

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・要旨集

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



高エネルギー加速器研究機構 ERL 計画推進室

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）

http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/cerl_scienceWS/2/index.html

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。

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。

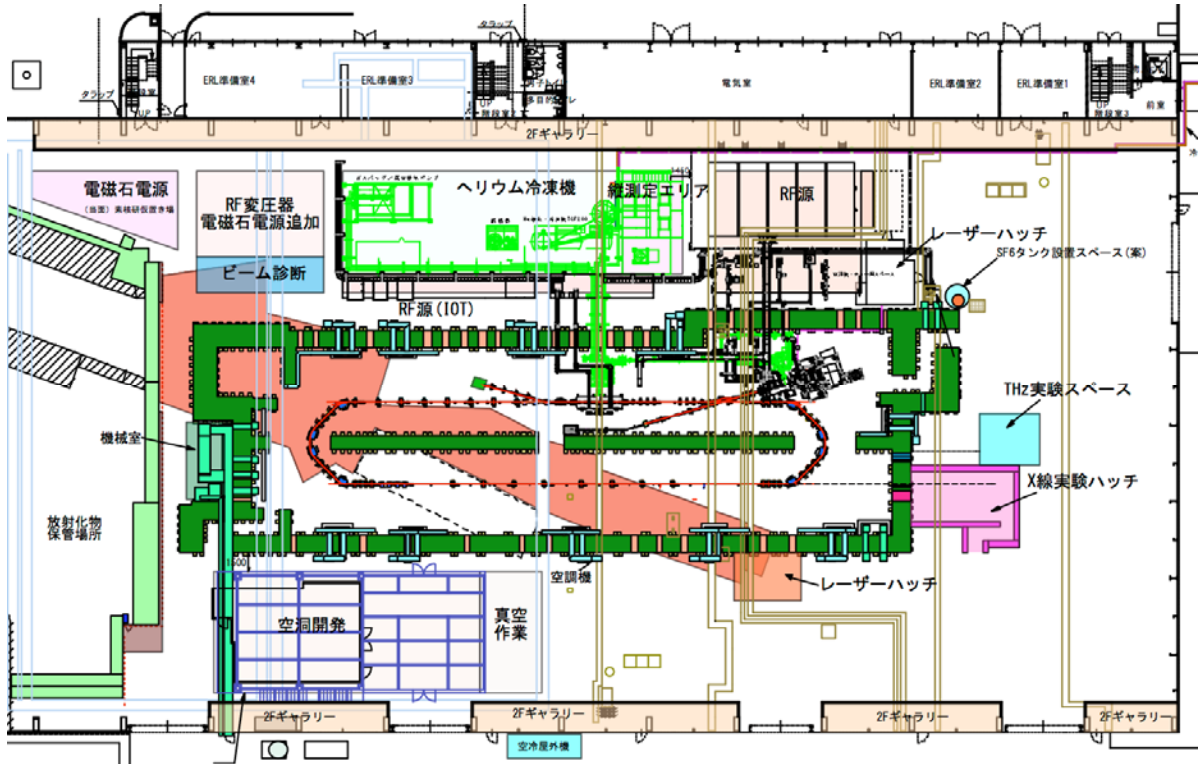


図1：ERL 開発棟の配置予定図



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）。

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。

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。バンチ圧縮時には 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)

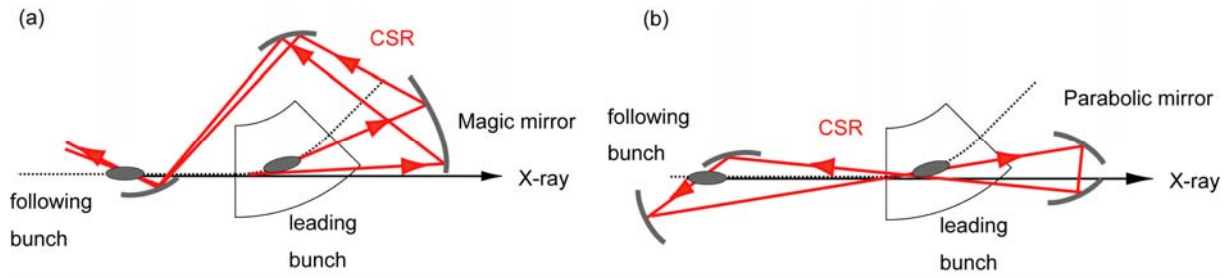


図 1: CSR による逆コンプトン散乱の模式図; (a) マジックミラー、(b) Optical Cavity

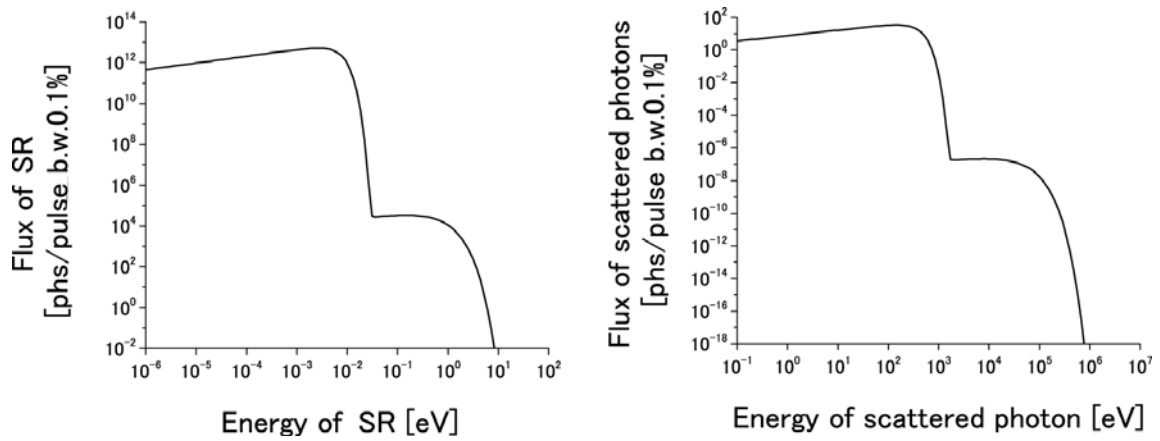


図 2: (左) 偏向電磁石からの放射光スペクトル、(右) マジックミラーによる逆コンプトン散乱で期待される光子のスペクトル。ここで真空チャンバーによる遮蔽効果は考慮していない。

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

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

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。

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

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).

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クイ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。

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.

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^2 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/cm² 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).

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 γ rays

Nobuhiko SAKAI

Laboratory of Advanced and Technology for Industry, University of Hyogo

It is possible to obtain circularly polarized γ 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) γ rays, a new technique for dynamic magnetization measurements with LCS γ 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 μm) 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。

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。

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。

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 LiNbO₃(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

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 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/cm²)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).

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 μm)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。

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。

赤外領域における近接場分光実験

岡村英一¹、池本夕佳²、森脇太郎²、木下豊彦²、石川迪雄³、中嶋悟³

¹神戸大院理、²JASRI-SPring-8、³阪大院理

Near-field spectroscopy in the infrared range

H. Okamura¹, Y. Ikemoto², T. Moriwaki², T. Kinoshita², M. Ishikawa³, S. Nakashima³

Kobe University¹, JASRI-SPring-8², Osaka University³

<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 μm 程度（波数 1000-2000 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 μm （波数 1000 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 cm^{-1} （波長 5-13 μm ）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 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 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 cERL 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.

THZ 光による protein folding 研究

氏名 木原 裕

所属 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 folding 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 α ヘリックスからなるもの、主に β 構造からなるもの、 α/β 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、 α 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 α ヘリックスの多い蛋白質だけでなく、nativeでは α 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。

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 μm 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。

SOI Pixel 検出器による X 線イメージング

氏名 新井 康夫

所属 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。

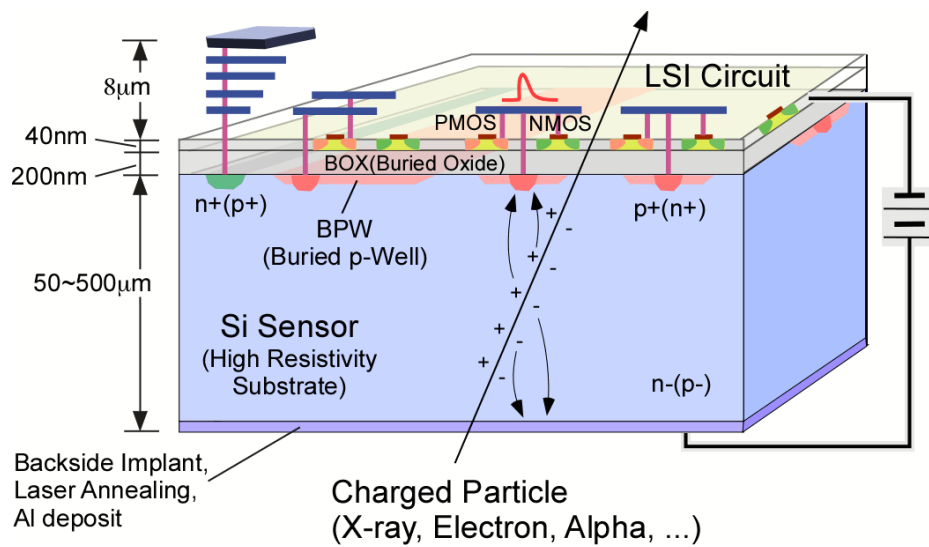


Fig. Cross-section of the SOIPIX detector.

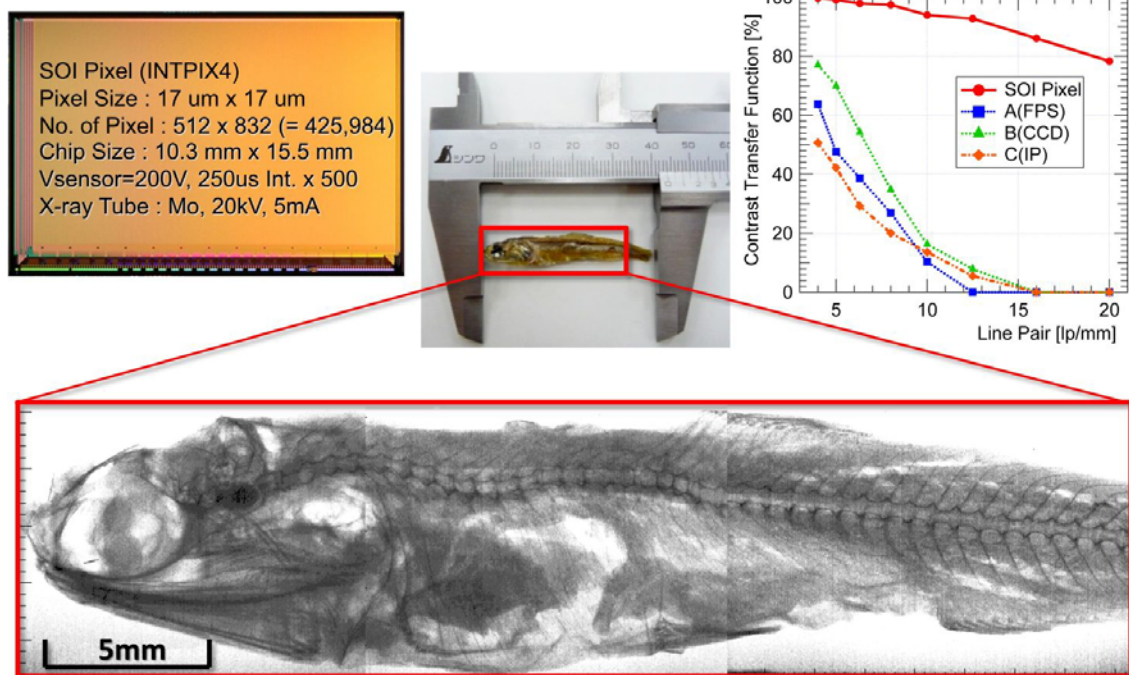


Figure. X-ray image of a dried fish taken by the SOI based sensor, INTPIX4. Photograph of the sensor is shown at the upper left corner with basic parameters. Contrast Transfer Function (CTF) of the sensor, which indicates ability of resolving fine structure, is shown in the upper right graph. The graph also includes CTF of commercial X-ray sensors (A: X-ray flat panel sensor of 50 μm square, B: Fiber-coupling X-ray CCD with effective pixel size of 23 μm square, C: X-ray Imaging plate of \sim 50 μm resolution). SOI sensor shows superb resolution especially for fine object.

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.

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.

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 μm). Because conventional angiographic systems lack sufficient spatial resolution (100-200 μm) 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 μm), 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 μm 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ることで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。

北部シャトルバス Hokubu-Shuttle-Bus

2011.10.01 改正版 毎日運行 Operates Monday to Sunday

つくばセンター ⇄ KEK バス時刻表

Tsukuba Center ⇄ KEK Bus Timetable

料金 Fare: 300yen

H01 つくばセンター	H04 KEK	H04 KEK	H01 つくばセンター
06:55	07:13	06:20	06:43
07:30	07:48	06:50	07:13
07:55	08:13	07:15	07:38
08:30	08:48	07:45	08:08
08:55	09:13	08:10	08:33
09:20	09:38	08:45	09:08
10:00	10:18	09:20	09:43
10:25	10:43	09:45	10:08
10:55	11:13	10:15	10:38
11:25	11:43	10:45	11:08
11:55	12:13	11:15	11:38
12:25	12:43	11:45	12:08
12:55	13:13	12:15	12:38
13:25	13:43	12:45	13:08
13:55	14:13	13:15	13:38
14:25	14:43	13:45	14:08
14:55	15:13	14:15	14:38
15:25	15:43	14:45	15:08
15:55	16:13	15:15	15:38
16:25	16:43	15:45	16:08
16:55	17:13	16:10	16:33
17:25	17:43	16:35	16:58
17:55	18:13	17:10	17:33
18:25	18:43	17:40	18:03
18:55	19:13	18:15	18:38
19:25	19:43	18:45	19:08
19:55	20:13	19:15	19:38
20:25	20:43	19:45	20:08
20:55	21:13	20:10	20:33
21:25	21:43	20:35	20:58
21:55	22:13	21:10	21:33
22:20	22:38	21:40	22:03

- ・北部シャトルバスは、つくばセンターと筑波山の間を運行いたします。
- ・つくばセンターのバス乗場は3番です。

Note:

- ・Hokubu-Shuttle Bus operate between Tsukuba Center and Tsukuba-san-guchi.
- ・The bus stop number at the Tsukuba center is #3.



H01 つくばセンター Tsukuba Center	(10min.) ↓	↑ (15 min.)
H02 花畑 Hanabatake	(5min.) ↓	↑ (3min.)
H03 大穂窓口センター Oho Madoguchi Center	(3min.) ↓	↑ (5min.)
H04 KEK	(4min.) ↓	↑ (3min.)
H05 つくばウェルネスパーク Tsukuba Wellness Park	(9min.) ↓	↑ (7min.)
H06 筑波窓口センター Tsukuba Madoguchi Center	(12min.) ↓	↑ (10min.)
H07 筑波山口 Tsukuba-san-guchi		

2012.0.25 KEK Users Office

KEKとつくばセンター間は、“関鉄バス” と “つくバス” が運行しています。
 Kantetsu Bus and Tsuku Bus services between KEK and Tsukuba Center.



つくばセンター ⇄ KEK バス時刻表 (関鉄バス)

Tsukuba Center ⇄ KEK Bus Timetable (Kantetsu-Bus)

平日
Weekday

料金 Fare: 430yen
2012.06.18 改正版

土日祝祭日
Saturday, Sunday, National Holidays

つくばセンター → KEK			KEK → つくばセンター		
Rt. No	つくばセンター	KEK	Rt. No	KEK	つくばセンター
C8	07:22	07:37	71	06:28	06:50
C8	07:50	08:05	71	07:33	07:55
18	08:10	08:32	71	08:28	08:50
71	08:45	09:04	C8	08:50	09:14
71	09:00	09:19	C8	09:25	09:49
71	09:55	10:14	71	10:18	10:40
C8A	10:00	10:16	C8	10:55	11:19
71	10:30	10:49	71	11:28	11:50
C8	10:55	11:10	C8	11:50	12:10
71	11:00	11:19	71	13:23	13:45
71	12:00	12:19	71	14:28	14:50
C8	14:00	14:15	C8	14:50	15:10
71	14:00	14:19	71	15:28	15:50
71	15:00	15:19	71	16:58	17:20
C8	16:25	16:40	C8	17:20	17:45
71	16:35	16:54	C8	17:50	18:15
C8	17:00	17:15	71	17:58	18:20
71	17:30	17:49	C8	18:45	19:15
C8	17:55	18:10	71	19:19	19:40
C8	18:30	18:45	C8	19:30	19:50
71	19:05	19:24	18	20:50	21:10
71	19:45	20:04			
C8	20:05	20:20			

つくバスの時刻表は裏面にあります。

つくばセンター → KEK			KEK → つくばセンター		
Rt. No	つくばセンター	KEK	Rt. No	KEK	つくばセンター
18	08:10	08:32	71	07:33	07:55
71	08:45	09:04	71	08:28	08:50
71	09:00	09:19	C8	09:05	09:25
C8	09:35	09:50	71	10:18	10:40
C8	10:55	11:10	C8	10:25	10:45
71	11:00	11:19	71	11:28	11:50
71	12:00	12:19	C8	11:50	12:10
C8	13:20	13:35	71	13:23	13:45
71	14:00	14:19	C8	14:20	14:40
71	15:00	15:19	71	14:28	14:50
C8	16:25	16:40	71	15:28	15:50
71	16:35	16:54	71	16:58	17:20
71	17:30	17:49	C8	17:20	17:40
C8	17:55	18:10	71	18:28	18:50
71	19:30	19:49	18	18:45	19:05

- ・つくばセンターのバス乗場は5番です。
- ・系統番号71番: つくばセンター⇄下妻駅
- ・系統番号C8, C8A:
つくばセンター⇄テクノパーク大穂
- ・系統番号18: 土浦駅 ⇄ テクノパーク大穂

Note:

- ・The bus stop number at the Tsukuba Center is #5.
- ・Route Number 71: Operate Between Tsukuba Center and Shimotsuma Station
- ・Route Number C8, C8A: Operate between Tsukuba Center and Techno-park Oho
- ・Route Number 18: Operate between Tsuchiura Station and Techno-park Oho

There are two kinds of buses service between Tsukuba center and KEK. Kantetsu Bus and Tsuku Bus (back side)

Tsukuba Express Timetable

つくばエクスプレス時刻表

2012.03.09
2010.10.01改正版

	つくば駅 Tsukuba	研究学園 Kenkyu-gakuen	北千住 Kitasenju	浅草 Asakusa	秋葉原 Akihabara
普通 Local	0	3	47	53	57
区間快速 Semi Rapid (区)	0		42	48	52
快速 Rapid (快)	0		35	41	45

平日 Weekday

Note: つくばTsukuba ・ 秋葉原 Akihabara

つくば	秋葉原	つくば	秋葉原	つくば	秋葉原	秋葉原	つくば	秋葉原	つくば	秋葉原	つくば
区 5:07	5:59	区 11:30	12:23	区 17:21	18:13	5:30	6:27	区 11:45	12:37	区 17:40	18:33
快 5:28	6:13	11:44	12:47	区 17:32	18:24	5:45	6:42	11:52	12:54	区 17:50	18:43
区 5:32	6:24	快 11:55	12:40	快 17:48	18:33	5:57	7:00	快 12:00	12:45	快 18:00	18:45
区 5:51	6:43	区 12:00	12:53	区 17:51	18:43	快 6:05	6:50	区 12:15	13:07	区 18:10	19:03
区 6:12	7:05	12:14	13:17	区 18:02	18:54	区 6:20	7:13	12:22	13:24	区 18:20	19:13
区 6:32	7:26	快 12:25	13:10	快 18:19	19:04	区 6:29	7:22	快 12:30	13:15	快 18:30	19:15
区 6:41	7:34	区 12:30	13:23	区 18:21	19:14	区 6:45	7:37	区 12:45	13:37	区 18:40	19:33
快 6:56	7:42	12:44	13:47	区 18:31	19:24	6:52	7:53	12:52	13:54	区 18:50	19:43
区 6:57	7:51	快 12:55	13:40	18:38	19:38	快 7:00	7:45	区 13:15	14:07	快 19:00	19:45
7:06	8:04	区 13:00	13:53	快 18:49	19:34	区 7:11	8:04	13:22	14:24	区 19:10	20:03
区 7:12	8:07	13:14	14:17	区 18:51	19:44	区 7:24	8:18	快 13:30	14:15	区 19:20	20:13
快 7:25	8:12	快 13:25	14:10	19:08	20:08	快 7:37	8:22	区 13:45	14:37	快 19:30	20:15
区 7:27	8:23	区 13:30	14:23	快 19:19	20:04	区 7:46	8:40	13:52	14:54	区 19:40	20:33
区 7:42	8:37	13:44	14:47	区 19:21	20:14	快 8:02	8:49	快 14:00	14:45	区 19:50	20:43
快 7:56	8:43	快 13:55	14:40	19:38	20:38	区 8:08	9:03	区 14:15	15:07	快 20:00	20:45
区 7:57	8:53	区 14:00	14:53	快 19:49	20:34	区 8:15	9:09	14:22	15:24	区 20:10	21:03
区 8:12	9:06	14:14	15:17	区 19:51	20:44	快 8:24	9:11	快 14:30	15:15	区 20:20	21:13
快 8:26	9:12	快 14:25	15:10	20:09	21:11	区 8:34	9:28	区 14:45	15:37	快 20:30	21:15
区 8:31	9:24	区 14:30	15:23	快 20:19	21:04	区 8:47	9:40	14:52	15:54	区 20:40	21:33
区 8:47	9:40	14:44	15:47	区 20:24	21:17	区 8:57	9:49	快 15:00	15:45	区 20:50	21:43
区 9:00	9:52	快 14:55	15:40	区 20:39	21:31	快 9:09	9:55	区 15:15	16:07	快 21:00	21:45
9:14	10:17	区 15:00	15:53	区 20:51	21:44	区 9:17	10:09	15:22	16:24	区 21:12	22:04
快 9:25	10:10	15:14	16:17	快 21:08	21:53	9:22	10:24	快 15:30	16:15	区 21:23	22:16
区 9:32	10:25	快 15:25	16:10	区 21:11	22:03	快 9:30	10:15	区 15:45	16:37	区 21:36	22:29
9:45	10:47	区 15:30	16:23	区 21:27	22:19	区 9:45	10:37	15:52	16:54	区 21:48	22:40
快 9:55	10:40	15:44	16:47	区 21:42	22:34	快 10:00	10:45	快 16:00	16:45	21:55	22:56
区 10:02	10:54	快 15:55	16:40	区 21:57	22:50	区 10:15	11:07	区 16:15	17:07	快 22:00	22:45
10:15	11:17	区 16:00	16:53	区 22:14	23:06	10:22	11:24	16:22	17:24	区 22:15	23:07
快 10:25	11:10	16:14	17:17	22:27	23:25	快 10:30	11:15	快 16:30	17:15	区 22:30	23:23
区 10:30	11:23	快 16:25	17:10	区 22:40	23:33	区 10:45	11:37	区 16:45	17:37	区 22:45	23:37
10:44	11:47	16:30	17:32	区 22:57	23:49	10:52	11:54	16:52	17:54	22:51	23:54
快 10:55	11:40	快 16:43	17:28	23:14	0:11	快 11:00	11:45	快 17:00	17:45	快 23:00	23:45
区 11:02	11:54	区 16:51	17:43	23:30	※1	区 11:15	12:07	区 17:17	18:09	区 23:15	0:08
11:14	12:17	快 17:09	17:54	23:47	※2	11:22	12:24	17:22	18:24	23:30	0:27
快 11:25	12:10	区 17:12	18:04	---	---	快 11:30	12:15	快 17:30	18:15	---	---

※1, 2: 守谷駅止 Stopping at Moriya Station

Tsukuba Express Timetable つくばエクスプレス時刻表

つくば Tsukuba
秋葉原 Akihabara

土日祝祭日 Saturday・Sunday・National Holidays

2010.10.01改正版

つくば	秋葉原	つくば	秋葉原	つくば	秋葉原
区 5:07	5:59	区 11:30	12:23	快 17:20	18:05
快 5:28	6:13	11:44	12:47	区 17:25	18:17
区 5:32	6:24	快 11:55	12:40	17:33	18:35
区 5:51	6:43	区 12:00	12:53	快 17:46	18:31
区 6:13	7:06	12:14	13:17	区 17:49	18:42
区 6:33	7:26	快 12:25	13:10	区 18:02	18:54
6:45	7:46	区 12:30	13:23	快 18:20	19:05
快 6:57	7:42	12:44	13:47	区 18:25	19:17
区 7:01	7:53	快 12:55	13:40	区 18:38	19:31
7:16	8:17	区 13:00	13:53	区 18:49	19:42
快 7:28	8:13	13:14	14:17	区 19:02	19:54
区 7:31	8:23	快 13:25	14:10	快 19:20	20:05
区 7:41	8:34	区 13:30	14:23	区 19:25	20:17
快 7:58	8:43	13:44	14:47	区 19:37	20:30
区 8:02	8:54	快 13:55	14:40	区 19:49	20:42
8:15	9:17	区 14:00	14:53	区 20:01	20:54
快 8:28	9:13	14:14	15:17	快 20:20	21:05
区 8:32	9:25	快 14:25	15:10	区 20:25	21:17
区 8:47	9:39	区 14:30	15:23	区 20:37	21:30
9:00	10:02	14:44	15:47	区 20:51	21:43
快 9:10	9:55	快 14:55	15:40	快 21:08	21:53
区 9:17	10:10	区 15:00	15:53	区 21:11	22:03
区 9:32	10:24	15:14	16:17	区 21:27	22:19
9:42	10:46	快 15:25	16:10	区 21:42	22:34
快 9:54	10:39	区 15:30	16:23	区 21:57	22:49
区 10:02	10:54	15:44	16:47	区 22:15	23:08
10:12	11:17	快 15:55	16:40	22:27	23:25
快 10:25	11:10	区 16:00	16:53	区 22:40	23:33
区 10:30	11:22	16:14	17:17	区 22:57	23:49
10:44	11:47	快 16:25	17:10	23:14	0:11
快 10:55	11:40	区 16:30	17:23	23:30	※1
区 11:02	11:54	16:44	17:47	23:47	※2
11:14	12:17	快 16:55	17:40	—	—
快 11:25	12:10	区 17:02	17:54	—	—

秋葉原	つくば	秋葉原	つくば	秋葉原	つくば
5:30	6:27	11:22	12:24	快 17:00	17:45
5:45	6:42	快 11:30	12:15	区 17:12	18:04
5:57	6:59	区 11:45	12:37	区 17:24	18:16
快 6:05	6:50	11:52	12:54	区 17:36	18:28
区 6:18	7:10	快 12:00	12:45	区 17:48	18:40
区 6:31	7:24	区 12:15	13:07	快 18:00	18:45
区 6:43	7:35	12:22	13:24	区 18:12	19:04
6:55	7:56	快 12:30	13:15	区 18:24	19:16
快 7:00	7:45	区 12:45	13:37	区 18:36	19:28
区 7:12	8:04	12:52	13:54	区 18:48	19:40
快 7:24	8:09	快 13:00	13:45	快 19:00	19:45
区 7:35	8:27	区 13:15	14:07	区 19:12	20:04
区 7:48	8:40	13:22	14:24	区 19:24	20:16
7:55	8:56	快 13:30	14:15	区 19:36	20:28
快 8:00	8:45	区 13:45	14:37	区 19:48	20:40
区 8:20	9:12	13:52	14:54	快 20:00	20:45
8:25	9:26	快 14:00	14:45	区 20:12	21:04
快 8:30	9:15	区 14:15	15:07	区 20:24	21:16
区 8:50	9:42	14:22	15:24	区 20:36	21:28
8:55	9:56	快 14:30	15:15	区 20:48	21:40
快 9:00	9:45	区 14:45	15:37	快 21:00	21:45
区 9:19	10:11	14:52	15:54	区 21:12	22:05
9:25	10:27	快 15:00	15:45	区 21:24	22:16
快 9:30	10:15	区 15:15	16:07	区 21:36	22:29
区 9:45	10:37	15:22	16:24	区 21:48	22:40
9:55	10:57	快 15:30	16:15	快 22:00	22:45
快 10:00	10:45	区 15:45	16:37	区 22:15	23:07
区 10:15	11:08	15:52	16:54	区 22:30	23:23
10:22	11:24	快 16:00	16:45	区 22:45	23:37
快 10:30	11:15	区 16:15	17:07	快 23:00	23:45
区 10:45	11:37	16:22	17:24	区 23:15	0:08
10:52	11:54	快 16:30	17:15	23:30	0:27
快 11:00	11:45	区 16:45	17:37	—	—
区 11:15	12:07	16:52	17:54	—	—

※1, 2: 守谷駅止 Stopping at MoriyaSta

2012.03.09 KEK Users Office