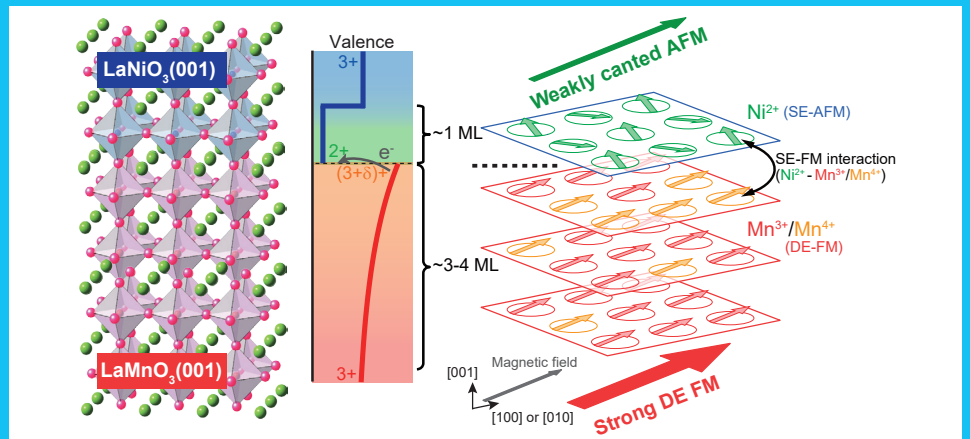
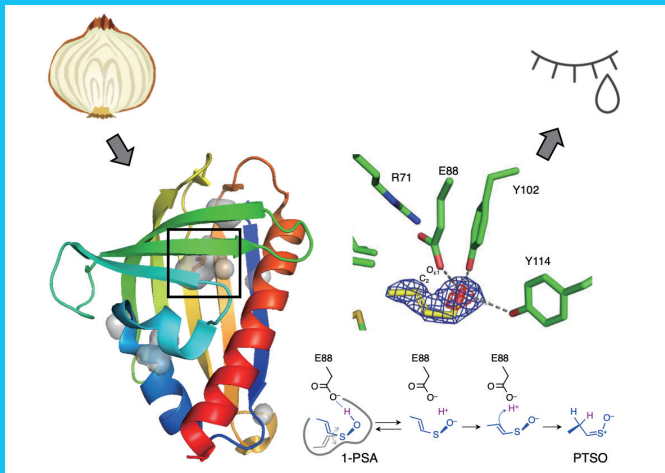
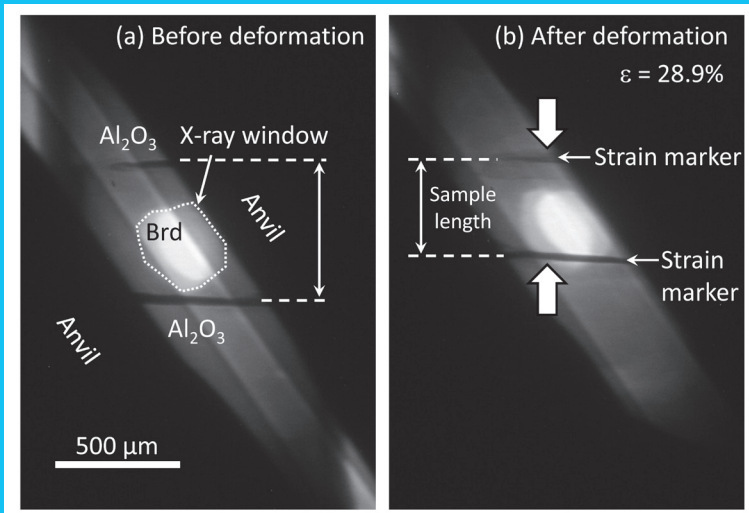


- D111型装置を用いた高温高压変形実験: 固体地球深部の流動変形の理解を目指して
- タマネギ催涙成分が作られる酵素反応の構造・理論基盤
- 非対称な電荷分布が引き起こすペロブスカイト型遷移金属酸化物界面の強磁性



目次

施設だより	船守 展正	1
現 状		
入射器の現状	古川 和朗	2
光源の現状	小林 幸則	4
放射光実験施設の現状	船守 展正	7
放射光科学第一, 第二研究系の現状	雨宮 健太	8
最近の研究から		
D111 型装置を用いた高温高压変形実験: 固体地球深部の流動変形の理解を目指して High-Pressure and -Temperature Deformation Experiments using D111-type apparatus: Towards Understanding of Rheology of Deep Earth Materials	西原 遊, 辻野 典秀, 久保 友明, 山崎 大輔, 土居 峻太, 今村 公裕, 芳野 極	10
タマネギ催涙成分が作られる酵素反応の構造・理論基盤 Structural and Theoretical Bases of the Enzymatic Reaction Producing the Onion Lachrymatory Compound	佐藤 優太, 荒川 孝俊, 伏信 進矢	15
非対称な電荷分布が引き起こすペロブスカイト型遷移金属酸化物界面の強磁性 Interfacial Ferromagnetism Induced by Asymmetric Charge Redistribution at Heterointerfaces of Perovskite Transition-Metal Oxides	北村 未歩, 堀場 弘司, 小林 正起, 坂井 延寿, 雨宮 健太, 藤森 淳, 藤岡 洋, 組頭 広志	20
プレスリリース		
世界初! 「マランゴニ対流」による分子のリズミカルな運動を観測生命活動をつかさどるリズムの起源に迫る		26
金属イオン間の電子の授受で極性構造を制御〜強誘電体・圧電体材料や負熱膨張材料の開発に新しい知見〜		26
隕石衝突の規模を鉱物から探る〜高強度レーザーで再現した隕石衝突の瞬間を超高速X線撮影〜		26
酸化物ナノ構造に現れる新しい電子相の発見〜二酸化バナジウムを用いたモットランジスタ開発に新しい知見〜		27
新奇な磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ構造の作成に成功〜磁性とトポロジカル物性の協奏現象に新たな知見〜		27
研究会等の開催・参加報告		
「第 37 回 PF シンポジウム (代替開催)」 開催報告	君島 堅一	28
ユーザーとスタッフの広場		
DESY 滞在記〜研究編〜	石井 晴乃	29
KEK オンライン一般公開 2020 が開催されました	阿部 仁, 山下 翔平, 山本 尚人	30
総研大 物質専攻の亀沢知夏さんが SOKENDAI 賞を受賞		31
PF トピックス一覧 (8 月〜10 月)		31
PF-UA だより		
原子分子科学ユーザーグループの紹介	小田切 丈, 足立 純一, 北島 昌史, 早川鉄一郎, 寺崎 亨, 彦坂 泰正	32
動的構造ユーザーグループ活動紹介	中村 一隆, 野澤 俊介	35
令和 2 年度 第 1 回 PF-UA 幹事会・運営委員会 議事録		36
令和元年度 PF-UA 総会 議事録		37
人 事		
新人紹介		38
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所教員公募について		39
お知らせ		
2020 年度量子ビームサイエンスフェスタ (第 12 回 MLF シンポジウム / 第 38 回 PF シンポジウム) 開催のお知らせ	松垣 直宏, 川崎 卓郎	40
2021 年 4 月入学 物質構造科学専攻博士課程 (5 年一貫制) 及び 3 年次編入学の最終募集のお知らせ	熊井 玲児	40
2021 年度前期フォトンファクトリー研究会の募集	船守 展正	40
予定一覧		41
運転スケジュール (Dec. 2020 ~ Mar. 2021)		42
掲示板		
放射光共同利用実験審査委員会速報	君島 堅一, 兵藤 一行	43
第 123 回 物質構造科学研究所運営会議議事次第		43
第 124 回 物質構造科学研究所運営会議議事次第		43
編集委員会だより		
「PF ニュース」からのお知らせ		45
投稿のお願い		45
巻末情報		46

〈表紙説明〉最近の研究から

- (上段) 高温高压下で一軸圧縮変形された下部マントル鉱物ブリッジマナイト (Brd) のラジオグラフィ像 (左: 変形前, 右: 変形後) 「D111 型装置を用いた高温高压変形実験: 固体地球深部の流動変形の理解を目指して」より
- (中段) タマネギの生体防御・催涙成分としてはたらく含硫分子生合成酵素 (LFS) の立体構造・触媒機構 「タマネギ催涙成分が作られる酵素反応の構造・理論基盤」より
- (下段) 軟 X 分光により決定した LaNiO₃-LaMnO₃ 界面の電荷分布と磁気構造 「非対称な電荷分布が引き起こすペロブスカイト型遷移金属酸化物界面の強磁性」より

KEK ロードマップ 2021 についての紹介から始めたいと思います。KEK ロードマップ 2021 は、国立大学法人・大学共同利用機関法人の第四期中期目標・中期計画期間にあたる 2022~27 年度の 6 年間の KEK における研究推進の指針となる文書で、KEK 研究推進会議を中心に策定に向けた議論が行われています。第 100 回研究推進会議（2020 年 2 月 3 日）では、これまで各所でご説明している内容が「フォトンファクトリーの将来計画」として議論されました。KEK ロードマップオープンシンポジウム（2020 年 7 月 6 日）において、KEK の全ての研究所・施設およびプロジェクトについて議論された後、7 月から 8 月にかけて、6 回の非公開の研究推進会議（通常は公開）で集中的に審議され、第 112 回研究推進会議（2020 年 9 月 8 日）の承認を経て、中間まとめの文書が公表されました。現在、中間まとめに対する意見募集が行われていますが、12 月に非公開の研究推進会議において修正が行われた後、2021 年 3 月に予定されている KEK 国際諮問委員会の評価を経て、KEK ロードマップ 2021 が策定されることとなります。

中間まとめの第一章には、KEK の推進する主要プロジェクトの方針が記載されており、PF については、以下の通りになっています。

・フォトンファクトリー

『学術先端基盤施設として、引き続き、稼働中の 2 光源による物質と生命の探究を進めるとともに、短期計画として、高度化により向上する光源性能を活用したオンリーワン・ナンバーワンのビームライン群と R&D 専用ビームラインを整備し、最先端の利用研究と開発研究を展開する。また、長期計画の具体化に向けて、自由度を格段に向上させた新光源施設の概念設計と関連技術の R&D を進める。』

この方針には KEK 機構長の同意もあり、短期計画として、PF リングの高度化（PF Upgrade 2020）と研究開発専用ビームラインの整備を概算要求しています。概算要求が認められれば、計画を一気に進めることが可能ですが、認められない場合でも、予算のやり繰りをすることで、優先順位を考慮しながら進めることにしています。

短期計画である PF Upgrade 2020 の実行、その第一弾として、2021 年夏期の運転停止期間中に PF リングのビーム診断系を高度化する準備を進めています。軌道安定化の帯域を 0.3 Hz から 50 Hz に拡張することで、挿入光源のギャップ変更や機械振動に由来する軌道変動が低減されるとともに、低エミッタンス化を始めとする加速器オプティクスの改善のためのスタディも進むと期待されます。導入予定の機材は、長期計画の新光源施設に持ち込めば、より広い帯域で動作する仕様となっており、長期計画に向けた準備の意味合いもあります。

研究開発専用ビームラインの設計とビームライン再整備の検討も進めています。ビームライン再整備については、測定装置部門の 10 の測定手法グループからの委員で構成

されるワーキンググループを設置して、PF としての新展開や各測定手法の先端化を図るための議論を開始したところです。再整備には再編を伴うことが想定されますが、ビームラインの多様性は極めて重要ですから、それを損なうような再編は可能な限り避けたいと考えています。なお、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）拡大への対応の観点からも、2020 年度第二次補正予算を始めとする各種の予算により、リモート測定や自動測定など、各測定手法に適した機能強化の取り組みを進めています。

次に、放射光共同利用実験審査委員会（PF-PAC）の報告をしたいと思います。PF-PAC では、分科会の再編と PF 内部課題の整理について審議されました。物構研運営会議でも承認されましたので、2021 年度から新しい制度が導入されます。新分科会は、ビームライン編成に準拠する形となり、分科の名実不一致や同一ビームラインにおける複数分科評点混在が解消されます。また、横断的な手法による第六分科が新設されます。新制度では、利用を希望するビームラインと課題審査を担当する分科が 1:1 に対応することとなります。審査基準に変更はありません。PF 内部課題の整理は、施設戦略の可視化、創出成果の最大化、内部課題へのビームタイム配分の根拠の明確化を目的としています。PF-PAC 関連の詳細については、本誌紹介記事をご参照ください。

2020 年度は、COVID-19 拡大による緊急事態宣言で始まりましたが、ようやく新しい生活様式・実験様式による平穏が戻ってきているように感じています。延期されていた第 37 回 PF シンポジウムも Web 形式により無事に代替開催（2020 年 9 月 27 日）されました。詳細については、こちらも本誌紹介記事をご参照ください。第 38 回についても 2021 年 3 月に Web 形式で開催する方向で準備が進められています。

PF では、COVID-19 拡大防止の観点を考慮した「安全ガイドライン」を定めた上で、2020 年度第二期の運転を開始しています。当然ですが、「安全ガイドライン」の順守をお願いします。なお、これに関連して、放射線科学センターの協力により、新方式での放射線講習が実施されていますが、2021 年度には e-learning に移行しますので、全ての講習をリモート受講できるようになり、利便性も向上すると期待されます。

最後に運転の予定ですが、第一期が 6 月後半の 2 週間の PF リングのみでしたので、第三期については、運転時間を十分に確保できるように調整を進めています。研究教育成果の創出と COVID-19 拡大の防止の両立のため、利用者の皆さんには、引き続き、ご理解とご協力をお願いいたします。

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 古川和朗
(2020年11月6日付け)

概要

2020年度夏期の停止期間は、7月3日から9月27日まで確保された。この間に、熱電子銃とRF電子銃の合流部のパルス偏向電磁石や収束電磁石の交換があり、陽電子50 Hz入射を含めたより柔軟なビームパルス配分による同時トップアップ入射が可能となった。また、陽電子生成用フラックスコンセントレータの更新に伴って、これまでの知見に基づいたビームモニタや補正電磁石の追加を含む陽電子捕獲部の改造が行われ、より安定性の高いビーム加速が期待される。低速陽電子実験施設についても、通常の保守作業の他に、放電予防・安全性維持のため電子銃の高電圧ケーブルの交換が行われた。9月28日から始まった安全自主点検に引き続く立ち上げ作業は順調に推移し、各蓄積リングへの入射状況を観測しながらさらなる改善を進めている。新型コロナウイルスにより夏前に充分運転時間が確保できなかった放射光施設に向けてできるだけ早くビームを供給するために、例年より短い立ち上げ時間となり、RF電子銃空洞のコンディショニングに時間を要したことも災いして、SuperKEKB向けの電子ビームの調整時間が充分ではなかった。SuperKEKBメインリングへのビーム輸送路の後半でのエミッタンス悪化については、明確な原因が掴めていないが、夏期の調査により装置の問題の可能性が低くなってきた。現実的な装置の動作点の誤差を含めたビームシミュレーションにより、いくつかの仮定に基づく悪化再現の調査も進んでおり、理解が進めば、解消も可能となるのではないかと期待される。当初は重視していなかったビーム輸送路におけるビーム測定装置の増強も、今後は期待される。

SuperKEKB 加速器審査委員会

本年の審査委員会は、新型コロナウイルスの影響により内容を厳選したビデオ会議開催となり、全ての委員に参加していただき、7月15日に我々からの報告と質疑、20日に講評が行われた。入射器からは、入射器全般の報告とビーム輸送路によるエミッタンス増大の報告が行われ、集中した活発な質疑討論となった。

今回は入射器に対する意見はいつもの年に比べると少なく、全般的には、積極的な検出器バックグラウンド低減の努力を求められた。この一年間の入射器とビーム輸送路でのエミッタンス抑制の努力は評価されたが、最終目標に早期に近づくよう求められている。そのためのこの夏の改造を含めた計画が支持された。エミッタンスを維持しながら、ビーム電流を目標に近づけるためのあらゆる努力を惜しまないよう求められている。

特に今回、目新しい提言が得られたわけでは無いが、日々の装置やビームについての開発に追われる中、まとまった報告を行い、確認し合う良い機会となっている。今回は日本時間の夜間に行われたが、米国西海岸の委員には厳しい時間帯となり、新型コロナウイルス対策として今後どのように対応するのか検討も必要と思われる。

夏期加速器停止期間の改善点

今回の夏期停止期間は長くはなかったが、改造項目としては多岐にわたり、高い密度となった。そのため、一部の作業を冬期の停止期間に繰り越さざるを得なかった。入射器のビームの安定化、低エミッタンス化については、さまざまな努力を試み、以前は短時間しか維持できなかったビーム品質が、比較的長く維持できるようになり、それによって浮き彫りになってきたより繊細な課題に取り組むことが可能になってきた。これをさらに進展させるためにも、時機を逸さない装置の機能向上も重要である。

RF電子銃のレーザーシステムに関して、レーザー光の形状の補正と安定化のために回折光学素子(DOE)を導入し、生成されるビームの形状、位置、さらにはビームエミッタンスの安定化が期待される。また、以前から運用されてきたレーザー光の光量と位置の安定化機構も改善更新され、これもビームの安定化に繋がると期待される。レーザーの同期用の複数の信号の位相管理を、マイクロ波全体の分周通倍装置の移相器管理と統合し、より安定で誤りの無いビーム制御を狙う。

RF電子銃向けの3系統のレーザー装置のうち、予備を除く2系統をそれぞれ25 Hzで動作させることにより50 Hzのビーム発生が可能となるが、25 Hz以下のビームを発生する場合には、一方のレーザー光を光陰極表面のクリーニングに使用することが可能となるような仕組みが整えられた。これにより、レーザー光の出力不足が避けられ、また運転員のビーム改善への集中が可能となるため、本格的な運用を期待している。

さらに第2RF電子銃の整備も進められ、直ちに入射に使用されるわけではないが、ビーム試験などを通してビームの改善の理解が進むと期待される(図1)。

熱電子銃に関して、春の運転時を含めて過去にも高電圧破壊を経験した高圧ケーブルを全数交換し、充分な安全係数を確保することにした。同じ対策を低速陽電子電子銃にも適用した。

RF電子銃と熱電子銃の24度合流部において暫定的に使用されてきたパルス偏向電磁石には、チェンバーの発熱により熱電子銃側に繰り返し制限があったが、パルス偏向電

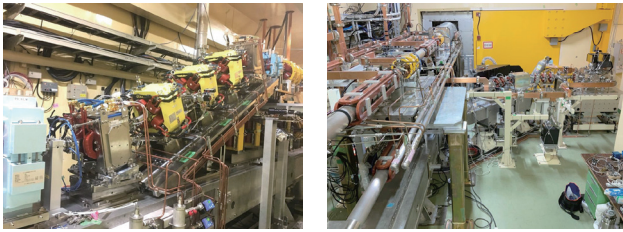


図1 第2 RF 電子銃を含めた2階建ての入射部と、2つの電子銃の合流部

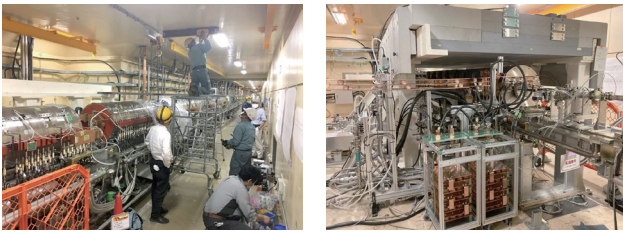


図2 陽電子捕獲部の改造作業と、再度組み上げた遮蔽に覆われたフラックスコンセントレータ

磁石2台と光学補正用の4極電磁石3台、ビーム位置モニタ2台により、改善を進めた。これまでも、電子と陽電子を合わせて50 Hzの運転が可能であったが、RF電子銃の改善と合流部の改善の双方により、それぞれ単独での50 Hz運転も可能となり、精度が高く柔軟性も高い同時トップアップ入射が可能となる(図1)。

陽電子生成部に関連しても様々な改造も行われた。生成陽電子収束のためのフラックスコンセントレータ(FC)については、これまでテストスタンドでの試験が成功しても2年にわたり放電を経験し、運用磁場を1/4に制限してきたことから、材質が充分でないと考えられた。NC50というCu-Si-Ni合金を用いた新規FCが試験の結果良好であり、今回置き換えを行ったところ、定格値での運用が可能となった。FC下流のソレノイド部の軌道の歪みがビーム損失に繋がっている可能性があり、これまで装置間の干渉を恐れて最低限としてきた軌道補正パルス電磁石とビーム位置モニタを、それぞれ4台ずつ増設した。既にタイミング調整や較正を終え、ビーム改善に繋がっている(図2)。

入射器内のビーム収束用4重極電磁石について、これまではビーム形状を円形とするためにトリプレットの運用としてきたが、ビームサイズや磁場勾配強度の条件としてはダブルレットでも運用可能であり、夏前のスタディの結果にも問題が発見されなかったため、ダブルレット接続に移行した。これによって、将来軌道補正電磁石を増設することも可能となる余裕も得られた。また、一部の旧式でリップルの大きな大型電磁石電源の更新が行われた。

新規加速管のコンディショニング

これまでも報告してきたように、入射器で約230本使用されているSバンドの2m加速管の劣化が進んでいるため、SuperKEKBで $\Upsilon(6S)$ などのより高いエネルギーの共鳴での衝突が不可能になっており、また通常行っている

$\Upsilon(4S)$ での衝突実験やPF-ARの入射についても、将来が脅かされている。そこで、60の加速ユニットを3つの領域に分け、それぞれの領域に1つの故障ユニットが生じても運転を継続できるような想定で、7%の加速管を交換する予定である。2年前から新しい加速管の設計製作を進め、第一弾が納入されたので、試験を開始している。7%の加速管だけを交換することにより、劣化した加速管での加速を補う必要があるため、既存の加速管の加速勾配に比べ、新規加速管は高い勾配での加速を期待している。また、運転投入を容易にするためにコンディショニングの速さも重要な観点となる。

6月から始めた試験においては、予想どおりまたは予想を上回る性能が確認され、ダミーロードの許容電力のため最大電力は確認できていないが、102 MWまでの電力の投入が可能であった(図3)。冬の停止期間に運転向けの投入が期待される場所である。当初は他の健全加速管と同じ40 MWでの運用を行う。

旧クライストロン準備室の試験設備を利用して試験を開始したところであるが、さらに昨年火災により被災した加速管組立室の試験設備も復旧が進んでおり、双方を用いて今後納入される加速管のコンディショニングを進める予定である。これらによって、2年半の後には $\Upsilon(6S)$ の共鳴での衝突実験に手が届くようになる。なお、入射電流も向上しており、電流が高くなると、性質の良いビームにはビームローディングなどによりエネルギーの制限が厳しくなるので、慎重な検討も必要となる。

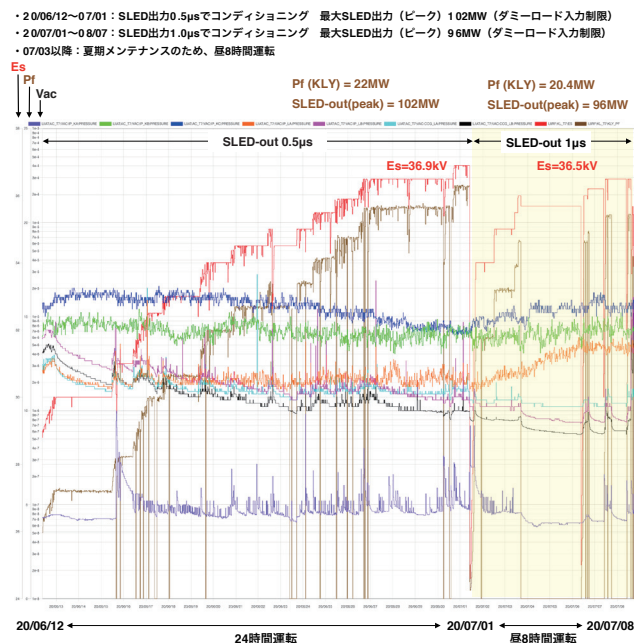


図3 加速管コンディショニング時の印加電圧、マイクロ波電力、真空値(放電状況)の記録、期待通りまたは期待以上の速さでの正常な進行が確認された。ダミーロードの許容値の102 MWまでの電力の投入が可能であった。

光源リング運転状況

今年度も夏期の停止期間中に、各種装置の定期的な点検保守を行い、PFリングおよびPF-ARともに立ち上げへ向けて準備を行ってきた。特に、PFリングにおいては、次節で詳述するが、PF入射部セプタム2真空ダクト交換という大がかりな作業を約3ヶ月間に渡って行った。

図1に、PFリングにおける立ち上げ日10月14日9:00～10月29日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。セプタム2電磁石更新を含む入射部の大幅な改造を行ったため、すぐにビームが入射されるかどうか懸念はあったが、

比較的スムーズにビームが蓄積した。リングの真空度を確認しながら、徐々に電流値を上げていき、初日は300 mAでの真空光焼きだしとなった。2日目にさらなる入射調整を行い、定格の450 mAまで到達することができた。入射部改造により期待された入射効率には到達していないものの、運転は概ね順調に推移し、予定されていたスケジュール通り、10月20日9:00からの光軸確認後ユーザー運転が開始された。ユーザー運転は順調に進んでいたが、10月27日16:30分頃にビームダンプが発生した。調査を行ったところ、入射キッカー電磁石K3のタイミングがずれたこ

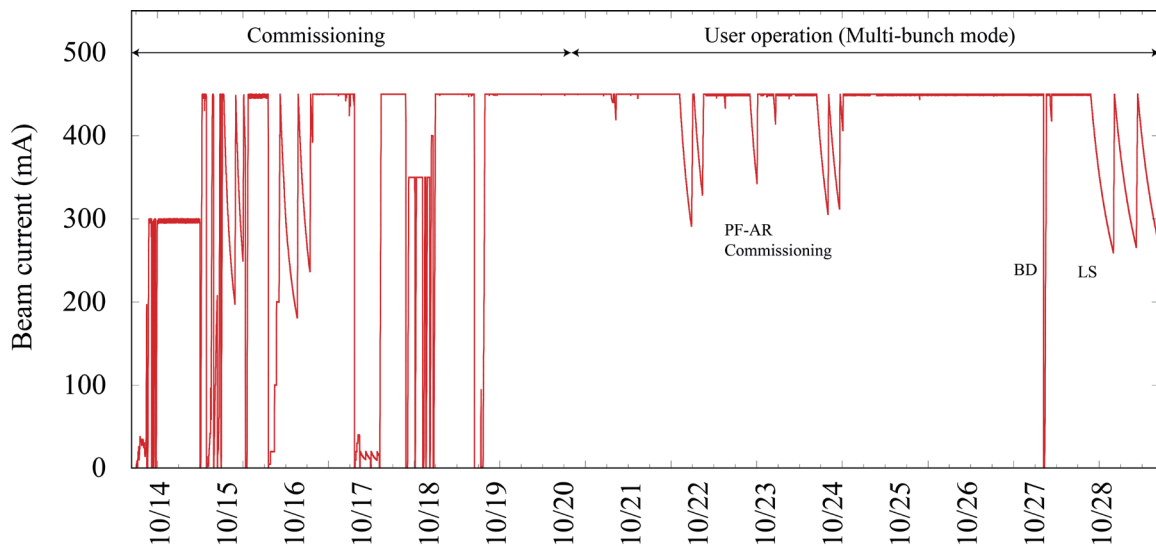


図1 PFリングの立ち上げ日10月14日9:00～10月29日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。LSは入射器マシン調整日、BDはビームダンプを示す。

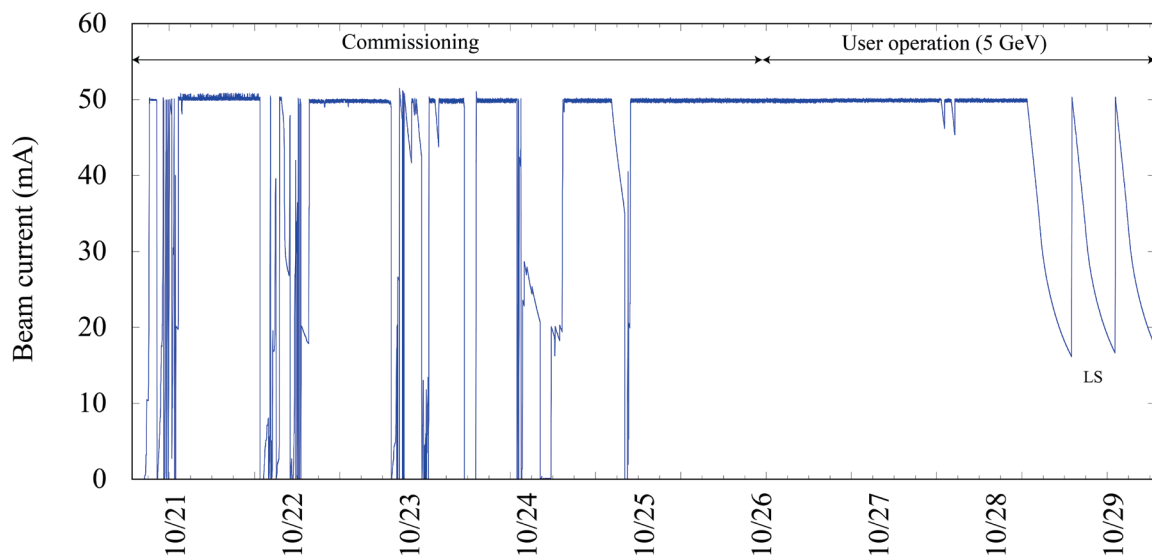


図2 PF-ARにおける立ち上げ日10月21日9:00～10月29日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。LSは入射器マシン調整日を示す。

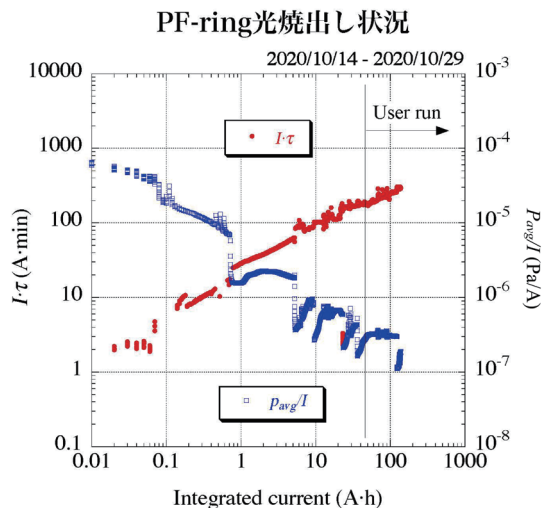


図3 PFリングにおける光焼きだし状況として、10月14日から10月29日までの積分電流値に対する電流値とビーム寿命の積 ($I \cdot \tau$) と電流値当たりのリング平均真空度 (P_{avg}/I) を示す。

とが原因と判明した。タイミングを元に戻し、約1時間後の17:33に運転を再開した。

PFリングの立ち上げ後の真空光焼きだし状況を図3に示す。夏期停止期間中の入射点付近の改造が長期に渡ったため、通常の立ち上げ時に比べて光焼き出しに時間がかかっている。10月20日のユーザー運転開始までに、規格化圧力 P_{avg}/I が目標値の 10^{-7} Pa/A に到達できず、ビーム寿命は停止前の約半分、ビーム電流値と寿命の積 ($I \cdot \tau$) は $200 \text{ A} \cdot \text{min}$ 程度であった。計6回のTiゲッターポンプの活性化直後は圧力低下が見られるが、改造区間内にある偏向電磁石B26の分布型イオンポンプ(DIP)が絶縁不良で故障中であるため、ゲッターポンプへのガス負荷が大きく、比較的短時間で飽和する傾向が見られている。ただし、遅延はあるものの着実に光焼き出しは進行しており、 $I \cdot \tau$ は10月29日時点で $300 \text{ A} \cdot \text{min}$ 程度まで回復している。

図2に、PF-ARの立ち上げ日10月21日9:00～10月29日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。新型コロナの影響で、PF-ARは第1期の運転を行わなかったため、2月25日の運転停止から約8ヶ月ぶりの運転再開となった。停止期間中に真空を大気暴露するような大きな作業はなかった。PF-ARの立ち上げ初日は、加速器機器の正常化を確認するためビームエネルギー6.5 GeVで行い、2日目に5 GeVへの切り替えを行った。立ち上げ作業は概ね順調にすすみ、10月26日9:00より光軸確認を行い、ビームエネルギー5 GeVでのユーザー運転を開始した。

PF入射部セプタム2真空ダクトの更新

2020年夏期停止期間中、PFリングでは入射部の老朽化したセプタム2(S2)電磁石とその真空ダクトを更新する作業を行った。旧S2真空ダクトは1988年製で、電磁石を内蔵するin-vacuum型入射ビーム路にセプタム壁と放射

光吸収板を介して蓄積ビーム路が隣接する一体型真空ダクトであった。2015年に蓄積リング側冷却水配管から真空リークを起こして以降は放射光吸収板への熱負荷を低減させる処置を施して運用してきたが、この放射光アブソーバ挿入による物理アパーチャの制限が入射調整を困難にする要因となっていた。また、入射ビーム路側真空槽では、S2電磁石からの放出ガスや大口徑Oリングからの透過ガスにより、イオンポンプが高負荷になり停電後の真空復帰を困難にしてきた。

今回のS2改造は、これらの問題を解消して真空システムの堅牢性やメンテナンス性を向上させるとともに、入射効率の改善やビームモニタの増強などの加速器性能の向上を目的とするものである。

まず、新S2真空ダクトの基本設計において、入射ビーム路にエアギャップを設けて、入射ビームダクトと蓄積ビームダクトを分ける分離型構造を採用する方針とした。本構造は、NewSUBARU[1]や台湾TPS[2]などで報告事例のあったパルス磁場による渦電流がビームダクトや架台を介してループ電流を形成し、その浮遊磁場が蓄積ビームの振動を引き起こす問題や、PF-ARでも懸案となっているループ電流によるパワー損失が電源の周波数を制限する問題への根本的な対策となる。新システムではエアギャップと絶縁管、絶縁固定治具を用いて、蓄積リングに及ぶ広範囲なループ電流を遮断する。さらに、入射ビームダクトをS2電磁石の磁極間に配置するin-air型として、S2電磁石からのガス放出問題を解消しつつ、真空槽の簡素化を図る方針とした。新S2真空ダクトの構成を図4に示す。以下に2種類の新ビームダクトの特徴について纏める。

1) 入射ビームダクト

in-air型セプタム電磁石の場合、ビームダクトにはパルス磁場に対する高い透過性能が求められる。新ダクトでは、渦電流によるパルス磁場の減衰と遅延を低減させるため、電気抵抗率がSUS304の約1.7倍のインコネル718を採用し、さらにダクトの厚さも0.3 mmまで薄くした。これにより、磁場の減衰率が同じ厚さのSUSダクトが6.2%

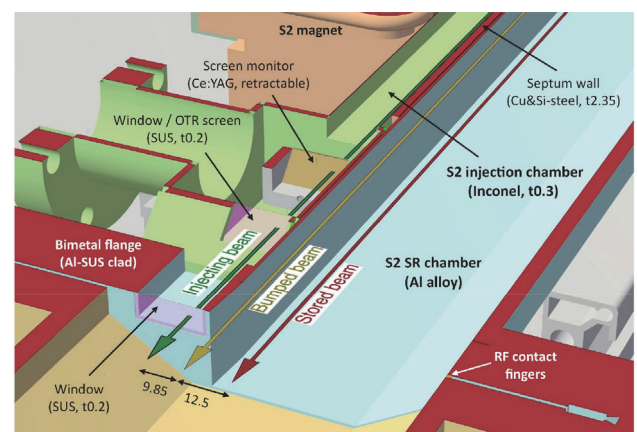


図4 改造後のPFリング入射部真空ダクト構成

であるに対して 3.8%に緩和され、パルス電源の定格電圧 1.5 kV に対して 1.3 kV での余裕をもたせた運転が可能となる（再充電時間も約 15%短縮されて 40 ms となるが、25 Hz の繰り返しは難しい）。

インコネルダクトは S2 磁極内にカプトンシートで絶縁した状態で設置される。長さ約 1.2 m の湾曲ダクトで、高さ 7.4 mm × 幅 15.8 mm の矩形小開口を有する。0.3 mm 厚の SUS304 ダクトは PF-AR の入射ビームダクトで実績があり、さらに今回は SUS304 の約 2 倍の引張強度を有する固溶化処理を施したインコネル 718 の採用で堅牢性の向上を図っている。0.3 mm 厚のインコネルダクトは他施設での採用事例の報告はないが、今回ファイバーレーザー溶接を利用して真空ダクトとしての製作を成功させた。本技術は、将来光源での Fast Corrector 用小口径ダクトなどへの応用も期待される。

入射ビームダクトの S2 直下流部には 2 種類のビームプロファイルモニターが入る SUS 製チェンバが溶接される。1 つは格納可能な YAG スクリーンモニタ、もう 1 つは常時観測型 OTR スクリーンモニタで、入射ビームの通過する 0.2 mm 厚の SUS 窓の真空面をバフ研磨で鏡面に加工して OTR を観測する。

2) 蓄積ビームダクト

PF リングはリング外側からの入射のため、S2 側に放射光が照射される。新蓄積ビームダクトでは他区間と同様に熱伝導率の高いアルミ合金（A6063 /A5052）を採用し、ダクト内壁に直接放射光を当てて、真空側に放射光吸収板や冷却水配管を入れない構造とした。全長約 2.1 m のアルミ合金ダクトの入射点に向けた緩やかなテーパ面で 322 W（450 mA 蓄積時）の放射光を受け、ダクトの外側の上下面に溶接した配管に冷却水を通して除熱する。

入射ビームとバンパビームを 9.85 mm まで近づけるため、S2 側（リング外側）のアルミ合金壁は蓄積ビーム軌道から 16 mm まで近づけて、厚さも 1 mm まで削り込んでいる。長さ 47 mm のエアギャップを通過した入射ビームは、Al-SUS クラッド材の SUS フランジ面にレーザー溶接された 0.2 mm 厚の SUS304 箔を通過して蓄積リングに入射される。

改造作業のスケジュールはビームダクトの納期遅延により当初の予定よりも遅れたが、各グループ間での協力や工程調整を行いながら、予定されていた 10 月 14 日、無事新ビームダクトでの運転再開となった。

- [1] Y. Shoji and K. Kumagai, "Stray Field of a Pulse Septum Induced by Eddy Currents", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **14** (2004) 441.
- [2] C.H. Chen *et al.*, "Preliminary study of injection transients in the TPS storage ring", IOP Conf. Series: Journal of Physics: **874** (2017) 012060.

測定装置部門の紹介

<https://www2.kek.jp/imss/pf/section/endstation/>

昨年の8月号から、放射光実験施設の内部組織を紹介してきました。これまでに、3つの内部組織の中の2つ、運営部門と基盤技術部門の紹介まで終わりました。前回、残る測定装置部門の概要を紹介しました。今回は構成メンバーを紹介させていただきます。

測定装置部門の構成メンバーは、清水伸隆教授、野澤俊介准教授、松垣直宏准教授、高木秀彰助教、山下翔平助教、柴崎裕樹特別助教、亀沢知夏博士研究員、亀卦川卓美研究員、大原麻希研究員、金澤知器研究員の10名です。清水さんの専門は小角X線散乱です。昨年4月の放射光実験施設の組織化の際に部門長に着任して部門の立ち上げをゼロから進めています。また、『施設だより』で紹介したビームライン再整備ワーキンググループ(2020年9月設置)の委員長でもあります。野澤さんの専門は超高速時間分解です。将来計画のサイエンスケースの検討のとりまとめも担当しています。松垣さんの専門はタンパク質結晶構造解析です。Native-SAD法で世界を先導するビームラインには、協定を締結している海外施設(Swiss Light Source)からの利用もあります。高木さんの専門は小角X線散乱、テンドーX線の利用に適した装置の開発を進めています。材料科学分野の出身ですが、最近は食品科学への応用にも注力しています。山下さんの専門は軟X線顕微鏡、ガス雰囲気(非真空)下での測定のための装置の開発を進めています。材料科学分野の出身です。柴崎さんの専門は高圧ですが、PFとして進めている「3次元X線ズーム顕微鏡の開発」プロジェクトに参加し、高圧科学ビームラインでの展開を図っています。地球惑星科学分野の出身です。亀沢さんは、今年10月に着任した新人です。人事異動の項でご紹介したいと思います。亀卦川さんは高圧を専門とする定年退職されたOBで、ビームライントラブル対応への支援などを担当しています。大原さんと金澤さんは、それぞれ、宇佐美さん(運営部門)と野澤さん(測定装置部門)のプロジェクトに参加するポスドクで、それぞれのプロジェクトを推進しています。

このように多様なバックグラウンドをもつ人材が測定装置部門に所属していますが、前回もご紹介した通り、10の測定手法グループの約半数に測定装置部門メンバーが存在しない状況です。早期に解決する必要のある問題と認識しています。

昨年の8月号から、6号にわたり放射光実験施設の内部組織と構成メンバーを紹介してきましたが、如何でしたでしょうか。放射光実験施設を理解して頂くための一助になれば幸いです。

運転・共同利用関係

2020年度第2期の運転ですが、予定通り、PFは10月14日に、PF-ARは10月21日に、それぞれ運転を開始しました。ともに12月22日までの予定です。PFのハイブリッドモードは11月27日から12月9日を予定しています。PF-ARは5 GeVで運転を開始して、PFがハイブリッドモードになるタイミングに合わせて、11月26日以降を6.5 GeVで運転します。第3期については、両リングとも運転時間を十分に確保できるように調整を進めています。2月中旬から3月下旬までの運転となる見込みです。

9月27日には、延期になっていた第37回PFシンポジウムがWeb会議方式で開催されました。また、10月1日には、PF-PACがWeb会議方式で開催されました。審議の結果、PF-PAC分科会とPF内部課題について、2021年度から新制度を導入することになり、現在、その準備を進めています。詳細については、本誌記事をご参照ください。

人事異動

最後に、放射光実験施設に関する人事異動を報告します。10月1日付けで、亀沢知夏さんが博士研究員に着任しました。亀沢さんの専門はX線イメージングで、総研大の物質構造科学専攻で今年9月に学位を取得し、放射光実験施設・測定装置部門に採用されました。学位研究「動的X線エラストグラフィによる弾性率の可視化」に対してSOKENDAI賞を授与されています。

はじめに

2019年度の組織改編から1年半が経過し、装い新たに再出発した放射光科学第一，第二研究系も、少しずつ腰を落着けた活動ができるようになってきています。研究系はその名の通り、放射光を中心とする量子ビームを駆使した先端的な利用研究を行い、分野を先導することをミッションとしていますので、スタッフ一同、日進月歩で着実に研究を進めております。今回は放射光科学第一研究系に関する最近の話題を二つ紹介します。

Science Advisory Committee (固体物理学部門) の開催

放射光科学第一研究系では、固体物理学研究部門を中心に、8月から9月にかけて Science Advisory Committee を開催しました。今回は、新型コロナウイルス感染症の影響などを鑑み、我々が取り組んでいる研究のトピックスをまとめたレポートを諮問委員（岡山大学 大学院自然科学研究科 池田直教授）にお送りし、書面にてコメントをいただくという形をとりました。トピックスとして取り上げたのは、以下の7件です。いわゆる評価を目的としたものではありませんので、全てのアクティビティを網羅したものではないことをお断りしておきます。

1. Element Strategy Initiative for Electronic Materials
2. Inorganic Materials Structure Project
3. Resonant X-ray Scattering Study for Condensed Matter Science

4. Structural Investigations of Molecular Systems
5. Study of Photoinduced Phase Transitions
6. Theoretical Study of Permanent Magnets
7. *Operando* Observation of Chemical and Magnetic States at Interface of Functional Thin Films

これらのうち、1-6は固体物理学研究部門のメンバーが中心となって実施しており、7は表面科学研究部門のメンバーが主導するプロジェクトですが、上記の通り網羅的なレポートではありませんので、このような変則的なラインアップになっています。図1に、レポートに掲載した、固体物理学研究部門のメンバー紹介の図を示します。PIが一つずつ選んだ図から、それぞれのメンバーが最もアピールしたい内容が見て取れると思います。個々のメンバーが実施している研究内容については、PFニュース38-1号に少し詳しく紹介してありますのでご覧ください（表面科学研究部門については37-3号）。諮問委員からのコメント全文は、委員会の開催記事に掲載されていますが (<https://www2.kek.jp/imss/news/2020/topics/0930IMSS-SAC/>)、研究内容について、マルチプローブ利用研究や手法開発も含めて高く評価いただいたと理解しております。また、研究所外の研究者との連携をより広げることや理論と実験の協力を進めることなど、多くの有益なコメントをいただきました。

Section Leader
Reiji Kumai

- Electronic Materials**
Figure: Phase diagram of $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{H}_x$ showing temperature vs. hydrogen content x .
Reference: *Nat. Phys.* (2014)
Member: Youichi Murakami
- Cross Correlation Materials**
Figure: Crystal structure diagram of $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{H}_x$ showing the positions of Fe, O, and H atoms.
Reference: *Phys. Rev. Res.* (2020)
Member: Hajime Sagayama
- Resonant X-ray scattering**
Figure: Resonant X-ray scattering intensity map showing a peak at a specific energy.
Reference: *Phys. Rev. B* (2019)
Member: Hironori Nakao
- Functional Molecular Materials**
Figure: Schematic diagram of molecular structure and electronic states.
Reference: *J. Am. Chem. Soc.* (2018)
Member: Reiji Kumai
- Theory of Condensed Matter**
Figure: Energy band structure diagram showing 'Two-dimensional domain', 'One-dimensional domain', and 'Minimum domain'.
Reference: *Phys. Rev. Lett.* (2017)
Member: Kaoru Iwano

図1 諮問委員会の資料に掲載した固体物理学研究部門のメンバー紹介

研究系における人材育成について

研究系の第一のミッションは、上記のように利用研究を推進することですが、そのような活動を通して研究者を育成し、コミュニティに輩出することも大きな役割の一つだと考えています。人事異動についてはPFニュース等でその都度報告していますが、人材の輩出という観点から、最近の放射光科学第一研究系の人事異動を振り返ってみたいと思います。2019年度からだと1年半しかありませんので、少し遡って2018年度から、現在の固体物理研究部門および表面科学研究部門の研究グループに対応するメンバーの転出をまとめると、以下のようになります。

- 2018年 4月 組頭広志さん（教授→東北大 教授）
- 2018年 4月 蓑原誠人さん
（特別助教→産総研 主任研究員）
- 2018年 4月 小林賢介さん
（特任助教→物材機構 特別研究員）
- 2018年 10月 鈴木（酒巻）真粧子さん
（助教→群馬大 准教授）
- 2018年 11月 田端千紘さん（研究員→京都大 助教）
- 2019年 10月 小畑由紀子さん
（博士研究員→東工大 特任助教）
- 2019年 11月 湯川龍さん（特任助教→大阪大 助教）
- 2020年 4月 石井祐太さん（博士研究員→東北大 助教）
- 2020年 4月 玉造博夢さん（研究員→JAEA 研究員）

このように、多くの若手研究者がPFで研究成果をあげて新天地へ巣立っていきました。また、転出後も有力なユーザーとしてPFに実験に来ているメンバーがたくさんいます。これからも、こうした流れを途絶えさせることなく、PFをはじめとする4つの量子ビーム施設を有する物構研の強みを活かした特徴ある研究を展開しながら、多くの人材を輩出していきたいと考えております。

人事異動

最後に、放射光科学第一、第二研究系に関連する人事異動を報告します。構造生物学研究部門の研究員として、伊藤道俊さんが10/1付で着任されました。また、量子ビーム連携研究センターの博士研究員として、AHMED, Rezwanさんが11/1付で着任されました。

D111 型装置を用いた高温高压変形実験：固体地球深部の流動変形の理解を目指して

西原遊¹, 辻野典秀², 久保友明³, 山崎大輔², 土居峻太¹, 今村公裕⁴, 芳野極²

¹愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, ²岡山大学惑星物質研究所, ³九州大学大学院理学研究院,

⁴九州大学大学院理学府

High-Pressure and -Temperature Deformation Experiments using D111-type apparatus: Towards Understanding of Rheology of Deep Earth Materials

Yu NISHIHARA¹, Noriyoshi TSUJINO², Tomoaki KUBO³, Daisuke YAMAZAKI², Shunta DOI¹,

Masahiro IMAMURA⁴, Takashi YOSHINO²

¹Geodynamics Research Center, Ehime University, ²Institute for Planetary Materials, Okayama University

³Faculty of Science, Kyushu University, ⁴Graduate School of Science, Kyushu University

Abstract

DT-Cup 装置を大型化した高压変形実験装置である D111 型装置が KEK, PF-AR, NE7A に導入された。この装置では、従来難しかった最高約 30 GPa の高压下でのよく制御された変形実験が可能であり、放射光 X 線と組み合わせることで同時に歪と応力の測定も可能である。この装置を使って、オリビン - スピネル相転移と変形の相互作用、ブリッジマナイトとポストスピネルのレオロジー、六方最密構造鉄のレオロジーなどの地球深部物質の流動変形の性質が調べられている。

1. はじめに

地球のマントルは大部分が固体岩石であるが、1000°C を超える高い温度のため地質学的な長い時間の中では流体として振舞っている (Fig. 1)。そのような地球深部での固体の変形と流動の性質の理解には、地球深部に相当する高温高压下で実際に地球の物質を変形する実験的研究が重要な役割を担っている。高压力下の変形実験には固体圧またはガス圧の変形試験機が用いられてきたが、20 世紀から用いられてきた試験機のうちで比較的高い圧力下の実験が可能で Griggs 型固体圧試験機での発生圧力は約 3 GPa に限られていた。これは地球マントルの最上部に相当する深さ約 100 km までしか再現することができないことを意味する。21 世紀に入って以降、地球のより深部での物性を探るための高压変形実験装置が相次いで開発された (D-DIA 装置 [1], 回転ドリッカマー装置 [2], DT-Cup 装置 [3])。これらの装置によってより高压下での固体の変

形と流動の性質を実験的に調べることが出来るようになってきたものの、試料の大きさや形状が限定される問題から精密な実験が可能な圧力条件は 10 数 GPa 程度に限られていた。これでは、体積の上で地球の半分以上を占める下部マントル (深さ 660 km 以上) の物質の詳しい性質について調べることが困難である。

このような状況のなか、我々は新学術領域研究「核—マントルの相互作用と共進化—統合的地球深部科学の創成—」の一環として、2017 年 3 月に高エネルギー加速器研究機構, PF-AR, ビームライン NE7A に D111 型装置のシステムを構築した。そして、この実験システムを用いてマントル遷移層, 下部マントル, 内核といった地球深部の物質の物質のレオロジー (変形と流動の性質) を明らかにしつつある。本論文では、D111 型装置を用いて進められている地球深部物質のレオロジーの研究の現状を紹介する。なお本論文の内容は西原ほか [4] を再構成したものであり、掲載にあたっては著作権者の日本高圧力学会の許諾を得ている。

2. D111 型装置を用いた高温高压変形実験

D111 型装置の写真と概念図を Fig. 2 に示す。上下に分割されるガイドブロック (guide block) には上下それぞれに差動ラム (D-ram) が内蔵されており、これは油圧により駆動することができる。一段目アンビル (first-stage anvil) は 3 個ずつ組み合わされ上下ガイドブロック内に設置されているが、その中心部に六角柱型の空間が設けられ、この空間に 3 本のピストン (piston) がはめ込まれて

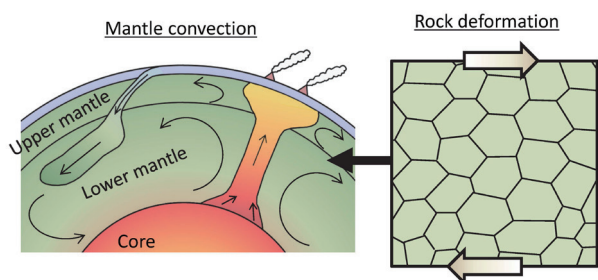


Figure 1 Schematic illustration of mantle convection and rock deformation in the Earth's interior.

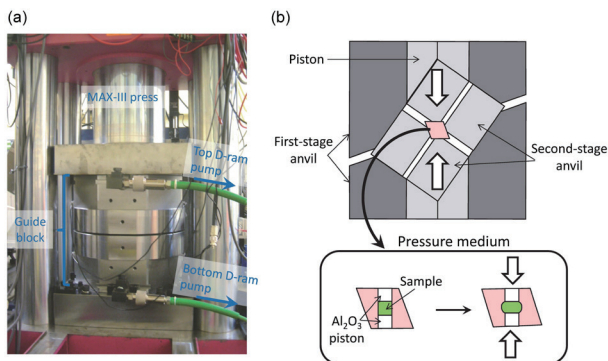


Figure 2 (a) A photograph of D111-type apparatus installed at KEK. (b) A schematic cross section of pressure medium and anvils in D111-type guide block (modified after ref. [4]).

いる [5]。ガイドブロック全体の中心部には、8個の立方体二段目アンビル (second-stage anvil) と八面体形状の圧力媒体 (pressure medium) を組み合わせたアセンブリをそのまま設置し実験を行う。(Mg,Co)O などのセラミックス半焼結体の圧力媒体内部には、中心部に試料を、試料上下には硬い Al_2O_3 ピストンを配置する。以上のような設計により、メインラム荷重を印加し圧力媒体およびその内部の試料に圧力をかけた状態で差動ラムを前進 (または後退) させ、ピストンと上下二段目アンビルを通じて圧力媒体ひいてはその内部の試料を変形することができる。このようなタイプの変形実験装置はもともと Hunt *et al.* [3] によって開発されたもので、D111 型装置はそれを大型化したものにあたる。なお、装置名の「D111」は、変形を意味する Deformation の頭文字と圧縮・変形方向が「111 方向」であることに由来している。

ガイドブロックの最高差動ラム荷重は上下各 314 tf である。これを PF-AR のビームライン NE7A に設置されている MAX-III プレスと組み合わせて用いることで、最高メインラム荷重 700 tf での実験が可能で「D111 型装置」が構成される。Hunt *et al.* [3] の装置では差動ラム荷重とメインラム荷重が最高でそれぞれ 62, 413 tf しかなかったため、実験可能な圧力が最高 18 GPa にとどまっていた。大型化された D111 型装置では発生可能な荷重が大きく拡大されており、最高約 30 GPa の高圧下での変形実験を実現できる。これは従来困難だった地球下部マントルの条件 (圧力 >23 GPa) での変形実験が可能になることを意味する。

高温高圧変形その場観察実験では、まず試料を含む圧力媒体にメインラム荷重を印加し高圧力を発生させる。目的圧力到達後に、圧力媒体に内蔵した発熱体により試料を加熱し、上下差動ラムを一定速度で前進させることにより高温高圧下の試料の圧縮変形を行う。D111 型装置を用いた高圧変形実験その場観察システムの概念図を Fig. 3 に示す。50–60 keV の単色 X 線を圧力媒体中の試料に照射しラジオグラフィ像および二次元 X 線回折パターンを収集する。ラジオグラフィ像は YAG または GAGG 蛍光体と CCD または CMOS カメラを用い、二次元 X 線回折パターンはフラ

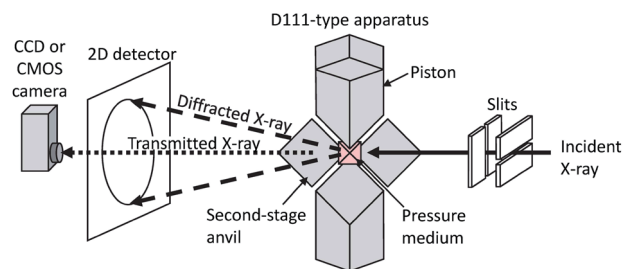


Figure 3 A schematic illustration of experimental system at a beamline NE7A, PF-AR, KEK (modified after ref. [4]).

ットパネルセンサーを用いて撮影する。通常は二段目アンビルには超硬合金が用いられるが、受光側の二個のアンビルが回折 X 線を遮ってしまう。このため受光側二段目アンビルには、cBN などの X 線を透過する材料でできたアンビルまたは円錐形の掘り込みを施した超硬合金アンビルを用いて、その場での二次元 X 線回折測定を可能にしている。このようにして得られたラジオグラフィ像から試料の歪を、また二次元回折パターンから圧力と差応力を決定する。

3. オリビン - スピネル相転移と変形の相互作用

固体地球で駆動するプレートテクトニクス型のマントル対流を理解する一つの鍵が、マントル遷移層 (深さ約 400–700 km, 圧力約 14–23 GPa) を通過する沈み込んだ海洋プレート (遷移層スラブ) の挙動である。遷移層スラブ

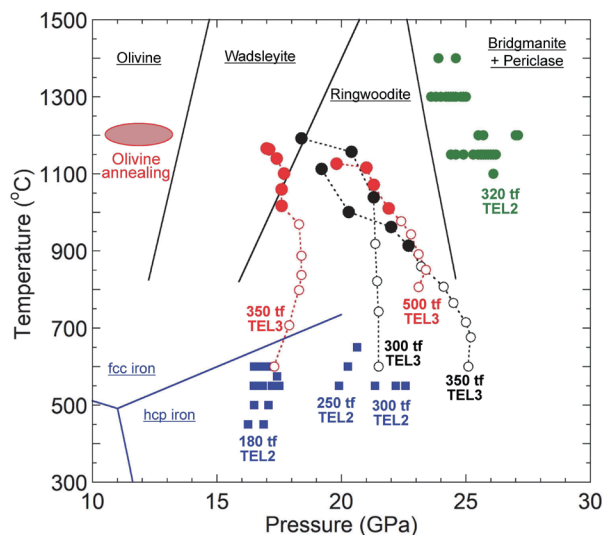


Figure 4 Pressure and temperature conditions of experiments using D111-type apparatus at KEK (modified after ref. [4]). Green circles are deformation conditions of bridgmanite and post-spinel. Blue squares and lines are deformation conditions of hcp iron and phase boundaries in iron [10], respectively. Red and black circles are pressure-temperature paths in four series of the olivine-ringwoodite transformation experiments in shear with and without annealing prior to the transformation, respectively (solid symbols indicate ringwoodite appeared). Black lines are phase boundaries in Mg_2SiO_4 [11–14]. TEL denotes truncation edge length of the second-stage anvils in mm.

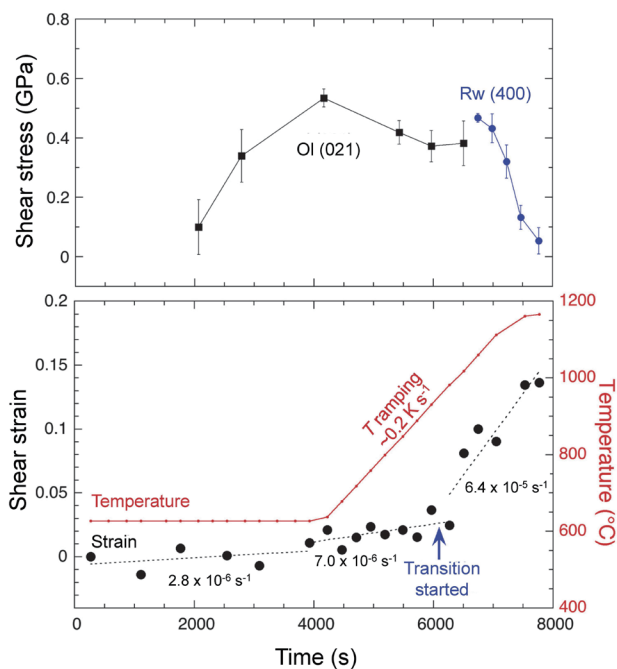


Figure 5 Changes of stress and strain during the olivine–ringwoodite transformation in shear at ~18 GPa with increasing temperature (modified after ref. [4]). The pistons were advanced with a constant rate of 200 $\mu\text{m h}^{-1}$.

は硬い下部マントルから抵抗を受けて深発地震を起こすとともに大変形して折れ曲がる場合が多い。それには遷移層で起こるオリビン–スピネル（ウォズレアイトおよびリングウッドイト）相転移が深く関与しているとされている。特にスラブの低温下では相転移が過剰圧状態で非平衡に進行するため細粒化が起こりやすく、それが大きな変形強度の低下を引き起こすことが指摘されている（例えば [6]）。その実証には非平衡相転移と塑性流動が相互作用する現象を解明する必要があるが、D111 型装置の開発によりその直接的な実験研究が可能になった。

オリビンの焼結多結晶体を出発物質として、圧力 15–25 GPa で 600°C から 1200°C 付近へ昇温させながら剪断変形実験を行い、オリビン–リングウッドイト相転移の進行と変形挙動をその場観察した (Fig. 4)。圧力 18 GPa 付近で得られた結果を Fig. 5 に示す。上下差動ラムの変位速度は一定にしているが剪断歪速度は一定ではなく、相転移の開始に同期して顕著に上昇している。そのときの差応力は昇温の効果もあるが、特に相転移の進行とともに顕著に低下している。この相転移にともなう試料の変形強度の大きな低下は、より過剰圧の大きい圧力 22 GPa 付近でより顕著であった。このようにマントル遷移層圧力下で相転移と変形の相互作用をその場観察できている。将来的には、相転移にともなう時間変化する岩石のレオロジーをより高い時間・空間分解能でその場観察することを目指したい。

4. ブリッジマナイトとポストスピネルのレオロジー

地球下部マントルは約 70 vol.% を占めるブリッジマナイト¹⁾ (以下 Brg) と約 20 vol.% を占めるフェロペリクレ

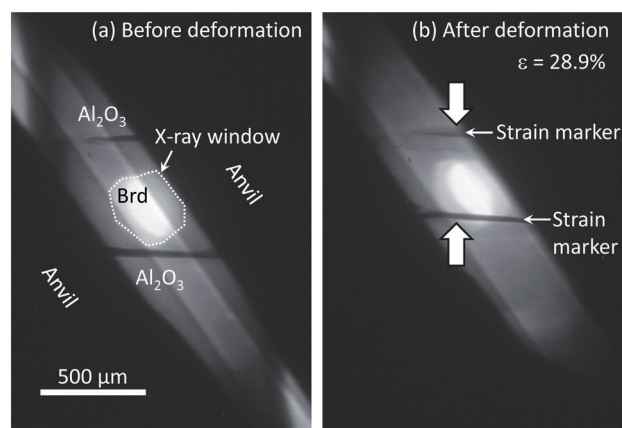


Figure 6 The X-ray radiographs at ~24–27 GPa taken (a) before and (b) after deformation (modified after ref. [4]). The maximum strain reached about 30%.

ース²⁾ (以下 Fp) から主に構成されている (パイロライトモデル)。下部マントルは上部マントル・遷移層に比べて高粘性率であるだけでなく、下部マントル中の粘性率は深さとともに大きく上下することが地球物理学的観測から報告されている。この深さに伴う粘性率変化を理解するためには Brg 単相の粘性率の知見が重要である。Brg 単相の粘性率を明らかにするため、Brg 多結晶焼結体を用いて高温高压一軸変形実験中のその場応力–歪測定を行った。変形条件は温度 1200–1400°C、圧力 ~24–27 GPa、歪速度 2.5×10^{-6} – $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ である (Fig. 4)。Fig. 6 に示すように、最大歪量は約 30% に達した。一回の変形実験中に歪速度および温度を変えた測定により応力依存性・温度依存性を精密に決定した。その結果、Brg 単相の応力指数は 3 と求まり、本研究の実験条件では高温型べき乗則 (転位) クリープが支配的であることが明らかとなった。このメカニズムが支配的であることは温度依存性の結果からも支持される。また、同様な一軸変形実験に基づいた報告のあるマントル遷移層主要鉱物のウォズレアイト・リングウッドイトと比べて、Brg 単相は高粘性率を持つことが明らかになった。

Brg は Fp に比べ圧倒的に高い粘性率を持つことから、塑性変形の進行とともに硬い Brg に代わって軟らかい Fp が下部マントルの粘性率を支配するようになり下部マントル全体の粘性率の低下が起きる可能性が指摘されている。この可能性を検証するため、Brg : Fp のモル比が 1 : 1、体積比が約 2 : 1 となる混合物 (ポストスピネル) を用いた高温高压剪断変形実験を行った。回転ドリッカー装置を用いて剪断変形実験を行なった先行研究 [7] では、一定歪速度の変形において歪量 γ が約 0.3 以上で Brg にかかる応力の明らかな低下が報告されている。その一方で、我々の実験では最大歪量 γ が約 1 に達しても Brg の明らかな応力低下は観察されない。今後さらに実験を行うことで、どのような条件下でどちらの鉱物が粘性率を支配するのかを明らかにしたい。

¹⁾ ペロフスカイト構造で (Mg,Fe)SiO₃ の化学組成を持つ鉱物

²⁾ 岩塩構造で (Mg,Fe)O の化学組成を持つ鉱物

5. 六方最密構造 (hcp) 鉄のレオロジー

地球の中心に位置する固体金属の内核には特異な地震波異方性が存在する。これは内核における何らかの物質移動現象によって生み出されていると考えられる。そして、この物質移動現象がどのような駆動力によるかは、内核冷却速度と内核粘性率の値に依存している [8]。このため内核を構成する hcp 鉄の流動変形の力学的性質を決定し内核の物質輸送の実態に迫ることを目指している。

鉄の焼結多結晶を用いて、一定歪速度における一軸圧縮変形実験を行った。変形の条件は温度 450–600°C、圧力 16.3–22.6 GPa、歪速度 1.5×10^{-6} – $8.8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ である (Fig. 4)。変形中の応力の変化を様々な条件で測定し (Fig. 7)、定常流動応力が決定された。結果から総合的に判断すると、約 500°C 以上の高温とそれ以下の低温ではそれぞれ異なる変形機構が卓越していることが示唆される。高温機構は応力指数がおよそ 4 程度であり、格子拡散が律速する高温型べき乗則クリープであると考えられる。一方で、低温機構は転位芯拡散が律速する低温型べき乗則クリープであると考えられ、また約 400°C 以下では顕著なべき乗則の崩壊を伴っている。内核条件でべき乗則クリープが支配的変形機構であると仮定し、融点規格化に基づいた見積もりを行うと、内核条件での hcp 鉄の粘性率は約 $10^{18} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 以上の高い値を持つことが示唆される。

6. おわりに

最高圧力 27 GPa、最高温度 1400°C での定量的な応力・歪測定をともなった変形実験が D111 型装置を用いて実現されている。これにより従来の装置では調べることが困難だった高温高圧下の地球深部物質のレオロジーが明らかにされつつある。今後の技術開発によってさらに高い圧力下の変形実験が実現され、D'' 層の地震波速度異方性の成因 (例えば [9]) をはじめとするマントル深部のレオロジーに関連した問題が解き明かされることが期待される。

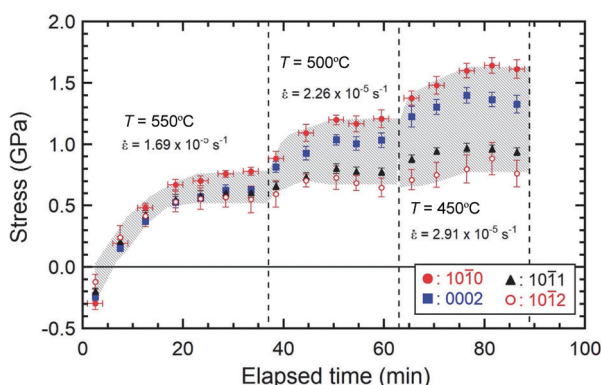


Figure 7 Plots of stress versus elapsed time in the deformation experiments of hcp iron at temperature of 550, 500, and 450°C and pressure of 16.5–16.3 GPa with strain rates in a range of 1.7 – $2.9 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (modified after ref. [4]). Stress values were determined from the four diffraction peaks of hcp iron (1010, 0002, 1011, and 1012).

7. 謝辞

D111 型装置の製作および立ち上げ作業でご協力いただいた Simon Hunt 博士 (University of Manchester), David Dobson 教授 (University College London), 大内智博准教授 (愛媛大学), 山本周平氏 (C&T ファクトリー), 鈴木昭夫准教授 (東北大学), 亀掛川卓美博士, 若林大佑助教, 船守展正教授 (KEK), Fang Xu 博士 (Sorbonne Université) に深く感謝します。本稿で紹介した研究でご支援をいただいた松影香子教授 (帝京科学大学), 坪川祐美子助教 (九州大学), Andrew Thomson 講師 (University College London), 森悠一郎氏 (東京大学) に謝意を表します。この研究における実験は, KEK 放射光実験課題 2016G016, 2016G598, 2017PF-02, 2017PF-07, 2018G024, 2018G059, 2018G591 によって行われました。この研究は科学研究費補助金, 新学術領域研究 (15H05827), 基盤研究 (B) (15H03749), 基盤研究 (A) (19H00723), 基盤研究 (S) (18H05232) を受けて行われました。

引用文献

- [1] Y. Wang, W.B. Durham, I.C. Getting, and D.J. Weidner, *Rev. Sci. Instrum.* **74**, 3002 (2003).
- [2] D. Yamazaki and S. Karato, *Rev. Sci. Instrum.* **72**, 4207 (2001).
- [3] S.A. Hunt, D.J. Weidner, R.J. McCormack, M.L. Whitaker, E. Bailey, L. Li, M.T. Vaughan, and D.P. Dobson, *Rev. Sci. Instrum.* **85**, 085103 (2014).
- [4] 西原遊, 辻野典秀, 久保友明, 山崎大輔, 土居峻太, 今村公裕, 芳野極, *高圧力の科学と技術* **30**, 78 (2020).
- [5] S.A. Hunt and D.P. Dobson, *Rev. Sci. Instrum.* **88**, 126106 (2017).
- [6] T. Kubo, S. Kaneshima, Y. Torii, and S. Yoshioka, *Earth Planet. Sci. Lett.* **278**, 12 (2009).
- [7] J. Girard, G. Amulele, R. Farla, A. Mohiuddin, and S. Karato, *Nature* **351**, 144 (2016).
- [8] M. Lasbleis and R. Deguen, *Phys. Earth Planet. Inter.* **247**, 80 (2015).
- [9] A. Tommasi, A. Goryaeva, P. Carrez, P. Cordier, and D. Mainprice, *Earth Planet. Sci. Lett.* **492**, 35 (2018).
- [10] F.P. Bundy, *J. Appl. Phys.* **36**, 616 (1965).
- [11] H. Morishima, T. Kato, M. Suto, E. Ohtani, S. Urakawa, W. Utsumi, O. Shimomura, and T. Kikegawa, *Science* **265**, 1202 (1994).
- [12] A. Suzuki, E. Ohtani, H. Morishima, T. Kubo, Y. Kanbe, T. Kondo, T. Okada, H. Terasaki, T. Kato, and T. Kikegawa, *Geophys. Res. Lett.* **27**, 803 (2000).
- [13] T. Irifune, N. Nishiyama, K. Kuroda, T. Inoue, M. Isshiki, W. Utsumi, K. Funakoshi, S. Urakawa, T. Uchida, T. Katsura, and O. Ohtaka, *Science* **279**, 1698 (1998).
- [14] T. Tsuchiya, *J. Geophys. Res.* **108**, 10.1029/2003JB002446 (2003).

(原稿受付日: 2020 年 8 月 31 日)

著者紹介

西原遊 Yu NISHIHARA



愛媛大学地球深部ダイナミクス研究
センター 准教授
〒 790-8577 愛媛県松山市文京町 2-5
TEL: 089-927-8150
e-mail: yunishi@sci.chime-u.ac.jp

略歴：2003年東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了 博士（理学），2003-2004年Yale大学ポスドク研究員，2004年日本学術振興会特別研究員PD（東京大学物性研究所），2004-2008年東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻助手（21世紀COE）・助教（21世紀COE），2008-2013年愛媛大学上級研究員センター上級研究員，2013年より現職。
最近の研究：地球深部の輸送特性の実験的研究，熱電対起電力の圧力効果。

辻野典秀 Noriyoshi TSUJINO
岡山大学惑星物質研究所 助教
e-mail: tsujino@okayama-u.ac.jp

久保友明 Tomoaki KUBO
九州大学大学院理学研究院 教授
e-mail: kubotomo@geo.kyushu-u.ac.jp

山崎大輔 Daisuke YAMAZAKI
岡山大学惑星物質研究所 准教授
e-mail: dy@misasa.okayama-u.ac.jp

土居峻太 Shunta DOI
愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター 修士課程
(研究当時)

今村公裕 Masahiro IMAMURA
九州大学大学院理学府 博士課程 (研究当時)

芳野極 Takashi YOSHINO
岡山大学惑星物質研究所 教授
e-mail: tyoshino@misasa.okayama-u.ac.jp

タマネギ催涙成分が作られる酵素反応の構造・理論基盤

佐藤優太¹, 荒川孝俊^{1,2}, 伏信進矢^{1,2}

¹ 東京大学大学院農学生命科学研究科, ² 東京大学微生物科学イノベーション連携研究機構

Structural and Theoretical Bases of the Enzymatic Reaction Producing the Onion Lachrymatory Compound

Yuta SATO¹, Takatoshi ARAKAWA^{1,2}, Sinya FUSHINOBU^{1,2}

¹ Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo,

² Collaborative Research Institute for Innovative Microbiology, The University of Tokyo

Abstract

タマネギの催涙成分はネギ属植物が豊富に持つ含硫化合物に由来し、催涙因子合成酵素 (LFS) によって生成される。LFS が触媒する催涙因子生成反応は、基質が不安定な化合物である、生成物の立体選択性に特徴があるなど、非常に独特である。本稿では、実験のみからのアプローチでは結論の得られにくいタイプの酵素 (= 生体触媒) に対し、X線結晶構造解析、生化学的な解析、計算化学的手法を組み合わせることで反応機構の解釈を得た、最新の研究事例について紹介する。

1. はじめに

タマネギやニンニクといったネギ属植物が持つ特徴の1つに、独特な香気が挙げられる。この香気の原因となる化合物はネギ属植物の細胞中に存在する含硫成分が由来となって生成される [1]。生成された含硫化合物は香気と同時に風味や薬効等のさまざまな生理的作用をもたらすとされており、古くから注目を集めてきた [2]。

ネギ属植物に共通する含硫成分であるシステインスルホキシド (CSO) は、生体構成アミノ酸の1つであるシステインの側鎖のチオール基に炭化水素基と酸素原子が付加した化学構造をしている。外敵に襲われる、包丁で切られるなどによってネギ属植物の細胞が損傷すると、細胞質に蓄えられていた CSO は別の細胞内区画に存在する酵素アリイナーゼと接触し、その作用によって C-S 結合が切断される。切断で生じるスルフェン酸 (R-SOH) は反応性が極めて高いために、スルフェン酸や活性化化合物同士が自発的に反応する。こうした反応が繰り返され、CSO は香気成分を含む複雑な組成を持った下流の含硫化合物へと代謝されていく (Fig. 1)。

タマネギを切ると涙が出る現象も CSO を起源とする含硫化合物の1つが引き起こす。催涙因子と呼ばれてきたこの原因物質は化学名では *syn*-プロパンチアール-S-オキシド (PTSO) という [3]。PTSO は揮発性の分子で、催涙効果に加えタマネギ臭を我々に感じさせるタマネギのアイデンティティを形作る化合物でもある。PTSO は非酵素的には生成しないという点においても他の CSO 代謝物とは一線を画しており、PTSO の生成反応を担う触媒分子として催涙因子合成酵素 (LFS) が今世紀初頭に発見された [4]。LFS は、タマネギの主要 CSO である *trans*-1-プロペンスルフェン酸 (1-PSA) が分解されて生じる *trans*-1-プロペンスルフェン酸 (1-PSA) に作用し、スルフェン酸基中の水素原子 "H^b" が分子内の別の炭素原子 "C₂" に移動する反応を触媒して PTSO を合成する (Fig. 2) [5]。

LFS の作用機序の詳細は発見以来調べられてこなかった。LFS が作用する分子のスルフェン酸は、求核性と求電子性を併せ持つ非常に不安定な化合物であり、解析に困難を伴うことが主な理由に挙げられる [6]。とりわけ、スルフェン酸自身を含む含硫官能基に対して高い反応性を持つ

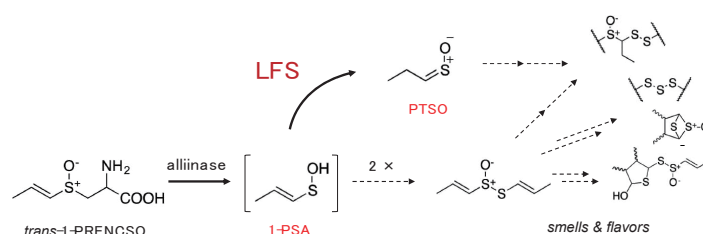


Figure 1 Biological degradation pathway of a CSO compound in onion (*Allium cepa*). Solid and dashed arrows represent enzymatic and nonenzymatic reactions, respectively.

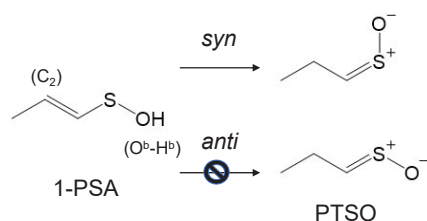


Figure 2 Scheme of reaction catalyzed by LFS. Produced PTSO is strictly regulated to *syn*-configuration (“*syn*-effect”).

ため、2分子以上の縮合や転位反応が生じやすく反応の制御・追跡が非常に難しい [7, 8]。遊離する低分子スルフェン酸に関する知見は極めて乏しいが、LFSはそのようなスルフェン酸を認識し積極的に作用する類例のない酵素である。

一方で、LFSの触媒機構について推測されていることも存在する。LFSによって生成される PTSO 分子には、C=S結合周りでシス型配座を好んで水素転位するという *syn* 効果が認められている [9]。LFSが作用する前の 1-PSA は、溶液中で熱力学的に安定な *anti* 型の構造を取りやすいと考えられる。そのため、LFSは反応初期状態における 1-PSAの配向を *syn* 型に限定し、*syn* 効果を促す機構を持ち合わせていると予想される。

本稿では、以上のように他に類を見ない酵素 LFS の作用機序解明にいたる研究について紹介する。タンパク質 X線結晶回折実験による LFS 立体構造決定と基質アナログ分子が結合した状態の観察に加えて、変異体 LFS を用いた生化学実験、計算化学・分子シミュレーションを組み合わせて LFS 触媒機構を提唱し、その素過程を検証した [10]。

2. LFS の X線結晶構造解析および変異体 LFS を用いた生化学的解析

大腸菌を用いて異種発現したタマネギ由来 LFS を精製・結晶化し、得られた結晶を用いて PF の PX ビームライン

にて X線回折データを収集した。最大分解能 1.7 Å で決定された結晶構造 (Fig. 3A) から、LFS は脂溶性分子の結合タンパク質に多く見られる α グリップフォールドを形成することがわかった。また、分子の中央に向かって活性部位と考えられるポケットが観察された (Fig. 3B)。そこで、ポケットを形成する残基の点変異体を作製し、PTSO 生成能力を野生型 LFS と比較した (Fig. 3C)。ポケット形成残基のうち、芳香族側鎖や荷電側鎖で作られる側面 (“Wall”) にあたる残基の変異体は、軒並み PTSO 生成量が野生型に比べて 10% 未満に減少し、この部位が酵素活性に重要であると示された。

また、基質 1-PSA の安定なアナログ分子であるクロチルアルコール (*cis/trans*-2-ブテン-1-オール混合体) との複合体構造を決定した。クロチルアルコール存在下で結晶化した LFS を用いて X線回折実験を行うと、LFS のポケット内部にクロチルアルコール由来と考えられる U 字型の電子密度が観測された (Fig. 4)。この電子密度に *trans*-2-ブテン-1-オールを当てはめると、ヒドロキシ基がグルタミン酸 88 番 (E88)、チロシン 102 番 (Y102)、チロシン 114 番 (Y114) との間の 3 つの水素結合により認識されている様子が観察された。また炭化水素鎖領域は、熱力学的に安定な直線状の配向ではなく、E88 残基周りで平面状に折れ曲がった配向をしていた。この構造を本来の基質 1-PSA に置き換えると、C-S 結合の周りは *syn* 型の配向となる。1-PSA もクロチルアルコールと同じ様式で LFS に認識されるのであれば、LFS は 1-PSA を結合部位で炭化水素鎖領域の向きを *syn* 型に限定する。このことが *syn* 効果を促す原因であると推測される。

クロチルアルコールとの複合体構造において、E88 側鎖の酸素原子 “O_{e1}” は、1-PSA における C₂ にあたる炭素原子とスルフェン酸基の酸素 “O^b” にあたる酸素原子の 2 つの原子に近い位置に、ほぼ同じ距離だけ離れて存在していた。この状況から、LFS の触媒機構としては H^b がプロトンとして E88 を経由して C₂ へと戻るといったシャトル機構

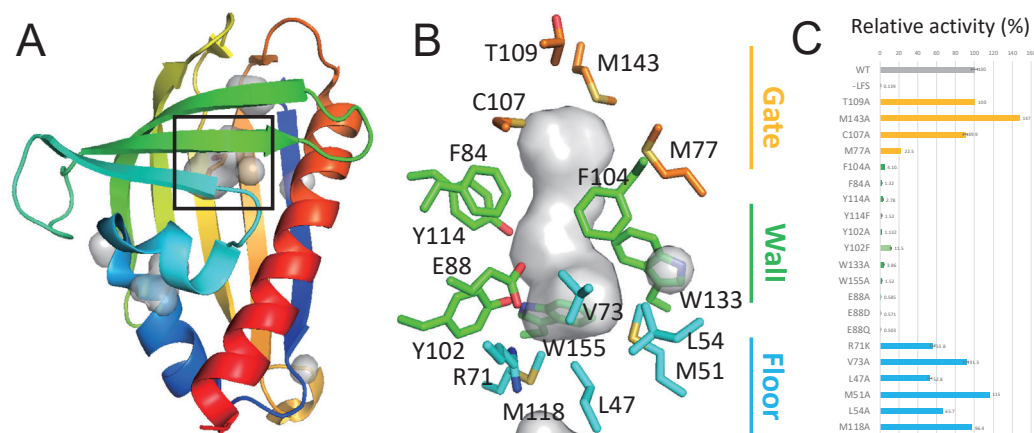


Figure 3 Structure and functional characterization of LFS. A) Crystal structure of LFS. Putative catalytic pocket exists at the center of the molecule. B) Residues forming putative catalytic pocket (close-up view around the box in Fig. 3A). C) Mutagenesis analyses. Bar graph represents relative yields of PTSO by wild type (WT; colored in grey) and variant LFSs. The yields were severely decreased when residues at “Wall” (colored in green) were substituted.

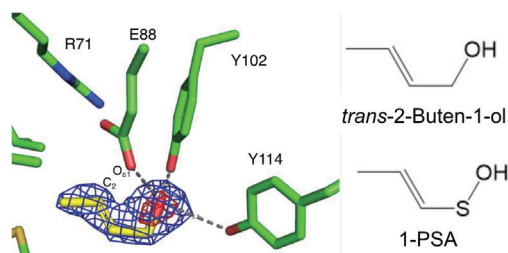


Figure 4 Zoom up view of the catalytic center of LFS. *trans*-Isomer of crotyl alcohol (*trans*-2-buten-1-ol) is modeled to the map. Hydroxy group is recognized by the 3 hydrogen bonds, and the carbohydrate chain is situated next to E88.

が仮定された。

ここで、酸性残基である E88 に一時的にとはいえプロトンが移動しうるのかについては検証の必要がある。E88 のグルタミン変異体 (E88Q) やアスパラギン酸変異体 (E88D) の PTSO 生成活性は、アラニン変異体 (E88A) と同程度の対野生型比 1% 未満であった (Fig. 3C)。そのため触媒機構における E88 には、1-PSA に近い位置で電荷的に酸性であるだけでなく、位置的に厳密に調整された役割を担っていると考えられる。また、スルフェン酸の pK_a はグルタミン酸に比べて高く [11]、加えて E88 には R71 が隣接しておりプロトンの共有によって E88 の pK_a は更に低下していると予想される [12]。本当に LFS がこの機構で PTSO を生成しているのかを検証するため、次に我々は計算化学的なアプローチを行った。

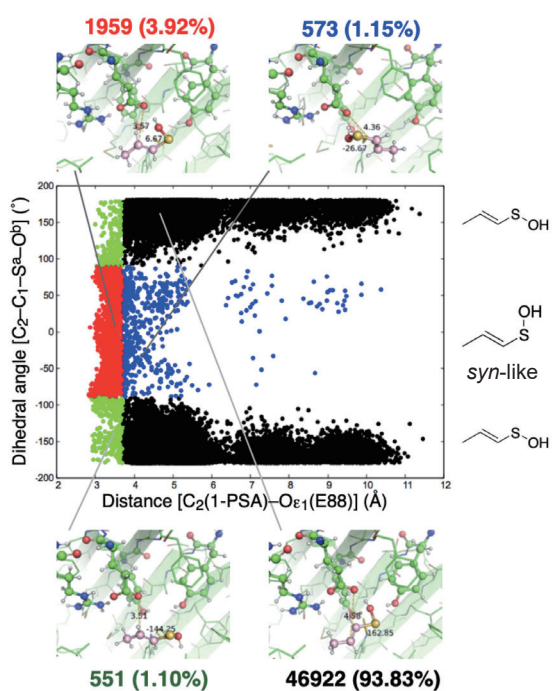


Figure 5 Distribution plot of 1-PSA during the MD simulation. 1-PSA showed *syn*-like conformation next to E88 in approximately 2,000 poses (colored in red) out of 50,000 poses.

3-1. MD シミュレーションによる動的挙動の観察

まず、分子動力学 (MD) 法で LFS および 1-PSA の動的挙動を追跡した (Fig. 5)。1-PSA はポケットの中で高い運動性を示したが、室温条件で計算した 500 ns の時間のうち 20 ns 程度の間は、複合体構造におけるクロチルアルコールと同様に *syn* 型の配向をとっていた。これにより LFS が反応初期状態の 1-PSA を *syn* 型の配向に限定しうることが示唆された。

3-2. QM/MM 法による反応経路の探索

次に、量子力学/分子力学計算 (QM/MM 法) を用い反応経路の探索を行った。結晶構造からターゲット構造を作成し、変異体活性解析から最重要と判断された R71, E88, Y102, Y114 と 1-PSA を QM 層に含め、 H^b を動かした際のエネルギー値を描画した結果、2つの反応経路が見つかった (Fig. 6A)。1つは、反応初期状態 (Reactant) と反応終了時の状態 (Product) の間に遷移状態が1つ (Transition State 3) ある経路であるが、こちらはエネルギー障壁が非常に高く現実的に起こりえないと考えられる。もう1つの経路は1つの中間状態 (Intermediate State) と2つの遷移状態 (Transition State 1, Transition State 2) を持つ経路である。この経路は H^b がプロトンとして E88 経由で C_2 へとシャトルされる機構を再現しており (Fig. 6B), H^b が O^b から離れ E88 に近づく段階 (Reactant \rightarrow Intermediate State) と、 H^b が C_2 に近づく段階 (Intermediate State \rightarrow Product) から構成されていた。最も高いエネルギー障壁でも TS2

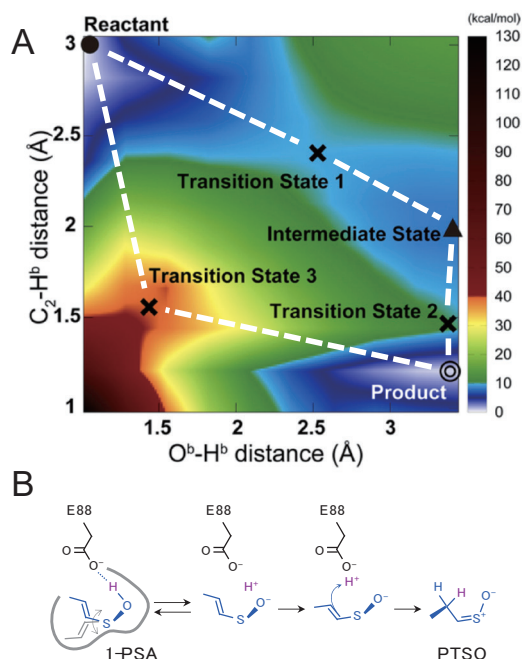


Figure 6 Proposed pathways of the proton transfer at the catalytic center of LFS. A) Potential energy surface according to two distances (C_2-H^b and O^b-H^b) during QM/MM calculation. Two pathways were found, and the one with two transition states and one intermediate state showed relatively low energy barrier (9.19 kcal/mol). B) Schematic representation of the plausible pathway.

の $\Delta E = 9.19$ kcal/mol であり、この反応経路が起こりうることが示された。

3-3. 自然結合軌道計算によるプロトン化状態の観察

最後に、QM/MM によって得られた反応経路上の各電子状態について自然結合軌道を計算し、 H^b のプロトン化状態を観察した (Fig. 7)。これにより、反応開始の定常状態 (Reactant) における H^b は、 O^b と共有結合距離に存在するものの、その軌道は反結合性であることがわかった。つまり、1-PSA が LFS のポケット内部で *syn* 型の配向で認識された際、脱プロトン化が誘発され、反応を駆動することが示唆された。また H^b は、Transition State 1 を除いて O_{e1} と反結合性の軌道を形成することがわかった。つまり、E88 のプロトンを受け取る塩基としての役割は限定的で、スルフェン酸基から送られてきたプロトンを C_2 原子へと即座に送り返していると考えられる。また、Transition State 2 では C_2-H^b 間で 1.48 \AA と非常に長い C-H 結合が形成されている点も特徴的である。R71 により強められた E88 の酸としての性質は TS2 のエネルギー障壁低減に大きく寄与すると推定される。

以上の計算化学的アプローチにより、LFS により 1-PSA が *syn* 型に認識されることをきっかけに、 H^b がプロトンとして E88 を経由して C_2 へと素早くシャトルされるという触媒機構が、確かに起こりうるものとして解釈できた。

4. まとめ

本研究ではタマネギの催涙成分を合成する酵素 LFS について、構造生物学、生化学、計算化学の手法を用いて解析し、これらを総合することで触媒機構を詳細に提唱した。LFS の基質スルフェン酸についての知見は未だ限られているが、様々な手法を組み合わせることで信用に足る解釈を得た。

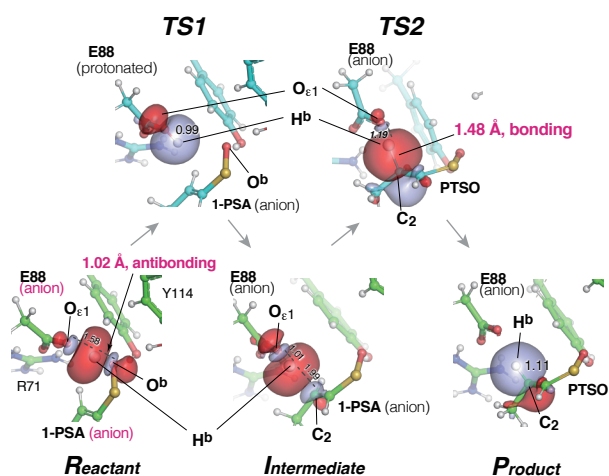


Figure 7 Natural bond orbitals of Reactant, Transition State 1 (TS1), Intermediate State, Transition State 2 (TS2), and Product. Orbitals belonging to H^b atoms are shown and distances between H^b and adjacent atoms are labeled. Dashed lines represent the pairs of atoms that do not form covalent bonds.

反応性の高い含硫化合物をさらに酵素的に変換する LFS の存在は、植物が自身の生存に含硫化合物を利用するに至った長い歴史を思わせる。本研究のように含硫化合物と酵素にまつわるしくみを物理的な観点も入れて調べることを通して、我々ヒトとこれら生物や物質との関係性が将来にわたり一段と高まると期待する。

5. 謝辞

本研究を行うにあたり、お世話になりました KEK-PF スタッフの皆様には厚くお礼申し上げます (放射光共同利用実験課題番号 2018G043)。また試料の提供をいただきましたハウス食品グループ本社の今井真介博士、柘植信昭博士、正村典也博士、様々な計算化学的研究を行っていただきました東京大学大学院農学生命科学研究科の山田真行氏、森脇由隆助教、寺田透准教授、清水謙多郎教授に感謝申し上げます。

引用文献

- [1] E. Block, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **31**, 1135 (1992).
- [2] P. M. Kris-Etherton, K. D. Hecker, A. Bonanome, S. M. Coval, A. E. Binkoski, K. F. Hilpert, A. E. Griel, and T. D. Etherton, *Am. J. Med.* **113**, 71S (2002).
- [3] M. H. Brodnitz and J. V. Pascale, *J. Agric. Food Chem.* **19**, 269 (1971).
- [4] S. Imai, N. Tsuge, M. Tomotake, Y. Nagatome, H. Sawada, T. Nagata, and H. Kumagai, *Nature* **419**, 685 (2002).
- [5] N. Masamura, M. Aoyagi, N. Tsuge, and S. Imai, *Biosci. Biotechnol. Biochem.* **76**, 1799 (2012).
- [6] V. Gupta and K. S. Carroll, *Biochimica et Biophysica Acta.* **1840**, 847 (2014).
- [7] E. Block, A. J. Dane, and R. B. Cody, *J. Agric. Food Chem.* **58**, 4617 (2010).
- [8] T. Yoshimura, E. Tsukurimichi, S. Yamazaki, S. Soga, C. Shimasaki, and K. Hasegawa, *J. Chem. Soc., Chem. Commun.* **18**, 1337 (1992).
- [9] E. Block, J. Z. Gillies, C. W. Gillies, A. A. Bazzi, D. Putman, L. K. Revelle, D. Wang, and X. Zhang, *J. Am. Chem. Soc.* **118**, 7492 (1996).
- [10] T. Arakawa, Y. Sato, M. Yamada, J. Takabe, Y. Moriwaki, N. Masamura, M. Kato, M. Aoyagi, T. Kamoi, T. Terada, K. Shimizu, N. Tsuge, S. Imai, and S. Fushinobu, *ACS Catal.* **10**, 9 (2020).
- [11] T. Okuyama, K. Miyake, T. Fueno, T. Yoshimura, S. Soga, and E. Tsukurimichi, *Heteroatom Chem.* **3**, 577 (1992).
- [12] A. Gutteridge and J. M. Thornton, *Trends Biochem. Sci.* **30**, 622 (2005).

(原稿受付日：2020年9月19日)

著者紹介

佐藤優太 Yuta SATO



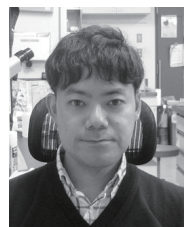
東京大学大学院農学生命科学研究科
博士後期課程3年
〒113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1
TEL: 03-5841-5152
FAX: 03-5841-5152
e-mail: sato-yuta463@g.ecc.u-tokyo.ac.jp
略歴：2018年東京大学大学院農学生命

科学研究科博士後期課程進学

最近の研究：植物由来酵素を利用した高効率な含硫成分合成系の構築，古細菌由来硫黄代謝酵素のクライオ電子顕微鏡を用いた単粒子解析。

趣味：音楽。最近ピアノを練習し始めました。

荒川孝俊 Takatoshi ARAKAWA



東京大学大学院農学生命科学研究科
助教
〒113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1
TEL: 03-5841-5149
FAX: 03-5841-5149
e-mail: arakawa@g.ecc.u-tokyo.ac.jp
略歴：2007年東京農工大学大学院工

学府博士後期課程修了博士（工学），科学技術振興機構 ERATO 研究員，京都大学産官学連携研究員を経て2013年より現職

最近の研究：生体構成分子の構造・機能・物性

趣味：歴史散策，食べ歩き

伏信進矢 Shinya FUSHINOBU



東京大学大学院農学生命科学研究科
教授
〒113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1
TEL: 03-5841-5151
FAX: 03-5841-5151
e-mail: asfushi@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp
略歴：1999年博士（農学），東京大学

大学院農学生命科学研究科 助教，准教授を経て2012年より現職

最近の研究：酵素（特に糖質関連酵素）の構造と機能

趣味：SNS

非対称な電荷分布が引き起こすペロブスカイト型遷移金属酸化物界面の強磁性

北村未歩^{1,2}, 堀場弘司¹, 小林正起¹, 坂井延寿¹, 雨宮健太¹, 藤森淳³, 藤岡洋², 組頭広志¹

¹KEK 物質構造科学研究所, ²東京大学生産技術研究所, ³東京大学大学院理学系研究科

Interfacial Ferromagnetism Induced by Asymmetric Charge Redistribution at Heterointerfaces of Perovskite Transition-Metal Oxides

Miho KITAMURA^{1,2}, Koji HORIBA¹, Masaki KOBAYASHI¹, Enju SAKAI¹, Kenta AMEMIYA¹, Atsushi FUJIMORI³, Hiroshi FUJIOKA², Hiroshi KUMIGASHIRA¹

¹Institute of Materials Structure Science, KEK, ²Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, ³Department of Physics, Graduate School of Science, The University of Tokyo

Abstract

ペロブスカイト型遷移金属酸化物 LaNiO₃-LaMnO₃ ヘテロ構造で発現する特異な界面強磁性の起源を明らかにするため、軟X線分光の元素選択性を利用して、界面電荷移動現象と界面磁化状態を評価した。その結果、LaNiO₃-LaMnO₃ ヘテロ界面においては、Mn イオンから Ni イオンへ電子が移動していること、さらに移動した電荷の空間分布が LNO 側と LMO 側で非対称であることが分かった。詳細な界面磁化状態の評価から、LaNiO₃-LaMnO₃ 界面で発現する強磁性を理解するためには、この電荷移動の非対称な空間分布が重要であると結論付けた。

1. はじめに

ペロブスカイト型遷移金属酸化物では、電荷・スピン・軌道の自由度が複雑に絡み合い多彩な物性が発現する [1]。近年、酸化物薄膜作製技術の進歩により、原子層レベルで厳密に制御された酸化物ヘテロ構造や超構造の実現が可能になってきた。このような異種酸化物を組み合わせた酸化物ヘテロ構造は、構成材料単体では実現できない特異な電気・磁気特性がその界面において発現するというおもしろさがあり、注目を集めている [2-4]。ヘテロ界面における特異な物性発現の要因の1つとして、ヘテロ界面を構成する遷移金属イオン間での界面を通しての電荷のやりとり（界面電荷移動）が挙げられる。界面電荷移動は、化学ドーピングを行った場合に伴う意図しない原子並びの乱れを引き起こすことなく遷移金属イオンの電荷・スピン・軌道状態を再構成し、新たな電子・磁性状態を発現させる。例えば、モット絶縁体 LaTiO₃ とバンド絶縁体 SrTiO₃ (STO) の超格子では、界面電荷変調に起因した金属状態が現れる [5]。また、反強磁性絶縁体同士の LaMnO₃ (LMO) と SrMnO₃ からなる超格子は、界面電荷変調により強磁性を示す [6]。

本研究で着目した、LaNiO₃ (LNO) と LMO とのヘテロ構造では、バルクではそれぞれ常磁性金属と反強磁性絶縁体であるにも関わらず、超格子を作製すると界面において Ni イオンと Mn イオン間で電荷が移動し、強磁性特性を示すことが報告されている [7]。さらに LNO と LMO を (111) 方向に積層した超格子においては、LNO に界面誘起の反強磁性秩序が生じ、交換バイアスが発現するという報

告もなされた [8]。LNO-LMO ヘテロ界面で発現するこれらの特異な磁気特性の起源を解明するためには、界面で発現する電荷移動現象がどのような機構で強磁性状態を発現させるのかを明らかにする必要がある。そこで、本研究では、元素選択性と界面（表面）感応性を併せ持つ軟X線分光に注目し、LNO-LMO ヘテロ界面における電荷分布と磁気構造を実験的に直接決定することで、界面強磁性の起源について理解を得ることを目的とした。具体的には、X線吸収分光 (XAS) を用いて界面電荷移動の評価を、X線磁気円二色性 (XMCD) を用いて界面磁化状態の評価を行った。

2. ヘテロ構造の作製と品質評価

LNO-LMO ヘテロ構造は、Photon Factory のビームライン BL-2A MUSASHI (Multiple Undulator beamline for Spectroscopic Analysis on Surface and HeteroInterface) に設置されたレーザー分子線エピタキシー装置を用いて作製した。薄膜堆積中に反射高速電子線回折パターン強度振動をモニターすることで、1 monolayer (ML) 単位で厳密に膜厚を制御することが可能である。これを利用して、TiO₂ 終端された Nb:STO(001) 単結晶基板上に、異なる膜厚・積層構造を持つ LNO-LMO ヘテロ構造を作製した。LNO 及び LMO 各層堆積時には、基板温度をそれぞれ 450-500°C 及び 600-700°C に、酸素分圧を 1×10⁻³ Torr に維持し、ヘテロ構造作製後、酸素空孔を埋めるために 760 Torr の酸素圧において 400°C で 45 分間のポストアニールを行った。

作製したヘテロ構造では、大気中での原子間力顕微鏡による評価の結果、全てのヘテロ構造において Nb:STO 基板

の表面構造を反映した明瞭なステップ・テラス構造が観察された。このことから、作製したヘテロ構造は、表面だけでなく、埋もれた界面も原子層レベルで平坦であると言える。またX線回折測定の結果、LNO及びLMO各層はNb:STO基板上にコヒーレント成長していた。さらに、走査透過電子顕微鏡の電子エネルギー損失分光法測定、及び光電子分光による内殻強度測定により、LNOとLMOの界面は化学的に急峻であることを確認した。この厳密に界面が定義されたLNO-LMOヘテロ構造について、XASを用いて電荷移動現象の評価、XMCDを用いて界面磁化状態の評価を行った。

3. X線吸収分光を用いた界面電荷移動解析 [9]

LNO (n ML)/LMO 及び LMO (m ML)/LNO の二層膜のXASの評価は、BL-2A MUSASHI に設置した *in situ* (その場) 角度分解光電子分光-レーザー分子線エピタキシー複合装置にて行った。測定用の試料として、ヘテロ構造下層のLMO (LNO) の膜厚を20 ML に固定し、上層のLNO (LMO) の膜厚 n (m) を0-5 ML の範囲で1 ML 単位で変化させたヘテロ構造を用いた。作製したヘテロ構造は大気に晒すことなく超高真空下で測定チャンバーまで搬送し、*in situ* で試料のドレイン電流を計測することによりXASスペクトルを取得した。測定温度は室温である。

Fig. 1(a) に、LNO (n ML)/LMO 二層膜のLMO下層のMn- $L_{2,3}$ XAS スペクトルを示す。LMO単層膜 ($n = 0$) では、MnイオンはMn³⁺状態が存在するのにに対し、LNO/LMO二層膜ではLMO単層膜 ($n = 0$) に比べて、LNO/LMO二層膜

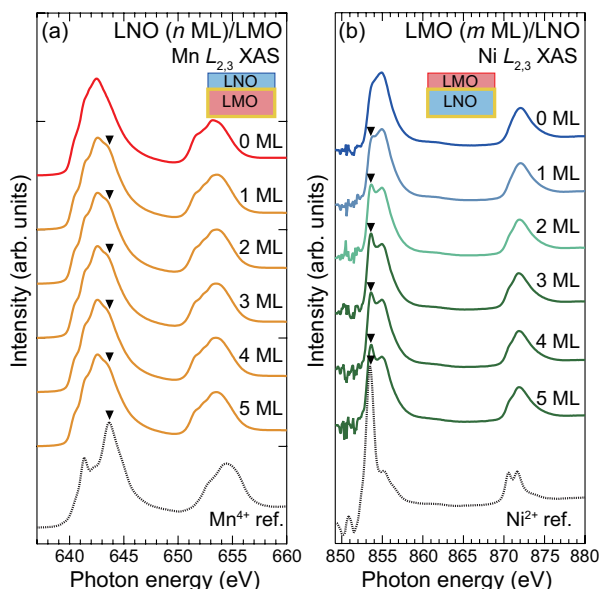


Figure 1 (a) Mn- $L_{2,3}$ XAS spectra of the LMO underlayer of LNO (n ML)/LMO bilayers. (b) Ni- $L_{2,3}$ XAS spectra of the LNO underlayer of LMO (m ML)/LNO bilayers ($m = 0-5$). The contribution of the La- M_4 edge has been subtracted. The spectra of an $\text{La}_2\text{NiMnO}_6$ film are shown as references for the Mn⁴⁺ and the Ni²⁺ states. The triangular arrows indicate the representative changes due to the interfacial charge transfer. All XAS measurements were carried out at 300 K.

では~643.5 eVにMn⁴⁺状態の存在を示す肩構造 (Fig. 1(a)中の三角印)[10]が現れる。一方で、Fig.1(b)に示すように、LMO (m ML)/LNO二層膜におけるLNO下層のNi- $L_{2,3}$ XASスペクトルでは、LNO単層膜 ($m = 0$) (NiイオンはNi³⁺状態で存在)と比較して、~853.6 eVにNi²⁺状態の存在を示す鋭いピーク構造 (Fig. 1(b)中の三角印)[10]が観察される。これらの結果から、LNO-LMO界面においてLMO層からLNO層へ電子が移動 (LNO層からLMO層へ正孔が移動)し、Ni³⁺ + Mn³⁺ → Ni²⁺ + Mn⁴⁺の価数変化が起こっていることが明らかとなった。

電荷移動と界面磁化状態の関係をより詳細に解明するためには、電荷移動発現の有無だけではなく、電荷移動によって移動した電荷がヘテロ界面でどのように空間的に分布しているかについても明らかにする必要がある。例としてLMOについて考える。移動してきた正孔が界面第一層に局在した場合には、このMnイオンの価数は4価となり、Mn酸化物の磁気相図 [11] からLMOの界面第一層は反強磁性を示すと考えられる。一方で、もし正孔が界面から離れた領域まで広がって分布した場合には、界面領域には電荷移動によって価数変化したMn⁴⁺イオンに加えてMn³⁺イオンも存在するため、Mn酸化物の磁気相図 [11] からLMOの界面領域は強磁性を示すと予想される。このように、電荷移動の空間的分布を評価することは界面磁性を理解するのに非常に重要な役割を果たすと考えられる。

電荷移動の空間的分布、即ち遷移金属イオンの価数の深さ分布を評価するためには、一般的には、Fig. 2 (a)-(c)に示すように、ヘテロ構造を作製し、上層の膜厚を製膜時間やエッチング時間によって変化させながら、上層の価数変化を測定する。しかしながらこの従来の測定手法では、軟X線分光の表面感性の高さに由来して、電荷移動に関する埋もれた界面からのシグナルが相対的に弱くなること、得られたスペクトルが表面状態の影響を大きく受けてしまうこと、検出領域と膜厚変化の両方を考慮した複雑な解析が必要であること、という問題があった。これらの問題を解決するために、我々は、XASの元素選択性を利用して界面電荷移動の空間分布を決定する新たな手法を提案した。新手法では、上層の膜厚を変化させながら、下層の価数変化を測定する [Fig. 2 (d)-(g)]。ヘテロ接合が形成されると、界面電荷移動に伴う価数変化を反映して下層のスペクトル形状が変化する [Fig. 2 (d) → (e)]。ここで上層の膜厚を1 ML単位で増加させていくと、上層の膜厚が電荷移動に関わる膜厚以下である限り、下層のスペクトル形状は電荷移動の継続を反映して連続的に変化する [Fig. 2 (e) → (f)]。上層の膜厚が電荷移動の長さに匹敵する、すなわち、一定の厚さの上層膜で界面電荷移動が完了すると、下層のスペクトル形状の変化は飽和することになる [Fig. 2 (f) → (g)]。このように、下層のスペクトル変化が飽和する上層の膜厚を決定することで、上層の酸化物における電荷移動の長さを知ることができる。この新手法では、電荷移動量そのものを評価することは困難であるが、従来の測定手法と比べて以下のような利点を有する。第一に、XAS

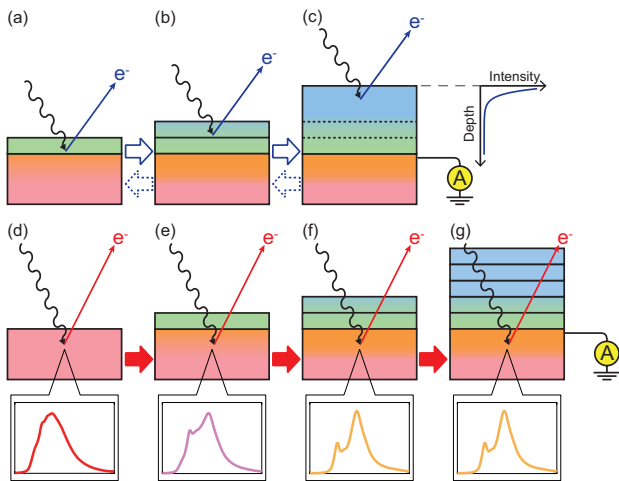


Figure 2 Schematic illustrations of the conventional method (a)–(c) and the proposed approach in the present study (d)–(g) used to investigate the interfacial charge transfer phenomena.

の元素選択性を利用することにより、電荷移動に関与する埋もれた界面が下層の「表面」と定義されるため、界面が最も感度良く測定できる。第二に、測定しているのは埋もれている下層の XAS スペクトルであるため、表面由来の状態の影響を受けない。第三に、膜厚が一定である下層におけるスペクトルの形状変化を電荷移動の「指標」として用いるため、膜厚変化によるスペクトル形状の変化や検出長を考慮することなく解析が可能である。

この手法を用いて、LNO-LMO 界面の電荷移動の空間分布を評価した。ここでは、電荷移動により LNO 側に移動した電子の分布を決定するために、LNO (n ML)/LMO 二層膜の LMO 下層の Mn- $L_{2,3}$ XAS スペクトル測定を行なっている。Fig.1 (a) に示すように、LMO に 1 ML LNO を堆積してヘテロ界面を生成すると Mn- $L_{2,3}$ XAS スペクトルは界面での電荷移動を反映してその形状が変化している。しかしながら、LNO 層の堆積厚さを 1ML から厚くしても、スペクトル形状は実験精度の範囲内で変化せず、LNO 層と LMO 層の間の電荷移動が 1ML の LNO 堆積のみで完了することが分かる。この結果は、LMO 側から移動した電子が LNO 界面第一層に閉じ込められていることを示している。同様にして、LMO 側に移動した正孔の分布を決定した (Fig.1 (b))。LMO (m ML)/LNO 二層膜の LNO 下層の Ni- $L_{2,3}$ XAS スペクトル測定により、電荷移動によって生成した Ni²⁺ 状態の存在を示す ~853.6 eV のピーク強度は LMO 上層の膜厚が 3-4 ML まで増加するが、LMO 上層の膜厚がさらに厚い領域では形状変化が飽和している。この Ni- $L_{2,3}$ XAS スペクトルの形状変化の飽和から判断すると、電荷移動によって LMO に誘起された正孔は界面から 3-4 ML の領域に分布していると考えられる。

以上の結果から、LNO-LMO ヘテロ界面では、LMO 側から LNO 側に電子が移動することが明らかとなった。さらにその空間分布を評価することで、電荷移動によって移動した電荷は LNO 層では界面第一層に局在しているのに

対して、LMO 層では界面から 3-4 ML の領域に広がって分布している、非対称な空間分布を有することが分かった。

4. X線磁気円二色性を用いた界面磁化状態解析 [12]

XAS で明らかにした非対称な空間分布を有する電荷移動現象と、LNO-LMO 界面での特異な磁気特性との関係を明らかにするために、LNO-LMO ヘテロ構造の XMCD 測定を行った。XMCD による界面磁性評価用の試料として、LMO/LNO (n ML)/LMO 及び LNO/LMO (m ML)/LNO の三層膜を用いた。ヘテロ構造上層と下層の LMO (LNO) の膜厚をそれぞれ 5 ML と 20 ML に固定し、中間層の LNO (LMO) の膜厚 n (m) を 2-5 (6, 12) ML の範囲で変化させた。XMCD スペクトルは、Photon Factory のビームライン BL-16A に設置された常伝導磁石 XMCD 装置を用いて、1 T の磁場下で温度 70 K にて測定した。このとき、入射 X 線ビームと試料法線との角度を 60° に設定し、入射ビームの偏光は一定に保ったまま磁場を正負で切り替えて試料のドレイン電流を測定した。XMCD スペクトルは、正と負の磁場下で測定したスペクトルの差分として定義した。

Fig. 3(a) に、LMO/LNO (n ML)/LMO 三層構造における

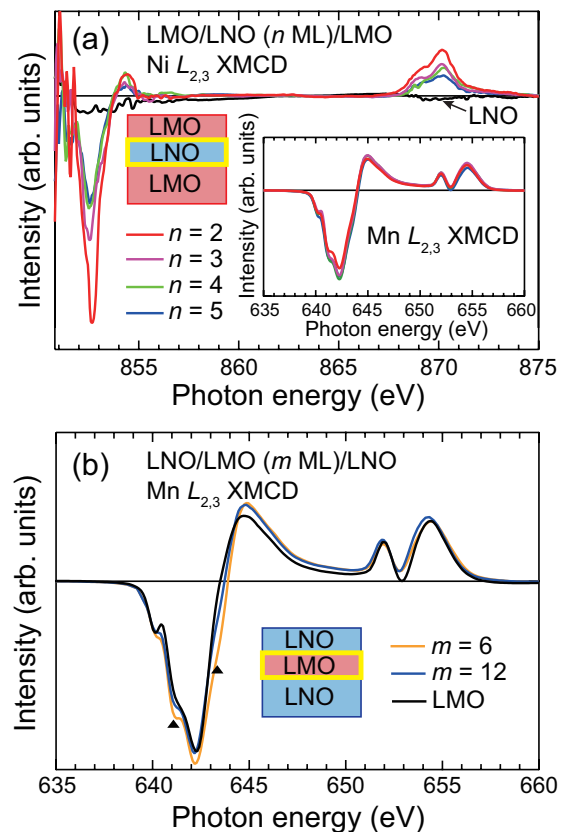


Figure 3 (a) Ni- $L_{2,3}$ XMCD spectra of the LMO/LNO (n ML)/LMO trilayer structures ($n=2, 3, 4,$ and 5) measured under the magnetic field of 1 T at 70 K. The spectrum of a 20 ML LNO film is shown for reference. The corresponding Mn- $L_{2,3}$ XMCD spectra of the trilayers are shown in the inset. (b) Mn- $L_{2,3}$ XMCD spectra of the LNO/LMO (m ML)/LNO trilayer structures ($m=6$ and 12) obtained under the magnetic field of 1 T at 70 K. The spectrum of a 20 ML LMO film is shown for reference.

LNO 中間層と参照用の LNO 単層膜の Ni- $L_{2,3}$ XMCD スペクトルを示す。LNO 単層膜では、その常磁性特性を反映して XMCD 信号は観測されていない。それに対して、LMO/LNO/LMO 三層構造では全ての三層構造で明瞭な XMCD 信号が観測されており、LMO と界面を作ることでバルクでは常磁性の LNO の Ni イオンに磁化が誘起されることが明らかになった。また、XMCD 信号の強度が LNO 中間層の膜厚増加と共に単調に減少することから、Ni イオンの磁化は LMO との界面領域に存在すると言える。磁化を発現している Ni イオンの電子状態に目を向けると、LMO/LNO/LMO 三層膜における Ni- L_2 XMCD スペクトルの形状は、LNO 中間層の膜厚に依らず実験誤差の範囲内でほぼ一致しており、その形状は Ni^{2+} 状態の XMCD スペクトル [13] によく似ている。ここで、前述した XAS 測定の結果では、LMO と LNO の界面では電荷移動により界面第一層の Ni イオンの価数がバルクの 3 価から 2 価に価数変化していた。この XAS の結果と合わせると、LNO-LMO ヘテロ構造の LNO 側では、電荷移動で価数変化した界面第一層の Ni^{2+} イオンにのみ磁化が発現していると考えられる。さらに、Fig. 3(a) の挿入図に示すように、LNO 中間層の Ni- $L_{2,3}$ XMCD 信号と LMO 上下層の Mn- $L_{2,3}$ XMCD 信号の符号は同じであることから、Ni イオンと Mn イオンに誘起された磁化は強磁性的に結合していることが明らかとなった。XMCD の磁気総和則 [14,15] を用いた定量解析の結果、誘起された有効スピン磁気モーメントは約 $0.2-0.3 \mu_B/Ni$ ion であり、これは Ni^{2+} 状態の電子配置 ($3d^8: e_g^6 t_{2g}^2$) から予測されるフルモーメント ($2 \mu_B/Ni$ ion) よりもかなり小さいことが分かった。

同様に、LNO/LMO (m ML)/LNO 三層構造の Mn- $L_{2,3}$ XMCD を用いて、ヘテロ構造を作製した際の LMO 側に誘起された磁化状態を評価した。三層構造の Mn- $L_{2,3}$ XMCD スペクトルでは、LMO 単層膜の Mn^{3+} 状態由来の XMCD 信号に加えて、 ~ 641.1 eV と ~ 643.4 eV の肩構造 (Fig. 3(b) 中の三角印) に対応する Mn^{4+} 状態の寄与が観察された。このことから、 $m = 6, 12$ ML の三層構造の LMO 中間層の強磁性には Mn^{3+} 状態に加えて、電荷移動によって生成した Mn^{4+} 状態も寄与していることが示唆される。磁気総和則を用いて Mn イオン当たりの有効スピン磁気モーメントを計算すると、三層構造における Mn イオンの磁気モーメント ($m = 6$ ML ($2.3 \mu_B/Mn$ ion), 12 ML ($2.1 \mu_B/Mn$ ion)) は、LMO 単層膜 ($1.7 \mu_B/Mn$ ion) よりも大きかった。XAS の結果から界面で LMO 側に移動した正孔は LMO の界面近傍の 3-4 ML 領域に分布していると考えられることから、電荷移動に関与する界面 3-4 ML の LMO は、電荷移動に関与していない内部の LMO に比べて磁化が大きく、強磁性が安定化しているといえる。

これらの結果をもとに、(001) 配向の LNO-LMO ヘテロ界面における強磁性の起源を考察する。Fig. 4 に示すように、LMO 層の界面領域では、LMO 側に移動した正孔が深さ方向に分布することで生成した Mn^{4+} ($3d^3$ high spin (HS)) イオンと Mn^{3+} ($3d^4$ HS) イオン間での強磁性的二重交換

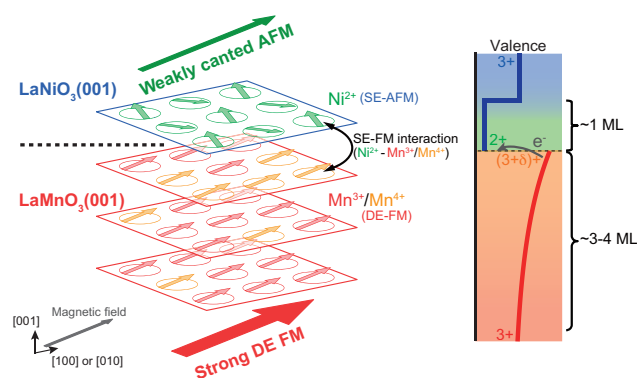


Figure 4 Schematics of possible interfacial magnetic structures of LNO-LMO with asymmetric charge redistributions. Here, SE denotes superexchange interaction, DE means double exchange interaction, AFM is antiferromagnetism, and FM means ferromagnetism.

(DE) 相互作用によって強磁性が安定化していると考えられる。これは、巨大磁気抵抗効果で広く知られる (La,Sr) MnO_3 や (La,Ca) MnO_3 等のペロブスカイト型マンガン酸化物における強磁性発現機構 [1] と類似のものである。次に、LNO 層に関して考える。LNO 界面第一層に存在する Ni^{2+} イオンのスピンは、超交換相互作用 (SE) の符号を予測する一般的規則である Kanamori-Goodenough (KG) 則によると Ni^{2+} ($3d^8$)–O– Ni^{2+} ($3d^8$) の強い反強磁性的超交換相互作用により、互いに反平行に整列すると予想される。加えて LMO 層と LNO 層の界面では、界面を挟んで面直方向に KG 則に従った Ni^{2+} ($3d^8$)–O– Mn^{4+} ($3d^3$ HS) や Ni^{2+} ($3d^8$)–O– Mn^{3+} ($3d^4$ HS) の強磁性的 SE 相互作用が働くと考えられる。その結果、面直の交換相互作用と面内の交換相互作用の微妙な力関係によって、Fig. 4 の緑の矢印に示すように LNO 界面第一層の Ni^{2+} イオンのスピンが傾き (スピンキャンティング)、その結果 LNO 層に巨視的な弱い磁化が観測されたと考えられる。

仮に LMO 層で正孔の空間分布がなく、界面第一層に局在していた場合には、界面第一層の LMO に存在する Mn^{4+} イオンのスピンは Mn^{4+} ($3d^3$ HS)–O– Mn^{4+} ($3d^3$ HS) の反強磁性的 SE 相互作用によって反平行に整列し、LMO 層の界面領域の巨視的な磁化は存在しないと考えられる。加えて上に述べたように、界面 1ML の LNO 界面第一層では Ni^{2+} –O– Ni^{2+} の反強磁性的 SE 相互作用、界面を挟んだ LNO 層と LMO 層間では Ni^{2+} –O– Mn^{4+} の強磁性的 SE 相互作用が働くため、LNO 層内の Ni^{2+} イオンのスピンも反平行に整列すると考えられ、全体として Mn と Ni イオンの巨視的な磁化が存在しないことが予想される。これらの結果から、(001) 配向の LNO-LMO 界面では、電荷移動により生成した正孔の空間的な広がり起因した LMO 界面層における強磁性の安定化と、Ni イオンと Mn イオン間の強磁性的結合が、特有の界面強磁性を引き起こす重要な要因であると言える。

5. まとめ

LNO-LMO ヘテロ構造において、界面で起こる電荷移動現象がどのような機構で界面強磁性を発現するのかを明らかにすることを目的として、測定用に最適化した LNO-LMO ヘテロ構造を作製し、その軟 X 線分光測定を行った。その結果、(001) 配向の LNO-LMO 界面の強磁性は、電荷移動により LMO 内に生成した正孔が空間的に広がっていることに起因していることが明らかになった。より具体的には、正孔の空間的な広がりに起因した LMO 界面層における強磁性の安定化と、Ni イオンと Mn イオン間の界面を通じた強磁性的結合が、特有の界面強磁性を引き起こす重要な要因であると考えられる。

今後、本研究で得られた知見に基づき適切な界面を作製し、界面電荷分布を制御することで、酸化物ヘテロ構造における界面強磁性の設計・制御につながることを期待される。

6. 謝辞

本研究は、簗原誠人、湯川龍、志賀大亮、三橋太一 (KEK-IMSS-PF)、長井拓郎 (NIMS)、及び、野中洋亮、芝田悟朗 (東大) 各氏との共同研究である (所属は研究当時)。本研究における Photon Factory での XAS, XMCD 実験は、共同利用実験課題 (2014T002, 2013S2-002, 及び 2015S2-005) によって行われた。

引用文献

- [1] M. Imada, A. Fujimori, and Y. Tokura, *Rev. Mod. Phys.* **70**, 1039 (1998).
- [2] Y. Hwang, Y. Iwasa, M. Kawasaki, B. Keimer, N. Nagaosa, and Y. Tokura, *Nat. Mater.* **11**, 103 (2012).
- [3] J. Mannhart, and D. G. Schlom, *Science* **327**, 1607 (2010).
- [4] P. Zubko, S. Gariglio, M. Gabay, P. Ghosez, and J. -M. Triscone, *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **2**, 141 (2011).
- [5] A. Ohtomo, D. A. Muller, J. L. Grazul, and H. Y. Hwang, *Nature* **419**, 378 (2002).
- [6] T. Koida, M. Lippmaa, T. Fukumura, K. Itaka, Y. Matsumoto, M. Kawasaki, and H. Koinuma, *Phys. Rev. B* **66**, 144418 (2002).
- [7] J. Hoffman, I. C. Tung, B. B. Nelson-Cheeseman, M. Liu, J. W. Freeland, and A. Bhattacharya, *Phys. Rev. B* **88**, 144411 (2013).
- [8] M. Gibert, P. Zubko, R. Scherwitzl, J. Íñiguez, and J-M. Triscone, *Nat. Mater.* **11**, 195 (2012).
- [9] M. Kitamura, K. Horiba, M. Kobayashi, E. Sakai, M. Minohara, T. Mitsuhashi, A. Fujimori, T. Nagai, H. Fujioka, and H. Kumigashira, *Appl. Phys. Lett.* **108**, 111603 (2016).
- [10] M. Kitamura, I. Ohkubo, M. Matsunami, K. Horiba, H. Kumigashira, Y. Matsumoto, H. Koinuma, and M. Oshima, *Appl. Phys. Lett.* **94**, 262503 (2009).
- [11] H. Fujishiro, T. Fukase, and M. Ikebe, *J. Phys. Soc. Jpn.*

67, 2582 (1998).

- [12] M. Kitamura, M. Kobayashi, E. Sakai, M. Minohara, R. Yukawa, D. Shiga, K. Amemiya, Y. Nonaka, G. Shibata, A. Fujimori, H. Fujioka, K. Horiba, and H. Kumigashira, *Phys. Rev. B* **100**, 245132 (2019).
- [13] H. Guo, A. Gupta, M. Valera, S. Pennycook, and J. Zhang, *Phys. Rev. B* **79**, 172402 (2009).
- [14] B. T. Thole, P. Carra, F. Sette, and G. van der Laan, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 1943 (1992).
- [15] P. Carra, B. T. Thole, M. Altarelli, and X. Wang, *Phys. Rev. Lett.* **70**, 694 (1993).

(原稿受付日: 2020 年 10 月 1 日)

著者紹介

北村未歩 Miho KITAMURA



KEK 物質構造科学研究所 助教
〒 305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1
TEL: 029-879-6196
e-mail: mkita@post.kek.jp

略歴: 2016 年東京大学大学院工学系研究科 (東京大学生産技術研究所) 博士課程

修了, 2016 年物質構造科学研究所博士研究員, 2020 年物質構造科学研究所助教。工学博士。

最近の研究: 放射光分光を用いた酸化物ヘテロ界面物性の起源解明。

趣味: おいしいもの, めい撮り。

堀場弘司 Koji HORIBA

KEK 物質構造科学研究所 准教授
〒 305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1
TEL: 029-879-6196
e-mail: horiba@post.kek.jp

小林正起 Masaki KOBAYASHI

東京大学大学院工学系研究科 准教授
〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1
TEL: 03-5841-6692
e-mail: masaki.kobayashi@ee.t.-tokyo.ac.jp

坂井延寿 Enju SAKAI

東京大学環境安全研究センター 助教
〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1
TEL: 03-5841-2324
e-mail: e_sakai@esc.u-tokyo.ac.jp

雨宮健太 Kenta AMEMIYA

KEK 物質構造科学研究所 教授
〒 305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1
TEL: 029-879-6027
e-mail: kenta.amemiya@kek.jp

藤森淳 Atsushi FUJIMORI

早稲田大学大学院先進理工学研究科 客員教授

〒 169-8555 新宿区大久保 3-4-1

TEL: 03-5286-3230

e-mail: fujimori@phys.s.u-tokyo.ac.jp

藤岡洋 Hiroshi FUJIOKA

東京大学生産技術研究所 教授

〒 153-0041 東京都目黒区駒場 4-6-1

TEL: 03-5452-6342

e-mail: hfujioka@iis.u-tokyo.ac.jp

組頭広志 Hiroshi KUMIGASHIRA

東北大学多元物質科学研究所 教授

(兼) KEK 物質構造科学研究所 特別教授

〒 980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1

TEL: 022-217-5802

e-mail: kumigashira@tohoku.ac.jp

世界初！「マランゴニ対流」による分子のリズミカルな運動を観測生命活動をつかさどるリズムの起源に迫る

2020年8月11日

近畿大学

東京学芸大学

高エネルギー加速器研究機構

高輝度光科学研究センター

■発表のポイント

近畿大学理工学部（大阪府東大阪市）、東京学芸大学（東京都小金井市）、高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所（茨城県つくば市）、高輝度光科学研究センター（兵庫県佐用郡佐用町）らの研究グループは、液体が表面をできるだけ小さくしようとする性質である表面張力の差によって液体に流れが生じる「マランゴニ対流」という自然現象を、分子レベルで観測することに世界で初めて成功しました。それにより、水面上の分子がまさにスクラムを組むようにしてマランゴニ対流を押し返すリズミカルな運動を数分の周期で繰り返していることを明らかにしました。生命活動には、心臓の拍動や呼吸などのように、リズムを刻む現象が数多く見られます。本研究成果は、生命活動をつかさどるリズムの発生メカニズムの理解につながります。本件に関する論文が、令和2年（2020年）8月6日（木）に、アメリカ化学会発行の学術誌“The Journal of Physical Chemistry Letters”に掲載されました（この記事の続きは <https://www.kek.jp/ja/newsroom/attic/PR0811.pdf> をご覧下さい）。

金属イオン間の電子の授受で極性構造を制御～強誘電体・圧電体材料や負熱膨張材料の開発に新しい知見～

2020年8月25日

東北大学多元物質科学研究所

東京工業大学

高輝度光科学研究センター

高エネルギー加速器研究機構

■概要

次世代デバイス開発やエネルギー問題の解決のために、強誘電体・圧電体材料や負熱膨張材料の優れた新素材の開発が求められています。東北大学多元物質科学研究所 山本孟助教、木村宏之教授、戸田薫大学院生（理学研究科）らの研究グループは、特殊な電子状態に起因して極性構造を示すペロブスカイト型酸化物、バナジウム酸鉛（ PbVO_3 ）

とコバルト酸ビスマス（ BiCoO_3 ）の固溶体において、組成変化により、巨大な体積変化を伴う常誘電相への結晶構造変化が起こることを発見しました。また、誘電体特性の1つである自発電気分極の制御にも成功しました。これらの変化の起源は、バナジウムイオンとコバルトイオン間の電子の授受（金属間電荷移動）によるものであることを明らかにしました。この発見は、強誘電体・圧電体材料や巨大負熱膨張材料などの新たな機能性材料の開発につながる成果です。

同研究グループには、東京工業大学 科学技術創成研究院 フロンティア材料研究所 東正樹教授、重松圭助教、酒井雄樹特定助教（以上3名は神奈川県立産業技術総合研究所併任）、西久保匠研究員、大阪府立大学 山田幾也准教授、高エネルギー加速器研究機構（KEK）物質構造科学研究所 佐賀山基准教授、高輝度光科学研究センター 水牧仁一朗主幹研究員および新田清文研究員が参加しました。

本成果は2020年8月11日（米国時間）に Chemistry of Materials 誌でオンライン公開されました（この記事の続きは <https://www.kek.jp/ja/newsroom/attic/PR20200825.pdf> をご覧下さい）。

隕石衝突の規模を鉱物から探る ～高強度レーザーで再現した隕石衝突の瞬間を超高速X線撮影～

2020年9月7日

高エネルギー加速器研究機構

筑波大学

熊本大学

■概要

高エネルギー加速器研究機構（KEK）、筑波大学、熊本大学は、KEKの放射光実験施設フォトンファクトリーアドバンストリング（PF-AR）において、ジルコニア（ ZrO_2 ）鉱物であるバッデレイアイトについて衝撃実験を行い、衝撃を受けている最中に起きる結晶構造の変化をナノ秒（1ナノ秒＝1億分の1秒）の時間スケールで直接観測することに成功しました。

これは、KEK 物質構造科学研究所の高木壮大研究員、一柳光平研究員、野澤俊介准教授、深谷亮特任助教、船守展正教授、足立伸一教授、筑波大学生命環境系の興野純准教授、熊本大学の川合伸明准教授らを中心とした共同研究グループの成果です。本研究は、KEK PF-ARの時間分解X線回折実験ステーションNW14Aを利用して行われました。

本成果は、アメリカ地球物理学連合（AGU：American Geophysical Union）の発行する科学雑誌『Geophysical

Research Letters』(9月16日号 (Volume47, Issue17)) に掲載されます (この記事の続きは <https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2020/09/PR20200907.pdf> をご覧ください)。

酸化物ナノ構造に現れる新しい電子相の発見～二酸化バナジウムを用いたモットトランジスタ開発に新しい知見～

2020年9月17日
東北大学多元物質科学研究所
高エネルギー加速器研究機構

■概要

二酸化バナジウム (VO_2) は室温付近で巨大な金属・絶縁体転移を示すことから、次世代デバイス材料として盛んに研究されている機能性酸化物の一つです。しかし、 VO_2 の示す金属・絶縁体転移においては、デバイス設計に必須となるナノ領域における振る舞いはよく分かっていませんでした。東北大学多元物質科学研究所の志賀大亮大学院生、吉松公平講師、組頭広志教授らの研究グループは、高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所の北村未歩助教、堀場弘司准教授等と共同で、 VO_2 をナノレベルまで薄くすると従来とは異なる新しい電子相が現れることを明らかにしました。

今後、この知見に基づいて最適なデバイス構造を設計することが可能になり、BeyondCMOS の有力候補であるモットトランジスタの実現が期待されます。

本研究成果は、米国物理学会誌 Physical Review B の注目論文 (Editors' Suggestion) に選ばれ、2020年9月9日にオンライン掲載されました (この記事の続きは <https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2020/09/PR20200917.pdf> をご覧ください)。

新奇な磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ構造の作成に成功—磁性とトポロジカル物性の協奏現象に新たな知見—

2020年10月8日
東京工業大学
分子科学研究所
広島大学
日本原子力研究開発機構
東京大学 大学院工学系研究科
高エネルギー加速器研究機構
筑波大学

■概要

東京工業大学 理学院 物理学系の平原徹准教授は、分子科学研究所の田中清尚准教授、広島大学放射光科学研究セ

ンターの奥田太一教授、日本原子力研究開発機構の竹田幸治研究主幹、東京大学大学院工学系研究科の小林正起准教授、高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所の兩宮健太教授、筑波大学数理物質系の黒田眞司教授、物質・材料研究機構 磁性・スピントロニクス材料研究拠点の佐々木泰祐主幹研究員、ロシア・スペインの理論グループと共同で、トポロジカル絶縁体の表面近傍に複数の規則的な磁性層を埋め込むことに成功し、その表面ディラックコーンのエネルギーギャップが磁化秩序の発現する温度より高い温度で閉じることを実証した。

トポロジカル絶縁体とは、物質内部は絶縁体で電流を通さないが、表面には金属状態が存在し、電流を流すことのできる新しい絶縁体であり、「量子物質」として注目されている。このトポロジカル絶縁体にさらに磁石の性質である磁化秩序を導入することで、輸送特性として量子異常ホール効果が実現する。磁性トポロジカル絶縁体では表面に存在するディラック電子にエネルギーギャップが開くが、これまでの研究では、理論の予想する磁化秩序 (磁性) とディラックコーンのエネルギーギャップの相関が実験的に正しいのか明確でなく、論争になっていた。

今回、トポロジカル絶縁体である Bi_2Te_3 (ビスマステル化合物) 薄膜上にさらに Te (テルル) と磁性元素 Mn (マンガン) を蒸着したところ、表面近傍に Mn と Te が潜り込み、 $\text{Mn}_4\text{Bi}_2\text{Te}_7/\text{Bi}_2\text{Te}_3$ という新奇な磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ構造が形成された。そしてこの物質の表面ディラックコーンのエネルギーギャップは、磁化秩序が消失する温度より一桁高い温度まで存在し、最終的には閉じることが示された。この成果によって量子異常ホール効果がこれまでより高温で実現され、デバイス応用につながるものが期待できる。

本成果は、2020年9月24日に、英国科学誌「Nature Communications (ネイチャー・コミュニケーションズ)」にオンライン掲載された (この記事の続きは <https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2020/10/PR20201008.pdf> をご覧ください)。

「第37回 PF シンポジウム（代替開催）」 開催報告

第37回 PF シンポジウム（代替開催）実行委員長
君島堅一

第37回 PF シンポジウム（代替開催）は、フォトンファクトリー（PF）と PF ユーザーアソシエーション（PF-UA）の共同主催で、2020年9月27日（日）に web 会議方式にて開催されました。本シンポジウムは、新型コロナウイルス感染症拡大への対応として開催を見合わせた2019年度量子ビームサイエンスフェスタ（第11回 MLF シンポジウム/第37回 PF シンポジウム）（2020年3月開催予定）のうち、PF シンポジウムおよび PF-UA 総会について代替開催したものです。

今回のシンポジウムには、日曜日の開催にもかかわらず179名の方にご参加いただきました。オンライン開催ということもあり、日本国内各地の大学・研究所・民間企業の研究者・学生はもとより、アジア・欧米地域からのご参加（接続）がありました。今回は、学術セッションは設けられず、午前中は「PF 施設報告」、午後は「PF の将来計画」および「PF-UA 総会」のセッションがプログラムされました。

当日は、東京大学 清水敏之 PF-UA 会長のご挨拶で始まりました。午前の PF 施設報告では、KEK 船守展正実験施設長から PF の COVID-19 対応や PAC 制度改正などの報告がありました。続いて、2020年度に新たに設立された「量子ビーム連携研究センター」について KEK 雨宮健太センター長からセンターの設立目的や組織などについての報告があり、最後に意見交換がなされました。午後の「PF の将来計画」では、船守実験施設長から「概要」として PF の将来計画についての説明があり、短期計画としての PF リングの高度化、ならびに、長期計画としての Hybrid リング計画についての説明がありました。その後、KEK 原田健太郎准教授から「光源計画」として Hybrid リング計画を含む光源案についての説明、KEK 野澤俊介准教授から「利用計画」として、新リングの特徴を軸とした研究の展開について説明があり、最後に意見交換がなされました。次に PF-UA 総会が行われ、最後に小杉信博物構研所長の挨拶で締めくくられました。

今回の PF シンポジウム（代替開催）は初めてのオンライン開催でしたが特に大きな混乱もありませんでした。一方、使用したオンライン会議システムの仕様により質疑応答などの方法に若干制約があり、これらは今後しばらくの間続くと思われるオンライン研究会等を開催する際の課題と思われます。2020年度のサイエンスフェスタは2021年3月9日（火）～11日（木）にオンライン方式で開催予定です。最後になりましたが、シンポジウムの代替開催にあ

たっては、事前準備から当日まで、献身的に活動していただいた実行委員の方々、シンポジウム運営に関し、事務手続きから運営まで全てを円滑に進めて頂き、献身的に支えて下さいました事務局の皆様へ深く御礼申し上げます。

開催概要

日時：2020年9月27日（日）10:30～15:30

開催方法：オンライン

主催：フォトンファクトリー（PF）

PF ユーザーアソシエーション（PF-UA）

参加費：無料

プログラム：

10:30～10:35 PF-UA 会長挨拶（東京大学 清水敏之）

10:35～12:00 PF 施設報告 [座長: KEK 物構研 足立伸一]

「報告」COVID-19 対応, PAC 制度改正, その他

(KEK 物構研 船守展正)

「量子ビーム連携研究センター」(KEK 物構研 雨宮健太)

意見交換

12:00～13:00 休憩

13:00～14:25 PF 将来計画 [座長: KEK 物構研 雨宮健太]

「概要」(KEK 物構研 船守展正)

「光源計画」(KEK 加速器 原田健太郎)

「利用計画」(KEK 物構研 野澤俊介)

意見交換

14:35～15:25 PF-UA 総会

15:25～15:30 物構研所長挨拶 (KEK 物構研 小杉信博)

第37回 PF シンポジウム（代替開催）実行委員：

宇佐美徳子 (KEK 物構研), 北島昌史 (PF-UA/ 東工大), 北島義典 (KEK 物構研), ◎君島堅一 (KEK 物構研), 兵藤一行 (KEK 物構研), 伏信進矢 (PF-UA/ 東大) (◎委員長, 50音順, 敬称略)



図1 発表された方々（会議画面をキャプチャーしたものを編集）。上段左から、雨宮健太（KEK）、植草秀裕（東工大）、小杉信博（KEK）、近藤寛（慶応大）。中段左から清水敏之（東大）、高橋嘉夫（東大）、田中信忠（北里大）、野澤俊介（KEK）。下段左から、原田健太郎（KEK）、伏信進矢（東大）、船守展正（KEK）、山本勝宏（名工大）（五十音順、敬称略）。

DESY 滞在記～研究編～

放射光実験施設 石井晴乃

こんにちは。放射光実験施設の基盤技術部門の石井晴乃です。前回 (Vol.37 No.3) の DESY 滞在記～生活スタート編～に続き、今回は DESY での仕事や職場について書いていきたいと思います。

私はドイツのハンブルグにあるドイツ電子シンクロトン (DESY) の加速器制御を行っている Machine Control System (MCS) グループに 1 年間の長期海外派遣をさせていただきました。前回にも少し話しましたが、加速器グループ (M) は DESY の持つ複数の加速器に関する業務を行っており、その中でも制御グループ (CS) は加速器を制御するためのハードウェアとソフトウェアの開発と維持、そしてそれらの情報サービスの提供を行っています。私は KEK では放射光利用側のインターロックの開発や維持を主業務としており、加速器というさらに大きなシステムを取り扱うような機会はなかったため、規模の違いからくる仕事の取り組み方の違いなどを感じました。また、今回の滞りで組織や国の違いからくる働き方の違いも多くみられ、驚きの連続でした。

私の所属した MCS グループのオフィスは DESY 敷地のおよそ中央、加速器のコントロールルームもある 5 階建ての建屋にあります。私もその一室に相部屋を割り当ててもらい仕事をしていました。現在 DESY では建屋を建築する予算がハンブルグや国から多く割り当てていることや、企業や大学がそれぞれのオフィスを DESY 所内に持つ動きが活発で、所内に次々と新しいオフィスが建設されています。来年度には MCS グループのあるオフィスも新しい建物に移るらしく、年々夏の暑さが厳しくなっているドイツでは冷房の完備された建物は非常にありがたいようです。

海外の研究施設で働く人と話すと働き方の自由度が高くとよく聞いていましたが、実際に目にしてみると想像以上のものでした。DESY での働き方は本当に人それぞれで、朝早く 4 時頃から仕事をして午後すぐに帰る人や、お昼に来て夜帰宅する人もいます。時間をずらす理由も多種多様で、子供の送り迎えである人もいれば午後は気温が上がって仕事の効率が下がるからという人もいますし、昼間にスポーツをしたいからというような人もいます。同じグループで一緒に仕事をしているのに 3 時間ほどしか会わないというのは始めのうちはとても驚きましたし、どうやって仕事をうまく回しているのだろうと不思議でした。実際一緒に仕事をしてみると、仕事の分担をはっきりと分け、互いの仕事を共有する環境をしっかりと整えているからこそ、このような働き方が無理なくできているのだとわかりまし

た。もちろん、ソフトウェア関連の仕事が主だからこそできることかもしれませんが、このような環境が働き方を自由にし、また、業務を効率化しているのだと感じました。

私は放射光実験施設では基盤技術部門でビームラインのインターロック・制御に携わっています。また、それらの技術を生かし、ビームラインの真空をモニタするシステムや実験ホールの環境測定システムなどの整備も行っています。これらのシステムはビームライン担当者や運転当番、ユーザーなど様々な人が利用します。そのため、利用しやすさまで意識したシステムづくりをすることは非常に重要です。また、開発の手が足りない昨今、開発のしやすさも非常に重要な意味を持つようになりました。今回の DESY 滞りの目的はそのような利用しやすいシステム開発を、開発負担を削減し行おうような技術を学ぶためです。

以前より MCS グループとはグループ単位での交流があり、.NET Framework を利用した Advanced Component Oriented Programing (ACOP) と PF で利用されている制御ソフトウェア Simple Transmission and Retrieval System (STARS) を組み合わせ利用するための開発を行ってきました。

ACOP.NET は GUI 開発において、開発者がソースコードを書かずに STARS や TINE などの制御ソフトウェアと通信することのできるコンポーネント群を提供するもので、現在 DESY でも利用されています。私は滞在期間中、まず DESY の加速器制御ソフトウェア TINE で、TINE サーバーとクライアント間の簡単な通信プログラムなどを書きながら TINE の基礎を学びました。そのあと、ACOP.NET で GUI を作成しながら、ACOP.NET の開発とデバッ

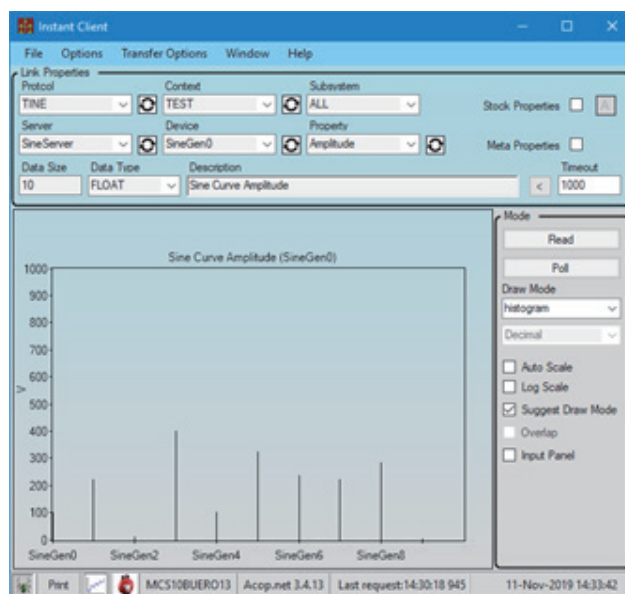


図1 ACOP.NET を用いて開発した GUI (instant client)

グを行いました。

図1は選択した制御サーバからデータを取得したり、送信したりするような制御システムとのコミュニケーションGUIです。STARSと違いTINEは取り扱うデータの形式も様々でACOP.NETのデバッグや機能の拡充は非常に大変でしたが、おかげでACOP.NETのような制御系に即した高機能なフレームワークの開発について詳しく学ぶことができました。今回作成したGUIなどはDESYで利用される制御ソフトウェアのパッケージに組み込まれ、所内で容易にインストールできるようになっています。このようにDESYでは作成したソフトウェアをDESYの技術者や利用者が使用しやすいように配布する仕組みも整えられています。PFでもより多くの人に我々が提供するソフトウェアなどを利用してもらえるようにマニュアルや環境を整え、利用のサポートをできるように努力していく必要があると感じました。

今年はコロナの影響を受け、3月からDESYでも加速器のシャットダウンや在宅勤務が開始されるなど通常とは異なる生活を強いられました。DESYでは早期の対応をしたことで、最初の感染者以降私の滞在期間中に新たに感染した人は出ていません。

積極的な呼びかけと情報共有、注意喚起により帰国までの間比較的安心して過ごすことができました。DESYでホストしていただいたBacher氏やSzczesny氏、Duval氏をはじめMCSグループの皆様には感謝いたします。

また、このような機会を与えてくださった物構研の皆様及び、諸手続きなど帰国までサポートくださった国際企画係の方々にこの場を借りてお礼申し上げます。DESYでの滞りで学んだことを今後のKEK、そして物構研で生かすこれからの施設へ貢献していきたいと思えます。

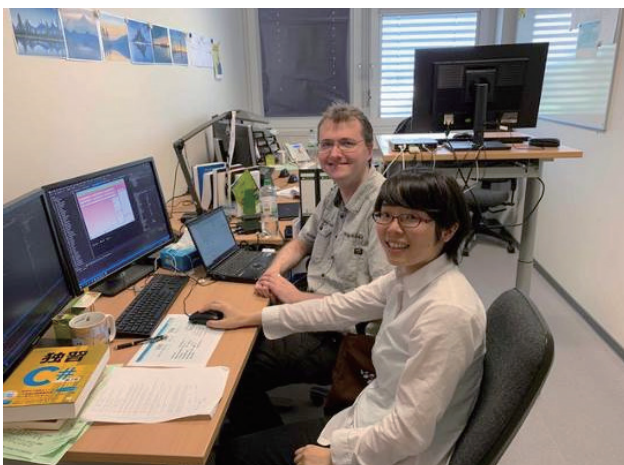


図2 DESYでの職場(手前 私, 奥 Jan Szczesny氏)

KEK オンライン一般公開 2020 が開催されました

一般公開実行委員会
放射光科学第二研究系 阿部 仁
放射光実験施設 山下翔平
加速器第六研究系 山本尚人

令和2年9月6日(日)に、毎年恒例となるKEK一般公開が開催されました。新型コロナウイルスの感染状況を鑑み、今年オンラインという初の試みとなり、YouTube Liveとニコニコ生放送で同時に配信されました。

フォトンファクトリーからはいつもの一般公開では足を運ばない、奥のビームラインまで紹介できればということで、11時15分より「今日のにゃんこ」と題してスタジオ(雨宮健太教授、鈴木真粧子客員准教授)からナビゲーター(宇佐美徳子講師)へ、続いて光電子分光のBL-2A(北村未歩助教)、軟X線顕微分光のBL-19A(小野寛太准教授)、タンパク質結晶構造解析のBL-17A(引田理英助教)の順番でリレー形式によっておよそ30分間に渡り生中継しました。遠方のため現地になかなか足を運ばない方は勿論、スタジオゲスト(勝手につくば大使)や視聴者からの質問にその場で答えるといった生中継ならではの良さを取り入れながら、無事中継が行われました。フォトンファクトリーの中継時でのYouTube Live視聴者数はおよそ480人(全日累計はおよそ6000人)、ニコニコ生放送からは朝からの累計でおよそ4200人(全日累計はおよそ12400人)となり、例年以上に多くの方に参加いただきました。



図1 中継スタジオの様子(左からスタジオゲスト、鈴木真粧子客員准教授、雨宮健太教授)



図2 PFのビームラインからの中継の様子

総研大 物構専攻の亀沢知夏さんが SOKENDAI 賞を受賞

物構研トピックス
2020年10月7日

国立大学法人 総合研究大学院大学（総研大）高エネルギー加速器科学研究科 物質構造科学専攻の亀沢 知夏（かめざわ ちか）さんが、第5回 SOKENDAI 賞を受賞しました。SOKENDAI 賞は、総研大の理念と目的に照らして特段に顕彰するに相応しい研究活動を行い、その成果を優れた学位論文にまとめて課程を修了し学位を取得する学生を表彰するものです。学位論文「動的X線エラストグラフィによる弾性率の可視化」の内容はもちろんのこと、総研大の特別研究派遣制度による東北大学 多元物質科学研究所での研究や、全学事業である SOKENDAI 研究派遣プログラムを使って滞在したハーバード大での研究など、総研大の教育プログラムを十分に活用して研究成果をあげたことが、総研大の理念である高い専門性・広い視野・国際的通用性という面で優れていると評価されました。

亀沢さんは、2018年、2019年の KEK スチューデントデイで連続して機構長賞を受賞するなど、KEK 内でも優秀な成績が認められていました。

SOKENDAI 賞は通例では総研大の学長から授与されるものですが、今回は COVID-19 対策のため9月28日に KEK つくばキャンパスで行われた学位記授与式の後、高エネルギー加速器科学研究科の磯 暁 研究科長より賞状が授与されました。

受賞後のスピーチで亀沢さんは、「総研大では指導教員の兵藤先生をはじめ、多くの先生方の指導を受けました。総研大はプロの研究者が身近にいることと、同じキャンパス内に素粒子原子核や加速器を含めて広い分野の研究者がいる環境がとてもよかったです」と話し、さらなる研究への意欲を見せました。

亀沢さんは、10月からはフォトンファクトリーの博士研究員として研究を続けています。



磯 研究科長から亀沢さんへ学位記の授与

PF トピックス一覧（8月～10月）

PF のホームページ (<https://www2.kek.jp/imss/pf/>) では、PF に関する研究成果やイベント、トピックスなどを順次掲載しています。各トピックスの詳細は PF ホームページをご覧ください。

2020年8月～10月に紹介された PF トピックス一覧

- 8.11 【プレスリリース】世界初！「マランゴニ対流」による分子のリズミカルな運動を観測 ～ 生命活動をつかさどるリズムの起源に迫る～
- 8.25 【プレスリリース】金属イオン間の電子の授受で極性構造を制御 – 強誘電体・圧電体材料や負熱膨張材料の開発に新しい知見–
- 9.3 【物構研ハイライト】物構研4つのプローブの歴史放射光編
- 9.7 【プレスリリース】隕石衝突の規模を鉱物から探る – 高強度レーザーで再現した隕石衝突の瞬間を超高速X線撮影–
- 9.17 【プレスリリース】酸化物ナノ構造に現れる新しい電子相の発見～二酸化バナジウムを用いたモットトランジスタ開発に新しい知見～
- 10.7 【物構研トピックス】総研大 物構専攻の亀沢 知夏さんが SOKENDAI 賞を受賞
- 10.8 【トピックス】技術職員の海外研修報告会を開催
【プレスリリース】新奇な磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ構造の作成に成功–磁性とトポロジカル物性の協奏現象に新たな知見–
- 10.9 【物構研トピックス】物質構造科学研究所 諮問委員会の開催報告
- 10.21 【物構研トピックス】第3回文理融合シンポジウム「量子ビームで歴史を探る」を開催
- 10.23 【物構研トピックス】PF ユーザーの東京大学などの研究グループが TLR7/ 新規阻害剤の複合体構造を高分解能で解明
- 10.27 【物構研トピックス】第37回 PF シンポジウムをオンラインで開催

原子分子科学ユーザーグループの紹介

上智大学理工学部 小田切文
 KEK-IMSS-PF 足立純一
 東京工業大学理学院 北島昌史
 コンボン研究所 早川鉄一郎
 九州大学大学院理学研究院 寺寄亨
 富山大学教養教育院 彦坂泰正

原子分子科学ユーザーグループの概要

原子分子科学ユーザーグループは、主に孤立した原子分子の光吸収に起因する素過程研究に関わる研究者の集まりです。原子分子は電子と原子核からなるクーロン多体系ですが、統計的扱いが含まれるほど粒子数は多くありません。そのような少数多体系における粒子相関を研究の対象としています。実験結果の理解、および、理論との厳密な比較という観点から、原子や二、三原子からなる分子など、非常にシンプルな系を対象とした研究が盛んです。さらに、高温で振動励起した分子、逆に極低温に冷やして回転状態をそろえた分子、強レーザーで向きをそろえた分子といった「変わった分子」に対する実験も行われています。また、クラスター、液滴、イオン液体、自己組織化膜などより複雑な系を対象とした研究もユーザーグループ内で行われるようになってきました。これらはより大きな系、より現実的な系での素過程研究という側面に加え、応用的観点も意識した研究です。アクチノイドの選択的分離抽出剤として着目される有機分子 HONTA（分子量 840；常温で液体）の電子分光、光分解実験もそのような流れの一つで、複数の実験グループによる研究が始まっています。孤立系の電子状態・ダイナミックスの解明が本質的であれば、原子分子科学ユーザーグループのメンバーと学術的な興味が共有できるはずです。

このように対象とする系も多岐にわたりますが、研究内容としても、電子分光、光誘起反応ダイナミックス、量子もつれ原子対の発生、電子衝突断面積測定などと多様です。これらの研究は市販の装置を利用するわけにはいかないことがほとんどですので、自前でくみ上げた装置を、BL-2, 7A, 13, 16, 20A, 28B などのビームラインにおけるフリーポートに持ち込み利用させてもらっています。装置と格闘している場面に遭遇したら、我々ユーザーグループのメンバーかもしれません。本ユーザーグループの紹介として、以下に3つトピックスを選んでもう少し具体的にお話したいと思います。一つ目は放射光を用いて高品質の電子-分子衝突断面積データを測定する研究例で、放射光により生成する2次粒子をビームとして利用することにより、放射光施設で電子衝突実験を行う研究です。二つ目は、イオン源により発生させたクラスターイオンをサイズ選別してトラップし光吸収実験に利用する例で、広い意味で加速器と

放射光を連携させた研究といえます。三つ目は多重光電離過程において放出する電子をすべて検出し同時計数する実験研究で、使用する磁気ボトル型電子エネルギー分析器自体も特殊ですが、PFリングのハイブリッド運転モードとパルスセレクターの利用により約7 μ s 間隔の光パルスを作り出し利用するという特徴があります。同時計数（あるいはコインシデンス計測）も本ユーザーグループ内では汎用的に利用する技術です。詳細はそれぞれの研究の責任者の方にお話しいただけます。書きぶりが多少異なる点はご容赦ください。

超低エネルギー電子衝突実験 “Cold Electron Collision”

原子分子科学の重要な研究分野の一つとして、電子と原子・分子の衝突過程の研究があります。電子-原子・分子衝突過程の理解は、種々の反応素過程の解明をはじめ、地球や惑星の高層大気科学、反応性プラズマから核融合プラズマまでの種々のプラズマの理解、物質や生体への放射線作用の解明など、広範な分野における基礎として極めて重要な役割を果たしています。さらに、粒子間の支配的な相互作用が Coulomb 力と既知であることから、量子力学における少数多体系の散乱理論の検証の場として、基礎科学においても重要な分野になっています。

さて、一般的な電子-原子・分子衝突の実験はフィラメントから放出される熱電子を電子ビーム源として用いますが、放射光により原子をイオン化して生成した電子を電子ビームとして用いることで、より高品質な電子ビームを生成することが出来ます。特に、「しきい光電子源」と呼ばれる、世界でも PF のみで行われている手法では、原子のイオン化ポテンシャルにほぼ等しいエネルギーの放射光を照射し、原子の光イオン化により放出された、エネルギー

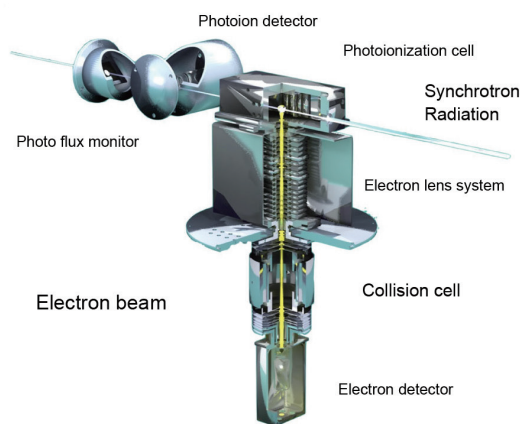


図1 しきい光電子を用いた Cold Electron Collision 実験装置。BL-20A からの単色 VUV 光を用いて Photoionization cell 内で Ar を光イオン化し、生成したしきい光電子を Electron lens system にて捕集・整形し、Collision cell 内で電子を分子と衝突させる。

がほぼ 0 eV のしきい光電子を、特殊な電場により捕集・整形することで、極めてエネルギーが低く、かつエネルギーの揃った電子ビームを生成することに成功しています [1] (図 1 参照)。

このような超低エネルギーの電子ビームを用いることで、従来は不可能であった超低エネルギー電子衝突「Cold Electron Collision」の実験が可能になりました。Cold Electron Collision とは、入射電子のエネルギーが 100 meV 程度を下回る電子衝突であり、例えば、電子の de Broglie 波長が数十 Å 以上となって原子・分子のサイズよりもはるかに長くなり、特異的な量子効果の発現が期待されるものです。また、このような状況での衝突では微弱な力によっても電子の運動が大きな影響を受けやすく、電子と原子・分子間の相互作用のうちでも長距離での漸近形が重要になるなど特徴的な散乱現象が期待され、大変興味深い研究です。最近では、最も基本的な分子である H₂ とその同位体からなる HD および D₂ を標的とした Cold Electron Collision 実験で、これまでの衝突モデルでは認識されてこなかった同位体効果が存在することを見出しています [2]。(北島昌史)

サイズ選別した孤立クラスターの軟 X 線吸収分光

数個～数十個の原子からなるクラスターは、その物性がサイズ(構成原子数)に顕著に依存するという特徴を持ちます。こうした特徴を抽出するためには、サイズを厳密に選別したクラスターを試料として真空中に孤立させた状態で測定することが必要です。当グループでは、サイズ選別した金属酸化物クラスターイオンに対する軟 X 線吸収分光を行っています。サイズ選別した孤立クラスターは試料密度が極めて希薄なため、内殻吸収の断面積が小さいことと相まって、信号は微弱となってしまいます。そのためクラスターの X 線吸収分光測定用に装置(図 2)を製作し、(1)クラスター試料をイオントラップに蓄積して X 線を長時間照射し、(2)解離イオン収量法で X 線吸収を高感度に検出することで測定を実現しました [3]。X 線吸収スペクトルは解離イオン収量の X 線エネルギー依存性を取ることで得られます。測定は、以前は BL-7A で、最近では BL-2B を

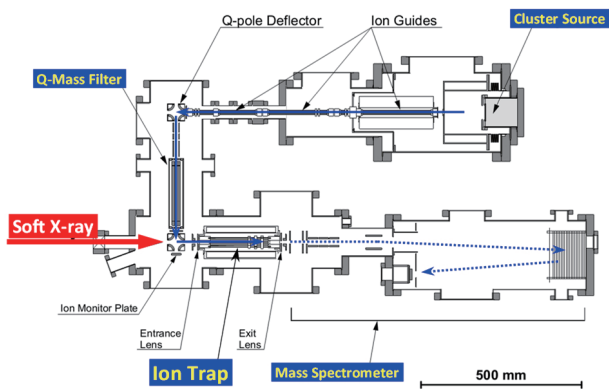


図 2 イオントラップを用いた X 線吸収分光測定装置

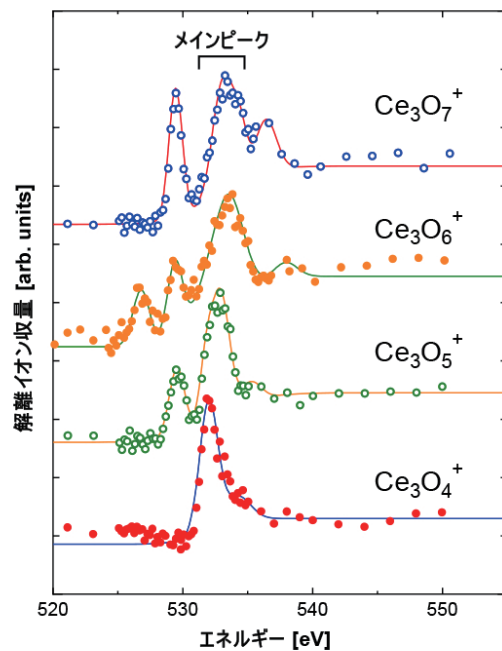


図 3 酸素 K 吸収端近傍における酸化セリウムクラスター $Ce_{3O_{4-7}}^+$ の X 線吸収スペクトル。

利用し、いずれも持ち込み装置をフリーポートに接続して実施しています。アンジュレータの利用により、測定に要する時間はずいぶん短くなりました (BL-7A で 1 スペクトル当たり 20 - 30 時間に対し、BL-2B では 3 時間程度)。実験結果の例として、酸化セリウムクラスター $Ce_3O_{4-7}^+$ の酸素 K 吸収端における X 線吸収スペクトルを図 3 に示します。メインピークの低エネルギー側に、酸素原子数の増加に伴って成長するピークが見られ、 $Ce_3O_4^+$ 中の酸素原子とそこに付加する酸素原子の電子状態が異なることが分かります。一方でセリウム M₄ 吸収端スペクトルからは酸素原子数増加に伴うセリウムの酸化状態変化についての知見が得られ、クラスターの場合には組成から算出される形式的な酸化数が必ずしも金属原子の荷電状態と対応していないことが分かりました [4]。

クラスターに対する X 線吸収分光測定は実験的な難しさがあり、研究例は限られています。しかし他の測定法では得ることのできない元素選択的な知見は、クラスター研究において重要な意味を持っています。こうした強みをさらに活かして、現在は金属酸化物を複合化したクラスターに対する測定を進めており、複合化によって発現する興味深い特性を見出しつつあります。(早川鉄一郎, 寺寄亨)

原子分子の多重電離過程

軟 X 線と物質との相互作用では、様々なプロセスによって複数の電子が放出されることがあります。その全ての放出電子の同時計測を行い、それらのエネルギー相関を得ることで、その多重電離メカニズムやダイナミクスの詳細を理解することができます。特殊な装置である磁気ボトル型電子分光器(図 4)を利用した多電子同時計測によって、

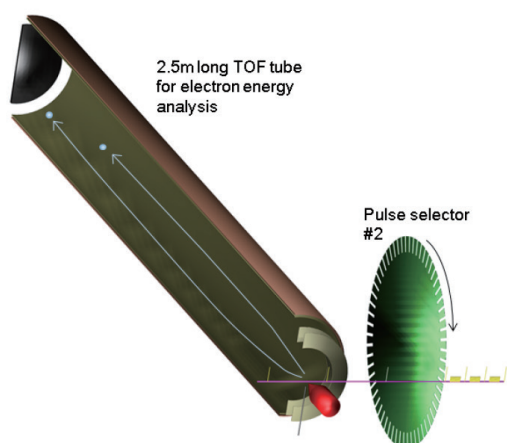


図4 2.5 m 飛行管を備えた磁気ボトル型電子エネルギー分析器による電子 - 電子同時計数実験の模式図 [5]。パルスセクター（緑色）でハイブリッド運転モード時の光パルスを開引く。

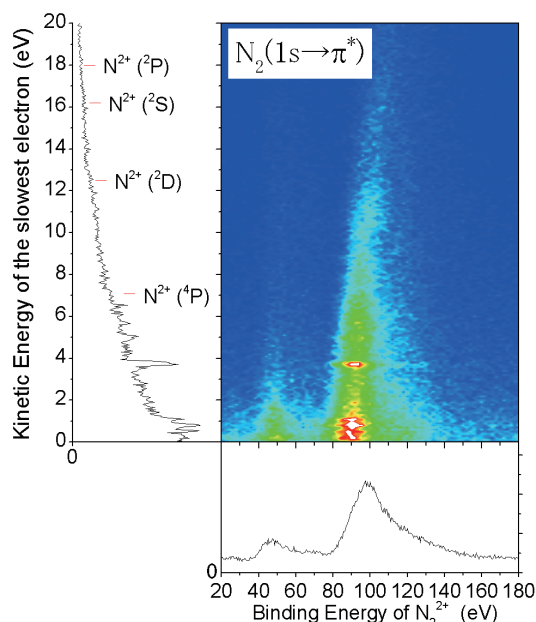


図5 N_2 の内殻励起 ($1s \rightarrow \pi^*$) における放出3電子のエネルギー相関図

そのようなエネルギー相関の測定が可能となりました。図5は、窒素分子の $1s-\pi^*$ 共鳴状態の崩壊過程に対し、多電子同時計測を行うことで得られた3つの放出電子のエネルギー相関図です。ここでは、 $1s$ 内殻空孔を価電子が埋める際に別の3つの価電子が放出される三重オーグメント過程が明示されています。連続的なエネルギー分布は窒素分子からの段階的な3電子放出として理解されますが、その分布上、縦軸の値が4 eV のところで強調構造が見られています。これは、3つ目の電子放出に先立ち、窒素分子の2価イオン状態で分子結合の切断が起こり、さらに生成した解離フラグメントである窒素原子が最後の電子を放出しているものとして理解されます [6]。このような内殻共鳴状態

の崩壊過程だけでなく、光多重電離ダイナミクスや内殻二重空孔状態の分光においても多電子同時計測によって多くの成果が得られています。多電子同時計測のための磁気ボトル型電子分光器では、電子エネルギーを飛行時間分析によって決定しますが、そのため、PF リングのハイブリッド運転と同期するパルスセクターを導入し、数マイクロ秒以上の時間間隔をもったパルス光を測定に利用しています (図4 参照)。(彦坂泰正)

PF への要望

上で紹介した研究に限らず、私たちの分野では実験時の試行錯誤は欠かせません。その点で、SPRING-8 など「共用利用」施設に比べ、PF が研究開発にも重点を置くスタンスを維持してくれている点は非常に感謝しています。

上で紹介したように研究内容および手段が様々ですので、ユーザーグループとして統一の意見を出すことはこれまであまりありませんでした。ただ、今回このような紹介記事の機会をいただき改めて検討した結果、以下2点の要望：(i) フリーポートの充実、および、(ii) ハイブリッド運転の継続あるいは拡大、についてはメンバーで共有できるものと考えています。(i) については、ユーザーグループとしての統一ビームライン仕様をまとめることが難しい現実がありますので、持ち込みの装置が利用でき、かつ、調整のためにブランチで切り替えができるようなビームラインおよびその運用が望ましいと考えています。関連して、R&D のときには細切れのビームタイムを複数回配分されるより、比較的長いビームタイムを一度にももらった方が効率的という意見もありました。また、(ii) について、動力学を詳細に調べるためには複数粒子の同時計数や時分割計測は大変重要であり、そのためにはハイブリッド運転モードとパルスセクターの利用は必要不可欠です。軟X線パルスセクターはPF のワーキンググループが主体となり開発 [7] されており、本ユーザーグループはその開発に積極的に協力してきました。今後もハイブリッド運転モードとパルスセクターについては継続的に利用できる環境を維持していただければと思います。なお、軟X線パルスセクターは二号機と三号機が運用可能状態にあり、PF 時間分解チームでは広く利用者を募集しています。利用のご希望があれば足立 (純) (jun-ichi.adachi@kek.jp) までご連絡ください。

引用文献

- [1] 北島昌史, 日本放射光学会誌 **32** (1), 16 (2019).
- [2] 奥村拓馬ら, PF News **36** (2), 21 (2018)
- [3] T. Hayakawa *et al.*, *J. Phys. B* **49**, 075101 (2016).
- [4] T. Hayakawa *et al.* *Top. Catal.* **61**, 119 (2018).
- [5] T. Odagiri *et al.*, to be appeared in *PF Highlights 2019*.
- [6] T. Odagiri *et al.*, *J. Chem. Phys.* **152**, 124301 (2020).
- [7] 田中宏和ら, KEK Proceedings 2019-9, pp22-26 (<https://lib-extopc.kek.jp/preprints/PDF/2019/1925/1925009.pdf>).

動的構造ユーザーグループ活動紹介

東京工業大学 フロンティア材料研究所 中村一隆
KEK 物質構造科学研究所 野澤俊介

はじめに

物質科学・生命科学における放射光を用いた構造ダイナミクス研究は、この20年間で大きく進展してきました。PF, PF-ARにおいても時間分解X線測定による様々な研究対象への応用実験が行われています。本ユーザーグループ(UG)は主に時間分解X線実験専用ビームラインAR-NW14Aにおいて、100ピコ秒の高強度硬X線パルスを用いたレーザーポンプ-X線プローブ型の時間分解測定を行っており、放射光を用いた時間分解測定の可能性を追求し、また時間分解X線測定の将来像についても議論するために活動しています。

測定手法

AR-NW14Aでは光物性物理・光化学・生体物質等、様々な分野の光誘起ダイナミクス現象について、回折・散乱・分光といった従来の放射光測定法を時間分解測定に適応させることで利用研究が行われています。本UGではPF-ARの高エネルギー性、白色性、高繰り返し性を有効に活用して、蓄積リング型放射光源としての特徴を生かした時間分解測定をAR-NW14Aにおいて実施しています。本UGが利用している代表的な時間分解測定を表1に示します。

表1 動的構造UGがAR-NW14Aで実施している代表的な時間分解測定

測定手法	時間領域	サイエンス例	文献
時間分解 XAFS	100 ps ~ 1 ms	光化学反応(錯体・半導体)	1, 2, 3
時間分解 XRD	100 ps ~ 1 ms	光誘起相転移, 光化学反応(単結晶構造解析)	4, 5, 6
時間分解 X線溶液散乱	100 ps ~ 10 ms	光化学反応(小分子・タンパク質)	7, 8, 9
衝撃圧縮 XRD	10 ns ~ 1 μs	高圧物性・惑星科学	10, 11, 12

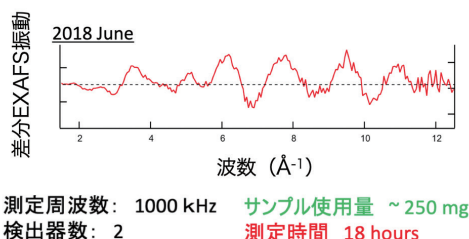


図1 二台の検出器(プラスチックシンチレーター+PMT)を導入したシステムで測定された、Re光触媒錯体の反応中間体構造(寿命~100 ns)における過渡差分EXAFSスペクトル。

最近の整備状況

1) 時間分解-XAFSシステムの検出器多素子化: 本手法で用いられる溶液ジェットを用いた蛍光測定の場合、円筒形状に整形されたサンプルの中心にX線は照射されるので、水平面内のX線と垂直な軸方向に対称な蛍光シグナルが発光します。これまで1方向の蛍光シグナルしか検出していませんでしたが、2018年度に逆方向の蛍光シグナルに関しても検出器とBOXCARシステムを導入することにより、検出効率が2倍になりました。この高度化により、サンプルの光励起比率が1.4%の実験条件においても、およそ18時間の測定で波数~12(Å⁻¹)までの過渡EXAFSスペクトルを得ることが可能になりました(図1)。

2) 時間分解-XRD専用回折計の導入: 高繰り返し時間分解XRD測定システムにおいて、二次元検出器PILATUS 100 Kが設置可能な小型回折計を新規に導入しました。カメラ長は最長1000 mmまで可変で、ω, 2θ軸は垂直および水平の両回転に対応可能です。この回折計の導入により、従来と比較して、より短時間かつ高精度にセットアップおよびサンプルアライメントを実施することが可能となりました。サンプルの温度制御は液体窒素吹付け冷凍機によって行われ、回折計の制御はXRDソフトウェア「SPEC」で行われます。(図2)。

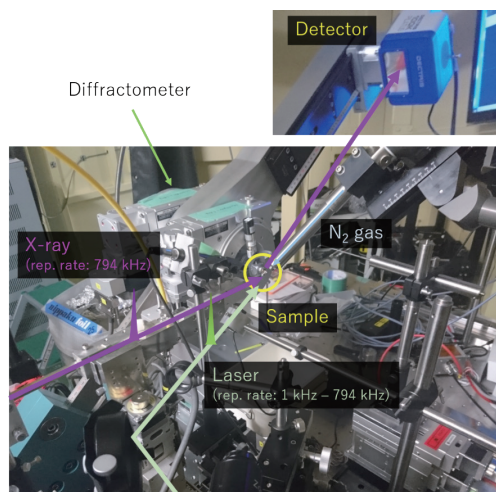
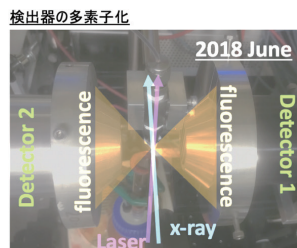


図2 新規導入した小型X線回折計を利用した高繰り返し時間分解XRDのセットアップ例



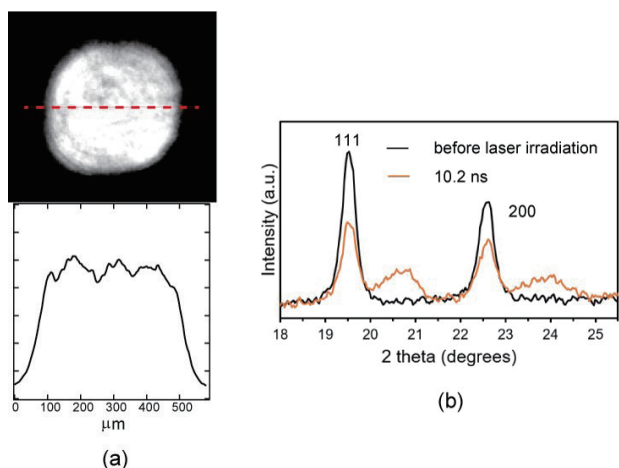


図3 (a) 試料位置における約 500 μm 径のフラット領域を持つビームプロファイル。(b) (a) のビームプロファイルを用いて行ったアルミニウムの時間分解 X 線回折測定。レーザー照射後 10.2 ns のときに衝撃圧縮を示す高角側へのシフトが確認できる。

3) 衝撃圧縮 XRD におけるレーザー光学系の整備：衝撃波駆動用の Nd: ガラスレーザーの光学系を整備し、試料位置でのレーザーの空間プロファイルがガウシアン型からフラットトップ型になるよう改良を行いました (図 3(a))。空間プロファイルをフラットトップ化することにより試料に入る衝撃波の空間的な均一性が向上し圧力状態が均一化することに成功しました。図 3(b) に 100 mm のアルミニウムの時間分解 X 線回折プロファイルを示します。アルミニウムの 111 と 200 に対応する回折ピークがピークを持つプロファイルのまま高角側にシフトし、圧力分布の少ない均一な衝撃波が形成されたことが確認出来ました。本測定ではパルス幅 12 ns、出力 16 J のレーザーを用いて衝撃圧縮することでサンプル内の最大圧力は 17 GPa まで到達しています。

おわりに

時間分解測定で利用している PF、PF-AR の孤立バンチのみの flux は、PETRA-III、APS と同等であり、世界最高クラスの性能を持っています。したがって、そこで展開される時間分解 X 線測定は、様々な放射光実験手法に適用することが可能であり、現在も非常に高い国際的な競争力を持っています。この記事をきっかけに、多くの皆様に本 UG が AR-NW14A で実施している時間分解 X 線測定について興味を持って頂ければ幸いです。ご質問等ありましたら AR-NW14A のビームライン担当者 (野澤: noz@post.kek.jp) まで、遠慮なくご連絡下さい。

参考文献

- [1] K. Sato *et al.*, *Inorg. Chem.* **59** (2020) 10439.
- [2] Y. Uemura *et al.*, *Chem. Lett.* **43** (2014) 977.
- [3] T. Sato *et al.*, *J. Phys. Chem. C* **116** (2012) 14232.
- [4] H. T. Lemke *et al.*, *ACS Omega* **3** (2018) 9929.

- [5] M. Hoshino *et al.*, *Cryst. Eng. Comm.* **17** (2015) 8786.
- [6] H. Ichikawa *et al.*, *Nat. Mat.*, **10** (2011) 101.
- [7] S. Park *et al.*, *J. Chem. Phys.* **150**, (2019) 224201.
- [8] C. Yang *et al.*, *Int. J. Mol. Sci.* **19** (2018) 3633.
- [9] K. Kim *et al.*, *Nature* **518** (2015) 385.
- [10] S. Takagi *et al.*, *Geophys. Res.*, DOI: 10.1029/2020gl089592.
- [11] S. Takagi *et al.*, *J. Synchrotron Radiat.* **27** (2020) 371.
- [12] K. Ichiyanagi *et al.*, *Sci Rep.* **9** (2019) 7604.

令和 2 年度 第 1 回 PF-UA 幹事会・運営委員会 議事録

日時：令和 2 年 9 月 25 日 16:00 – 19:00

場所：Zoom 会議

出席者：[幹事会] 清水敏之 (会長)、植草秀裕* (庶務)、田中信忠 (会計)、伏信進矢、北島昌史 (行事)、阿部善也 (推薦・選挙管理)、山本勝宏 (広報)、朝倉清高*、平井光博 (戦略)、上久保裕生 (共同利用)、奥田浩司* (教育)、高橋嘉夫 (次期会長) [同委任状] 和田敬広、市川創作、[* 運営委員兼任]
 [運営委員会] 朝倉清高、一國伸之、植草秀裕、奥田浩司、腰原伸也、小林寿夫、近藤寛、齋藤智彦、佐藤友子、佐藤衛、志村考功、鈴木昭夫、手塚泰久、松村浩由、横谷明德、雨宮健太、木村正雄、船守展正、[同委任状] 宮脇律郎、足立伸一、千田俊哉、山口博隆

・会長挨拶 (清水 会長)、定足確認 (植草 庶務幹事)

【報告事項】

- ・広報報告 (山本 幹事)
PF-UA だより (PF ニュース) 進行、英文ホームページ作成について報告した。
- ・行事報告 (伏信・北島 幹事)
2019、2020 年度量子ビームサイエンスフェスタ開催について報告した。
- ・会計報告 (田中 幹事)
2019 年度 PF-UA 会計最終報告を行い承認した。
- ・共同利用報告 (上久保 幹事)
2020 年度のユーザーグループ継続申請審議について報告した。
- ・推薦・選挙管理報告 (阿部 幹事)
次期 PF-UA 会長選挙結果、次期 PF-UA 運営委員会選挙日程について報告した。
- ・庶務報告 (植草 幹事)
PF-UA から提出した要望書について報告した。
- ・施設報告 (船守 施設長)
PF 施設報告、PF 将来計画について報告した。

【協議事項】

- ・次期 PF-UA 運営委員選挙について（阿部 幹事）
日程案を承認した。
- ・2020 年度活動について（植草 幹事）
英語版会則・細則を年度内に掲示することとした。
JSR2021 では PF-UA のつどいを開催しないこととした。
- ・その他（植草 幹事）
PF-UA 総会の次第を確認した。

令和元年度 PF-UA 総会 議事録

日時：令和2年9月27日 14:35 – 15:25

場所：第37回 PF シンポジウム（代替開催）内

Zoom webinar

総会の定足・成立確認（植草 庶務幹事）

本総会は2020年3月14日開催予定の総会を延期して開催するものと説明した。会則による定足数を満たしており、総会が成立していることを確認した。近藤 寛会員を総会議長に選任した。

- ・会長挨拶（清水 会長）

【報告事項】

- ・行事報告（伏信 幹事）
2019, 2020 年度量子ビームサイエンスフェスタ（QBSF）について報告した。
- ・広報報告（山本 幹事）
PF-UA だより（PF ニュース）進行について報告した。
- ・会計報告（田中 幹事）
2018 年度 PF-UA 会収支決算報告を報告した。
- ・推薦・選挙管理報告（植草 幹事代読）
次期 PF-UA 会長選挙結果，次期 PF-UA 運営委員会選挙日程について報告した。
- ・PF-UA 活動報告（植草 幹事）
PF-UA による研究会活動支援実績を報告した。幹事会・運営委員会内規を報告した。英訳会則・細則作成経緯を報告した。JSR2021 で PF-UA のつどいを開催しないことを報告した。

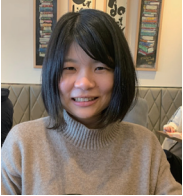
【総合討論】（清水 会長）

PF-UA の予算用途などについて総合討論を行った。

新人紹介

(採用)

亀沢 知夏 (かめざわ ちか)

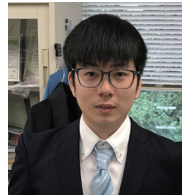


1. 2020年10月1日
2. 物構研 放射光実験施設
博士研究員
3. 総合研究大学院大学・博士課程
4. X線イメージング
5. 皆様のご指導のおかげで、無事に

博士課程を修了できました。これからも研究を進めていきたいと考えております。今後ともご指導いただけますと幸いです。

7. 文鳥・ハリネズミ

伊藤 道俊 (いとう どうしゅん)



1. 2020年10月1日
2. 物構研 構造生物学研究センター
研究員
3. 東京工業大学・博士学生
4. 生命科学, 質量分析
5. 結果につなげられるように頑張り

ます。

7. テニス, ピアノ, 低温調理

AHMED, Rezwan (出身: Bangladesh)



1. November 1st 2020
2. Post doctoral fellow (IMSS/CIQuS)
3. Ph.D candidate, Kyushu University
4. Surface structure analysis and
determination of 2-D materials using
low energy electron diffraction.

5. To determine and verify the surface structure of materials
using different quantum beams available in PF.
6. Time is limited so our effort should be limitless.
7. To explore new places.

- | |
|--|
| 1. 着任日 2. 現在の所属・職種 3. 前所属・職種
4. 専門分野 5. 着任に当たっての抱負 6. モットー
7. 趣味 (写真, 5番~7番の質問は任意) |
|--|

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所教員公募について

本機構では、下記のとおり教員を公募いたします。

記

公募番号 物構研 20-4

1. 公募職種及び人員
准教授 1名(任期なし)
本機構の教員の職名は、教授、准教授、講師、研究機関講師及び助教であるが、機構の性格から、大学における講座制とは異なる運営が行われる。また、本機構の教員の定年は63歳である。
 2. 研究(職務)内容
大学共同利用機関である物質構造科学研究所では、放射光、中性子、ミュオン、低速陽電子の4種類の量子ビームを先端的かつ横断的に利用した物質・生命科学研究を推進している。
本公募の准教授は、量子ビーム連携研究センターに所属し、様々な量子ビームを利用した研究・教育の実績に基づき、各量子ビームの利用研究の中から、複数の量子ビームを利用することでさらなる発展が見込まれるものを取り上げ、複合的な量子ビーム利用を支援・促進する。また、同センターにおいて、量子ビームを複合的に利用した先端的な研究プロジェクトを提案・主導するとともに、そのために必要な量子ビーム利用技術の開発研究を推進する。
勤務地はつくばキャンパスであるが、業務の性質上、東海キャンパスへも赴くことになる。
 3. 応募資格
研究教育上の能力があると認められる者
 4. 給与等
給与及び手当は本機構の規則による。(年俸制)
 5. 公募締切
2020年12月14日(月)正午 必着
 6. 着任時期
採用決定後、できるだけ早い時期
 7. 選考方法
原則として面接選考とする。ただし、第一段階の審査として書類選考を行うことがある。
面接予定日: 決定次第機構 Web サイトに掲示します。(対象となる方には、面接日の2週間前までに詳細をお送りいたします。)
 8. 提出書類
(1) 履歴書: KEK 指定様式 (https://www.kek.jp/jv/jobs/post_2.html よりダウンロードしてください。)
※KEK 指定様式以外の履歴書を使用する場合は、通常の履歴事項の後に必ず応募する公募番号 物構研 20-4(2件以上応募の場合はその順位)、推薦者(もしくは意見者)、電子メールアドレス及び、可能な着任時期を明記すること。
(2) 研究歴: 提出する論文の位置付けを含めること。
(3) 業績リスト: 以下の所定様式に従って作成すること。該当のないものは省略可。
 1. 査読付き原著論文リスト
 - ・和文と英文は別葉とし、共著の論文については原則として共著者名を論文記載順にすべて記入すること。(ただし、共著者数が極端に多い場合は省略可。) また応募者の名前には下線を付けて示すこと。
 - ・論文に整理番号を1からつけること。提出する論文別刷の番号には○印を付すこと。
 - ・著者、論文題目、論文誌名、巻数、発行年、ページ(始めと終わり)はもれなく記載すること。記載の順番は問わない。
 2. 総説、著書リスト
 3. その他の発表論文リスト(査読のない論文、会議録、紀要等)
 4. 国際会議等の招待講演リスト
 5. その他、外部資金獲得状況や受賞歴など参考となる業績
 - (4) 着任後の抱負(共同利用研究者に対する複合的な量子ビーム利用の支援・促進のための方策、および自身の研究計画を含む)
 - (5) 論文別刷: 主要なもの5編程度
 - (6) 履歴書に記載の推薦者(意見者)からの推薦書または参考意見書(宛名は物質構造科学研究所長 小杉信博とすること)
※上記の書類は、すべてA4判横書きとし、それぞれ別葉として各葉に氏名を記入すること。
※2件以上応募の場合、内容が同じであれば提出書類は一部で良いが、異なる場合は提出書類を別々に用意すること(推薦書等も同様とする)。
9. 書類送付
(1) 応募資料
当機構の Web システムを利用して提出してください。
※個人ごとにアップロード用のパスワードを発行しますので、応募される方は人事第一係 (jinji@ml.post.kek.jp) 宛に電子メールでご連絡ください。(件名は「物構研 20-4 応募希望」とし、本文に所属、氏名及び電話番号を記載してください。)
※応募に係るファイルは、PDF でお願いします。
※Web システムでのアップロードが困難な場合は、人事第一係までお問い合わせください。
※電子メールでのファイル添付による応募は受け付けられませんので、ご注意ください。
(2) 推薦書または参考意見書
郵送もしくは電子メール(件名は「物構研 20-4 推薦書」とし、添付ファイルは PDF でお願いします。) で送付してください。
送付先 〒305-0801 茨城県つくば市大徳1-1
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構
総務部人事労務課人事第一係 (E-mail: jinji@ml.post.kek.jp)
注) 電子メールは様々な理由により受信できない可能性があります。数日以内に返信がない場合は、別メールアドレスや電話等によりご連絡ください。
10. 問い合わせ先
(1) 研究内容等について
量子ビーム連携研究センター長 雨宮 健太 TEL: 029-879-6027(ダイヤルイン) e-mail: kenta.amemiya@kek.jp
(2) 提出書類について
総務部人事労務課人事第一係 TEL: 029-864-5118(ダイヤルイン) e-mail: jinji@ml.post.kek.jp
11. その他
本公募に関する、より詳細な説明は、以下を参照してください。
<https://www2.kek.jp/imss/employment/IMSS20-4-j.html>
本機構は、男女共同参画を推進しており、「男女共同参画社会基本法」の趣旨に則り、業績(研究業績、教育業績、社会的貢献等)及び人物の評価において優劣をつけがたい最終候補者(男女)がいた場合、女性を優先して採用します。
男女共同参画推進室 (<https://www2.kek.jp/gco/>)

2020年度量子ビームサイエンスフェスタ (第12回 MLF シンポジウム / 第38回 PF シンポジウム) 開催のお知らせ

PF シンポジウム実行委員会委員長 松垣直宏
MLF シンポジウム実行委員会委員長 川崎卓郎

2020年度量子ビームサイエンスフェスタ(第12回 MLF シンポジウム/第38回 PF シンポジウム)を2021年3月9日(火)~11日(木)の日程で開催を予定しておりますが、今年度は新型コロナウイルス感染拡大防止のため、オンラインで開催することとなりました。

このシンポジウムは、施設側スタッフ、ユーザーの皆様が一堂に会することのできる機会ですので、是非ご参加下さいますようお願い申し上げます。

詳細が決まり次第ホームページやPFニュース等で皆様にお知らせ致します。

<開催概要>

主催: 物質構造科学研究所,
J-PARC センター,
総合科学研究機構 (CROSS),
PF ユーザーアソシエーション (PF-UA),
J-PARC MLF 利用者懇談会

会期: 2021年3月9日(火)~11日(木)

会場: オンライン開催

ホームページ: <http://qbs-festa.kek.jp/2020/>

問い合わせ先: 量子ビームサイエンスフェスタ事務局

Email: qbsf2020-office@ml.post.kek.jp

2020年度量子ビームサイエンスフェスタ実行委員:

猪野隆 (KEK 物構研), 大井元貴 (JAEA), ○川崎卓郎 (JAEA), 神田聡太郎 (KEK 物構研), 北島昌史 (PF-UA, 東工大), 桐山幸治 (CROSS), 佐賀山基 (KEK 物構研), 高木宏之 (KEK 加速器), 巽一巖 (JAEA), 中尾裕則 (KEK 物構研), 永谷幸則 (KEK 物構研), 中野岳仁 (J-PARC MLF 利用者懇談会, 茨城大), 仁谷浩明 (KEK 物構研), 伏信進矢 (PF-UA, 東大), 増井友美 (J-PARC MLF 利用者懇談会, 住友ゴム工業㈱), 町田真一 (CROSS), 松浦直人 (CROSS), ◎松垣直宏 (KEK 物構研), 山崎大 (JAEA), 山田武 (CROSS), 山田悠介 (KEK 物構研), 和田健 (KEK 物構研) (◎委員長, ○副委員長, 50音順, 敬称略)

2021年4月入学 物質構造科学専攻 博士課程(5年一貫制)及び3年次編入 学の最終募集のお知らせ

総研大高エネルギー加速器科学研究科
物質構造科学専攻長 熊井玲児

物質構造科学専攻では2021年4月入学の博士課程(5年一貫制)及び3年次編入学の最終募集を行ないません。いずれも願書は12月10日(木)から12月16日(水)必着で、書類選考と面接で選抜します(面接日は2021年1月19日(火)です)。興味のある方は是非ご検討下さい。詳細は<http://kek.soken.ac.jp/sokendai/admission/general/>をご覧ください。

2021年度前期 フォトンファクトリー研究会の募集

放射光実験施設長 船守展正

物質構造科学研究所放射光実験施設(フォトンファクトリー)では放射光科学の研究推進のため、研究会の提案を全国の研究者から公募しています。この研究会は放射光科学及びその関連分野の研究の中から、重要な特定のテーマについて1~2日間、高エネルギー加速器研究機構のキャンパスで集中的に討議するものです。年間6件程度の研究会の開催を予定しております。

つきましては研究会を下記のとおり募集致しますので応募下さいますようお願いいたします。

記

- 1. 開催期間** 2021年4月~2021年9月
- 2. 応募締切日** 2020年12月18日(金)
[年2回(前期と後期)募集しています]
- 3. 応募書類記載事項**(A4判, 様式任意)
 - (1) 研究会題名(英訳を添える)
 - (2) 提案内容(400字程度の説明)
 - (3) 提案代表者氏名, 所属及び職名(所内, 所外を問わない)
 - (4) 世話人氏名(所内の者に限る)
 - (5) 開催を希望する時期
 - (6) 参加予定者数及び参加が予定されている主な研究者の氏名, 所属及び職名
- 4. 応募書類送付先**(データをメールに添付して送付)
放射光実験施設 PF 秘書室
Email: pf-sec@pfiqst.kek.jp TEL: 029-864-5196

なお、旅費、宿泊費等については実施前に詳細な打ち合わせのうえ、支給が可能な範囲で準備します（1件当たり上限30万円程度）。開催日程については、採択後、放射光実験施設長までご相談下さい。また、研究会の報告書をKEK Proceedingsとして出版していただきます。

※感染症対策として、開催時期の変更やビデオ会議での開催をお願いする場合も考えられます。予めご承知おき下さい。

予 定 一 覧

2020年

- 12月11日 タンパク質X線溶液散乱ミニ講習会 -2020年度トライアルコース-
- 12月18日 2021年度前期フロントファクトリー研究会応募締切
- 12月22日 PF, PF-AR 2020年度第二期ユーザー運転終了

2021年

- 1月8～10日 第34回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム（オンライン開催）
- 2月19日 PF 2020年度第三期ユーザー運転開始
- 2月22日 PF-AR 2020年度第三期ユーザー運転開始
- 3月9～11日 2020年度量子ビームサイエンスフェスタ／第12回MLFシンポジウム／第38回PFシンポジウム（オンライン開催）
- 4月1日 PF, PF-AR 2020年度第三期ユーザー運転終了

※最新情報は <http://pfwww.kek.jp/spice/getschtxt> をご覧下さい。
新型コロナウイルスの感染拡大状況により予定が変更になる場合もあります。

運転スケジュール(Dec. 2020 ~ Mar. 2021)

E : ユーザー実験 B : ボーナスタイム
M : マシンスタディ T : 立ち上げ
MA : メンテナンス HB : ハイブリッド運転
I : 産業利用促進日

12月	PF	PF-AR	1月	PF	PF-AR	2月	PF	PF-AR	3月	PF	PF-AR
1(火)		E (6.5GeV)	1(金)			1(月)			1(月)	E	E (5GeV)
2(水)		B (6.5GeV)	2(土)			2(火)			2(火)		
3(木)		M	3(日)			3(水)			3(水)	B	B (5GeV)
4(金)	HB		4(月)			4(木)			4(木)	M	
5(土)			5(火)			5(金)			5(金)		
6(日)		E (6.5GeV)	6(水)			6(土)			6(土)		E (5GeV)
7(月)			7(木)			7(日)			7(日)	E	
8(火)			8(金)			8(月)			8(月)		
9(水)	MA	B (6.5GeV)	9(土)			9(火)			9(火)		
10(木)	M		10(日)			10(水)			10(水)	B	M
11(金)			11(月)			11(木)			11(木)	M	
12(土)			12(火)			12(金)			12(金)		
13(日)	E	E (6.5GeV)	13(水)			13(土)			13(土)	E	E (6.5GeV)
14(月)			14(木)			14(日)			14(日)		
15(火)			15(金)	STOP	STOP	15(月)			15(月)	M	
16(水)	B	B (6.5GeV)	16(土)			16(火)	T/M		16(火)		
17(木)			17(日)			17(水)			17(水)		B (6.5GeV)
18(金)	E(I)	E (6.5GeV)	18(月)			18(木)			18(木)		
19(土)			19(火)			19(金)		T/M	19(金)	HB	
20(日)			20(水)			20(土)	E		20(土)		E (6.5GeV)
21(月)	B(I)	B (6.5GeV)	21(木)			21(日)			21(日)		
22(火)			22(金)			22(月)		E (5GeV)	22(月)		
23(水)			23(土)			23(火)			23(火)		
24(木)			24(日)			24(水)	B	B (5GeV)	24(水)	MA	B (6.5GeV)
25(金)			25(月)			25(木)			25(木)		M
26(土)			26(火)			26(金)			26(金)		
27(日)	STOP	STOP	27(水)			27(土)	E	E (5GeV)	27(土)		
28(月)			28(木)			28(日)			28(日)	HB	E (6.5GeV)
29(火)			29(金)						29(月)		
30(水)			30(土)						30(火)		
31(木)			31(日)						31(水)		

~4/1(木)9時で終了

スケジュールは変更されることがありますので、最新情報はPFホームページ(<https://www2.kek.jp/imss/pf/>)の「PFの運転状況／長期スケジュール」(<https://www2.kek.jp/imss/pf/apparatus/schedule/>)をご覧ください。

放射光共同利用実験審査委員会速報

放射光実験施設運営部門 君島堅一
兵藤一行

2020年10月1日(木)に、放射光共同利用実験審査委員会(PF-PAC)全体会議が、オンライン会議形式で開催されました。放射光実験施設報告やPF-PAC制度の改正など実験施設運営に関する重要事項の報告・議論・審議がなされました。今回は、2020年度第2回目の全体会議になります。

報告事項

- 放射光実験施設報告(船守実験施設長)

今年度の運転日程、遠隔・自動測定機能の強化に関する二次補正予算交付、KEKロードマップ2021の中間まとめの概要、ビームライン再整備検討WGの設置等について説明がありました。

審議事項

以下の事項について審議されました。

1. PF-PAC分科再編について

2021年度から(課題募集としては2021年度後期から)PF-PACの分科を、ビームライン編成に準拠した編成とする改正案が提案されました。5分科から6分科に変更した新分科会の編成案について説明がありました。再編の効果について、分科不一致の解消や複数分科の評点の混在の解消、分野横断的な審査が可能になること、また、本案はこれまでPF-PACやPF内でも議論を経てきたという経緯について補足の説明がありました。審議の結果、2021年度から分科を再編することが了承されました。

2. PF課題の整備について

現行の「所内優先課題」や「施設留保課題」を整理して、PFスタッフを対象とする「PF課題」を新たに整備することが提案されました。新たに整備する制度について、課題の区分、特徴および対象者について概要説明があり、これにより施設戦略の可視化、創出成果の最大化が見込まれるほか、共同利用実験課題以外へのビームタイム配分の根拠が明確になるなどの説明がありました。審議の結果、2021年度から新たな区分のPF課題を実施することが了承されました。細かい運用上の修正についてはPF側で検討後、実施することとされました。

3. マルチプローブ共同利用実験課題の新方式及び2021年度前期公募について

見直しを進めていたマルチプローブ共同利用実験課題の新方式案と2021年度前期公募案について、新設する2種類の課題(エキスパートタイプとスタンダードタイプ)の特徴や審査方針、エキスパートタイプの課題で実施する中間評価の方針等に関する説明がありました。審議の結果、マルチプローブ共同利用実験の新方式案及び2021年度前期公募(エキスパートタイプ課題)を開始することについて了承されました。

その他

- 従来からPF-PACで議論されていたことも含めて、委員会の制度・運用や、実験参加者の資格などの項目について意見交換がなされました。
- 次回PF-PAC全体会議は来年1月の開催を予定しています。

第123回物質構造科学研究所運営会議議事次第

日時:2020年9月16日(水) 13:30~

開催方法:管理棟大会議室およびウェブ会議

議事

【1】第121回~第122回議事要録について

【2】審議

- (1) 次期所長候補者について
- (2) 学術研究フェローの雇用計画について
(特定人事・特任助教1名・住友ゴム工業(株)とのクロスアポイントメント)

第124回物質構造科学研究所運営会議議事次第

日時:2020年9月30日(水) 13:30~

開催方法:管理棟大会議室およびウェブ会議

議事

【1】第123回議事要録について

【2】審議

- (1) 次期所長候補者について
- (2) 教員人事(特定人事 中性子 特任助教1名・住友ゴム工業(株)とのクロスアポイントメント)
- (3) 特定人事(中性子 特別准教授1名)
- (4) 特定人事(中性子 特別助教1名)
- (5) 特定有期雇用職員の雇用計画について(特定人事 中

性子 特別教授)

- (6) 教員の雇用計画について (特定人事 ミュオン 助教 1 名)
- (7) 2020 年度後期ミュオン共同利用 S 型実験課題審査結果について
- (8) 教員公募 (量子ビーム連携研究センター准教授 1 名)
- 【3】 所長報告
- 【4】 報告
 - (1) 人事異動
 - (2) 2020 年度後期放射光共同利用実験課題審査結果について (条件解除))
 - (3) マルチプローブ共同利用実験の新体制及び 2021 年度前期公募について
 - (4) 協定等の締結について (国内機関関係)
 - (5) 協定等の締結について (外国機関関係)
- 【5】 研究活動報告 (資料配布のみ)
 - (1) 物質構造科学研究所報告
 - (2) 素粒子原子核研究所報告
 - (3) 加速器研究施設報告
 - (4) 共通基盤研究施設報告

「PF ニュース」からのお知らせ

平成 24 年度からの PF-UA の発足に伴い、PF ニュースはウェブが主体となりましたが、引き続きご愛読を賜り感謝致します。今後も新しい企画記事の連載など誌面の充実につとめ、PF ニュースをより魅力あるものにしていきます。PF ニュースウェブページには、冊子版では白黒となっている図等もオリジナルのカラーのものを掲載しています。ウェブ版もお楽しみ頂ければと思います。

ウェブ掲載時にはメールでお知らせするシステムも運用しています。希望される方は、どうぞ登録下さい。PF ニュースウェブページにフォームを掲載しています（※ KEK の共同利用者支援システムでユーザー登録をされた皆様には、PF メルマガが配信され、そちらにも PF News 発行のお知らせが載りますので、その方はお知らせメールの登録は必要ありません）。

PF ニュース編集委員一同

投稿のお願い

【最近の研究から】

PF で行われた実験、研究の成果をお寄せ下さい。

【建設・改造ビームラインを使って】

特にビームラインの改良点、他のビームラインとの比較、要望等を是非お聞かせ下さい。

【ユーザーとスタッフの広場】

PF での実験の成果等が認められ受賞された方、海外放射光施設に滞在、訪問された方、国際会議等に参加された方、修士論文等、どうぞ投稿下さい。また PF に対するご意見等がありましたら是非ご投書下さい。

詳細は事務局または PF ニュース HP をご覧下さい。

宛 先

〒 305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1
高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所 放射光実験施設内
PF ニュース編集委員会事務局
TEL : 029-864-5196 FAX : 029-864-3202
E-mail : pf-news@pfqst.kek.jp
URL : <http://pfwww.kek.jp/publications/pfnews/>

編集後記

世の中の仕組みや常識がこんなに簡単にひっくり返るものなのだというのを痛切に感じて半年ほどが過ぎました。オフィスへの出勤も出張も全く許されなかった頃から比べると多少緩和されましたが、私のような外部ユーザーにはまだまだ PF への出張も以前ほど自由ではありません。それでも悪いことばかりではなく、リモートワークに関するインフラやルールの整備が急ピッチで進み、社内会議も PF ニュース編集委員会もオンライン開催が当たり前になり、移動時間や距離が仕事やコミュニケーションの制限には必ずしも当たらなくなりました。本号の編集委員会でも PF でのリモート実験が話題に上がり、今後本格的に運用が進むことを期待しています。

他方で、やはり実験・研究に関しては現場で手を動かさないと学べないものもありますし、対面して唾のかかる距離での議論で理解が深まることもあるはずですが。新型コロナという意外な外圧により、社会がテクノロジーに追いついた面もありますが、テクノロジーは最大限に活用しつつ、必要な外出や対面コミュニケーションは自由にできる、そんな当たり前の世界が早く戻ってくることを祈っています。(A.N.)

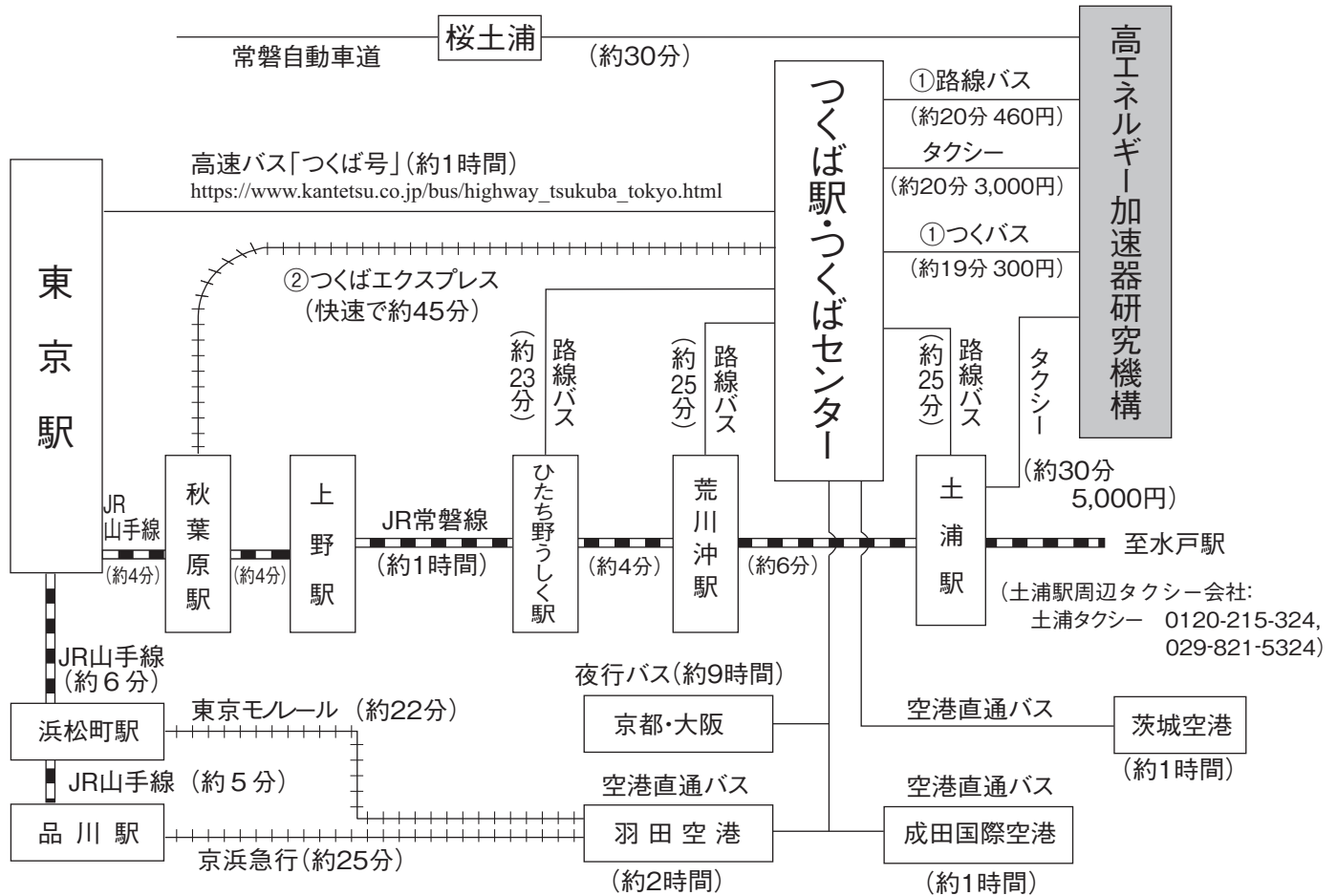
* 2020 年度 PF ニュース編集委員 *

委員長	加藤 龍一	物質構造科学研究所			
副委員長	和田 敬広	東京医科歯科大学大学院医歯学総合研究科			
委員	荒川 孝俊	東京大学大学院農学生命科学研究科			
	宇佐美徳子	物質構造科学研究所	門林 宏和	物質・材料研究機構	
	北村 未歩	物質構造科学研究所	古賀 舞都	産業技術総合研究所	
	芝田 悟朗	東京理科大学理学部	清水 伸隆	物質構造科学研究所	
	杉山 弘	物質構造科学研究所	高木 宏之	加速器研究施設	
	武市 泰男	物質構造科学研究所	南部 英	(株) 日立製作所基礎研究センター	
	引田 理英	物質構造科学研究所	山崎 信哉	筑波大学数理物質系	
	和田 健	物質構造科学研究所			
事務局	高橋 良美	物質構造科学研究所			

新型コロナウイルスの影響により、運休、運転時刻や営業時間の変更があるので、必ず直前に確認して下さい。

巻末情報

KEK アクセスマップ・バス時刻表



(KEK周辺タクシー会社：大曾根タクシー 0120-000-302, 029-864-0301)

つくば～空港直通バス：
<https://www.bus-ibaraki.jp/hwbus/highway.html>

①つくばセンター ↔ KEK (2019年10月1日改定)

関東鉄道バス 所要時間 約20分 運賃 460円 (KEK～土浦駅間の料金は800円) つくばセンター乗り場5番

18系統：土浦駅東口～つくばセンター～KEK～つくばテクノパーク大穂 C8系統：つくばセンター～KEK～つくばテクノパーク大穂
71系統：つくばセンター～(西大通り)～KEK～下妻駅 (筑波大学は経由しません)

つくバス 所要時間 約20分 運賃 300円 つくばセンター乗り場3番
HB/HA (北部シャトル)：つくばセンター～KEK～筑波山口 (筑波大学には停まりません)

下り (×は土曜・休日運休、○は土曜・休日運転)

系統	つくばセンター	KEK	系統	つくばセンター	KEK	系統	つくばセンター	KEK	系統	つくばセンター	KEK
HB	7:05	7:25	C8A	×10:00	×10:15	HB	15:20	15:40	HB	19:30	19:50
C8	×7:20	×7:35	HB	10:20	10:40	HB	15:50	16:10	HB	20:10	20:30
HB	7:25	7:45	HB	10:50	11:10	C8	×16:25	×16:40	HB	20:30	20:50
C8	×7:50	×8:05	C8	10:55	11:10	HB	16:30	16:50	HB	21:20	21:40
HB	7:50	8:10	71	11:00	11:21	71	×16:35	16:56	HB	21:50	22:10
18	○8:10	○8:32	HB	11:50	12:10	C8	17:00	17:15	HB	22:30	22:50
18	×8:12	×8:34	HB	12:20	12:40	HB	17:10	17:30			
HB	8:20	8:40	HB	12:50	13:10	HB	17:50	18:10			
71	8:50	9:11	C8	○13:20	○13:35	71	17:50	18:11			
71	×9:07	×9:28	HB	13:20	13:40	C8	×17:55	×18:10			
HB	9:25	9:45	C8	×14:00	×14:15	HB	18:10	18:30			
C8	○9:35	○9:50	HB	14:10	14:30	C8	×18:30	×18:45			
HB	9:45	10:05	HB	14:50	15:10	HB	18:55	19:15			
71	×9:55	×10:16	71	15:15	15:36	71	×19:10	19:31			

18系統の土浦駅東口～つくばセンターは20分間です。

上り (×は土曜・休日運休、○は土曜・休日運転)

系統	KEK	つくばセンター	系統	KEK	つくばセンター	系統	KEK	つくばセンター	系統	KEK	つくばセンター
HA	6:19	6:55	71	10:18	10:45	71	×15:28	×15:55	HA	19:44	20:20
71	×6:28	×6:55	C8	○10:25	○10:45	HA	15:44	16:20	HA	20:34	21:10
HA	6:39	7:15	C8	×10:55	×11:19	HA	16:24	17:00	HA	21:04	21:40
HA	7:04	7:35	HA	10:59	11:35	HA	16:54	17:30	HA	21:44	22:20
HA	7:04	7:40	HA	11:29	12:05	71	16:58	17:25			
71	○7:28	○7:55	C8	11:50	12:10	C8	×17:20	×17:45			
71	×7:28	×8:00	HA	11:59	12:35	HA	17:24	18:00			
HA	7:34	8:10	HA	12:24	13:00	C8	×17:50	×18:15			
HA	8:39	9:15	HA	13:24	14:00	18	○17:55	○18:15			
C8	×8:50	×9:14	HA	13:54	14:30	71	×17:58	×18:30			
HA	8:59	9:35	C8	○14:20	○14:40	HA	18:09	18:45			
C8	○9:05	○9:25	HA	14:24	15:00	HA	18:44	19:20			
C8	×9:25	×9:49	71	14:28	14:55	C8	×18:45	×19:15			
HA	9:24	10:00	C8	×14:50	×15:10	HA	19:24	20:00			
HA	10:04	10:40	HA	14:54	15:30	18	×19:30	×19:50			

18系統のつくばセンター→土浦駅東口は22分間です。

②つくばエクスプレス

(2020年3月14日改定)

所要時間 つくば駅-秋葉原駅(快速)約45分 [1,210円]

普通回数券(11枚綴り), 昼間回数券(12枚綴り), 土・休日回数券(14枚綴り)あり

詳細はホームページ <http://www.mir.co.jp/> をご参照下さい。

平日・下り					
秋葉原発	つくば着	秋葉原発	つくば着	秋葉原発	つくば着
* 5:08	6:06	9:13	10:06	19:19	20:14
* 5:30	6:28	○9:29	10:14	△19:30	20:21
○5:50	6:36	9:43	10:36	19:40	20:36
6:05	6:58	○10:00	10:45	19:49	20:44
6:16	7:09	10:13	11:06	△20:00	20:51
○6:27	7:12	○10:30	11:15	20:10	21:06
* 6:29	7:27	10:43	11:36	20:19	21:15
6:40	7:34	(10時~16時まで同じ)		△20:30	21:20
6:50	7:45	○17:00	17:45	20:40	21:35
7:00	7:54	17:10	18:04	20:49	21:45
7:06	8:02	17:19	18:13	○21:00	21:47
7:16	8:12	△17:30	18:21	21:16	22:11
7:24	8:22	17:40	18:36	21:29	22:24
7:36	8:31	17:49	18:45	21:41	22:36
7:43	8:40	△18:00	18:51	○22:00	22:46
7:56	8:51	18:10	19:06	22:16	23:11
8:01	8:58	18:19	19:14	22:30	23:25
8:13	9:09	△18:30	19:21	22:45	23:40
8:23	9:21	18:40	19:36	○23:00	23:46
8:36	9:31	18:49	19:44	23:16	0:10
○8:47	9:34	△19:00	19:51	23:30	0:23
9:01	9:56	19:10	20:06	* 23:45	0:43

平日・上り							
つくば発	秋葉原着	つくば発	秋葉原着	つくば発	秋葉原着	つくば発	秋葉原着
5:06	5:59	8:46	9:39	18:10	19:04	22:29	23:22
○5:26	6:11	8:58	9:51	○18:28	19:13	* 22:42	23:40
5:32	6:25	○9:22	10:07	18:32	19:26	22:58	23:51
5:50	6:45	9:28	10:23	18:41	19:34	* 23:14	0:12
6:02	6:55	* 9:41	10:40	○19:00	19:45		
6:12	7:05	9:51	10:44	19:02	19:55		
6:23	7:20	○10:11	10:56	19:11	20:04		
6:33	7:32	10:20	11:13	○19:30	20:15		
6:40	7:41	○10:41	11:26	19:32	20:25		
6:52	7:51	10:50	11:43	19:41	20:35		
7:01	7:58	(10時~15時まで同じ)		○20:01	20:46		
7:09	8:08	○16:11	16:56	20:03	20:56		
7:18	8:15	16:20	17:13	○20:30	21:15		
7:27	8:25	16:31	17:26	20:38	21:31		
7:36	8:34	16:41	17:35	20:50	21:43		
7:45	8:44	16:50	17:43	○21:09	21:54		
7:52	8:49	17:02	17:55	21:12	22:06		
7:59	8:57	17:11	18:04	21:25	22:19		
* 8:07	9:09	17:20	18:13	21:40	22:33		
8:17	9:12	○17:42	18:27	21:52	22:45		
8:27	9:20	17:50	18:43	22:02	22:55		
8:36	9:31	18:02	18:56	22:17	23:10		

土曜/休日・下り					
秋葉原発	つくば着	秋葉原発	つくば着	秋葉原発	つくば着
* 5:08	6:06	8:45	9:38	○23:00	23:45
* 5:30	6:28	○9:00	9:45	23:15	0:08
○5:50	6:35	9:13	10:06	23:30	0:23
6:04	6:57	○9:30	10:15	* 23:45	0:43
6:16	7:09	9:43	10:36		
○6:30	7:15	○10:00	10:45		
6:45	7:38	10:13	11:06		
○7:00	7:45	○10:30	11:15		
7:15	8:08	10:43	11:36		
○7:30	8:15	(10時~21時まで同じ)			
7:45	8:38	○22:00	22:45		
○8:00	8:45	22:15	23:08		
8:15	9:08	22:30	23:23		
○8:30	9:15	22:45	23:38		

土曜/休日・上り							
つくば発	秋葉原着	つくば発	秋葉原着	つくば発	秋葉原着	つくば発	秋葉原着
5:06	5:59	7:28	8:21	○10:11	10:56	21:46	22:39
○5:26	6:11	○7:45	8:30	10:20	11:13	○22:10	22:55
5:32	6:25	7:50	8:43	○10:41	11:26	22:15	23:09
5:51	6:44	8:04	8:57	10:50	11:43	22:30	23:24
6:02	6:56	○8:25	9:10	○11:11	11:56	* 22:41	23:39
6:13	7:07	8:32	9:25	11:20	12:13	22:58	23:52
6:25	7:18	8:47	9:40	○11:41	12:26	* 23:14	0:12
6:38	7:32	○9:11	9:56	11:50	12:43		
○6:57	7:42	9:18	10:11	(11時~20時まで同じ)			
7:02	7:56	○9:41	10:26	○21:11	21:56		
○7:24	8:09	9:50	10:43	21:20	22:13		

○: 快速

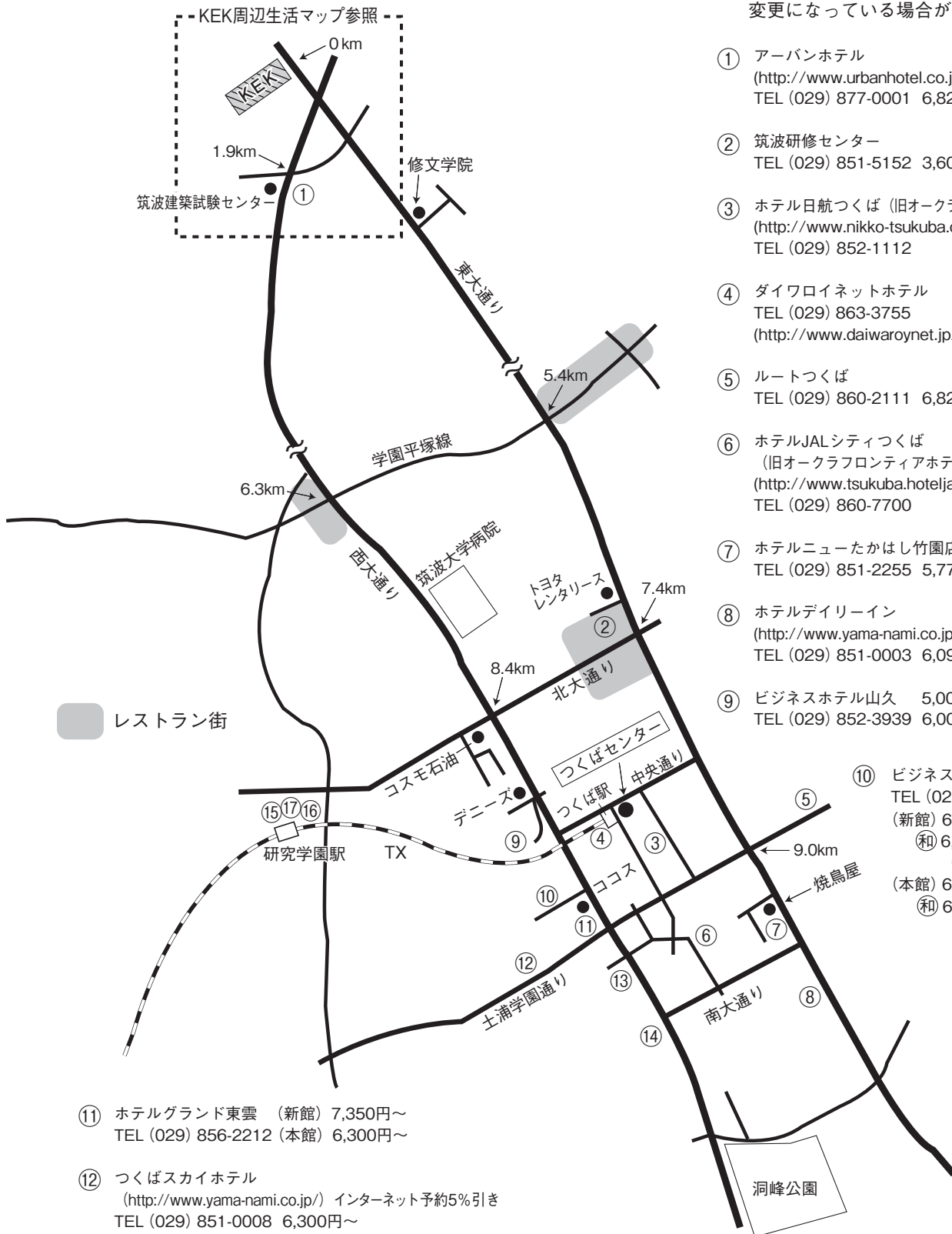
△: 通勤快速(研究学園駅にも停まります。)

無印: 区間快速 * : 普通

つくば市内宿泊施設

※料金は参考値です。

※新型コロナウイルスの影響により、情報が変更になっている場合があります。



- ① アーバンホテル
(<http://www.urbanhotel.co.jp/uhotel.html>)
TEL (029) 877-0001 6,825円～
- ② 筑波研修センター
TEL (029) 851-5152 3,600円～
- ③ ホテル日航つくば (旧オークラフロンティアホテルつくば)
(<http://www.nikko-tsukuba.com>)
TEL (029) 852-1112
- ④ ダイワロイネットホテル
TEL (029) 863-3755
(<http://www.daiwaroynet.jp/tsukuba/>)
- ⑤ ルートつくば
TEL (029) 860-2111 6,825円～ (朝食付)
- ⑥ ホテルJALシティつくば
(旧オークラフロンティアホテルつくばエポカル)
(<http://www.tsukuba.hoteljalcity.com>)
TEL (029) 860-7700
- ⑦ ホテルニューたかはし竹園店
TEL (029) 851-2255 5,775円～
- ⑧ ホテルデイリーイン
(<http://www.yama-nami.co.jp/>)インターネット予約5%引き
TEL (029) 851-0003 6,090円
- ⑨ ビジネスホテル山久 5,000円～(2食付・1室2人)
TEL (029) 852-3939 6,000円～(2食付・1室1人)

- ⑩ ビジネスホテル松島
TEL (029) 856-1191
(新館) 6,500円～
(和) 6,800円 (3人～)
(風呂・2食付)
(本館) 6,000円～
(和) 6,300円(3人～)(2食付)
- ⑪ ホテルグランド東雲 (新館) 7,350円～
TEL (029) 856-2212 (本館) 6,300円～
- ⑫ つくばスカイホテル
(<http://www.yama-nami.co.jp/>) インターネット予約5%引き
TEL (029) 851-0008 6,300円～
- ⑬ ホテルつくばヒルズ学園西大通り店 (旧学園桜井ホテル)
(<https://breezabay-group.com/tsukuba-hills/>)
TEL (029) 851-3011 6,878円～
- ⑭ ビジネス旅館二の宮
TEL (029) 852-5811 5,000円～
(二人部屋のみ 2食付)

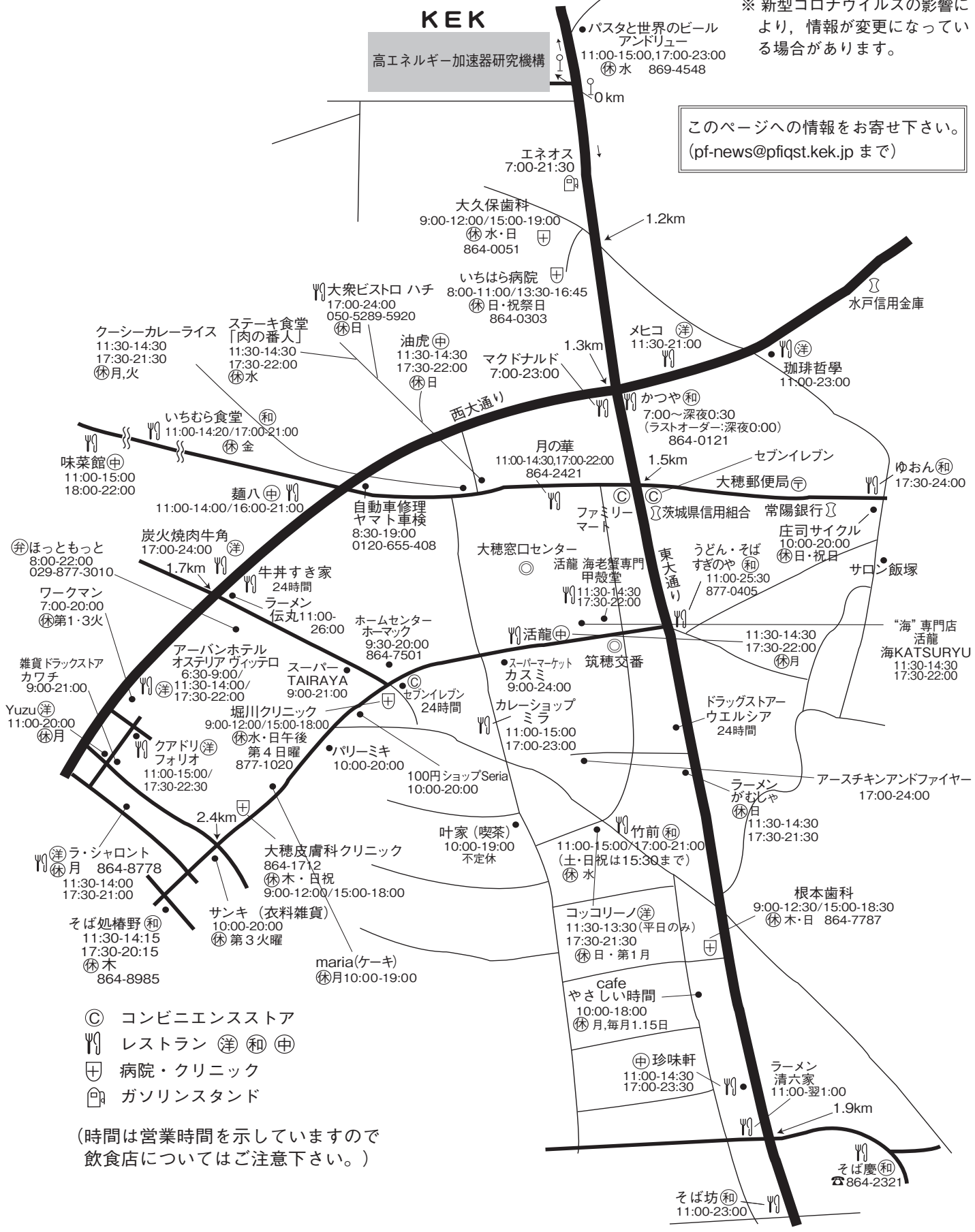
- ⑮ ホテルベストランド
(<http://www.hotel-bestland.co.jp>)
TEL (029) 863-1515
- ⑯ 東横イン
(<http://www.toyoko-inn.com/hotel/00228/>)
TEL (029) 863-1045
- ⑰ ホテルマークワン
(<http://www.mark-1.jp/>)
TEL (029) 875-7272

KEK 周辺生活マップ

放射光実験施設研究棟，実験準備棟より正面入口までは約 800 m

※ 新型コロナウイルスの影響により、情報が変更になっている場合があります。

このページへの情報をお寄せ下さい。
(pf-news@pqjst.kek.jp まで)



- ◎ コンビニエンスストア
- ☎ レストラン (洋) (和) (中)
- ⊕ 病院・クリニック
- 🏠 ガソリンスタンド

(時間は営業時間を示していますので 飲食店についてはご注意ください。)

KEK周辺広域マップ



KEK内福利厚生施設

ユーザーの方は、これらの施設を原則として、機構の職員と同様に利用することができます。各施設の場所は裏表紙の「高エネルギー加速器研究機構平面図」をご参照下さい。

＜新型コロナウイルスの影響により、営業時間等が変更になる場合がありますので、ご注意下さい。＞

●共同利用研究者宿泊施設（ドミトリー）

（管理人室 TEL/FAX:029-864-5574 PHS:2920）

シングルバス・トイレ付き 2,200円

シングルバス・トイレなし 1,700円

- ドミトリーは夜の22時から朝の8時までは施錠されます。また、この時間帯は管理人が不在ですので、22時以降にドミトリーに到着される方はインフォメーションセンター（029-864-5572, PHS:3398）でドミトリーの部屋の鍵を受け取って下さい。
- 支払いはユーザーズオフィスにて、現金の他、クレジットカード、デビットカードが利用可能です。また宿泊が週末等になり、ユーザーズオフィスで支払えない場合は銀行振込または管理人による現金での領収（土、日、祝のみ）も可能です。

●図書室（研究本館1階 内線3029）

開室時間：月～金 9:00～17:00

閉室日：土、日、祝、年末年始、夏季一斉休業日
機構発行のIDカードがあれば開室時間以外でも入館可能。詳しくは下記URLをご覧ください。

<https://www2.kek.jp/library/riyou/>

●健康相談室（医務室）（内線 5600）

勤務時間中に発生した傷病に対して、応急処置を行うことができます。健康相談も行っていますので、希望者は事前に申し込んでください。

場 所 先端計測実験棟

開室時間 8:30～17:00（月曜日～金曜日）

●食 堂（内線 2986）

営 業 月～金 ただし祝日及び年末年始は休業

昼食 11:30～13:30 夕食 17:30～19:00

●喫茶室 Suzu Cafe（スズカフェ）（内線 3910）

10月19日（月）の夕食から12月21日（月）までの間、下記のとおり営業時間となります。

【平日】

朝食 8:00～9:30まで（完全予約制）

昼食 11:30～15:00まで

夕食 18:00～21:00まで（ラストオーダー20:30）

【土・日・祝日】

朝食 8:00～9:30まで（完全予約制）

昼食 11:30～15:00まで

夕食 17:00～20:00まで（ラストオーダー19:30）

営業時間等は変更となる場合もあります。

詳細はホームページをご覧ください。

<https://www2.kek.jp/imss/notice/2020/10/37pf.html>

●売 店（ニューヤマザキデイリーストア）（内線 2989）

弁当、パン、食料品、軽食、菓子類、日用品、タバコ、お酒、雑誌、切手等、KEKオリジナルグッズの販売等。

11月7日（土）から12月20日（日）までの間、下記のとおり営業時間となります。

月～金 8:00～19:00

土 10:00～15:00

日・祝 休業日

●宅配便（宅配荷物室はPF研究棟1階）

★荷物は基本的に置配となります（冷蔵便・冷凍便含む）。

★shipping@pfiqst.kek.jp宛のご連絡は不要となりました。

★荷物の発送はご自身でお願いいたします。

宅配荷物室に設置したファイルで、業者への発送依頼方法を必ずご確認ください。

★伝票の記載方法

〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1

高エネルギー加速器研究機構 放射光実験施設

【PFで荷物を受け取る場合】PF宅配荷物室

BL-〇〇（ステーション名）+受取人名

【PF-ARで荷物を受け取る場合】PF-AR共同

研究棟 N〇〇〇（ステーション名）+受取人名

※電話番号は、受取人の携帯電話番号等を記入してください。

PF事務室の電話番号は記入しないようにお願いします。

●自転車貸出方法（受付〔監視員室〕内線3800）

・貸出は実験ホール入口の監視員室で行う。

・貸出は一往復とし、最長でも半日とする。

・使用後は所定の自転車スタンドへ戻し、鍵は監視員室へ速やかに戻す。

（PF-ARでも自転車を10台用意していますので利用したい方はビームライン担当者または運転当番〔PHS 4209〕に連絡して下さい。）

ユーザーズオフィスでも自転車の貸出を行っています（約50台）。

●郵便ポスト（計算機棟正面玄関前）

収集時間：10:30（平日・土曜）、10:00（休日）

●ユーザーズオフィスについては、<https://www2.kek.jp/usersoffice/>をご覧ください。

Tel : 029-879-6135, 6136 Fax : 029-879-6137

Email : usersoffice@mail.kek.jp

ビームライン担当一覧表 (2020. 11. 1)

ビームライン	光源	BL担当者
ステーション	形態 ステーション/実験装置名 (●共同利用, ○建設/立ち上げ中, ◇所外, ☆教育用BL, ★UG運営ST)	担当者 担当者 (所外)
BL-1	U	松垣
BL-1A	● タンパク質結晶構造解析ステーション	松垣
BL-2	U	堀場
BL-2A/B	● MUSASHI: 表面・界面光電子分光, 広エネルギー帯域軟X線分光	堀場
BL-3	U (A) / B M (B, C)	中尾
BL-3A	● 極限条件下精密単結晶X線回折ステーション	中尾
BL-3B	●★ VUV 24m球面回折格子分光器 (SGM)	間瀬 枝元 (立教大) 吉信 (東大)
BL-3C	● X線光学素子評価/白色磁気回折ステーション	平野
BL-4	B M	中尾
BL-4A	●★ 蛍光X線分析/マイクロビーム分析	丹羽 宇尾 (東京医科歯科大)
BL-4B2	●★ 多連装粉末X線回折装置	中尾 植草 (東工大)
BL-4C	● 精密単結晶X線回折ステーション	中尾
BL-5	M P W	松垣
BL-5A	● タンパク質結晶構造解析ステーション	松垣
BL-6	B M	五十嵐
BL-6A	● X線小角散乱ステーション	五十嵐
BL-6C	●★ X線回折/散乱実験ステーション	中尾 八方 (広島市大)
BL-7	B M	雨宮 (岡林: 東大)
BL-7A	◇● 軟X線分光 (XAFS, XPS) ステーション (東大・スペクトル)	雨宮 岡林 (東大)
BL-7C	● 汎用X線ステーション	杉山
BL-8	B M	佐賀山
BL-8A	● 多目的極限条件下ワンセンベルグカメラ	佐賀山
BL-8B	● 多目的極限条件下ワンセンベルグカメラ	佐賀山
BL-9	B M	阿部
BL-9A	● XAFS (高強度) 実験ステーション	阿部
BL-9C	● XAFS (その場) 実験ステーション	阿部
BL-10	B M	清水
BL-10A	●★ 垂直型四軸X線回折装置	熊井 吉朝 (熊本大)
BL-10C	● X線小角散乱ステーション	清水
BL-11	B M	北島
BL-11A	● 軟X線斜入射回折格子分光ステーション	北島
BL-11B	● 軟X線2結晶分光ステーション	北島
BL-11D	● 軟X線光学素子評価装置用ステーション	間瀬
BL-12	B M	仁谷
BL-12C	● XAFS (ハイスループット) 実験ステーション	仁谷
BL-13	U	間瀬
BL-13A/B	● 表面化学研究用真空紫外軟X線分光ステーション	間瀬
BL-14	V W	岸本
BL-14A	● 単結晶構造解析・検出器開発ステーション	岸本
BL-14B	● 精密X線光学実験ステーション	平野
BL-14C	● X線イメージングおよび汎用X線実験ステーション	平野
BL-15	U	五十嵐
BL-15A1	● XAFS (セミマイクロビーム) 実験ステーション	武市
BL-15A2	● 高輝度X線小角散乱実験ステーション	高木 (秀)
BL-16	U	雨宮
BL-16A	● 可変偏光軟X線分光ステーション	雨宮

BL-17		U	山田
BL-17A	●	タンパク質結晶構造解析ステーション	山田
BL-18		B M	熊井
BL-18B(インド・DST)	◇●	Multipurpose Monochromatic Hard X-ray Station	熊井 MANNNA, Gouranga (SINP)
BL-18C	●★	超高压下粉末X線回折計	船守 鍵 (東大)
BL-19		U	小野
BL-19A/B	●	軟X線顕微鏡/分光実験ステーション	武市
BL-20		B M	足立 (純)
BL-20A	☆●	3 m直入射型分光器	足立 (純) 北島 (東工大)
BL-20B	●	白色・単色 X線トポグラフィ/X線回折実験ステーション	杉山
BL-27		B M	宇佐美
BL-27A	●★	放射性試料用軟X線実験ステーション	宇佐美 横谷 (量研機構)
BL-27B	●★	放射性試料用X線実験ステーション	宇佐美 岡本 (原研機構)
BL-28		H U	堀場
BL-28A/B	●	可変偏光 VUV・SX 不等間隔平面回折格子分光器 高分解能角度分解光電子分光実験ステーション	堀場
PF-AR			
AR-NE1		E M P W	船守
AR-NE1A	●	レーザー加熱超高压実験ステーション	船守
AR-NE3		U	山田
AR-NE3A	●	タンパク質結晶構造解析ステーション	山田
AR-NE5		B M	船守
AR-NE5C	●	高温高压実験ステーション /MAX80	船守
AR-NE7		B M	平野
AR-NE7A	●	X線イメージングおよび高温高压実験ステーション	平野
AR-NW2		U	丹羽
AR-NW2A	●	時間分解 DXAFS / X線回折実験ステーション	丹羽
AR-NW10		B M	仁谷
AR-NW10A	●	XAFS (高エネルギー) 実験ステーション	仁谷
AR-NW12		U	引田
AR-NW12A	●	タンパク質結晶構造解析ステーション	引田
AR-NW14		U	野澤
AR-NW14A	●	ピコ秒時間分解 X線回折・散乱・分光	野澤
低速陽電子			和田
SPF-A3	●	全反射高速陽電子回折 (TRHEPD) ステーション	和田
SPF-A4	○	低速陽電子回折 (LEPD) ステーション	和田
SPF-B1	●	汎用低速陽電子実験ステーション	和田
SPF-B2	●	ポジトロニウム飛行時間測定ステーション	和田

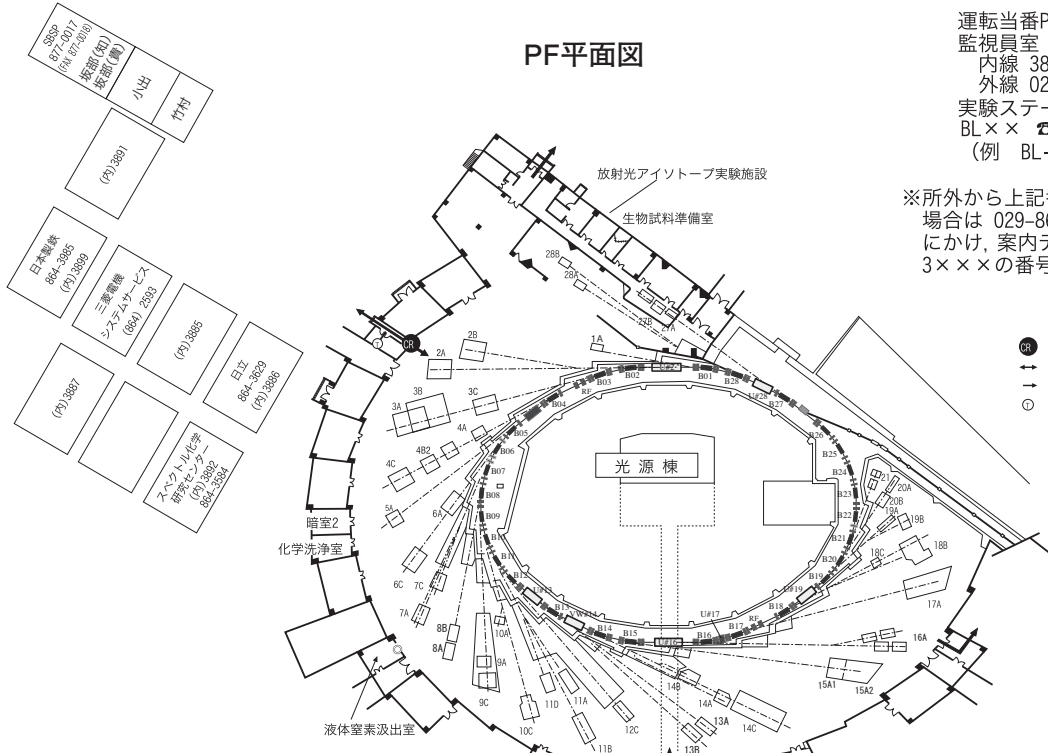
【UG 運営装置】 AR-NE7A 高温高压実験装置 (MAX-III) 久保友明 (九州大)

【所外ビームライン】 BL-7A 東大 RCS 岡林 潤 (東大) jun@chem.s.u-tokyo.ac.jp
BL-18B インド JNCASR SAHA, Pinku 029-879-6237 [2628] pinkusaha1990@gmail.com

運転当番PHS 4209
 監視員室
 内線 3800
 外線 029-864-5778
 実験ステーション
 BL×× ☎38××
 (例 BL-6 ☎3806)

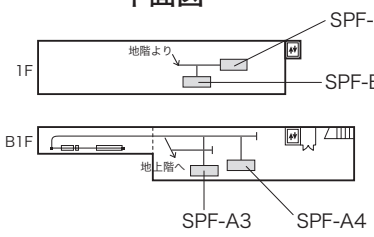
※所外から上記番号にアクセスする
 場合は 029-864-5200 (代表番号)
 にかき、案内テープの後に4×××、
 3×××の番号を押して下さい。

PF平面図



- IDカードリーダー
- 出入口
- 非常口
- 便所

低速陽電子実験施設 平面図

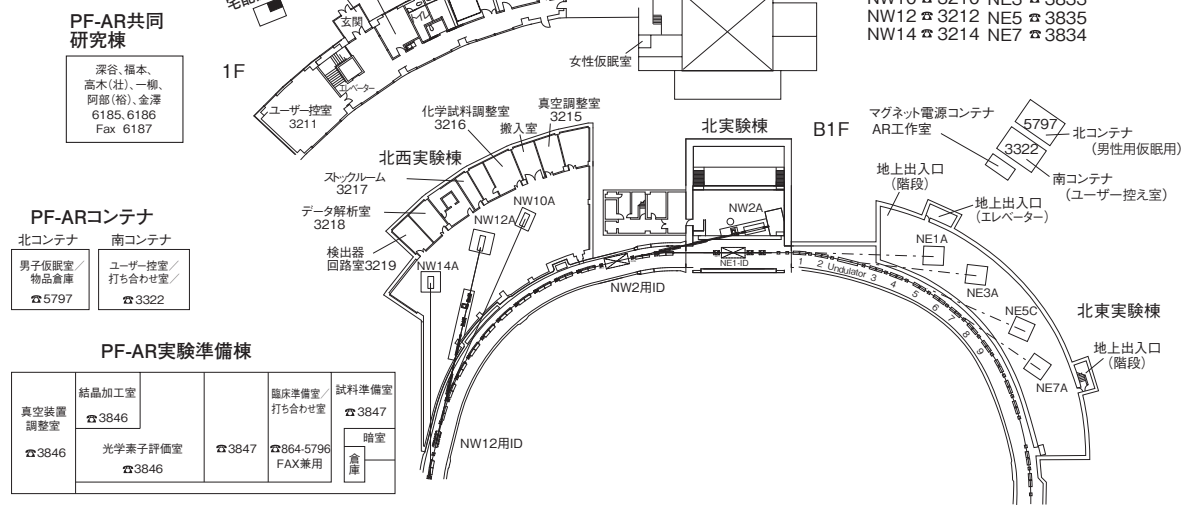


電源棟	
☎3881	原田(健) 山口(孝)
☎3880	東 佐々木(洋) 尾崎
☎5630	

実験準備室			
実験準備室7 ☎5709	実験準備室5 ☎3874 図面室 ☎5708	実験準備室3 仮眠室 (男子) ☎3873 実験準備室4 ☎5650	実験準備室1 談話室 2 ☎3858 実験準備室2 日本アクセス ☎3872

0 25M

PF-AR平面図



PF-AR共同研究棟
 深谷、福本、高木(社)、一柳、阿部(裕)、金澤
 6185, 6186
 Fax 6187

PF-ARコンテナ
 北コンテナ
 男子仮眠室/物品倉庫
 ☎5797
 南コンテナ
 ユーザー控室/打ち合わせ室
 ☎3322

PF-AR実験準備棟			
真空装置調整室 ☎3846	結晶加工室 ☎3846	臨床準備室/打ち合わせ室 ☎3847 ☎864-5796 FAX兼用	試料準備室 ☎3847 暗室 倉庫

NW 2 ☎3324 NE1 ☎3831
 NW10 ☎3210 NE3 ☎3833
 NW12 ☎3212 NE5 ☎3835
 NW14 ☎3214 NE7 ☎3834

高エネルギー加速器研究機構平面図



— 歩行者・自転車用ルート

● 緊急時避難場所 Emergency Assembly Area

非常の際は、運転当番 4209 インフォメーションセンター 3399

発行 PHOTON FACTORY NEWS 編集委員会(TEL:029-864-5196)

〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光実験施設 (<https://www2.kek.jp/imss/pf/>)

Vol.38 No.3 2020 TEL:029-864-1171 (機構代表)

