



PF 研究会

「X 線干渉計と縦型ウィグラーを用いた

超高感度画像計測の現状と将来展望」

*Present status and future prospect of ultra-high-sensitive  
X-ray imaging using crystal X-ray interferometer and  
vertical wiggler*

日時:2020 年 10 月 8 日(木)~9 日(金)

場所:オンライン 研究本館小林ホール併用

共催:PF ユーザーアソシエーション(PF-UA)

協賛:九州シンクロトン光研究センター



## **High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 2021**

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: <https://www.kek.jp/en/>

# 目 次

目次	1
開催報告	3
プログラム	6
「超伝導磁石の精密磁場設計手法と応用」	
阿部 充志（KEK 超伝導低温工学センター）	8
「X線干渉計とX線光学」	
平野 馨一（KEK 物構研放射光）	15
「位相イメージングのヒト発生学への展開」	
山田 重人（京都大学）	19
「位相差X線CTを用いたヒト胚子筋骨格系の三次元可視化」	
山口 豊（京都大学）	24
「X線位相イメージング法の微化石、特に紡錘虫類の古生態研究への応用の可能性」	
一田 昌宏（豊橋市自然史博物館）	28
「位相コントラストX線イメージングによる蓄電・発電デバイスのオペランド計測」	
高松 大郊（(株)日立製作所 研究開発グループ基礎研究センタ）	32
「温度制御下での位相コントラストX線CT測定：低温条件下におけるガスハイドレートの三次元観察」	
竹谷 敏（産業技術総合研究所）	36
「X線サーモグラフィーによる熱伝搬可視化の試み」	
米山 明男（九州シンクロトロン光研究センター）	39
「CT画像再構成法の技術革新と深層学習への期待」	
工藤 博幸（筑波大学）	43

「縞走査法を用いた干渉縞 X 線イメージングにおける高速・高精度なエラー補正手法の提案」	
橋本 康（東北大学多元物質科学研究所） .....	47
「BL14C で世界に先駆けて実現された位相コントラスト CT と屈折コントラスト CT」	
湯浅 哲也（山形大学） .....	52
「二次元半導体検出器 SOIPIX シリーズの PF における応用状況と今後の開発」	
西村 龍太郎（KEK 物構研放射光） .....	56
「位相コントラスト X 線 CT によるエタノール固定ラット脳の白質イメージング」	
Thet Thet Lwin（北里大学） .....	59
「位相イメージングを用いた X 線エラストグラフィの基礎的検討」	
亀沢 知夏（総合研究大学院大学） .....	60
「位相コントラスト X 線イメージング法による食品の観察」	
篠崎 純子（日清製粉グループ本社 R&D・品質保証本部基礎研究所） ..	63
参加者リスト .....	65

**提案代表者：**米山明男（九州シンクロトロン光研究センター）

**所内世話人：**本田融（KEK 加速器）、岸本俊二、平野馨一、兵藤一行（KEK 物構研放射光）

## PF 研究会

### 「X線干渉計と縦型ウィグラーを用いた超高感度画像計測の現状と将来展望」開催報告

九州シンクロトロン光研究センター 米山明男

X線を用いた非破壊観察は、医療用のレントゲン撮像やX線 CT から、空港におけるセキュリティチェックや工場の異物検査に至る様々な分野で幅広く利用されています。一般にはX線の吸収率の違いを利用して被写体内部の密度分布を画像化していますが、1990年代以降はX線を「波」として捉え、被写体を透過した際に生じた位相の変化（位相シフト）を利用して高感度に密度分布を画像化する「位相コントラストX線イメージング法（位相イメージング法）」が活発に研究・開発されています。これまでに、様々な位相シフトの検出方法が開発されていますが、単結晶のX線回折を利用してX線の分波・反射・結合を行う「X線干渉計」を用いた位相イメージング法が現在のところ最も高感度と考えられています。

X線干渉計の安定な動作には干渉計を構成する単結晶X線光学素子を  $\mu\text{rad}$  レベルで超精密に回転制御することが不可欠です。しかし、耐振動特性を優先して水平面内でX線光学系を展開した場合、通常の放射光（横発散）では観察視野が大きく制限されてしまいます。一方、PFのBL-14に設置されている縦型ウィグラーから放射される放射光は、世界で唯一の縦発散ですので、数 cm 角の広い視野で被写体の超高感度な三次元観察を行うことができます。この特徴を活用して、現在 BL-14C には 2 個の単結晶ブロックから構成されたX線干渉計（分離型干渉計）を採用した位相イメージングシステムが常設され、最大観察視野  $5 \times 3 \text{ cm}$ 、密度分解能  $0.5 \text{ mg/cm}^3$  で非破壊の三次元観察を行うことが可能になっています。これまでに、小動物の各種臓器や腫瘍の無造影可視化、及びヒト胚子の高精度な解析等のバイオメディカルへの応用に加え、リチウムイオンバッテリー（LIB）の電解液イオン濃度のオペランド観察などの産業利用、南極氷中に含まれるエアハイドレートの三次元可視化などの地球環境への応用など、様々なオンリーワン計測が行われてきました。

今後、BL-14の縦型ウィグラーが更新・改良された場合、オンリーワンの本計測法が更に発展・展開することが大いに期待されます。本研究会では、バイオメディカル、産業利用、地球環境、考古学、食品、画像解析、新規イメージング法と非常に幅広い分野の方々に本計測法を用いた観察例や関連する最新のご研究をご紹介頂き、縦型ウィグラーの更新によりどのような新しいサイエンスの展開が期待できるのかという点を中心に、分野を超えた積極的な検討議論を行いました。

本研究会は、当初 2020 年 3 月に高エネルギー加速器研究機構（KEK）での開催を予定していましたが、新型コロナウイルス感染予防の観点から一時的に延期し、改めて 2020 年 10 月 8 日（木）から 10 月 9 日（金）午前の 1.5 日に渡って、PF 研究会では初めてとなる KEK とオンライン会議を組み合わせ開催致しました。なお、オンライン発表者の PC 切り替え

時における混乱防止のため、初日はKEK（小林ホール）での発表を、2日目はオンラインでの発表をメインとして発表プログラムを組みました。

本研究会の参加者は延べ60名で、KEKで参加された方は20名、オンラインで参加された方は40名でした。研究会後のアンケートでは、本開催形式について「参加しやすい」「気軽に参加できる」など多くの方に評価して頂きました。その一方で、「質問のタイミングが難しい」「個別に質問できない」など質疑応答に関して支障があり、今後はチャットを併用するなど改善の必要があることが判りました。

研究会1日目は初めに物質構造科学研究所の小杉所長にご挨拶を頂いた後、放射光実験施設の船守施設長にPFの現状や将来の方向について、BL-14の縦型ウィグラーの更新に関する計画や状況などをご説明して頂きました。その後、PFの兵藤氏からBL-14Cのユーザー利用などに関してご報告頂きました。最初のご講演として、KEKの阿部氏からは超伝導ウィグラーの設計における磁場や熱対策などの具体的な手法について九州シンクロトロン光研究センターのウィグラー設計を例としてご紹介頂きました。PFの平野氏からはX線干渉計の基礎的な原理と、アボガドロ数の精密計測や動力学的な理論検証への応用などに関してご紹介頂きました。

続く午後のセッションでは、京都大学の山田先生から京都コレクション（ヒト胚子）と位相イメージングへの応用のご紹介を、同大学の山口氏からは京都コレクションを対象として胚子の筋骨格形成過程の解明に関するご講演を頂きました。豊橋市自然史博物館の一田氏からは紡錘虫（フズリナ）の示準化石及び古地球環境解析における重要性と位相イメージング及び九州シンクロトロン光研究センターにおけるマイクロCT計測の結果について、日立の高松氏からは鉛蓄電池及び熱化学電池を対象としたオペランド計測により電池セル内の電解液濃度をリアルタイムで計測した結果についてご講演頂きました。休憩をはさみ、産総研の竹谷氏からはクライオ計測システムとその応用として南極古氷に含まれるエアハイドレートの観察結果についてご講演頂きました。その後、米山からX線サーモグラフィーについてご紹介した後、PF-UAが主催となって展示企業のショートプレゼンテーションとして、ご出展頂いた各社から製品や技術に関してご紹介頂きました。

2日目はオンラインの発表が中心で、初めに筑波大学の工藤先生から圧縮センシングやスパースモデルリングを活用した少数投影における再構成法や深層学習の試用に関するご講演を頂きました。その後、東北大学の橋本氏からは縞走査法におけるステップングエラーをトータルバリエーション（TV）を活用してソフトウェア的に低減する手法に関するご講演を、山形大学の湯浅先生からは位相イメージングにおける像再構成の概要のご講演を頂きました。休憩をはさみ、PFの西村氏からKEKで開発している2次元検出器SOIPIXの現状とイメージングへの試用結果に関するご講演を、北里大学のLwin先生からは生体試料をエタノール固定することでコントラストを増強する方法と脳の白質組織の可視化に適用した結果に関する紹介を、KEKの亀沢氏からは硬さの新しい評価方法としてX線エラストグ

ラフィーのご講演を頂きました。最後に、日清製粉グループの篠崎氏からは冷凍パスタやニンジンの観察結果と官能評価と対応付けした結果に関するご講演を頂きました。

1.5 日間にわたり多くの方々に非常に興味深いご講演を頂き、X線干渉計とそのイメージング法の重要性、有用性、そして将来性を改めて認識致しました。今後はバイオメディカル、地球環境、産業応用（デバイスや材料）、考古学、食品等への応用から、X線検出器等のハードウェア、そして画像処理に至る多種多様な分野の方と連携し、オンリーワンの本計測法を研究連携の苗床や拠点（ハブ）として、より発展させることが非常に重要かつ必要であると強く感じました。新しい縦型ウィグラー光源を迎えて本法の再構築・再飛躍の折には、関係各位に是非ご協力頂ければ幸いです。

コロナウイルスの影響により一時は中止も危ぶまれた本研究会ですが、PF 世話人の本田氏、岸本氏、兵藤氏、平野氏、PF 秘書室の高橋氏、林氏の多大なるご協力の下に開催することができました。この場を借りて深くお礼申し上げます。

（研究会ホームページ）

<https://www2.kek.jp/imss/pf/workshop/kenkyukai/20201008/index.html>



## プログラム

10月8日 (木)	
10:30~10:35	趣旨説明
10:35~10:40	挨拶 小杉 信博 (KEK物構研・所長)
10:45~10:55	PF運営方針 船守 展正 (KEK物構研・放射光実験施設長)
10:55~11:10	BL-14Cの状況報告 兵藤 一行 (KEK物構研放射光)
11:10~11:40	超伝導磁石の精密磁場設計手法と応用 阿部 充志 (KEK超伝導低温工学センター)
11:40~12:00	X線干渉計とX線光学 平野 馨一 (KEK物構研放射光)
12:00~13:00 (昼食)	
13:00~13:30	位相イメージングのヒト発生学への展開 山田 重人 (京都大学)
13:30~13:50	位相差X線CTを用いたヒト胚子筋骨格系の三次元可視化 山口 豊 (京都大学)
13:50~14:10	X線位相イメージング法の微化石、特に紡錘虫類の古生態研究への応用の可能性 一田 昌宏 (豊橋市自然史博物館)
14:10~14:30	位相コントラストX線イメージングによる蓄電・発電デバイスのオペランド計測 高松 大郊 ((株)日立製作所 研究開発グループ基礎研究センタ)
14:30~14:50 (休憩)	
15:00~15:30	温度制御下での位相コントラストX線CT測定：低温条件下におけるガスハイドレートの三次元観察 竹谷 敏 (産業技術総合研究所)
15:30~15:50	X線サーモグラフィーによる熱伝搬可視化の試み 米山 明男 (九州シンクロトロン光研究センター)
15:50~16:50	企業展示各社のショートプレゼンテーション
10月9日 (金)	
9:00~9:30	CT画像再構成法の技術革新と深層学習への期待 工藤 博幸 (筑波大学)
9:30~9:50	縞走査法を用いた干渉縞X線イメージングにおける高速・高精度なエラー補正手法の提案 橋本 康 (東北大学多元物質科学研究所)
9:50~10:10	BL14Cで世界に先駆けて実現された位相コントラストCTと屈折コントラストCT 湯浅 哲也 (山形大学)
10:10~10:30 (休憩)	
10:30~10:50	二次元半導体検出器SOIPIXシリーズのPFにおける応用状況と今後の開発 西村 龍太郎 (KEK物構研放射光)
10:50~11:10	位相コントラストX線CTによるエタノール固定ラット脳の白質イメージング Thet Thet Lwin (北里大学)
11:10~11:30	位相イメージングを用いたX線エラストグラフィの基礎的検討 亀沢 知夏 (総合研究大学院大学)
11:30~11:50	位相コントラストX線イメージング法による食品の観察 篠崎 純子 (日清製粉グループ本社 R&D・品質保証本部基礎研究所)
11:50~12:00	まとめと将来展望

PF 研究会での企業展示一覧(7社にご協力いただきました)

・株式会社アド・サイエンス

 **ADS** アド・サイエンス

・ツジ電子株式会社

 **TSUJICON** ツジ電子株式会社

・株式会社テクノエーピー

 **TechnoAP**

・神津精機株式会社

 **KOHZU**

・エキシルム株式会社

 **excillum**

・シャランインスツルメンツ株式会社



・株式会社 ASICON

 **ASICON** 株式会社ASICON  
ASICON Tokyo Ltd.

※申し込み順

## 超伝導磁石の精密磁場設計手法と応用

阿部充志

KEK 超伝導低温工学センター

本発表では、超伝導磁石の磁場設計について、実例を含めて、述べる。以下で、磁石は主に超伝導磁石である。磁気応用を目的とする磁石の新規製作は、磁場設計から始まると言える。しかし、磁場設計が単独に存在するのではなく、個々の磁石装置に依存した制約条件の中で、磁場設計を行い、磁石の規模・概略構造を把握していく。また、熱設計、機械強度設計と共存することも求められる。その結果、磁石全体の形は磁場設計に依存する。この発表では、放射光源である超伝導ウイグラーを中心に、MRI 用磁石や J-PARC での E34 実験（ミューオンの磁気・電気モーメントを精密に計測する実験）用磁石の磁場設計について、高精度を目指した磁場設計についても述べる。

九州シンクロトロン超伝導ウイグラーの磁場設計(図 1)は、4T でガウスオーダー( $10^{-4}$ )精度の磁場設計である。起磁力配置を与え、磁場計算を行い、そして電子ビームの軌道計算をチェックする順方向の計算を繰り返し試行することで、仕様を満足する起磁力配置を探索した。鉄芯を効率的に使うことで全体のコンパクト化に務めた。鉄芯利用の自由度は大きく、逆問題への定式化は難しいので、順方向の磁場計算で対応した。鉄芯による磁場が安定するように、磁気飽和(2.15T に飽和)の鉄を主要部に使うことで、必要な磁場分布を実現した。この考え方は、より精密な磁場が必要な他の磁石でも利用している。また、励消磁時の渦電流による発熱と共存できる鉄芯・支持・冷却の構造としている。

一方、MRI 用磁石や E34 実験用磁石では、ppm オーダ以下の磁場精度が必要である。このため特異値分解を利用して逆問題を解く手法を開発した。上記の飽和鉄芯の考え方と共に発展させながら、J-PARC での、ミューオンを対象とした実験用の磁場設計や MRI 磁石設計(図 2 参照)に応用している。

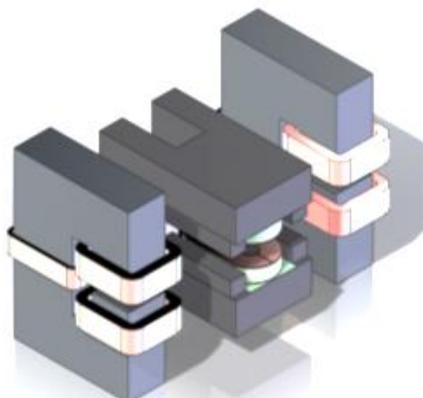


図 1 Saga-Wiggler の起磁力配置

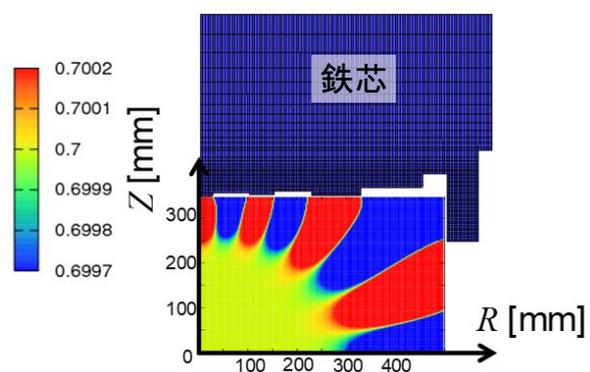


図 2 鉄芯利用の MRI 磁石磁場設計例  
鉄芯突起部を利用し磁場を安定化

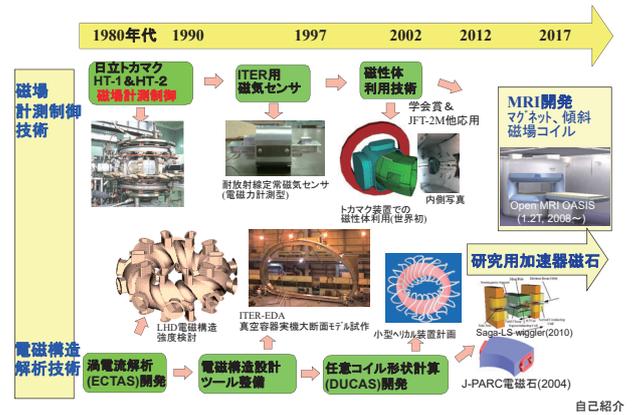
## 超伝導磁石の精密磁場設計手法と応用

PF研究会  
2020年10月8日  
小林ホール&Web

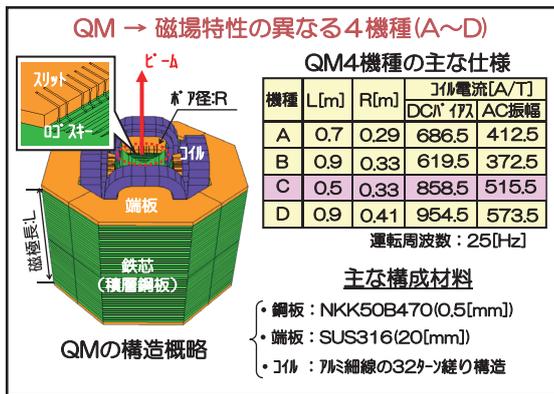
阿部充志  
KEK 超伝導低温工学センター

1977年-2017年 日立製作所, エネルギー研究所/日立研究所  
核融合, MRI用磁石を含む超伝導磁石(主に磁気設計)などの開発  
2017年~ 高エネルギー加速器研究機構 研究員(非常勤)  
素粒子原子核研究所/超伝導低温工学センター

## 発展と応用展開

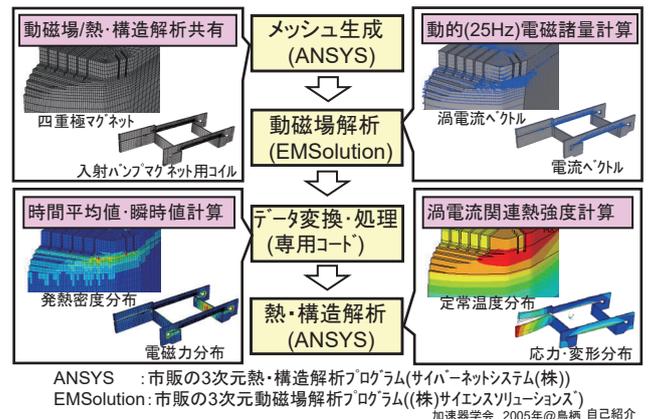


## 3/42 J-PARC RCSのQ磁石動磁場/熱解析/スリット調整

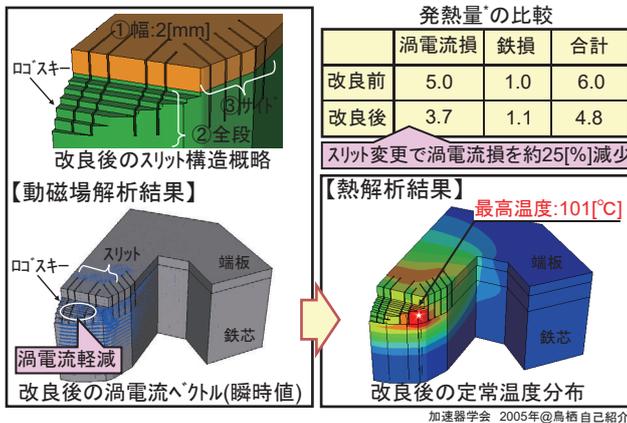


原子力学会 200年秋@京都大学 自己紹介

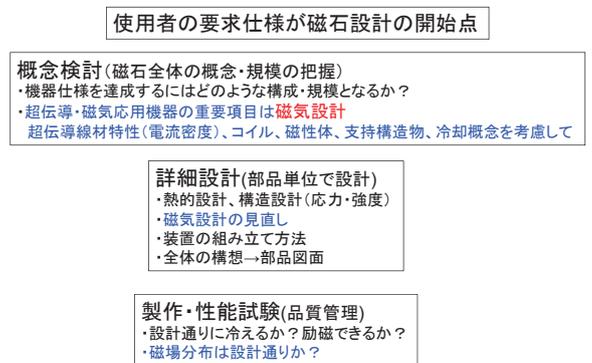
## 4/42 3次元渦電流・熱解析システムの概要(J-PARC 3GeV-RCS)



## 5/42 J-PARC RCSのQ磁石動磁場/熱解析/スリット調整



## 6/42 磁気設計の位置づけ

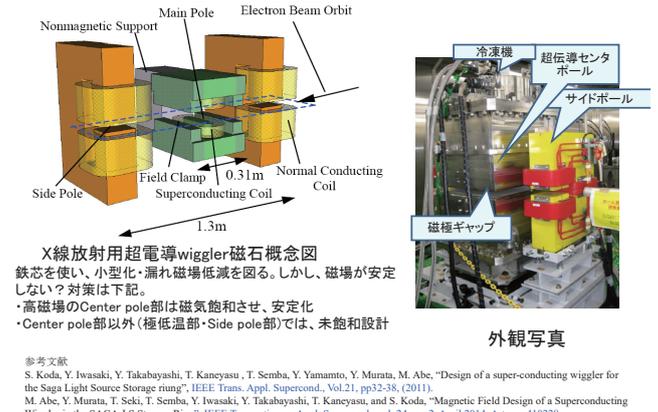


## 7/42 磁気設計の目指す精度

機器分野	磁場強度	要求精度 ( $B^R/B_0$ )	補正
核融合装置	数 T	$10^{-4} \sim 10^{-5}$	周回方向一様成分のみ(Poloidal field coils) 最近: 局所誤差成分補正 (Correction coil)
加速器磁石 (含wiggler)	0.5~10 T	$10^{-4}$	ビームライン全体として補正 (多重極コイル)
MRI用磁石	0.3~11.7 T	$<10^{-6}$ (Φ40cm球: 3.35E+4cm <sup>3</sup> )	Passive: シム(鉄)片によるシミング Active: 10ch程度のシムコイル
Nmr磁石	数~30 T	$10^{-8}$ (但し狭い領域, 1cm <sup>3</sup> )	MRI用磁石と同様
ミュオン詳細計測用磁石	1.7 & 3.0 T	$<10^{-7}$ 共に約6300 cm <sup>3</sup>	MRI用磁石技術の応用

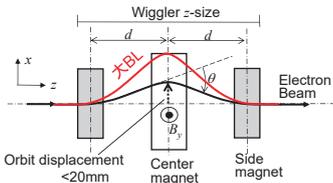
装置サイズが大きい核融合装置に比べ、他では磁石が比較的小さく、高精度な磁場が必要のため、コイル中心位置だけでなく断面形状も磁場精度に関連して重要となる。  
 本発表では、磁気設計の詳細を、超伝導wigglerを対象にし、述べ、さらに高磁場精度の設計(ミュオン実験)についても紹介する

## 8/42 Wiggler磁石外観と磁場分布 (#1機 2010年, #2機2016年)



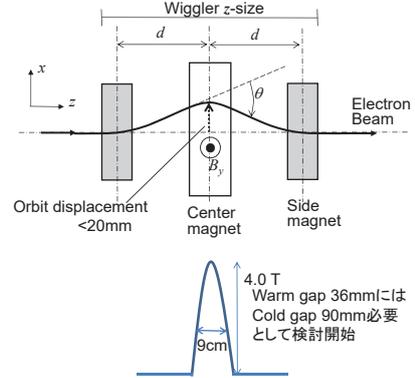
# Saga-LS wigglerの超電導磁石の仕様

- 1.4GeV電子ビームからX線放射光源を実現できる超伝導磁石
- (1) 4Tのセンターポールのピーク磁場
- (2) 既存リングへの設置実現のために、全長1.5 m以下とビーム軌道の変位20mm以下、Warm gap 36mm → 小BL積(〜0.35Tm)の単ポールWiggler+サイドポール(1.0T)2個
- (3) 液体Heを使わない伝導冷却超伝導磁石を安定に運転  
励消磁時間は各20分以下、導体(NbTi)の最大経験磁場<6.0T



- ・センターポール形状？
- ・コイル形状？
- ・鉄芯利用は必要(漏れ磁場) その形状？
- ・励消磁時の渦電流・発熱？
- ・支持方法？
- ・磁極間ギャップ(低温ギャップ？)
- ・磁場精度と補正可能性

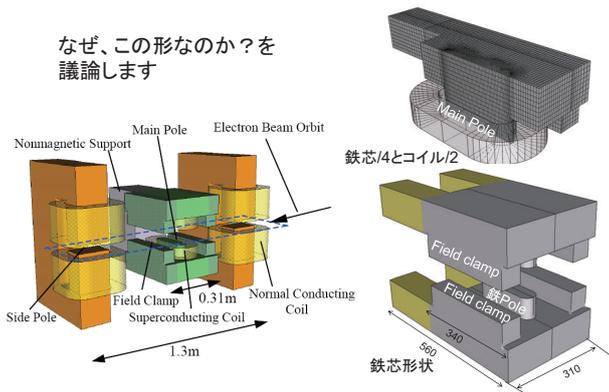
# 磁場分布案



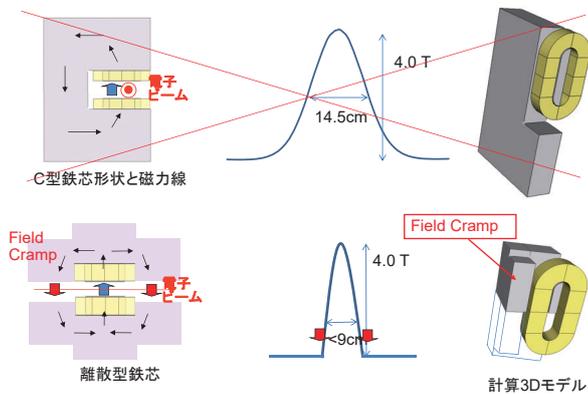
4.0 T  
Warm gap 36mmには  
Cold gap 90mm必要  
として検討開始

# 最終的に決めた超電導wiggler磁石の形状

なぜ、この形なのか？を議論します



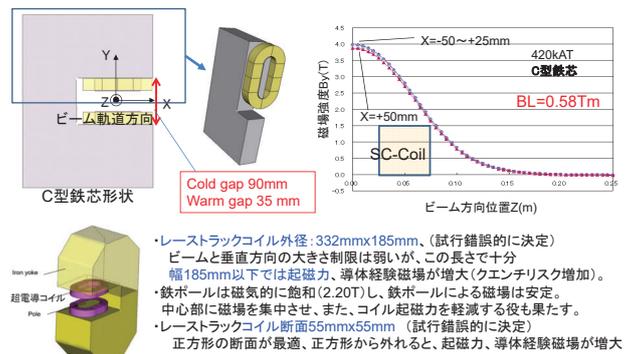
# BL積低減の戦略



# 実形状・配置を反映した実現性の検討

- 支持構造や冷却の観点から実現性を確認する
- ・支持構造の反映
- ・発熱・冷却の許容性
- ・調整機能の検討
- ・これらを反映した起磁力配置で、磁場性能を確認

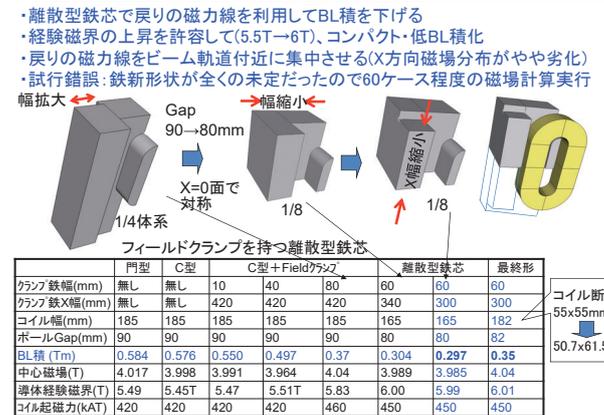
# 簡易的なダイポール磁石



- ・レストラックコイル外径: 332mmx185mm、(試行錯誤的に決定) ビームと垂直方向の大きさ制限は弱い、この長さで十分幅185mm以下では起磁力、導体経験磁場が増大(クエンチリスク増加)。
- ・鉄ポールは磁氣的に飽和(2.20T)し、鉄ポールによる磁場は安定。中心部に磁場を集中させ、また、コイル起磁力を軽減する役も果たす。
- ・レストラックコイル断面55mmx55mm (試行錯誤的に決定) 正方形の断面が最適、正方形から外れると、起磁力、導体経験磁場が増大

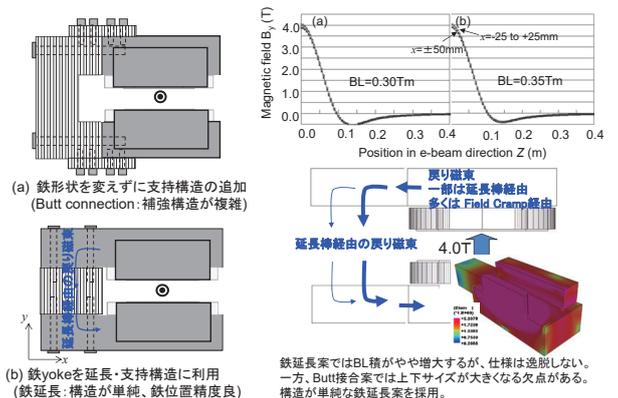
Yukihiko Murata, Mitsubishi Abe and Ryuya Ando, 'Design Optimization for Superconducting Bending Magnets using Pareto Front Curve', IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 897 (2017) 012023 doi: 10.1088/1742-6596/897/1/01202, Proceeding of 1st Asian ICMC & CSSJ 50th Anniversary.

# 磁場分布の検討とBL積低減



# 分割された上下鉄の対磁力(121kN)支持構造

磁場に影響を与えないために鉄芯形状の変更は最小に！



鉄延長案ではBL積がやや増大するが、仕様は追従しない。一方、Butt接合案では上下サイズが大きくなる欠点がある。構造が単純な鉄延長案を採用。

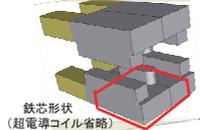
### 発熱量と冷却可能性

励磁・消磁時には、導体・伝導冷却板・鉄芯に渦電流などによる発熱がある。一方、冷凍機の容量は4Kにて1.5Wであり、大きな発熱は不可である。発熱があっても、超伝導状態を保てる(発熱量<冷凍機能力)ように、超伝導コイルと鉄形状(材質も含め)の構造・冷却法を概念検討を、磁気設計と共に行う。

表 鉄芯材料の選択

	バルク鉄芯	積層鉄芯
利点	鉄芯を通過できる磁束が大きく、磁石小型化・低BL積化しやすい	渦電流が抑制でき、発熱量が少ない
欠点	励磁・消磁時の渦電流発熱が心配される(対策:発熱量の計算、冷却パスの調整)	鉄芯を通過する磁束が少なくなり、コイル起磁力の増加、支持構造の複雑化、磁石サイズ・BL積の増加につながる。
採否	採用(概念設計開始時に選択)	不採用、磁場の低下、大型化の理由で採用不可、当初から除外せざるを得なかった。

励磁中(1200秒)の鉄芯中の渦電流・発熱量を計算し・成立性を確認する。大きな計算コストを要するので、右記の1/8を計算領域とした。

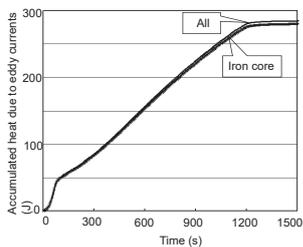


### 20分励磁の発熱シミュレーション

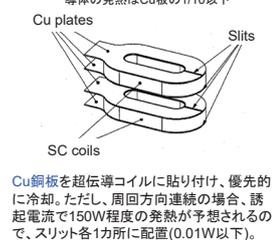
1200秒励磁時の発熱量			
部位	ピーク(W)	平均(W)	蓄積(J)
Iron cores	0.94	0.23	275
SS supports	1.64E-4	6.85E-5	0.082
Cu plates	5.23E-3	3.89E-3	4.70

1200秒消磁時の発熱量			
部位	ピーク(W)	平均(W)	蓄積(J)
Iron cores	1.28	0.11	135
SS supports	1.68E-4	6.37E-5	0.076
Cu plates	5.41E-3	4.13E-3	4.96

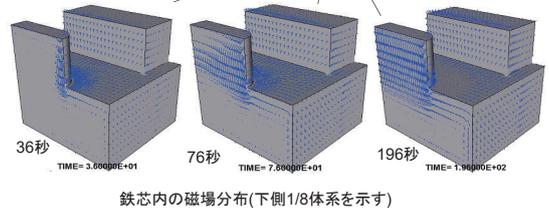
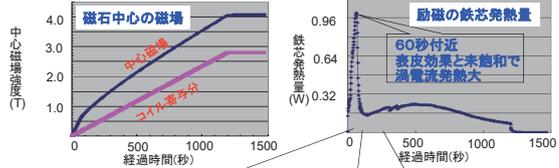


磁石励磁時の発熱量の98%は鉄芯の渦電流発熱全発熱量は1200秒平均で0.23Wであり、超伝導コイルを優先的に冷却し、鉄芯はゆっくりと冷却することで、安定な超伝導を保つ考えで設計。漏れ磁場、輻射シールド(AI)の発熱量も小さい。フィールドクランプが奏効した。

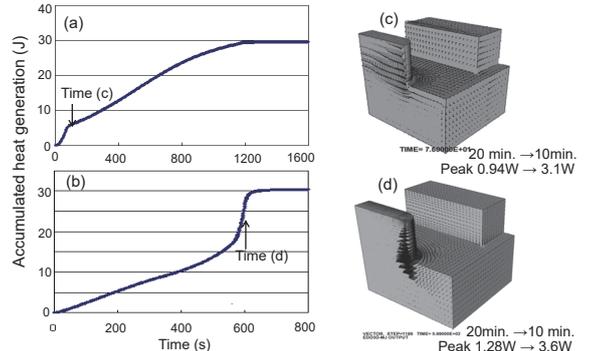


### 20分励磁の発熱シミュレーション

鉄芯の電流上昇期間(1200s)平均の発熱は0.3W以下であり、冷凍機能力に比べ小さい励磁開始時にピーク発熱→コイルと鉄は断熱しておき、超伝導コイルを独立・優先的に冷却

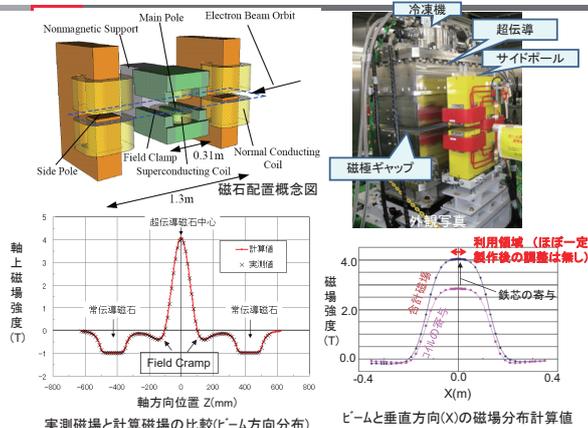


### 励磁(20分)・消磁(10分)の発熱量比較

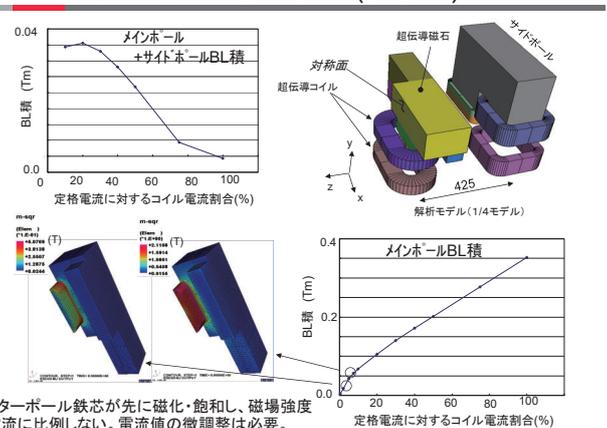


消磁時の発熱量は少なく、時間を半分とすると、励磁時の発熱量と同程度。励磁・消磁時の鉄芯の蓄積発熱量(J)は、おおよそ、それぞれの時間に反比例であり、ピーク値と励磁中の平均発熱(W)は2乗に反比例である。

### 磁石外観と磁場分布の検証



### 励磁時のBL積の変化(静解析)



センターポール鉄芯が先に磁化・飽和し、磁場強度は電流に比例しない。電流値の微調整は必要。

### 詳細・製作設計での磁場分布精度の確保

製作設計での配置・形状に合わせた起磁力配置で磁場の妥当性を確認。

- Field Crampと中心ポール部の固定に使うボルトとボルト穴(鉄の欠損部)部分の磁場影響を評価 → 3E-5 Tm程度であり、問題なしと判断
- クエンチ時の磁石応答 応力・温度上昇共に問題なし 起磁力配置への影響する変更は無し。

以上の様な慎重な磁場設計を通して製作したSAGA-LS wigglerは2号機を含め、安定に利用してもらっていると聞いています。最終的に磁場計測値を使い、4.0Tのメインポール磁場で、ビーム変位15mmとなった。

九州シンクロtronの方々のご指導に感謝します

参考文献

S. Koda, Y. Iwasaki, Y. Takabayashi, T. Kaneyasu, T. Semba, Y. Yamamoto, Y. Murata, M. Abe, "Design of a superconducting wiggler for the Saga Light Source Storage ring", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.21, pp32-38, (2011). M. Abe, Y. Murata, T. Seki, T. Semba, Y. Iwasaki, Y. Takabayashi, T. Kaneyasu, and S. Koda, "Magnetic Field Design of a Superconducting Wiggler in the SAGA-LS Storage Ring", IEEE Transaction on Appl. Supercond., vol. 24, no. 2, April 2014, Art. no. 410228.

### 10<sup>-4</sup>以下の精度が必要な磁石の設計・調整

#### 磁気分布の要求精度

機器分野	磁場強度	要求精度 ( $B^{\text{ER}}/B_0$ )	補正
核融合装置	数 T	$10^{-4} \sim 10^{-5}$	周回方向一様成分のみ(Poloidal field coils) 最近: 局所誤差成分補正 (Correction coil)
加速器磁石	0.5 ~ 10 T	$10^{-4}$	ビームライン全体として補正 (多重極コイル)
MRI用磁石	0.3 ~ 11.7 T	$10^{-6}$ (Φ40cm球: 3.35E+4cm <sup>3</sup> )	Passive: シム(鉄)片によるシミング Active: 10ch程度のシムコイル
Nmr磁石	数 ~ 30 T	$10^{-8}$ (但し狭い領域, 1cm <sup>3</sup> )	MRI用磁石と同様
ミュオン詳細計測用磁石	1.7 & 3. 0T	$10^{-7}$ 以下 共に約6300 cm <sup>3</sup>	MRI用磁石技術の応用

磁石製作精度は10<sup>-4</sup>程度(1mサイズ程度の磁石を0.1mm精度で製作)、これ以上の磁場精度は製作・設置後に調整を行う。しかし、目標精度を実現できる実力を持つ磁石を設計しておく必要はある(設計以上の高精度磁場は不可)。

### MRI用磁石(<10<sup>-6</sup>)

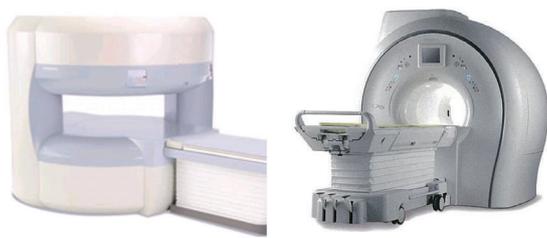
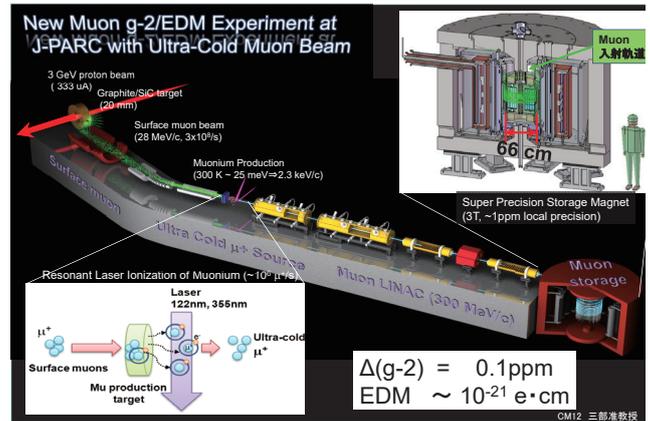


図 MRI(Magnetic Resonance Imaging)装置

・ M. Abe, K. Shibata, "Consideration on Current and Coil Block Placements with Good Homogeneity for MRI Magnets using Truncated SVD", IEEE Trans. Magn., vol. 49, no. 6, pp. 2873-2880, June, 2013.  
・ M. Abe, K. Shibata, "Coil Block Designs with Good Homogeneity for MRI Magnets Based on SVD Eigenmode Strengths", IEEE Trans. Magn., vol. 51, no.10, Oct. 2015, Art. no. 7002713.

### Muon g-2/EDM詳細計測実験全体構想図

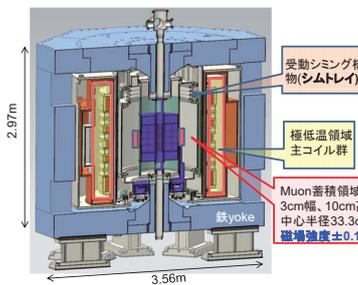


$$\Delta(g-2) = 0.1\text{ppm}$$
$$\text{EDM} \sim 10^{-21} \text{ e}\cdot\text{cm}$$

### MRI用/ミュオン詳細計測用磁石(磁場精度<10<sup>-7</sup>)

MRI磁石などの高精度な磁石(許容誤差10<sup>-6</sup>以下の精度)では、試行錯誤で起磁力配置を決めるわけには行かない。しかし、使用コイルはソレノイド状と決まっている。磁場精度を向上させるために、特異値分解利用の最小二乗法で、高精度を確保する手法を開発し、適用している。

$|B^0 - A I|^2 \rightarrow \text{minimum}$   
Normal  $B^0 = A I$   
Inverse  $I = A^{-1} B^0$   
 $B^0$ : 目標磁場分布(数十点以上)  
 $I$ : 電流分布(数十~数千点)  
 $A$ : 応答行列(非正則),  $A^{-1}$ : 一般逆行列  
応答行列Aを特異値分解  
 $A = \sum u_i \lambda_i v_i^T \rightarrow A^{-1} = \sum v_i u_i^T / \lambda_i$   
したがって、  
 $I = \sum (v_i u_i^T / \lambda_i) B^0$   
 $= \sum \eta_i^{1/2} P_i v_i / \lambda_i$   
固有分布の加算は必要精度まで実行  
 $P_i$ は固有モード強度で、  
 $P_i = u_i \cdot B^0 / \eta_i^{1/2}$   
 $u_i$ : 磁場分布の固有ベクトル(数十~数千点)  
 $v_i$ : 電流分布の固有ベクトル(数十~数千点)  
 $P_i$ : 番号固有モードの強度  
 $\lambda_i$ : 特異値(T/m)



### 仕様を満たす磁場分布(1)

仕様の磁場分布が可能なことを線輪(FL)電流の集束で確認

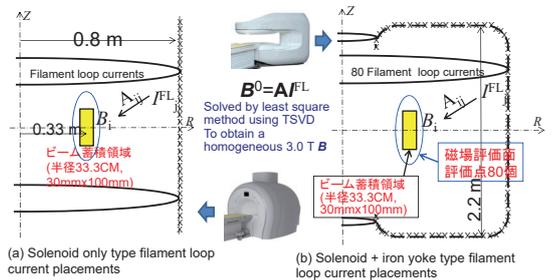


Fig. Computational models to discuss the concept of the g-2/EDM magnet with filament loop (FL) currents

・ M. Abe, K. Shibata, "Consideration on Current and Coil Block Placements with Good Homogeneity for MRI Magnets using Truncated SVD", IEEE Trans. Magn., vol. 49, no. 6, pp. 2873-2880, June, 2013.  
・ M. Abe, K. Shibata, "Coil Block Designs with Good Homogeneity for MRI Magnets Based on SVD Eigenmode Strengths", IEEE Trans. Magn., vol. 51, no.10, Oct. 2015, Art. no. 7002713.

### 仕様を満たす磁場分布(3)

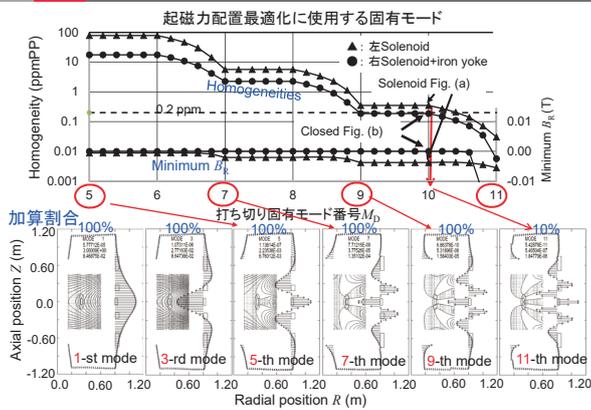


Fig. Eigenmodes used for the magnet design

### 仕様磁場の可能性を確認(3)

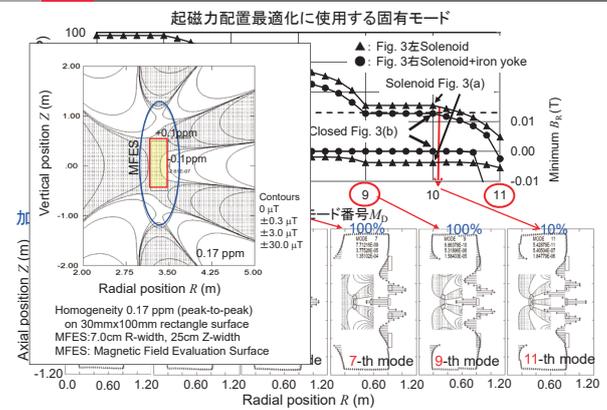


Fig. Eigenmodes used for the magnet design

### 仕様を満たす磁場分布(2)

均一磁場領域を覆う起磁力配置が必要

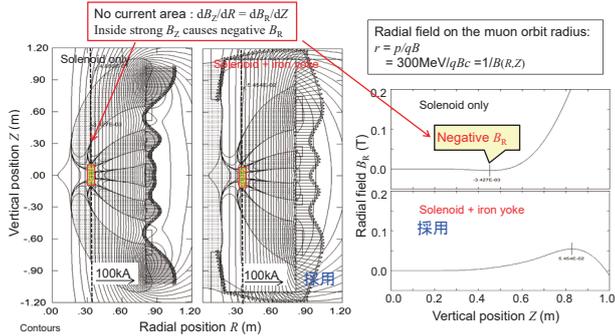


Fig. Candidates for the g-2/EDM magnetic field

### 鉄芯とCBsの最適配置: 初期配置

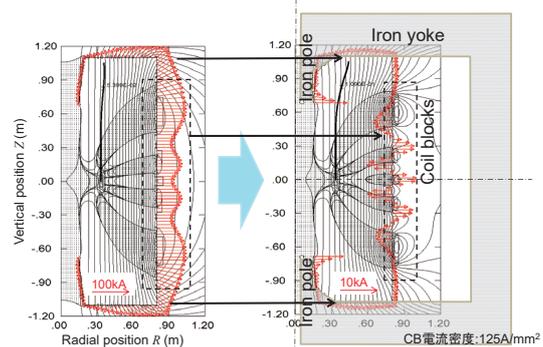


Fig. 前スライドの線輪電流(左)を鉄芯とCBsに置き換えて(右)。右図ではCBsと鉄芯が最適化されていないので、残差線輪電流(スケール: 赤矢印)が残っている。繰り返し計算で残差を無くしていく

### 鉄芯とCBsの最適配置: 繰り返し配置計算

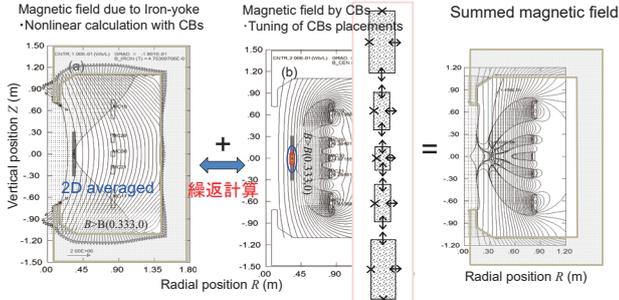


Fig. 6 コイルブロック(CB)配置を与えて鉄yokeの作る磁場計算と、鉄yoke磁場を与えて磁場分布を均一化するようにCB配置を最適化する計算を、交互に繰り返してビーム蓄積領域の磁場分布を均一化させる。  
M. Abe, K. Shihata, "Coil Block Designs with Good Homogeneity for MRI Magnets Based on SVD Eigenmode strength", IEEE Trans. Magn., vol. 51, no. 10, P. 7002713, Oct. 2015.

### 鉄芯とCBsの最適配置: 繰り返し配置計算

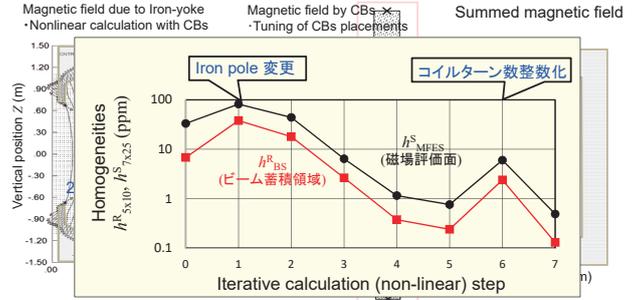


Fig. コイルブロック(CB)配置を与えて鉄yokeの作る磁場計算と、鉄yoke磁場を与えて磁場分布を均一化するようにCB配置を最適化する計算を、交互に繰り返してビーム蓄積領域の磁場分布を均一化させる。  
M. Abe, K. Shihata, "Coil Block Designs with Good Homogeneity for MRI Magnets Based on SVD Eigenmode strength", IEEE Trans. Magn., vol. 51, no. 10, P. 7002713, Oct. 2015.

### 磁場シミングの必要性

・以上の方法を利用すれば、「正確」な様磁場分布を発生できる磁石の起磁力配置(コイルブロック(CB)位置・断面形状および鉄芯形状)を決定出来る。ここで、「正確」とは、MRI用磁場であれば、40cm球体内(40cmDSV; DSV=Diameter Spherical Volume,  $3.35E+4cm^3$ )で3ppm以下程度であり、j-PARCミューオン実験用磁石であれば、 $\pm 0.1ppm(10^{-7})$ 以内(6400cm<sup>3</sup>)の様な磁場を意味する。  
・しかし、製作後の磁石には、製作誤差や環境磁場による誤差磁場があり、現実には、 $10^{-4}$ オーダの誤差磁場(数Tの磁場で数ガウス)は不可避である。  
・そこで、据え付け直後に、その誤差磁場成分を補正する磁場調整が必要となる。これがシミング作業である。磁場分布の凹凸はpeak-to-peak値で100ppm(数ガウス/3T機)超の誤差磁場が存在する。この誤差磁場を、3ppm(9μT)程度以下(MRIの場合)の残差磁場にシミングする。  
・MRI用磁石レベルでは確立された技術があり、発表者は特異値分解利用の最小二乗法の利用を使っている。  
・この方法は、MuSEUM(j-PARC)実験を目指した試験をしている。一部の改良で、サブ $\pm 0.1ppm$ にも対応できることを最近確認している。

シミング計算(計測磁場→シム鉄配置の計算)参考文献  
Mitsushi Abe, Kenji Sakakibara, Takuya Fujikawa, Hikaru Hanada, "Static Magnetic Field Shimming Calculation Using TSVD Regularization Considering Constraints of Iron Pieces Placements", IEEE Transaction on Applied Superconductivity, vol. 27, no. 7, Oct. 2017, Art. no. 4400812.  
TSVD:打ち切り特異値分解(Truncated Singular Value Decomposition)

### MRI磁石のシミング体系: 水平磁場型MRI磁石

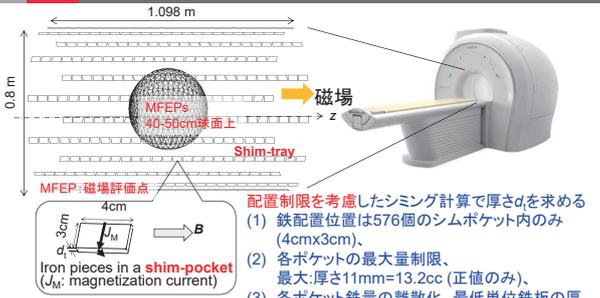
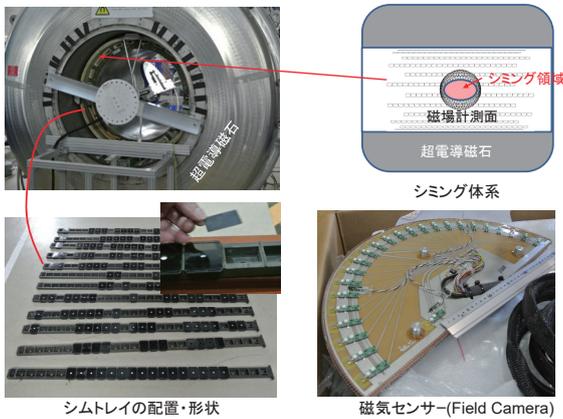
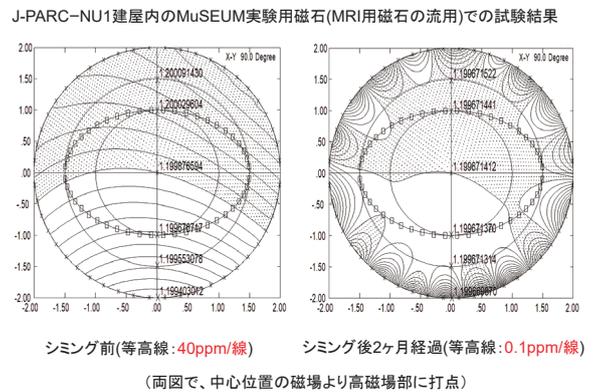


Fig. Shimming geometry for a cylindrical type MRI magnet.

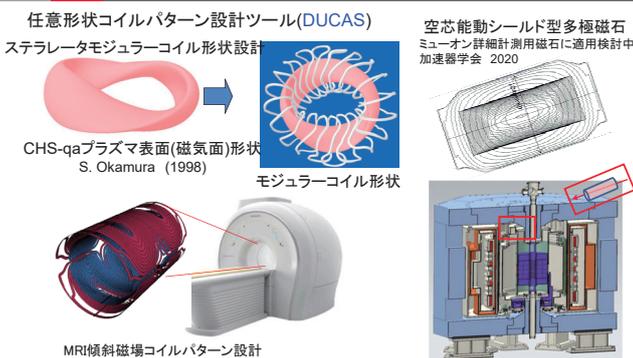
### J-PARC内の磁石で誤差磁場 $\pm 0.1ppm$ を目指すシミング試験



### シミングにより磁場分布を均一化した例

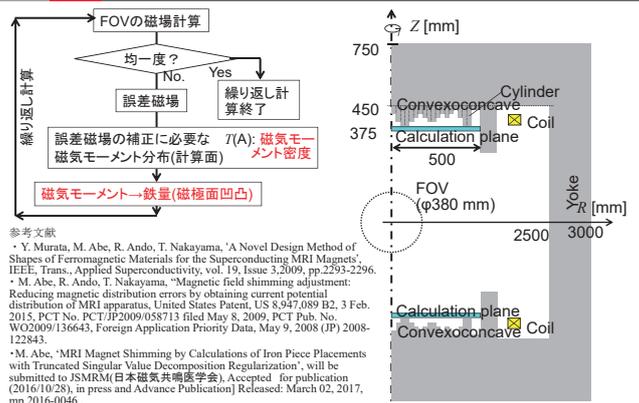


### 特異値分解利用の最小二乗法利用の磁気設計



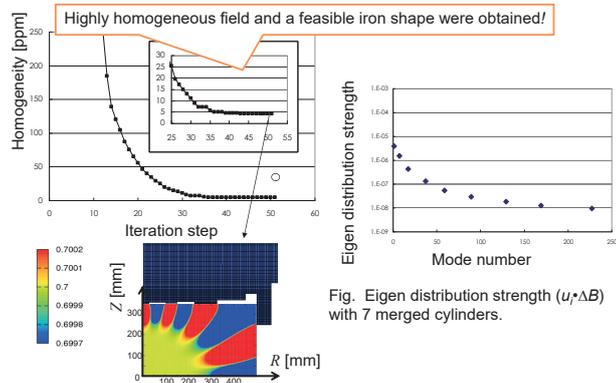
参考文献  
\*DUCAS: M. ABE, T. NAKAYAMA, S. OKAMURA, K. MATSUOKA, "A new technique to optimize coil winding path for the arbitrarily distributed magnetic field and application to a helical confinement system", Phys. Plasmas, Vol. 10, No. 4, (2003)1022.  
\*M. Abe, "A Design Technique of MRI Active Shield Gradient Coil Using Node Current Potentials and Triangular Finite Elements", IEEE Trans. Magn., vol. 50, no. 10, Oct. 2014, Art. no. 5100911.

### 鉄芯型MRI磁石の均一磁場設計(DUCAS応用)



参考文献  
\* Y. Murata, M. Abe, R. Ando, T. Nakayama, "A Novel Design Method of Shapes of Ferromagnetic Materials for the Superconducting MRI Magnets", IEEE, Trans., Applied Superconductivity, vol. 19, Issue 3, 2009, pp.2293-2296.  
\* M. Abe, R. Ando, T. Nakayama, "Magnetic field shimming adjustment: Reducing magnetic distribution errors by obtaining current potential distribution of MRI apparatus, United States Patent, U.S. 8,947,089 B2, 3 Feb. 2015. PCT No. PCT/JP2009/058713 filed May 8, 2009. PCT Pub. No. WO2009/136643, Foreign Application Priority Date, May 9, 2008 (JP) 2008-122843.  
\* M. Abe, "MRI Magnet Shimming by Calculations of Iron Piece Placements with Truncated Singular Value Decomposition Regularization", will be submitted to JSMRM (日本磁気共鳴医学会). Accepted for publication (2016.10.28), in press and Advance Publication] Released: March 02, 2017, mp.2016-0046.

Fig. 1/2 cross-sectional drawing of test model including symmetric axis



- ・超電導Wiggler(SAGA-LS)の磁気設計について、起磁力配置とした設計過程と磁場精度の確保を紹介し、さらなる磁場精度の向上策を紹介しました。
- ・MRI関係では $10^{-6}$ レベル  
→J-PARC Muon実験関係では $10^{-7}$ レベル
- ・最後に、任意のコイル形状を設計するツール(DUCAS)についても紹介しました。

ありがとうございました。

## X 線干渉計と X 線光学

平野馨一  
KEK 物構研放射光

1965 年に U. Bonse と M. Hart によって開発された X 線干渉計[1]は、X 線光学における重要な基本的光学素子の一つであり、今日に至るまで様々な改良や応用がなされてきた。その中でも、近年、特に注目を集めているのが、X 線干渉計による各種試料の超高感度な位相イメージング[2]である。また、これに関連して、X 線干渉計の空間分解能の改善に向けた取り組みもなされている[3]。

Photon Factory ではこの他にも、X 線干渉計に関連した研究として、シリコンの格子定数の超精密測定によるアボガドロ定数の精密決定[4]や、X 線動力学的回折理論の検証[5]と位相トポグラフィーへの応用などが行われてきた。

本講演では、X 線光学の観点から X 線干渉計開発・利用研究の歴史と現状について概観する。

[1] U. Bonse and M. Hart: *Appl. Phys. Lett.* **6** (1965) 155.

[2] A. Momose, T. Takeda, Y. Itai and K. Hirano: *Nature Medicine* **2** (1996) 473.

[3] K. Hirano and A. Momose: *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** (1999) L1556.

[4] 物構研トピックス “2019 年 5 月 20 日、キログラムの定義改定”  
<https://www2.kek.jp/imss/news/2019/topics/0520kg/>

[5] K. Hirano and A. Momose: *Phys. Rev. Lett.* **76** (1996) 3735.



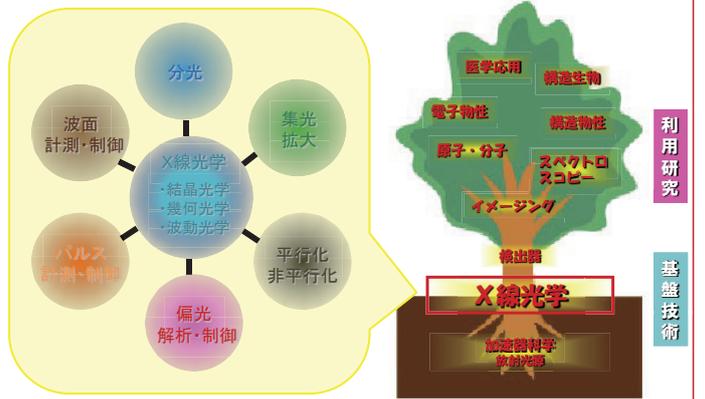
## X線干渉計とX線光学

KEK物構放射光 平野馨一

1. はじめに
2. X線干渉計について
3. X線干渉計の利用例
  - 3-1. X線干渉計による位相イメージング
  - 3-2. X線干渉計による格子定数の精密測定
  - 3-3. X線干渉計による動力学的X線回折理論の検証
4. まとめ



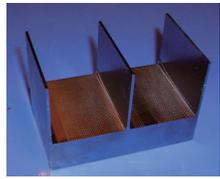
## 1. はじめに ～放射光とX線光学～



2



## PFとX線干渉計



- ① 位相像の取得
  - PFで初めて成功！
  - 超高感度位相イメージング
- ②  $\lambda$  定規
  - 格子定数の超精密測定
  - Kg再定義(量子標準)へのPFの貢献 (2019年5月)
- ③ X線動力学的回折理論の検証
  - 前方回折X線の位相シフトの検出

3



## 2. X線干渉計について ～X線干渉計の誕生～

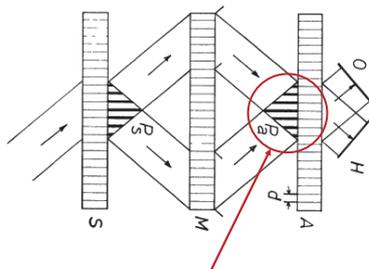


マッハ・ツェンダー干渉計	X線干渉計
ツェンダーが1891年に発表し、マッハが1892年に改良。	1965年に U. Bonse と M. Hart によって発表された。
(Wikipedia より引用)	

4



## X線干渉計の基本原則

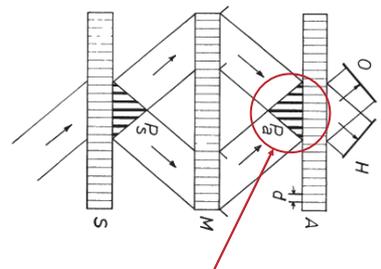


- ① アナライザー A の前に定在波が立つ！
  - ・定在波の周期は干渉計の格子面間隔  $d$  と等しい
- ② 定在波と格子面の相対位置による透過強度変化：
  - ・定在波の節が格子面の位置と一致する時 → 吸収最大、透過強度最小
  - ・定在波の節が格子面の位置と一致する時 → 吸収最小、透過強度最大

5



## X線干渉計の基本原則 ～位相イメージングと $\lambda$ 定規の基本原則～



- ① 干渉計内の片方の光路に物体を挿入すると・・・
  - 定在波の位置が動いて透過強度が変動する。(位相イメージングの基本原則！)
- ② 干渉計のアナライザー A の位置をずらすと・・・
  - 格子面の位置が動いて透過強度が変動する。 $(\lambda$ 定規の基本原則！)

6



## 3. 1 X線干渉計による位相イメージング ～試料の干渉像の観察～



花崗岩の干渉縞像(安藤&細谷)

光学顕微鏡像

7



## X線干渉計による位相イメージング ～試料の位相マップ(位相像)の観察～



X線二次元検出器と縞走査法の活用により、位相像の取得が可能になった。その後、X線干渉計による位相イメージングでPFは世界をリードしてきた。

8



### 3. 2. X線干渉計による格子定数の精密測定 ～ Å 定規としてのX線干渉計 ～



9



### アボガドロ定数の精密測定



$$N_A = 8M_{Si}/\rho a^3$$

$N_A$ : アボガドロ数  
 $M_{Si}$ : シリコンのモル質量  
 $\rho$ : シリコン結晶の密度  
 $a$ : 格子面間隔

計量標準総合センター(NMI)で開発されたSiの格子定数絶対測定用のX線光波長干渉計  
 真空槽内で組み立てられ、2003年まで産総研内のX線を用いて測定が行われた。(NMI 藤本氏  
 ご提供)

10



### 高純度 $^{28}\text{Si}$ 結晶



- Siの主な安定同位体の天然存在比は  $^{28}\text{Si} : ^{29}\text{Si} : ^{30}\text{Si} \approx 92 : 5 : 3$
- 高純度  $^{28}\text{Si}$ 結晶の作製(純度99.985%)

$^{28}\text{Si}$ インゴットの写真

$^{28}\text{Si}$ インゴットの模式図

11



### 高純度 $^{28}\text{Si}$ 結晶の評価 ～ 自己参照型格子コンパレータ ～



自己参照型格子コンパレータの実験配置

PF BL-3Cでの実験風景

自己参照型格子コンパレータ  
 リングから入射した放射光は  
 ①前蓋モノクロメータで短く単色化され  
 ②MDCMで精密で単色性の非常に高いX線になり  
 ③試料に照射され一対の検出器で検出される。  
 二重線の傾角は実験ハッチを表す。

12



### 高純度 $^{28}\text{Si}$ 結晶の評価 ～ 格子間隔の相対変位測定結果～



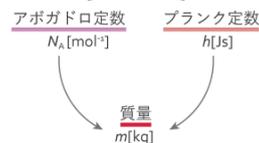
絶対測定にも使われたインゴット中央の試験片での格子間隔の  
 相対変位測定結果

格子間隔の相対変位は $10^{-9}$ のオーダーで、インゴット  
 中央の試料片は格子定数の測定に十分適している  
 ことが示された

13



### 国際単位系(SI)kg再定義 ～ 2019年5月20日 ～



$$N_A h = c M_e a^2 / 2 R_\infty$$

$$N_A = 6.02214076 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

$$h = 6.62607015 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

重さについても量子標準へ!

キログラムは質量数が  $\{ (209 \ 792 \ 489) / 6.626 \ 069 \ 57 \} \times 10^{28}$  ヘルツ  
 の光子のエネルギーに等しい質量である<sup>1)</sup>。

14



### 物質構造科学研究所ハイライト ～ 紹介記事～



<https://www2.kek.jp/imss/news/highlight.html>

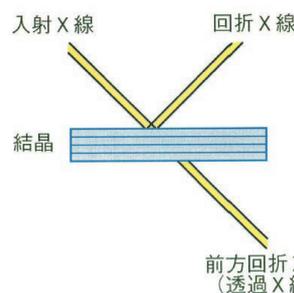
#### 2018年11月

- 2018.11.09 [ハイライト](#) 国際単位系 (SI) kg再定義の舞台裏 (3) 研究成果が活かされる時
- 2018.11.09 [ハイライト](#) 国際単位系 (SI) kg再定義の舞台裏 (2) フォトンファクトリーでの実験
- 2018.11.09 [ハイライト](#) 国際単位系 (SI) kg再定義の舞台裏 (1) なぜ、どうやって、再定義するのか

15



### 3. 3 X線干渉計による 動力学的X線回折理論の検証

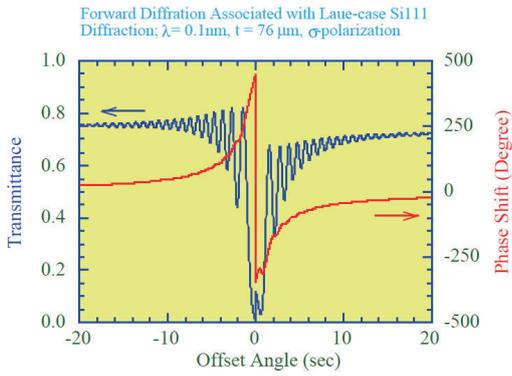


★**回折X線の位相:**  
 フラッグ条件の前後で180度変化  
 → X線定在波法、X線反射型移相子 etc.

★**前方回折X線の位相:**  
 フラッグ条件の前後で急激に変化  
 → X線透過型移相子 etc.

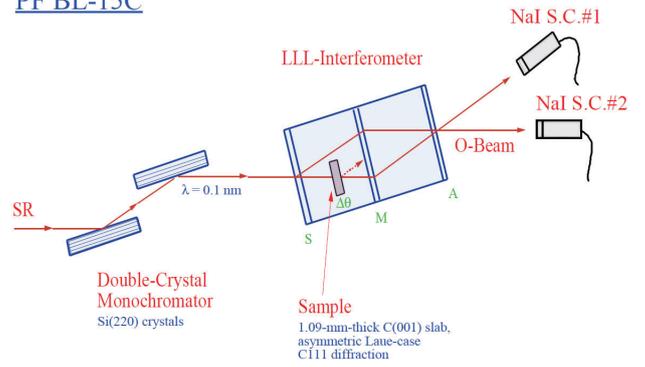
17

16



17

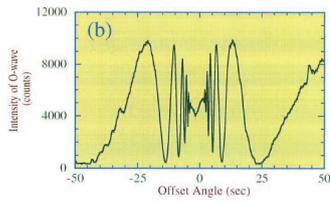
PF BL-15C



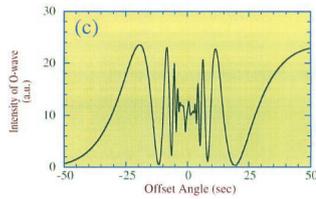
18

実験結果

測定値



計算値



19

4. まとめ

- 1965年にU. BonseとM. Hartによって発表されたX線干渉計により、PFはこれまで独自の貢献を果たしてきた。
- PFはX線干渉計による位相像の取得に世界で初めて成功し(@ BL-14B等)、超高感度X線位相コントラストイメージングの端緒を拓いた。その後も、この分野で世界をリードしている(@ BL-14C)。
- X線干渉計をÅ定規として利用して重さの量子標準を定義するプロジェクトでも、PFは独自の超精密X線光学技術で貢献を果たした(@ BL-3C)。
- X線干渉計による動力学的回折理論の検証も行われた(@ HBL-15C)。

20

## 位相イメージングのヒト発生学への展開

山田 重人

京都大学大学院医学研究科・附属先天異常標本解析センター

ヒトのサンプルを用いて行う研究は、データの取り扱いや解析に対する倫理的な制約が大きく、特に胎児期やさらに早期の胚子期については、通常はサンプルの入手すら難しく、連続した発生時期の標本を用いた大規模な形態学的解析は極めて困難である。京都大学大学院医学研究科附属先天異常標本解析センターは、1961年以來、発生初期のものを含むヒト胎児標本を多数収集してきた。サンプル数は40000例を超え、世界一の標本数を誇り、また世界で唯一利用可能なヒト初期胎児のリソースとして国内外の研究室から注目を集めている。これまでに、この膨大なヒト胎児コレクションの連続組織切片を利用した三次元再構築を行い、心疾患などの詳細な解析を行ってきたが、組織切片になる過程でサンプルが破壊されてしまうのが難点であった。そこで、内部異常を解析するための非破壊的三次元イメージング法として、MRI顕微鏡を用いて画像解析を行い、脳の発達や内臓の発生における隣接臓器との位置関係について解析を行ったが、その解像度は最高でも $35\mu\text{m}/\text{pixel}$ 程度と詳細な解析には不十分であり、さらに高解像度な撮影法が必要であった。

X線位相イメージングは、X線がサンプルを透過する際の位相シフトを利用しており、従来の撮像法に比べて感度が約1000倍高い。現在のところ、観察視野 $5\times 3\text{cm}$ 、解像度 $9\mu\text{m}/\text{pixel}$ という、非破壊イメージングとしては世界最高のシステムとして、高エネルギー加速器研究機構・放射光科学研究施設BL-14Cにおいて稼働中である。これを用いて、当研究グループは、発生学領域にこの位相X線顕微鏡による撮像システムを応用し、ヒト初期胎児を用いて撮像を行い良好な成績を得ており、例えば妊娠6週のヒト胚において、下垂体原基の領域についての明瞭な像の描出に成功した。この位相X線顕微鏡を用いて、研究グループで所有する膨大な数のヒト初期胎児の撮像を行えば、ヒト胎児発生初期の詳細な形態学的解析が実現し、世界でも類をみない多次元画像データベースの作成が可能となる。

発生現象はこれまで、形態を記述するのが研究手法の基本であった。上記の多次元画像データベースにより、発生現象を定量的に解析することを検討している。また異常例との比較により、超早期胎児異常診断法の開発も目指している。連続的・同時的に起こる多彩な発生現象を一元的に記述できるようになることから、発生生物学の考え方を大きく変える新しい指標の樹立に繋がる研究に発展しようと考えている。

# 位相イメージングの ヒト発生学への展開

山田 重人  
京都大学大学院医学研究科  
附属先天異常標本解析センター

## 発生学とは

- 1つの細胞から成熟した個体が出来上がっていくメカニズムを解明する学問。
- 古典的には形態学的な変化を観察・記述するものであったが、このメカニズムを分子遺伝学的なツールを用いて解明することで、大きく発展した分野である。

Congenital Anomaly Research Center, Kyoto University Graduate School of Medicine

## ヒト発生学

- ヒト妊娠: 約38週間で完成
  - 妊娠週数: 最終月経開始日から計算、40週0日が分娩予定日
  - 受精: 妊娠2週0日で起こる。
  - 正常分娩: 37週0日～41週6日
    - それより早ければ「早産」
    - 遅ければ「過期産」

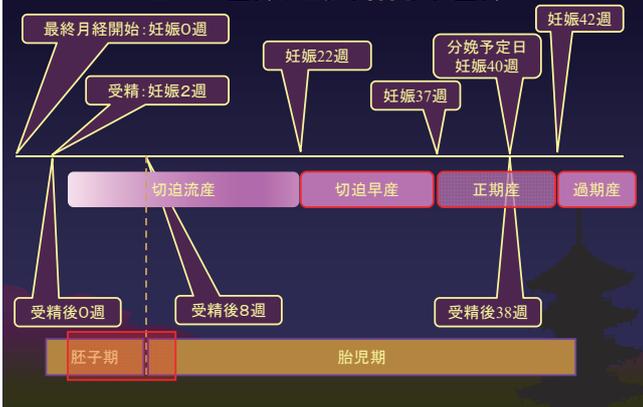
Congenital Anomaly Research Center, Kyoto University Graduate School of Medicine

## ヒト発生学

- 発生学におけるヒト妊娠の日数計算
  - 発生学的な変化は、受精後週数(日数)で数えることが多い
  - いわゆる「妊娠週数」とは2週間のズレ

Congenital Anomaly Research Center, Kyoto University Graduate School of Medicine

## 妊娠週数と受精後週数



## ヒト胚子世界3大コレクション

Blechschmidt Collection (ドイツ・ゲッティンゲン)  
Carnegie Collection (アメリカ・DC)  
Kyoto Collection (日本・京都)

## 先天異常標本解析センター

- Kyoto Collectionを所蔵
  - 世界最大規模のヒト胚子・胎児コレクション
  - 1961年から収集開始
- 1975年 設立
  - 2015年はセンター設立40周年

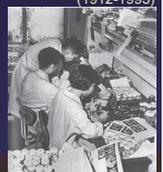


## Kyoto Collection of Human Embryos (京都コレクション)

- ❖ 1961年～ ヒト胚子・胎児標本の収集開始  
多くの産婦人科医の協力のもとに、人工妊娠中絶による標本を収集
- ❖ 1975年 附属先天異常標本解析センター設立
- ❖ 1992年～ 画像化の取り組み
- ❖ 2011年～ 国際的な連携  
現在、標本の数は45,000例以上にのぼり、様々な解析が続けられている。



創始者: 西村秀雄 (1912-1995)



1970年頃の研究室



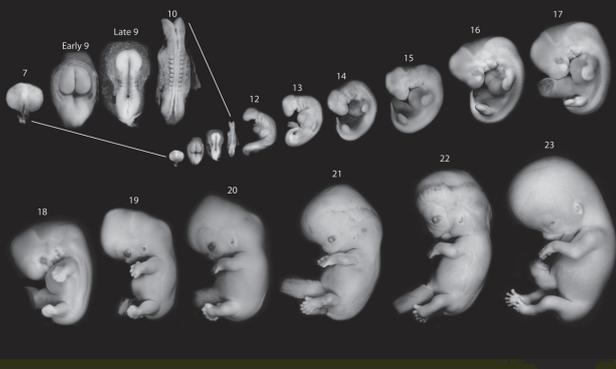
# Kyoto Collection 標本の特徴

- 母体保護法(旧・優生保護法)の下、人工妊娠中絶による
- 妊娠第一三半期(～妊娠13週)までの「正常妊娠」のものが大半を占める
- 協力産科医は、胚の所見で選別は行っていない

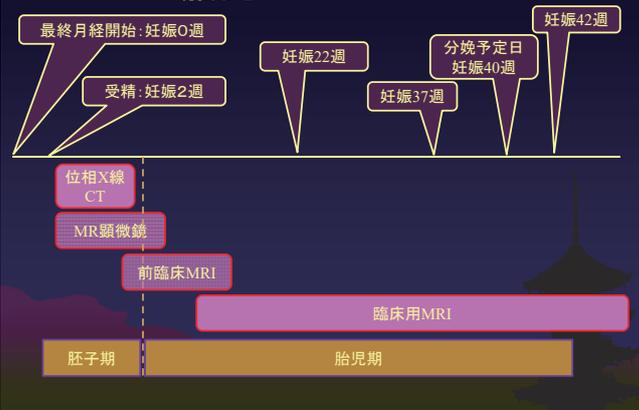
京都コレクションの胚集団は子宮内人口集団を反映したものと考えられる

# ヒトの正常発生

## カーネギー発生段階 Carnegie Stages (CS)

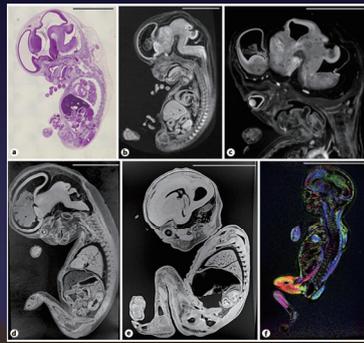


## 胎児イメージング



## 胎児イメージング

- 連続組織切片
- MR顕微鏡
- 位相X線CT
- 前臨床MRI (7T Magnet)
- 臨床MRI (3T Magnet)
- DTI (3T MRI)



Yamaguchi & Yamada, Cells Tissues Organs 2018;205:314-319

## 連続組織切片

- 情報量(解像度)は最強
- (脱灰工程なしでスライス可能な)胚子期のみ可能
- Dead embryoでは、ここまでキレイにならない→流産胎児では難しいか

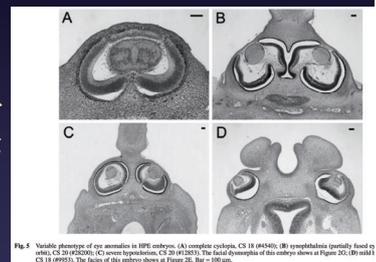


Fig. 5 Visible phenotypes of eye anomalies in 10PE embryos. (A) anencephaly, CS 18 (95540), (B) spina bifida (partially fixed to uterus), CS 20 (95200), (C) sacral hypoplasia, CS 20 (91283). The facial dysmorphism of this embryo shows as Figure 20; (D) anisot CS 13 (99953). The faces of this embryo shows as Figure 25. Bar = 100µm.

Yamada. Congenital Anomalies 2006; 46

## MR顕微鏡

- MRIの原理を用いて、微細サンプルを撮像するのに特化した装置。



1.5T magnet (permanent)      2.34T magnet (super-conducting)      7T magnet (super-conducting)

## 撮像結果

妊娠週数	6週	7週	8週	9週
頭殿長	5mm	10mm	16mm	23mm
解像度	40µm/pixel	50µm/pixel	100µm/pixel	120µm/pixel

## 前臨床MRI

- 7T-magnetを用いたMRI
- 6cm程度くらいのサイズまでは撮像可能

小動物用7テスラMR装置  
BioSpec 70/20 USR (Bruker Biospin)

小動物の撮像に特化した7テスラMRI装置です。多核種のMRスペクトロスコピーにも対応しています。実験小動物だけでなく、標本、細胞懸濁液、化合物溶液なども計測できます。



- 世界に100台前後
- 使用料: 4,000~8,000円/h

京都大学大学院医学研究科  
医学研究支援センター  
パンフレットより

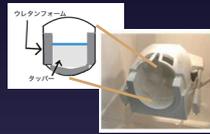
## 臨床用MRI

- 医療施設に広く存在し、これまでに挙げた中ではアクセスが最も容易。
- 胎児なら長時間の撮像でS/Nを上げることが可能。



## 撮像法

- 頭部用コイルにウレタンマットで固定して撮像
- プラスチック製密閉容器内に1%アガロースゲルを満して固定

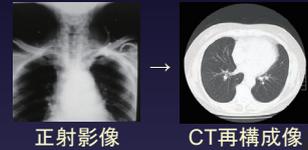


## 位相X線イメージング

- X線の位相変化を利用した比較的新しいイメージング

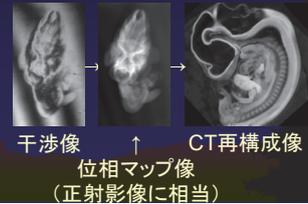
### 吸収コントラスト画像 (吸収X線)

- 日常臨床で使われるX線を画像化するのにも有利
- 骨~空気という広い範囲の生体構造を画像化するのにも有利

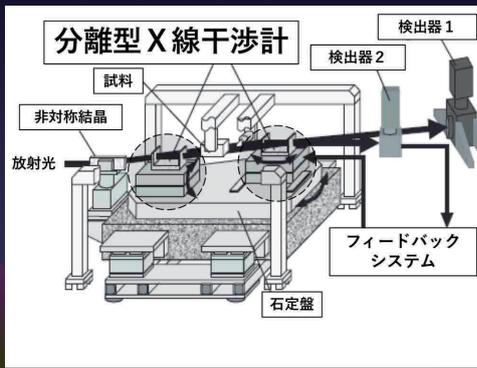


### 位相コントラスト画像 (位相X線)

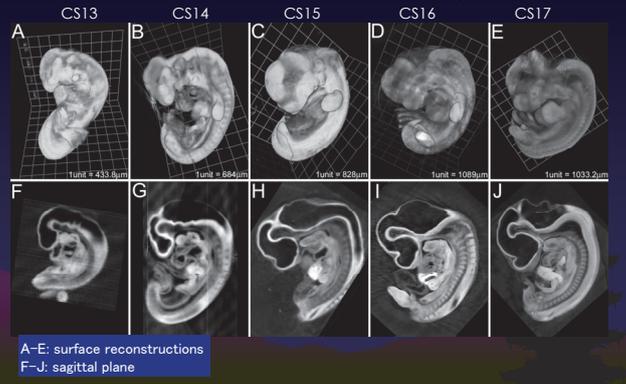
- 柔らかい構造 (胚子など) を画像化するのにも有利
- 吸収像より感度が1000倍高い



## 位相X線顕微鏡システム

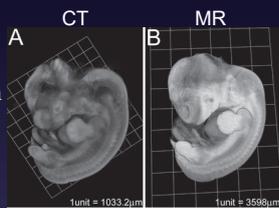


## CS13-17 human embryos

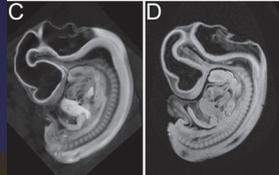


## Phase contrast CT vs MR

\* surface reconstruction

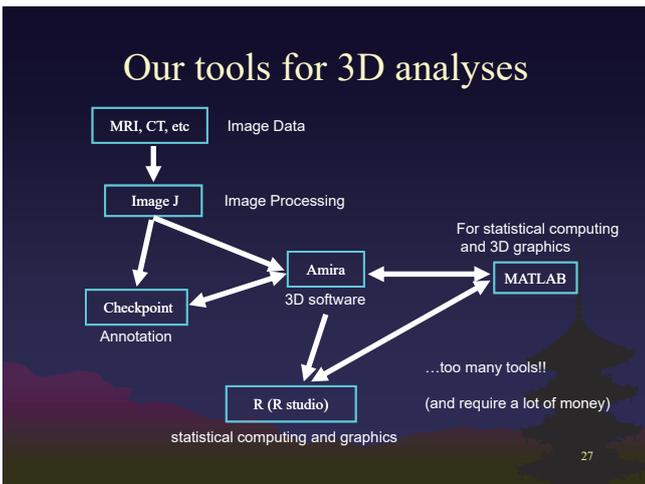
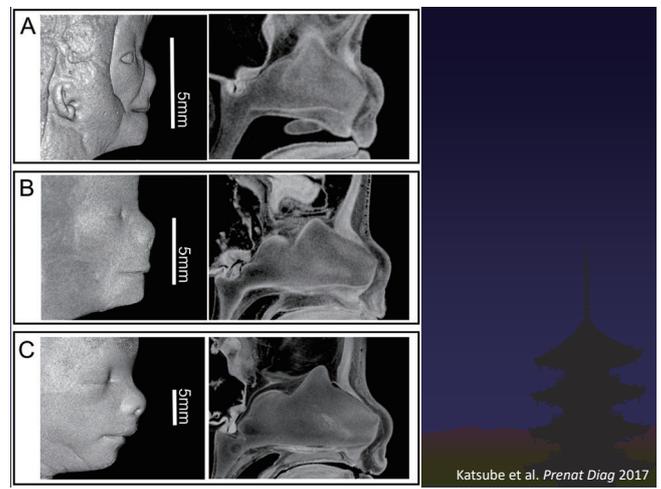
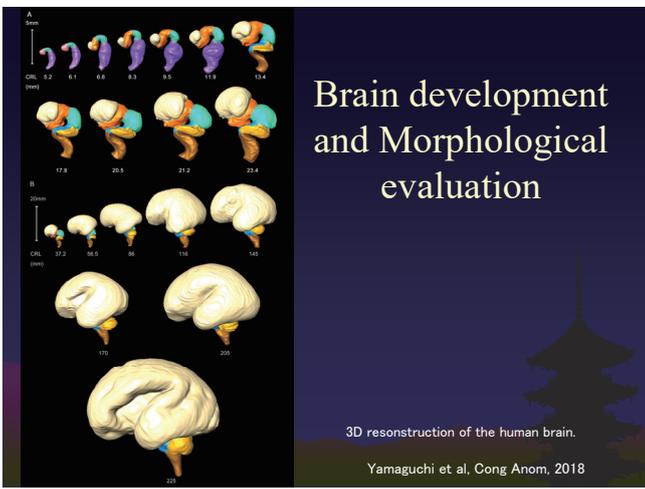


\* sagittal plane



## Data Analyses

Morphology and Morphometrics



**3D Slicer**

Free software for medical image informatics, image processing, and three-dimensional visualization

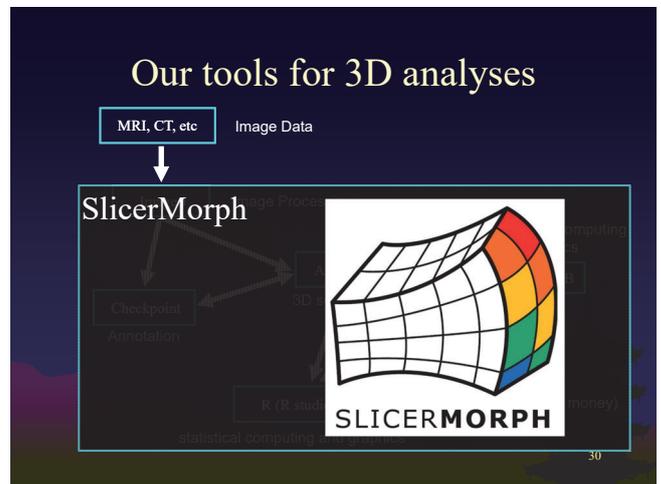
https://www.slicer.org/

**SlicerMorph Project**

- A toolkit made from 3D-Slicer
- “The toolkit enables biologists to retrieve, visualize, measure and annotate high-resolution specimen data both from volumetric scans (CTs and MRs) as well as from 3D surface scanners effectively within 3D-Slicer”.

https://slicermorph.github.io

**SLICERMORPH**



これまでのヒト発生の記述法:  
発生「段階」による不連続なもの

- 間隔が均等ではない
- 時系列の定量的な解析が難しい
- 外表のみの評価

カーネギー発生段階

10 14 18 22 時間軸

目指す記述法:  
時間軸を連続的な指標で表す

- 外表・内臓の両方を評価
- その個体・臓器が発生プロセスのどこに位置するのか明示
- 定量的な解析を容易にする
- 応用で種間の比較も容易に

新指標

10 15.2 18 22.3 時間軸

**まとめと展望**

- とにかくより美しい画像を撮る
- 得た画像の解析を行う
  - 何が映っているのか
  - 何が映っていないのか
  - 何を調べることができるのか

## 位相差 X 線 CT を用いたヒト胚子筋骨格系の三次元可視化

山口豊<sup>1</sup>、村瀬亜美<sup>1</sup>、児玉竜汰<sup>1</sup>、米山明男<sup>2</sup>、山田重人<sup>1</sup>

1. 京都大学大学院医学研究科
2. 九州シンクロトロン光研究センター

ヒトの四肢筋骨格系の形成は、沿軸中胚葉由来の筋板の細胞が体肢芽基部の壁側中胚葉領域へ遊走することからはじまる。これらの細胞が凝集した後には分化・成長し、胚子期の終わりには成人に見られるような筋骨格系のおおよその配置が完成することが知られているが、各筋がどの時期にどのように形成するかについてはこれまでほとんど説明されていない。運動系や神経系の立体的な形態形成過程に関する知見は、ヒトの発達を評価・解釈する際の指標となると考えられる。

現在、ヒト胚子・胎児筋骨格系の形態形成過程の解析では主に組織切片や MR を用いた解析が主流となっている。組織切片では細胞レベルまでの高い情報量の組織像を観察することができるが、作成時の断面の歪みなどから正確な三次元再構成は難しい。また、MR は非侵襲的に内部構造を解析することができ、近年では母体内の胎児の撮像にも有効であることが報告されているが、空間分解能から発生初期のヒト胚子の筋骨格系の解析は難しい。

位相差 X 線 CT は X 線が物質を透過する際に生じる位相シフトを利用した撮像方法であり、MR に比べてより高い空間分解能での撮像が可能である。また、一般的に使用される吸収 X 線 CT とは異なり軟骨や筋組織などの軟部組織の測定も可能であり、発生初期の筋骨格系の三次元可視化が期待できる。

本発表では、位相差 X 線 CT を用いたヒト胚子の四肢の筋骨格系の三次元可視化について報告する。京都大学が所蔵するホルマリン固定のヒト胚子標本を用いて撮像を行なった結果、胎生 4 週～8 週の胚子に関して、voxel size  $6.5\mu\text{m}^3$  の高精細な画像を取得することができた (図 1)。また、これらの画像を基にした四肢の筋骨格系の三次元再構成および定量的解析の試みについて報告する (図 2)。

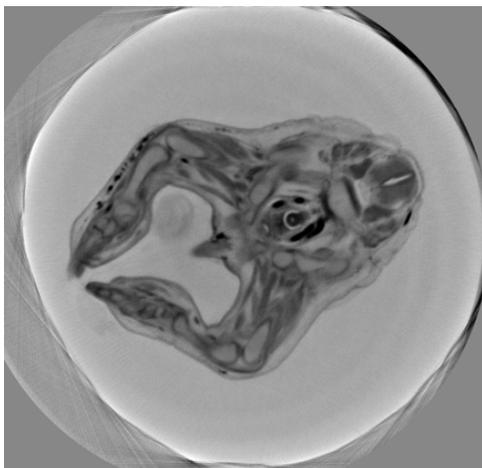


図 1 CS22 の胚子の下肢筋骨格系の撮像データ

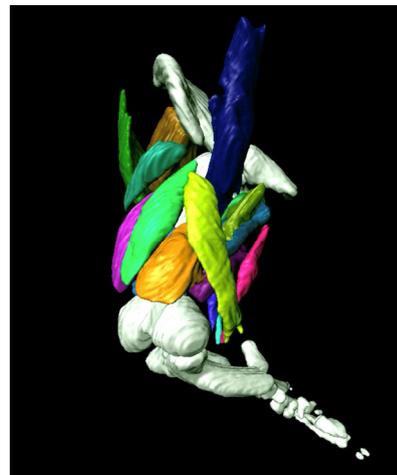


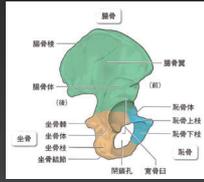
図 2 CS21 の胚子の下肢筋骨格系の三次元立体像



# Segmentation Bones

右下肢の骨（軟骨性骨原基）：33個

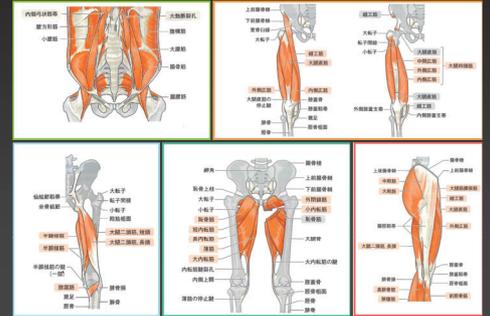
下股帯	寛骨	腸骨
		恥骨
		坐骨
大腿	大腿骨	大腿骨
		膝蓋骨
		脛骨
下腿	腓骨	腓骨
		距骨
		踵骨
足部	足根骨	舟状骨
		立方骨
		(内側・中間・外側)楔状骨
		(第一～五)中足骨
		(第一～五)跖骨
		(第二～五)跗骨
足趾	趾骨	(第一～五)中節骨
		(第一～五)末節骨



# Segmentation Muscles

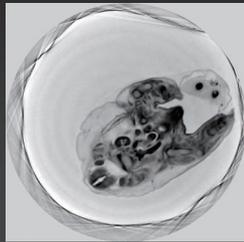
(羊土社「解剖学第1版」)

骨格筋	腸腰筋
	縫工筋
大腿四頭筋	大腿直筋
	内側広筋
	外側広筋
	中間広筋
ハムストリングス	大腿二頭筋
	半腱様筋
	半膜様筋
内転筋群	薄筋
	恥骨筋
	短内転筋
	長内転筋
	小内転筋
	大内転筋
	外閉鎖筋
大腿筋膜張筋	



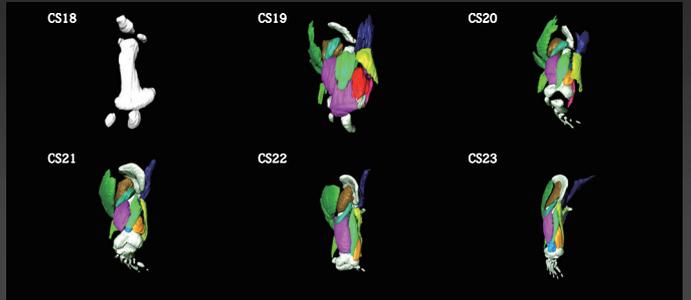
# Result Imaging

- 各発生段階でのヒト胚子標本の撮像に成功。
- CS17以前は軟骨性骨原基や個々の骨格筋の抽出は不可能。
- CS18で軟骨性骨原基が、CS19以降からは個々の筋を抽出可能。



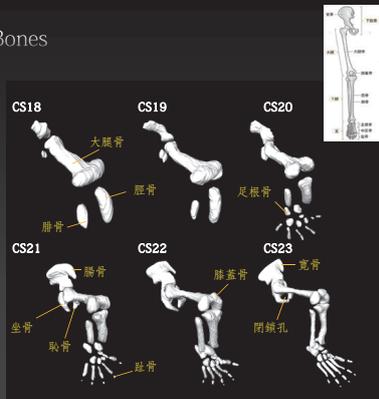
CS19のヒト胚子標本の撮像データ

# 3D models



# Bones

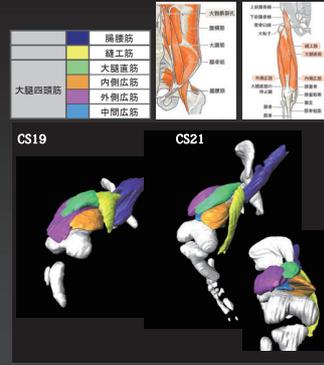
- CS17以前では骨原基は見えない。
- CS18から寛骨（腸骨・恥骨・坐骨）、大腿骨、脛骨、腓骨を抽出可能。
- CS20から足根骨を抽出可能。
- CS21から趾骨の抽出が可能となり、各骨で解剖学的特徴を形成し始める。
- CS23では腸骨・恥骨・坐骨の原基が癒合し、閉鎖孔を持つ寛骨原基となる。



# Muscles

## 腸腰筋・前区画の筋

- 腸腰筋はCS19から抽出可能。起始は大腰筋と腸骨筋で区別可能であったが、停止の区別は困難。
- 縫工筋はCS19から抽出可能。初期は扁平な形態だが次第に細長くなる。
- 大腿四頭筋はCS19で大腿直筋および内側広筋の抽出可能。CS21で外側広筋と中間広筋の抽出可能。



# Muscles

## 後区画・内側区画の筋

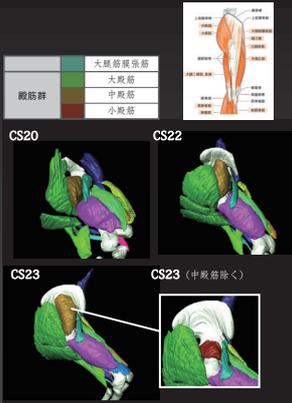
- 後区画
  - 停止部は全てCS19より区別可能だが、大腿二頭筋と半腱様筋の起始はCS21より区分でき、CS23に明確となった。
- 内側区画
  - 薄筋はCS19より抽出可能。
  - 恥骨筋・短内転筋・長内転筋・大内転筋はCS21より、小内転筋・外閉鎖筋はCS22より抽出可能。



# Muscles

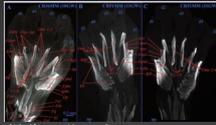
## 殿部・外側の筋

- 大殿筋・大腿筋膜張筋はCS19から抽出可能。
- 中殿筋・小殿筋はCS22以降より抽出可能。
- 大殿筋は初期より上部線維と下部線維で分かれていたが、途中で3区分できるようになり、その後再び2区分として観察できた。



## Discussion

- ヒト四肢筋骨格系の形成過程を理解するための、参照可能なデータベースがヒトにおいてはほとんど存在しない。
- 近年、Whole-mount免疫染色を用いたヒト胚子の四肢筋骨格系の可視化が報告されている。(R. Diogo et al. 2019)
  - これらは非常に精細な画像を取得可能であるが希少な標本を破壊する必要がある。
- 今回の位相差X線CTを用いた研究では標本を非破壊的に撮像可能であり、足の骨格筋 Kyoto Collectionを用いることでサンプル数を増やすことが可能。



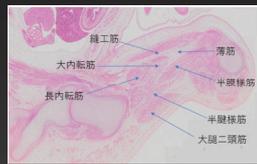
## 骨格筋の抽出

- CS19より見え始め、CS22より各筋の抽出が可能となった。
- 前区画・内側区画・殿筋群においては浅層の分離が早く、深層の筋が遅い傾向があった。
- 後区画では当てはまらなかったが、これは坐骨神経の影響が関与している可能性があると考えられる。

CS	19	20	21	22	23
膈横筋	○	○	○	○	○
縫工筋	○	○	○	○	○
大腿直筋	○	○	○	○	○
内側広筋	○	○	○	○	○
外側広筋			○	○	○
中間広筋			○	○	○
大腿二頭筋			○	○	○
半腱様筋			○	○	○
半膜様筋	○	○	○	○	○
薄筋	○	○	○	○	○
恥骨筋			○	○	○
短内転筋			○	○	○
長内転筋			○	○	○
小内転筋			○	○	○
大内転筋			○	○	○
外閉鎖筋			○	○	○
大腿筋膜張筋	○	○	○	○	○
大殿筋	○	○	○	○	○
中殿筋			○	○	○
小殿筋			○	○	○

## 組織切片との比較

- 組織切片と同様にCS18で軟骨性骨原基、CS19以降の骨格筋の分化の観察が可能。
- 各筋が分かれる時期も大部分は一致するが、内転筋群やハムストリングスの分かれ方はCT画像のみでの精査は現時点では困難。
- 今後はサンプル数を増やしつつ、組織切片との比較検討が必要。



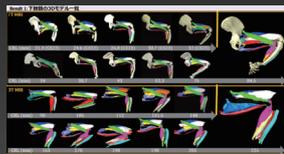
組織切片による各筋の形成時期の観察 (各時期: n=3)

## Limitation

- 本研究で使用した標本は10%ホルマリン固定標本のため、ホルマリンによる筋の萎縮や軟骨の溶解などの可能性がある。
- 位相差X線CT画像では、骨格筋周囲の神経や血管系も同程度の輝度であり、抽出が困難な部分があった。また、筋腹と腱の境界および腱の付着部の観察はCT画像のみでは困難であった。
  - 組織切片との比較を行い、各領域がCTではどのように撮像されるか検討。
  - 複数人の観測者による抽出を行い、誤差を検討。

## Plan

- サンプル数を増やしつつ、大腿部の骨格筋に続いて下腿部や上肢の作成を進め、胚子期の四肢形成過程の三次元アトラスを作成する。
- 当研究室でMRIを用いた胎児期のモデル作成も行っている。位相差X線CTに加え、MRIなどの多様なモダリティを横断的に用いることで胎生期に渡る四肢の形成メカニズムを解明したい。



胎生8~25週のヒト胎児下肢筋骨格系の3Dモデル



ご清聴ありがとうございました。

## X線位相イメージング法の微化石、 特に紡錘虫類の古生態研究への応用の可能性

一田 昌宏  
豊橋市自然史博物館

後期古生代（後期石炭紀～ペルム紀末）に繁栄し、古生代末に絶滅した  $\text{CaCO}_3$  殻を持つ大型底性有孔虫、紡錘虫類（“フズリナ”）は、熱帯～亜熱帯浅海環境における重要な示準化石であり、当時の二酸化炭素化学種のリザーバである生物礁の最も重要な炭酸塩生産者でもある。すなわち、紡錘虫類の古生態を明らかにすることは、当時の古環境や地球史上最大の古生代末の大量絶滅を理解する上で重要といえる。

化石の古生態学的研究において、岩石中から化石を単離（クリーニングによる剖出）し、その形状や死後にできる表面の傷などを三次元的に観察・記載することは、最も基本的な研究手法の一つである。しかしながら、主に  $\text{CaCO}_3$  よりなる石灰岩中に含まれ、 $\text{CaCO}_3$  殻を持つ紡錘虫類は単離も難しく、その研究は岩石薄片を用いた 2 次元データを用いており、ごく一部の研究（例えば、Lepping et al. 2005 など）を除き、殻の三次元的な検討は不可能であった。すなわち、これまでの薄片を基にした研究では、一個体における殻成長の変化、現生の有孔虫にも観察される殻の傷病痕との比較、殻の磨滅度の評価、岩石内での殻配列の検討など、クリーニング可能な化石で一般的に行われている古生態学的検討が制限されている状況であった。

大型動物化石においては多くの X 線 CT を用いた研究がなされてきたが、これらの研究は頁岩中に含まれる  $\text{CaCO}_3$  の殻を持つ腕足動物（椎野ほか, 2010）や砂岩に含まれる恐竜の頭骨形状の観察など、化石自体と周辺の岩石の密度差が大きく、観察対象自体も比較的大きなもの（数 mm～数十 cm）であった。一方で、 $\text{CaCO}_3$  の殻を持ち石灰岩に含まれる微化石である紡錘虫類は、殻と周囲の岩石部にほぼ密度差がないこと、殻も数～数十  $\mu\text{m}$  オーダーの構造の集合体であることから、空間分解能の問題等で X 線 CT での実用的な観察は行われてこなかった。しかしながら、 $\text{CaCO}_3$  殻が  $\text{SiO}_2$  に交代されるなどの特異な保存状態の紡錘虫類について、X 線位相イメージング法により、石灰岩中に含まれたままの状態での殻の内部構造観察が実用的なレベルで可能になることが近年報告されてきた（例えば、米山他, 2012, Yoneyama et al. 2018 など）。

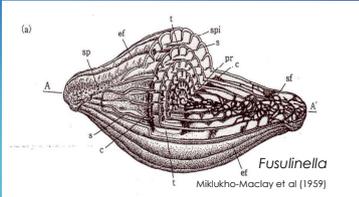
これらの成果により、 $\text{SiO}_2$  に交代された紡錘虫類の殻のみならず、不純物（生物起源の炭質物やケイ酸塩質砂など）を多く含む石灰岩中の  $\text{CaCO}_3$  でできた紡錘虫類殻を X 線位相イメージング法によって観察・検討できる可能性も高いと考えられる。そこで、2020 年 6 月、不純物を多く含む石灰岩に含まれる異形巻き紡錘虫類 *Nipponitella auriculla* Hanzawa を試料とし、九州シンクロトロン光研究センターの BL07 にて位相イメージング法により測定を行ったが、本実験においては紡錘虫殻と周辺岩石の密度差が想定以上に小さかった等の原因により、実用的なデータの取得に至ってはいない。

一方で、同時に実施した蟻酸クリーニングにより石灰岩から単離した  $\text{SiO}_2$  に交代された紡錘虫類 3 種（*Hidaella kameii*, *Beedeina lanceolata*, *Pseudostaffella sphaeroidea*）のマイクロ CT による測定では、蟻酸処理時の発泡による殻のダメージも観察されたが、これまで通常のマイクロ CT で観察することのできなかった殻の微細構造（例えば、*diaphanotheca* など）等が観察可能な高精度な殻構造の三次元データを取得することに成功した。

今後、Yoneyama et al. (2018) と同様な殻と周辺岩石のより密度差の大きな試料を位相イメージング法で測定し、マイクロ CT に近い精度かつクリーニング時の破壊がない状態の紡錘虫類殻の三次元データを取得することで、紡錘虫類の古生態の理解が飛躍的に進むことが期待される。

- ◆ 原生生物類
- ◆ 6科166属約5000種

- ◆ Late Paleozoic (Mississippian - Late Permian, 320 Ma - 251 Ma) の約1億年間生存
- ◆ 地球上初めて出現した大型有孔虫類
- ◆ それまでの有孔虫とは違い極端な大型化と殻壁構造の複雑化・多様化をした。



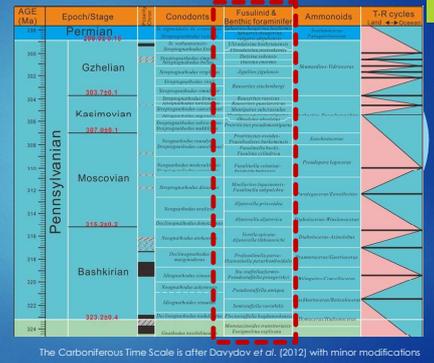
一田 昌宏  
豊橋市自然史博物館

## X線位相イメージング法の微化石、特に紡錘虫類の古生態研究への応用の可能性

## 現在の紡錘虫類の古生物学的価値

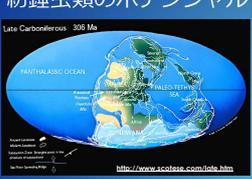
- 6科166属約5000種
- 後期古生代 (Mississippian - Late Permian, 320 Ma - 251 Ma) の地層から多産し、形態変化も速いことから、温帯～熱帯浅海域の最も良い示準化石
- 示準化石としての最上級の解像度を持つ (最小30~40万年程度)

示準化石としての価値

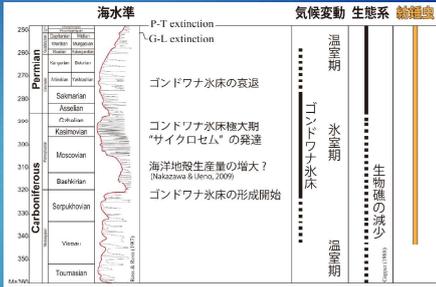


The Carboniferous Time Scale is after Davydov et al. (2012) with minor modifications

## 古環境指標としての紡錘虫類のポテンシャル



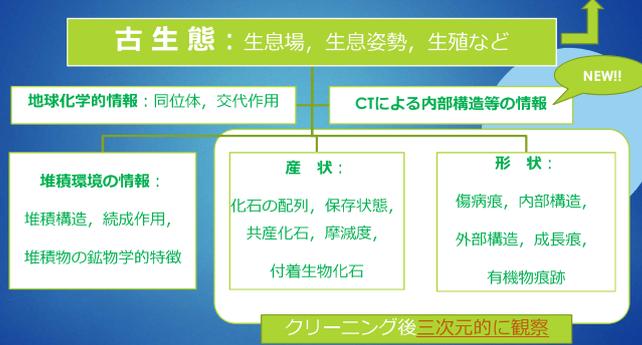
◎ 当時の二酸化炭素化学種のリザーバである生物礁の最も重要な炭酸塩生産者



## ◎ 紡錘虫類の古生態

≡ 当時の古環境や古生代末の大量絶滅を理解するカギ

## 古生態学研究の手法



## 紡錘虫 1 個体を観察する難しさ



▶ 岩石薄片による観察：1断面(2D)のみ観察可能で他の部分は薄片作製時の研磨にて消失



▶ 酸処理による観察：SiO<sub>2</sub>に交代されたサンプルの表面のみの3D観察可能、1個体の内部構造観察は不可能

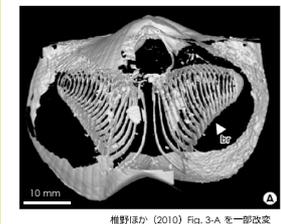
## 紡錘虫類の古生態



## X線CTを用いた化石研究 (化石と化石以外の密度差大)

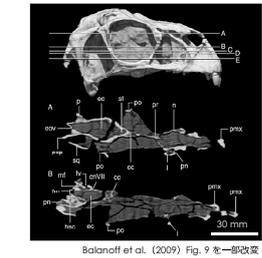
### ▶ 腕足動物の腕骨の復元

- ▶ 黄鉄鉱化した殻及び内部の腕骨
- ▶ 化石以外は泥



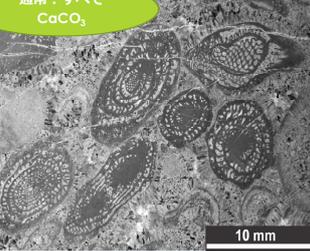
種別未詳 (2010) Fig. 3-A を一部改良

### ▶ Incisivosaurus gauthieriの頭骨の可視化と脳容量

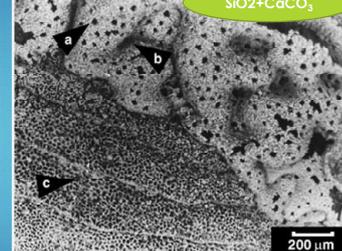


Balanoff et al. (2009) Fig. 9 を一部改良

## なぜ紡錘虫類にCTは用いられなかったのか



▶ 殻化石と母岩 (石灰岩) の組成が同じ (CaCO<sub>3</sub>) = 密度差がほとんど存在しない



▶ 非常にレアなSiO<sub>2</sub>に交代されたサンプル  
▶ 従来の薄片法では使えない  
▶ 観察したい内部構造の小ささ (数~数十μm)

# X線位相イメージングによる 紡錘虫研究の革命

9

Yoneyama et al. 2018

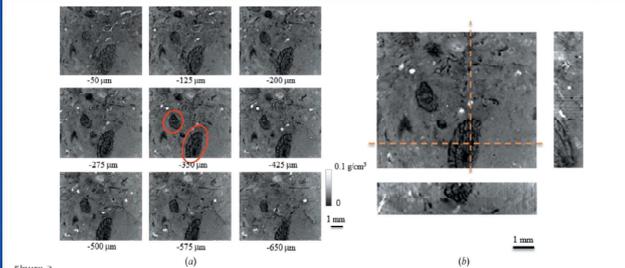


Figure 2 (a) Sectional images and (b) expansion images of flat slabs of limestone from the Carnic Alps in the Carboniferous period. Red circles indicate two kinds of fusulinids: *Daizuna* sp. (left) and *Trilicites* cf. *immarubilis* (right).

X線位相イメージングによる紡錘虫研究の革命

# X線位相イメージングによる 紡錘虫研究の革命

10

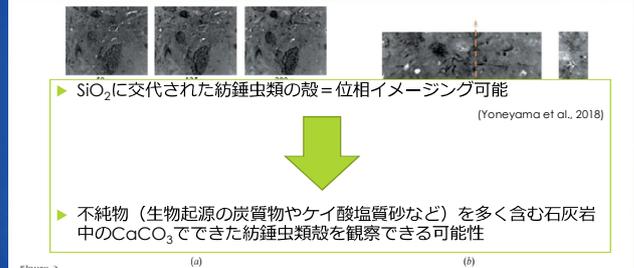
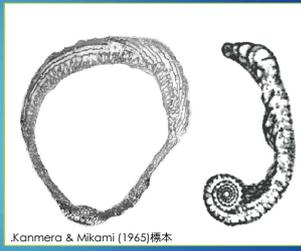


Figure 2 (a) Sectional images and (b) expansion images of flat slabs of limestone from the Carnic Alps in the Carboniferous period. Red circles indicate two kinds of fusulinids: *Daizuna* sp. (left) and *Trilicites* cf. *immarubilis* (right).

X線位相イメージングによる紡錘虫研究の革命

# 佐賀LS (BL07) でのX線位相イメージング 異常巻き紡錘虫 *Nipponitella auriculla*

11



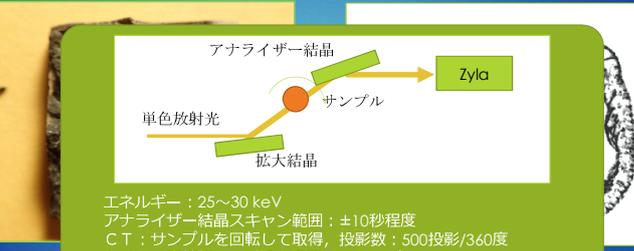
母岩の約30% (重量) がSiO<sub>2</sub>及び有機物起源と思われる炭素で構成される“不純な”石灰岩 = 大陸縁辺部に普遍的に存在

堆積作用を受けやすい異常な形状をした殻構造 = 古生態学的情報が得やすい

X線位相イメージングによる紡錘虫研究の革命

# 佐賀LS (BL07) でのX線位相イメージング 異常巻き紡錘虫 *Nipponitella auriculla*

12



母岩の約30% (重量) がSiO<sub>2</sub>及び有機物起源と思われる炭素で構成される“不純な”石灰岩 = 大陸縁辺部に普遍的に存在

X線位相イメージングによる紡錘虫研究の革命

# 佐賀LS (BL07) でのX線位相イメージング 異常巻き紡錘虫 *Nipponitella auriculla*

13



## 実用的なデータの取得に至らず

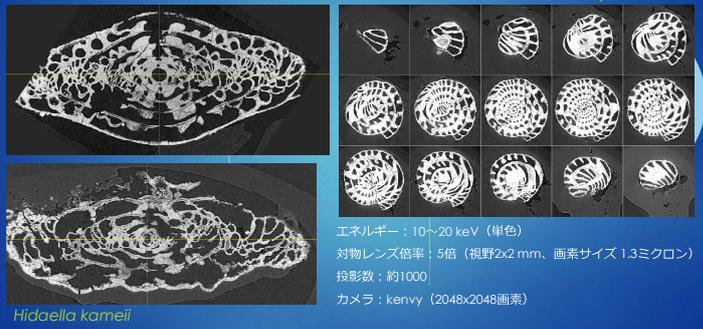
- 紡錘虫殻と周辺岩石の密度差が想定以上に小さかった等が原因
- より密度差の大きいサンプルが必要

母岩の約30% (重量) がSiO<sub>2</sub>及び有機物起源と思われる炭素で構成される“不純な”石灰岩 = 大陸縁辺部に普遍的に存在

X線位相イメージングによる紡錘虫研究の革命

# 放射光マイクロCTの結果

14



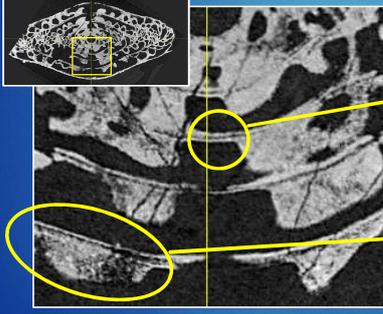
エネルギー：10~20 keV (単色)  
対物レンズ倍率：5倍 (視野2x2 mm、画素サイズ 1.3ミクロン)  
投影数：約1000  
カメラ：kenvy (2048x2048画素)

X線位相イメージングによる紡錘虫研究の革命

# 放射光マイクロCTの有用性

15

通常の薄片法と同等の観察が可能



- これまで通常のマイクロCTで観察することのできなかつた殻の微細構造が観察可能
- Spirotheca**  
Spirothecaにより紡錘虫類の系統関係は構築可能
    - Diaphanotheca**：厚さ約数~10 μmの透明層、時代とともに形状が大きく変化
    - Chomata**：殻補強用の二次的構造。

# 放射光マイクロCTの有用性

16

通常の薄片法と同等の観察が可能



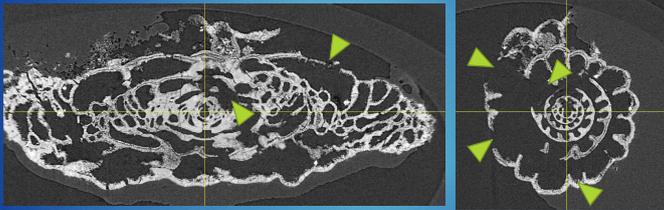
- 1個体のSpirothecaやChomataの構造変化が三次元的に観察可能になると、系統関係の再検討、共生藻類の有無、殻成長様式の解明
- 古生態情報**
- 殻構造の系統関係 (緒方 2011)
- (a) シェワグリン型
  - (b) アズリネラ型
  - (c) トリティシーテス型
  - (d) テクタム
  - (e) プロフズリネラ型

X線位相イメージングによる紡錘虫研究の革命

# 放射光マイクロCT用サンプル処理の問題点

17

酸処理時の発砲による殻の破壊? ⇒死後破壊などの古生態情報としては問題あり



**堆積時の状態のまま観察**  
⇒重要な古生態情報

- ▶ 非発泡状態での溶出処理
- ▶ 非溶出状態での位相イメージング

00201180 放射光の中心から放射線が放射状に広がるため、放射線が当たった部分の物質は溶解し、放射線が当たった部分の物質は残ります。

# 今後の展望

18

## ◎紡錘虫類古生態の解明

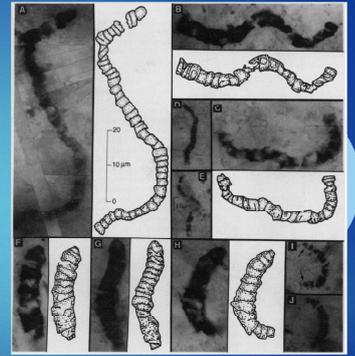
- ◆ より密度差の大きいサンプルとSiO<sub>2</sub>に交代されたサンプルの探索
- ◆ 位相イメージング用サンプル作製方法の確立

## ◎初期生命(シアノバクテリア)化石の構造観察による生命史の解明

- ◆ 位相イメージング用サンプル作製方法の確立

## ◎眼化石の3D観察による眼の初期進化

- ◆ 位相イメージング用サンプル作製方法の確立



- ▶ オーストラリア・ビルバラ地域産バクテリア化石(約38.5億年前)
- ▶ 化石部は炭素, 周辺岩石部はSiO<sub>2</sub>で構成 (Schopf, 1993)

00201180 放射光の中心から放射線が放射状に広がるため、放射線が当たった部分の物質は溶解し、放射線が当たった部分の物質は残ります。

19

ありがとうございました。

九州シンクロトロン光研究センター及び同センターの米山明男博士のご協力なしに、本研究は行うことはできませんでした。この場を借りて、御礼申し上げます。

00201180 放射光の中心から放射線が放射状に広がるため、放射線が当たった部分の物質は溶解し、放射線が当たった部分の物質は残ります。

# 位相コントラスト X 線イメージングによる蓄電・発電デバイスのオペランド計測

高松大郊

(株)日立製作所 研究開発グループ 基礎研究センタ

低炭素社会実現に向けて蓄電池や燃料電池などのエネルギー変換デバイスの高エネルギー密度化・高出力化・長寿命化が求められている。そのためには、デバイス内で起こっている反応を十分理解して対策を立てる必要があるが、動作中のデバイス内部の反応不均一性・動的挙動の詳細は未解明なことが多い。放射光は、高強度かつ高い透過能、光学系や検出器の工夫によるミリ～ナノ程度までの空間分解能、エネルギーが可変による多くの解析手法、等の特徴から、動作中の電気化学デバイス内部で起こっている現象の非破壊その場評価に非常に有効である。これまでに我々は、放射光 X 線吸収分光/回折によるリチウムイオン電池 (LIB) の充放電中その場計測技術を活用し、活物質粒子・電極ナノ界面・合剤電極内といった空間的・時間的な階層構造での反応理解を進めてきた。しかし、電解液内の不均一性・動的挙動に関しては、適切な計測法がなかったため、詳細がブラックボックスであった。我々は、軽元素の可視化に有効な位相コントラスト X 線イメージング法を LIB に適用することで、充放電中の電解液内でイオン濃度分布が発生している現場（過渡状態）を、位相シフトとしてその場可視化することに成功した[1]。特に連続高出力動作時には、イオン濃度分布（濃度分極）が顕在化し、電池容量を規定する可逆的抵抗上昇の要因になることを実証した。

近年、自動車からの CO<sub>2</sub> 排出規制のため、ハイブリッド車 (HEV)、アイドリングストップシステム (ISS) 車、電気自動車 (EV)、燃料電池車 (FCV) などが市場投入され、蓄電・発電デバイス需要が更に高まっている。なかでも、信号待ちや渋滞停車時にエンジンを停止させる ISS 車は、HEV や EV に比べて大幅に低コストで低燃費を実現できるため急速に普及している。この ISS 車に搭載される鉛電池 (LAB) には、高頻度な高速充放電サイクルに対する高い耐久性が要求される。LAB では、充電で電極から放出された高濃度の硫酸イオンが自重によりセルの下部に沈降し、セル内電解液の上部と下部で硫酸イオン濃度が異なる“成層化”現象が発生する。この成層化は電池寿命に直結するため、ISS 車用 LAB では成層化をいかに抑制するかが鍵になる。我々は、この成層化挙動の可視化に位相コントラスト X 線イメージング法が有効と考え、充放電中の LAB における硫酸イオンの動的挙動の可視化に取り組み、図 1 に示したように充放電中の LAB 電解液内で成層化（上下での電解液密度差）が起こる現場を二次元像としてリアルタイムで可視化することに成功した[2]。

本発表では、位相コントラスト X 線イメージング法を蓄電デバイスに適用した事例として、充放電中の LAB 電解液内の硫酸イオンの動的挙動をその場可視化した結果を紹介する。また、発電デバイスへの適用例として、IoT センサ電源への適用が期待される室温付近の微小な温度差で発電する熱化学電池の動作中オペランド計測結果についても紹介する予定である。

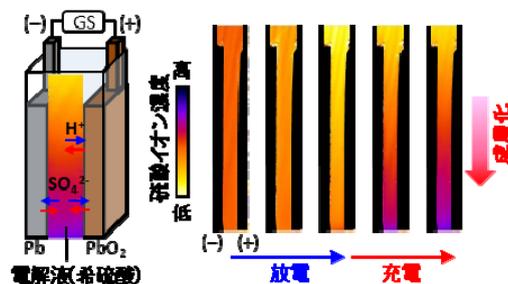


図 1. 充放電中の LAB 電解液内の成層化挙動の二次元像

[1] D. Takamatsu, A. Yoneyama, Y. Asari, and T. Hirano, *J. Am. Chem. Soc.*, 140 (5), 1608 (2018).

[2] D. Takamatsu, T. Hirano, A. Yoneyama, T. Kimura, M. Harada, M. Terada, and T. Okoshi, *Chem. Commun.*, 56, 9553 (2020).

2020/10/8 PF研究会  
「X線干渉計と縦型ウィグラーを用いた超高感度画像計測の現状と将来展望」

## 位相コントラストX線イメージングによる 蓄電・発電デバイスのオランダ計測

株式会社 日立製作所  
研究開発グループ 基礎研究センター  
高松 大郊

© Hitachi, Ltd. 2020. All rights reserved.

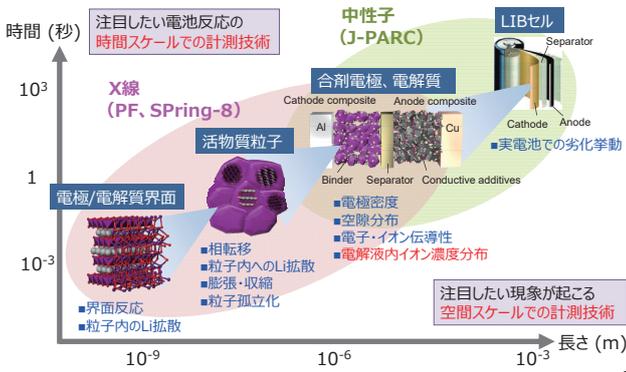
© Hitachi, Ltd. 2020. All rights reserved. 1

## Contents

1. 緒言：位相イメージングの電気化学デバイスへの適用
2. 蓄電デバイスの例：鉛電池の成層化挙動の可視化
3. 発電デバイスの例：熱化学電池の熱・イオン分布の可視化
4. まとめ

### 1-1 電気化学デバイス：リチウムイオン電池(LIB)

LIBの時間的（ミリ秒～年）、空間的（ナノ～ミリメートル）な階層構造



© Hitachi, Ltd. 2020. All rights reserved. 2

### 1-2 放射光を用いた動作中LIBのその場解析

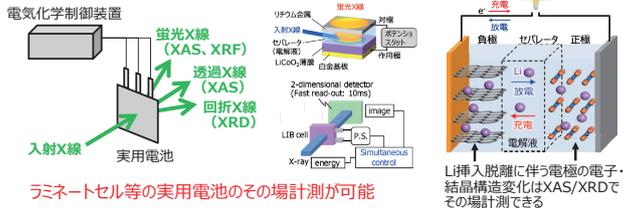
様々な空間・時間スケールでの電池反応挙動のその場解析に好適

#### 放射光の特徴

- 高輝度かつ透過力が強い
- 大気中で測定できる
- エネルギーが可変で、解析手法としてバリエーションが広い
- マルチスケール計測、異なる技術の同時相補計測ができる

#### LIBその場計測法

- 全反射蛍光XAS
- 時分割XRD/XAS
- 位置分解XAS/XRD



XAS: X-ray Absorption Spectroscopy, XRF: X-ray Fluorescence, XRD: X-ray Diffraction  
LIB: Lithium Ion Battery  
© Hitachi, Ltd. 2020. All rights reserved. 3

### 1-3 電解液内の動的挙動を可視化するために

軽元素領域の密度変化に高感度なX線位相イメージングを用いて、電解液内のイオン濃度分布の動的挙動をその場可視化する

電解液は軽元素からなり周期性がないため、XAS・XRDによるその場計測が困難  
→電解液内の非平衡・不均一性といった動的挙動はブラックボックス

#### 位相コントラストX線イメージング

複素屈折率:  $n = 1 - \delta + i\beta$   
 $\delta, \beta$ は、ともに密度に比例

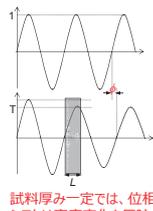
吸収コントラスト法 ( $\beta$ を利用)  
試料による振幅の減衰 $T$ を画像化

位相コントラスト法 ( $\delta$ を利用)  
試料による位相シフト $\phi$ を画像化

軽元素領域: 位相( $\delta$ ) >> 吸収( $\beta$ )  
(位相法は吸収法よりも、1,000倍以上高感度)

$$-\ln(\text{透過率}) = \frac{2\pi\beta}{\lambda} L$$

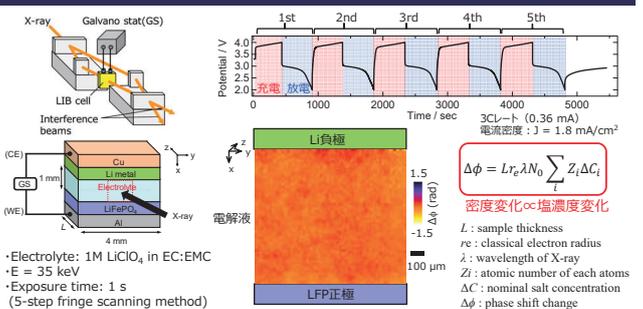
$$\text{位相}(\phi) = \frac{2\pi\delta}{\lambda} L$$



© Hitachi, Ltd. 2020. All rights reserved. 4

### 1-4 LIB電解液のイオン濃度可視化への適用例

軽元素からなるLIB電解液内のイオン濃度分布を密度変化として高感度検出  
■ LIB充放電中の塩濃度分布の動的挙動をリアルタイムで可視化できる

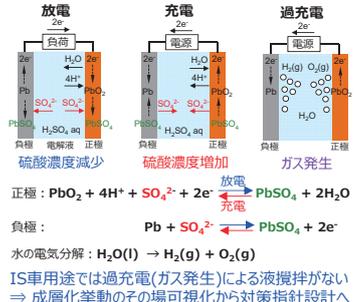


© Hitachi, Ltd. 2020. All rights reserved. 5

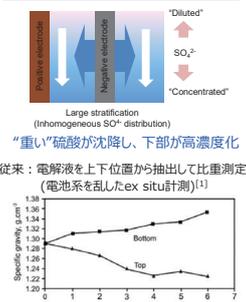
### 2-1 車載用鉛電池の課題：成層化

アイドリングストップ(IS)用途には高頻度高速充放電への高い耐久性が必要  
■ 電解液上部と下部で硫酸イオン濃度が異なる“成層化”は電池寿命に直結

#### 鉛電池(Lead Acid Battery)の反応

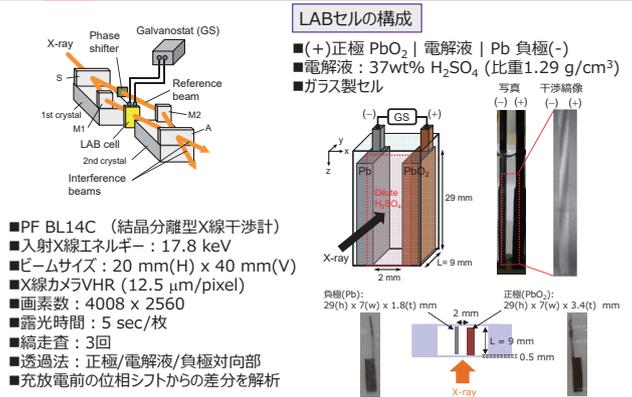


#### 上下の硫酸濃度差：成層化



[1] Encyclopedia of Electrochemical power sources 4, 677 (2009). © Hitachi, Ltd. 2020. All rights reserved. 6

### 2-2 実験方法

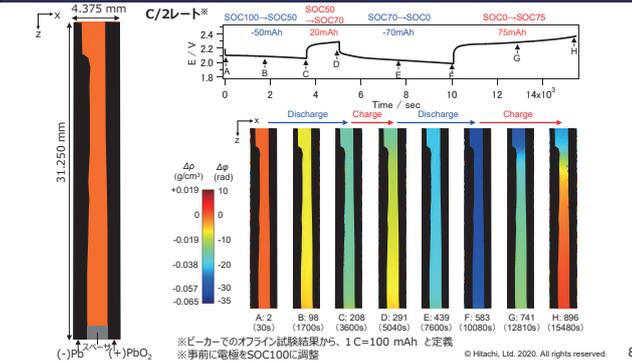


© Hitachi, Ltd. 2020. All rights reserved. 7

## 2-3 LAB : 低レート充放電 (Deep Cycle)

HITACHI Inspire the Next

- 放電で電解液密度が徐々に減少し、充電で電解液密度が増加
- 充放電後の電解液では上下方向で密度差が発生 ⇒ 成層化を可視化

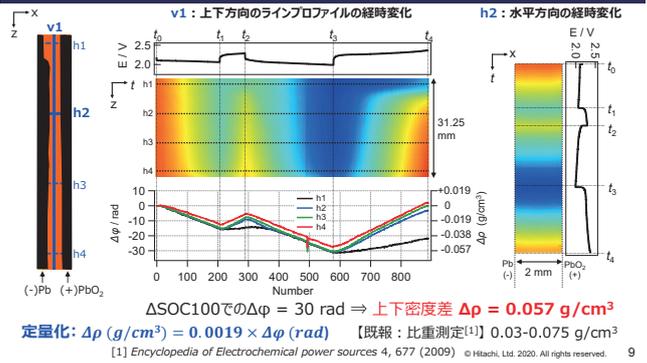


© Hitachi, Ltd. 2020. All rights reserved. 8

## 2-4 LAB : 低レート充放電 (上下、水平方向)

HITACHI Inspire the Next

- 位相シフトから算出した上下密度差は、比重測定結果と一致 ⇒ 定量化可能
- 低レートでは、水平方向のイオン濃度分布は観察されない

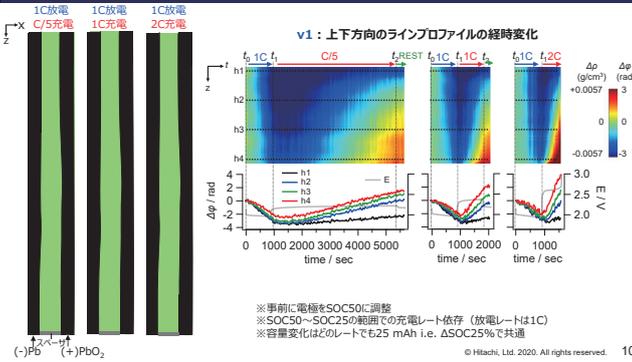


© Hitachi, Ltd. 2020. All rights reserved. 9

## 2-5 LAB : 充電レート依存 (上下方向)

HITACHI Inspire the Next

- 成層化は放電中よりも充電中の方が顕著
- 同じ充電容量でも、充電レートが高いほど成層化の度合いが大きい

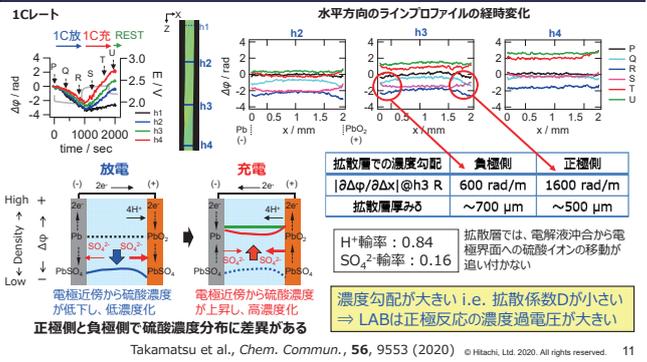


© Hitachi, Ltd. 2020. All rights reserved. 10

## 2-6 LAB : 高レート充放電 (水平方向)

HITACHI Inspire the Next

- 高レート充放電では、水平方向でのイオン濃度分布が顕著
- 正極側と負極側で濃度勾配が異なる ⇒ 局所的な濃度分布を可視化できる

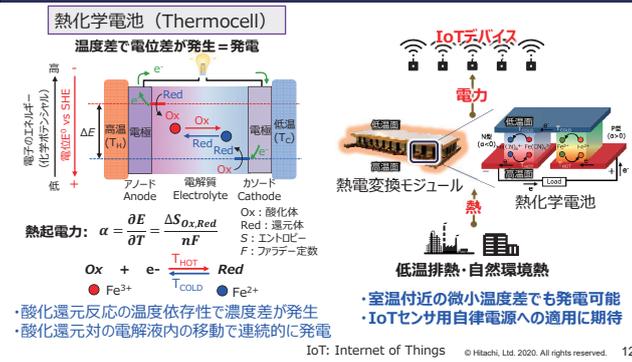


Takamatsu et al., Chem. Commun., 56, 9553 (2020) © Hitachi, Ltd. 2020. All rights reserved. 11

## 3-1 熱発電デバイス (温度差で発電)

HITACHI Inspire the Next

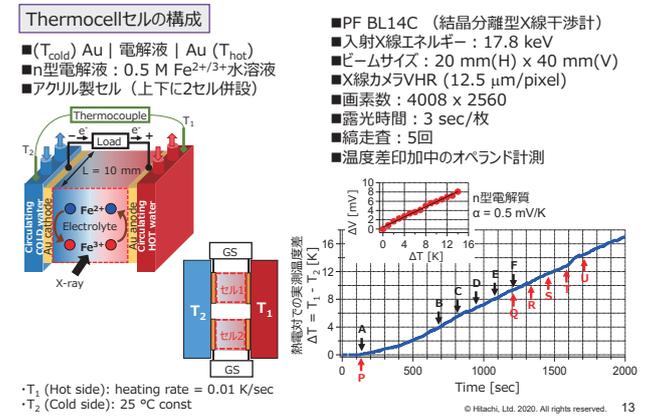
- 長所: 熱起電力が大、薄膜並列化・大面積化が可能、低コスト、軽量、柔軟
- 課題: 低出力、発電効率が低い (イオン輸送律速)



© Hitachi, Ltd. 2020. All rights reserved. 12

## 3-2 実験方法

HITACHI Inspire the Next

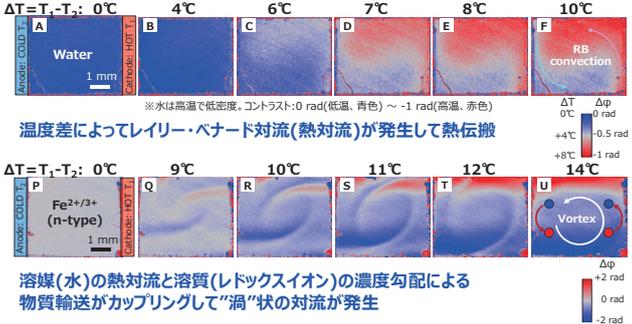


© Hitachi, Ltd. 2020. All rights reserved. 13

## 3-3 熱化学電池の熱・イオン可視化結果

HITACHI Inspire the Next

- 熱化学電池の電解液内部で生じている温度勾配とイオン濃度勾配がカップリングした熱・イオン輸送ダイナミクスを、リアルタイムで可視化することに成功



Takamatsu et al., MRS Fall Meeting, EN05.06.10, Boston, USA (2019) © Hitachi, Ltd. 2020. All rights reserved. 14

## 4-1 まとめ

HITACHI Inspire the Next

- 位相コントラストX線イメージングによる電気化学デバイス内部の非平衡・動的挙動の“その場”計測 ⇒ 反応機構の理解 ⇒ 特性向上の設計指針

- ① 鉛蓄電池の電解液内部の成層化現象のその場可視化
  - ② 熱化学電池の電解液内部の熱&イオン濃度分布のその場可視化
- デバイス動作中の電解液内の動的挙動をリアルタイム可視化可能
  - 位相シフト∝密度変化 ⇒ イオン濃度変化への定量化が可能
  - 定常状態での位相シフト量から、拡散係数の定算算出も可能
  - 温度分布とイオン濃度分布が相関した非平衡挙動を可視化可能
  - 測定対象に原理的な制限がなく、どんな電極・電解液にも適用可能

検出感度が高く、時間・空間分解能も高いX線位相イメージングは、各種電気化学デバイスのオペランド計測に適用できる有力な手法

共同研究者

米山 明男 (日立製作所、佐賀LS)  
平野 辰己 (日立製作所、京都大学)

鉛電池の成層化可視化  
木村 隆之 (日立化成)  
原田 素子 (日立製作所)  
寺田 正幸 (日立化成)  
大越 哲郎 (日立化成)

熱化学電池の熱・イオン可視化  
數内 真 (日立製作所)  
早川 純 (日立製作所)

**HITACHI**  
Inspire the Next

# 温度制御下での位相コントラスト X 線 CT 測定 低温条件下におけるガスハイドレートの三次元観察

竹谷 敏

産業技術総合研究所・物質計測標準研究部門

軽元素は、最近のエネルギー材料や環境材料に不可欠の構成元素となっており、マイクロ～マクロスケールでの挙動の解析の重要性が高まっている。材料中の軽元素の分布や挙動の直接観察により、材料特性の解明や新たな材料開発にブレークスルーをもたらすことが期待できることから、X 線 CT などその場観察手法が期待されている。水は、最も身近な軽元素で構成される物質の一つであり、X 線 CT における X 線吸収（および CT 値）の基準の物質として用いられている。一方、水は温度変化により、20℃で 0.9982 g/cm<sup>3</sup>、3.984 °C で 1.0000 g/cm<sup>3</sup> と密度変化し、水が凍結し氷になると密度（0 °C のとき 0.9167 g/cm<sup>3</sup>）は液体の水よりも小さくなる。温度変化にともなう水の相変化や密度変化は、身近な現象であるにも関わらず、X 線 CT による現象の観察はほとんど行われてこなかった。これは、一般に用いられている吸収コントラスト型 X 線 CT 測定では、温度変化にともなう水の密度変化を検出するだけの感度は得られず、水と氷の識別も容易ではないことが要因の一つである。

X 線イメージング技術として普及している「吸収コントラスト法」は X 線が物質を透過する際に生じる X 線透過率の差を検出し、「位相コントラスト法」は X 線が物質を透過する際に生じる位相シフトを利用している。位相コントラスト法は、吸収コントラスト法よりも軽元素で構成される低密度な物質に対し、特に高エネルギー領域の X 線を利用することにより、高い密度分解能での測定が可能である。従って、位相コントラスト X 線 CT 測定により、材料やデバイスがその機能を発現する温度環境下での可視化技術の開発は重要である。我々は、位相コントラスト法の中でも特に密度変化に対する感度が高い「X 線干渉法」と、密度に対するダイナミックレンジの広い「屈折コントラスト(DED)法」を用い、位相コントラスト X 線 CT 法による温度制御下での軽元素材料の三次元可視化に取り組んでいる。位相コントラスト X 線 CT 法は試料の温度変化などに対して敏感であり、特殊環境下での測定への応用は困難であった。これまでに、専用の温調装置の開発により、温度-80℃～+95℃までの条件下における位相コントラスト X 線 CT 測定が可能になっている。

今回の発表では、氷と同様に水分子の水素結合ネットワーク中にメタンや二酸化炭素などのガス分子を取り込むガスハイドレートに関し、これまでの研究成果について紹介する。ガスハイドレートは取り込む分子の種類により異なるものの、一般に密度は 0.9～1.1g/cm<sup>3</sup> 程度で、水や氷と同程度である。このため、ガスハイドレートと水や氷とを識別することは、吸収コントラスト X 線 CT では困難であった。位相コントラスト X 線 CT 測定は、35 keV の単色の放射光を利用することにより、非造影で水や氷と共存するガスハイドレートを可視化することの可能な唯一の非破壊観察手法となっている。また最近の研究では、高压容器内でのガスハイドレートの可視化も可能であることが示され、今後の応用利用が期待されている。

本研究の結果は、高エネルギー加速器研究機構、日立製作所、北里大学、九州シンクロトロン光研究センター等との共同の成果であり、高エネルギー加速器研究機構放射光施設の課題（課題番号 2016G666 他）のもと実施してきた。

# 温度制御下での位相コントラストX線CT測定 低温条件下におけるガスハイドレートの三次元観察

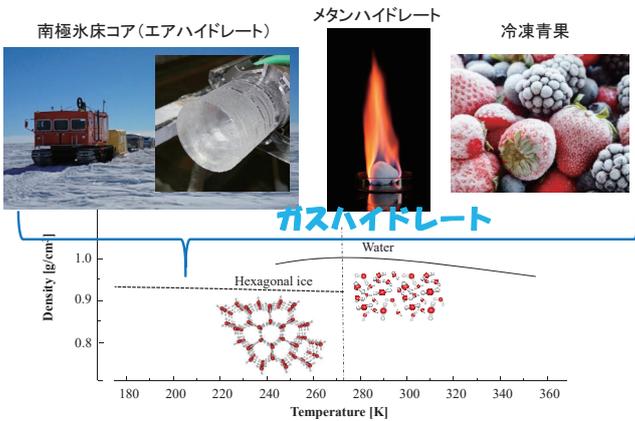
竹谷敏 (産総研)

米山 明男 (九州シンクロトロン光研究センター)  
兵藤 一行 (高エネルギー加速器研究機構)  
武田 徹 (元 北里大学)

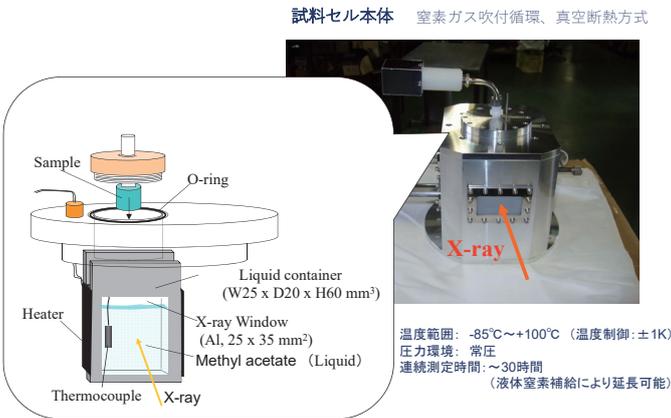
### 謝辞

位相コントラストX線CT測定は、高エネルギー加速器研究機構放射光施設のS型課題 (2009S2-006)、G型課題 (2018G666他) のもとで実施した。

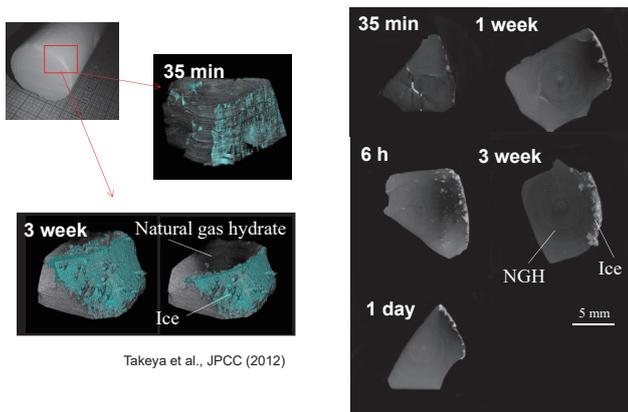
## 測定可能な温度領域



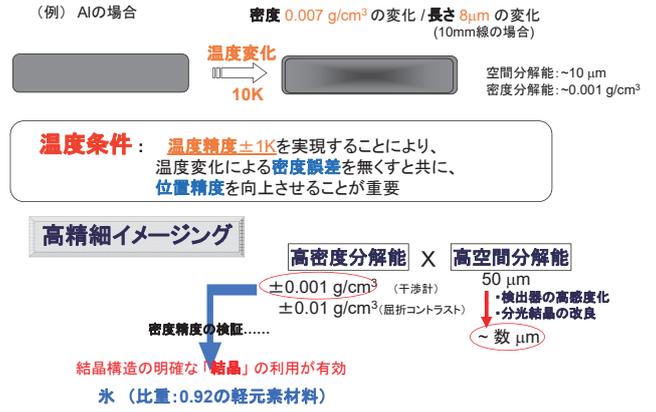
## X線CT測定用温度制御装置



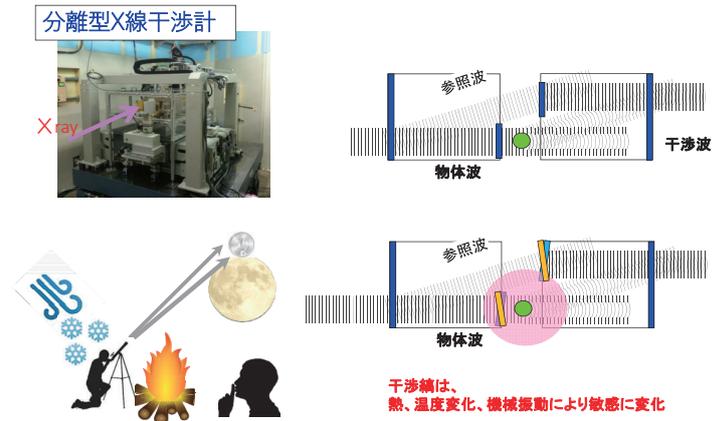
## 測定例 (1) メタンハイドレート



## 温度制御の重要性

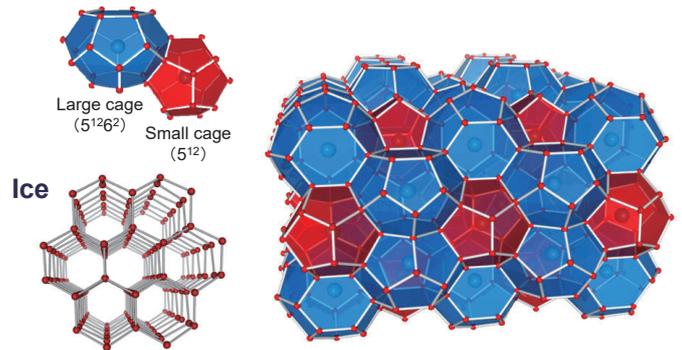


## 温度制御測定

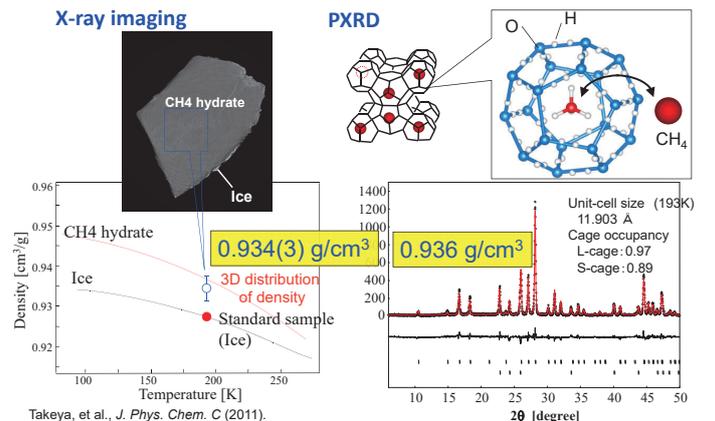


## ガスハイドレートとは

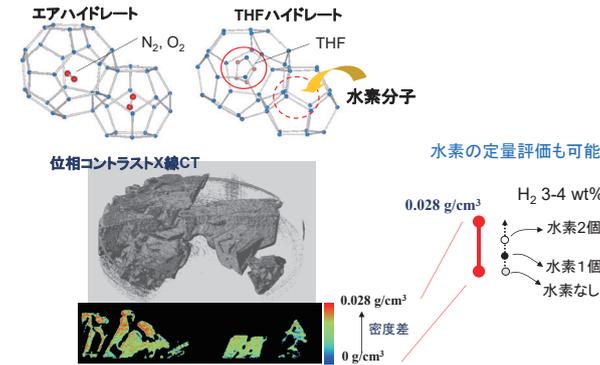
包摂水和化合物で、結晶中に体積の100倍以上のガス (メタンや二酸化炭素) 分子を包摂している。氷状の結晶で、吸収コントラストX線イメージング法では、氷との識別は困難である。



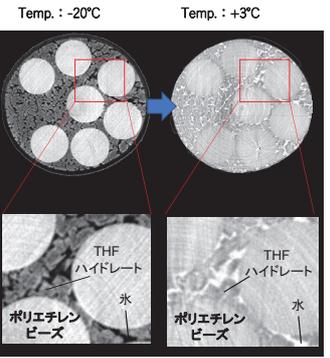
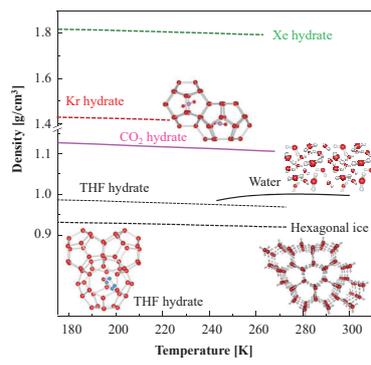
## 測定例 (1) メタンハイドレート



THFハイドレートによる水素貯蔵効率



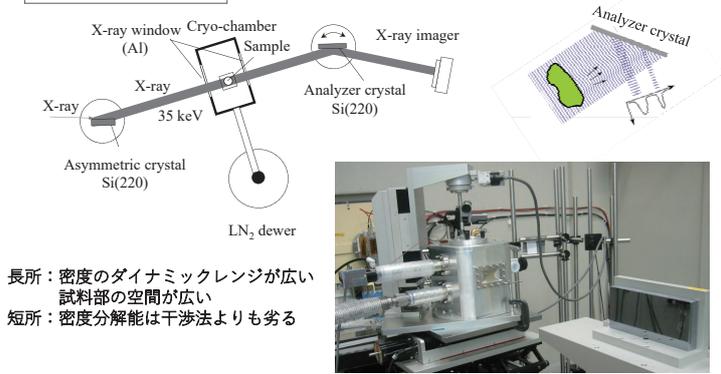
密度の温度依存性



Takeya, et al., Can. J. Chem. C (2015).

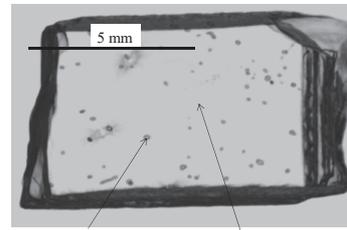
温度制御測定

屈折コントラスト法



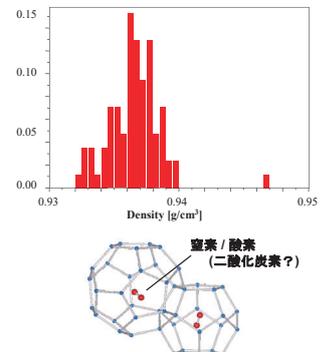
測定例 (3) エアハイドレート

水コアの位相コントラストX線CT像



Takeya et al, J. Synchro. Rad. (2012)

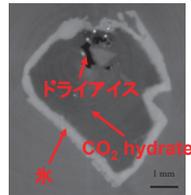
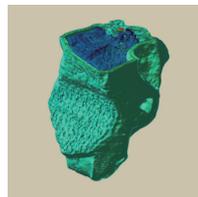
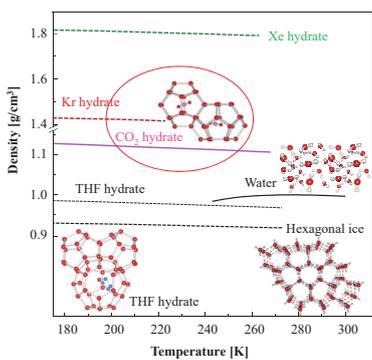
エアハイドレート粒子の密度分布



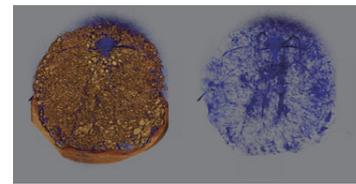
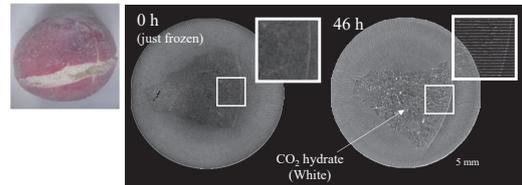
測定例 (4) 二酸化炭素ハイドレート

測定例 (4) 二酸化炭素ハイドレート (冷凍青果物)  
CO<sub>2</sub>高圧処理凍結したブドウ(巨砲)

密度の温度依存性



Takeya et al, J. Synchro. Rad. (2012)



Takeya, et al., Food Chem. (2016).

まとめ

- 各種結晶を精密に評価するうえで、温度制御した環境下での可視化実験は、物質内部を高精度に密度評価するために重要である。
- 低温環境下での、氷と共存するガスハイドレートの可視化が可能となっている。
- -80 ~ +100°C (温度制御: ±1K) でのX線位相イメージング技術が確立されている。

今後の展開

- 計測時間の短縮により、統計データの取得や、反応状態下での変化の様子を三次元観察を可能にし、より信頼性の高いデータ取得を目指す。

## X線サーモグラフィーによる熱伝搬可視化の試み

米山 明男

九州シンクロトロン光研究センター

持続可能な低炭素社会を実現するためには、熱の効率的な制御（サーマルエマネージメント）が不可欠である。しかし、従来の赤外線を利用したサーモグラフィーは物体表面の測温に限定されるため、内部の温度変化やその伝搬を可視化できる新しいサーモグラフィーが切望されている。そこで、X線の高い透過能と位相コントラスト X線イメージング法の高い感度特性を利用し、熱膨張に伴う物体の密度変化から内部の温度変化を非破壊かつ三次元的に可視化する「X線サーモグラフィー」法の開発を進めている[1]。

熱膨張に伴う密度の変化は一般に数  $\text{mg}/\text{cm}^3$  以下であり、従来の吸収コントラスト X線イメージングは勿論のこと、屈折コントラストや回折格子を用いた位相イメージング法でも十分な感度を得ることができない。そこで、本研究では最も高感度に密度変化を検出可能な結晶 X線干渉計を用いた位相イメージング法（結晶干渉法）を採用している。これまでに、KEK PF BL14C に常設された同原理に基づいた大視野イメージングシステム[2]を用いて、ヒーターで加熱したチューブ内の水の三次元的な温度分布（下図）、ヒーター加熱に伴う経時的な水の温度変化（熱の流れ）、及び生体試料内の熱伝搬などの可視化に成功している。当日は本法の原理、装置、及び適用例に加えて、放射光のパルス特性を利用したポンプ&プローブ法についても紹介する予定である。

[1] A. Yoneyama, A. Iizuka, T. Fujii, K. Hyodo, and J. Hayakawa, Sci Rep 8, 12674 (2018).

[2] A. Yoneyama, et al., Journal of Physics: Conference Series 425, 192007 (2013).

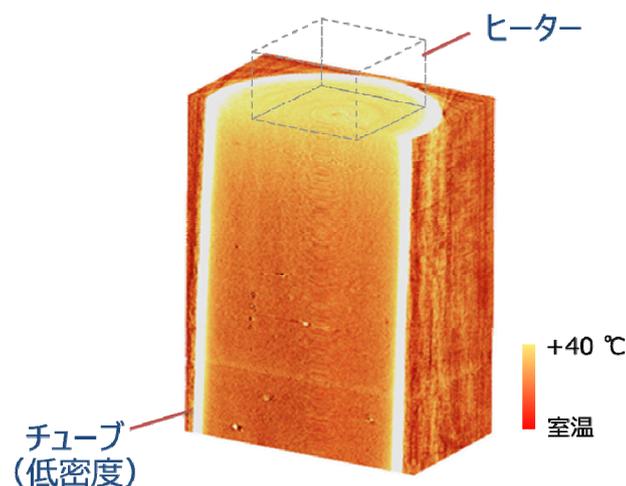


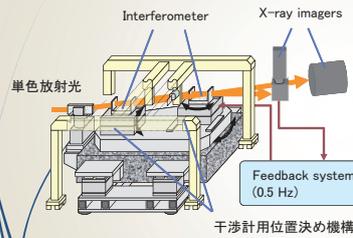
図 ヒーター加熱したチューブ内の水の三次元温度分布

# X線干渉法を用いた X線サーモグラフィーによる 熱伝搬可視化の試み

九州シンクロトロン光研究センター  
(SAGA Light Source (SLS))  
米山 明男



## 1. 位相イメージングシステム装置の現状

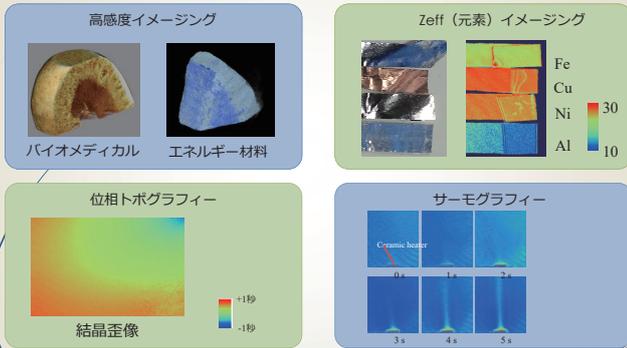


設置場所	KEK PF BL-14C
エネルギー	17.8, 35 keV
観察視野	50x35 mm <sup>2</sup> @17.8 keV, 30x35 mm <sup>2</sup> @35 keV
空間分解能	~30ミクロン
密度分解能	<1 mg/cm <sup>3</sup> (3次元観察)
計測時間	<1.2秒 (投影像) <10分 (CT)

A. Yoneyama, et al., Nucl. Inst. and Meth. in Phys. A 523,217 (2004).



## 2. 高感度特性を活用した応用例



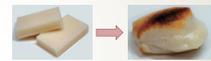
## 3. X線サーモグラフィーの原理

温度と体積の関係

$$V = V_0(1 + k\Delta T);$$

$V$  : 体積  
 $\Delta T$  : 温度変化  
 $k$  : 熱膨張係数

体積の変化と温度の変化はほぼ比例  
→熱膨張に伴う密度変化から  
**温度差**を検出

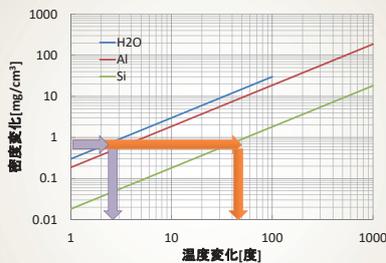


従来法との比較

	従来法	本法
利用ビーム	赤外線	硬X線
観察対象	表面の温度	密度 (内部観察可能)
温度分解能	<0.1°C	数°C
黒色コーティング	要	不要



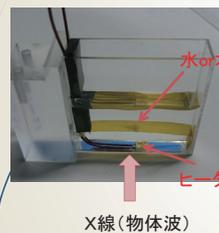
## 4. 温度分解能の見積り



高感度な位相イメージングであれば**2~3°C**  
(水)の変化を検出可能!



## 5. 透過型サーモグラフィー

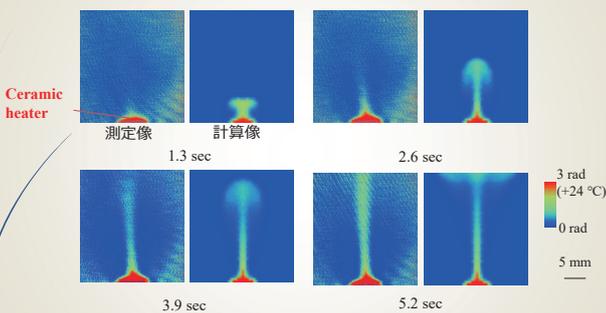


測定条件

エネルギー	17.8 keV
露光時間	0.2 s / 干渉像
位相検出法	縞走査法
走査数	3
時間分解能	1.2 s (0.2 s x 3 + 位相板動作)
X線カメラ	Photonic Science VHR 画素数: 4000x2650 画素サイズ: 12.5ミクロン GOS 30ミクロン



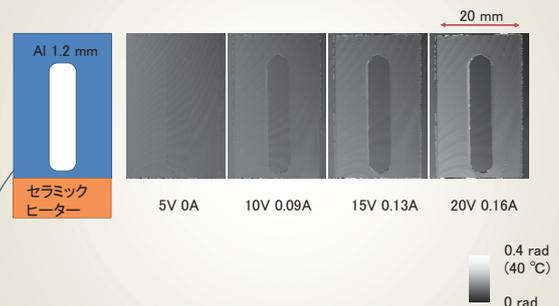
## 6. 液体中の熱伝搬の可視化例



A. Yoneyama, et al., Sci. Rep. 8, 12674 (2018).



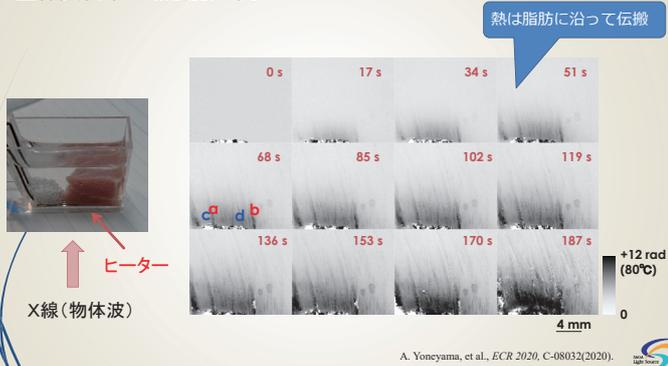
## 7. 金属固体中の熱伝搬の例



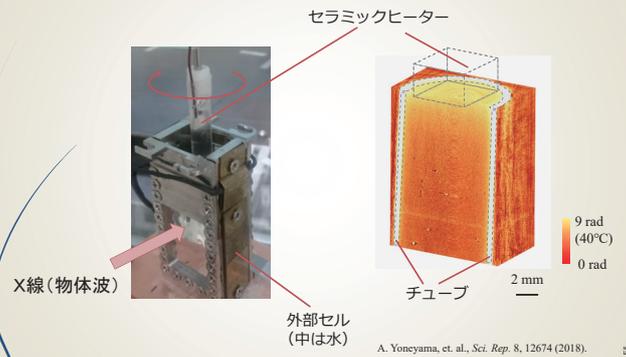
A. Yoneyama, et al., SRI 2019.



### 8. 生体試料中の熱伝搬の例

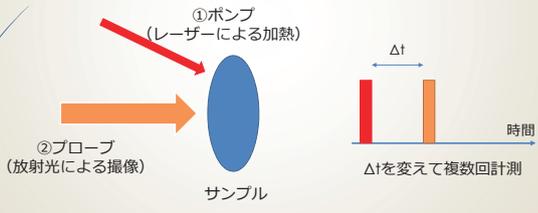


### 9. 3次元サーモグラフィー



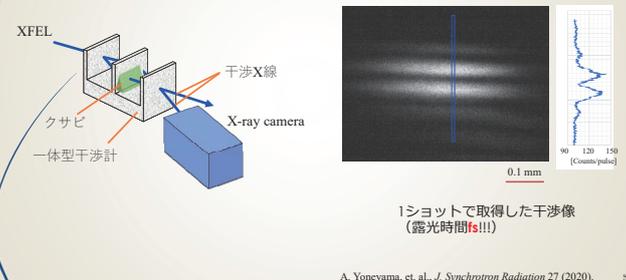
### 10. 動的な熱 (フォノン) 伝搬の可視化に向けて

固体中の熱 (フォノン) の伝搬 ~ 数1000 m/s  
 → 0.1 mmを進む時間は0.1ms以下。現在の計測系では不可能!  
 放射光のパルス特性を利用したポンプ&プローブ (P&P) 法

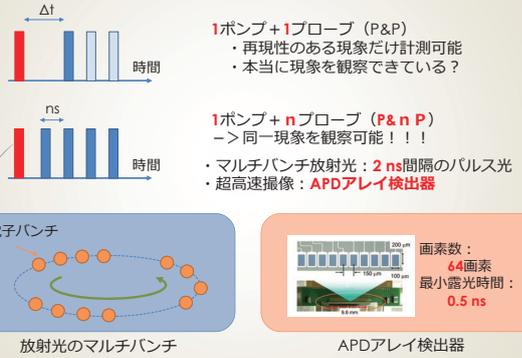


### 11. 自由電子レーザー (SACLA) と組み合わせたfs時間分解イメージング

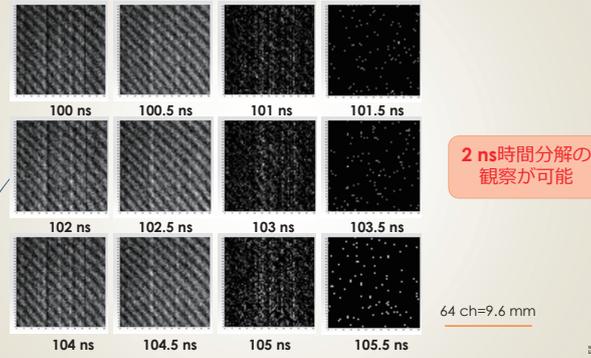
SACLA (XFEL) であれば**1ショット**で干渉像の計測が可能  
 → fsの干渉計測が可能



### 12. APDアレイ検出器と組み合わせた連続イメージング



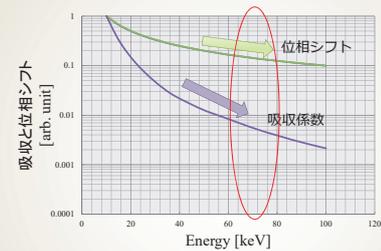
### 13. 0.5 ns毎のX線干渉像



### 14. 高エネルギー、高輝度が実現されると、、、

1. 厚い試料: 現状20 mm → 50mm!? 全身!?
2. 空間分解能: 30 ミクロン → 数ミクロン  
光子束密度の向上が不可欠
3. 感度の向上: 高エネルギーで有利
4. 時間分解能の向上: in situ, in vivo, 動的な観察

### 高エネルギーX線の利用



高エネルギーにおいても位相シフトは大きい (軽元素が見える!) → 軽元素材料と金属材料の同時可視化が可能。

## 15. まとめと今後の展望

1. 結晶X線干渉計を用いて高感度な位相イメージングだけでなく、 $Z_{\text{eff}}$ イメージングやサーモグラフィーなど新しい計測法が開発されている。
2. X線サーモグラフィーは物体の熱膨張に伴う密度変化から非破壊で温度を計測する方法である。
3. 液体に加え、生体サンプルや金属の温度変化を捉えることに成功している。

現在、1ポンプ&nプローブ法（P&nP）による固体中のフォノン伝搬を可視化すべく、APDアレイ検出器と組み合わせた計測系を開発中である。



## 謝辞

本研究は以下の方々との共同研究により実施している。

高工ネ研物構研  
兵藤一行教授、岸本俊二教授、亀沢千夏氏  
(株)日立製作所  
高松大郊氏、馬場理香氏  
産総研  
竹谷敏氏

PFにおける実験は課題番号2016G578及び2018G560で、SACLAIにおける実験は課題番号2017A8037, 2017B8042, 2018A8016, 2019A8030で実施した。



# CT 画像再構成法の技術革新と深層学習への期待

工藤博幸  
筑波大学システム情報系

投影データの測定方向数を通常の 1/10 以下に削減して画像生成を行う CT を「スパースビューCT」、投影データを物体内部の見たに関心領域 (Region of interest, ROI) のみに照射して画像生成を行う CT を「インテリア CT」と呼ぶ。これらの新方式 CT は 2000 年までは実現不可能な夢の技術と考えられてきたが、「圧縮センシング」や「スパースモデリング」など最新の数理的手法を用いた画像再構成法の研究、CT 画像再構成理論の革新的な進歩などが重なり、現在実用化される段階に到達している。また、2017 年以降「深層学習」を用いた画像再構成法の研究が開始され、将来大きなブレークスルーになると期待されている。本発表では、これらの最近の CT 画像再構成法の技術革新の中から、以下の 3 つのトピックを取りあげ、当該分野に馴染みのない研究者向けに平易に解説する。

## (1) スパースビューCT の画像再構成

スパースビューCT のキーである「圧縮センシング」を用いた画像再構成法の原理と発表者の研究を解説し、再構成画像の実例を紹介する。

## (2) インテリア CT の画像再構成

インテリア CT のキーである物体に関する先験情報を利用して数学的に厳密な画像再構成を行う幾つかの画像再構成法を解説して、再構成画像の実例を紹介する。

## (3) 深層学習を用いた CT 画像再構成

深層学習を用いた CT 画像再構成法の原理を解説して再構成画像の例を紹介し、最後に (私見を含むが) 期待と批判を述べる。

右図は、スパースビューCT 及びインテリア CT の最新の画像再構成法を用いて生成した画像の典型的な例である。上段はスパースビューCT (48 方向投影データ)、下段はインテリア CT (赤点線の円が ROI) の例であり、いずれも通常の FBP 法と比較すると劇的に画質が改善されている様子が見て取れる。発表者らは、医療用 CT 以外にも電子線トモグラフィ・放射光 CT・位相 CT への応用に関する研究を行っており、発表ではこれらの応用分野での再構成例も紹介する。

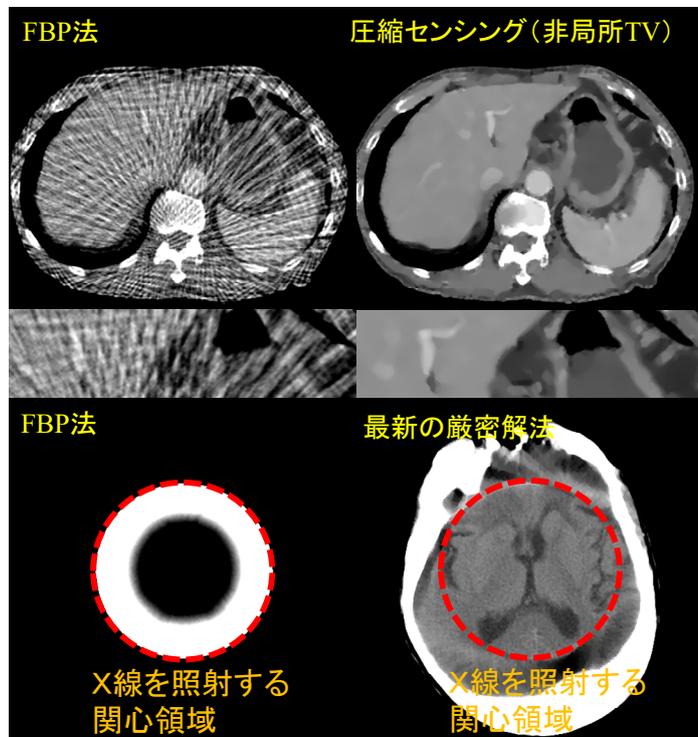


図 スパースビューCT (上段) 及びインテリア CT (下段) の再構成例

筑波大学 University of Tsukuba

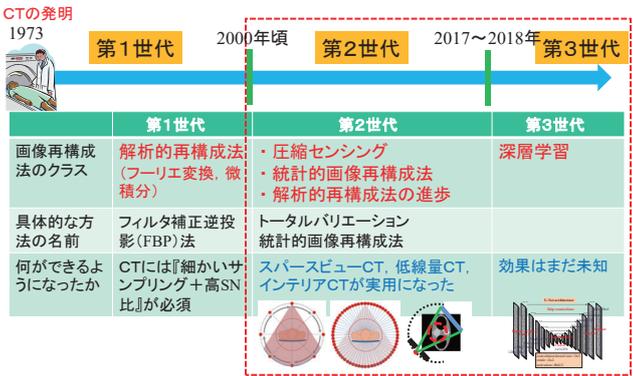
PF研究会『X線干渉計と縦型ウィグラーを用いた超高感度画像計測の現状と将来展望』(10/9(金),2020)

## CT画像再構成法の技術革新と深層学習への期待

工藤博幸  
筑波大学システム情報系情報工学科

謝辞: 本研究はJST-ERATO『百生量子ビーム位相イメージング』(課題JPMJER1403)の支援を受けた。本研究はJST-CREST『情報計測領域』(課題JPMJCR1765)の支援を受けている。

### CT画像再構成法の進歩のOverview



### 第2世代 テーマ1: スパースビューCTの画像再構成 (圧縮センシング)

- (1) スパースビューCTとは何か
- (2) スパースビューCTの歴史と研究動向
- (3) 再構成例の紹介

### (2) スパースビューCTの歴史と研究動向

- ☆ 古くから、有限の投影方向数の画像再構成問題は零空間が存在し解が一意に定まらないことが知られる  
Louis: "Ghosts in tomography - the null space of the Radon transform", Math.Meth.Appl.Sci., 1981
- ☆ 2000年代中盤まで様々な画像再構成法で試みられてきたが、実用化は無理というのが結論  
補間して投影方向数を増加, 逐次近似画像再構成法の適用など
- ☆ 2000年代中盤にDonohoとCandesらが『圧縮センシング』と呼ばれる不足した測定データから高精度で信号復元を行う逆問題の新解法を発見して、実用でできる見通しが出てきた  
Donoho: "Compressed sensing", IEEE Transactions on Information Theory, 2006  
Candes,Romberg,Tao: "Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information", IEEE Transactions on Information Theory, 2006

### 次ページ以降で圧縮センシングの説明

- ☆ その後、圧縮センシングを応用したスパースビューCTの画像再構成に関する膨大な数の研究が行われ、今後多様な分野で実用化・製品化が進む状況

### 本日の発表の概要

- ☆ 2000年以降、以下の新方式CTが研究開発され画像再構成法の革新的な進歩により実用化に至った
- ☆ 更には、2017年以降深層学習を用いた画像再構成法の研究開発が始まり、新しいブレークスルーを生むと期待されている

- (1) スパースビューCT 圧縮センシングを用いて少ない方向数の投影データでCTを実現
- (2) インテリアCT 小視野 (ROI) のみにX線を照射してCTを実現
- (3) 低線量CT X線管の電流 (電圧) を落として撮影

本発表では、これらの2000年以降におけるCT画像再構成法の進歩と深層学習への期待について、専門以外の方にも最近の研究で何が可能になったかが分かり勉強になるように解説

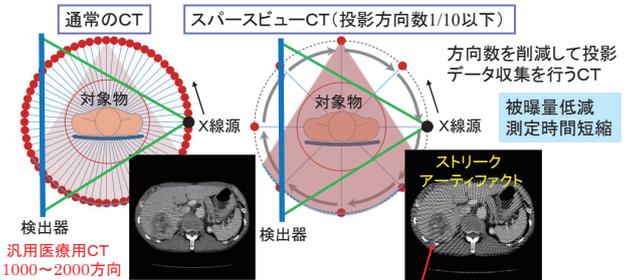
### 本日説明するテーマ

第2世代  
テーマ1: スパースビューCTの画像再構成 (圧縮センシング)

第2世代  
テーマ2: インテリアCT (ローカルCT) の画像再構成

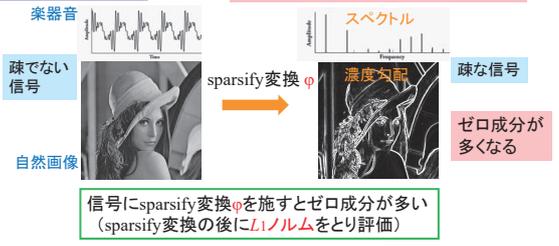
第3世代  
深層学習画像再構成法への期待

### (1) スパースビューCTとは何か



- ☆ 投影データ収集に時間がかかる以下のようなCT装置必要性が高い技術  
非医療用: マイクロ(ナノ)CT, 放射光CT, 電子線CT, 非破壊検査用CT  
医療用: 心臓CT, 歯科用CT, アンジオグラフィ, 他多数
- ☆ 少ない方向数の投影データから十分な画質の画像を再構成する画像再構成法の開発がキー (フィルタ補正逆投影 (FBP) 法だとストリークアーティファクト)

### 圧縮センシングとは 正則化に信号のスパース性を用いる逆問題解法



- ・ 雑音がない(少ない)場合 -> 制約つき最適化  

$$\underset{\vec{x}}{\text{minimize}} \|\phi(\vec{x})\|_{L1ノルム} \text{ subject to } A\vec{x} = \vec{y}$$
 画像 投影データ
  - ・ 雑音が多い場合 -> 制約なし最適化  

$$\underset{\vec{x}}{\text{minimize}} \|\vec{y} - A\vec{x}\|^2 + \beta \|\phi(\vec{x})\|_{L1ノルム}$$
 投影データ 画像
- Sparsify変換  $\phi$  の例
- ・ 天体の画像 恒等変換
  - ・ 自然画像 勾配変換
  - ・ Total Variation (TV)
  - ・ 楽器音 フーリエ変換

**トータルバリエーション(TV, Total Variation) 画像処理に最も良く用いられる**

正則化項に、先験情報として画像の**Total Variation (TV) ノルム**を利用

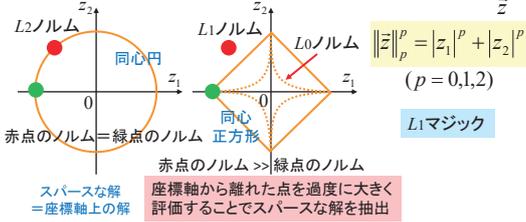
$$\|\bar{x}\|_{TV} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sqrt{(x_{ij} - x_{i+1,j})^2 + (x_{ij} - x_{i,j+1})^2}$$

水平方向差分      垂直方向差分

エッジを強力に保存しながら画像を滑らかにする効果

**スパース性をL1ノルムで評価する理由**

変数の数が2の場合のL2, L1, L0ノルムの等値線 正則化項  $\|\phi(\bar{x})\|_1$



**(3)再構成例の紹介**

**第2世代圧縮センシング**

Dong, Kudo; "Proposal of compressed sensing using nonlinear sparsity transform for CT image reconstruction", Medical Imaging Technology, 2016

**我々オリジナルの圧縮センシング**

SPIE Medical Imaging 2017, Honorable Mention Poster Award受賞

☆ TV正則化の性能を向上させることを目指した手法

- ・ テクスチャーや滑らかな濃度変化の再現性
- ・ Staircase (階段状) アーティファクトの低減
- ・ より少ない方向数の投影データで高画質

平成29年度日本医用画像工学会中栄一記念賞(論文賞)

minimize  $\|\bar{x}\|_{TV}$  subject to  $A\bar{x} = \bar{y}$       minimize  $\|\bar{y} - A\bar{x}\|^2 + \beta \|\bar{x}\|_{TV}$

☆ 正則化項として次式を使用      非線形フィルタを用いた圧縮センシング

$$U(\bar{x}) = \sum_{j=1}^J |x_j - (M\bar{x})_j| = L_1 \text{ norm of } (\bar{x} - M\bar{x})$$

任意の非線形平滑化フィルタ

☆ テクスチャーや滑らかな濃度変化を保存する性能が高い**非局所平均フィルタ**が有効

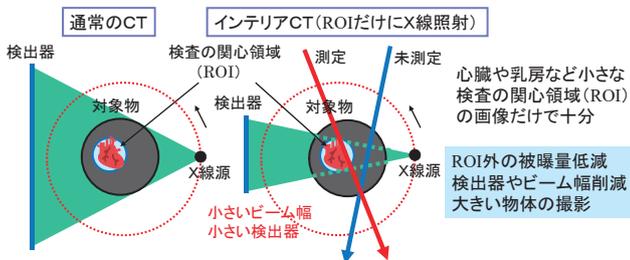
- 非線形フィルタの例
- ・ メディアンフィルタ
  - ・ K最近傍フィルタ
  - ・ 非局所平均フィルタ (Non-Local Means)
  - ・ バイラテラルフィルタ (Bilateral)

**第2世代**

**テーマ2: インテリアCT(ローカルCT)の画像再構成**

- (1) インテリアCTとは何か
- (2) インテリアCTの歴史と研究動向
- (3) 再構成例の紹介

**(1) インテリアCTとは何か**



問題の正確な定義(2008年までCT発明以来35年間の未解決問題だった)

赤線のROIを通過する投影データは全て測定し青線のROIを通過しない投影データは全く測定しない、このデータからROIの画像を厳密に再構成

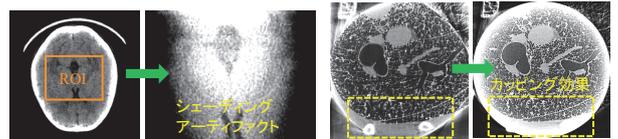
**(2) インテリアCTの歴史と研究動向**

☆ Nattererの著書『The Mathematics of Computerized Tomography, 1985』に**インテリアCT**の画像再構成は解が一意に定まらない証明

☆ 長年近似解法が研究されてきたが、誤差が発生して実用にならない

欠損データを滑らかな関数で外挿、逐次近似画像再構成法の適用など

典型的な画質劣化の例



☆ 2000年代後半に発表された以下の論文で厳密解法が発見され状況が一変

物体に関するちょっとした先験情報を用いればインテリアCTの画像再構成は厳密にかつ安定に解けることを示し、世界を驚かせた

**方法1: ROIの縁が区分的に一樣であることを使用**

Yu, Wang; "Compressed sensing based interior tomography", Physics in Medicine and Biology, 2009

ROI全体が区分的に一樣 (piecewise constant) であることが既知であれば、インテリアCTの画像再構成の解は一意

滑らかな濃度変化やテクスチャーが消失する問題点

改良版 Kudo: "Advanced compressed sensing image reconstruction for interior tomography", SPIE Optics+Photonics, 2019

先験情報領域B      ROI内の任意小領域Bで区分的に一樣であれば解は一意に決まることを証明して、ROIの縁のみに区分的に一樣な制約

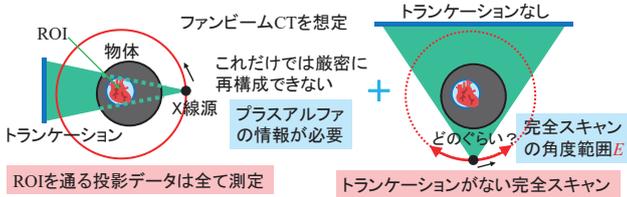
画像再構成は部分トータ TVノルム(先験情報領域Bだけにける) 画像 投影データ

$$\text{minimize } \|\bar{x}\|_{TV \text{ on } B} \text{ subject to } A\bar{x} = \bar{y}$$

☆ これらの論文発表以降、世界的に**インテリアCT**は厳密解法の研究が主流

キーである厳密な画像再構成を可能にする先験情報

4つくらい実用に資するものが存在するが2つを紹介



画像再構成の解を一意かつ安定にするには、完全スキャンはどのぐらいの角度範囲が必要か？

インテリアCTの投影データに加えて有限角度範囲E(いくら小さくても良い)の完全スキャン(トランケーションなし)投影データがあれば、インテリアCTの画像再構成の解は一意的安定

インテリアCT厳密解法の先験情報を使用しない新しい考え方を提供

17

深層学習画像再構成法への期待(第3世代)

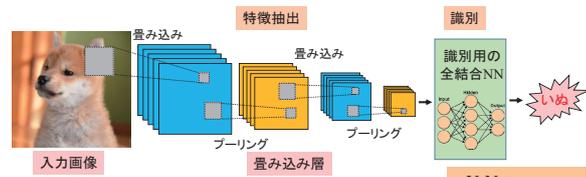
概要: 深層学習のスパースビューCT・低線量CTの画像再構成への使い方を紹介して、最後に(私見を含むが)期待できる点・問題点・今後の展望を述べる

一般事項のみ説明し、自分の研究は説明しない。

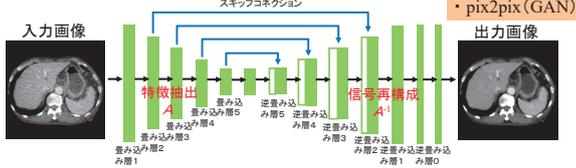
18

基礎知識(畳み込みニューラルネットワーク, CNN)

画像認識・検出 特徴抽出を行う畳み込み層の後ろに識別を行う全結合NN

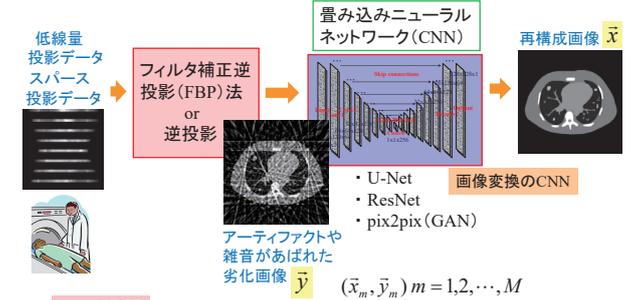


画像処理・復元・再構成 エンコーダー・デコーダー構造 スキップコネクション



26

深層学習を用いた低線量CT・スパースビューCTの画像再構成



★ CNNの学習

多数の劣化画像(低画質画像)と正解画像(高画質画像)のペアが必要 -> ない

(多くの研究では)多数の高画質画像だけを準備して、低画質画像はイメージング過程を計算でシミュレーションして利用

27

期待できる点

★ 画像再構成の方法論は逐次近似法や圧縮センシング以降非常に複雑化して、90パーセント以上の研究が逐次近似再構成の研究になった  
深層学習 = 『解析的再構成法 + ポストフィルタ』の単純な枠組みに戻す効果

問題点

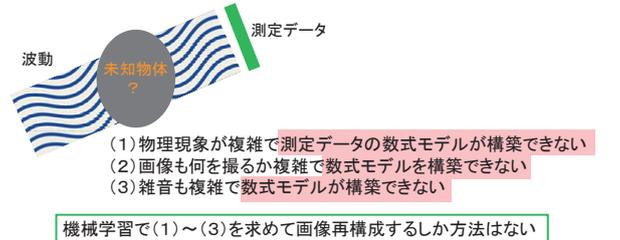
- 再現性 同じ手法でも、他の研究者の実装やデータと同じ性能にならない  
再現性尺度のイメージ 解析的再構成法 >> 圧縮センシング >> 深層学習  
1 1/5 1/50
- 画像再構成逆問題の本質的研究がおろそかになる危険

今後の展望

画像再構成法構築の3要素 (1)測定データのモデル (2)画像のモデル (3)雑音のモデル  
既存研究は、(1)~(3)がほぼ正確に既知の他手法で上手くできる問題への適用がほとんど

30

★ はるかに難しい既存手法では歯が立たない問題へのチャレンジ



31

## 縞走査法を用いた干渉縞 X 線イメージングにおける 高速・高精度なエラー補正手法の提案

\*橋本康<sup>1)</sup>、高野秀和<sup>1)</sup>、百生敦<sup>1)</sup>  
東北大学多元物質科学研究所

X 線透視画像は物体を通る X 線の強度分布を画像化したものである。つまり、物体中の X 線吸収係数の分布によってコントラストが形成される。しかし、高分子材料や生体組織などの軽元素を主成分とするような物体に対しては原理的にコントラストが十分に得られない。この欠点を克服するために吸収コントラストではなく、屈折による位相シフトを利用した位相コントラスト法が開発され、生体組織などでの測定に有効であることが示され、その応用が大きく期待されている。

位相コントラストを得るための縞走査法を用いた干渉縞 X 線イメージングにおける測定では、回折格子の 1 つを規則的に移動させて各ステップ毎に等しい線量での測定が求められ、その際のステップ幅・線量を正確に制御する必要がある。しかしながら、ステップング中の干渉計の機械的不安定性および熱揺らぎ等の様々な原因により、不可避免的にステップングエラーや線量揺らぎが引き起こされてしまう。これらが可能な限り抑えられるように測定系は組み立てられるがハードウェア的には限界があり、結果として再構成された微分位相画像やビジビリティ画像には縞状のアーチファクトがもたらされることとなり、ソフトウェア的なアプローチによりこれらを補正する手法が必要である。

本研究では、実験で得られたデータからステップングエラーや線量揺らぎを高速かつ高精度に推定する新しい手法を提案する。この手法によって推定されたステップングエラーや線量揺らぎを用いて再構成画像を補正することにより、従来の手法よりも高速かつ高精度な画像補正が可能となった。

図 1 (a) (b) はそれぞれ実験データを補正なしで再構成した微分位相画像、提案手法で補正した微分位相画像である。見比べると (a) で見られる縞状のアーチファクトが (b) では大幅に軽減されていることが分かる。

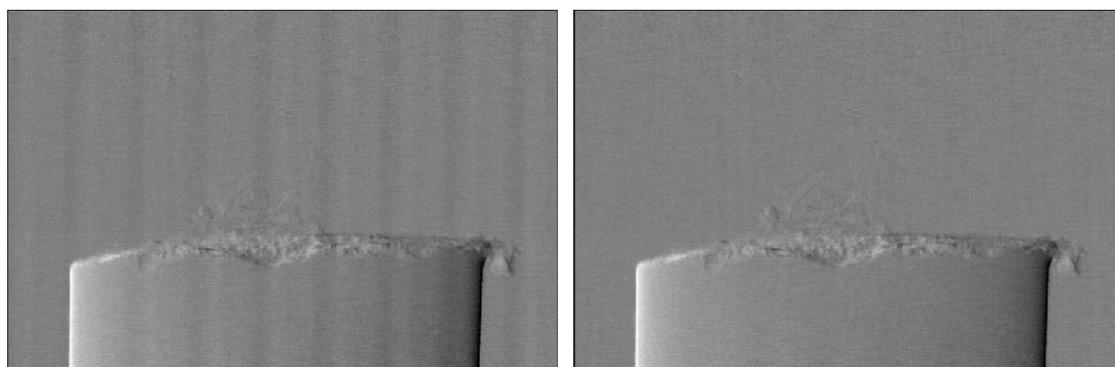


図 1 : (a) 補正なしで再構成した微分位相画像、(b) 提案手法で補正した微分位相画像

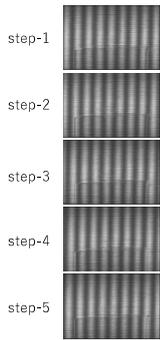
本発表では、提案手法の原理の紹介と併せて、シミュレーションによる他の補正手法との精度や計算時間の比較を行う。

# 縞走査法を用いた干渉縞X線イメージングにおける高速・高精度なエラー補正手法の提案

\*橋本康 1)、高野秀和 1)、百生敦 1)  
 東北大学多元物質科学研究所  
 ERATO 百生量子ビーム位相イメージングプロジェクト

PF研究会  
 X線干渉計と縦型ウィグラーを用いた超高感度画像計測の現状と将来展望  
 2010/10/9

## 縞走査法とステッピングエラー



微分位相取得には縞走査法とフーリエ変換法があるが、フーリエ変換法は高速撮影に有利な反面、空間分解能は縞走査法より劣るという問題がある。一方、縞走査法では格子の並進による複数の画像取得が必要のため、高精度な格子の並進が求められる。

$$I_k(x, y) = \alpha(x, y) + \beta(x, y) \cos\left(\psi(x, y) + \frac{2\pi k}{M}\right) \quad (k = 1, \dots, M)$$

$$\alpha = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M I_k$$

$$\beta = \frac{2}{M} \left| \sum_{k=1}^M I_k e^{\frac{2\pi k}{M} i} \right|$$

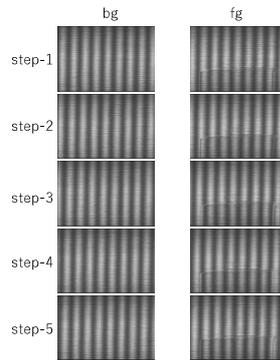
$$\psi = \arg \sum_{k=1}^M I_k e^{\frac{2\pi k}{M} i}$$

$M = \text{総ステップ数}$

## Contents

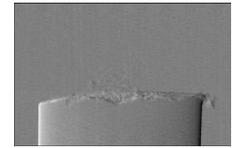
- 縞走査法とステッピングエラー
- 新しいステッピングエラーの推定手法の提案
- 数値実験による他の提案手法との比較

## 縞走査法とステッピングエラー

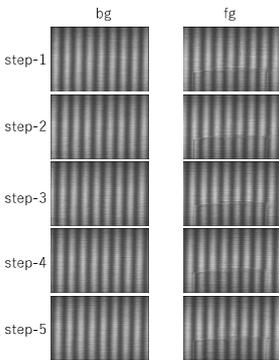


$$I_k(x, y) = \alpha(x, y) + \beta(x, y) \cos\left(\psi(x, y) + \frac{2\pi k}{M}\right)$$

微分位相:  $\psi^{fg} - \psi^{bg}$



## 縞走査法とステッピングエラー

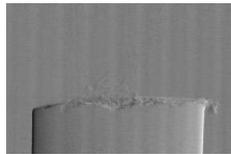


$$I_k(x, y) = \alpha(x, y) + \beta(x, y) \cos\left(\psi(x, y) + \frac{2\pi k}{M}\right)$$

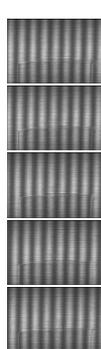
1ステップ毎の格子の移動量 = 格子周期/ステップ数

X線干渉計装置の機械的振動等により、移動量が期待される量からずれてしまうことが起こる。

再構成画像に縞状のアーティファクト  
 CT画像にはリング状のアーティファクト



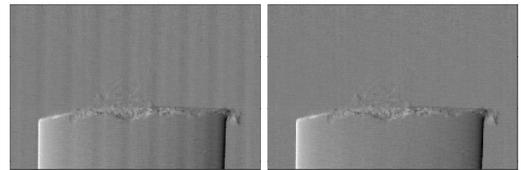
## 縞走査法とステッピングエラー



$$I_k(x, y) = \alpha(x, y) + \beta(x, y) \cos\left(\psi(x, y) + \frac{2\pi k}{M}\right)$$

$$I_k(x, y) = \alpha(x, y) + \beta(x, y) \cos\left(\psi(x, y) + \frac{2\pi k}{M} + \xi_k\right)$$

stepping error on the k-th step



## 新しいステッピングエラーの推定手法の提案

$$I_k(x, y) = \alpha(x, y) + \beta(x, y) \cos\left(\psi(x, y) + \frac{2\pi k}{M} + \xi_k\right)$$

$$= \alpha(x, y) + \beta(x, y) \cos \psi(x, y) \cos\left(\xi_k + \frac{2\pi k}{M}\right) - \beta(x, y) \sin \psi(x, y) \sin\left(\xi_k + \frac{2\pi k}{M}\right)$$

加法定理

$$\mathbf{I}(x, y) = \begin{pmatrix} I_1(x, y) \\ I_2(x, y) \\ \vdots \\ I_M(x, y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \cos\left(\frac{2\pi \cdot 1}{M} + \xi_1\right) & -\sin\left(\frac{2\pi \cdot 1}{M} + \xi_1\right) \\ 1 & \cos\left(\frac{2\pi \cdot 2}{M} + \xi_2\right) & -\sin\left(\frac{2\pi \cdot 2}{M} + \xi_2\right) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos\left(\frac{2\pi \cdot M}{M} + \xi_M\right) & -\sin\left(\frac{2\pi \cdot M}{M} + \xi_M\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha(x, y) \\ \beta(x, y) \cos \psi(x, y) \\ \beta(x, y) \sin \psi(x, y) \end{pmatrix}$$

$\Xi$  (M×3行列)

## 新しいステッピングエラーの推定手法の提案

$$\begin{pmatrix} \alpha(x, y) \\ \beta(x, y) \cos \psi(x, y) \\ \beta(x, y) \sin \psi(x, y) \end{pmatrix} = (\Xi^t \Xi)^{-1} \Xi^t \mathbf{I}(x, y)$$

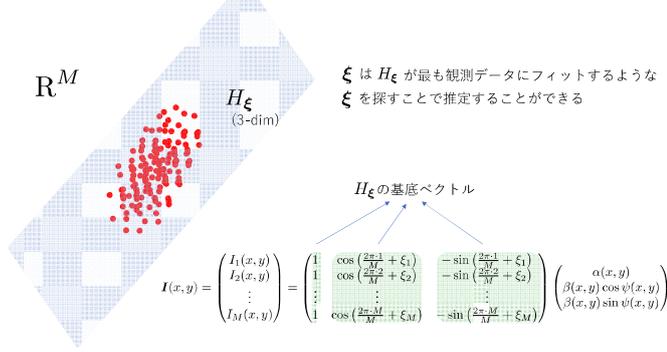
$\Xi$  を求めることができれば、擬似逆行列を用いて、 $\alpha, \beta, \psi$  を求めることができる

3次元空間からM次元空間への線形変換

$$\mathbf{I}(x, y) = \begin{pmatrix} I_1(x, y) \\ I_2(x, y) \\ \vdots \\ I_M(x, y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \cos\left(\frac{2\pi \cdot 1}{M} + \xi_1\right) & -\sin\left(\frac{2\pi \cdot 1}{M} + \xi_1\right) \\ 1 & \cos\left(\frac{2\pi \cdot 2}{M} + \xi_2\right) & -\sin\left(\frac{2\pi \cdot 2}{M} + \xi_2\right) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos\left(\frac{2\pi \cdot M}{M} + \xi_M\right) & -\sin\left(\frac{2\pi \cdot M}{M} + \xi_M\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha(x, y) \\ \beta(x, y) \cos \psi(x, y) \\ \beta(x, y) \sin \psi(x, y) \end{pmatrix}$$

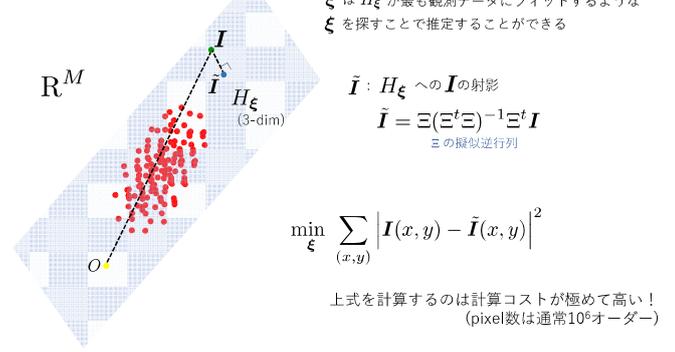
$\Xi$

新しいステップングエラーの推定手法の提案



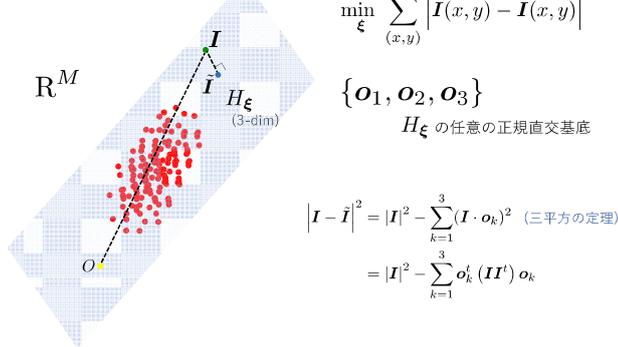
9

新しいステップングエラーの推定手法の提案



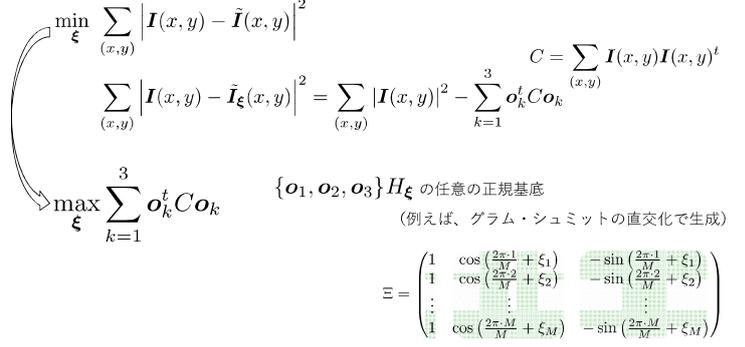
10

新しいステップングエラーの推定手法の提案



11

新しいステップングエラーの推定手法の提案



12

線量ゆらぎ on  $k$ -th step      ステッピングエラー on  $k$ -th step

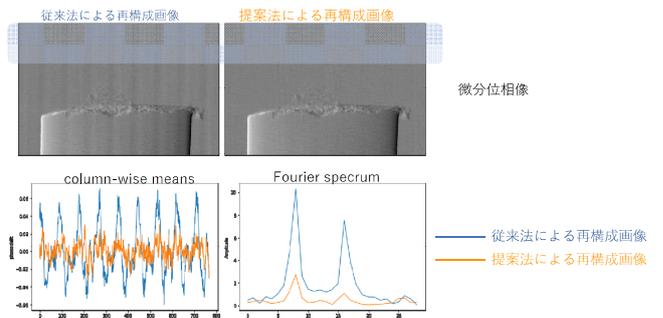
$$I_k(x, y) = e^{\lambda_k} \left\{ \alpha(x, y) + \beta(x, y) \cos \left( \psi(x, y) + \frac{2\pi k}{M} + \xi_k \right) \right\}$$

実際には、ステップングエラー以外にも線量のゆらぎがある場合もある。これもステップングエラー同様にアーティファクトの原因となる。

13

線量ゆらぎ on  $k$ -th step      ステッピングエラー on  $k$ -th step

$$I_k(x, y) = e^{\lambda_k} \left\{ \alpha(x, y) + \beta(x, y) \cos \left( \psi(x, y) + \frac{2\pi k}{M} + \xi_k \right) \right\}$$



14

数値実験による他の提案手法との比較

Wang's method (Z. Wang, B. Han, Optics Letters 29 (14) (2004) 1671) (AIA)	
Vargas' method (J. Vargas, C.O.S. Sorzano, J.C. Estrada, J.M. Carazo, Optics Communications 286 (2013) 130)	(gPCA)
Kaeppler's method (S. Kaeppler, J. Rieger, et. al., J. Medical Imaging, 4(3), 034005 (2017))	
Proposed methods (K. Hashimoto, H. Takano, A. Momose, Optics Express 28 (11) (2020) 16363) "Improved reconstruction method for phase stepping data with stepping errors and dose fluctuations"	

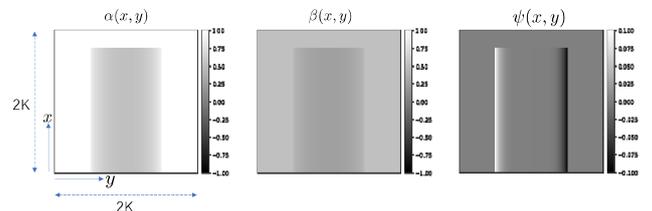
15

数値実験による他の提案手法との比較

simulation setting

$$I_k(x, y) = \alpha(x, y) + \beta(x, y) \cos \left( \psi(x, y) + \theta + \frac{2\pi}{M} k + \xi_k \right) + \sigma(k, x, y)$$

$\sigma$  : Gaussian noise (sd=0.02)



16

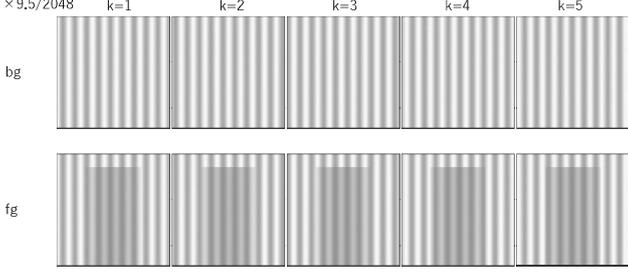
数値実験による他の提案手法との比較

simulation setting

$$I_k(x, y) = \alpha(x, y) + \beta(x, y) \cos\left(\psi(x, y) + y\theta + \frac{2\pi}{M}k + \xi_k\right) + \sigma(k, x, y)$$

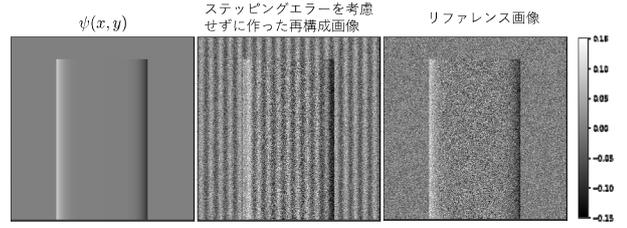
M=5

$\theta = 2\pi \times 9.5/2048$



17

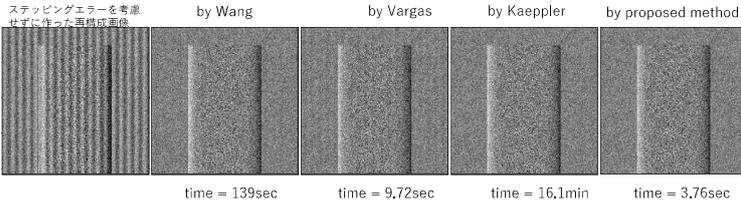
数値実験による他の提案手法との比較



stepping error is completely known as a reference image (correct image)

18

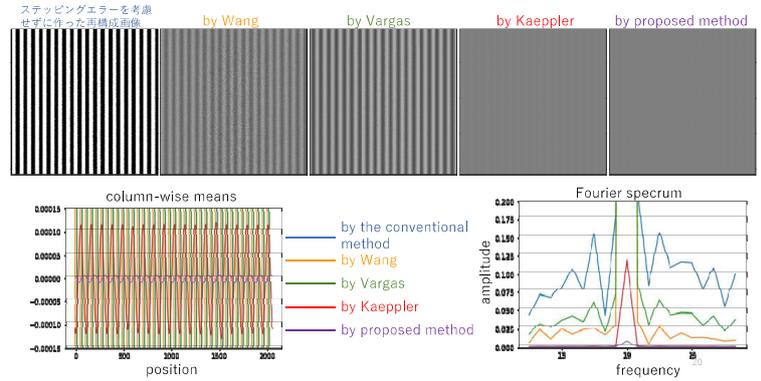
数値実験による他の提案手法との比較



19

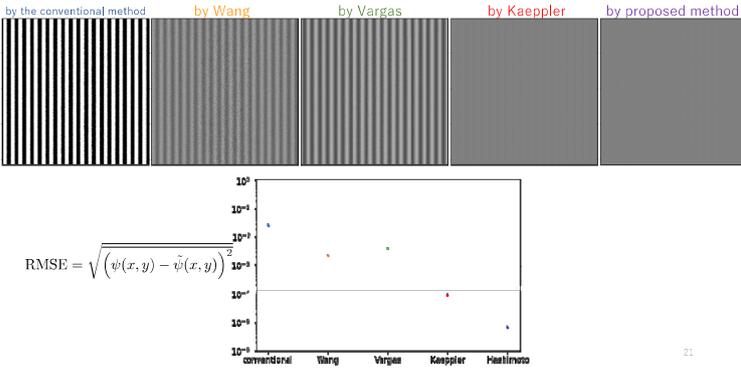
数値実験による他の提案手法との比較

リファレンス画像との差分



数値実験による他の提案手法との比較

リファレンス画像との差分



21

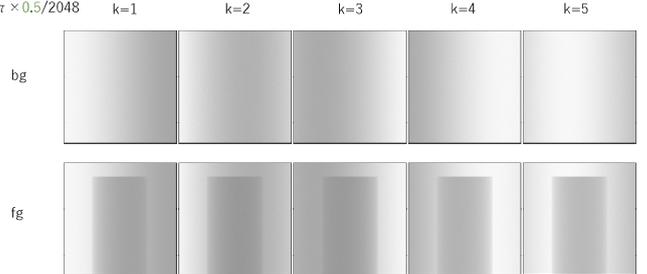
数値実験による他の提案手法との比較

simulation setting

$$I_k(x, y) = \alpha(x, y) + \beta(x, y) \cos\left(\psi(x, y) + y\theta + \frac{2\pi}{M}k + \xi_k\right) + \sigma(k, x, y)$$

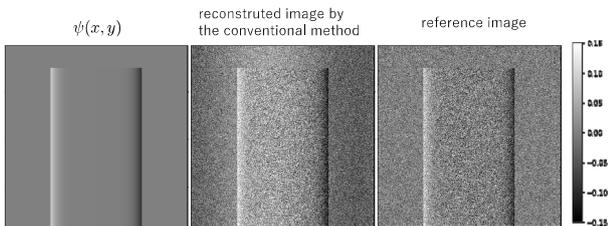
M=5

$\theta = 2\pi \times 0.5/2048$



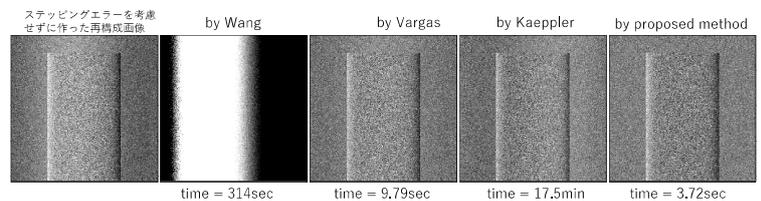
22

数値実験による他の提案手法との比較



23

数値実験による他の提案手法との比較



24

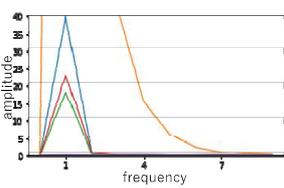
数値実験による他の提案手法との比較

リファレンス画像との差分

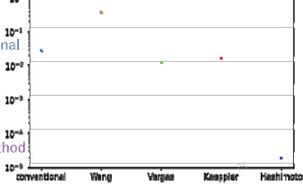
stepping errorを考慮  
せずに作った再構成画像



Fourier spectrum of column-wise means



RMSE



pros & cons of the proposed method

pros:

- 高速
- 高精度
- 実装が簡単

cons:

最小でも5-step必要

Summary

stepping errorによる弊害をソフトウェア的に克服する新たな方法を提案した。

数値実験によって、計算速度・精度の両面で今まで提案されてきた他の手法に比べて有利であることが示された。

実際の実験dataに適用し、この手法が効果的であることが確かめられた。

$$\max_{\xi} \sum_{k=1}^3 o_k^i C o_k$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i,j} (\hat{\psi}(x,y) - \psi(x,y))^2}$$



"Improved reconstruction method for phase stepping data with stepping errors and dose fluctuations" (K. Hashimoto, H. Takano, A. Momose, Optics Express 28 (11) (2020) 16363)

謝辞

本研究は、JST ERATO JPMJER 1403の支援を受けたものである。ポリマーの実験結果はSpring-8におけるシンクロトロン実験(No.2017B1445)による。

# BL14C で世界に先駆けて実現された 位相コントラスト CT と屈折コントラスト CT

湯浅 哲也

山形大学大学院理工学研究科

物質を伝搬する X 線は複素屈折率  $n = 1 - \delta + i\beta$  に影響を受ける。複素屈折率の虚部  $\beta$  は Beer の法則の吸収係数に相当する。現在、医療や産業の分野で広く用いられている X 線イメージングは、吸収コントラストにより画像が形成される。言い換えれば、 $\beta$  の分布を描出する撮像方式である。X 線の特性から吸収コントラストは、高い原子番号の元素はコントラスト高く描出できるものの、H, C, N, O のような低原子番号の元素に対してコントラストを得にくい。一方、複素屈折率の実部、すなわち  $\delta$  は、物質中での光の伝搬を記述するための指標である。一般に、 $\delta$  の値は  $\beta$  に対して、約 1000 倍の大きさを有する。したがって、低原子番号元素から構成される対象も  $\delta$  によれば高いコントラストで描出が可能である。 $\delta$  を描出する撮像方式は位相コントラスト、あるいは屈折コントラストイメージングと呼称される。物理量  $\delta$  を求める計測法は 4 つに大別される：(1) in-line holography<sup>[1]</sup>, (2) crystal interferometry<sup>[2]</sup>, (3) analyzer-based imaging<sup>[3]</sup>, (4) grating-based imaging<sup>[4]</sup>。これらの方法は、低原子番号元素から構成される対象を高コントラストな投影像として取得できる。これらすべての計測法は CT イメージングに拡張されており、高精細な 3 次元位相コントラスト CT 画像は医学や産業分野に数々の重要な知見をもたらしている。ここで特筆すべきは、これら 4 種の位相 CT 撮像法のうち、(2)および(3)の 2 種類が、世界に先駆けて BL14C で実現されたことである<sup>[5],[6]</sup>。これは当ビームラインの特性である縦偏光の恩恵と言っても過言ではない。

両者はともに、 $\delta$  の空間分布を描出する位相 CT イメージングではあるが、その CT 画像を得るまでのプロセスは大きく異なる。すなわち、(2)による CT は波動光学に基づいた計測であるのに対して、(3)による CT は幾何光学に基づく。これにより、後者を屈折コントラスト CT と呼称する場合がある<sup>[7]</sup>。

本演題では、BL14C で世界に先駆けて産声を上げた 2 つの位相 CT イメージングについて、物理情報  $\delta$  の投影取得から CT 画像が再構成されるまでのプロセスを、順を追って説明する。

- [1] Snigirev A, Snigireva I, Kohn V, Kuznetsov S, Schelokov I (1995) On the possibilities of x-ray phase contrast microimaging by coherent high-energy synchrotron radiation. Rev Sci Instrum 66:5486.
- [2] Bonse U, Hart M (1965) An x-ray interferometer. Appl Phys Lett 6:155-156.
- [3] Chapman D, Thomlinson W, Johnston RE, Washburn D, Pisano E, Gmür N, Zhong Z, Menk R, Arfelli F, Sayers D (1997) Diffraction enhanced x-ray imaging. Phys Med Biol 42:2015-2025.
- [4] Momose A, Kawamoto S, Koyama I, Hamaishi Y, Takai K, Suzuki Y (2003) Demonstration of X-ray talbot interferometry. Jpn J Appl Phys 2 Lett 42:L866-L868.
- [5] Momose A, Takeda T, Itai Y, Hirano K (1996) Phase-contrast X-ray computed tomography for observing biological soft tissues. Nat Med 2:473-475.
- [6] Maksimenko A, Ando M, Sugiyama H, Yuasa T (2004) Computed tomographic reconstruction based on x-ray refraction contrast. Appl Phys 86:2105.
- [7] Sunaguchi N, Huang Z, Shimao D, Yuasa T, Ichihara S, Nishimura R, Iwakoshi A, Ando M (2020) Three-dimensional microanatomy of human nipple visualized by x-ray dark field computed tomography. Breast Cancer Res and Treat 180:397-405.

# BL14Cで世界に先駆けて実現された 位相コントラストCTと屈折コントラストCT

湯浅哲也

山形大学大学院理工学研究科

## 目的

BL-14C(B) で開発された2つの位相コントラストCTについて、画像計測の観点から画像形成プロセスを概観し、先人の偉業を偲ぶ

## 背景

$$n = 1 - \delta + i\beta \quad \text{複素屈折率}$$

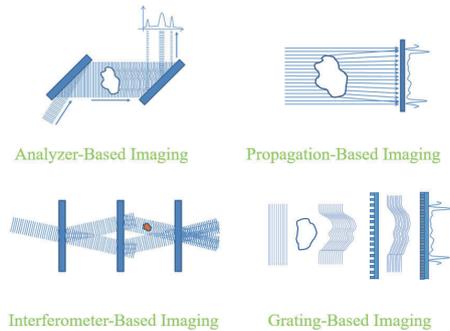
- ✓  $\delta$ : 位相シフト項,  $\beta$ : 吸収項
- ✓ 従来のX線イメージングは  $\beta$  に基づくコントラスト
- ✓ 低原子番号元素 (H, C, N, O....) からなる対象では十分なコントラストが得られない
- ✓ 硬X線領域では,  $\delta \gg \beta$  (約1,000倍)

- ✓  $\delta$  に基づくコントラストであれば, 低原子番号元素からなる対象も高コントラストで描出できる

⇒ 位相イメージング

生体軟組織, 有機物など低原子番号元素からなる対象のイメージングに有効

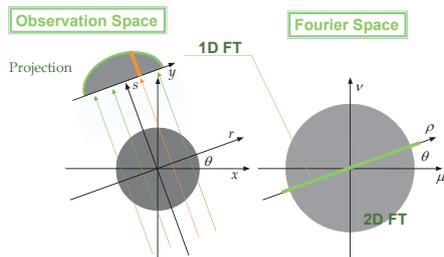
## 位相コントラストイメージング



## 位相コントラストCT

- ✓ 4種類すべての計測方法でCT化されている
- ✓ BL-14C(B) において, Interferometer と Analyzerで世界初のCTが得られた
  - ✓ Interferometer: Momose, Takeda (1996) Nat Med
  - ✓ Analyzer: Maksimenko, Ando (2005) APL
- ✓ 位相CT再構成画像は  $\delta$  の空間分布ではあるが, 画像を得るまでのプロセス (物理モデル) は計測方法により異なる

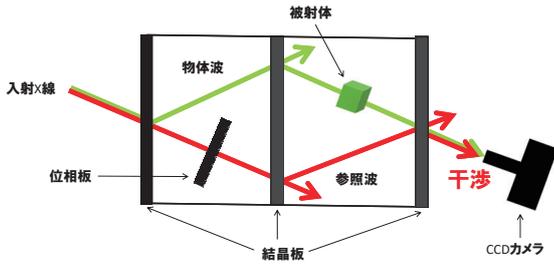
## 計測の観点から見たCT



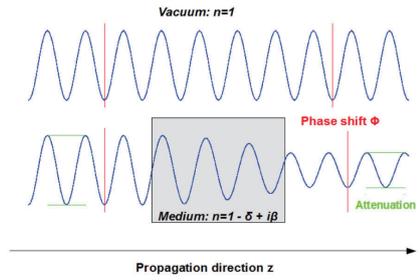
投影 = 物理量分布の線積分  
Radon transform

## CT based on Interferometer

# 干渉計



# 位相シフトと吸収

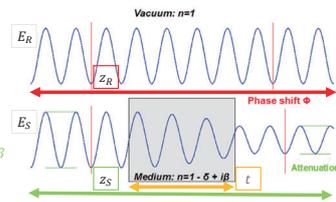


Wikipedia

# 計測される量

$$E_S = A_S \exp(ikz_S) \quad E_R = A_R \exp(ikz_R)$$

$$|E_S + E_R|^2 = A_S^2 + A_R^2 + 2A_S A_R \cos k(z_S - z_R)$$



$$E_S = A_S \exp(ik(z_S - t)) \exp\left\{ik \int_0^t n dz\right\} \quad n = 1 - \delta + i\beta$$

$$= A_S \exp(-k \int_0^t \beta dz) \exp\left\{ik(z_S - t + \int_0^t (1 - \delta) dz)\right\}$$

$$= A_S \exp(-\int_0^t \mu dz) \exp\left\{ik(z_S - \int_0^t \delta dz)\right\} \quad \mu = k\beta$$

$$I(z_S - z_R) \equiv |E_S + E_R|^2$$

$$= A_S^2 \exp(-2 \int_0^t \mu dz) + A_R^2 + 2A_S A_R \exp(-\int_0^t \mu dz) \cos\left\{k\left(\int_0^t \delta dz + z_R - z_S\right)\right\}$$

$$= I_D + I_A \cos(k(\phi + z_R - z_S))$$

$$I_D = A_S^2 \exp(-2 \int_0^t \mu dz) + A_R^2, \quad I_A = 2A_S A_R \exp(-\int_0^t \mu dz), \quad \phi = \int_0^t \delta dz$$

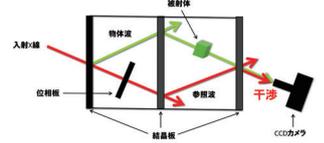
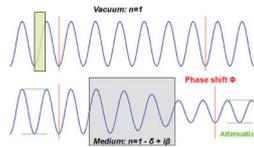
$$I(\Delta) = |E_S + E_R|^2 = I_D + I_A \cos(k(\phi + \Delta))$$

$$\Delta = z_S - z_R$$

$$\phi = \int_0^t \delta dz = \int_{-\infty}^{\infty} \delta dz \quad \text{位相シフト項の線積分}$$

$$S \equiv \sum_{p=1}^L I \left( \frac{2\pi p}{kL} = \frac{p\lambda}{L} \right) \exp\left(-i \frac{2\pi p}{L}\right) = \frac{L}{2} I_A \phi^{ik\phi}$$

$$\Rightarrow \phi = \frac{1}{k} \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im}\{S\}}{\text{Re}\{S\}} \right) + 2q\pi \quad (q \text{は整数}) \quad -\pi \leq \phi \leq \pi \text{にラップされている}$$



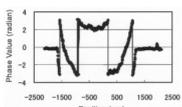
# 位相アンラップ

$$\phi = \frac{1}{k} \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im}\{S\}}{\text{Re}\{S\}} \right) + 2q\pi \quad (q \text{は整数})$$

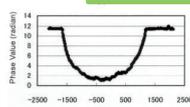
q の決定

投影の取得

$$\phi = \int_{-\infty}^{\infty} \delta dz$$



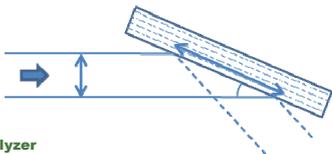
位相アンラップ



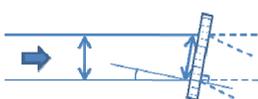
# CT based on Analyzer

# Bragg-case と Laue-case アナライザ

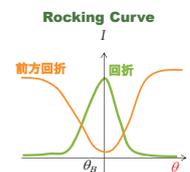
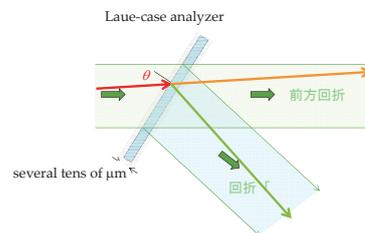
**Bragg Analyzer for DEI (Diffraction Enhanced Imaging)**



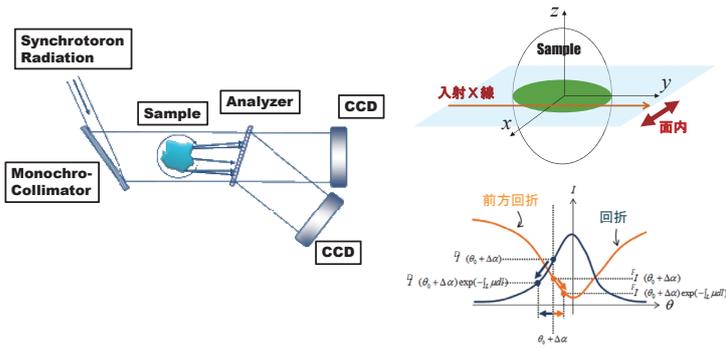
**Laue Analyzer for DFI (Dark Field Imaging)**



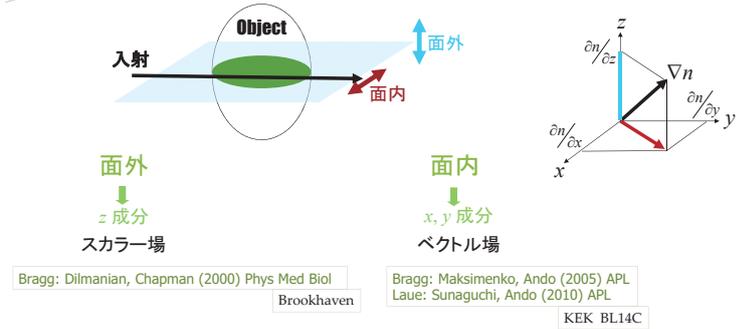
# Laue-case アナライザ



## Laue-case アナライザーによる位相コントラストイメージング



## アナライザーによる位相コントラストCT



## 光線方程式

$$\frac{d}{ds}(n(\mathbf{r})\mathbf{t}(\mathbf{r})) = \nabla n(\mathbf{r})$$

$$\frac{d}{ds}(n(\mathbf{r})\mathbf{t}(\mathbf{r})) = \nabla n(\mathbf{r}) \Leftrightarrow \frac{d}{ds}((1-\delta(\mathbf{r}))\mathbf{t}(\mathbf{r})) = -\nabla\delta(\mathbf{r})$$

$$\Leftrightarrow (1-\delta)\frac{d\alpha}{ds}\mathbf{v} - \frac{d\delta}{ds}\mathbf{t} = -\nabla\delta$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{d\delta}{ds} = \nabla\delta \cdot \mathbf{t} \\ \frac{d\alpha}{ds} = -\nabla\delta \cdot \mathbf{v} \end{cases}$$

$$\frac{d\mathbf{t}}{ds} = \frac{d\alpha}{ds}\mathbf{v}$$

$\mathbf{r} = \mathbf{r}(s)$

$\mathbf{t}$ : tangential vector

$S$ : arc length

$s + ds$

$\alpha + d\alpha$

$$\frac{d\delta}{ds} = \nabla\delta \cdot \mathbf{t} \Rightarrow \int_S \frac{d\delta}{ds} ds = \int_S d\delta = \int_S \nabla\delta \cdot \mathbf{t} ds$$

$$\frac{d\alpha}{ds} = -\nabla\delta \cdot \mathbf{v} \Rightarrow \int_S \frac{d\alpha}{ds} ds = \int_S d\alpha = -\int_S \nabla\delta \cdot \mathbf{v} ds$$

$$\begin{cases} \psi: \text{angle between } \nabla\delta \text{ and } \mathbf{t} \\ \int d\delta = 0 \end{cases} \Rightarrow \int_S |\nabla\delta| \cos\psi ds \cong 0$$

$$\begin{cases} \frac{\pi}{2} - \psi: \text{angle between } \nabla\delta \text{ and } \mathbf{v} \\ \int d\alpha = \Delta\alpha \end{cases} \Rightarrow \int_S |\nabla\delta| \sin\psi ds = -\Delta\alpha$$

$$\mathbf{r}_l = (p\cos\theta - q\sin\theta, p\sin\theta + q\cos\theta)$$

$$\varphi(\mathbf{r}_l) = \begin{cases} \bullet = + \\ \bullet = \theta + \frac{\pi}{2} \\ \bullet = \varphi(\mathbf{r}_l) - \left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \end{cases}$$

CT座標の導入

$$\begin{cases} \int_S |\nabla\delta| \cos\psi ds \cong 0 \\ \int_S |\nabla\delta| \sin\psi ds = -\Delta\alpha \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \int |\nabla\delta(\mathbf{r}_l)| \cos\left[\varphi(\mathbf{r}_l) - \left(\theta + \frac{\pi}{2}\right)\right] dq = 0 \\ \int |\nabla\delta(\mathbf{r}_l)| \sin\left[\varphi(\mathbf{r}_l) - \left(\theta + \frac{\pi}{2}\right)\right] dq = -\Delta\alpha(p, \theta) \end{cases}$$

$$\int_l |\nabla\delta(\mathbf{r}_l)| \exp(i\varphi(\mathbf{r}_l)) dq = \Delta\alpha(p, \theta) e^{i\theta}$$

## 複素数表現の投影

$$\int_l |\nabla\delta(\mathbf{r}_l)| \exp(i\varphi(\mathbf{r}_l)) dq = \Delta\alpha(p, \theta) e^{i\theta}$$

$$\mathbf{r}_l = (p\cos\theta - q\sin\theta, p\sin\theta + q\cos\theta)$$

左辺は  $\nabla\delta$  の複素数表現  $\nabla\delta = \frac{\partial\delta}{\partial x} + i \frac{\partial\delta}{\partial y}$  の投影  
右辺は計測可能な量

再構成することでベクトル場  $\left(\frac{\partial\delta}{\partial x}, \frac{\partial\delta}{\partial y}\right)$  を再構成

## まとめ

位相コントラストCTは位相シフト項  $\delta$  の空間分布を描出するイメージングモダリティ

干渉計は波動光学的に投影を取得

アナライザーは幾何光学的に投影を取得

Thank you for your attention

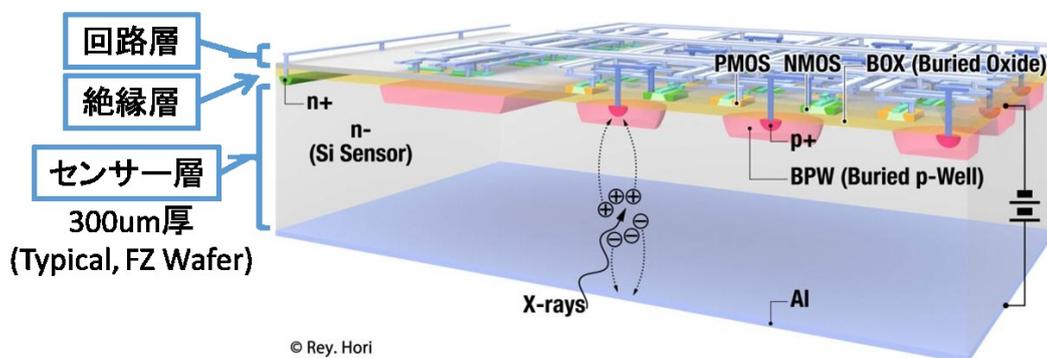
## 二次元半導体検出器 SOIPIX シリーズの PF における応用状況と今後の開発

西村 龍太郎  
KEK 物構研放射光

二次元半導体検出器 SOIPIX は、KEK 測定器開発室を中心とする SOIPIX グループにおいて開発中の新型撮像デバイスである。本検出器は Silicon-On-Insulator (SOI) 技術を用いてシリコンセンサと LSI 回路を一体のチップに収めたモノリシック構造 (図 1) となっており、機械的接合 (バンプボンディング) が不要なことからピクセルサイズの小型化に有利である、SOI ウェファ特有の構造により寄生容量が小さく LSI の高速化に有利であるといった特徴を備えている。

KEK 放射光実験施設 (PF) では、測定器開発室との協力の下 SOIPIX 検出器の開発・応用に向けた取り組みを行っており、主要なものとしては電荷積分型検出器 INTPIX4 (17  $\mu\text{m}$  正方面素、832 $\times$ 512 ピクセル、図 2) の性能評価及び応用、パルス計数型検出器 CNPIX シリーズの開発が上げられる。中でも INTPIX4 については X 線管球を利用する装置の商用化を視野に入れた改修型が開発されており、現在 PF の高輝度単色光を用いた X 線イメージャとしての性能評価と応用が進められている。

本発表においてはこれら二次元半導体検出器 SOIPIX シリーズの PF における応用状況と今後の開発の構想について、これまでの試験の結果と併せて紹介する。



© Rey. Hori

図 1 : SOIPIX 検出器の構造概略図

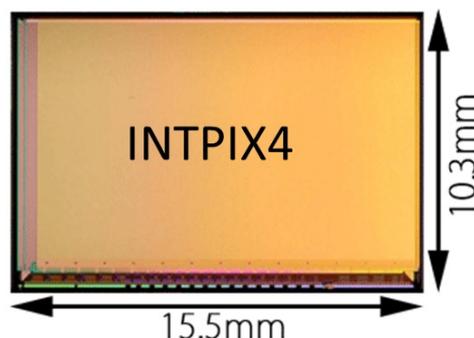


図 2 : INTPIX4 検出器



## 二次元半導体検出器SOIPIXシリーズのPFにおける応用状況と今後の開発

KEK放射光実験施設

西村 龍太郎

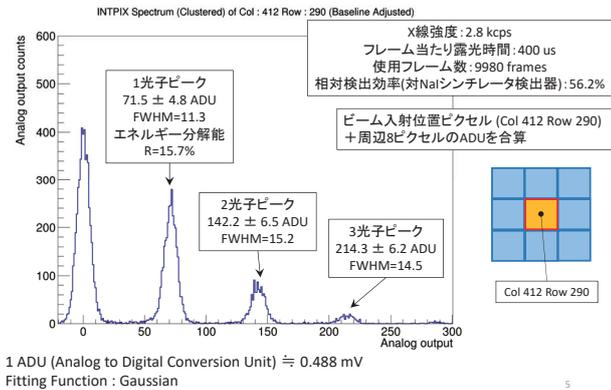
### 電荷積分型SOIPIX検出器 INTPIX4



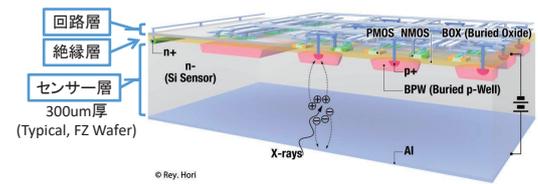
- 現在は本検出器について商用化を視野に入れた改良型(仮称INTPIX4NA)が製作されており、
- 回折環形状測定による金属材料の残留応力測定(金沢大学・株)不二越)
  - PFにおけるMicro-CT向けイメージング等のX線イメージング用途への応用が進められている

**KEK放射光実験施設を利用した性能評価を実施**

### エネルギー分解能(12keV)

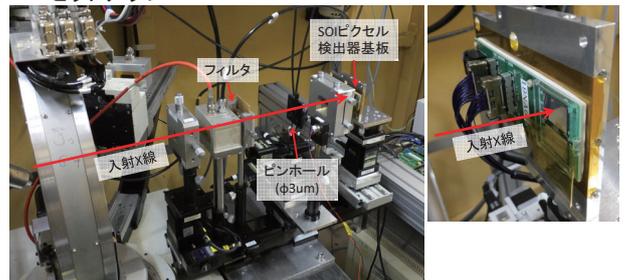


### SOIPIXについて



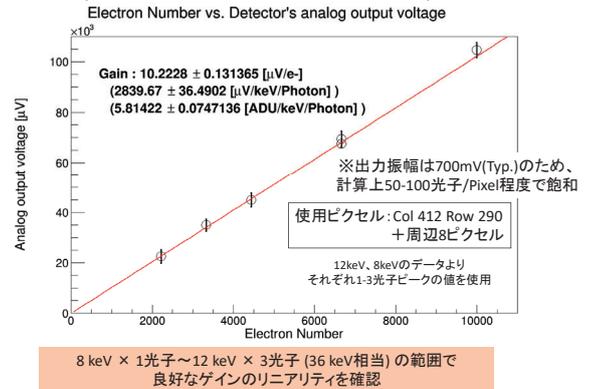
- SOI(Silicon-On-Insulator)技術を使用したピクセル検出器
- センサー層(高抵抗Si)と読み出し用LSI層(低抵抗Si)を絶縁層を介して接合
- 小ピクセル化(8 $\mu$ m $\sim$ )・高速読み出しへの対応が可能
- 現在は電荷積分型・パルス計数型の検出器の2種類を開発中

### エネルギー分解能・ゲイン測定セットアップ



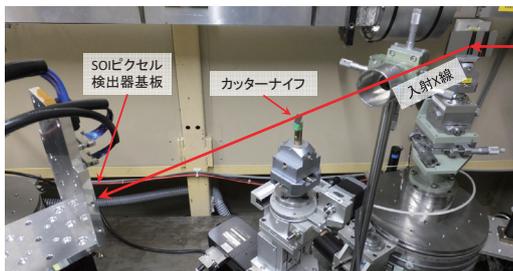
- X線エネルギー: 12keV(2020/02/06-08), 8keV, 5.415keV(2020/03/02-05)@PF BL-14A (Top-Up 450mA)
- INTPIX4NA検出器条件
- 300 $\mu$ m厚N型FZウェア、センサ印加電圧: 250V、セトリング待機時間320ns/pixel
- 露光時間: 400  $\mu$ s / frame  $\times$  10000 frames (12keV, 8keV)  $\cdot$  1 ms  $\times$  60000 frames (5.415keV)
- 室温(25 $\sim$ 27 $^{\circ}$ C)、細径単色X線ビーム( $\phi$  $\sim$ 10 $\mu$ m(FWHM))を裏面より入射

### ゲイン(12keV、8keVのデータより)



### 解像特性評価 エッジ法によるLSF(線広がり関数)測定セットアップ

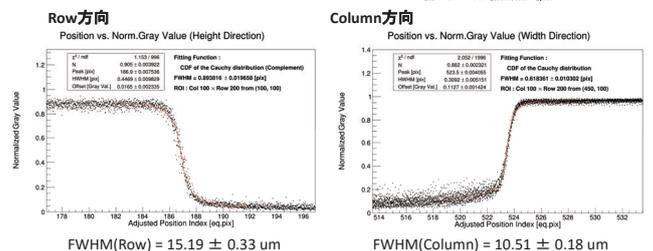
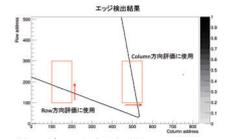
- カッターナイフの刃を使用してエッジ像を撮影
- エッジ像から検出器ピクセルアレイのColumn方向・Row方向それぞれについて合成ESF(エッジ広がり関数)を求め、これを微分してLSF(線広がり関数)を算出



- X線エネルギー: 9.5keV(2020/02/09-12)@PF BL-14B (Top-Up 450mA)
- 検出器条件: 300 $\mu$ m厚N型FZウェア、センサ印加電圧: 250V、セトリング待機時間320ns/pixel、室温(25 $\sim$ 27 $^{\circ}$ C)、露光時間 1s (2 ms/frame  $\times$  500 frames)、裏面入射

### 解像特性評価 エッジ法によるLSF(線広がり関数)測定

- カッターナイフの刃を使用してエッジ像を撮影
- エッジ像から検出器ピクセルアレイのColumn方向・Row方向それぞれについて合成ESF(エッジ広がり関数)を求め、これを微分してLSF(線広がり関数)を算出

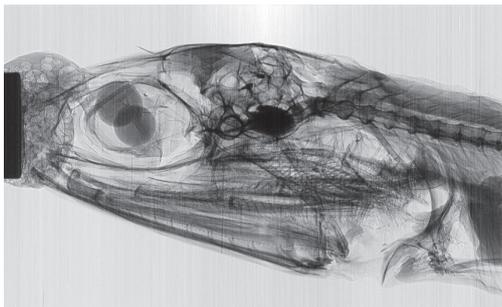


Row方向の方が若干解像度が下がるが  
いずれもFWHM<ピクセル間隔

## 撮像例:CT撮像

撮像サンプル: 煮干し

X線エネルギー: 9.5keV(2020/02/09-12)@PF BL-14B (Top-Up 450mA)  
露光時間 1s、撮像数181枚(0-180° まで1° ステップで連続撮像)



規格化画像(I/I<sub>0</sub>)

9

## 撮像例:CT撮像

撮像サンプル: 煮干し

X線エネルギー: 9.5keV(2020/02/09-12)@PF BL-14B (Top-Up 450mA)  
露光時間 1s、撮像数181枚(0-180° まで1° ステップで連続撮像)



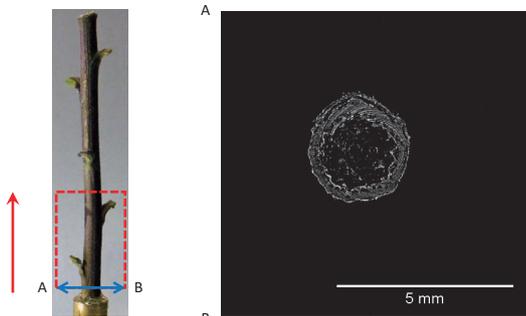
再構成法: Filtered Back Projection (FBP) (Shepp-Logan Filter)

10

## 撮像例:CT撮像

撮像サンプル: 双子葉植物(茎部)

X線エネルギー: 9.5keV(2020/02/09-12)@PF BL-14B (Top-Up 450mA)  
露光時間 1s、撮像数181枚(0-180° まで1° ステップで連続撮像)



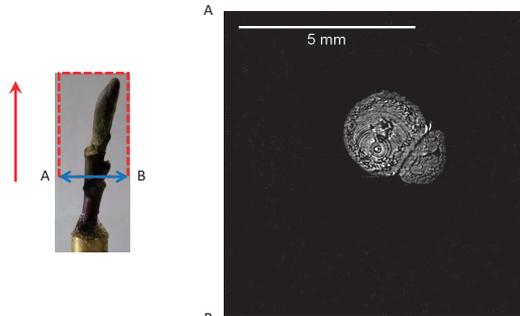
再構成法: FBP (Shepp-Logan Filter)

11

## 撮像例:CT撮像

撮像サンプル: 双子葉植物(新芽)

X線エネルギー: 9.5keV(2020/02/09-12)@PF BL-14B (Top-Up 450mA)  
露光時間 1s、撮像数181枚(0-180° まで1° ステップで連続撮像)



再構成法: FBP (Shepp-Logan Filter)

12

## まとめ

SOIPIX検出器は・・・

- SOI(Silicon-On-Insulator)技術を使用したピクセル検出器
- 最小ピクセルサイズ8um角～
- 電荷積分型とパルス計数型が開発中
- 17um角電荷積分型検出器INTPIX4(有感面積1.4 cm × 0.9 cm)
  - 商用化を視野に入れた改良型(INTPIX4NA)が製作され、放射光を用いた性能評価を実施中
  - エネルギー分解能: 15.7 %@12 keV
  - ゲイン: 10.2 ± 0.13 uV/e-
  - 解像特性:
    - FWHM(Row) = 15.19 ± 0.33 um, FWHM(Column) = 10.51 ± 0.18 um (ピクセル間隔(17um)以下)
- CT撮像試験においても良好な再構成結果を得られたことから、連続運用時に問題となる性能・特性の変動が生じなかったことが示された

13

## 今後

- 電荷積分型SOI検出器はX線イメージングに使用できる状況
- 本格的なCT撮像等への応用に当たっては
  - より高速な撮像への対応(例: 現行90 fps -> 900 fps)
  - 撮像面積の拡張  
(例: 現行1.5 cm × 1 cm -> 3 cm × 3 cm (2 × 3タイリング))
 等の拡張が求められる
- 検出器本体の改良だけではなく読み出しシステムの高速化等トータルでの開発を継続予定
  - KEK放射光実験施設では10Gb Ethernet 対応 SiTCP※を用いた汎用高速読み出しシステムを開発中

応用のご提案がありましたら是非お声かけください

※FPGA(プログラマブルロジックデバイス)上で動作するネットワークIO論理回路

14

ご清聴頂きありがとうございました

15

# 位相コントラスト X 線 CT によるエタノール固定ラット脳の白質イメージング

テイテイルイン

医療衛生学部・北里大学

最近、結晶 X 線干渉計を用いた位相コントラスト X 線 CT 装置が開発されている。従来の吸収の散乱断面積に比べ位相シフトの散乱断面積は、軽元素に対して 1000 倍以上大きく、生体や有機試料を非造影で観察が可能である。本研究では、位相コントラスト X 線 CT により、ラット脳の神経線維路描出能を検討した。画像のコントラストを改善するために、ラットの脳を 100 %エタノールで固定しました。位相コントラスト X 線 CT 画像で内包、脳梁、外包、内側毛帯、および大脳脚などの脳の白質構造を明確に描出された。さらに、3 次元ボリュームレンダリングソフトウェアを用い、脳梁から外部被膜までの白質路を適切に抽出することが可能であった。位相 X 線イメージングで、固定液にエタノールを用いることにより、白質路の解剖学的構造を詳細に観察ができた。したかて、位相 X 線イメージングはさまざまな動物・モデルを用いた神経疾患研究において重要な役割を占めていると考えられる。

## 位相イメージングを用いたX線エラストグラフィの基礎的検討

亀沢知夏<sup>1,2,3</sup>、米山 明男<sup>4</sup>、矢代 航<sup>3</sup>、兵藤 一行<sup>1,2</sup>

1. 総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究科

2. 高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所

3. 東北大学多元物質構造科学研究所

4. 九州シンクロtron光研究センター

病変部位は正常部位に比べて硬くなるのが古くから知られており、疾患の診断に古くから触診が用いられてきた。しかし小さい病変や深部にある病変部位の硬さを触診で確認することは難しく、X線イメージングや核磁気共鳴(MR)イメージング、超音波(US)イメージングでも、硬さを測定することは難しい。そこで、MRやUSイメージングを用いて、非侵襲的に病変部位の硬さを画像化するエラストグラフィが研究開発され[1-4]、この10年程度の間、病院で使用される診断機器にも搭載されるようになった。エラストグラフィは、標的部位へ圧力または応力を与えたときの応答から硬さ(弾性率)を画像化する方法である。

X線イメージングは、MRやUSイメージングと比較して高い空間分解能と透過力を持ち、深部や小さい病変に対してメリットがあるが、今までX線イメージングを用いたエラストグラフィはほとんど報告例がない。

本発表では、X線イメージングによりエラストグラフィを行うことで、高空間分解能かつ深い部位まで画像化可能なエラストグラフィ法が、実現可能か実証した結果について報告する。今まで、図1に示すように、X線吸収イメージングとエラストグラフィを組み合わせ、二次元面内での貯蔵弾性率を画像化することに成功した。また、回折格子干渉計を用いた、CTエラストグラフィおよび、放射光結晶干渉計を用いたCTエラストグラフィの試みについて報告する。

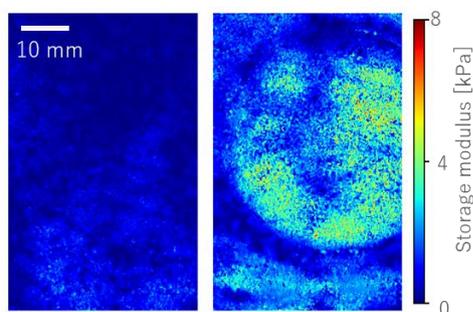


図 1. 実験室X線源を用いて測定した貯蔵弾性率マップ。左：ファントムA、右：ファントムB



図 2. 実験室回折格子干渉計を用いて測定したラットの肝臓のCT像

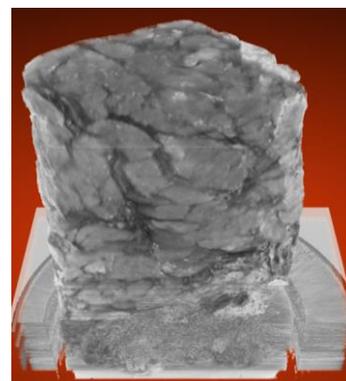


図 3. 結晶干渉計を用いて測定した豚の乳腺のCT像

### 参考文献

- [1] K. J. Parker, S. R. Huang, R. A. Musulin, R. M. Lerner and K. J. Parker, *Ultrasound in Med. & BioL.*, 16, 241, (1990)
- [2] R. M. Lerner, S. R. Huang and K. J. Parker, *Ultrasound in Med. & BioL.*, 16, 231, (1990)
- [3] Y. Yamakoshi, J. Sato and T. Sato, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroel. Freq. Control*, 17, 45, (1990)
- [4] R. Muthupillai, DJ Lomas, PJ Rossman, JF Greenleaf, A Manduca and RL Ehman, *SCIENCE*, 269, 1854, (1995)

# 位相イメージングを用いたX線エラストグラフィの基礎的検討

亀沢 知夏<sup>1,2,3</sup>, 米山 明男<sup>4</sup>, 矢代 航<sup>3</sup>, 兵藤 一行<sup>1,2</sup>  
 総研大<sup>1</sup>, KEK<sup>2</sup>, 東北大多元研<sup>3</sup>, 佐賀大<sup>4</sup>

## 目次

1. エラストグラフィとは
2. 目的
3. 実験室X線源を用いたX線エラストグラフィ (吸収) の実験方法
4. 計算過程と結果
5. 位相コントラストイメージングを用いたX線エラストグラフィの試み
  - ・結晶干渉計を用いたX線エラストグラフィ
  - ・回折格子干渉計を用いたX線エラストグラフィ
6. 今後の展開とまとめ

### 1. エラストグラフィとは 3/20

#### エラストグラフィ：非侵襲的に硬さを画像化する

超音波エラストグラフィ

Abbasi Samani et al., Phys. Med. Biol. 52, 1565, (2007)

MR エラストグラフィ

肝臓のMRE画像

Comb-push excitation

肝臓のU SE画像

GEヘルスケアホームページより引用

### 2. なぜX線イメージングでエラストグラフィ? 4/20

#### 高空間分解能かつ深い部位まで侵入可能

空間分解能 [μm]

侵入深さ [cm]

→より小さな病変を見つけることができる可能性がある。

**目的**  
 X線エラストグラフィ：  
 エラストグラフィをX線イメージングにより行い、試料内部のずり弾性率を画像化することが可能か実証する

PAT: 光超音波 (Photoacoustic computed tomography)  
 US: 超音波 (Ultrasound imaging)  
 OCT: 光コヒーレンストモグラフィ (Optical computed tomography)  
 参考にして編集 <http://biophotronics.bccrc.ca/index.php/research/>

### 3. 実験室X線源を用いたX線エラストグラフィ (吸収) の実験方法 5/20

X線源 (株) リガク 回転筒式X線発生装置 UltraX18 (最小光源サイズ: 100 μm角) 50 kV, 24 mA, W target

Phantom A: シルコ粉末  
 Phantom B: 5% アクリルアミドゲルの中に一部6%アクリルアミドゲルを含む (φ55mm)

フラットパネル: Dexcela 2923  
 画素サイズ: 74.8 μm  
 有効画素: 290.83 mm × 229.79 mm  
 シンチレータ: 希土類蛍光体 (GOS: Gd2O2S:Tb3+)  
 厚さ: 150 μm

拡大系のため、サンプル位置でのピクセルサイズ: 30 μm

### 4. 計算過程と結果 6/20

投影像

変位画像

弾性率画像

※本実験の性能  
 空間分解能: 75 μm程度 (MRE: 1mm程度、USE: 数百μm程度)  
 平行性が高いX線が必要 (放射光が適している)  
 複数回測定による精度: 30%  
 露光時間: 2.2秒 (MRE: 数十秒~数分程度)  
 線量: 2.78mGy (フィルターにより0.70mGyまで削減可)

## 位相コントラストイメージング + X線エラストグラフィ

軽元素をコントラスト良く撮影  
 生体内部の振動の様子をとらえることができる

### 5. 結晶干渉計を用いたX線エラストグラフィの試み 8/20

#### 結晶干渉計 + X線エラストグラフィ

結晶干渉計  
 位相コントラストイメージングの中でも最も密度分解能が高い (0.7 mg/cm<sup>3</sup>程度)  
 → サンプル中の振動状態を識別するための多くの指標が利用可  
 ・平行性が高いX線が必要 (放射光が適している)  
 光路長差がX線の波長 (約0.1 nm) より小さいスケールで安定が必要  
 ・位相シフト (Δp) を検出する

$$I_i = I_0 + I_r + 2\sqrt{I_0 I_r} |\cos(\Delta p)|$$

$I_i$ : 干渉ビームの強度  
 $I_r$ : 参照波の強度  
 $I_0$ : サンプルを透過した物体波の強度  
 $\gamma$ : 干渉ビームの複素コヒーレンス度  
 $\Delta p$ : 位相シフト

Double crystal monochromator  
 Asymmetrical Si(220) crystal  
 X-ray Crystal Interferometer  
 Detector

Si (220) のラウエ回折と透過X線を利用。  
 重さ2t 長さ1.5m程度

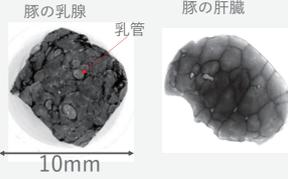
米山明男, 総合研究大学院大学博士論文, (2005).  
 E. Hecht, "Optics 2nd Edition", Addison, Wesley(1987).  
 A. Memouse et al, "Phase-contrast X-ray computed tomography for observing biological soft tissues", Nature Medicine 2, 473-475(1996).

エラストグラフィのために、内部の振動の指標がどのように画像化されるか確認

方法

試料: 豚の乳房および豚の肝臓 (どちらも生後約6か月)  
 直径10mmのストロー内部に試料をつめ、アガロースで固定。  
 使用ビームライン: PF BL-14C  
 X線エネルギー: 17.8 keV  
 検出器: Andor ZYLA 5.5HF  
 画素サイズ: 6.5 μm  
 位相ステップ: 3  
 乳房CT: 1000投影/360°  
 肝臓CT: 500投影/360°

結果



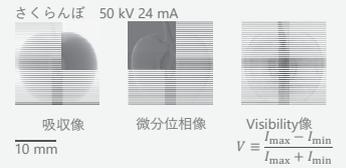
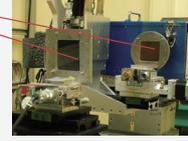
回折格子干渉計 + X線エラストグラフィ

放射光白色X線 + 高速検出器 + 回折格子干渉計

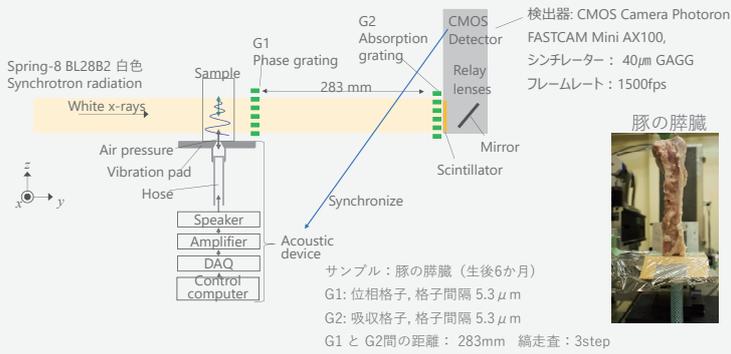
回折格子干渉計

- ・実験室X線源でも可能
- ・白色X線でも可能
- 大輝度の放射光白色X線を利用可能のため高速撮影が可能
- ・一度に3種類の画像を取得可能

回折格子 10cm角程度  
 格子状の光学素子

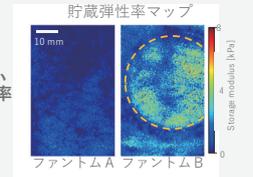


$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$



X線エラストグラフィ

エラストグラフィをX線イメージングを用いて行い、試料内部の貯蔵弾性率と損失弾性率を二次元面内で画像化することができた。



今後の放射光X線エラストグラフィの展開

- ・放射光単色X線と結晶干渉計を用いた高感度動的X線エラストグラフィの実現
  - ・放射光白色X線と回折格子干渉計を用いたリアルタイム動的X線エラストグラフィの実現
- (共通課題)  
 3次元動的X線エラストグラフィの実現

# 位相コントラスト X 線イメージング法による食品の観察

篠崎 純子

株式会社日清製粉グループ本社

## 【目的】

食品の品質を評価する際、官能評価を用いることは一般的である。食品の中でもめん類は品質評価に加えて物性測定を行い、「硬さ・弾力・もろさ」を客観的指標とする場合がある。本研究では、めん類の品質で比較的重要視される「硬さ」について可視化し、品質を評価する際の一つの指標とすることを目的とし、位相コントラスト X 線イメージング法（屈折コントラスト法・DEI）の応用を試みた。

## 【方法】

測定試料は冷凍パスタとし、茹で直後冷凍、 $-20^{\circ}\text{C}$  4 週間保管、温度変化のある保管庫に 4 週間保管して表面を硬化させたものを用いた。

実験は高エネルギー加速器研究機構の放射光施設 BL14C で実施した。X 線のエネルギーは 35 keV、ビームサイズは横 30 mm・縦 30 mm、測定温度 $-20^{\circ}\text{C}$ 、サンプル浸漬溶媒は酢酸メチルを用いた。検出器は Andor Zyla（画素サイズ 6.5 ミクロン、画素数 2560×2160 蛍光体 CsI 100 ミクロン）、計測は Bin 2×2（13 ミクロン）、露光時間 0.5 秒、DEI 送り点数 17 点 15pls、投影数 500 投影/360 度にて行った。

## 【結果】

官能評価では、茹で直後と $-20^{\circ}\text{C}$  4 週間保管の冷凍パスタは、外側は柔らかく中の方が硬い食感であり、温度変化のある環境で保管した冷凍パスタは外側が非常に硬い食感であった。同じ条件で保管した冷凍パスタを位相コントラスト X 線イメージング法で観察した結果、官能評価で硬いと感じた部分を密度の高低で示すデータを得ることができた。以上の結果より、位相コントラスト X 線イメージング法は食品の硬さを可視化する手段として有効であると考えられる。今後は、より高感度な X 線干渉法の応用も検討する。

# 位相コントラスト X 線 イメージング法による食品の観察

<sup>1</sup> (株) 日清製粉グループ本社, <sup>2</sup> (国研) 産総研, <sup>3</sup> (株) 日立製作所  
○篠崎純子<sup>1</sup>, 竹谷敏<sup>2</sup>, 馬場理香<sup>3</sup>

1

## 【研究の背景】

- 食品の品質を評価する際、官能評価を用いることが一般的である
- めん類は品質評価に加えて物性測定を行い、「硬さ・弾力・もろさ」を客観的指標とする場合がある
- 食感を可視化する技術として、応力を利用した物性測定(破断強度測定)、MRIによる水分分布測定などがある

## 【研究の目的】

- 本研究では、
- めん類の品質で比較的重要視される「硬さ」の可視化
  - 野菜の「食感」を可視化

することで、品質を評価する際の一つの指標とすることを目的とし、**位相コントラスト X 線イメージング法**(屈折コントラスト法・DEI) の応用を試みた。

## メリット

- 従来分析技術と併せることで、官能評価をよりわかりやすく説明できる
- 数値化、可視化することで客観的に評価できる

サンプル：冷凍パスタ・冷凍ニンジン

2

## 【材料と方法】

### 冷凍パスタ (1.7 mmのロングパスタ)

- 調製方法：乾燥パスタを茹でて水出し、-40℃の庫内で1本ずつを急速凍結した後、包装した
- 保管条件：①茹でたて(保管なし) ②-20℃温度一定 1ヶ月  
③家庭用冷凍庫 1ヶ月 ④-20℃⇔-3℃の繰り返し

### 冷凍ニンジン

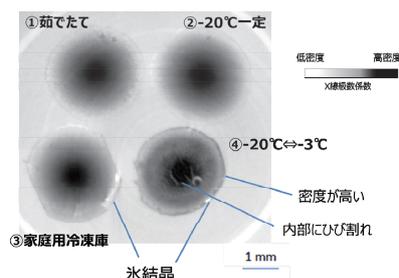
- 硬化処理 ① 乳酸Ca 0.5%溶液 + 静置浸漬 15分 ② 乳酸Ca 0.5%溶液 + 減圧浸漬 15分  
③ 60℃に温めた水道水 15分浸漬 ④ 無処理
- 茹で・凍結  
前処理したニンジン煮沸水中で茹でて水冷-40℃の庫内で急速凍結し、サンプルとした

測定：高エネルギー加速器研究機構放射光施設BL14C

X線エネルギー	35 keV
ビームサイズ	横 30 mm, 縦 30 mm (3.5度の非対称絞束により機方向に5倍に拡大)
クライオ温度	-20℃
溶媒	酢酸メチル
検出器	AndorZyla (画素サイズ6.5ミクロン、画素数2560x2160) (蛍光体Cs100ミクロン) 計測はBin 2x2 (13ミクロン)
露光時間	0.5秒
DEI送り点数	17点、15 pls
投影数	500投影/360度

3

## 【パスタの結果】

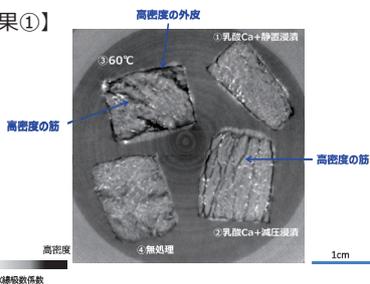


### 官能評価と観察結果の比較

	官能評価	観察
①茹でたて(保管なし)	内側は硬く、外側が軟らかい (アルデンテ)	内側の密度が高い 外側の密度が低い
②-20℃温度一定 1ヶ月	内側は硬く、外側が軟らかい (アルデンテ)	内側の密度が高い 外側の密度が低い
③家庭用冷凍庫 1ヶ月	やや硬く、しまっている	最外層の一部がやや高密度化している
④-20℃⇔-3℃の繰り返し	硬く、ガミーな食感	最外層が高密度化している

4

## 【ニンジンの結果①】



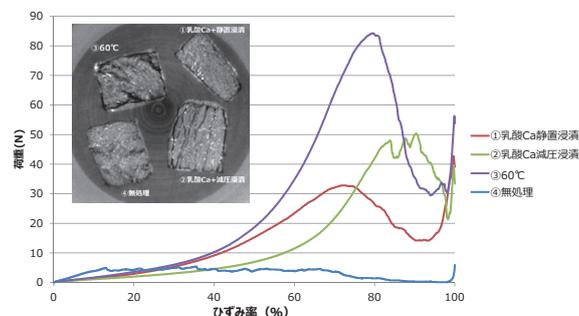
### 官能評価と観察結果の比較

	官能評価	観察
①乳酸カルシウム + 静置浸漬	外側が硬く 内側が軟らかい	外側の密度が高い
②乳酸カルシウム + 減圧浸漬	外側が硬く、筋っぽい 内側が軟らかい	外側の密度が高い 層状に密度が高い部分あり
③60℃の水道水に浸漬	外側が非常に硬く、 筋っぽい	外側の密度が高い 層状に密度が高い部分あり
④無処理	全体的に軟らかい	①~③と比較して密度の高い部分が少ない

5

## 【ニンジンの結果②】

### ニンジンの物性測定値



物性測定の波形と画像を組み合わせることで、硬さ、筋っぽさをよりわかりやすく示すことができる。

6

## 【総括】

### ◆冷凍パスタ

- 本手法(位相コントラスト X 線イメージング法)で示された密度の高い部分は官能で硬いと感じる部分と概ね一致していた

### ◆ニンジン

- 本手法で示された密度の高い部分は官能で硬いと感じる部分と概ね一致していた
- 官能評価で筋っぽいと感じた検体は、層状の密度が高い部分が観察できたことから、「筋っぽさ」についても可視化できる見込みがある

本分析手法と物性測定などを組み合わせることで、  
官能評価(主に食感)を  
より分かりやすく示すことができると考える。

7

## 参加者リスト

番号	氏名	所属名
1	穉場 亨	株式会社日産アーク
2	足立 伸一	KEK物質構造科学研究所
3	阿部 充志	KEK超電導低温工学センター
4	雨宮 健太	KEK物質構造科学研究所
5	一田 昌宏	豊橋市自然史博物館
6	内田 誠	東京工業大学理学院
7	梅原 康敏	東京エレクトロン株式会社PF開発部
8	岡野 哲之	パナソニック株式会社エナジーテクノロジーセンター
9	沖 充浩	株式会社東芝
10	柿山 創	東レ株式会社先端材料研究所
11	亀沢 知夏	KEK物質構造科学研究所
12	河村 力	マツダ株式会社技術研究所
13	岸本 俊二	KEK物質構造科学研究所
14	木村 正雄	KEK物質構造科学研究所
15	工藤 博幸	筑波大学
16	黒岡 和巳	パナソニック株式会社
17	河野 哲朗	日本大学松戸歯学部
18	小杉 信博	KEK物質構造科学研究所
20	小西 くみこ	株式会社日立製作所
21	小山 拓	東京理科大学兼松研究室
22	近藤 敏啓	お茶の水女子大学基幹研究院
23	榊 篤史	日亜化学工業株式会社研究開発本部
24	桜井 郁也	名古屋大学シンクロトロン光研究センター
25	真田 貴志	株式会社日産アーク機能解析部
26	篠崎 純子	日清製粉グループ本社 R&D
27	末広 省吾	株式会社住化分析センター
28	杉山 信之	あいち産業科学技術総合センター共同研究支援部
29	宋 哲昊	株式会社日産アーク
30	高尾 直樹	株式会社ダイセル
31	高橋 浩	昭和電工株式会社
32	高橋 弘充	広島大学先進理工系科学研究科
33	高橋 由美子	日本大学量子科学研究所
34	高松 大郊	株式会社日立製作所研究開発グループ

35	竹谷 敏	産業技術総合研究所
36	谷田 肇	日本原子力研究開発機構
37	谷林 宏紀	日亜化学工業株式会社
38	塚越 詩織	雪印メグミルク株式会社ミルクサイエンス研究所
39	Thet Thet Lwin	北里大学
40	中尾 裕則	KEK物質構造科学研究所
41	西村 龍太郎	KEK物質構造科学研究所
43	野村 昌治	KEK
44	橋本 康	東北大学多元物質科学研究所
45	馬場 理香	株式会社日立製作所研究開発グループ
46	原田 研	理化学研究所創発物性科学研究センター
47	春木 理恵	KEK物質構造科学研究所
48	東 直	KEK加速器研究施設
49	兵藤 一行	KEK物質構造科学研究所
51	平野 馨一	KEK物質構造科学研究所
52	平野 辰巳	京都大学産官学連携本部
53	福住 勇矢	筑波大学大学院数理物質科学研究科
54	船守 展正	KEK物質構造科学研究所
56	古田 典利	株式会社SOKEN
57	本田 融	KEK加速器研究施設
58	松浦 晃洋	藤田医科大学研究統括監理部
59	松野 信也	旭化成株式会社基盤技術研究所
60	水野 善之	あいち産業科学技術総合センター共同研究支援部
61	村井 崇章	あいち産業科学技術総合センター
62	諸野 祐樹	海洋研究開発機構高知コア研究所
63	矢代 航	東北大学多元物質科学研究所
64	安田 みどり	西九州大学健康栄養学部健康栄養学科
65	山口 博隆	産業技術総合研究所先進パワーエレクトロニクス研究センター
66	山口 豊	京都大学大学院医学研究科
67	山田 重人	京都大学大学院医学研究科
68	湯浅 哲也	山形大学大学院理工学研究科
69	与儀 千尋	株式会社村田製作所
70	吉川 真一	不二製油グループ本社株式会社未来創造研究所
71	米山 明男	九州シンクロトロン光研究センター
73	若林 大佑	KEK物質構造科学研究所