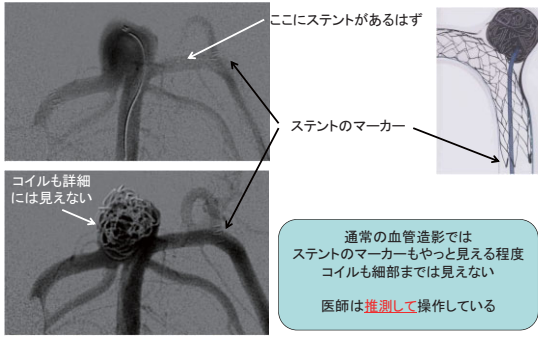
16







### 通常の血管造影でのステントの撮影状況



筑波大学脳神経外科

25



### 高エネルギー加速器研究機構



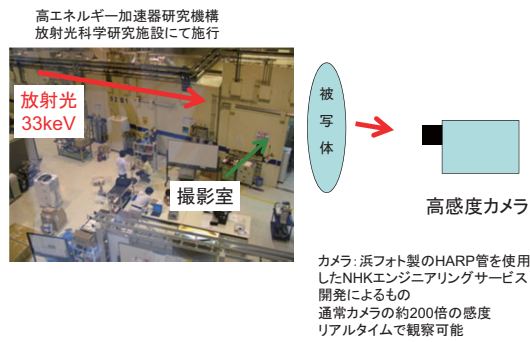
サイクロトロン

筑波大学脳神経外科

26



### 放射光によるステント・コイルの撮影方法

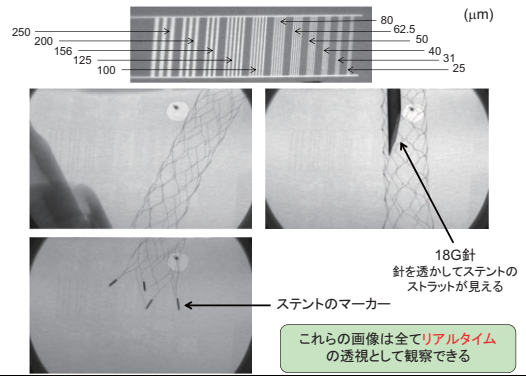


筑波大学脳神経外科

27



### 放射光によるステントの撮影 (33keV)

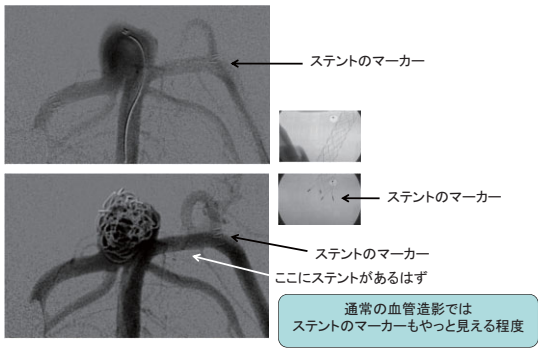


筑波大学脳神経外科

28



### 通常の血管造影でのステントの撮影状況

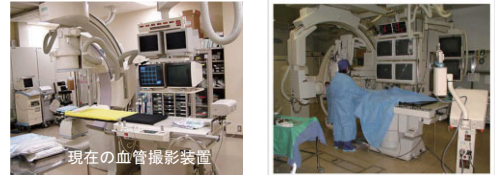


筑波大学脳神経外科

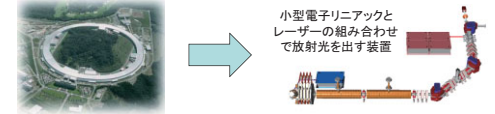
29



### 病院設置型線源の開発



産業技術総合研究所における線源のコンパクト化を目指した研究

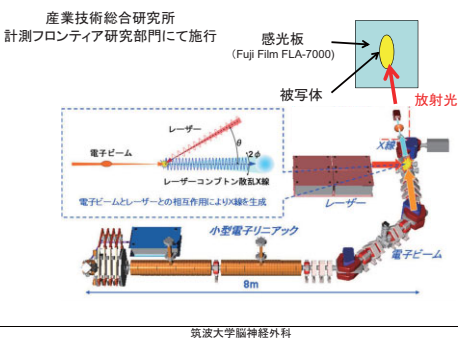


KEK photon factory 又は Spring-8 筑波大学脳神経外科

30



### レーザーコンプトン散乱準単色X線源を用いたステント・コイルの撮影方法

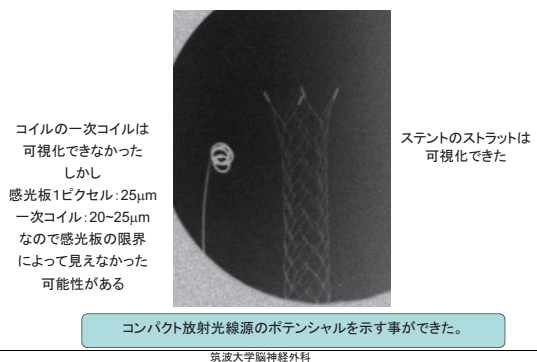


筑波大学脳神経外科

31



### コンパクト放射光線源でステント・コイルを撮影(静止画像)



筑波大学脳神経外科

32



## 高感度カメラの効用

### 血管内手術による被爆線量

脳動脈瘤塞栓術による被爆線量 ----- 平均2.6 Gy (最大5.4 Gy)  
 - 過性初期紅斑 ----- 11/17例中  
 - 過性脱毛 ----- 3/17例中

Japanese Society of Radiological Technology Suppl より

ハイビジョンでの夜間緊急報道等に威力を発揮  
**超高感度ハイビジョンハンディカメラ**

スーパー-HARP撮像管\*を世界に先駆けて開発し、いろいろな番組制作に活用してきました。今回、より一層の感度向上と信頼性改善を理った実用型の新スーパー-HARP撮像管を開発し、これを用いた超高感度ハイビジョンカメラを開発しました。超高感度・CCDカメラの約50倍の高感度を誇っています。

\*HARP: High-gain Avalanche-Rushing amorphous Photoconductor



NHK放送技術研究所ホームページより

### 被爆線量の軽減

筑波大学脳神経外科

33



通常の血管造影撮影装置による最小血管は**200~400 μm弱程度**

前出の画像では約**25 μmの線**を識別することができる解像度であった。

ステントの拡張径は4mm程度でステントストラットは50 μm以下と思われる。

放射光でなければ認識できない大きさ

拡張時で  
 ステント構造/ステント拡張時の径 = 1/100くらい

モニター上で拡張時ステント径を10cm程度にして、観ているとすれば  
 ステント構造物は1mmくらいの太さに見えることになる。

おそらく少しのコントラストでも可視化できるので

ステント以外の**コイルもよく見える**……塞栓状況を詳細に観察できる。  
**液体塞栓物質**などの可視化……液体塞栓物質には金属を混ぜているものもあるが、それらが不要になるかもしれない。  
**造影剤そのものを変えてしまう**可能性もある。

筑波大学脳神経外科

34



X線源は、この80年くらい全く変化がなかった。

最先端技術で作りに出された見えないステントを、  
 最先端技術で作りに出される新しいX線光源  
 で可視化する。

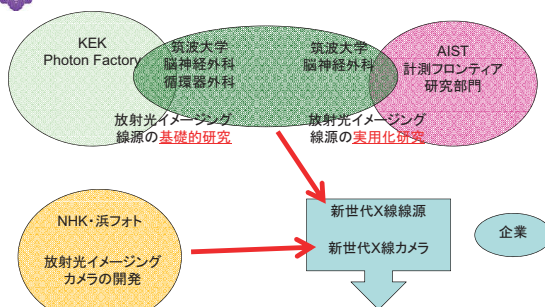
**新世代血管撮影装置**の開発を目指す。

ステントのリアルタイムの可視化は、血管内手術の操作をより確実でより安全なものにすると思われる。

ハイビジョンテレビと同じ、一度高解像度の画像をみたら元にはもどれない。

筑波大学脳神経外科

35



新世代血管撮影装置

筑波大学脳神経外科

36



放射光を用いたイメージングで臨床で求められるものは何か？

「見えないものが見える。」ことの意味とは？

解剖学的な生体構造  
 血管構造  
 病理学的な生体構造  
 癌の異常血管

微細構造の情報は臨床情報と対比してその臨床的価値を検討する必要がある。

生体材料 (Biomaterials)  
 ステント  
 塞栓物質

見えないステントのリアルタイムの可視化  
 狭心血管や脳動脈瘤閉塞術で血管再建のために用いられる

リアルタイムの可視化は血管内操作の安全性を向上させる？

筑波大学脳神経外科

37

# レーザーコンプトン X 線へのタルボ干渉計の応用

百生 敦

東北大学、多元物質科学研究所

## Talbot Interferometry with inverse Compton scattering X-rays

Atsushi Momose

Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University

### <Synopsis>

The property of inverse Compton scattering X-ray beam produced at compact ERL is expected to be highly compatible with Talbot interferometry from viewpoints of its spectrum and beam size. A plan of application study of X-ray phase imaging with a Talbot interferometer is introduced.

弱吸収物体の撮影を容易にする X 線位相イメージング手法は、1990 年代から様々な手法が考案されている。X 線 Talbot 干渉計[1]は 2000 年代に入って研究されるようになった位相イメージング用デバイスである。X 線透過格子を光学素子として使用する構成を持ち、柔軟な使い方ができるところが特筆すべき特徴である。シンクロトロン放射光に限らず、実験室 X 線源（マイクロフォーカス X 線源）でも実用的な装置が構成されている。また、X 線 Talbot-Lau 干渉計と呼ばれる発展型の構成においては、通常フォーカスの X 線源でも機能するため、これによる医用機器開発などのプロジェクトが進行中である。

さて、X 線 Talbot 干渉計の有用な特徴として、①バンド幅の広い X 線源に対して機能する（結晶分光器を必ずしも必要としない）こと、②球面波 X 線に対して機能すること、が挙げられる。結晶によるブラッグ回折を用いる他の位相コントラストには無い特徴である。これは、cERL で発生が予定されている逆コンプトン散乱 X 線のほぼ全てを使った X 線位相イメージングが行えることを意味しており、視野、空間分解能、撮影時間などの基本特性において、優れた性能が期待され、高度な実験が可能になるものと期待される。cERL が将来さらにコンパクト化される道筋があれば、本イメージングプラットフォームはさらに魅力的が増すであろう。講演では、本手法の開発経緯とこれまで達成してきた撮影結果を紹介し、最後に cERL への期待を述べる。

[1] A. Momose et al, Jpn. J. Appl. Phys. 42 (2003) L866-L868.



# レーザーコンプトンX線への Talbot干渉計の応用

百生 敦  
東北大学多元物質科学研究所

1

## X線位相コントラスト法

**Bonse-Hart X線干渉計**

**伝播法 (in-line法)**

**DEI: Diffraction Enhanced Imaging**

**Zernike位相差顕微鏡**

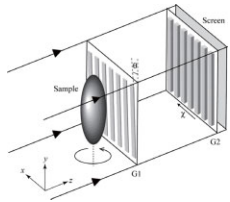
**X線Talbot干渉計**

※1 A. Momose et al., Med. Phys. 22 (1995) 375-379  
 ※2 A. Momose et al., Jpn. J. Appl. Phys. 42 (2003) L864-L868  
 ※3 Y. Kagoshima et al., J. Phys IV 104 (2003) 49-52

2

## X-ray Talbot interferometerの特徴

- ➔ 光学系が扱い易い
- ➔ 微分位相コントラストを生成
- ➔ コーンビームが使用可能
- ➔ 準単色X線 ( $\Delta E/E < 0.1$ ) が使用可能  
白色放射光でも実績あり
- ➔ シンクロトロン放射光以外のコンパクトX線源で展開可能
- ◎ 高アスペクト比のX線透過格子の製作



A. Momose et al., Jpn. J. Appl. Phys. 42 (2003) L866

3

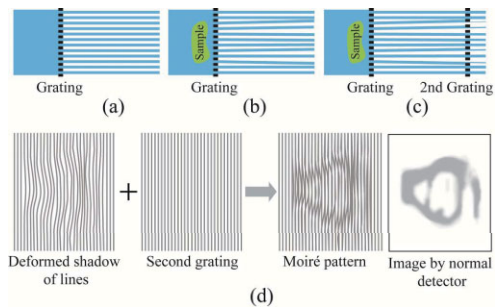
## X線Talbot(-Lau)干渉計のための光学素子 —X線格子の製作—

SPRING-8  
NewSUBARU

LASTI Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry, University of Hyogo

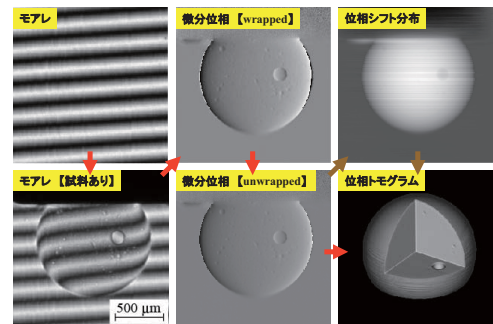
4

## X線の屈折を検出する新しい方法 X線Talbot干渉計



5

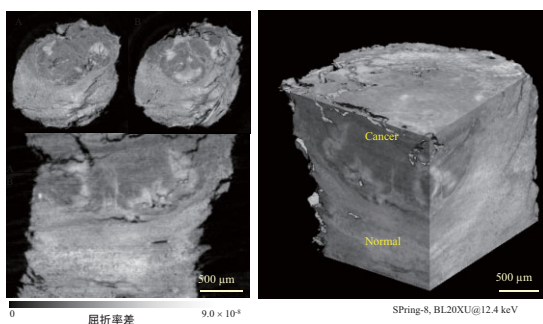
## 画像変換の流れ



6

## 観察例① ウサギ肝臓 (VX2)

A. Momose et al., Jpn. J. Appl. Phys. 45 (2006) S254



7

## 観察例 PS/PMMAブレンド

マルチライン線源 回折格子 G1 吸収格子 G2 検出器  
0.2mm 60mm 1190mm 212mm  
X線管のターゲットはW (中心波長 $\lambda \approx 0.5 \text{ \AA}$ )  
 $\delta \ (\times 10^{-7})$

8

### Third Contrast

Dark-field image  
Visibility image  
Scattering image

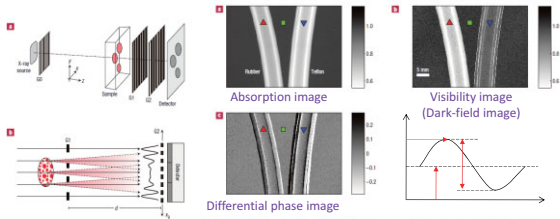
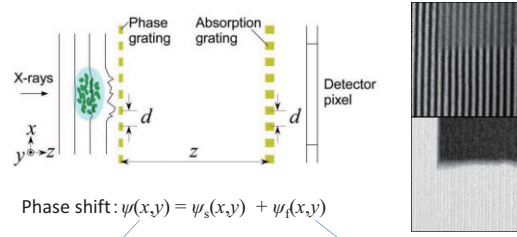


Figure 2 X-ray imaging of a test sample consisting of a PTFE (white plastic) tube and a natural rubber tube. (a) Conventional X-ray transmission image (normalized to the empty beam). (b) Dark-field image of the same sample demonstrating visibility. (c) Phase-contrast image. (d) Images are shown on a linear gray scale. A. Intensity oscillations for these detector pixels extracted from a series of eight images taken at different values of  $\phi_0$ . Clearly visible is the loss of fringe visibility in the detector pixel behind the rubber rubber tube due to the strong small-angle scattering produced by microscopic density fluctuations in the tube. The total exposure time for the entire data set was 40 s.

F. Pfeiffer et al., Nature Mat. 7 (2008) 134.

9

### 第3のコントラスト visibility像



$$\text{Phase shift: } \psi(x,y) = \psi_s(x,y) + \psi_r(x,y)$$

$\psi_s(x,y)$ : Component varying slowly comparing to the system spatial resolution

$\psi_r(x,y)$ : wave front fluctuation with the scale smaller than the system spatial resolution = 極小角散乱

Differential phase contrast

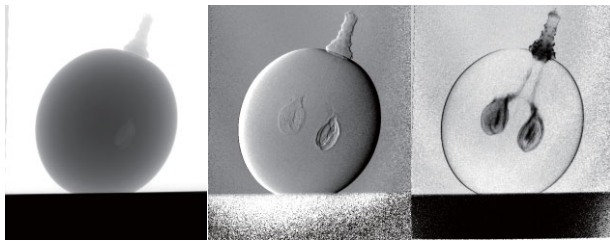
Visibility reduction

W. Yashiro, Y. Terui, K. Kawabata, and A. Momose, Opt. Express 18 (2010) 16890

10

### Visibility像の効果

ぶどう



吸収像

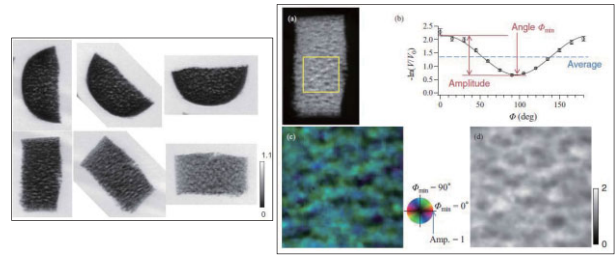
微分位相像

Visibility像

11

### Visibility像の方位異存性

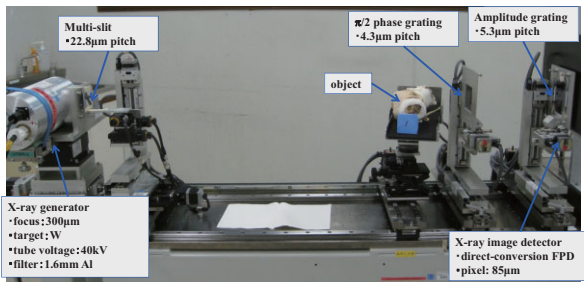
CRスポンジ  
17 keV @ PF



W. Yashiro et al., Phys. Rev. B 84 (2011) 094106

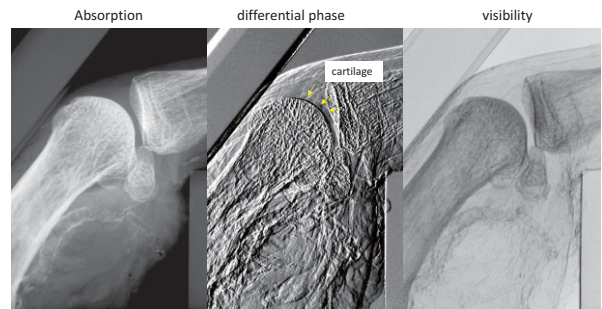
12

### X-ray Talbot-Lau Interferometer for Pre-clinical Test



13

### metacarpophalangeal joint of human thumb



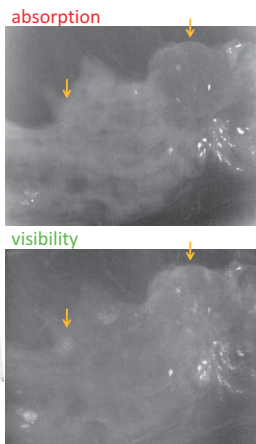
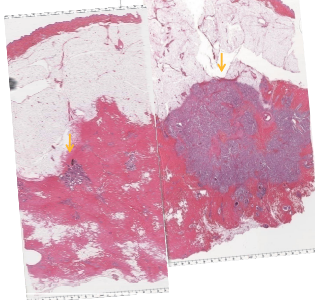
Prof. J. Tanaka, MD, Prof. M. Nagashima, MD  
@Saitama Medical School, Japan

14

### Human breast tissue

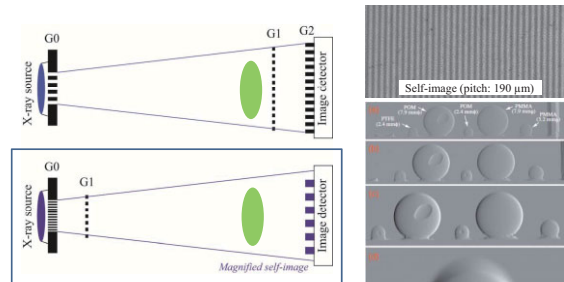
Dr. T. Endo  
@ Nagoya Medical Center, Japan

optical image



15

### X-ray Lau interferometry



◆製作が最も難しい振幅格子(G2)を省略

A. Momose et al., Appl. Phys. Express 4 (2011) 066603.

16

## cERLへの期待

- 放射光並み(?)画質のX線位相イメージングの普及(位相トモグラフィ、位相敏感X線顕微鏡、など)
- THz光イメージングとの融合ステーション(構造と機能の融合計測)
- 医療画像診断応用を推進するためには、cERLの更なるコンパクト化への青写真が必要。

謝辞: JST, 先端計測  
服部正(兵庫県立大)、ナノクリエート株式会社  
コニカミノルタエムジー(株)  
田中淳司(埼玉医科大学)  
遠藤登喜子(名古屋医療センター)  
矢代航他百生研学生スタッフ(東北大)  
兵藤一行(PF)、鈴木芳生(SP8)

17

## 謝辞

SENTAN-Project (Oct. 2004 – Nov. 2007) 

- Univ. Tokyo (A. Momose, W. Yashiro, Y. Takeda, K. Wan)
- Univ. Hyogo (T. Hattori, D. Noda)

SENTAN-Project (Dec. 2007 – Mar. 2012) 

- Univ. Tokyo (A. Momose, W. Yashiro, S. Harasse)
- Konica Minolta Medical & Graphic, Inc (C. Honda, S. Nagatsuka, et al.)
- Univ. Hyogo (T. Hattori, D. Noda)
- Saitama Medical Univ. (J. Tanaka, M. Nagashima)
- Nagoya Medical Center (T. Endo)

SENTAN-Project (Oct. 2011 – Mar. 2014) 

- Konica Minolta Medical & Graphic, Inc (S. Nagatsuka et al.)
- Saitama Medical Univ. (J. Tanaka, M. Nagashima)
- Univ. Tokyo -> Tohoku Univ. (A. Momose, W. Yashiro)

18

# 次世代光源を用いた糖尿病性微小循環障害の 低侵襲・早期診断法の開発

盛 英三

東海大学医学部（生理学、循環器内科学）

## **Fingertip microangiography using compact ERL for early detection of diabetic microangiopathy**

Hidezo Mori, M.D., Ph.D.

Tokai University School of Medicine

### <Synopsis>

Diabetic microangiopathy causes acetylcholine-induced paradoxical vasoconstriction in arterioles (20-200  $\mu\text{m}$ ). Because conventional angiographic systems lack sufficient spatial resolution (100-200  $\mu\text{m}$ ) they are not useful for prediction of diabetic microangiopathy and to monitor microvasculature for the prevention of lethal cardiovascular diseases.

We determined that fingertip synchrotron radiation microangiography has enough spatial resolution to quantitate arteriolar diameter changes, and to visualize arteriolar paradoxical vasoconstriction induced by acetylcholine in diabetic rats.

In order to expand microangiography in clinical settings, a new light source is mandatory in stead of synchrotron radiation. Because large cost of construction for synchrotron radiation facility is a big obstacle for medical needs. Compact ERL-derived laser Compton X ray is characterized by quasi-monochromatic nature and small focus (<40  $\mu\text{m}$ ), therefore it would be suitable as a light source for microangiography.

### 研究の目的と必要性：

糖尿病患者数は世界中で2億3000万人におよぶ。血管径20-200  $\mu\text{m}$ の微小血管病変がその発症機転をなし、失明、致命的腎症、動脈硬化性循環障害（心筋梗塞、脳梗塞症等）の原因となる。本研究では糖尿病性微小循環障害の早期診断のための革新的な低侵襲医療機器を開発する。

### 特色・独創的な点：

指尖微小血管の機能的異常は主要臓器の糖尿病性循環障害に先行して発症する。これを造影剤の動注を必要としない低侵襲の血管造影として実現する。さらに、次世代光源の小型

エネルギー回収型加速装置compactERL由来の逆コンプトン散乱X線を用いる事で、病院に設置可能な規模と建設費で、放射光微小血管造影法に匹敵する性能を実現する。

これまでの研究成果：

放射光微小血管造影の基本概念を提示、その超高精化（分解能 $5\mu\text{m}$ ）による指尖細動脈の可視化に成功した。放射光の代替線源として逆コンプトン散乱X線の有用性を確認した。

期待される成果：

糖尿病性微小循環障害の早期診断のための革新的な低侵襲医療機器が開発される。これにより、網膜症、腎症、動脈硬化性循環障害などに先行する糖尿病性循環障害を早期に検出し、早期治療を推進して致命的な生活習慣病の発症を予防する。

実験計画：

平成25年度：C-ERLの建設と、逆コンプトン散乱X線の実験環境を整備する。糖尿病および正常ラットを実験対象として、放射光指尖微小血管造影法を実施し、来年度以降の対照実験とする。

平成26年度：前年と同様の動物を用いて、逆コンプトン散乱X線を線源とするK吸収端コントラストイメージング法による実験をおこない、放射光法との性能を比較する。

平成27年度：K吸収端コントラストイメージング法に位相コントラスト法を組み合わせ、動脈内造影剤注入を必要としない非侵襲的微小血管描出法を実現し、その性能を評価する。

NHKエンジニアリングサービス社と浜松ホトニクス社が撮影装置の開発と実用化を担う。



## 発表者の放射光研究歴

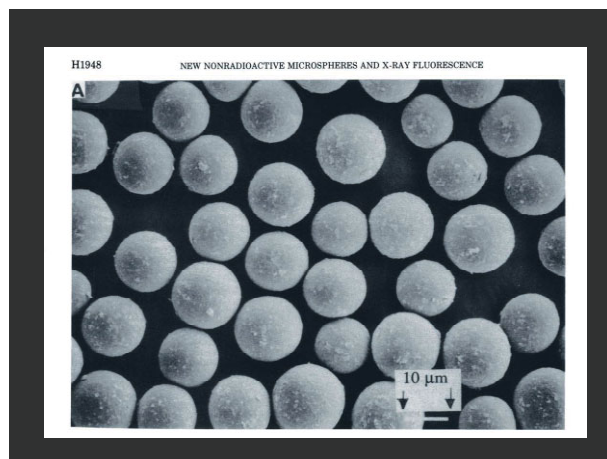
X線蛍光分析(1989-1999 共同研究者:飯田厚夫)

微小血管造影(1991-1999 共同研究者:兵藤一行、  
安藤正海、NHK技研、浜松ホトニクス)

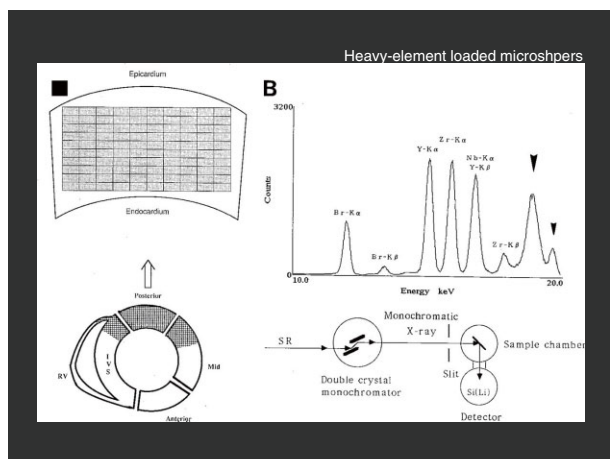
超高精細血管造影(2000-2009 共同研究者:梅谷啓二)

タンパク結晶構造解析(2003-2009 共同研究者:武田壮一)

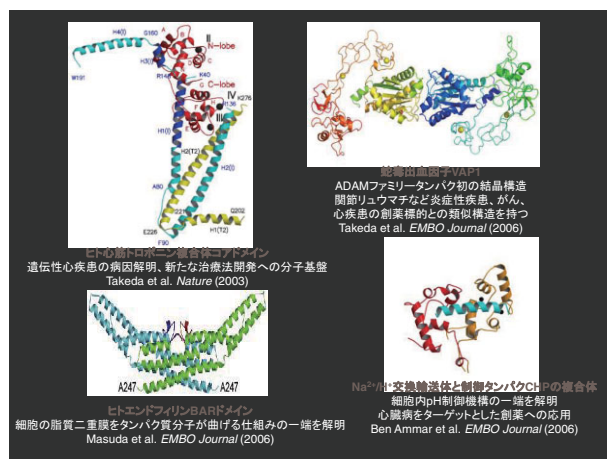
1



2



3



4

## 研究計画案

研究課題名:

**C-ERL由来逆コンプトンX線を用いた非侵襲的  
微小血管造影法の開発:  
糖尿病性微小循環障害早期検出を目指して**

東海大学 医学部 基礎医学系 生体構造機能学  
盛 英三、静間徹、福山直人、田中千陽、池谷義守

高エネルギー加速器研究機構  
兵藤一行、河田洋

5

## 我が国における糖尿病の頻度

- ・ 日本で糖尿病患者は740万人、強く疑われる人(HbA1C>6.1)は810万人、可能性が否定できない人1320万人(HbA1C: 5.6-6.1)
- ・ 30-39yrs:6%, 40-49: 15%, 50-59:27%, >60 yrs:43%
- ・ 世界で患者は2億3000万人

6

## 糖尿病慢性合併症

微小血管病変(血管径50-200 μmの細動脈が障害される): 網膜症、腎症、神経症

大血管病変: 冠動脈(心筋梗塞)、脳血管(脳梗塞)、末梢動脈疾患

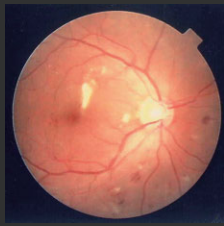
7

## 糖尿病性網膜症:

- (1) 糖尿病は20-74歳の成人の失明の最多の原因であり、糖尿病でない人に比べて25倍のリスクを有する。
- (2) 非増殖性糖尿病性網膜症は発病後10年前後で出現し網膜微小動脈瘤、出血、白斑(網膜組織の虚血性変化)、静脈拡張を特徴とする。
- (3) 非増殖性糖尿病性網膜症の病態生理は網膜の虚血。その原因は血管周囲細胞pericytesの喪失、網膜血管の透過性増加、網膜血流の変化、網膜微小血管の異常などである。

8

## 糖尿病性網膜症:



多数の斑状出血と軟性白斑を認めます

9

## 糖尿病性網膜症:

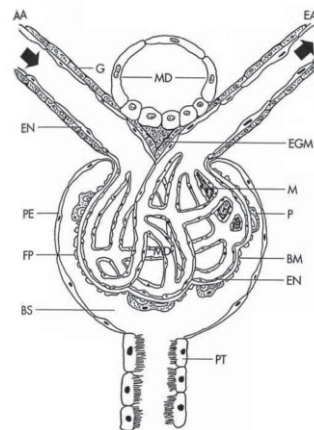
- (4) 増殖性糖尿病性網膜症の特徴は視神経や黄斑周囲の血管新生であり、それは出血、線維化や網膜剥離を引き起こす。
- (5) 増殖性糖尿病性網膜症は非増殖性の変化が進行したものである。
- (6) 蛍光血管造影により診断される黄斑部浮腫は3年以内に25%の確率で中等度の視力喪失を合併する。
- (7) 糖尿病歴20年以上の患者には全例で非増殖性性網膜症を認める。糖尿病の期間と血糖コントロールの程度は網膜症の重症度を反映する。

10

## 糖尿病性腎症:

- (1) 糖尿病性腎症は糖尿病が関連する死因のうち最多のものである。蛋白尿を伴う糖尿病患者は心血管病の発症リスクが高まり、生命予後が悪化する。
- (2) 糖尿病性腎症の原因:  
可溶性因子(成長因子 アンギオテンシン2, Endotheline, AGEs)  
腎微小循環障害(糸球体内圧の増加)、  
糸球体の構造変化 (ECMsの増加, 基底膜の肥厚, メサンギウムの拡大, 線維化)。

11



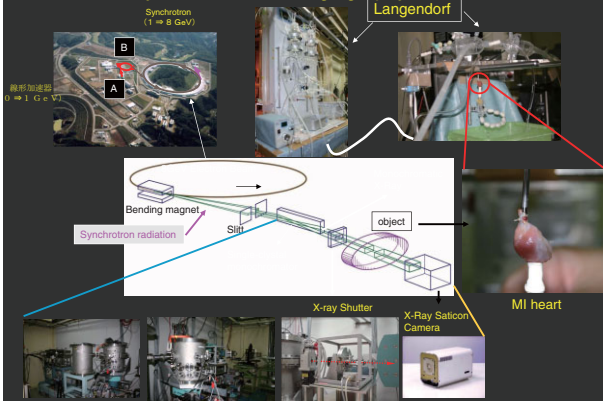
### 図解による腎小体と傍糸球体装置

傍糸球体装置は (1) 局細管上行脚の緻密斑 (2) 傍糸球体外のメサンギウム細胞及び (3) レニン生成をおこなう糸球体輸入細動脈の顆粒細胞からなる。

AA (Afferent arteriole): 糸球体輸入細動脈、  
 EA (efferent arteriole): 糸球体輸出細動脈、  
 G (granular cell): 糸球体輸入細動脈の顆粒細胞、  
 BM (basement membrane): 基底膜、  
 FP (foot process of the podocyte): タコ足細胞の足突起  
 P (podocyte cell body): タコ足細胞の体部分 (細胞の内臓層)、  
 M (mesangial cells between capillaries): 毛細血管の合間に存在するメサンギウム細胞、  
 EGM (extraglomerular mesangial cells between the afferent and efferent arterioles): 糸球体外のメサンギウム細胞 - 糸球体輸入細動脈と糸球体輸出細動脈の間に存在する。  
 EN (endothelial cell): 内皮細胞、  
 PT (proximal tubule cell): 近位尿管細胞、  
 BS (Bowman's space): ボーマン嚢腔、  
 PE (parietal epithelium): 壁側上皮組織

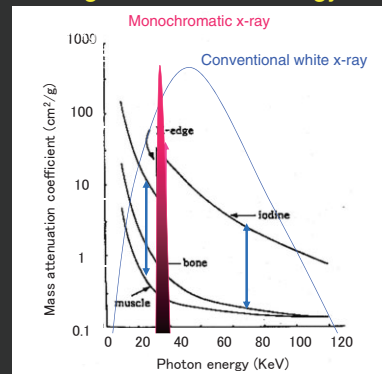
12

## An illustration of an experimental arrangement for synchrotron microangiography in rats



13

## Mass Absorption Coefficient Plotted Against Photon Energy



14

## 心血管病と糖尿病:

- (5) Type2糖尿病は心血管病による死亡率を男性で2倍、女性で4倍増加させる。
- (6) 糖尿病患者では血栓症が多い: 血中PAI-1とfibrinogen値の上昇、血管内皮、平滑筋、血小板の機能不全と関連。
- (7) 血糖値コントロールが心血管系合併症の頻度に影響を与えるというエビデンスはまだない。
- (8) 糖尿病は脳卒中のリスクを3倍高める。
- (9) 糖尿病は心不全の発症頻度を高める。

15

## 放射光微小血管造影法 (SPring8) における糖尿病ラットを用いた微小循環障害の検討結果

1. 腎臓、脳、心臓等の主要臓器で血管閉塞性病変の出現に先行してアセチルコリン刺激 (血管内皮Nitric Oxide産生刺激) による奇異性血管収縮反応が観察される。
2. 主要臓器の微小循環障害に先行して指尖微小血管にアセチルコリン刺激に対して奇異性血管収縮反応が観察される。

↓

指尖微小血管造影法は糖尿病性微小障害の早期検出・早期治療に道を開く

- I. C-ERL逆コンプトンX線一病院設置可能な単色微小焦点X線源
- II. 位相contrast法—造影剤を使用しない安全な微小血管造影法
- III. Ach投与に替わる局所NO産生刺激法の開発

→ 動脈穿刺不要の血管造影法を病院設置可能なX線源で実現

16

## 研究計画案

研究課題名:

C-ERL由来逆コンプトン散乱X線を用いた非侵襲的微小血管造影法の開発: 糖尿病性微小循環障害の早期検出への応用

研究内容:

- I. KEKのC-ERL由来の逆コンプトン散乱単色X線(30KeV)を用いた位相コントラスト微小血管造影法の開発
- II. X線吸収方式微小血管造影法(放射光および逆コンプトン散乱単色X線を用いる)との診断能力の比較
- III. 実験対象: 糖尿病ラットおよびヒト(正常および糖尿病患者)

経年計画:

H25-27: C-ERL建設、糖尿病ラット放射光微小血管造影法  
H28-29: 逆コンプトン散乱X線位相コントラスト微小血管造影法(糖尿病ラットおよびヒト)

17

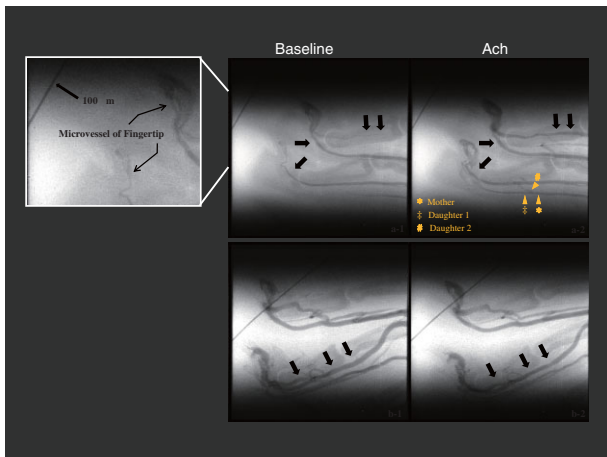
## Fingertip Microangiography Using Synchrotron Radiation Toward Prediction of Diabetic angiopathy

Hidezo.Mori, M.D., Toshiharu.Fujii M.D., Naoto.Fukuyama M.D., Yoshimori Ikeya M.D., Yoshiro.Shinozaki, B.E., Kazuto Fukushima\*, M.D., Keiji.Umetani\*\* Ph.D., Teruhisa.Tanabe M.D.

Tokai University School of Medicine, Departments of Physiology and Cardiology,

Isehara 259-1143, \* National Cardiovascular Center, Suita 565-8565 and \*\* JASRI, Division of Research and Utilization, Sayo-cho, 675-5198, Japan

18

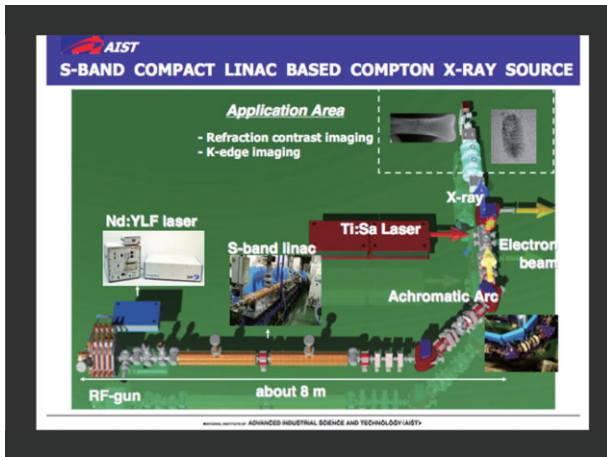


19

## AIST QUANTUM-BEAMS AS IMAGING TOOLS AT AIST

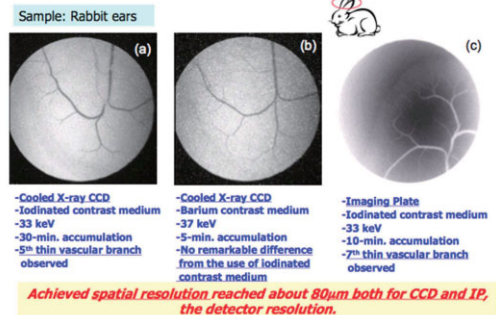
- ✓ Laser Compton X/gamma-rays
  - # S-band compact linac based system (10 – 40 keV) ← Presentation by R. Kuroda  
Fine and low dose X-ray imaging in biology and medicine
  - # Storage-ring based system (1 – 40 MeV) ← Presentation by H. Toyokawa  
Non-destructive inspection of industrial products composed of high-density materials
- ✓ Free Electron Lasers
  - # UV beam line in operation (300 – 198 nm)  
Imaging of surface chemical phenomena using photoelectric effects
  - # IR beam line in commissioning (1 – 10 μm)  
Imaging of surface chemical phenomena using molecular vibration  
Generation of intra-cavity laser Compton X rays
- ✓ Slow positron beams
  - # S-band linac based system  
Characterization of thin films containing defects and pores in atomic - nanometer scales  
Defect-sensitive positron microscopy

20



21

## AIST K-EDGE IMAGING FOR ANGIOGRAPHY IN ACCUMULATION MODE



22

## まとめ

以下の研究をKEKのC-ERL医学応用課題として提案する

C-ERL由来逆コンプトン散乱X線を用いた非侵襲的微小血管造影法の開発: 糖尿病性微小循環障害の早期検出への応用

23

## 「第2回コンパクト ERL サイエンスワークショップ」の報告

放射光科学第二研究系 野澤俊介

2012年7月30, 31日, KEK 研究本館 小林ホールにおいて標記研究会が開催された。総勢 100名の参加があり, 盛況な研究会となった。KEK では, 以前より放射光施設の次期計画をエネルギー回収型ライナック (ERL) と定めて準備を進めているが, その実現を目指して 2009年から加速器要素技術の実証器としてコンパクト ERL (cERL) の建設が始められ, 今年度末には電子ビーム運転を開始する予定である。一方, cERL は加速器の実証器と言う位置付けだけではなく, テラヘルツ (THz) 領域 (meV) から X 線領域 (keV) に至る幅広いエネルギー領域に跨る新しい量子ビーム科学のプラットフォームとして, 優れた光源性質を有している。特に, レーザーコンプトン散乱 (LCS) によるフェムト秒短パルス X 線や, 共振器を使った高繰り返し高強度 X 線, また cERL からのコヒーレント放射光 (CSR) である THz 光としての光源特性を, 単一の加速器を用いて実現することができることから, X 線位相イメージング, 医療用 X 線イメージング, THz 分光, THz イメージング, フェムト秒 X 線超高速ダイナミクス研究などを複合的に組み合わせた, 新しい学術研究が可能となることが期待される。2007年には第1回 cERL サイエンスワークショップ「cERL が拓く世界」が開催されたが, 今回, 電子ビーム運転が目前と迫ったタイミングにおいて2回目のワークショップを開催することで, cERL におけるサイエンスの展開について更に活性化することが本研究会の開催目的である。上述した cERL の光源性能に合わせて, 1. 光源について, 2. 時間分解・ダイナミクス研究, 3. THz CSR 利用研究, 4. イメージング研究, の四部構成のセッションで研究会は進行された。

最初の光源に関するセッションでは, 河田 洋 ERL 推進室長から, 本研究会において cERL を用いた新しい量子ビームプラットフォームでのサイエンスの展開を議論したい, という全体の趣旨説明が行われた後, 中村 典雄氏 (KEK) より 2013年・春にビーム運転開始という cERL の進捗状況が発表された。羽島 良一氏 (JAEA) からは, 低エミッタンスマシンによる分解能の高いレーザーコンプトン散乱は核燃料セキュリティーへの応用も可能であること, 島田 美帆氏 (KEK) からは cERL から発せられる THz 光と電子バンチを再度衝突させることによる軟 X 線ビームの生成について, 山本 樹氏 (KEK) からは cERL に極短周期のアンジュレーターを設置することで 2-3eV の真空紫外光が得られることが, それぞれ発表された。セッションの最後に, 野澤 俊介氏 (KEK) から cERL において建設が計画されている, LCS による硬 X 線ビームラインと THz ビームラインの展望について発表された。

次のセッションにおいては, cERL からのフェムト秒 X 線を利用した時間分解・ダイナミクス分野の利用研究, またレーザー・電子ビーム相互作用を用いた利用研究の可能性について講演が行われた。初めに, LCS で得られる 100fs パルス X 線を用いた時間分解回折

実験の研究提案として、衝撃圧縮過程における構造変化や、位相の揃った原子の集団振動であるコヒーレントフォノンのダイナミクス研究について、それぞれ、一柳 光平氏（東大新領域）と中村 一隆氏（東工大応セラ研）から発表された。LCS で得られる X 線は準単色光であるが、この光源性能を生かした利用研究として、阿部 仁氏（KEK）より DXAFS を用いた光反応中間体の分光研究について発表された。cERL における軟 X 線利用については、足立 純一氏（KEK）からレーザーによって配向制御された気体分子の光電子回折を用いたストロボ撮影について発表頂いた。坂井 信彦氏（兵庫県大）からは、LCS における衝突レーザーの偏光を電気光学デバイスによって制御することで円偏光 X 線の高速切り替えが実現されることが示され、磁性体の磁気緩和等の利用研究への応用について発表が行われた。また、将来的な 3GeV-ERL における ERL 加速器の特徴ある展開として大見 和史氏（KEK）からエネルギー分散の少ない加速器性能を生かしたアト秒光源としての可能性についてご講演頂いた。

その後、現在 cERL が建設されている ERL 研究開発棟において施設見学が行われた。現在、すでに設置された X 線遮蔽壁の外周部分から加速器の外観が想像できるまで建設は進んでおり、見学者は完成した cERL を想像しながらそこで展開される利用研究についてイメージを膨らませることができたと思う。見学終了後、小林ホールラウンジにおいて盛大な懇親会が行われ、参加者間で cERL における利用研究について実験的な細部な部分も含めた活発な議論が行われた。

2 日目の最初のセッションでは、レーザーベース光源も含めた THz 光による利用研究の現状と、CSR による大強度 THz 光によって可能となるサイエンスについて講演が行われた。初めに、木村 真一氏（分子研）から、cERL における CSR を利用した THz 光の概要について説明があり、そこでは、ピークパワーは 25MW が見込まれ、繰り返しを考慮するとレーザーベースの光源と比べて平均強度は桁違いに強いこと、THz ポンプ-X 線プローブ実験の可能性、さらには近接場分光への応用等が発表された。テーブルトップレーザーベースの装置を用いた先端研究として、廣理 英基氏（京大）から 1 kHz 繰り返し 1MV/cm の電場発生方法について、またその THz パルス励起によるバンド間電子励起に起因した励起子発光の観測について発表された。谷 正彦氏（福井大）からは高強度、高出力の THz 光源を利用した応用展開として THz 波による多光子吸収、Ponderomotive force、非線形物性等の最新のトピックスについての発表があった。THz 帯における高感度な超電導検出器についての講演として、大谷 知行氏（理研）から THz 光によるクーパー対の解離に起因した力学インダクタンスの変化を光検出原理とするマイクロ波力学インダクタンス検出器についての発表が行われた。続いて、築山 光一氏（東理大）からは東理大野田キャンパスの FEL 施設における赤外-FEL によるポンプ-プローブ励起状態解析についての紹介と、THz-FEL ポンププローブ測定への展望について発表が行われた。岡村 英一氏（神戸大）からは近接場分光の進展について講演頂き、変調法による空間分解能 $\sim 100\text{nm}$  の実現可能性について発表された。セッションの最後には木原 裕氏（立命館大）から生理的機能と重要な関係に



あるタンパク分子の低周波数内部振動に対する THz 光を用いた測定について、さらには、タンパク質が機能を有するため特定の立体構造に折りたたまれるフォールディングの THz 光を使った機構解明への期待について発表が行われた。

2 日目 2 番目のセッションでは、LCS による共振器を用いた高繰り返し高強度 X 線を使った X 線イメージング研究に関する講演が行われた。LCS で得られる光源サイズは約 50  $\mu\text{m}$  と小さく、また光源点から 20 m 離れた地点におけるビームサイズは直径約 100 mm、ビーム強度は約  $10^8 \text{photons/sec/mm}^2$  となる ( $E = 40 \text{ keV}$ , 繰り返し周波数 130MHz の場合)。このことから cERL は伝搬ベースの位相イメージングに適した光源であると言える。セッションの最初に兵藤 一行氏 (KEK) より cERL における X 線イメージングの概要についての発表があり、大視野・準単色・微小光源という詳細な光源性能について、また検出器開発の重要性について述べられた。X 線イメージングにおける検出器開発については新井 康夫氏 (KEK) から発表があり、半導体プロセスで製造される 3 次元構造のイメージング検出器である SOI 検出器の開発について、その性能や、共同開発体制、さらにはその大面積化について講演頂いた。鶴嶋 英夫氏 (筑波大学) からは臨床応用における現場からの意見として、従来の装置では見えないステント等の可視化を実現するため新世代光源の必要性について発表された。その後、昼食休憩を挟み、百生 敦氏 (東北大学) から、タルボ干渉計を用いた位相イメージングについての発表があり、従来の X 線源を使用しているタルボ干渉計はすでに臨床応用にも手が届いて来ているという現状について、またそれを受け医療画像診断応用を推進するには cERL のさらなるコンパクト化の構想が必要である点、さらには cERL における THz イメージングとの融合ステーションによる構造と機能の融合計測の可能性等について議論が行われた。セッション最後の講演として盛 英三氏 (東海大学) から微小血管の観察から糖尿病の診断法の確立について発表頂き、近年における MRI など先端診断法の急速な医療機関への導入実績例から、将来的に病院への導入を想定した cERL 光源の検討が必要であるとの指摘がなされた。

研究会最後には、研究会提案代表者である河田 洋 ERL 推進室長が全体のまとめを行い、聴衆に cERL 計画への協力を呼びかけて研究会を終了した。以下にプログラムを記す。尚、研究会での講演要旨、発表スライドについては以下のサイトを参照。

[http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/cerl\\_scienceWS/2/program.html](http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/cerl_scienceWS/2/program.html)