

NanoTerasu 利用研究検討委員会  
報告書（2024 年度）

令和 6 年 3 月 28 日

NanoTerasu 利用研究検討委員会

## 目次

はじめに

### 試験的共用課題報告

- 1) BL02U：軟 X 線超高分解能共鳴非弾性散乱ビームライン
  - 1-1) 「オペランド計測系の導入による超高分解能 RIXS のマルチモーダル化」  
課題責任者：原田慈久（東京大学・教授）
  - 1-2) 「銅酸化物高温超伝導体の集団励起の観測による RIXS 装置性能の実証」  
課題責任者：鈴木博人（東北大学・助教）
  - 1-3) 「超高エネルギー分解能 RIXS による銅酸化物高温超伝導体の素励起研究に向けた BL02U の活用推進」  
課題責任者：藤田全基（東北大学・教授）、石井賢司（量研・上席研究員）
- 2) BL06U：軟 X 線ナノ光電子分光ビームライン
  - 2-1) 「ナノ空間電子計測による新奇トポロジカル量子現象の解明」  
課題責任者：佐藤宇史（東北大学・教授）
  - 2-2) 「外場印加を活用した顕微スピン ARPES 装置の開発」  
課題責任者：奥田太一（広島大学・教授）、岩澤英明（量研・上席研究員）
  - 2-3) 「BL06U 原子層物質科学のための顕微 ARPES システム構築」  
課題責任者：石坂香子（東京大学・教授）
- 3) BL13U：軟 X 線ナノ吸収分光ビームライン
  - 3-1) 「分割アンジュレータを活かした X 線分光法の開拓」  
課題責任者：松田巖（東京大学・教授）
  - 3-2) 「軟 X 線ナノ吸収分光のためのギガピクセル X 線顕微鏡」  
課題責任者：小野寛太（大阪大学・教授）
  - 3-3) 「コンビナトリアル XMCD 分析基盤の開発」  
課題責任者：境誠司（量研・上席研究員）、上野哲朗（量研・主幹研究員）
  - 3-4) 「NanoTerasu BL13U におけるオペランド自動顕微測定システムの構築」  
課題責任者：一杉太郎（東京大学・教授）

### 【別添資料】

- |        |                           |
|--------|---------------------------|
| 別添資料 1 | NanoTerasu 利用研究検討委員会委員名簿  |
| 別添資料 2 | NanoTerasu 利用研究検討委員会の開催状況 |

## はじめに

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 QST（以下「QST」という。）が国の主体として整備している 3 GeV 高輝度放射光施設 NanoTerasu（以下「NanoTerasu」という。）の共用ビームラインでは、建設後の立ち上げから本格的共用開始までの間に、ビームラインおよびエンドステーションの立ち上げ・調整を進めると共に、試験的な利用実験を行い確実に本格的共用のユーザー利用へと繋げることを目的として、試験的共用課題を実施することとした。課題の選定にあたっては、装置の立ち上げにも協力が見込まれる潜在的ヘビーユーザーを候補者として、2023 年度「次世代放射光施設利用検討委員会」において木村昭夫委員長（広島大学教授）のもとヒアリングを行い決定した。

試験的共用課題は 2024 年 5 月より 2025 年 2 月までの期間で実施され、ビームラインおよびエンドステーションの立ち上げ・調整や、利用実験へのフィードバックなどに大きな貢献を果たし、2025 年 3 月 9 日に本格的共用を開始するに至った。本報告書は試験的共用課題の各課題における実施計画および実施報告の資料を取り纏めたものである。

# オペランド計測系の導入による 超高分解能RIXSのマルチモーダル化

提案者

原田 慈久

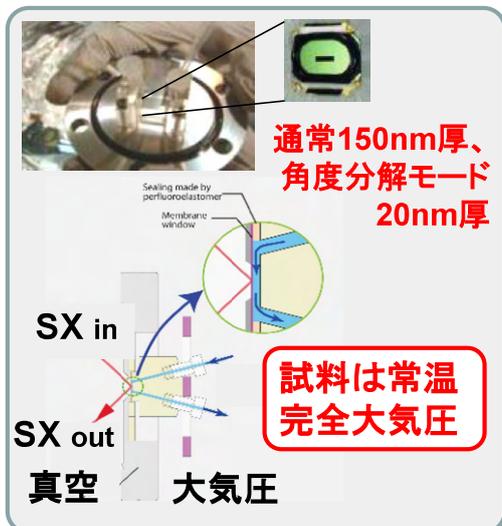
木内 久雄

東京大学シンクロトロン放射光連携研究機構  
東京大学物性研究所軌道放射物性研究施設

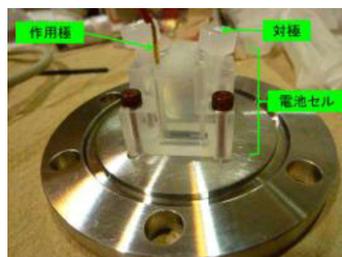
## 試験的共用課題の目的

RIXSの強みを徹底的に活かすため、様々な試料環境を整備し  
共用実験に提供する

### 1. 真空隔離膜による大気圧分光

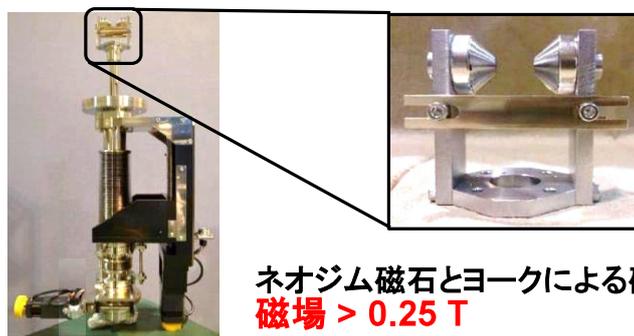


### 2. 電気化学オペランドセル



角度分解型検出によって、  
様々な界面で10-1000nm  
の深さ分解測定を実現

### 3. 電場・磁場印加測定装置



# 試験的共用課題の目的

## I. 固体・強相関物質科学への展開

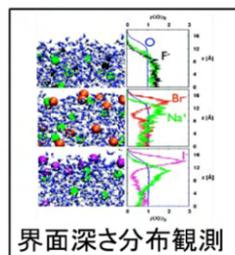
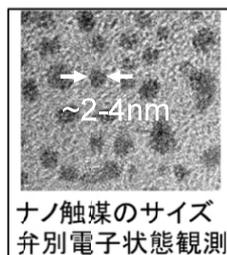
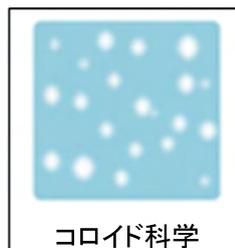
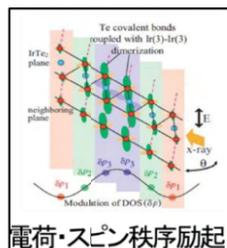
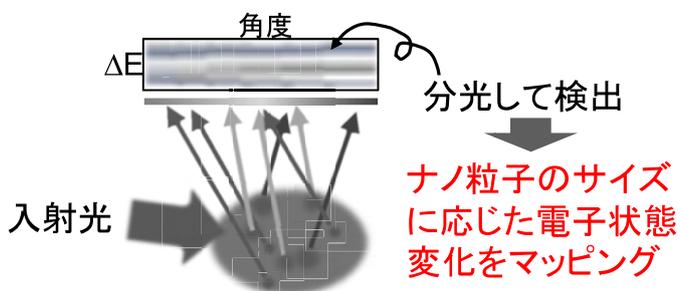
発光を用いて**10-20meV分解能で準粒子を観測**。  
エネルギー、温度、偏光、試料依存の情報を駆使

発光で観測する準粒子

対象物質群	準粒子	波及効果・意義
磁性誘電体	電気マグノン	ピコ秒スケールの電場による磁気制御
軌道整列物質	軌道励起	磁気熱量効果、電子ネマティック相互作用を利用した超伝導
かご状物質等	ラットリング	ラットリング超伝導、高効率熱電素子
半導体、磁性体等	スピン励起	スピントロニクス
水素結合型誘電体	プロトン-電子分極連成波	有機エレクトロニクス素子

## II. 材料・触媒科学への展開

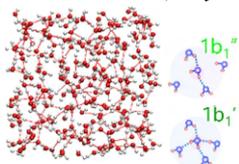
X線非弾性回折過程による角度情報を  
nm オーダーのナノ粒子サイズ分布や、  
マイクロ不均一系のサイズ同定に利用する。



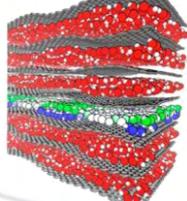
# 試験的共用課題の目的

## III. 水とガスの次元横断解析

3D バルク水 T. Tokushima *et al.*, CPL 460 387 (2008).

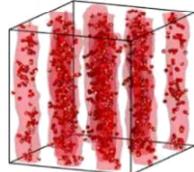


2D 界面での化学反応促進



M. Ahmed *et al.*, JPCB 125, 9037 (2021).

1D



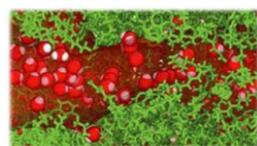
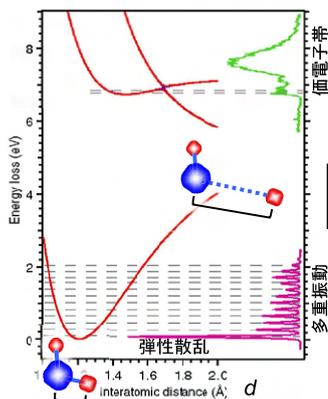
異方的な拡散現象

Y. Ishi *et al.*, Sci. Adv. 7, eabf0669 (2021).

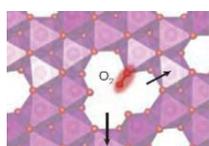


水分子の閉じ込め

K. Kurotobi *et al.*,  
Science 333, 613 (2011).



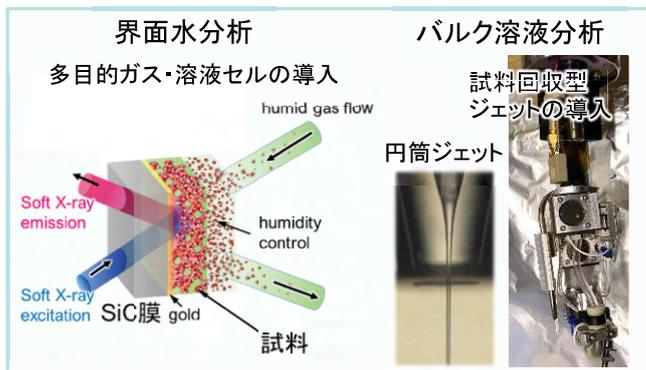
H<sub>2</sub>O libration: 20-50 meV



Trapped O<sub>2</sub>: 30 meV shift

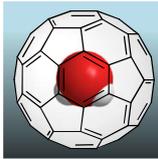
軟X線多重振動分析で水やガス分子が  
分子内外で相互作用する様子を捉える

液体試料の安全な導入



# 試験的共用課題の目的

## III'. 真空中で対応可能な実験

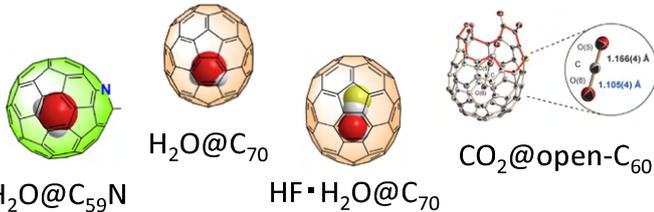


水分子の閉じ込め

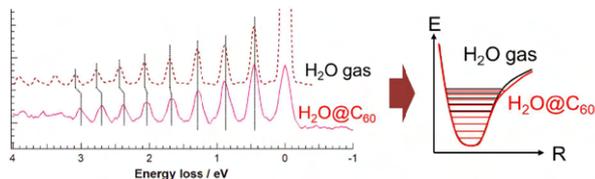
K. Kurotobi *et al.*,  
Science 333, 613 (2011).

with 橋川祥史助教@京大

ケージ形状や閉じ込め分子のバリエーションが豊富かつ精密に制御可能



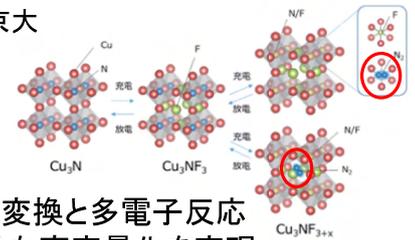
閉じ込め分子の構造やケージとの相互作用を多重振動&価電子分布から精密に解析



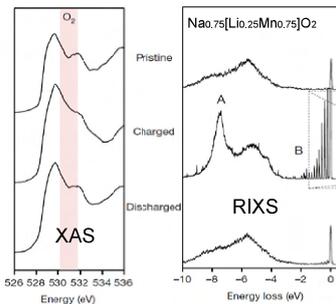
Aquatic Functional Materials 原田・計画班代表

$O^{2-} \rightarrow O_2$       電気化学的ホール導入に伴う  
 $N^{3-} \rightarrow N_2$       アニオン-分子変換反応を用いた電極材料  
 $S^{2-} \rightarrow S_2$

H. Miki, J. Miyawaki, Y. Harada, Y. Uchimoto *et al.*, JACS accepted.  
with 内本喜晴教授@京大



アニオン-分子の可逆変換と多電子反応により、電極の画期的な高容量化を実現



R. A. House *et al.*, Nature 577, 502 (2020).

充放電に伴うアニオン・分子の閉じ込め状態変化をXAS/RIXSと多重振動により解析

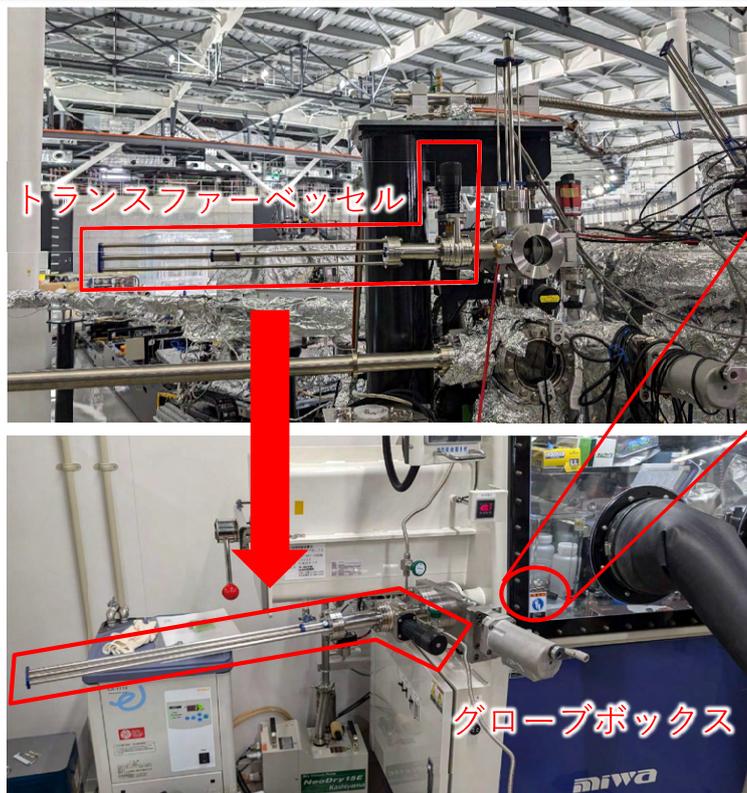
SUPRACERAMICS 木内・計画班分担

## 立ち上げ目標に対してどの観点から貢献できるか

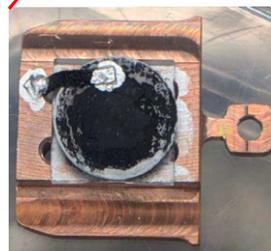
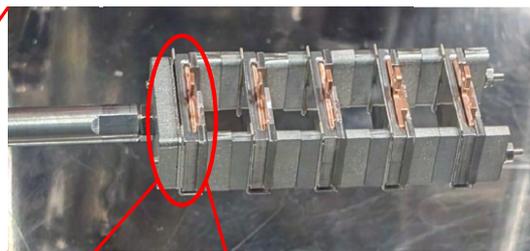


- ◆ **世界最高性能の超高分解能を活かす利用戦略**  
 多重振動解析 ex) H<sub>2</sub>O libration 20meV@540eV (E/ΔE ~ 25000)  
 分子閉じ込め、固体中の分子生成
- ◆ **超精密角度分解測定機能を活かす利用戦略**  
 X線非弾性回折の実証とナノ触媒、コロイドのサイズ弁別分析
- ◆ **オペランド計測や溶液計測系の立ち上げ**  
 電子強相関係など超高真空を必要とする材料との棲分け検討

# 大気非暴露かつ低温計測の実証@BL02U



サンプルバンク



SrFeO<sub>2</sub>F<sub>x</sub>, x=2.0  
(京大内本Gr. 提供)

銀ペーストを用いて固定

- ・トランスファーベッセルをグローブボックスに取り付けて大気非暴露搬送
- ・ペレット電池を短絡させずにAgペーストを用いて固定して<40 Kの低温測定

## 粉末試料の試料スキャン測定手順の確立@BL02U

1. 光軸直交軸からセオドライトを用いてサンプル表面位置 (X軸,  $\theta$  軸) を決定
2. 補償電流を用いて2D mapping (X軸, Z軸)を実施 (右側に参考図) し、測定するX軸とZ軸の範囲を決定
3. 測定する試料回転 $\theta$ に移動
4. 測定開始位置及び終了位置で光軸方向の試料スキャンを行い、弾性散乱の幅が最小となる位置を決定
5. X軸、Y軸、Z軸を連動した試料スキャンを行い、RIXS測定を行う

### ・ステップスキャンによるRIXS測定

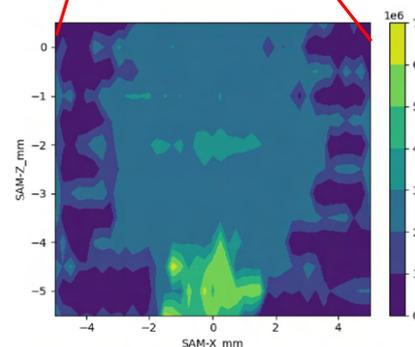
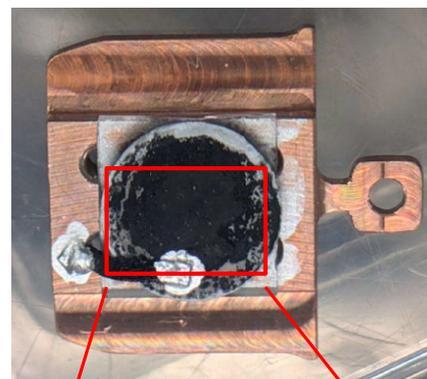
=> 試料の移動前後の測定に使わない時間が多い

### ・連続スキャンによるRIXS測定

=> 測定時間の短縮に有効

試料揺動用マクロを新規準備

RIXS測定ソフト側のエラーを解消



- ・X線照射の影響がある試料を動かしながら測定することにより、X線照射の影響を低減しつつ、高分解能なO K-edge RIXSスペクトルの取得に成功
- ・試料を動かすとスペクトルの横軸が動いてエネルギー分解能が低下するため、弾性散乱を用いた補正が必要

# 銅酸化物高温超伝導体の集団励起の観測による RIXS装置性能の実証 実施報告書



東北大学  
学際科学フロンティア研究所  
Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences

鈴木 博人

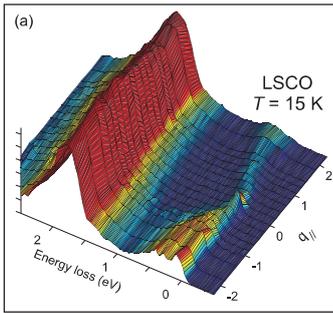
## アウトライン

- ・ 試験的共用課題の目的（想定しているサイエンスや開発目標）
- ・ ビームラインの立ち上げ目標に対してどの観点から貢献できるか
- ・ 投入可能なエフォート（人材の数、学生・若手スタッフの数と期間）とスケジュール
- ・ 一般市民にアピールすることができる研究成果のアイデアの提示（あれば）

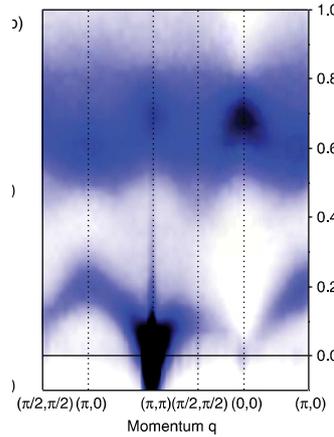
## 試験的共用の目標

### 目標

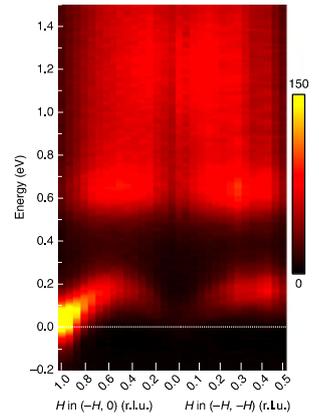
- 2D-RIXSを用いて集団励起を観測し、装置性能のデモンストレーションを達成しつつサイエンスを始める。  
(最近のRIXSの発展はいつもマグノンの観測が試金石だった)



L. Braicovich et al., Phys. Rev. Lett. **104**, 821 (2010)



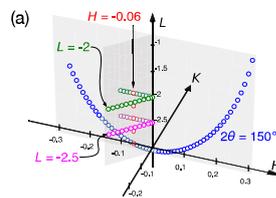
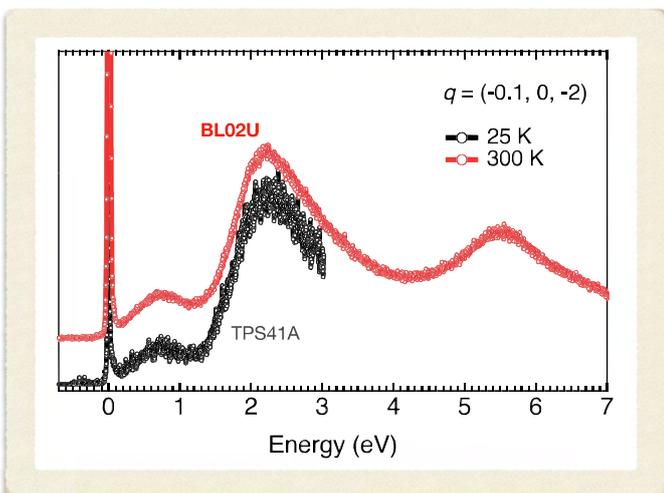
J. Kim et al., Phys. Rev. Lett. **104**, 177003 (2012)



H. Suzuki et al., Nat. Mater. **18**, 563 (2019)

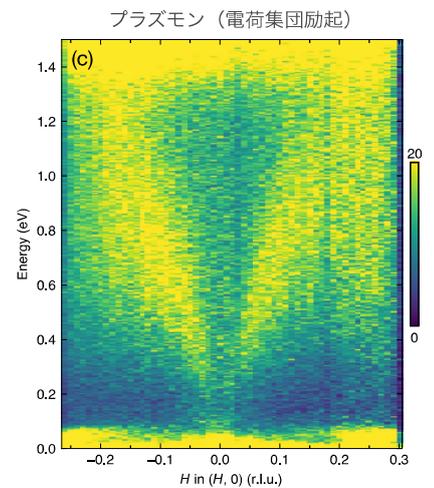
## 第2段階 (これから開始)

- 2D-RIXS装置が誇る技術的性能
  - 1. 軟X線の幅広い領域をカバー (O K端も得られる)
  - 2. Detector Armが連続回転可
  - 3. 超高エネルギー分解能



TPS41Aで同様の測定データを取得済みであったため、比較の可能なO K端の測定から始めた。

S. Nakata, K. Yamamoto, J. Miyawaki, D. J. Huang, HS et al., arXiv:2502.03779



S. Nakata, HS et al., in preparation.

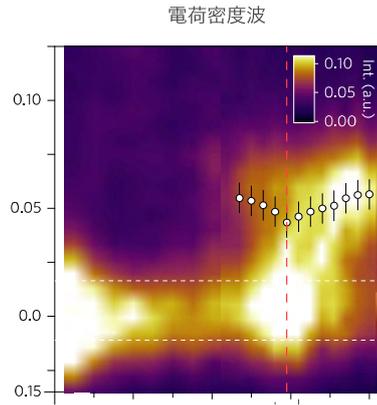
## 第1段階

- 2D-RIXS装置が誇る技術的性能

- 1. 軟X線の幅広い領域をカバーが1つのエネルギー(Cu L端930 eV)で得られる
- 2. Detector Armが連続回転可
- 3. 超高エネルギー分解能

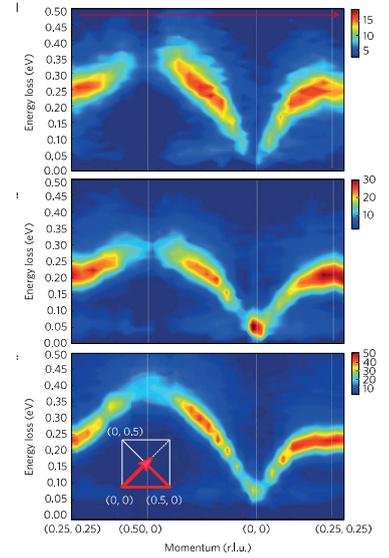


S. Nakata, K. Yamamoto, J. Miyawaki, D. J. Huang, HS et al., in preparation.



L. Chaix et al., Nat. Phys. 13, 952 (2017)

マグノン (磁気集団励起)



Y. Y. Peng et al., Nat. Phys. 13, 1201 (2017)

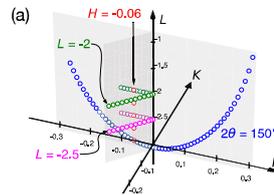
## 第3段階

- 2D-RIXS装置が誇る技術的性能

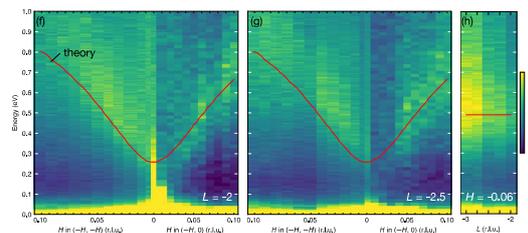
- 1. 軟X線の幅広い領域をカバー (O K端も得られる)
- 2. Detector Armが連続回転可
- 3. 超高エネルギー分解能



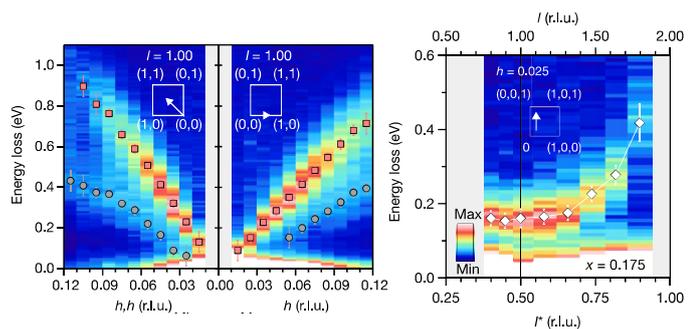
S. Nakata, K. Yamamoto, J. Miyawaki, D. J. Huang, HS et al., in preparation.



プラズモンの3次元性



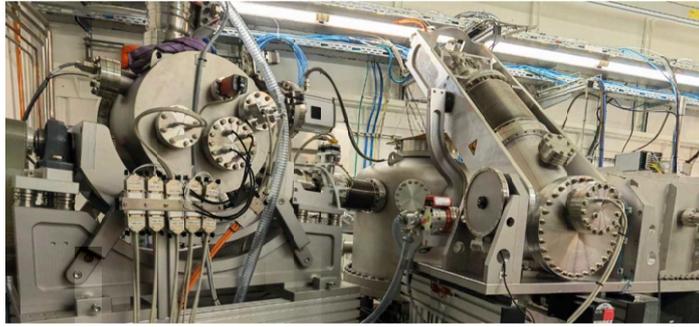
S. Nakata, HS et al., in preparation.



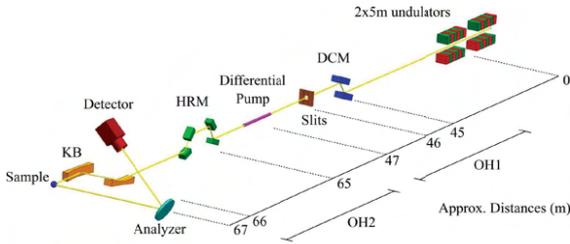
M. Hepting et al., Nature 563, 374 (2018)

# BL立ち上げ経験

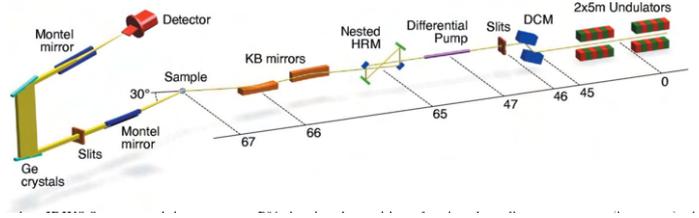
IRIXS Spectrometer



P01 PETRA III, DESY



H. Greetarsson et al., J. Synchrotron Rad. 27 (2020)



J. Bertinshaw et al., J. Synchrotron Rad. 28 (2021)

テンダーX線(光学系はほぼ硬X線) RIXS装置のコミッショニング経験あり。

軟X線の光学系は経験がありませんのでご指導お願いいたします。大変お世話になりました。

## 参加日程

	FY2023				FY2024												
	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	
ID	任意のエネルギー、偏光へ独立駆動できるように調整				ID gap vs energy table作成						table作成						
BL	焼き出し、大まかな全体確認 試料位置まで光が来るように				FESスキャン、ID光軸調整 ガスセルXAS測定、分光器粗調@400,870 eV M0とM1の集光調整、エネルギー校正				ID光軸、M0、M1、M2G総合調整								
	出射スリット調達				精密温調調達?(予算次第)												
ES	建設		ベーク		M3、M4b調整				M3、M4b総合調整				M4、Gr、CCD調整、 E/ΔE > 20,000を目指す				
	M4b、フォトダイオード、 フラックスモニター、ガスセル導入		ピンホール調達		Spectrometer (M4, Gr, CCD) の大まかな調整								2θ回転の調整				
	ガスセル据付		CCD導入		多層膜試料、結像調整用パターン調達												

他の予定(出張・授業)がない範囲で基本的に全て参加する予定。-> 実際参加した。

## 投入可能なエフォート

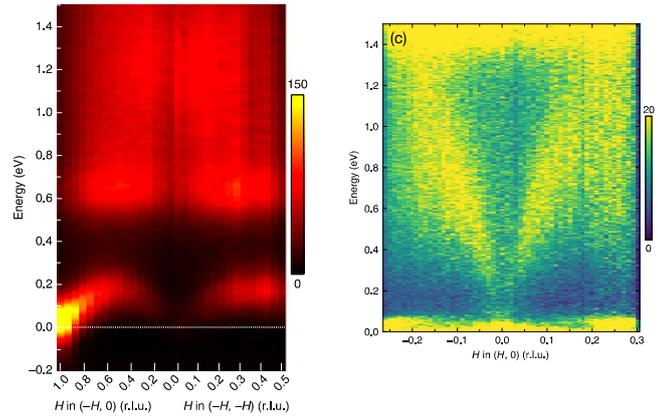
- 現在申請者のグループは本人のみ。
- 必要であれば東北大内の他のグループの学生に声をかけることも可能です。
- 光学系、装置、測定内容の物理、データ解析全て最高難度だった。進行スケジュールが読めないこと、大学院生の研究テーマとは繋げづらい開発が続いたこともあり、ほとんど学生を呼べなかったのは反省点。

## 一般市民向けの研究成果

- ある程度装置がチューニングできたら、東北大が強みを有するスピントロニクス材料の測定に進むのが応用物理・一般社会への貢献という観点でも良いと思う。
- 必要な吸収端はFe *L*端やMn *L*端など。
- Ni *L3*端を用いたファンデルワールス磁性体の位置分解RIXSに成功した。視覚的にわかりやすく、デバイス試料の測定に発展させる端緒になったと思う。
- Ce *M*端での測定にも成功した。4*f*電子系も測定可能であることがわかった。

## まとめ

- ✓ 目的：まずは銅酸化物のマグノン・プラズモン
- ✓ テンダーX線RIXSの開発経験を活かしたい。
- ✓ 申請者本人のエフォートは最大限投入可能。
  - スピントロニクス材料(Fe, Mn)への展開
- ✓ ファンデルワールス磁性体フレーク試料の位置分解RIXS
  - Ce M端でのRIXS



- QSTの皆様の光学調整に参加して2D-RIXS装置の特長を理解しながら、測定に用いる測定試料の準備、データ解析を主に担当しました（解析コードは共用ユーザーに開放）。貴重な機会を与えていただき感謝申し上げます。

# 試験的共用課題ヒアリング

2023年12月27日

QST仙台オフィス

## 超高エネルギー分解能RIXSによる 銅酸化物高温超伝導体の素励起研究 に向けたBL02Uの活用推進

東北大学金属材料研究所

藤田 全基



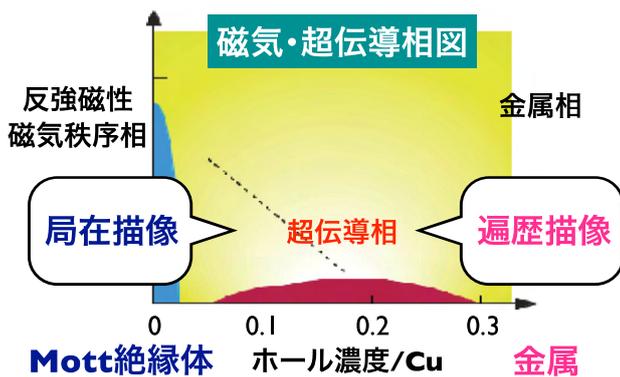
量研関西光科学研究所放射光科学研究センター

石井 賢司

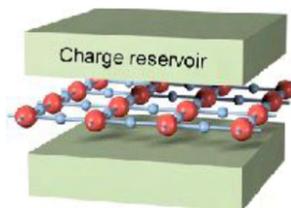


### 銅酸化物高温超伝導体の磁気励起 におけるエネルギー階層構造

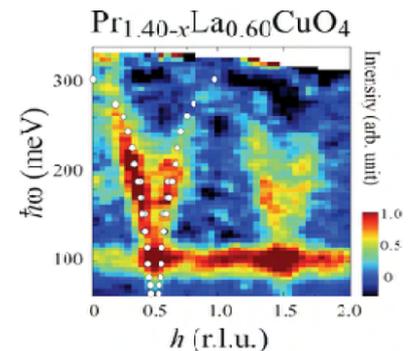
2/7



銅酸化物高温超伝導体  
二次元層状構造

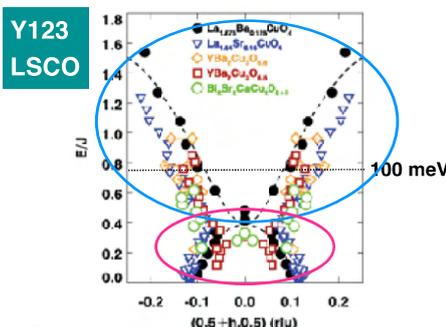


共通してCuO<sub>2</sub>面を持つ

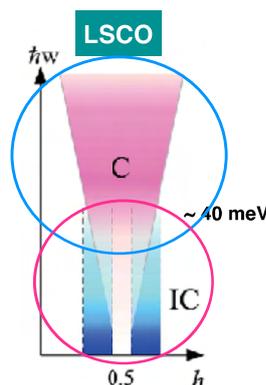


磁気励起の理解が重要

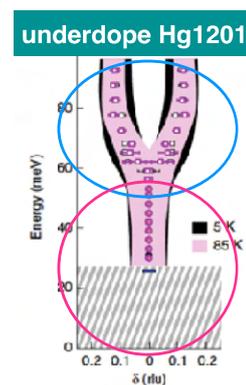
### 超伝導相の磁気励起



Reviewed in  
M. Fujita et al., JPSJ 81, 011007 (2012)



K. Sato et al., JPSJ 89, 114703 (2020)



M. K. Chan et al., Nat. Commun. 7, 10819 (2016)

高エネルギー励起

普遍性

フレームワークを決める  
相互作用に直結

低エネルギー励起

多様性

機能発現に關与



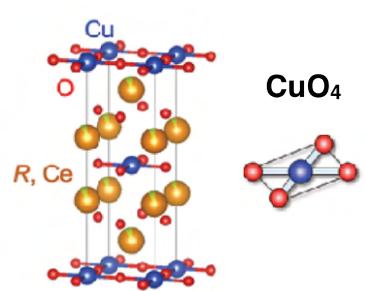
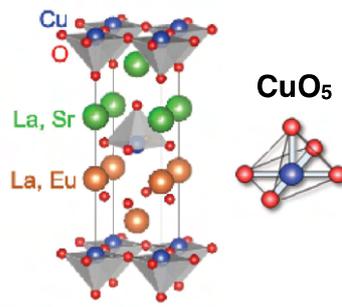
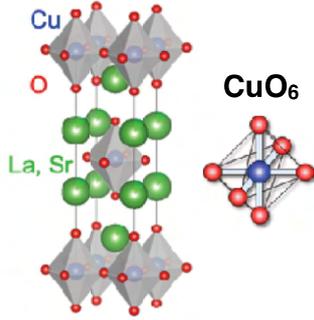
# 構造異性体の磁気・超伝導相図

## 結晶構造

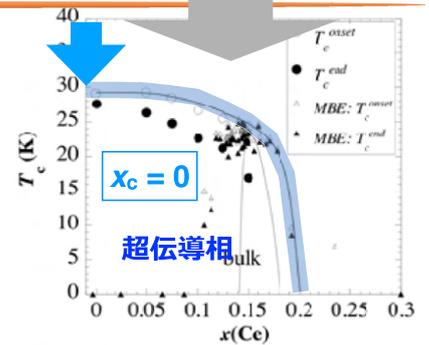
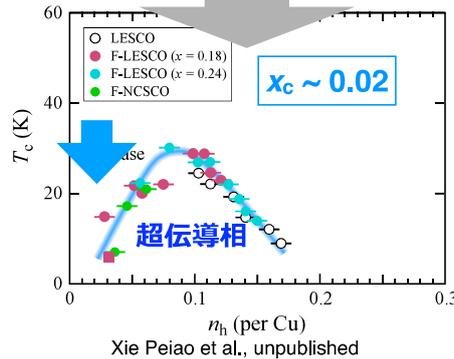
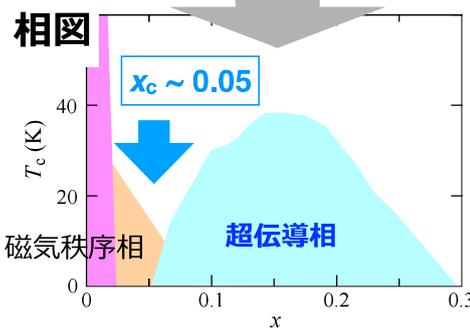
T-type  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$

T\*-type  $\text{Nd}_{1.6-x}\text{Ce}_x\text{Sr}_{0.4}\text{CuO}_4$

T'-type  $\text{RE}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$



## 相図



酸素配位数が小さい物質：磁気秩序相が存在せず、超伝導相が低ホールドープ領域で現れる

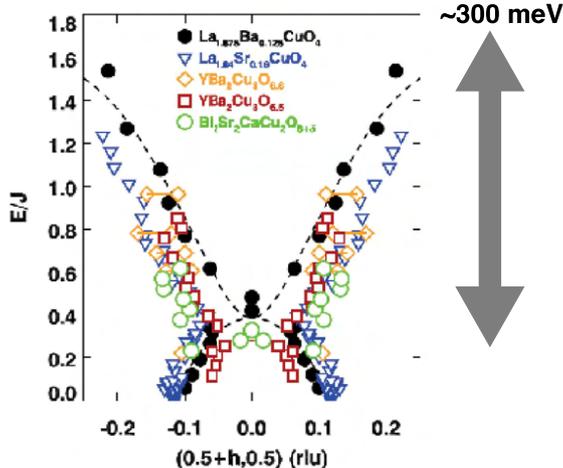
超伝導機構の共通性→低配位数物質の広エネルギー帯域の磁気・電荷励起の素性解明が鍵



# 軟X線超高分解能共鳴非弾性散乱ビームライン @NanoTerasu

電荷・軌道・スピン・格子の素励起のエネルギー分散を世界最高クラスのエネルギー分解能で探る

## ① 高エネルギー領域低分解能測定



磁気励起そのものが存在するか？  
電荷励起の特徴は？

## 低配位数物質での素励起の素性解明

- 超伝導機構に新しい視点をもたらす
- 機能性物質の開発に貢献

### 2D-RIXS Spectrometer

Primary goal is ultrahigh resolution of  $\Delta E < 10 \text{ meV}$ .

J. Miyawaki et al., J. Phys. Conf. Ser. 2380, 012030 (2022).

	Optical Design	Mechanical Design	Manufacturing	Installation	Commissioning
Beamline	Complete	Complete	Complete	Complete	April 2024
Spectrometer	Complete	Complete	Almost Complete	Oct. 2023	Sept. 2024

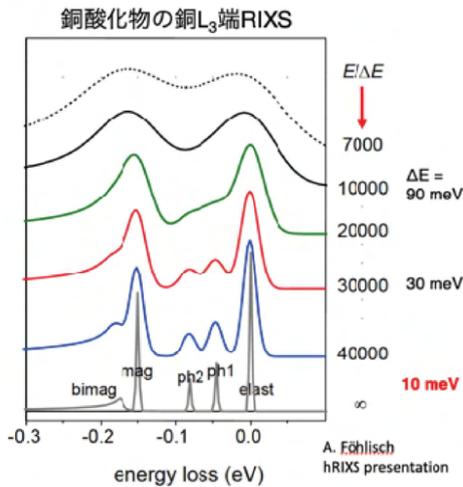


# 軟X線超高分解能共鳴非弾性散乱ビームライン @NanoTerasu

4/7

電荷・軌道・スピン・格子の素励起のエネルギー分散を世界最高クラスのエネルギー分解能で探る

## ② 低エネルギー領域高分解能測定



$\Delta E = 10 \text{ meV}$

- ・ サブ100 meVの励起が観測可能
  - ・ INSと同じエネルギー領域で相補利用
- 高エネルギー分解能化に貢献する  
→超高エネルギー分解能RIXSの実現

**2D-RIXS Spectrometer**

Primary goal is **ultrahigh resolution of  $\Delta E < 10 \text{ meV}$ .**

J. Miyawaki et al.,  
J. Phys. Conf. Ser. **2380**, 012030 (2022).

	Optical Design	Mechanical Design	Manufacturing	Installation	Commissioning
Beamline	Complete	Complete	Complete	Complete	April 2024
Spectrometer	Complete	Complete	Almost Complete	Oct. 2023	Sept. 2024



# ビームライン立ち上げに対する 試験的共用課題での関わり

5/7

## 2023年度メンバー



## 所属学生 (外国人学生6名)

博士後期課程: 8名 (D3: 7名, D2: 1名)

博士前期課程: 7名 (M2: 4名, M1: 3名)、学部4年生: 1名

## スタッフ



藤田教授



南部准教授



池田助教



谷口助教



岡部特任助教



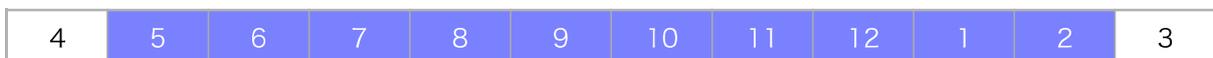
高田特任助教



QST・東北大マッチング支援事業でRIXS利用に向けた研究を遂行中

2024

2025



ビームライン調整

スピン・電荷励起の測定  
→高分解能化にフィードバック

他施設で測定に用いた試料→組成を変えた試料→テーマ開拓

装置調整の経験が活かせる

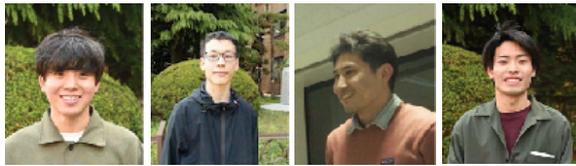
Xie Peiao (D3)、SPring-8, Diamod, PSIでRIXSの経験を有する

SLACのポスドク (予定)



# ビームライン立ち上げに対する 試験的共用課題での関わり

5/7



- Xieのテーマに近いM2一名を中心に学生四名が交代で補助する。また、助教の二名が支援する。(ただし助教の活動は前期が主。)
- 博士後期課程進学者の経験とする→将来活用する



2024

2025

4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
---	---	---	---	---	---	----	----	----	---	---	---



ビームライン調整

スピン・電荷励起の測定  
→高分解能化にフィードバック

他施設で測定に用いた試料→組成を変えた試料→テーマ開拓

装置調整の経験が活かせる

Xie Peiao (D3)、SPring-8, Diamod, PSIでRIXSの経験を有する

SLACのポスドク (予定)



# 研究成果のアピール

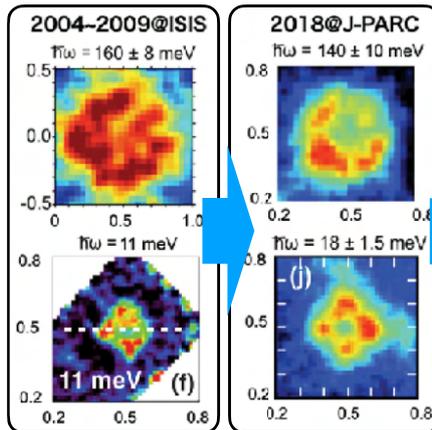
6/7

## 磁気励起研究

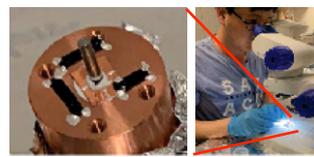
大型試料に対する  
中性子散乱実験



装置性能の向上  
による高分解能化

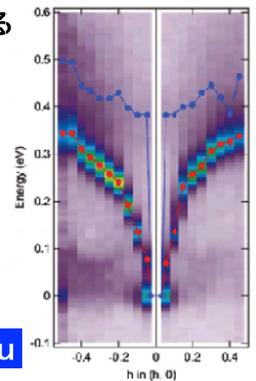


微少試料・薄膜試料に対する  
共鳴X線散乱実験



多種多様な超伝導試料で  
測定が可能→スペクトル集  
測定手法の進化 @NanoTerasu

2023@Diamond



## 超伝導現象の面白さを通じた測定技術・成果のアピールの場@大学

一般公開



物理学のフロンティア



一般公開、サイエンスエンジェル  
基礎ゼミ、物理学のフロンティア

→ 一般の方、高校生など  
→ 学部一年生



基礎ゼミ



## まとめ

### —BL02Uの活用推進—

- 試験的共用課題の目的
  - 銅酸化物高温超伝導体の磁気・電荷励起の共通性の解明
  - 高エネルギー低分解能測定（2024年度に実施）
  - 低エネルギー高分解能測定（フィジビリティスタディ）
- ビームラインの立ち上げへの貢献
  - 超高分解能RIXSの実現を見据え、高エネルギー分解能化に貢献（ビームライン調整、励起測定）
- エフォート
  - D3学生を軸にした学生×スタッフ体勢で年間通じて取り組む
- 一般市民へアピールできる研究
  - 超伝導体素励起スペクトル集の作成、アピールの場の提供

## 実施状況

TOHOKU  
UNIVERSITY

Research



# 測定内容

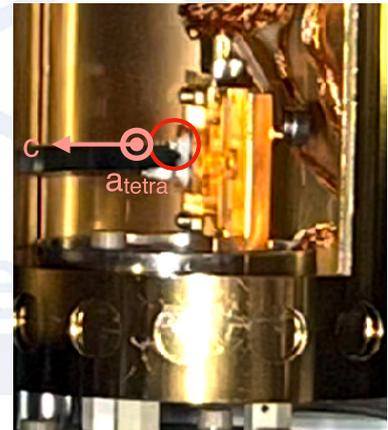
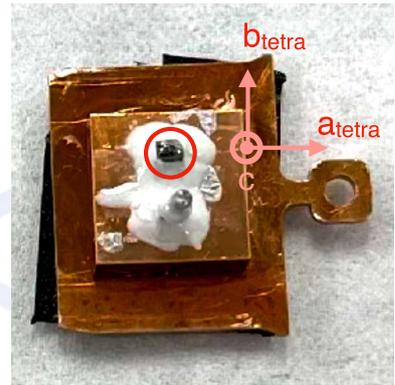
## 測定試料 : $\text{La}_2\text{CuO}_4$

- 銅酸化物高温超伝導体の母物質
- 多くのRIXS装置でベンチマークテストとして使用  
⇒ 超高エネルギー分解能RIXSのフィジビリティスタディ

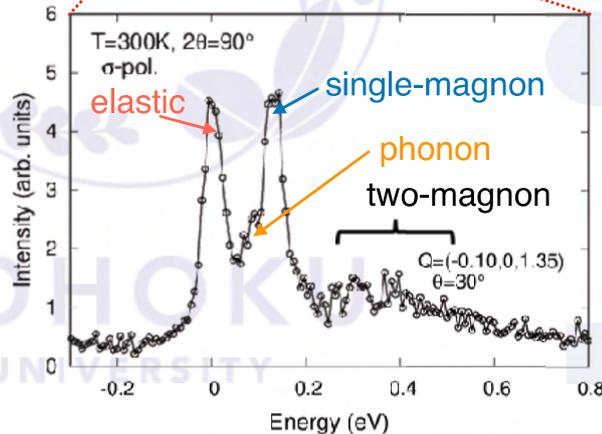
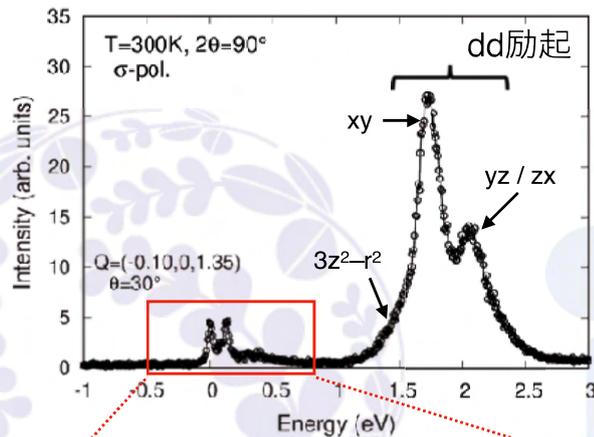
## 測定条件

$\text{La}_2\text{CuO}_4$ について既報の最高分解能 (37 meV)  
Robarts et al., PRB 103, 224427 (2021)  
を上回る33 meVでCu  $L_3$ -edge RIXSを測定。

- 大気中で劈開後、分光器に搭載
- 散乱面 //  $a_{\text{tetra}}c$ 面
- 試料温度 25 K、300 K
- 散乱角  $2\theta = 90^\circ$
- 積算時間 1スペクトルあたり ~2時間  
⇒ 偏光、温度、波数依存性を測定



# 測定結果



### 1-3 eV

- dd励起

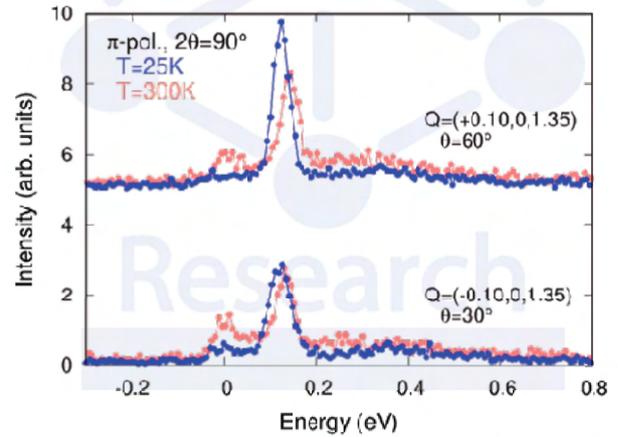
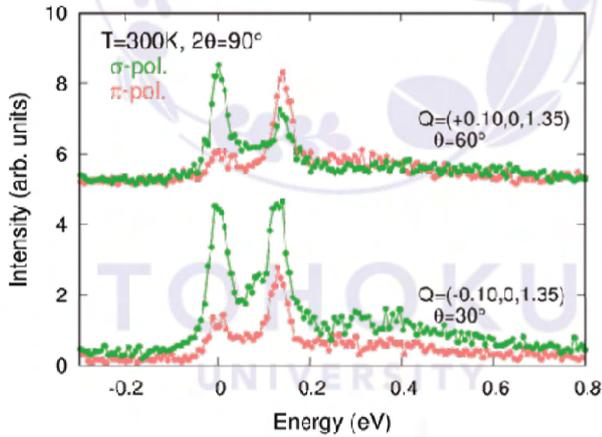
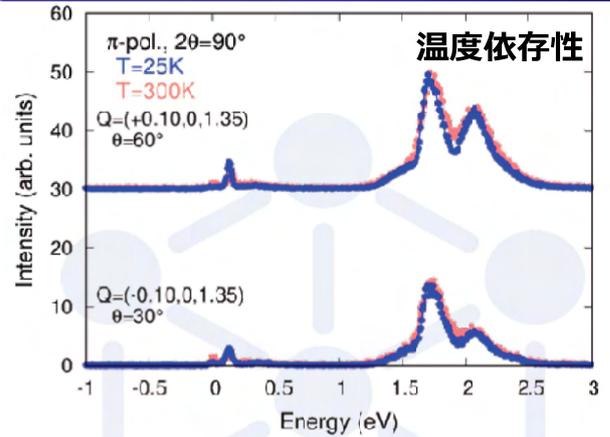
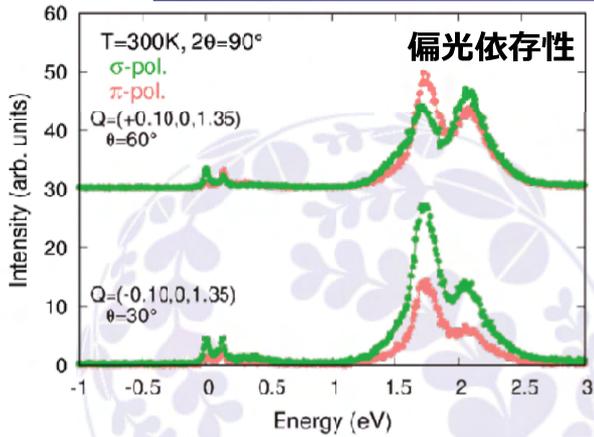
### 1 eV以下

- two-magnon
- single magnon
- phonon

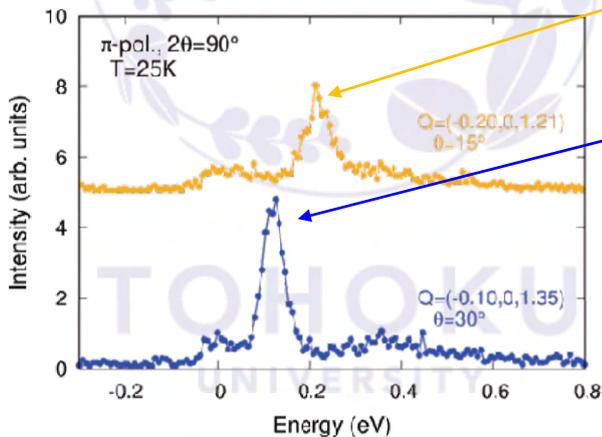
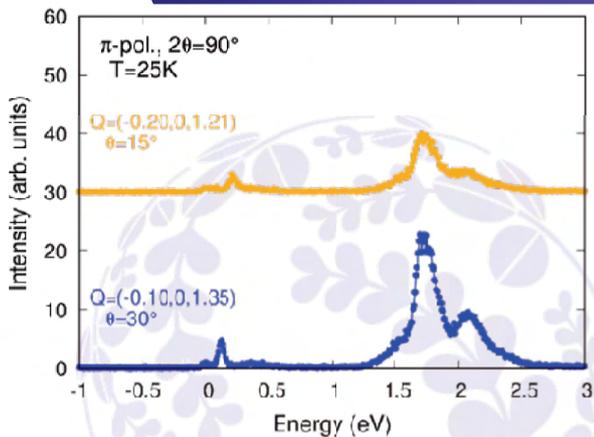
を観測



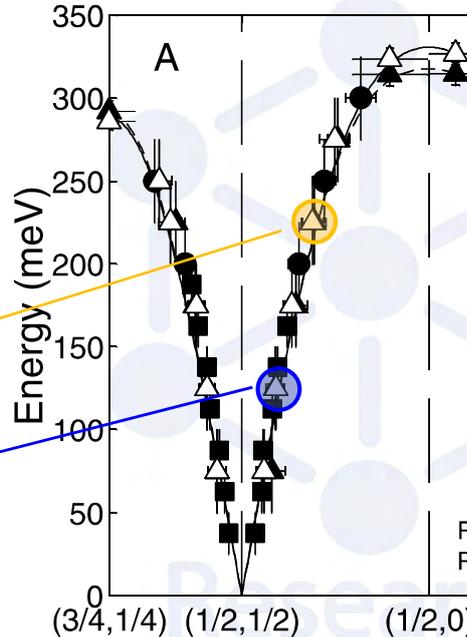
# 偏光・温度依存性



# 波数依存性



中性子非弾性散乱で得られた  
 磁気励起の分散関係



R. Coldea et al.,  
 PRL. 86, 5377 (2001)

中性子非弾性散乱の結果と良い一致



## 実施状況のまとめ

### 超高分解能RIXSのフィジビリティスタディ

- RIXS装置のベンチマークテストに使用されている銅酸化物高温超伝導体の母物質  $\text{La}_2\text{CuO}_4$  の Cu  $L_3$ -edge RIXSを測定

- ◆ 既報の最高分解能を上回る33 meVのエネルギー分解能でのスペクトルを2時間程度の積算時間で取得
- ◆ 測定条件として、入射偏光、温度、波数を変えた測定を実施
- ◆ 波数依存性は、中性子非弾性散乱の結果と良い一致

- 強磁性薄膜からのマグノン励起の観測にも成功

- ⇒ 低エネルギー素励起観測による銅酸化物超伝導体の今後の研究展開に資する成果を得ることができた。  
磁性・スピントロニクス材料での超高分解能RIXSの活用も期待できる。

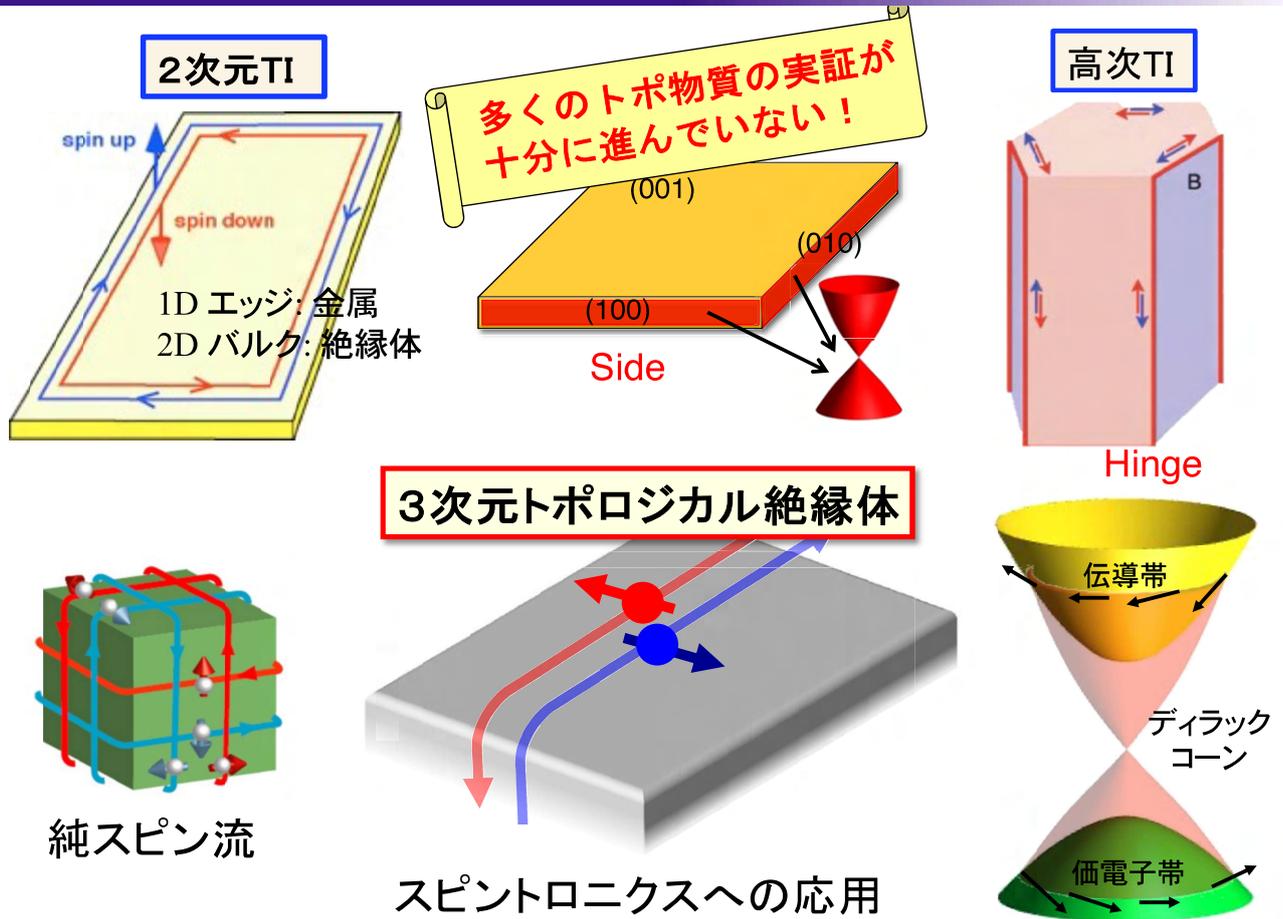
UNIVERSITY

# ナノ空間電子計測による 新奇トポロジカル量子現象の解明

東北大学 材料科学高等研究所  
佐藤宇史

共同研究者：相馬清吾, 菅原克明, 中山耕輔(東北大)  
堀場弘司, 岩澤英明(量研)

## 物質とトポロジー



現状のARPES 測定対象に著しい制

- 1) 大面積かつ平坦清浄表面 2) 劈開性・結晶性・均一性

典型的な光ビームスポットサイズ  
~500µm-1mmφ  
新型トポジカル物質候補

弱いTI候補物質

100 µm

側面ディラック状態?  
数µm↑

(001) (010) (100)

トポジカルデバイス

Py/Au (b) #2

I+ I- V+ V-

5µm

Yang et al., PRB (2016)

動作中 評価?

F4-TCNQ/BSTS (p type)

BSTS (n type)

0.5 mm

mmun. (2016)

**ナノ空間電子計測+高品質MBE試料作製**

試験的共用課題の目的

NanoTerasu BL06

ナノビーム放射光

ARPES

ナノ空間分離電子相

量研

ナノスピンのARPES装置

MBE薄膜作製

トポジカル超薄膜

東北大

次世代トポジカル材料

トポ/原子層デバイス

トポハイブリッド

機能性界面

ナノ空間量子現象の解明

トポジカル原子層の創製

# 研究課題名：ナノ空間計測のためのビームライン 技術開発と新奇トポロジカル量子現象の解明



量研代表者：堀場 弘司・次世代放射光施設整備開発センター



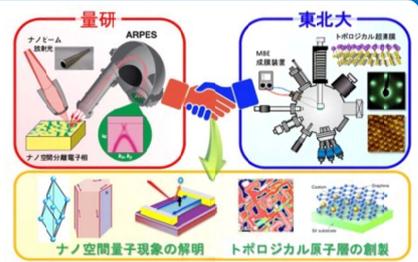
東北大代表者：佐藤 宇史・材料科学高等研究所

### 研究計画の強み

トポロジカル物質は、物質の中の数原子層程度の狭い領域に特殊な電子状態をもつ物質で、超低消費電力デバイスや量子コンピュータなどへの応用が期待されています。本研究では、量研が開発を担当する次世代放射光におけるナノARPESエンドステーションと、東北大が得意とするMBEによる原子層薄膜作製の高いシナジー効果により、これらの協働でしか成し得ない新しいトポロジカル物質の開拓を世界に先駆けて行います。

### 両機関が協力することで期待される成果

次世代放射光施設におけるナノARPES（角度分解光電子分光）エンドステーションを開発する量研堀場チームと分子線エピタキシー法によるトポロジカル材料の薄膜作製を行う東北大佐藤チームが強力にタッグを組み、新しいトポロジカル材料や原子層超薄膜のナノ空間領域における電子状態を直接「見る」ことのできるプラットフォームを新たに構築します。これにより、まだ理論でしか予測されていないような原子層トポロジカル絶縁体(TI)や高次TIといった新たなトポロジカル物質の実証が進み、その量子現象の解明と応用研究が発展すると期待されます。



### 研究成果からもたらされる社会へのインパクト

トポロジカルな電子は最新の物理理論と数学で予測される状態で、欠陥や不純物の影響を受けにくいという特徴をもち、様々な物質の微小領域に存在すると考えられています。量研と東北大の連携による次世代放射光を用いた研究を強力に推進することで、薄膜物質のナノ空間領域におけるトポロジカル電子の状態が次々に明らかになると期待されます。これにより、トポロジカル量子現象を活用した次世代の超低消費電力デバイスの開発や、各国で開発競争が進む量子コンピュータの実現が加速すると期待されます。

## ターゲットのトポロジカル材料

6



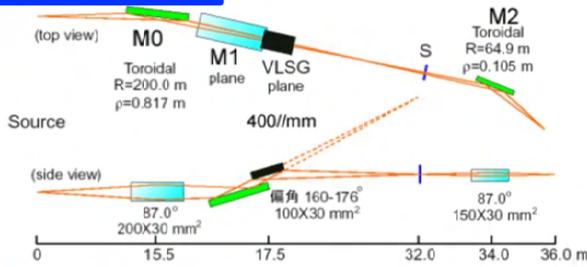
# 過去の実績：マイクロARPES装置の開発

7

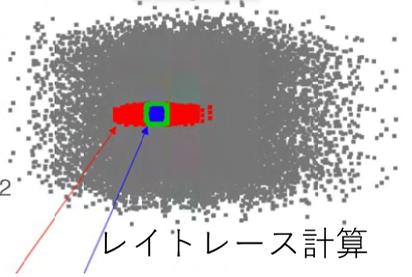
KEK-PF ビームラインBL-28A



## 元々のレイアウト



従来スポット  
200 x 300  $\mu\text{m}^2$

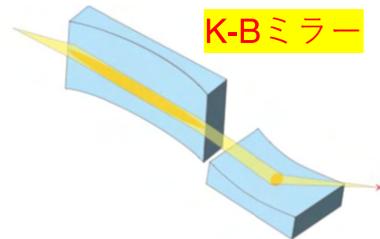
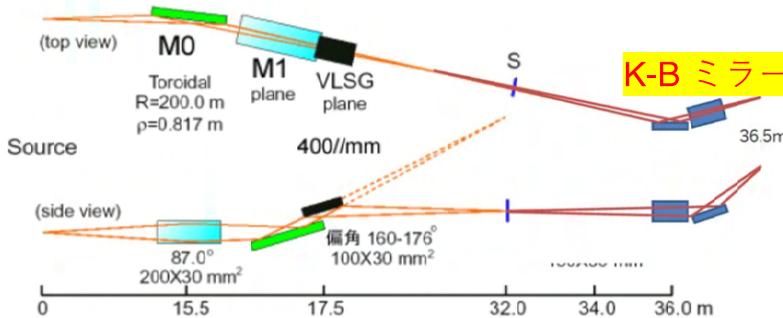


レイトレース計算

強度 90%:  
20 x 50  $\mu\text{m}^2$

強度 10%:  
10 x 10  $\mu\text{m}^2$

## 改造後レイアウト



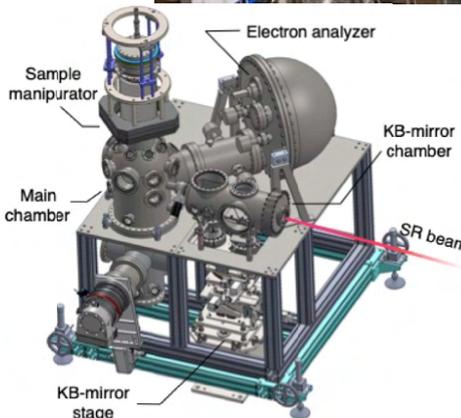
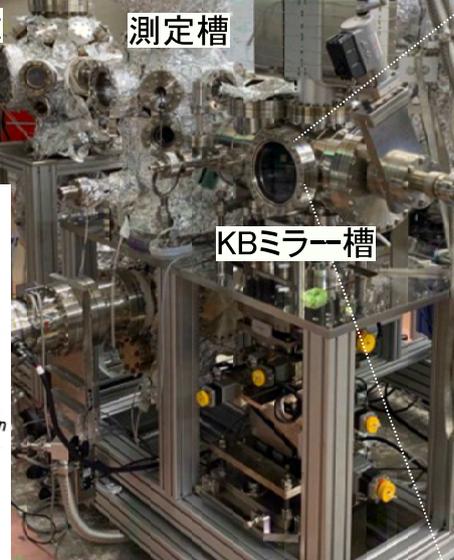
M. Kitamura (QST), SS, TS (Tohoku), K. Horiba (QST) *et al.*, RSI **93**, 033906 (2022).

# 過去の実績：マイクロARPES装置の開発

8

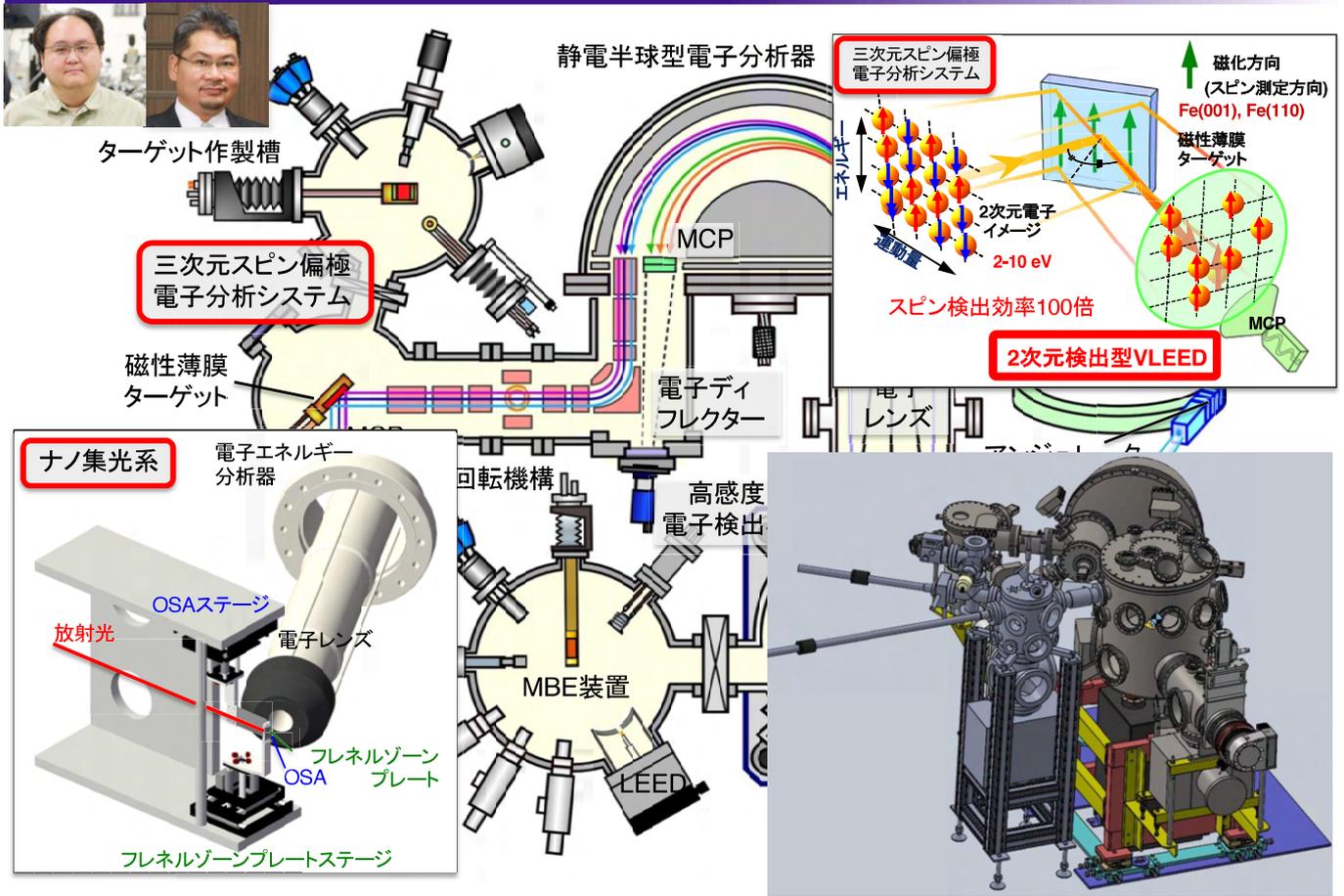


ビームスポットサイズ  
12 (V) x 10 (H)  $\mu\text{m}^2$



# 進捗：ナノスピンARPES装置の開発

9



# 進捗：電子分析器とスピン検出器の開発

10



# 進捗：ナノスピンARPES装置の開発

11

ターゲット作成装置

三次元スピン偏極電子分析システム

磁性薄膜ターゲット

MCP

スピ

メイン真空槽

グラナイト架台

静電半球型電子分析器

電子分析器

2次元VLEED

KEK-PF BL28 蓄積リング

アンジュレータ

KBミラー

FZP

OSA

ナノ集光系

極低温

(a) 集光点 OSA FZP 放射光  
光電流  
プロファイル方向  
Si結晶

(b) 光電流  
位置 ( $\mu\text{m}$ )  
Siエッジプロファイル

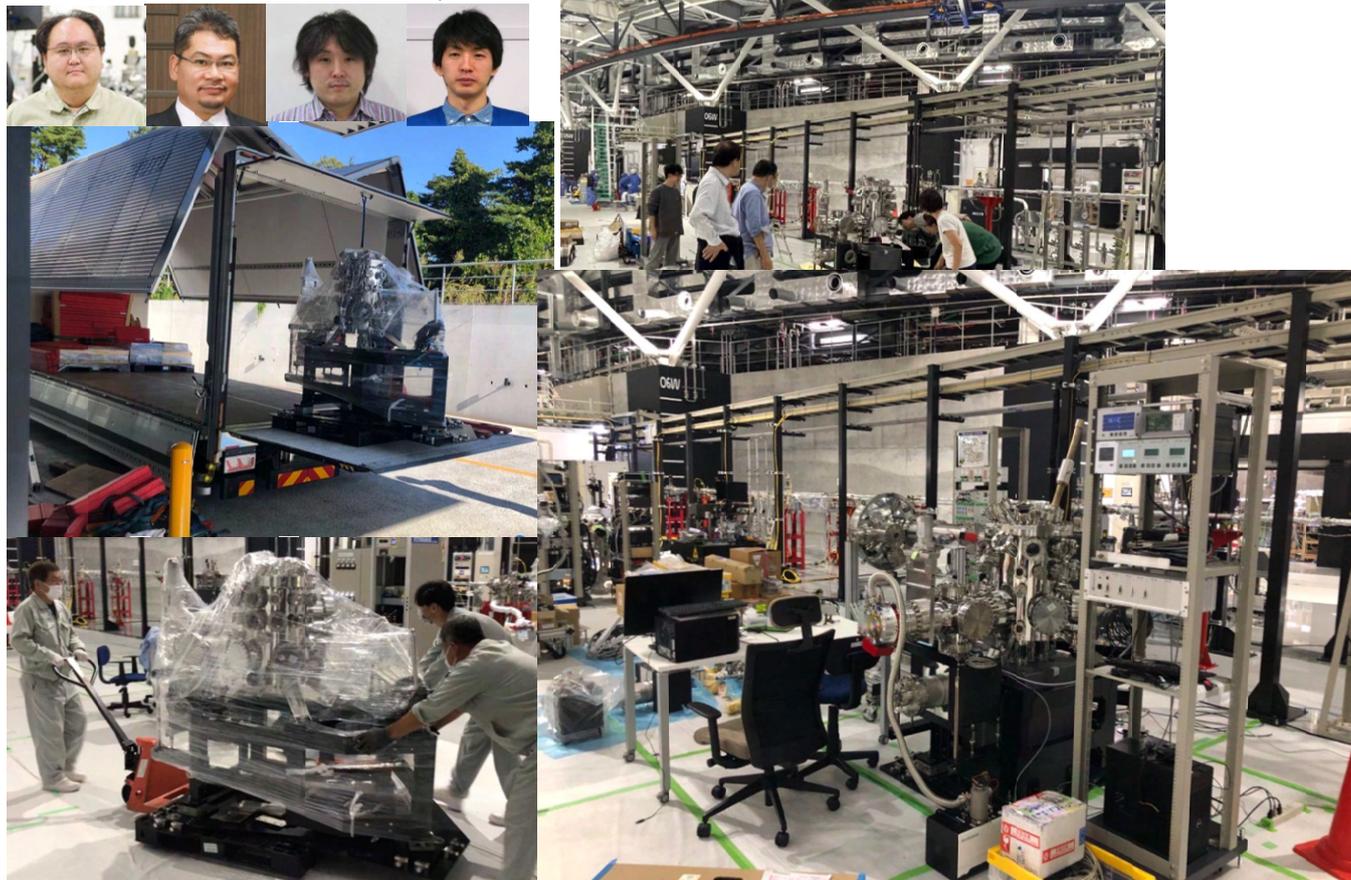
(c)  $dI/dE$   
相対位置 ( $\mu\text{m}$ )  
950 nm

(d) リソパターン  
ARPES  
100  $\mu\text{m}$   
マイクロ  
ナノ

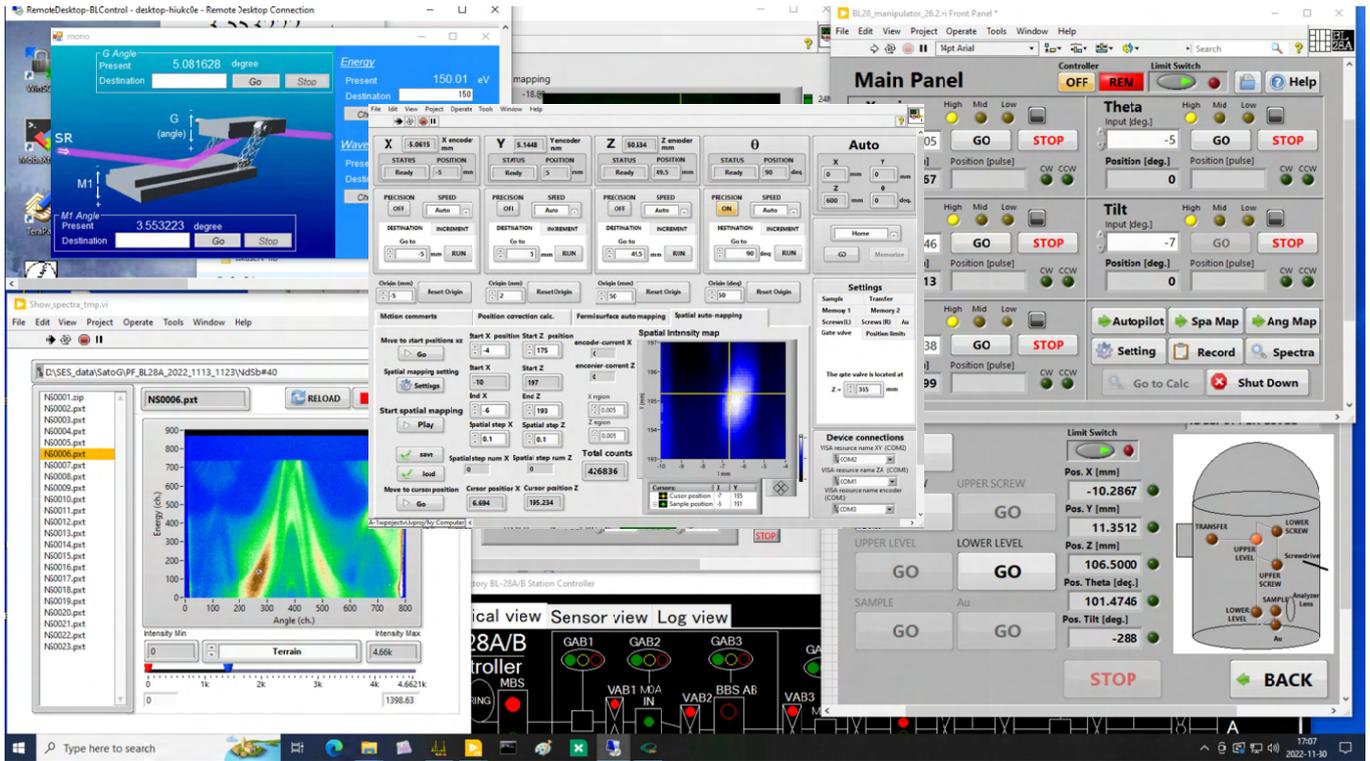
# 進捗：ナノスピンARPES装置のBL06への移設

12

移設作業風景 (2023.10.13)



- ① 空間マップ測定のソフト・ハードウェア改良：最大2倍の高速化を実現
- ② 機械学習を用いたARPES画像認識・データ解析アルゴリズムの構築



薄膜微細加工システム + 原子置換装置 + MBE薄膜作製装置



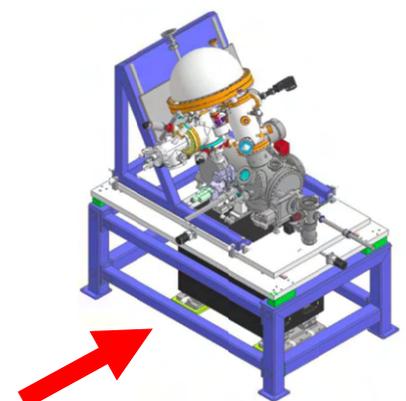
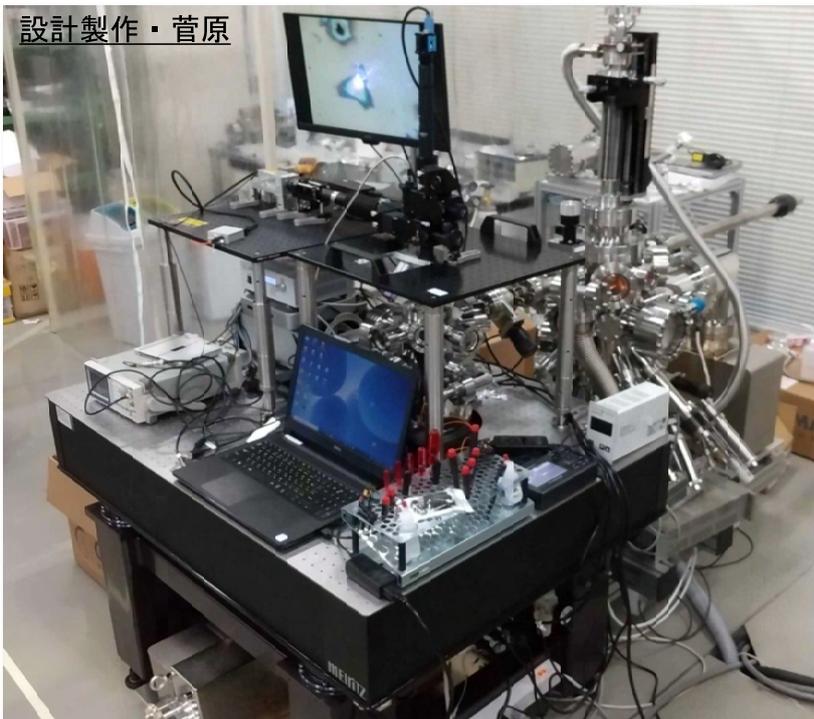
集光レーザ走査による直接微細加工

材料加熱による原子置換

原子層トポ材料開発

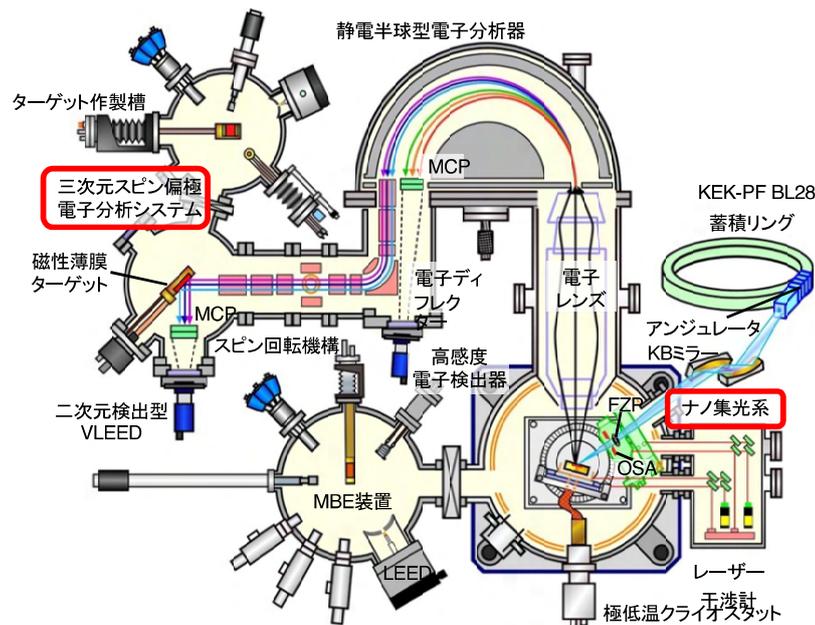
原子層トポ材料のナノ空間電子計測

設計製作・菅原

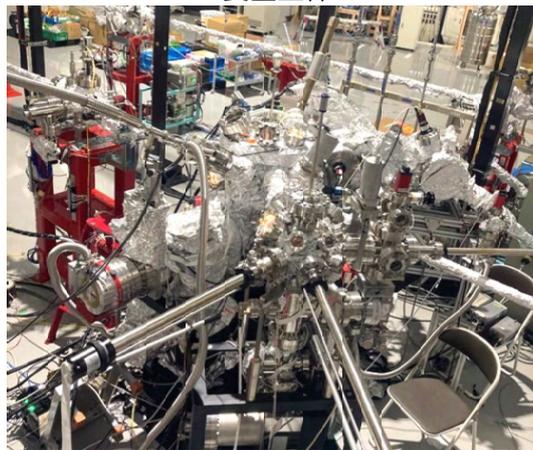


ナノテラス BL06Uへ搬送

## ナノスピナRPES装置開発



装置全体

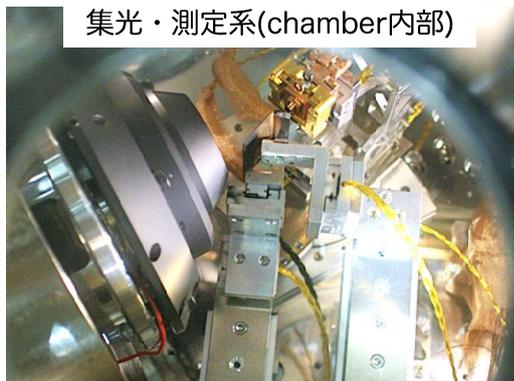


ナノスピナRPES装置で取得した最初のARPESデータ



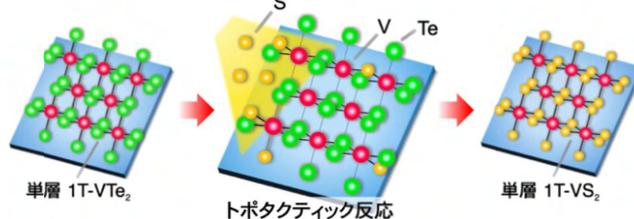
装置全体をビームラインに接続して光軸調整や電子軌道調整を行い、高精度ARPES測定を実現

集光・測定系(chamber内部)

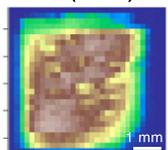


## MBE薄膜開発

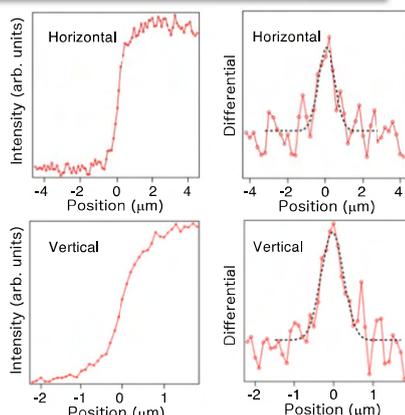
BL06Uに設置するMBE装置などを用いて種々の新奇原子層薄膜の作製に成功



Si(111)



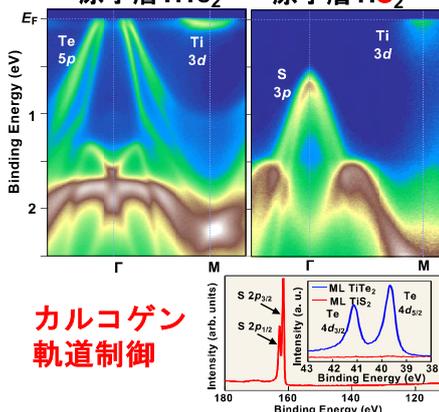
空間プロファイル



試料ピエゾステージ, FZP, OSAを含むナノ集光系と電子分析器の調整により高空間分解能化(スポットサイズ~300 nm)に成功

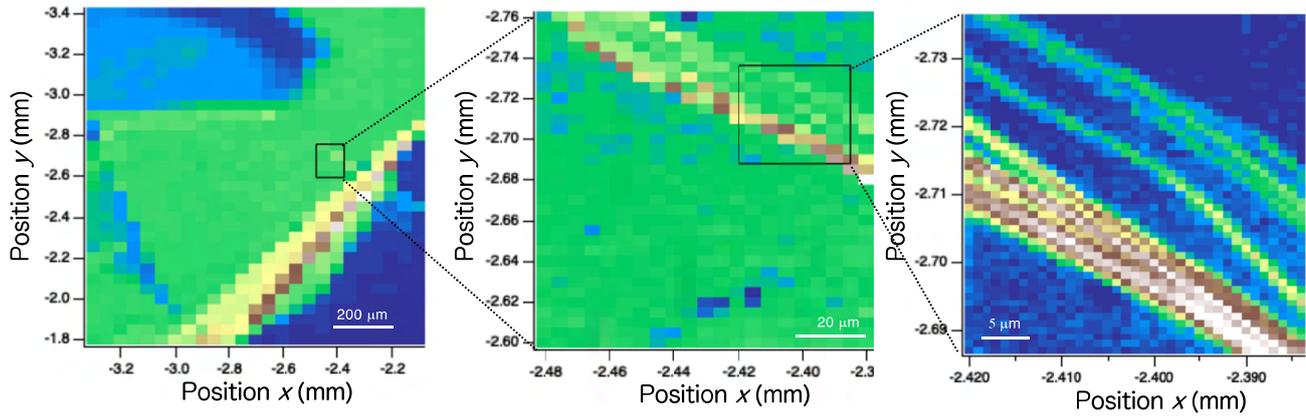
## 例：原子層TiS<sub>2</sub>

原子層TiTe<sub>2</sub> → 原子層TiS<sub>2</sub>

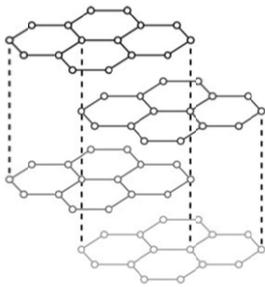


カルコゲン軌道制御

## 高空間分解能ARPES計測を実現



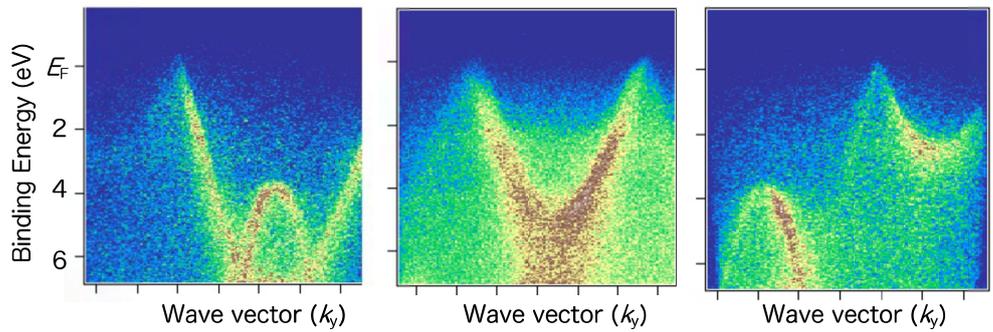
Kish graphite



論文準備中

## サブμmレベルの局所電子状態変調を可視化!

空間分解局所バンド分散の例



# 外場印加を活用した顕微スピンARPES装置の開発

奥田 太一

広島大学 放射光科学研究所 副センター長・教授

岩澤 英明

量子科学技術研究開発機構 プロジェクトリーダー・上席研究員

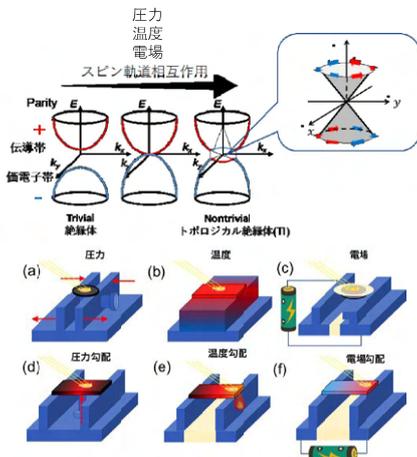
- 関西光量子科学研究所 放射光科学センター 量子物性情報計測プロジェクト (播磨：仙台駐在)
- NanoTerasuセンター 高輝度放射光研究開発部 ビームライングループ (仙台)

広島大学 放射光科学センター 客員研究員

## 「想定としているサイエンス」 → 「開発目標」

電場・温度・圧力印加による (トポジカル) 相転移の解明

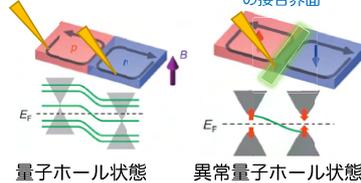
トポジカル相転移を示すTlBiS<sub>2</sub>の外場印加ARPES



圧力 (電場、温度) 勾配とマイクロフォーカスを利用した効率の良い外場依存性測定

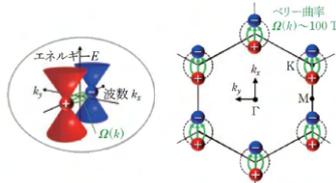
磁場印加による、電子・スピン状態の磁場応答の可視化

グラフェンのpn接合 トポジカル磁性体の接合界面



試料のエッジや磁壁に存在するカイラルエッジ状態・スピン流の直接観察が期待できる。

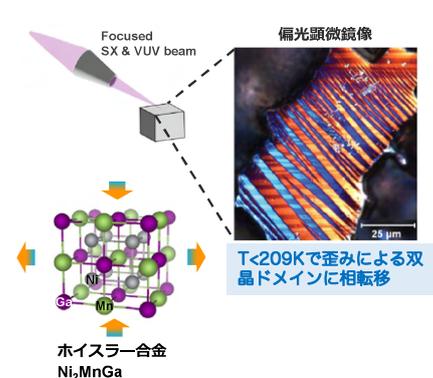
トポジカル反強磁性体の磁場印加ARPES



トポジカル反強磁性では、ベリ-曲率と電子・スピン状態の相関が重要である。磁場印加により、電子・スピン状態を変化させることで、物性の理解・制御が期待できる。

ドメイン構造を持つ磁性体や磁性トポジカル物質の電子状態解明

形状記憶効果を示すホイスラー型ワイルド磁性体の顕微ARPES

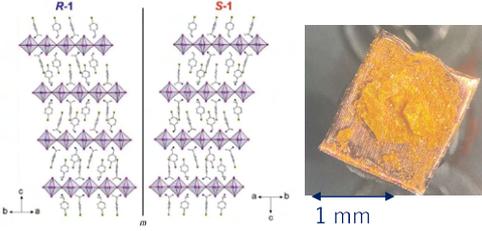


顕微ARPESによる双晶ドメイン、磁気ドメイン分解測定  
→歪みがバルク電子状態・表面トポジカル電子状態 (ワイルドセミメタル) に与える影響をドメインを選択して解明

# 「想定としているサイエンス」 → 「開発目標」

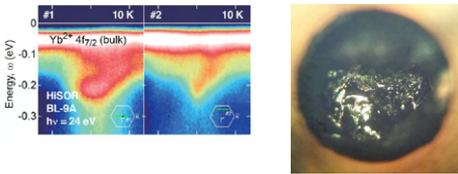
## 劈開困難物質の測定

カイラル由来の特異なスピン構造を持つ誘起ペロブスカイトのマイクロARPES



カイラル有機ペロブスカイト。カイラル構造に起因するスピン偏極状態が予想されているが、試料が脆く顕微分光で最適位置を観測するし方法がない。

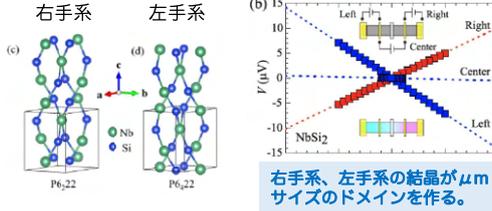
温度誘起価数相転移物質のマイクロARPES



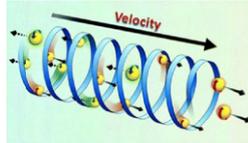
温度誘起価数相転移物質YbInCu<sub>4</sub>。長年研究されているが、劈開できないため明瞭な電子状態が観測されていない。

## マイクロビームと広域放射光を利用したカイラル物性の解明

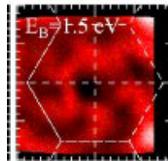
カイラル結晶を示すNbSi<sub>2</sub>の顕微スピンARPES



右手系、左手系の結晶がμmサイズのドメインを作る。



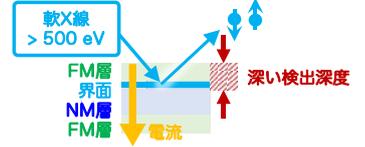
カイラリティ誘起スピン選択効果を観測するためにはバルク敏感 (SX-ARPES) 測定が必要。



カイラル構造による螺旋電子状態  
スパイラル状の電子状態の起源を表面・バルク敏感測定を使い分けて解明する。

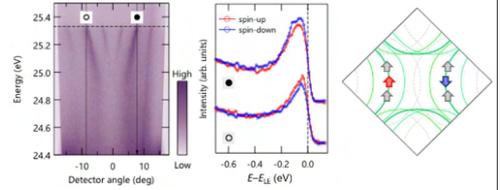
## 軟X線を活用した界面の電子・スピン状態の解明

面直電流巨大磁気抵抗を示す磁気積層デバイス



磁気積層デバイスの磁気抵抗効果比の低下の原因として、界面のバンド構造の理解と制御が重要と考えられているが、未だ不十分である。軟X線スピンARPESはその解を与える強力なツールとなる。

銅酸化物高温超伝導体の軟X線スピンARPES



銅酸化物高温超伝導体では、スピン偏極電子状態が観測されているが、スピントキシシャの全容や起源は未解明である。スピン偏極度の大きさが励起光や表面・バルクに依存している可能性があり、バルク敏感な軟X線での検証が必要である。

# ビームライン立ち上げへの貢献 (1)

## HR-ARPES

HiSOR, BL-1  
ヘリカルアンジュレーター



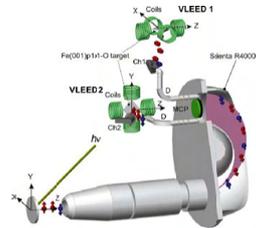
H. Iwasawa et al.,  
J. Synchrotron Radiat. (2017).

## SARPES

HiSOR, BL-9B  
Apple-II可変偏光アンジュレーター

### VLEED型スピン検出器の開発

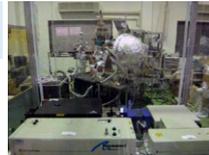
T. Okuda et al., Rev. Sci. Instrum. (2008).



T. Okuda et al., Rev. Sci. Instrum. (2011).  
T. Okuda et al., JESRP (2015).

## 顕微ARPES

HiSOR  
Micro-ARPES



H. Iwasawa et al., Ultramicroscopy 2017.

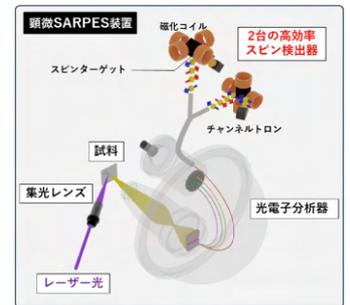
DLS  
Nano-ARPES



H. Iwasawa et al., Phys. Rev. B 2019.

## 顕微SARPES

HiSOR, Micro-Spin-ARPES



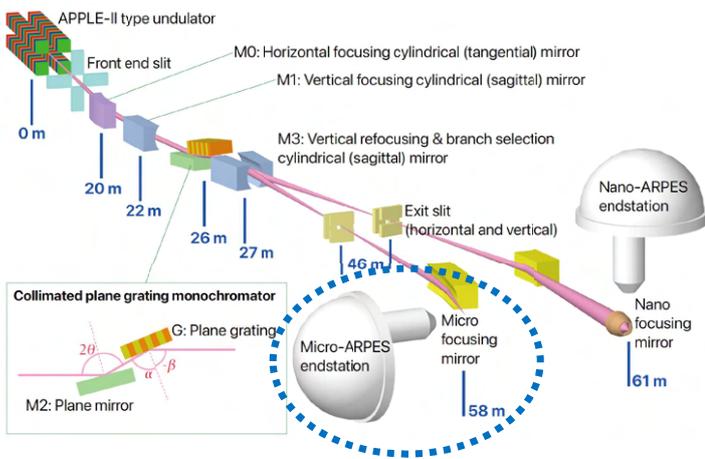
T. Iwata et al., in press, Sci. Rep. 2023.

QST-HiSOR共同研究契約 (R4, R5-)  
ナノテラスにおけるスピンARPES装置の開発

- ▶ BL・ARPES装置全般立ち上げ (ハードウェア)
- ▶ 顕微ARPES・SARPES・ARPESの計測ソフトウェアの開発
- ▶ スピン検出器の開発・立ち上げ

# ビームライン立ち上げへの貢献（2）

## BL06U マイクロARPES装置



2023.11.24

装置引越：HiSOR → NanoTerasu



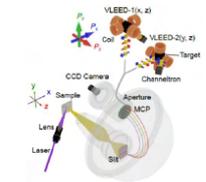
2024.11~2024.5

試料マニピュレータの改造  
(オペランド対応)



2024.11~2025.3

スピン検出器の開発  
(VLEED型)



- ▶ 広大HiSORから移管したARPES装置を立ち上げて、共用のマイクロARPES装置として利用可能にする
- ▶ オペランドARPES・スピンARPES計測を実現する

## 投入可能なエフオート

シニアスタッフ：3名

奥田太一（教授）、岩澤英明（上席）、宮本幸治（准教授）

若手スタッフ：3名

\*2024年4月着任予定

角田一樹（助教）、藤澤 唯太（助教\*）、Zhang Cheng（研究員\*）

学生：10名程度

博士4名、修士6名

期間

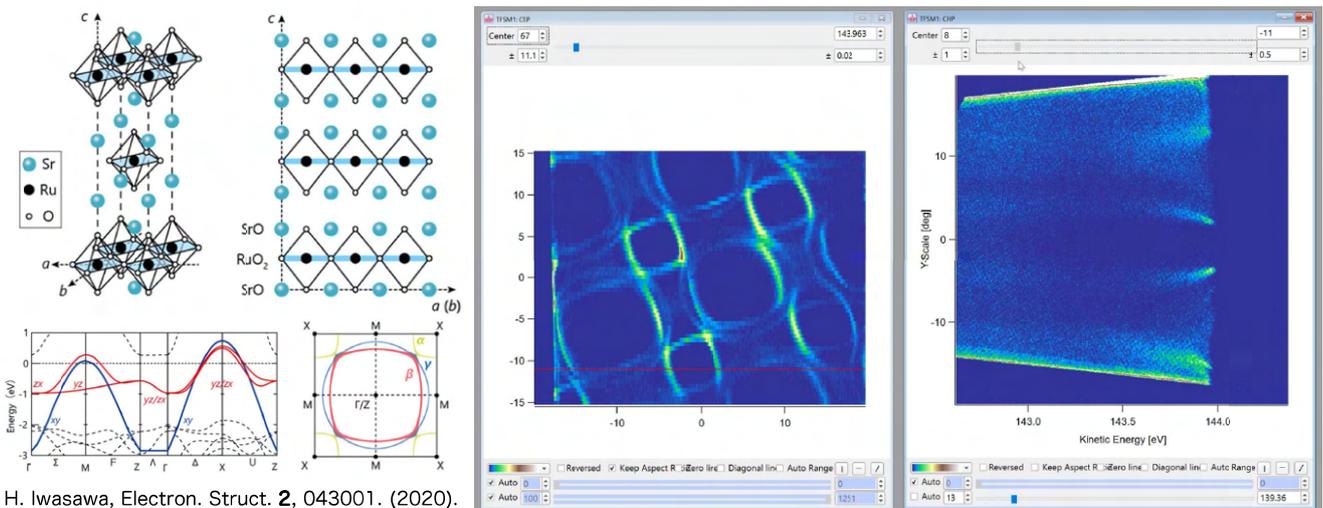
1期に1カ月程度（分担して）

## 試験的共用の成果：まとめ

- ① マイクロARPES装置の立ち上げを行い、世界最高品質のARPESデータの取得を可能とした。また、ビームラインの特徴の活用が、下記のような計測に有効であることを実証した。
  - マイクロビームを活用した終端面の分離・選択的観察
  - 非容易へき開試料における明瞭なバンド構造・フェルミ面の観察
  - 直線偏光依存性を利用したバンドの選択的観察
- ② オペランドARPESの実現に向けて、電極付試料マニピュレータを開発し、装置への導入を完了するなど、整備を進めた。
- ③ スピンARPES装置の開発に向けて、ターゲット準備槽の設計・発注を行い、次年度立ち上げに必要な準備を完了した。
- ④ ディフレクター機能付きアナライザーへの更新ならびにスピン検出器の導入に向けて、検討を進めた。

## 試験的共用の成果の例

■ バンド構造・フェルミ面の観測：Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> (150 eV, LH, T = 20 K, ΔE = 30 meV, ΔΦ = 50 μm) : ~30 min.



- バンド構造・フェルミ面を明瞭に観察
- 世界最高品質のARPESスペクトルの取得に成功

## NanoTerasu BL06U

# 原子層物質科学のための顕微ARPESシステム構築

石坂香子<sup>1,2</sup>

坂野昌人<sup>1,3</sup>

1) 東京大学 工学系研究科 附属量子相エレクトロニクス研究センター

2) 理化学研究所 創発物性科学研究センター

3) 電気通信大学 情報理工学研究科 基盤理工学専攻 (現所属)

## 2次元原子層物質の新展開

ファンデルワールス (vdW) 積層

A. K. Geim & I. V. Grigorieva Nature **499**, 419 (2013).

ツイスト2層グラフェン (特に2018-)

超伝導、フラットバンド、強相関、強磁性、

剥離で得られる原子層物質 >数10種 \*データベースでは>1000種

格子整合に制約されない積層構造

任意の原子層の自由な組み合わせ

バルク結晶にはないパラメータ 原子層種 $i$ , 層数 $n_i$ , ツイスト角 $\theta_i$

### van der Waals 原子層物質の新展開



#### 多様な結晶構造

対称性、配位、構成原子

#### 多様な物性

バレー半金属、超伝導、CDW  
トポロジカル、磁性、強誘電

物質の多様性

#### 集積・配列の自由度

・層数  $n_i$   
・ツイスト角  $\theta_i$   
・異種 vs 同種 積層



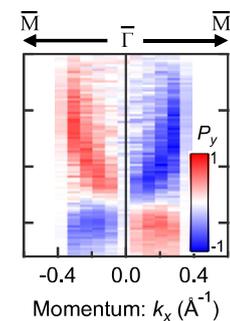
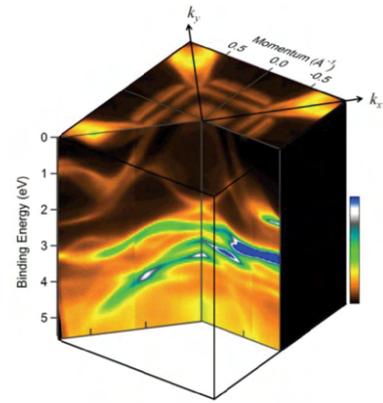
次元性/対称性/周期性 制御・付加

# 電子バンド構造 ( $E, \mathbf{k}, \mathbf{s}$ ) の重要性

結晶系の1電子波動関数  $\Phi_{\mathbf{k},\mathbf{s}}(E)$   
 エネルギー $E$ , 運動量 $\mathbf{k}$ , スピン $\mathbf{s}$  で状態指定

角度分解光電子分光 (ARPES)  $E, \mathbf{k}$   
 →物性起源、機能予測、物質設計

- 例)
- バンド交差点
    - トポロジカル半金属、超高移動度、
    - ベリー曲率由来の新奇物性、
  - 平坦バンド
    - 強相関電子、超伝導、磁性、熱電、
    - スピン分裂
      - スピントロニクス機能、ワイル半金属、
      - 非従来型超伝導、



- 第一原理計算  
 有限系・非周期/準周期系ではまだ困難も
- ✗ 大規模計算のコスト高
  - ✗ 基となる結晶構造の実験的取得が困難

## 原子層フレークARPESの課題：NanoTerasuへの期待

### 試料サイズ

グラフェンで<数10 $\mu\text{m}$ 、その他多くは<数 $\mu\text{m}$   
 ターゲットの領域だけを狙うことが重要  
 積層条件 ( $\theta$ など) の不均一性も課題

グラフェンや一部物質  
 (WSe<sub>2</sub>など) 以外は  
 世界的にまだ手付かず  
 の状況

### 原子層物質の質

原子層の劣化、積層界面でのコンタミネーション

当研究室の現状： nL-WTe<sub>2</sub>, twisted 2L-WTe<sub>2</sub>, twisted 2L-ReSe<sub>2</sub>など

	施設 / BL・光源	ビーム径	文献 (一部)
WTe <sub>2</sub>	東大 6.4 eV laser (Ti:Sa 3+1倍波)	15 $\mu\text{m}$	Phys Rev Res 4, 023247 (2022) Nano Lett 23, 9280 (2023)
ReSe <sub>2</sub>	KEK Photon Factory / BL28A	15 $\mu\text{m}$	Phys. Rev. Res 6, L022048 (2024)

参考) 世界の状況： twisted 2L-graphene, twisted 2L-WSe<sub>2</sub>など

	施設 / BL	ビーム径	文献 (一部)
2020-	英 Diamond Light Source / I05	1-4 $\mu\text{m}$	Nanoscale Horiz. 5, 1309 (2020)
2021-	伊 Elettra / SpectroMicroscopy BL	0.6 $\mu\text{m}$	Nat Phys 17, 189 (2021)
2021-	米 Advanced Light Source / MAESTRO	1 $\mu\text{m}$	Nat Phys 17, 184 (2021)
2022-	中 Shanghai SSRF / BL07U	0.4 $\mu\text{m}$	Adv. Mater. 34, 2205996 (2022)

## 研究計画 1

### 原子層フレイクARPES@NanoTerasu BL06Uのシステム構築

- 原子層試料構造の改善・最適化
- NanoTerasuへの試料搬送と試料準備
  - 共通試料ホルダの導入
  - 真空搬送ベッセルの整備
  - 共通アニール装置の導入
  - NanoTerasuでの試料評価
- 顕微ARPES計測系の整備
  - ビーム径評価
  - 微小試料の位置探索・走査計測
  - 歪・電場印可試料ホルダの設計・開発

### 新奇2D原子層物質のハイスループットARPES

## 研究計画 2

超高真空下で原子層試料を作製 → in-situ ARPES @ BL06U

原子層劣化や積層界面での気泡混入をほぼ完全に防ぐ

in-situ 超高真空原子層作製システムの設計・開発  
(東大生研町田Gと協働)

- クリーンな積層/界面構造を持つ原子層物質
- H<sub>2</sub>OやO<sub>2</sub>による劣化で研究が律速されている原子層物質  
cf 非従来超伝導, 磁性トポロジカル絶縁体など多数

ボトルネックを打破し広範な原子層物質のARPESを可能とする  
他の計測手法 (XMCDなど) への展開も可能

# 研究スケジュール@BL06U

2024年

2025年

4月 5月 6月 7月 8月 9月 10月 11月 12月 1月 2月 3月~

ナノテラス試験運用期間

## 1. 顕微ARPES計測@NanoTerasu BL06Uのためのシステム構築 および試料作製・搬送・評価プロトコル開発

試料作製 → 搬送 → 計測テスト

共通ホルダ、搬送ベッセル、アニール装置導入

位置探索・走査計測ツール

新奇原子層のARPES計測

## 2. in-situ 超高真空 2D原子層作製システムの 設計・開発

BL06Uに合わせた条件の洗い出し → 設計・仕様策定

# 研究体制

東大工 石坂G  
スタッフ2名  
博士学生1-2名  
修士学生2名  
学部生1-2名

顕微ARPES  
原子層試料準備  
in-situ装置開発

NanoTerasu BL06U  
堀場・岩澤G

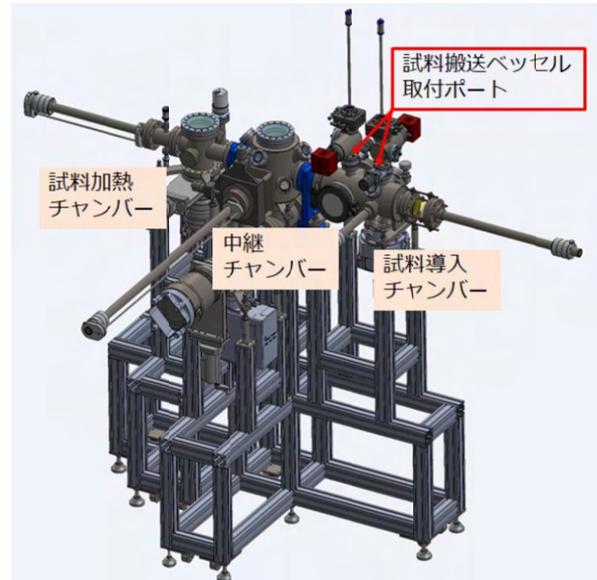
原子層探索  
試料作製法探索  
装置設計  
物性開拓

原子層探索・作製・評価  
東大生産研 町田G  
単結晶提供  
物材機構 谷口・渡辺G (hBN)  
東工大 笹川G, 阪大 石渡G, 他  
第一原理計算  
東大先端研 有田G 他

## 実施状況

- QST研究者と共に東京大学生産技術研究所町田研究室を訪問し、in-situ 超高真空原子層作製システムの開発に向けて検討を行った (2024/6/7)

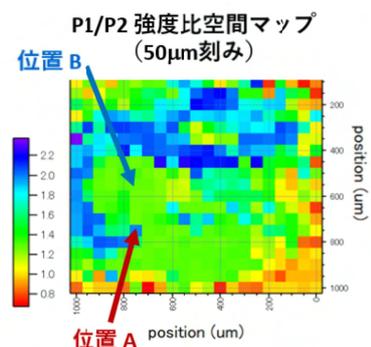
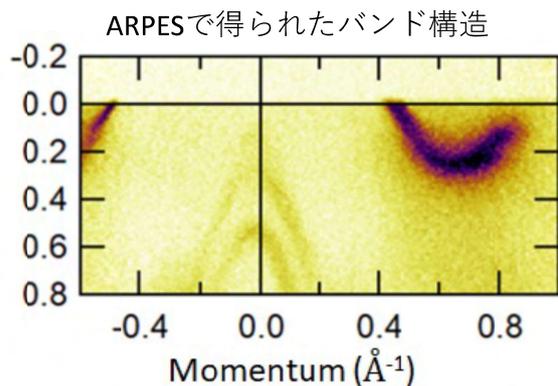
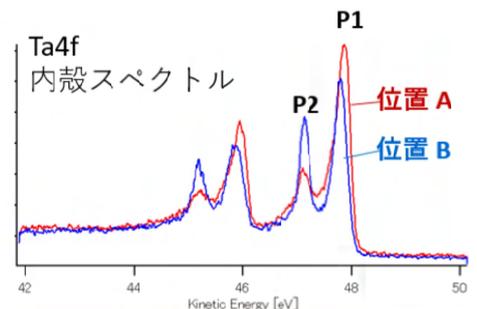
- 顕微ARPES計測@NanoTerasu  
BL06Uのためのシステム構築として、QSTと協働で搬送ベッセルとその取り付けポート、および加熱チャンバーの検討・構築を行った (2025年4月運用開始)



## 実施状況

- NanoTerasu BL06Uにて顕微ARPES実験を行った (2025/2/17-20)

- ✓ 10 $\mu\text{m}$ 程度の顕微ARPES計測を実施
- ✓ 走査計測により、試料の終端面の違いを反映する内殻スペクトルとバンド構造の取得に成功



# 試験的共用課題選定のためのヒアリング

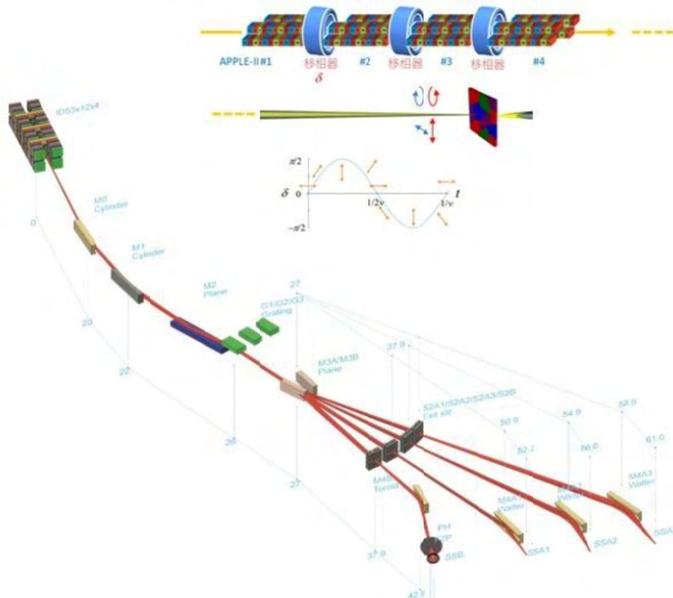
松田巖  
東京大学

## 分割アンジュレータビームライン

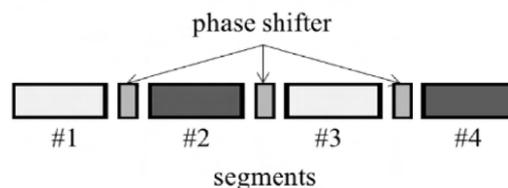
量子科学技術研究開発機構  
QST National Institute for Quantum Science and Technology

BL13U: 軟X線ナノ吸収分光ビームライン (XMCD)

APPLE-IIベース分割アンジュレータ



Segmented Cross Undulator



APPLE-II (Planar, Helical)

Phase Interferometric Ensemble of APPLE  
(PINEAPPLE) undulator

eJSSNT

Technical Note

e-Journal of Surface Science and Nanotechnology 17, 32–39 (2019)

Segmented Undulator for Extensive Polarization Controls in  $\leq 1$  nm-rad Emittance Rings

Iwao Matsuda,<sup>a,b,1</sup> Susumu Yamamoto,<sup>a</sup> Jun Miyawaki,<sup>a</sup> Tadashi Abukawa,<sup>b</sup> Takashi Tanaka<sup>c</sup>

<sup>a</sup>The Institute for Solid State Physics, the University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8581, Japan  
<sup>b</sup>Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University, Sendai 980-8577, Japan  
<sup>c</sup>RIKEN SPring-8 Center, Koto 1-1-1, Sayo, Hyogo 679-3148, Japan  
<sup>1</sup>Corresponding author: imatsuda@issp.u-tokyo.ac.jp

# 分割アンジュレータビームライン

## 理論

K.-J. Kim, A synchrotron radiation source with arbitrarily adjustable elliptical polarization, Nucl. Instrum. Methods, **219** (2) (1984), pp. 425.

## 開発

Y.K. Wu *et al.*, High-gain lasing and polarization switch with a distributed optical-klystron free-electron laser, Phys. Rev. Lett., **96** (22) (2006), Article 224801.

H. Deng *et al.*, Polarization switching demonstration using crossed-planar undulators in a seeded free-electron laser, Phys. Rev. ST Accel. Beams, **17** (2) (2014), Article 020704.

E. Ferrari *et al.*, Free electron laser polarization control with interfering crossed polarized fields, Phys. Rev. Accel. Beams, **22** (8) (2019), Article 080701.

T. Kaneyasu *et al.*, Polarization control in a crossed undulator without a monochromator, New J. Phys., **22** (8) (2020), Article 083062.

J. Miyawaki *et al.*, Fast and versatile polarization control of X-ray by segmented cross undulator at SPring-8, AAPP Bull., **31** (1) (2021), p. 25.

## 利用提案

H. Saito *et al.*, Variably polarized superradiant THz source employing crossed undulator configuration, Infrared Physics & Technology, Available online 18 December 2023, 105076.

## 特徴

- 1 偏光を自由に切り換えることができ、スポット位置もズレない
- 2 円偏光発生時の光エネルギー範囲が3倍になる
- 3 ミリ秒での高速偏光切替が可能である
- 4 高速偏光切替を用いたロックイン検出など、従来の放射光実験では不可能であった高感度な光物性実験が可能となる
- 5 偏光切替に伴う電子軌道の揺動がないため、低エミッタンス蓄積リングでの運用が容易である
- 6 トポロジカル光波(光渦)の光源として評価と利用ができる
- 7 超放射THz光源として利用できる

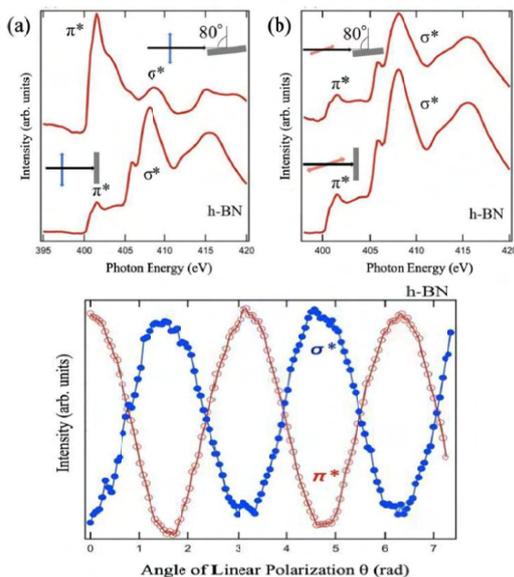


# 分割アンジュレータビームライン

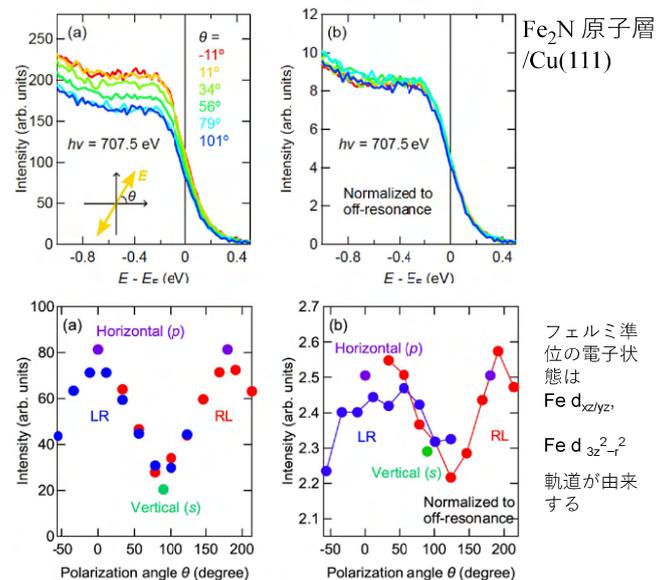
利用実験@SPring-8 BL07LSU



## 回転直線偏NEXAFSによる分子配向の特定



## 回転直線偏光共鳴光電子分光による軌道特定



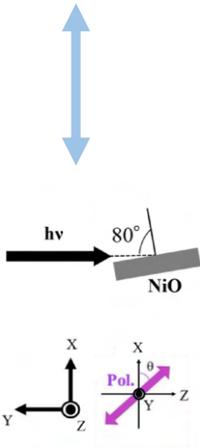
Y. Kudo, M. Horio *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A **1018**, 165804 (2021).

M. Horio *et al.*, J. Phys.: Condens. Matter **35**, 425001 (2023).

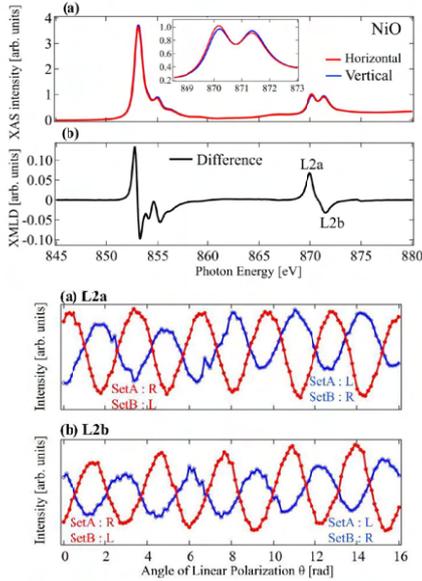


# 分割アンジュレータビームライン

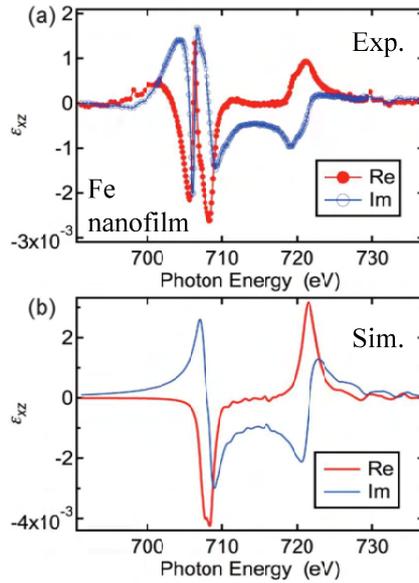
利用実験@SPring-8 BL07LSU



## 回転直線偏XMLD測定



## 連続直線円偏光スイッチングによるXMOKE/XMCD同時測定



Y. Kudo, M. Horio et al., e-J. Surf. Sci. Nanotechnology, **20**, 124 (2022).

Y. Kubota *et al.*, Phys. Rev. B **96**, 214417 (2017).

J. Miyawaki, M. Horio et al., AAPS Bull., **31** (1) (2021), p. 25.

## 試験的共用課題の目的 (想定しているサイエンスや開発目標)

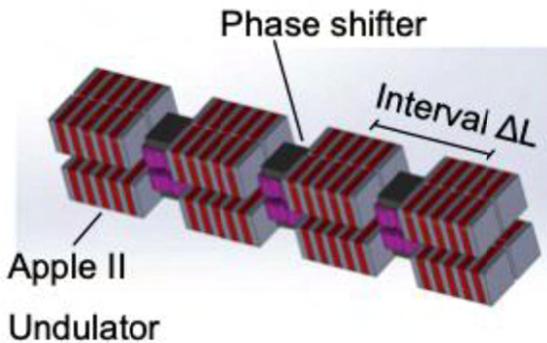
### 新しい放射光利用実験の開拓

安定なユーザー利用実験

BL13U: 軟X線ナノ吸収分光ビームライン (XMCD)



開発@SPring-8 BL07LSU



Y. Ohtsubo *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **2380**, 012037 (2022).

## 特徴

- 1 偏光を自由に切り換えることができ、スポット位置もズレない
- 2 円偏光発生時の光エネルギー範囲が3倍になる
- 3 ミリ秒での高速偏光切替が可能である
- 4 高速偏光切替を用いたロックイン検出など、従来の放射光実験では不可能であった高感度な光物性実験が可能となる
- 5 トポロジカル光波(光渦)の光源として評価と利用ができる

## 試験的共用課題の目的 (想定しているサイエンスや開発目標)

2次元物質の開拓 物質の精密評価

分析技術の開発 分光学による新規物理現象の検証

## ビームラインの立ち上げ目標に対してどの観点から貢献できるか

松田巖 (東京大学)、堀尾眞史 (東京大学)

### ✓ ノウハウ提供

SPring-8 BL07LSUの立ち上げに沿って

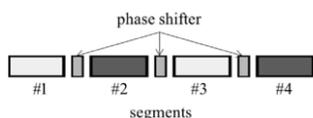
### ✓ 人手

研究員、大学院院生、分割アンジュレータ利用グループ

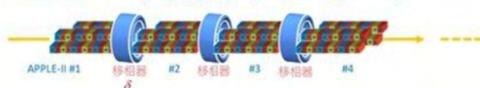
### ✓ 測定装置

分割アンジュレータ対応計測システム  
分割アンジュレータ用対応測定装置  
光電子分光装置

## 投入可能なエフォート (人材の数、学生・若手スタッフの数と期間) とスケジュール



### APPLE-IIベース分割アンジュレータ



### 体制

松田巖 (東京大学)  
堀尾眞史 (東京大学)

研究員：3名  
院生(東京大学)：15名

### 光源加速器調整と利用実験を同時に

#### Term 1-1

APPLE-II セグメントそれぞれの調整

#### Term 1-2

Phase shifter (PS) : 3台 : 単一アンジュレータモード  
直線偏光 (水平・垂直)、円偏光 (右・左)

NEXAFS, XMOKE, XMLD, XMCD,  
光電子分光

#### Term 2-1

Phase shifter (PS) : 1台 : クロスアンジュレータモード  
直線偏光回転、円偏光スイッチング、3次光円偏光

回転直線偏NEXAFS

#### Term 2-2

Phase shifter (PS) : 3台 : 分割アンジュレータモード  
直線偏光回転、円偏光スイッチング、3次光円偏光

回転直線偏光共鳴光電子分光

回転直線偏XMLD測定

#### Term 3

電磁石移相器(PS)調整 : 3台 : 分割アンジュレータモード  
高速切換 (>10 Hz)

連続直線円偏光スイッチングによる  
XMOKE/XMCD同時測定

#### Term 4

電磁石移相器(PS)調整 : 3台 : 分割アンジュレータモード  
高速切換 (>100 Hz)

偏光スイッチングによるロックイン  
高感度測定

eJSSNT Technical Note

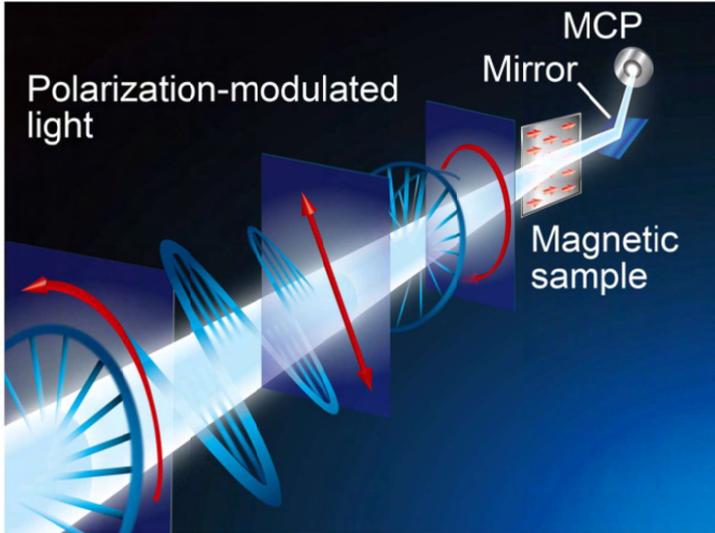
Segmented Undulator for Extensive Polarization Controls in  $\lesssim 1$  nm-rad Emittance Rings

I. Matsuda<sup>1,2</sup>, Y. Yamamoto<sup>1,2</sup>, J. Miyazaki<sup>1,2</sup>, T. Akhmetov<sup>1,2</sup>, T. Sakai<sup>1,2</sup>, S. Terada<sup>1,2</sup>

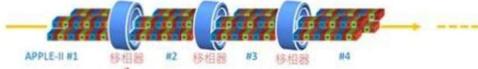
I. Matsuda *et al.*,  
e-J. Surf. Sci. Nanotechnol. 17, 32 (2019).

一般市民にアピールすることができる研究成果のアイデアの提示（あれば）

## 分割アンジュレータ: 国産、世界初、世界唯一、世界一光源性能



APPLE-IIベース分割アンジュレータ



世界唯一の光で見て探る、高い機能性と環境を保護する夢の材料開発

軽量（輸送燃料軽減）

豊富な資源（レアメタルフリー）

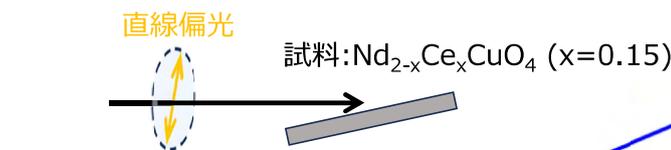
廃棄負荷フリー

軟X線で見やすい

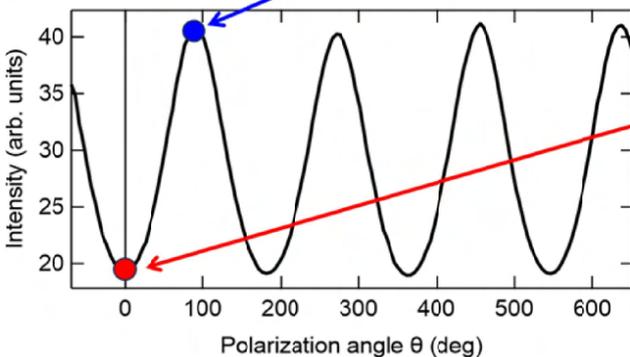
軽元素原子層、遷移金属(Fe,Cuなど)

分割アンジュレータによる  
新たな放射光計測技術の開発  
と  
機能性界面の研究

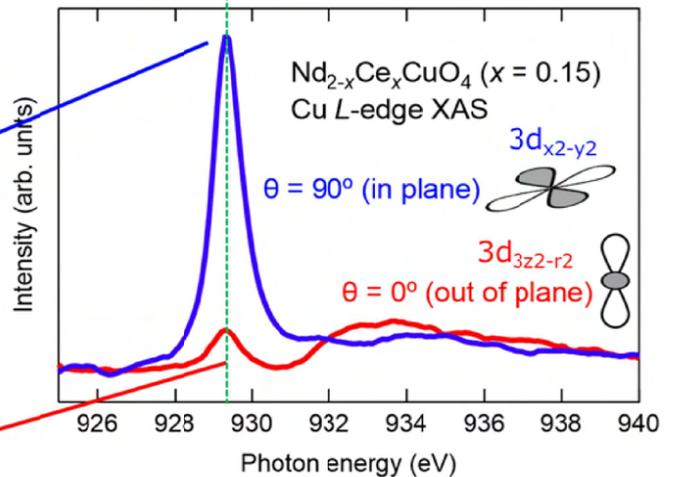
### 試験共用測定の結果



斜入射配置,  $h\nu=929.5\text{ eV}$  (Cu L端)にて、直線偏光角の回転に伴う吸収強度の周期振動を観測



### 929.5 eV Cu L端 NEXAFSスペクトル



Term 1-1

APPLE-II セグメントそれぞれの調整

Term 1-2

Phase shifter (PS) : 3台 : 単一アンジュレータモード

Term 2-1

Phase shifter (PS) : 1台 : クロスアンジュレータモード

Term 2-2

Phase shifter (PS) : 3台 : 分割アンジュレータモード

分割アンジュレータモードでの回転直線偏光NEXAFS測定に成功

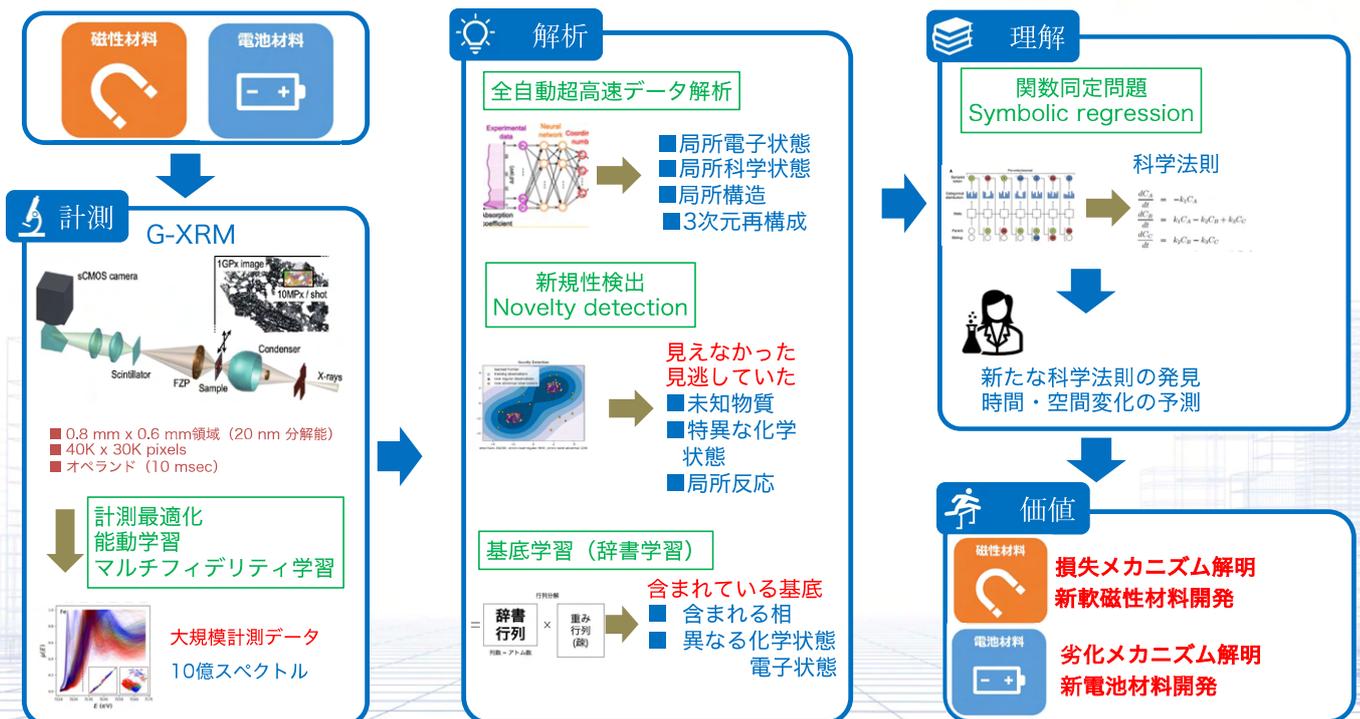
# 軟X線ナノ吸収分光のためのギガピクセルX線顕微鏡

大阪大学大学院工学研究科

小野 寛太

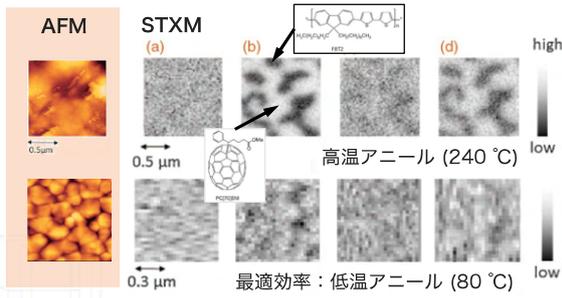
武市泰男

## 材料機能解明のための軟X線ナノ吸収分光とデータ解析



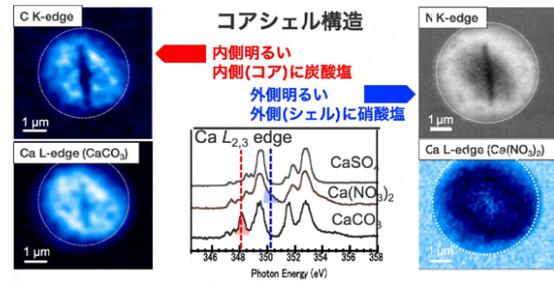
# 軟X線ナノ吸収分光を用いたナノ物性研究

## 化学状態可視化：有機薄膜太陽電池の分子混合



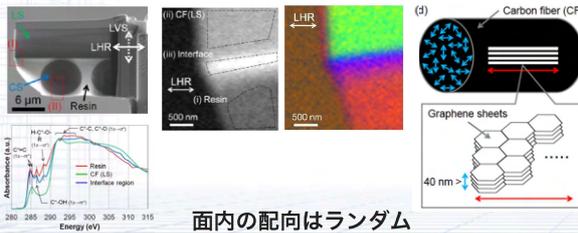
分子が「混ざっている」方が効率が高い

## 化学状態可視化：エアロゾル中の化学反応



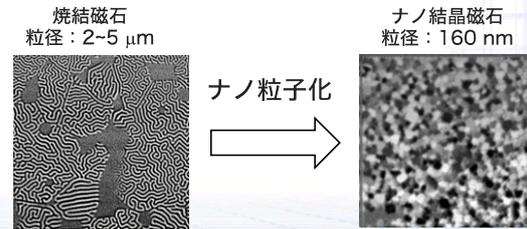
自然起源中のCa鉱物が硫酸・硝酸を中和、酸性雨を抑制  
 $\text{CaCO}_3 + 2 \text{HNO}_3 \rightarrow \text{Ca(NO}_3)_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

## 分子配向可視化：CFRPの化学状態分布



面内の配向はランダム  
 繊維の引っ張り方向へグラファイトシートが配向

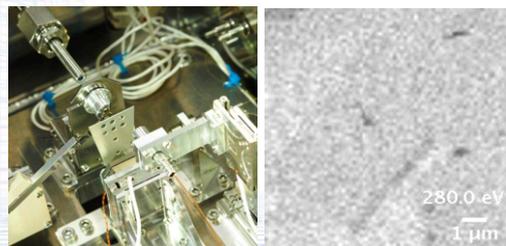
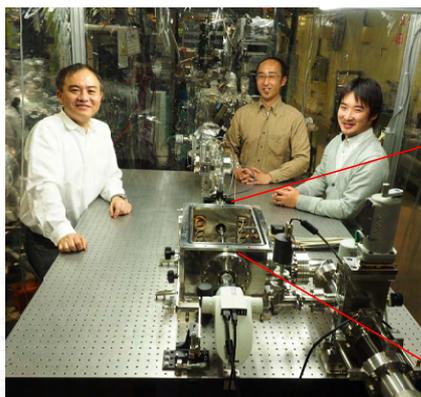
## スピン状態可視化：希土類永久磁石の磁区構造



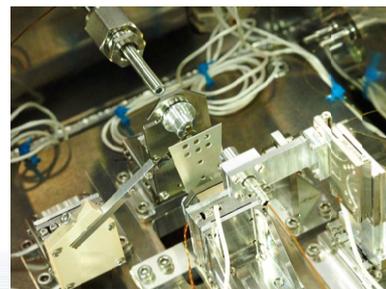
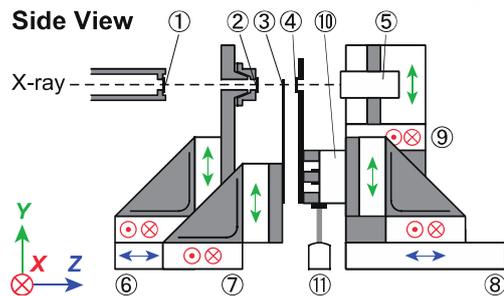
結晶粒をナノサイズにすることで性能向上

電子状態・化学状態・スピン状態の可視化によるナノ物性研究

# これまで開発したX線顕微鏡

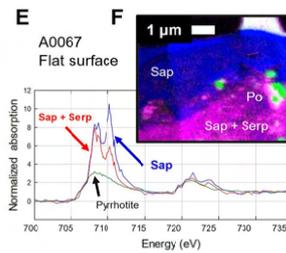


これまでに開発したX線顕微鏡



Y. Takeichi, *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **87**, 013704 (2016).

# はやぶさ2帰還リュウグウ試料分析 (武市)



Macromolecular organic matter in samples of the asteroid (162173) Ryugu  
 H. Yabuta, Y. Takeichi, *et al.*, *Science* **379**, eabn9057 (2023).

Formation and evolution of carbonaceous asteroid Ryugu: Direct evidence from returned samples  
 T. Nakamura, Y. Takeichi, *et al.*, *Science* **379**, eabn8671 (2023).



# 提案：高分解能・広視野軟X線顕微鏡



- 局所の分析はこれまでも多数行われてきた
- 広い視野の分析をすると、予想したよりもずっと不均一
- 不均一さのスケールはナノ～センチメートルにおよぶ
- どのような物質・相が含まれているかわからない
- 狭い視野・高分解能 → 全体を代表しているか？
- 広い視野・低分解能 → 見落としていないか？
- 標準スペクトルを用いた解析 → 未知の成分は見つけれない

3941×2622pixels 1mm

Y. Takeichi, *et al.*, accepted to ISIJ Int.

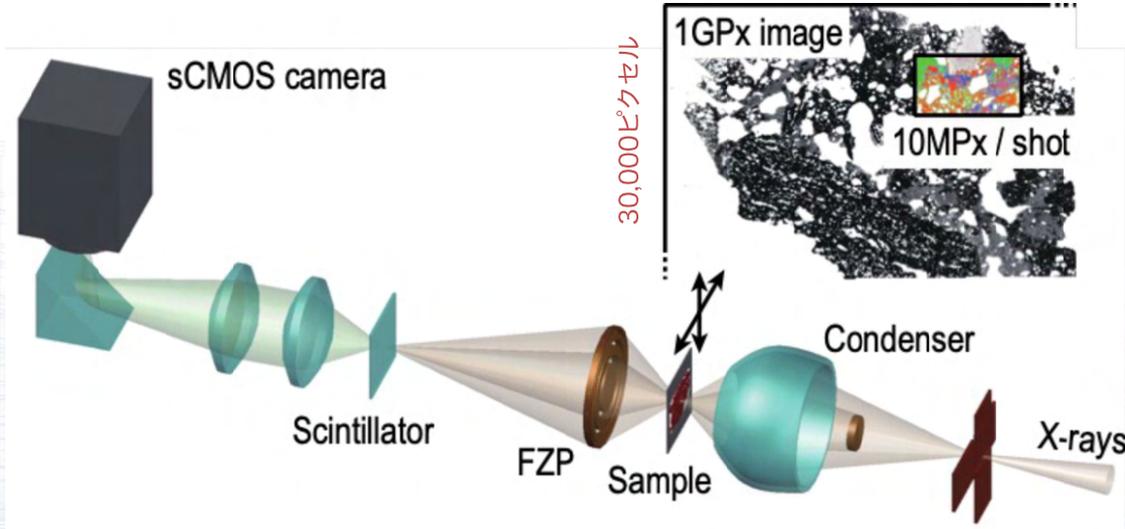
# 高分解能・広視野X線顕微鏡

## ギガピクセルX線顕微鏡

1ピクセル：10~30 nm 高分解能モード  
100 nm 広視野モード

40,000ピクセル

30,000ピクセル



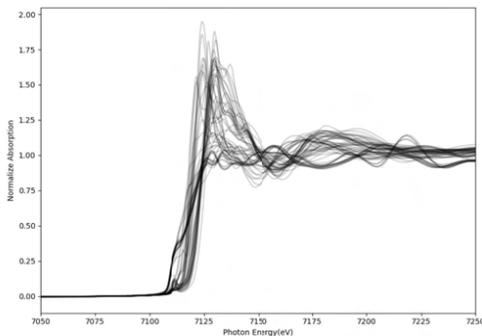
ナノメートル分解能でミリメートル領域を全て観察

# Optimal experimental design に基づく計測最適化

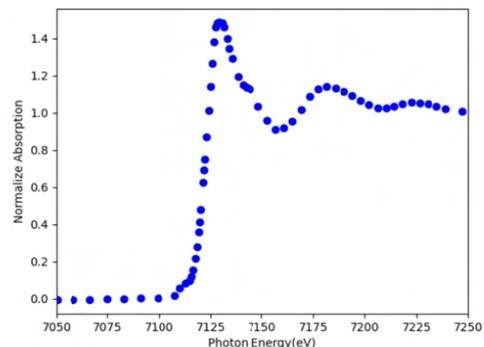
全計測時間（計測点数）を与えた場合の計測点の最適化

標準スペクトルデータベースをもとに、スペクトル計測の不確実性を定量化  
最も不確実性が大きい点をサンプリング → 計測の最適化

Y. Ito, K. Ono *et al.*, AI4Mat-NeurIPS2024.



D-Optimality

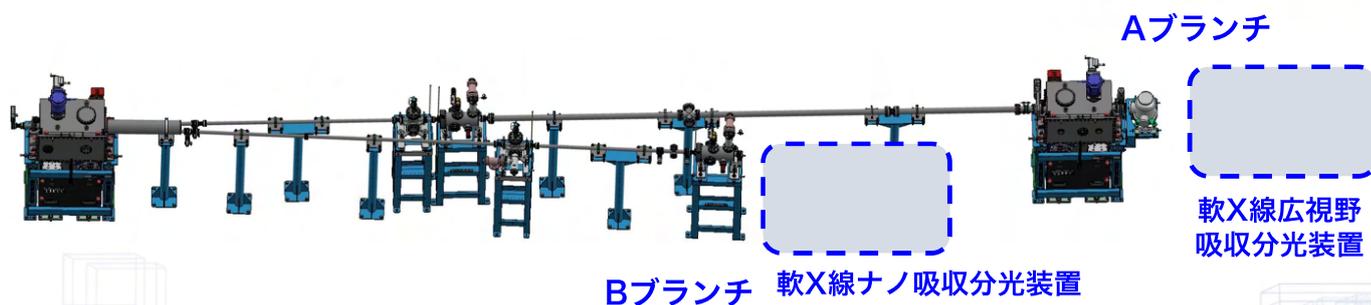


標準スペクトルデータベース

最適な計測点を提案



# ビームラインの立ち上げ目標への貢献



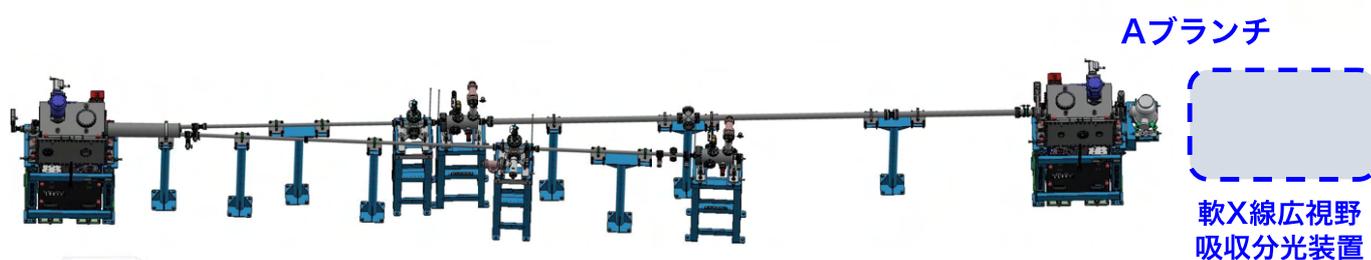
「軟X線広視野吸収分光装置」を開発・BL13U Aブランチ（非集光ポート）へ持込

- ・超広視野・中程度空間分解での軟X線顕微吸収分光実験
- ・イメージング検出器の性能評価

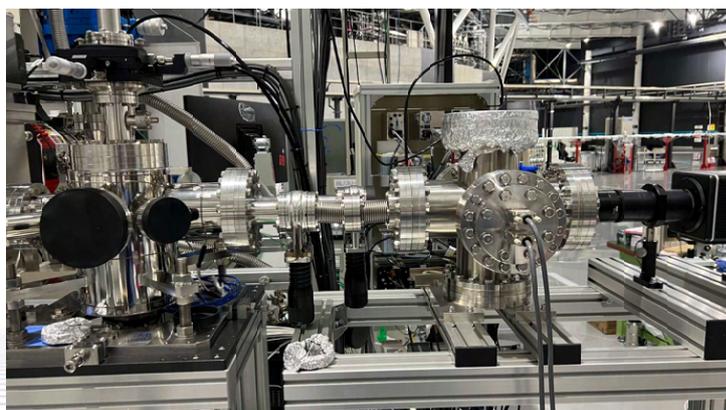
「軟X線ナノ吸収分光装置」を開発・BL13U Bブランチ へ持込

- ・高空間分解能・広視野での軟X線ナノ吸収分光実験
- ・ビームタイム有効活用のための最適実験、大規模実験データの解析・共有

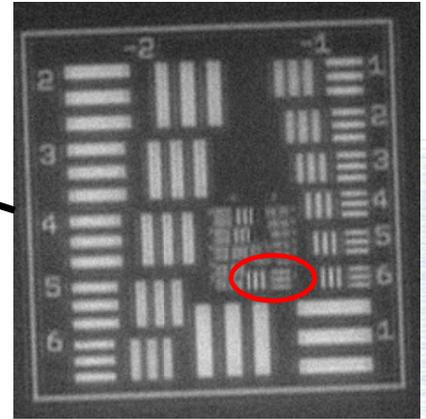
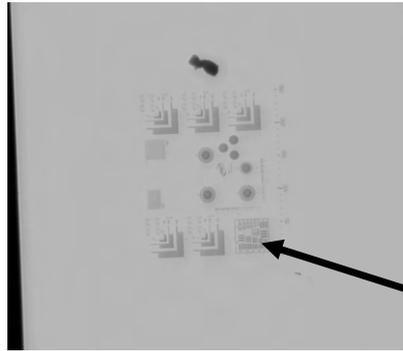
## 軟X線広視野吸収分光装置



- ・1mm程度の視野
- ・ビームに対するアライメント方法の検討  
および現地での実証
- ・計算上のビームサイズと比較  
→ ほぼ計算どおり ( $<1\text{mmH} \times >1\text{mmV}$ )



# 軟X線広視野吸収分光装置



- zu 150nm厚テストターゲットを用いて分解能を評価
- およそ1mmV × 0.5mmHの視野、空間分解能0.5 $\mu$ mの透過像が数秒で得られることを確認
- 条件によって、フレネル回折の影響が見られた
- 広視野吸収分光装置単体として使用可能なだけでなく、ナノ吸収分光装置の検出器として有望であることを確認



NanoTerasu

3GeV高輝度放射光施設(NanoTerasu)  
試験的共用課題

## コンビナトリアルXMCD分析基盤の開発

量子科学技術研究開発機構・量子技術基盤研究部門

境 誠司、上野 哲朗



NanoTerasu

NanoTerasu試験的共用課題

## 「コンビナトリアルXMCD分析基盤の開発」

ヒアリング資料

2023年12月27日



## 【目的・概要】

磁性・スピントロニクス材料のコンビナトリアル計測に向けてXEOL(X線励起可視発光)検出によるXMCD分析システム(実施項目1)と試料準備システム(実施項目2)を開発する。

## 【ビームラインの立ち上げ目標への貢献】

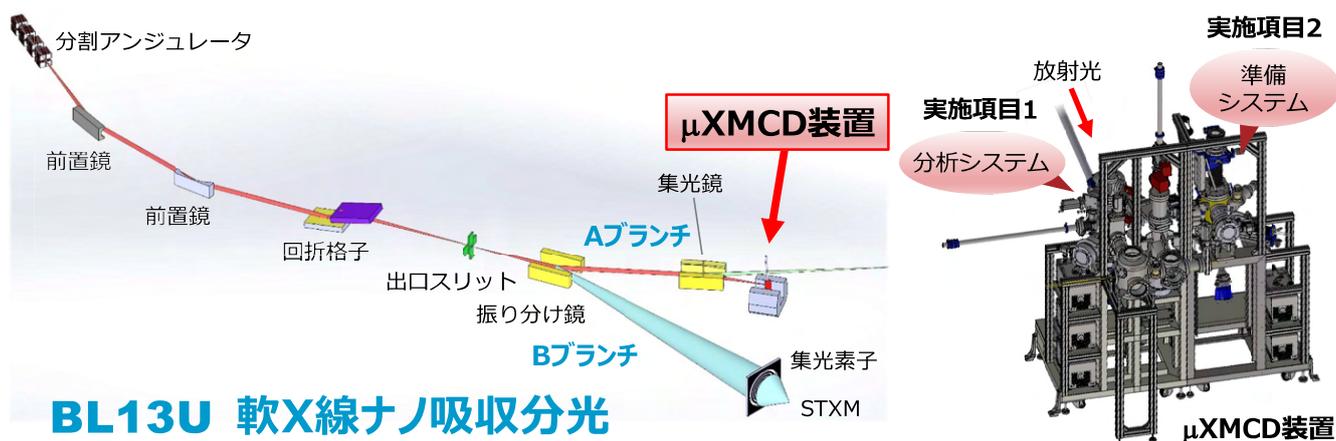
### μXMCD装置の立ち上げ

**実施項目1:分析システム** 集光鏡・XEOLによる顕微分析機構(空間分解能<1μm)

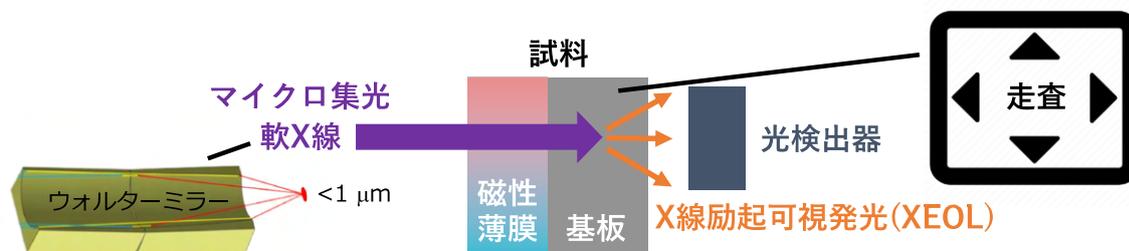
**実施項目2:準備システム** UHVスーツケース、試料処理室(熱処理・蒸着)

## 【投入可能なエフォート】

QST高崎:3名、QST播磨:1名 期間・回数:1週間×4回(2~3名が参加)



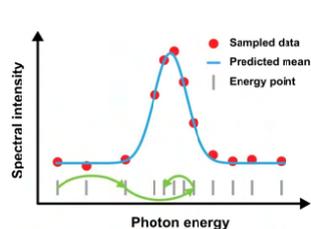
## 【実施項目1 XMCD分析システムの開発】



**XEOL-XMCD** 磁性薄膜によるXAS/MCDを基板からの発光( $\infty$ 透過X線強度)により計測  
**薄膜内部の電子・磁気状態の情報**

## コンビナトリアル試料の顕微XMCD分光

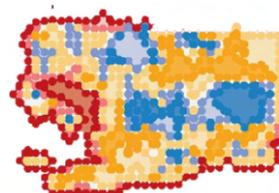
膜厚傾斜膜、組成傾斜膜等



T. Ueno *et al.*, npj Comp. Mater. (2021)

機械学習による計測の効率化

計測・分析  
自動化  
高速化



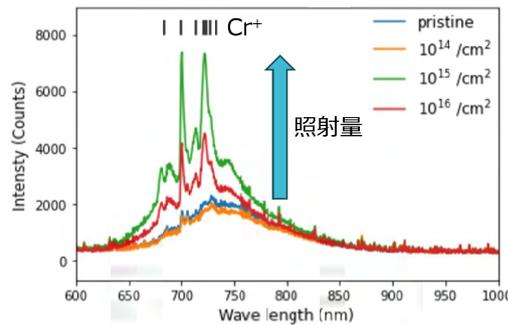
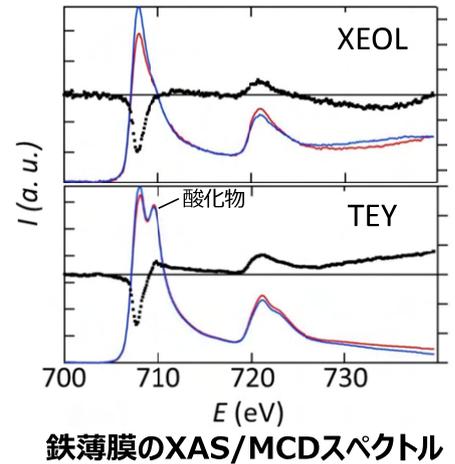
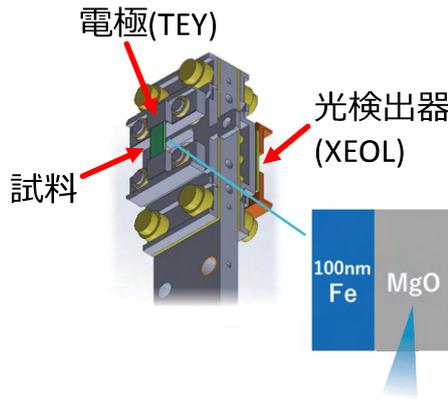
H. Iwasawa, T. Ueno *et al.*, npj Quant. Mater. (2022)

クラスタリングによる  
顕微スペクトルデータの解析

**コンビナトリアル試料のハイスループットXMCD分析を実現**



試作したXEOL測定装置  
KEK-PFで実施

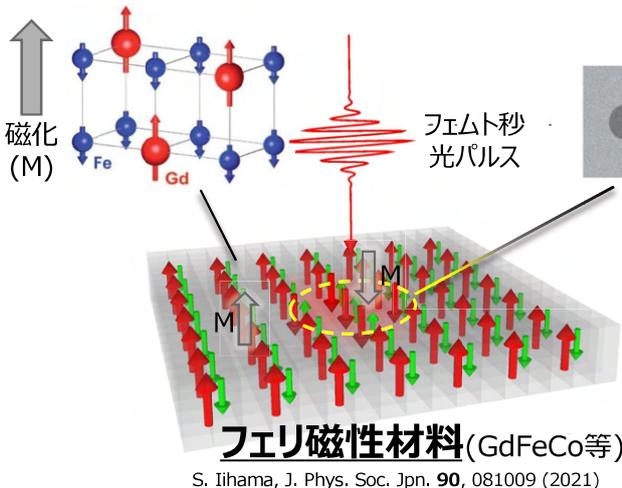


TIARA(QST高崎)で実施

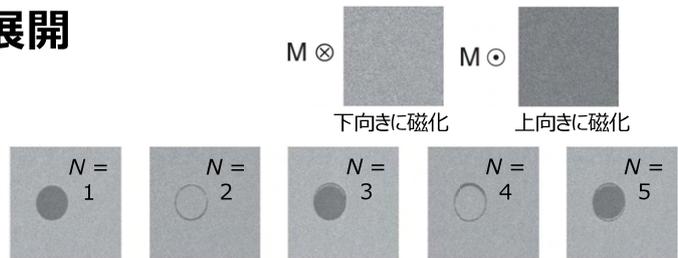
MgO基板のX線励起発光強度のCrイオン照射による変化

XEOL検出XMCDの技術的蓄積

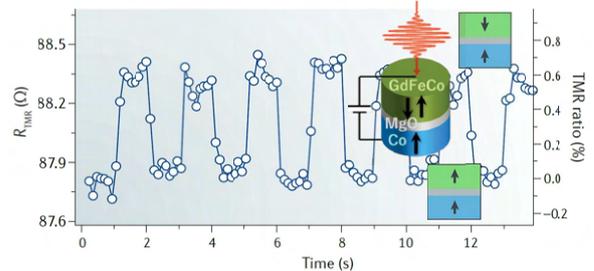
コンビナトリアル材料開発への展開



全光型磁化反転(AOS)  
ピコ秒の極短時間にスピンの反転



T. A. Ostler, Nat. Commun. **3**, 666 (2012)



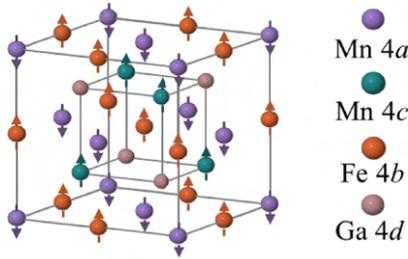
J. Y. Chen, Phys. Rev. Appl. **7**, 021001 (2017)  
光パルス照射によりメモリ素子の電気抵抗が変化

光電変換機能を備えた超高速不揮発性メモリ

高スピン偏極率・垂直磁気異方性なフェリ磁性材料への期待

### フェリ磁性ホイスラー合金 $Mn_2FeGa$

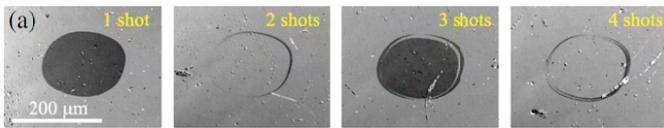
P. D. Bentley, S. Sakai et al., Phys. Rev. Mater. 7, 064404 (2023)



3種類の元素が規則配列(Xa構造)

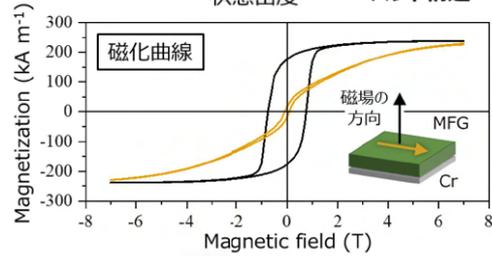
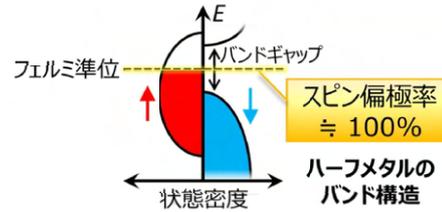
Mnスピンの向きが逆の二つの副格子(Mn4a, Mn4c)

### $Mn_2RuGa$ $Mn_2FeGa$ と同じXa構造

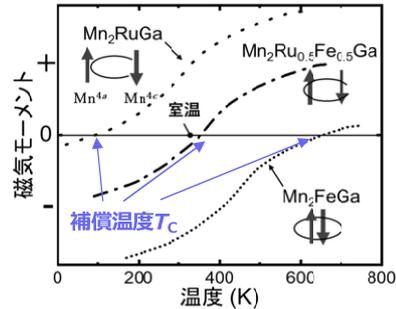


C. Banerjee, Nat. Commun. 11, 4444 (2020), PRL 126, 1772020 (2121)

磁化補償温度( $T_c$ ) > 室温でAOSが発現  
垂直磁気異方性が弱く実用に不向き

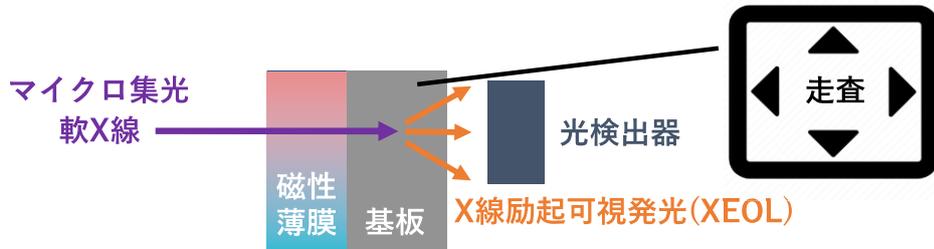


巨大垂直磁気異方性( $K_U \sim 1 MJ/m^3$ )



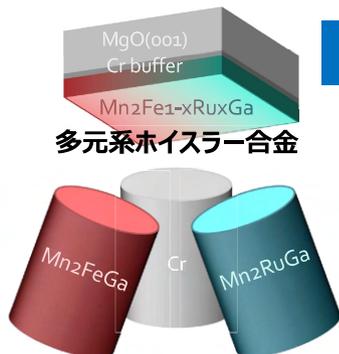
Fe/Ru組成比による $T_c$ 制御のイメージ

## MFGへの第四元素添加による新奇AOS材料の開発

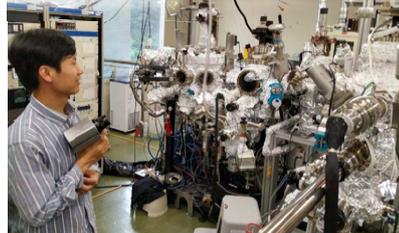


### コンビナトリアル試料の顕微XMCD分光

マイクロ集光軟X線とXEOLによるコンビナトリアル計測



#### 試料作製



#### 構造解析

佐々木・三井・QST播磨

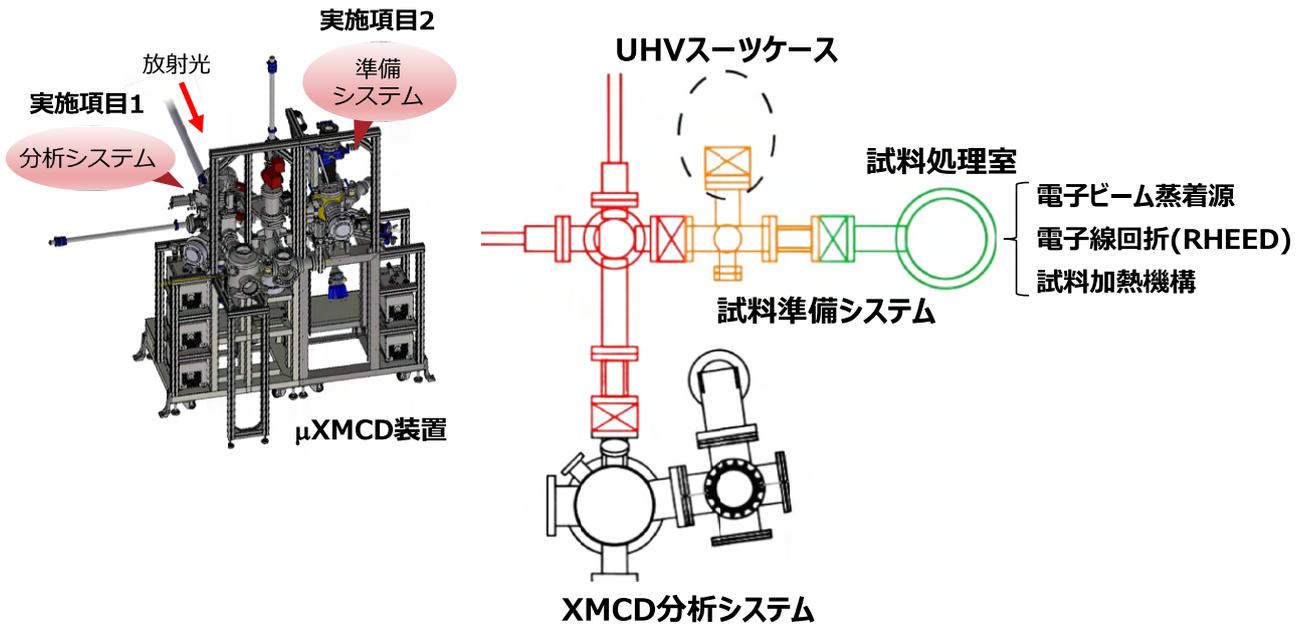
#### AOS実験

和達・兵庫県立大/板倉・QST木津

#### デバイス開発

境・QST高崎

## AOS材料・デバイス開発の加速 & $\mu$ XMCD装置開発の推進



**UHVスーツケース** 施設内のマルチプローブ測定や施設外からのUHV搬送を想定  
**試料処理室** 蒸着や加熱による追加処理や表面出し、簡単な試料作製を想定

**μXMCD装置の効果的運用が可能な装置環境を整備**



NanoTerasu

【まとめ】

磁性・スピントロニクス材料のコンビナトリアル計測に向けて  
**XEOL検出によるXMCD分析システムと試料準備システムを開発**

- XMCD分析システム** マイクロ集光・XEOLによる顕微分析機構(空間分解能<1μm)
- 試料準備システム** UHVスーツケース、試料処理室(熱処理・蒸着)の整備

**多元系ホイスラー合金のコンビナトリアル材料開発に着手**

**デバイス内部をそのまま透視できる磁気顕微鏡をアピール**





NanoTerasu

NanoTerasu試験的共用課題

## 「コンビナトリアルXMCD分析基盤の開発」

実施報告書

2025年3月14日



### 【実施内容】

#### ① ビームラインに既設の $\mu$ XMCD装置の立ち上げ

種々の磁性材料や二次元層状物質からなる薄膜試料、及び、マイクロメートルスケールの微細構造を加工したパターン状試料を測定し、装置の特性・性能を検証

#### ② コンビナトリアルスピン物性分析装置の開発

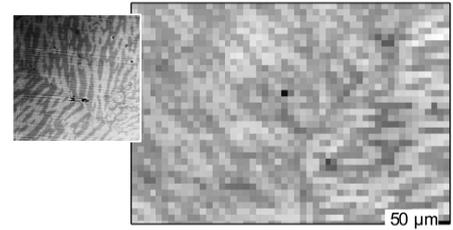
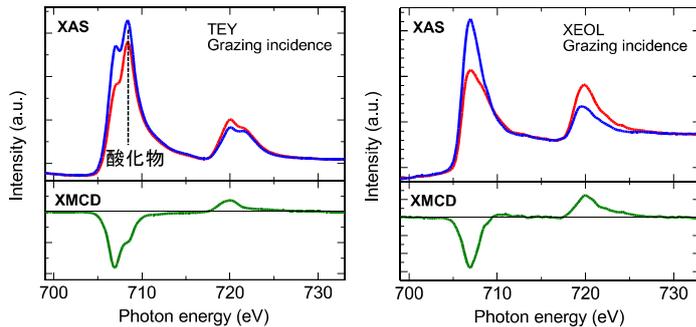
多元素化や超薄膜化・多層化により材料パラメータ空間が広大となる次世代磁性・スピントロニクス材料開発に対応可能な、コンビナトリアル試料のハイスループット分析が可能なXMCD分析装置を開発

## ① $\mu$ XMCD装置の立ち上げ

13

高崎研で作製した薄膜試料、パターン状試料を用いて、全電子収量(TEY)法及びX線励起可視発光検出(XEOL)法によるXAS・XMCD測定、及び、顕微マッピング測定を実施

【測定試料】 磁性材料：鉄、コバルト、サマリウムコバルト合金( $\text{SmCo}_5$ )、ホイスラー合金( $\text{Mn}_2\text{FeGa}$ )  
二次元層状物質：グラフェン、硫化錫( $\text{SnS}$ )、セレン化モリブデン( $\text{MoSe}_2$ )

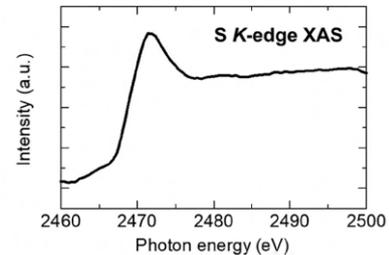
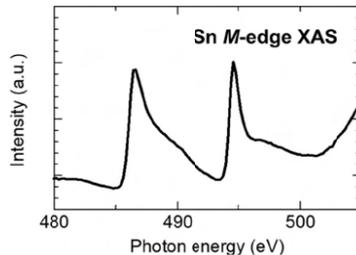
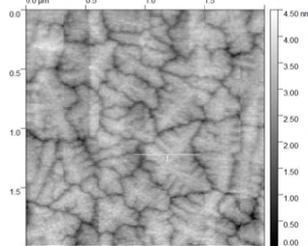


顕微XMCD測定による $\text{SmCo}_5$ の磁区像

TEY法により $\text{Co L}_{3,2}$ 吸収端(左/右円偏光)でステージを走査して測定、ビームスポット径:  $3\mu\text{m}$   
左の写真は磁気光学顕微鏡像による磁区像  
マイクロメートル台の分解能を達成

### TEY法、XEOL法で測定したFe薄膜のXAS/XMCDスペクトル

TEYに見られる表面酸化層による成分がXEOLでは消失。XEOLによる薄膜内部の測定に成功



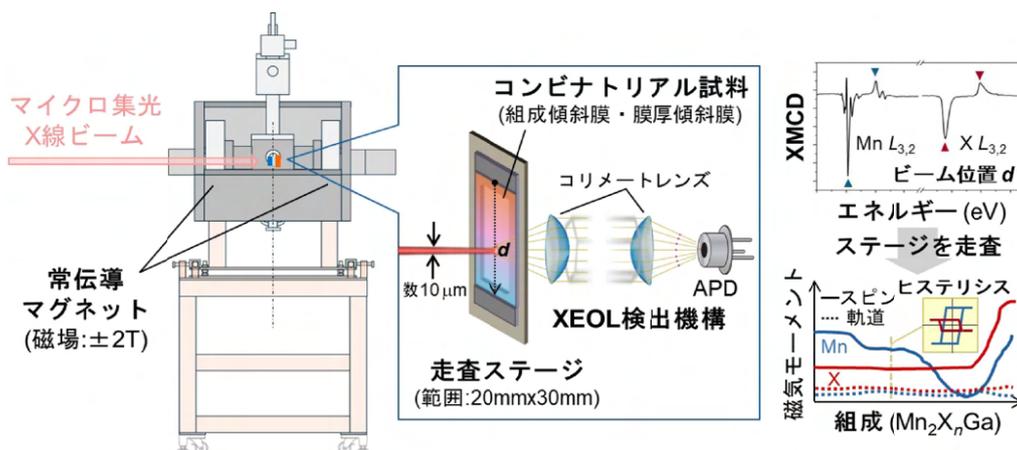
グラフェン上に成長した約1原子層の $\text{SnS}$ の原子間力顕微鏡像とXASスペクトル  
TEY法で測定。本ビームラインの特徴である幅広いエネルギー範囲での高感度測定を実現

エネルギー範囲の広さとマイクロビームを活かした多種元素の顕微分析を実証

## ② コンビナトリアルスピン物性分析装置の開発

14

$\mu$ XMCD装置の立ち上げで獲得した技術的知見を基に、次世代磁性・スピントロニクス材料開発に必要とされるコンビナトリアル試料(組成傾斜膜、膜厚傾斜膜)のハイスループット分析が可能な顕微XMCD分析装置を開発



コンビナトリアル試料分析用の顕微XMCD分析装置(イメージ図)

高磁場を迅速に印加できる常伝導電磁石を備え、走査ステージによる組成傾斜膜や膜厚傾斜膜などコンビナトリアル試料の顕微XAS/XMCD測定が可能。TEY法(電流計測)とXEOL法による測定機構を装備する。加えて、蛍光収量法やレーザー光の利用等への将来拡張性を備える。

本装置によるコンビナトリアル材料開発に関する研究提案が、令和7年度NanoTerasu共同利用課題に採択「コンビナトリアルXMCD分析による次世代スピントロニクス材料の開発」(境, 上野他)

令和7年度共同利用で利用を開始し、今後、共用設備として運用予定

# NanoTerasu BL13Uにおける オペランド自動顕微測定システム の構築

東京大学 大学院理学系研究科  
一杉 太郎

電気化学

固体物理

## Goal

室温超伝導

超低消費電力エレクトロニクス

超高性能全固体電池

超高性能触媒材料

### Vision

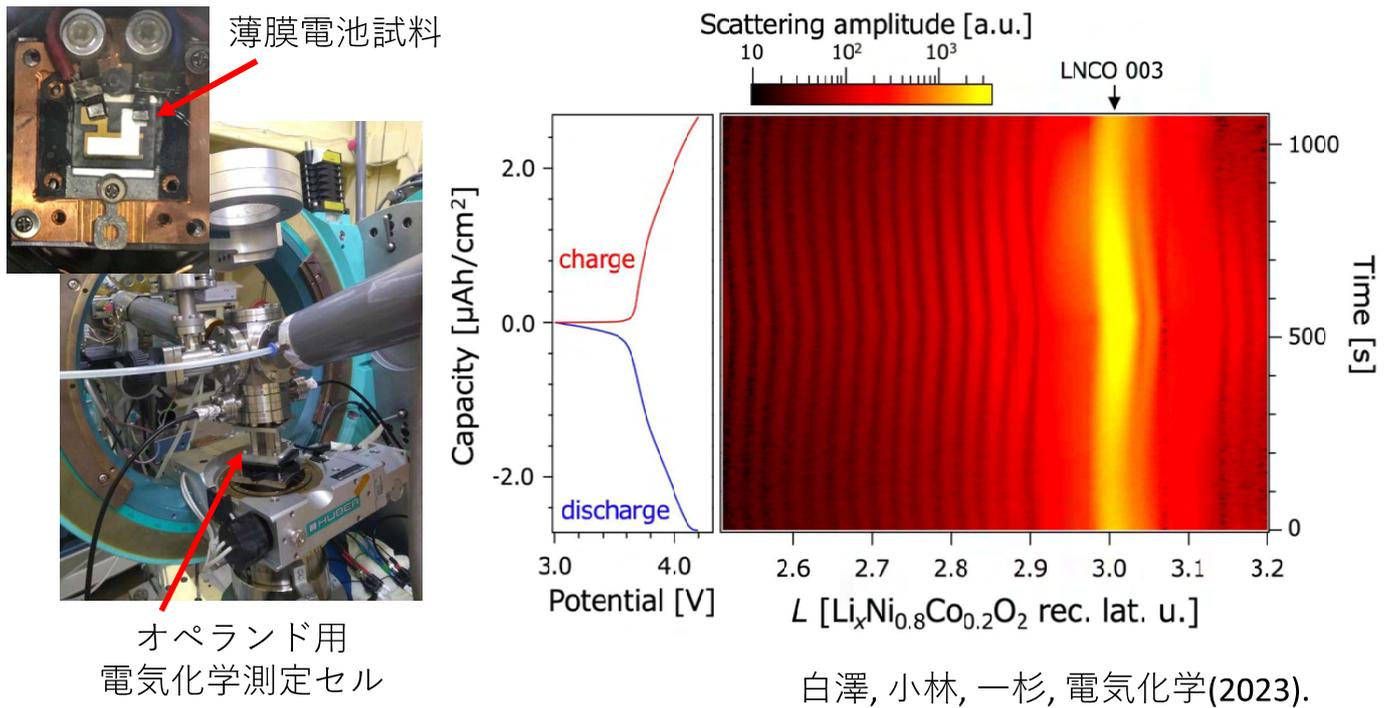
**固体電気”物理化学”の創成**

「表面/界面/薄膜の物理・化学」の知識を電気化学に注入

現在進行中プロジェクト: CREST代表、CREST共同研究、NEDO代表  
JST未来社会創造、文科省Dx-MT(DX-GEM)他

# これまでの研究紹介

## 放射光を用いた薄膜電池のオペランド計測



## 薄膜電池のオペランドX線回折・吸収分光を実現

Hitosugi *et al.*, Nano Lett. (2015), Nano Lett (2021), ACS Appl. Mater. Interfaces. (2023).

3

## 自動・自律実験による薄膜材料探索

目的を設計:

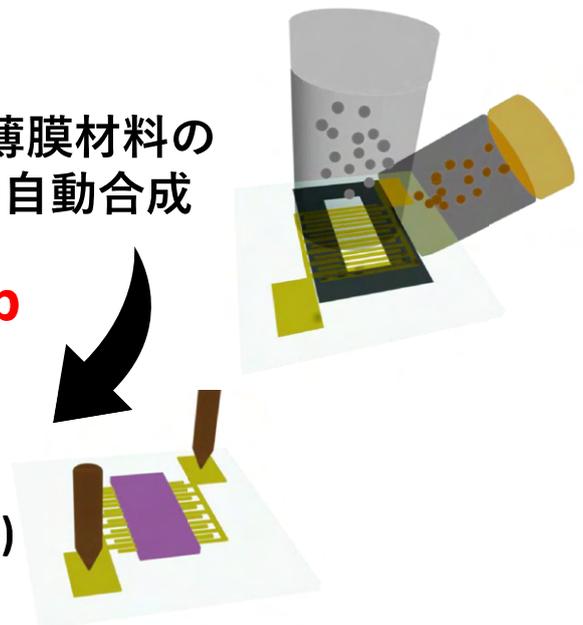
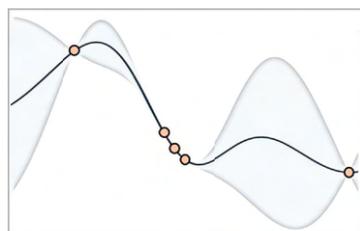
物性値 $Y$ を最大する合成条件 $X$ を決定せよ

ベイズ最適化  
(合成条件 $X$ を決定)

薄膜材料の  
自動合成

Closed-loop

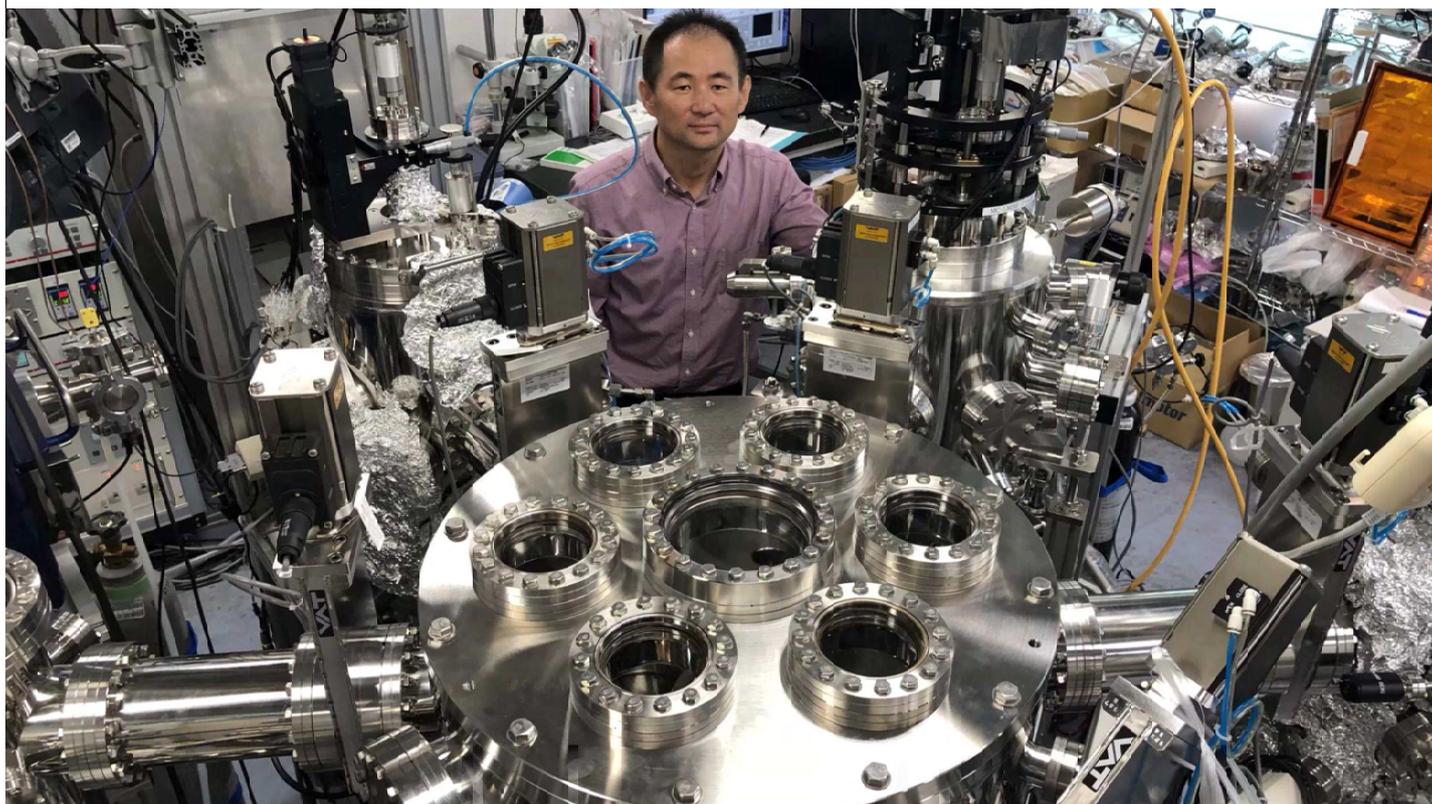
自動計測  
(物性・構造)



4

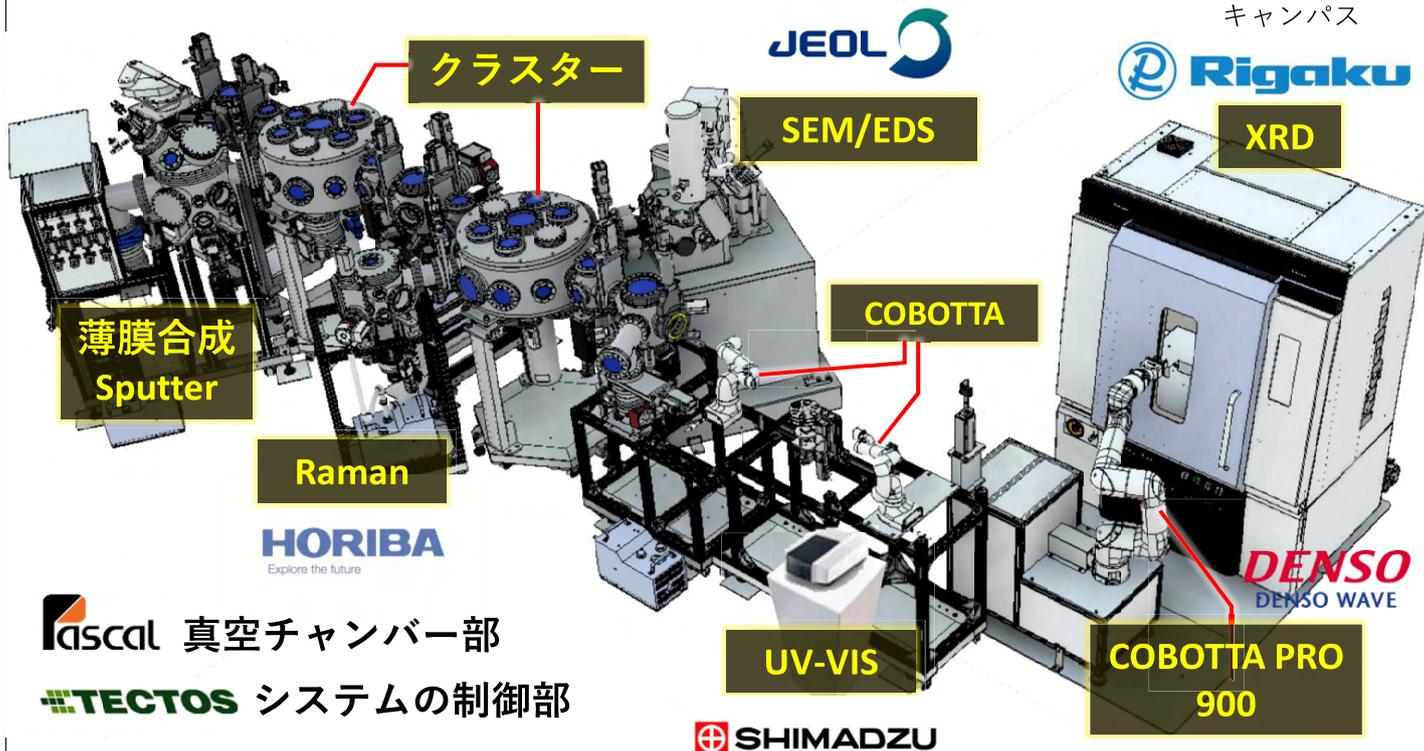
# 全自動・自律的に材料を探索する

JST-CREST/さきがけ/MIRAI  
の支援による



## データ・ロボット駆動科学を推進する デジタルラボラトリー

東工大  
すずかけ台  
キャンパス

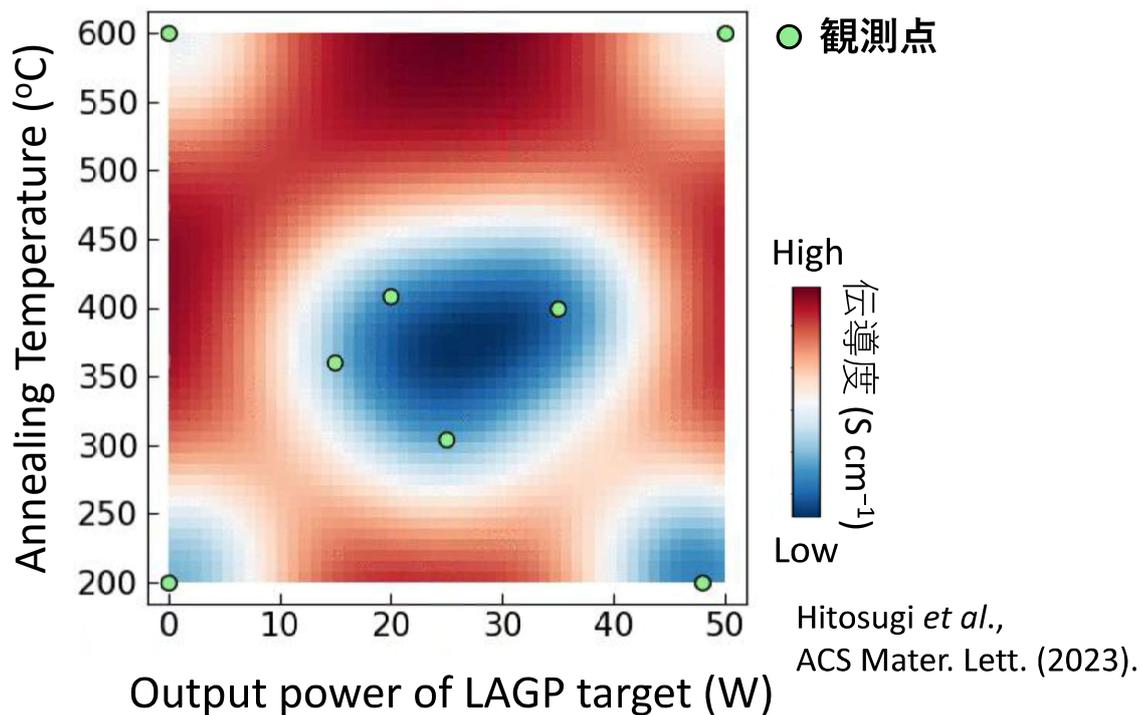


**Pascal** 真空チャンバー部

**TECTOS** システムの制御部

- ・ 成膜装置と計測機器(分光, 顕微鏡, X線回折)の複合化
- ・ ロボットを使った試料の装置間自動搬送

# 新規組成のLi伝導固体電解質の探索



自律的薄膜材料探索に成功

7

## 大型共用施設はデータ生産工場へ

- **共用施設内で物質を合成し、即評価**
  - 試料を放射光施設に持ち込む慣行からの変化  
(放射光施設に自動材料合成実験システムを設置)
- 総合診断: SEM、ラマン、電気測定等、  
**別の物性計測も実施してデータ収集**
  - 放射光はone of them (←すみません、怒らないでください!)
- **計測結果を自動解釈し、計算にすぐフィードバック**
- **計算シミュレーションの結果を  
すぐに実験で検証**
- **データの共有**



8

# NanoTerasuで展開するサイエンス

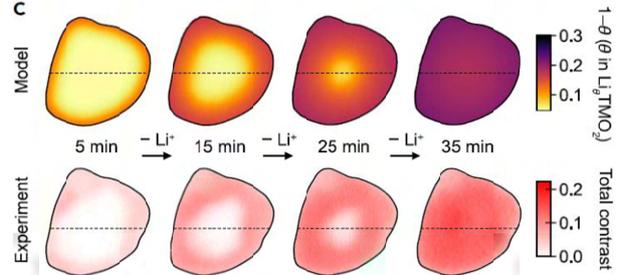
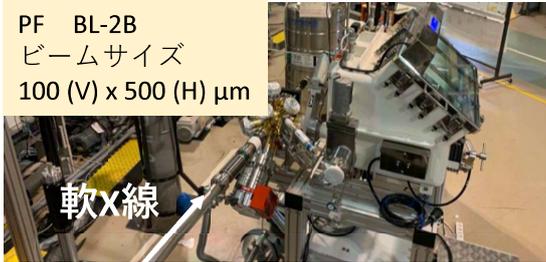
NanoTerasu  
BL13U  
ビームサイズ  
~1 μm

これまで：  
正極遷移金属の平均的な  
電子状態変化の観察に成功  
QST 堀場博士, 北村博士と共同



計画：  
正極遷移金属の局所的な  
スピン状態変化の観察に期待

先行研究：  
Li組成(遷移金属価数)の粒内不均一性



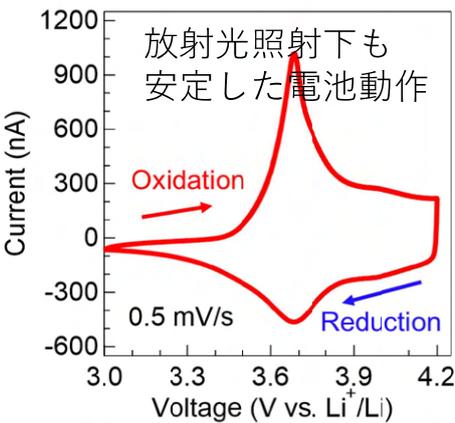
C. Xu, et al., Joule (2022).

スピン状態が電池容量に重要

J. Zhang, et al., JACS (2023).

薄膜Li電池の面内

- ・オペランド偏光顕微分光観察
- ・オペランドMCD測定



9

## 様々な研究機関との連携促進: 自動搬送システムの構築

東大 一杉研  
Arグローブボックス

Ar雰囲気下で  
スーツケース搬送

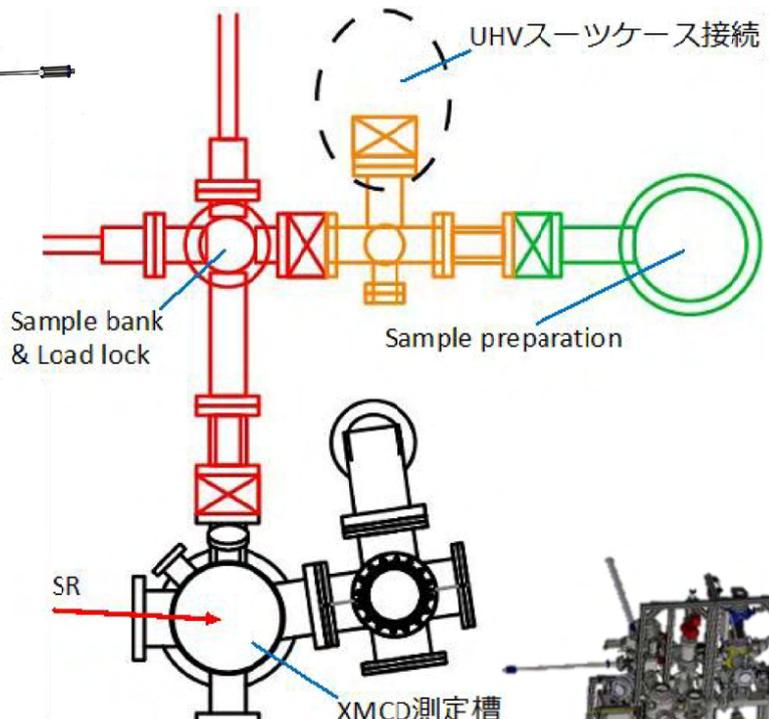
NanoTerasu BL13U  
μ-XMCDチャンバー

UHVスーツケース  
接続チャンバー

Sample bank

XMCD測定槽

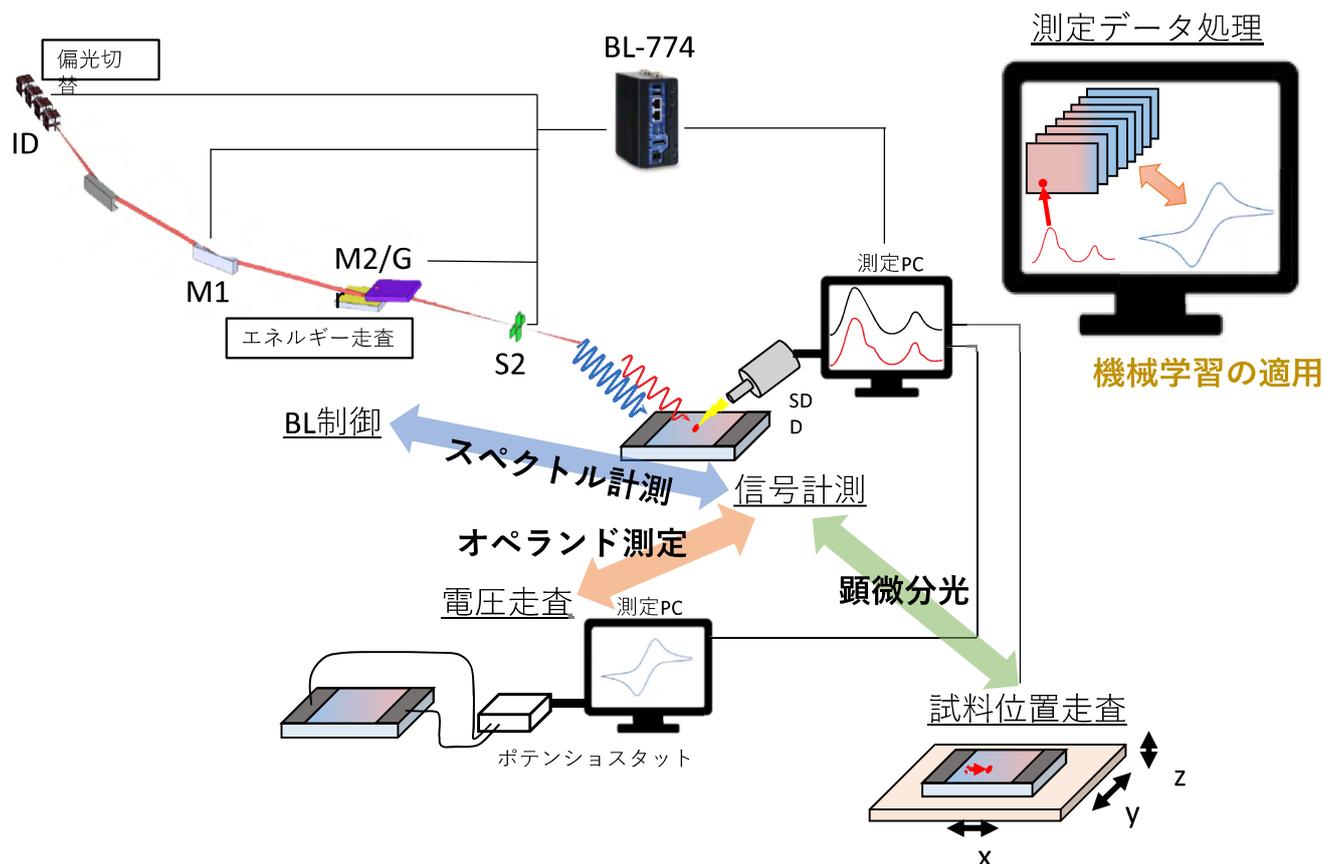
自動搬送



予算があれば、成膜自体をNanoTerasuで行いたい  
自動・自律的な物質合成と物性評価

10

# オペランド自動・自律顕微分光システムの構築



他の共用ビームラインへのオペランド自動計測スキーム展開

11

## 研究体制とスケジュール

### 研究体制

東京大学 一杉研究室

一杉太郎 教授	システム構築におけるアドバイス
小林成 特任助教	システム構築におけるアドバイス プログラミングのサポート
学生2名	調整のサポート テスト試料の作製 利用実験

NanoTerasu BL13U

QST  
大坪  
北村



### スケジュール

2024年

2025年

4月 5月 6月 7月 8月 9月 10月 11月 12月 1月 2月 3月

試験的共用

共用開始

BL制御・オペランド測定・顕微分光の同期  
システム構築 (光なしでも可)

システム  
構築完了

自動搬送システム構築 (光なしでも可)

放射光実験 → FB → 放射光実験 → FB → 放射光実験

12

# アウトリーチの経験

1. (一杉)リガクル 2023年  
(リンク) 夢、それは究極の物質を探し出すこと
2. (一杉) TECH-MAG (TDK) 2020年  
(リンク) 研究は宇宙探索のようにわくわくするもの
3. (一杉) EMIRA (東京電力関連)  
世界でただ一つの視点から、  
全固体電池の新たな研究領域を切り拓く(前編)(後編)
4. (一杉) 新聞報道 103件
5. 一杉研究室への見学 (2023年4 - 12月、のべ500名、180社以上)
6. 一杉研主催  
「機械学習×ロボット×材料科学」セミナー参加 800名
7. 東京化学同人より、書籍出版予定 (2024年3月)
8. 中高生へのセミナー (2023年度):  
神奈川県立柏陽高校(約100名)、兵庫県立豊岡高校 (約20名)  
東大メタバース工学部 ジュニア講座(約100名) 他多数

研究者ってどんな仕事?  
研究者って楽しいぞ!

一杉 太郎先生  
東京大学 大学院理学系研究科 化学専攻 教授

皆さんは「人間で自分しかできないこと」はありますか?  
心おさないでください。今は無くても自然です。  
地球温暖化を解決するための超伝導や機械学習、ロボット技術を題材に、  
研究者のオリジナリティについて、おおいに皆で議論しましょう!  
皆さんも新発見が必ずあります!

日程 12.26 (火) 13:30~15:30  
場所 東京大学工学部11号館1階 HASEKO-KUMA HALL  
募集対象 主に中高生 60名(現地参加のみ)  
申し込みは12月15日(金)までです。

METAVVERSE <https://www.meta-school.t.u.tokyo.ac.jp/junior/>

2023年12月26日  
(一杉) 中高生向けの講演



直談 専門家へ問う  
AI×ロボで材料開発  
「人知を超えた」発見

東大教授 一杉 太郎氏

「ヒト意識」なるものがある。1999年、東京大学工学部材料化学専攻に在籍した。東大工学部材料化学専攻の教授。2019年10月から現職。政府の「マテリアル未来戦略」も関係が深い。



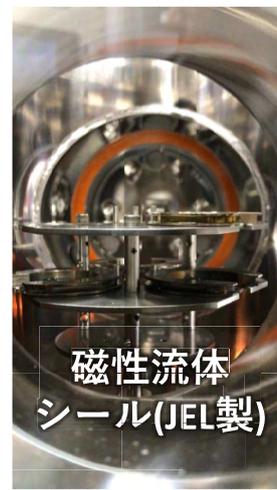
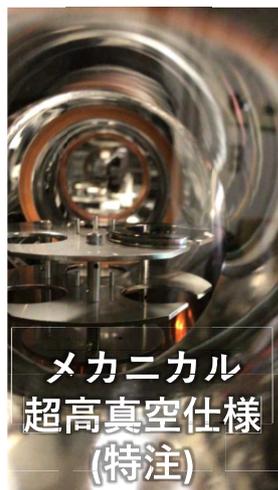
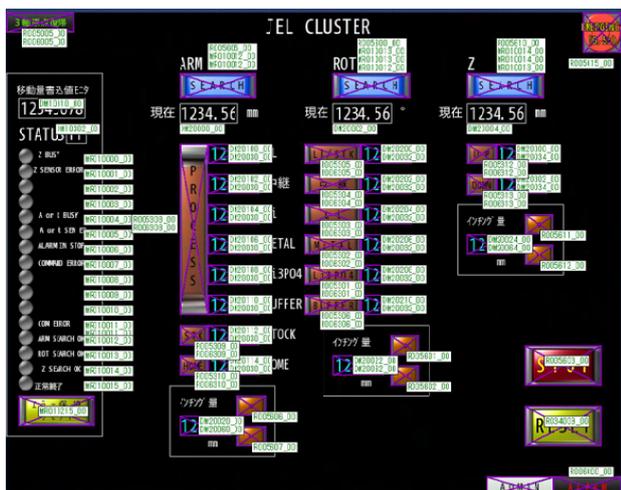
## 実施状況①: 自動化に関するセミナー実施

研究参加者の小林からNanoTerasuメンバー向けの自動化セミナーを実施した



ソフトウェア:  
PLC制御によるロボット搬送/  
バルブ開閉等の構造化

ハードウェア:  
真空搬送ロボットによる  
基板ホルダーの可搬性の違い

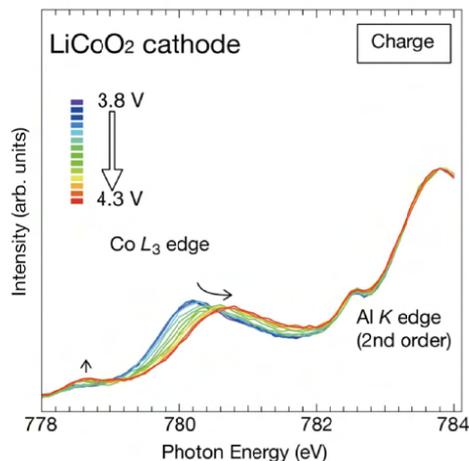
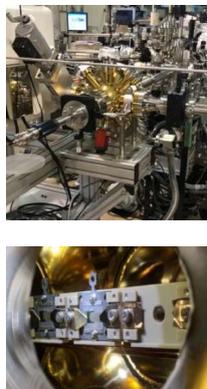
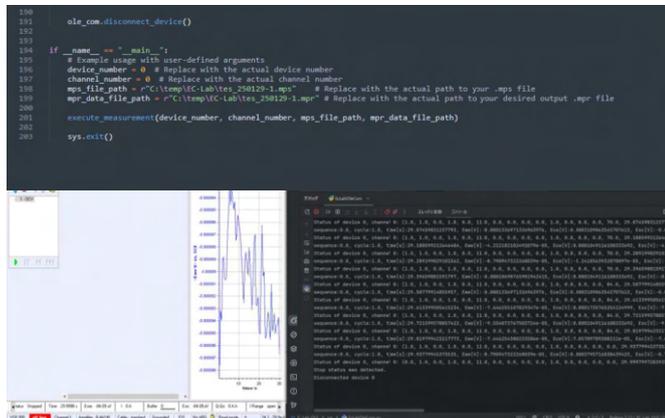


BL06U nanoARPESシステムに導入予定の自動搬送システムの構築にも貢献

# 実施状況②: 薄膜電池オペランド測定に向けたシステム開発

ポテンショスタットの  
python制御実装

薄膜電池オペランド  
X線吸収分光の検討



Python制御と相性がよい  
NanoTerasu BL制御システムに  
簡便に適合可能

オペランド計測に成功

※グローブボックス整備の  
都合から、KEK-PFで予備実施

NanoTerasuでのオペランド計測成功に期待

15