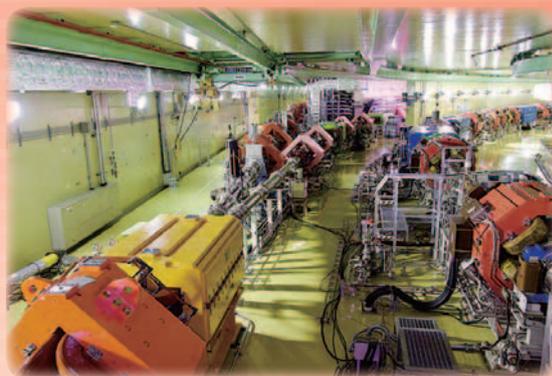




FOUNDATION FOR HIGH ENERGY
ACCELERATOR
SCIENCE

FAS だより

2022.8 第 24号



公益財団法人
高エネルギー加速器科学研究奨励会

■ 広報誌「FAS だより」第 24 号の発行に当って ■

- 賛助会員の皆様にはますますご清栄のこととお喜び申し上げます。
日頃より、当財団に対する格別のご協力をいただき、心より厚く御礼申し上げます。
- 広報誌「FAS だより」も公益財団法人に移行してから第 24 号を発行することになりました。
- 2021 年度助成では、国際交流等助成およびインターンシップ等への助成を実施、研究者等に対する顕彰事業では 5 件の研究業績に対し奨励賞を授与することができました。
- 奨励会では、賛助会員の皆様からの「FAS だより」に投稿したい高エネルギー加速器に関する記事等を募集しております。是非ご投稿ください。お待ちしております。
- 当財団では、ホームページや「FAS だより」などで加速器科学に関する知識の普及啓発活動を行っておりますが、是非ご覧いただき、より良いものにするために皆様のご意見をお寄せください。
- 賛助会員のバナー広告掲載について
当財団のホームページ上に賛助会員様のバナー広告を掲載しております。
掲載を希望される賛助会員様は、是非ご利用ください。(無料)

<連絡先 : info@heas.jp 又は TEL/FAX 029-879-0471>

公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会
事務局

FAS だより 第24号 目次

2022年8月

1. 国際交流助成報告	
1) X線1nm集光ビームのためのミリサイズ小型多層膜ミラーの検討及び作製 東京大学大学院工学系研究科 精密工学専攻 島村勇徳	1
2. 加速器インターンシップ報告	
1) 新潟大学理学部4年 五十嵐拓朗	29
2) 大阪大学工学部環境・エネルギー工学科4年 守實友梨	31
3) 東京理科大学理学部物理学科3年 須部実咲	35
3. 2021年度高エネルギー加速器科学研究奨励会奨励賞について	38
1) 西川賞1「KISS（元素選択型質量分離器：KEK Isotope Separation System）とMRTOF-MS （多重反射型飛行時間測定式質量分光器：Multi-Reflection Time of Flight Mass Spectrograph）の設計・建設・運転」 和田道治・宮武宇也	38
2) 西川賞2「ミュオニウム超微細構造精密測定におけるラビ振動分光の研究」 西村昇一郎・神田聡太郎・下村浩一郎・鳥居寛之・田中香津生	39
3) 小柴賞「原子核乾板の技術革新と素粒子・宇宙線実験等への応用」 中村光廣・中野敏行	40
4) 諏訪賞1「先進小型電子ライナックの開発と利用推進」 上坂 充	41
5) 諏訪賞2「物質と放射線との反応シミュレーションプログラム：Geant4の国際的な開発 運用」 Geant4日本グループ	42
4. 奨励賞授与式に関する科学新聞記事	44
5. 2022年度奨励賞候補者募集要項	45
6. 2022年度研究助成等応募要領	48
7. 高エネルギー加速器セミナー（OHO'22）開催	56
8. 2021年度事業報告および2021年度決算報告	57
9. 賛助会員一覧（2022年4月1日現在）	62

X線 1 nm 集光ビームのための ミリサイズ小型多層膜ミラーの 検討及び作製

東京大学 大学院工学系研究科
精密工学専攻 博士課程 3年

(公財) 高輝度光科学研究センター (JASRI)
ビームライン技術推進室 研究生

島村 勇徳^{たけのり}

1. 概要

X線は構造・元素・化学結合等の情報を非破壊で取得できる。これら分析の分解能を原子スケールにまで高めるための一手段として、X線を微小な点に集める集光素子が研究されてきた。本研究では新たに「ミリサイズ小型多層膜ミラー」を提案し、X線の極限集光を目指す。その実現のため、派遣先の European Synchrotron Radiation Facility で多層膜作製技術を習得すると共に、新設計の多層膜が提案する小型ミラーに作製可能か検討した。

未公開情報も含め、多層膜作製技術を習得することができた。一方、小型ミラーに新設計の多層膜を作製できる判断材料は多く得られたものの、自身の小型ミラーが複雑な設計をしているため、派遣先の装置では対応できなかった。その他には、当初予定していなかったものの、自身が日本で作製した小型ミラーを持ち込み、派遣先の手法で形状計測した。日本で得た結果との比較の上で本計測結果は有益であり、論文投稿も見据え、引き続き滞在先と議論する予定である。

現地で見えた開発中のツール等は将来の研究に役立つと感じた。今後は得られた知見を活かし、所属研究室の成膜装置を多層膜仕様に改造する予定である。より高品質な多層膜作製のために装置設計を見直し、改造後の装置を用いて多層膜作製を目指す。

2. 導入

大型放射光施設による高輝度・高指向性のX線を利用する上で、集光素子の開発が不可欠である。特に、X線を極限まで集光すると、X線解析手法の空間分解能が数 nm となる。集光素子の作製技術向上に伴い、Fig. 1 で示すように集光サイズは過去 40 年間で 100 μm から約 2 万倍縮小した。一方で、作製精度が課題となり、集光サイズは 5 nm 程度で頭打ちとなっている。そこで本研究は、新たな設計の反射型集光素子を開発することでこの課題を緩和し、30 keV の X 線を 1 nm に集光することを狙う。提案する小型ミラー [1] は、既にも実証実験を行い、2 keV の X 線を前例のない 25 nm に集光した [2]。反射面の構造を新設計の多層膜に改良することで、より高い光子エネルギーの X 線でもナノビームを実現する。

派遣先の ESRF (European Synchrotron Radiation Facility, 欧州大型放射光施設) は、放射光施設で用いる集光素子の多くを市販基板から自作しており、多層膜の製造部門 (Multilayer Laboratory, 以下 MLL) が設けられている。本部門は従来設計の多層膜ミラーを、世界随一の精度の高さで作製する技術を持つ [3]。この部門にて多層膜技術を習得すると共に、新設計の多層膜が提案する小型ミラーに作製可能か検討した。

受入先の MLL は ESRF の X-ray Optics Group (以下 XOG) の一部門であり [4]、Dr. Christian Morawe によって指揮されている。2022 年 1 月 6 日から 5 月 23 日までの約 5 ヶ月の滞在にあたり、Dr. Morawe には 3 点の目的を予め提示し

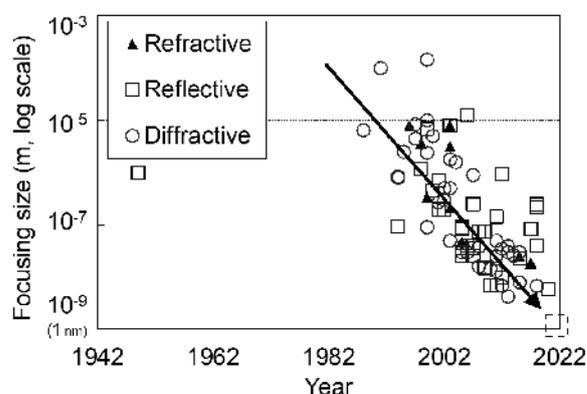


Fig. 1 過去 80 年で報告された集光サイズ

た。また、本目的以外でも、滞在中に研究面・生活面で得たものがあつた。本稿では、これら目的や得られた内容ごとに、次に示す構成で進捗・結果・個人的な洞察を述べる。特に、国際情勢変化に対する ESRF の対応は、国内研究所も把握しておくべき内容だと考える。

- ・多層膜作製レシピとその評価方法の習得 (目的 1)
- ・多層膜による集光理論の学習 (目的 2)
- ・ESRF での研究・就労環境体験 (目的 3)
- ・その他に得られたこと
 - ・計測ユニット訪問と小型ミラーの計測
 - ・国際学会への参加
 - ・感染症と国際情勢変化への反応
 - ・長期滞在での気づき
- ・今後の研究の方向性

3. 多層膜作製レシピとその評価方法の習得 (目的 1)

3.1. 背景と小目標

MLL では、放射光ユーザーの一般利用のために世界最高級の多層膜ミラーが既に作製されている。多層膜は重元素と軽元素の組合せで作られ、例えば白金と炭素、タングステンとボロンカーバイドのような組が実際に用いられる。これら材料の選定は、例えば光子エネルギーに基づき行われるが、一意に定まる訳ではなく、各国で独自に研究が進められている。また、成膜装置ごとに作製パラメータが変わるため、論文に

記載される情報のみで同じ環境・精度の再現は極めて困難である。

そこで、MLL で頻繁に用いられる元素の組合せについて現地で議論し、成膜装置の観察や実際の多層膜作製を通じて成膜レシピを学ぶ。また、Å レベルの厚み精度が求められる多層膜を成膜後にどのように評価するのか、現場で実際に観察する。さらに、これら評価内容をビームラインでの評価・集光性能にどのように紐づけるか、その計算方法について学ぶ。

3.2. 使用機器と作業状況

現地での装置校正作業や多層膜作製工程を、Dr. Morawe とその同僚らに快く紹介いただいた。Fig. 2 に多層膜作製装置である Large-scale multilayer coating system (LMCS) [5,6] を示す。LMCS は既に論文で多層膜作製内容が発表されており、滞在前から見学予定の装置である。一方、現在立ち上げ作業中で未発表の Compact multilayer coating system (CMCS) [7] の作業にも同行させていただいた。LMCS は従来の最大 1 m 程度の大型ミラーへの成膜を対象とするのに対し、CMCS は比較的小型な 10 cm 程度の基板を対象とした装置である。

CMCS は昨年 9 月頃の始動を予定していたが、長引く感染症の影響で部品供給が滞っていた。本滞在中に完成し、校正作業が開始されている。LMCS で高品質な多層膜作製プロセスを俯瞰することとし、CMCS ではその品質に至るまでの装置校正作業を主として学ぶこととなった。



Fig. 2 Multilayer Laboratory 所有の大型 X 線ミラー (~1.2 m) 用多層膜成膜装置

LMCS で行う作業ではビームラインに供給する完成品を作製する工程が多く、筆者自身は直接作業を行わず、見学した。一方で、装置較正の中でも重要度が低いものや、LMCS の立上げ作業は実際に同僚と共に現場で行った。具体的には、LMCS であればテスト試料の取付け・評価、CMCS であれば駆動ステージの安定性評価・真空排気性能の確認と条件出し・成膜源の交換や調整等である。

また、評価について、成膜された試料は目的に応じて可視光透過率測定器や Fig. 3 に示すような X 線反射率測定器 [8] で評価した。前者は、ガラス基板上に成膜を行い、成膜フラックスの位置分布を測定する。この位置分布と目標の成膜プロファイルを元に、ステージの駆動情報を算出する [9]。後者は、鏡として成膜された試料を対象に斜入射 X 線の反射率を測定する装置で、鏡の寸法・重量・必要な自由度を踏まえ特注されている。実際に基板上に成膜された試料は、この反射率を用いて成膜厚みを評価する。こうしたビームライン外での評価に加え、MLL は



Fig. 3 大型ミラー用 X 線反射率測定器

ESRF のビームライン BM05 が申請無しで使用できる。筆者の滞在中でも 2 回ビームタイムを経験し、成膜による形状変化や反射率低下の有無を確認した。

3.3. これまでの多層膜作製に関する検討

日本の X 線多層膜ミラーは伝統的に Pt/C [10] や PtC/C [11] の組合せが用いられるのに対し、ESRF では W/B₄C [12] ないし NiV/B₄C の組合せが使用される。ESRF では Pt/C の使用経験が無く、単純な比較は困難だが、W/B₄C や NiV/B₄C に関しては作製経験が豊富であり、未公開データを交えながらその特性を議論する機会を得た。

その中でも特に、極端に薄い多層膜でも作製可能なことを示すデータが印象的だった。X 線の集光サイズを小さくするためには集光素子の開口数を大きくする必要があり、X 線ミラーの場合は射入射角を大きくとることに相当する。一方、多層膜の設計式は斜入射角に依存し、大きな射入射角の場合、多層膜中の各層が薄すぎて作製できないことが課題となっていた。Pt/C の多層膜の場合、概ね多層膜の周期長が 4 nm、即ち交互に積層する各元素層の厚みが 2 nm 程度になると、反射率が急激に低下する [13]。これは、3 次元的に結晶核が成長する白金の場合、結晶成長の初期段階では結晶核同士が独立しており、水平方向に斑な層（アイランド）が確認されるためだと考えられる [14,15]。一方、Dr. Morawe の元ではそれより薄い条件でも、X 線を十分反射できる多層膜が作製されていた。

本点は以下 2 点で示唆に富む。1 つ目に、小型ミラーを多層膜化できる可能性を向上させる。小型ミラーの斜入射角は従来の 10 倍程度であり、先述の周期長の課題が顕著である。新設計の多層膜構造設計を用いる理論的なアプローチを検討する一方で、作製技術の側面で薄さの下限値が緩和されることも望ましく、本材料は有望と言える。2 つ目に、材料や条件を検討する方向性を示している。薄膜の結晶化等、モフォロジーに関する定性的な傾向は真空・薄膜分野では調査されているが、X 線ミラー分野では見か

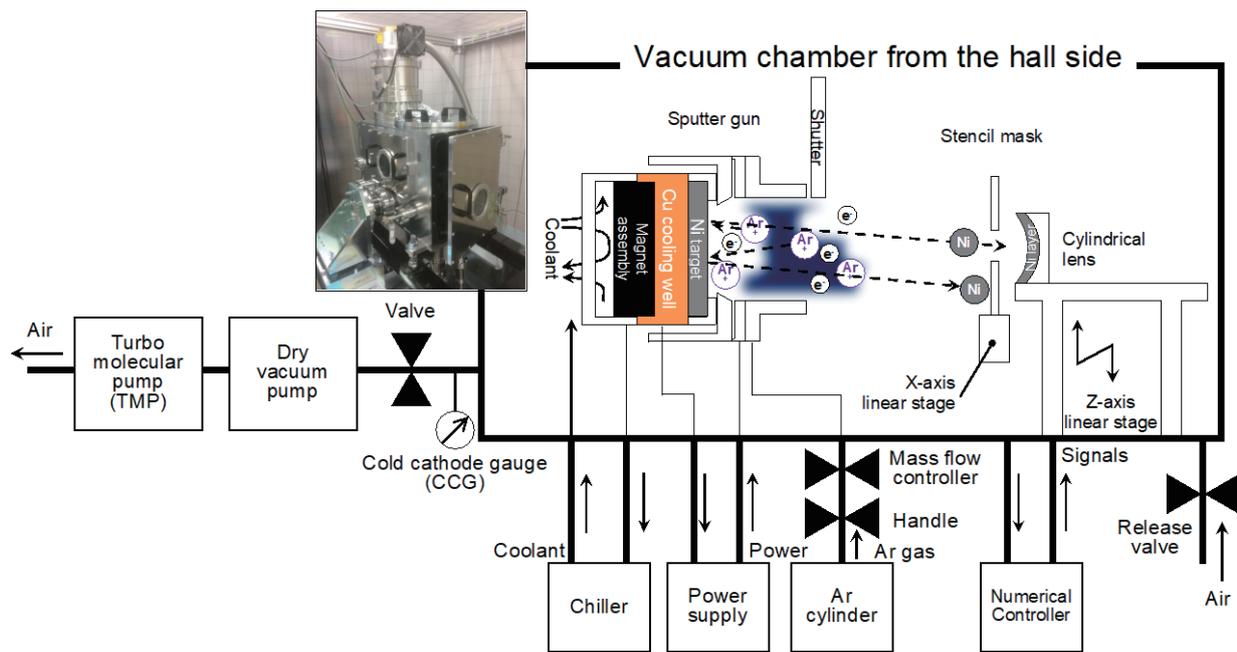


Fig. 4 成膜装置の構成 (国内の所属研究室の例)

けないように思われる。その理由として、2つ挙げる。1つ目に、成膜装置によって膜の特性が異なり、詳細な理論よりも個々の経験則に基づいてX線ミラーの成膜が行われているためである。2つ目に、X線ミラーの成膜で極限の薄さを求める場面がこれまで無く、結晶核のモフォロジーの影響が顕著でなかったためである。X線の進入長を鑑みると、通常成膜による基板コーティングは20 nm厚以上で、結晶核の発生状況は気にならない。極限に薄い多層膜で初めて起こる問題と言える。

MLLでも具体的な理論は考慮されておらず、実現可能な周期長の下限について深掘りされていない。結晶モフォロジーと成膜プロセスの関係性をより精査し、元素の種類や成膜時の真空度・温度環境等を調整することで、極薄の多層膜を作製する道が開かれるのではないかと期待される。

3.4. 装置設計と装置立ち上げ作業

3.4.1. 装置構成と立ち上げ作業

日本の所属研究室では単一元素でしか反射膜を現状作製できない一方で、ESRFでは多数の元素

を使用し、これらを積層することで多層膜とできる。LMCS・CMCSは共に成膜に必要なスパッタ源を4基備えている。これは、一度の真空プロセスにて最大4つの元素を扱えることを意味し、LCMSに関してはFig. 2の中央付近でその設置状況を確認できる。このうち、2基が多層膜の作製に使用され、残りの2基は多層膜の前処理・後処理のプロセスに使用されていた。

LMCS・CMCSは共に、成膜プロセスに関連する真空度・試料位置・電力・プロセスガス流量等に対して積極的な制御を行う。成膜装置の構成要素の一例を、所属研究室の装置を用いてFig. 4に示す。制御が失敗した場合、設定値に収束せず、安定したプロセスが実現できない。安定性追求のため、CMCSの装置の立ち上げ作業では、真空排気ユニット・各種駆動ステージ・電源機器・スパッタ源等の構成要素を一つ一つ調査する作業が多くを占めた。工場出荷時の性能が現地で達成されているか丁寧に評価した後、実際の成膜プロセスを想定し、制御パラメータを逐一修正していく作業が印象的だった。精密な多層膜の作製プロセスには、装置の較正以前に丁寧な調整作業が必要だと改めて感じ、学ぶ点が多かった。

その他、制御という点では、駆動ステージに対してはエンコーダーを2つ使用し、多重のフィードバックを行うダブルループ制御を採用している。また、重要な試料の位置決めのために、顕微鏡を挿入して成膜装置の外部から観察可能な機構を搭載している。こうした、誤差を修正する仕組みが数多く存在し、装置全体として複雑な仕組みである。

3.4.2. ESRF で感じた設計思想の違い

実は、こうした「積極的に制御する」装置設計は、日本の所属研究室で使用する装置の設計思想と対照的なものである。現在使用している成膜装置はむしろ、「積極的に介入せず、値は決め打ちする」ことで定常状態を作り出すようにしており、高い駆動精度を持つステージの搭載や振動源の隔離によって、ノイズやエラーを初めから極力低減するように作られている。ノイズやエラーを前提に、積極的な環境制御によって安定したプロセスを実現する MLL の装置とは正反対であり、重視する設計思想の違いを感じながら現場で作業にあたった。反面、MLL の設計方針のため、小型ミラーに多層膜を作製する上で必要な駆動ステージ精度を LMCS・CMCS 共に満足しなかった。この点が小型多層膜ミラーを今回作製できない要因の一つだった。

小型ミラーは従来ミラーよりも 50 倍程度小さく、作製環境が作製精度に大きく影響すると考えている。それ故に、「積極的に介入しない」装置をこれまで使用してきたが、今後多層膜を作製する上で MLL の設計思想が有効か、検討の余地がある。現在、所属研究室の装置は多層膜作製用に改造を進めている最中だが、今後、MLL で学んだことを踏まえ、装置設計を見直し、多層膜作製装置を完成させる。

3.5. 多層膜の作製レシピ

本節の作製には加工（成膜）と評価が含まれる。真空引き・成膜・大気解放までの一工程で 1 日以上要し、評価にも 1 日かかる。以下に述べ

るテスト試料と合わせ、本番の多層膜を作製するのに最低 2 週間要した。

3.5.1. 試料の成膜加工

まず加工について、成膜条件の較正手法を概観し、ステージ駆動速度を始めとして必要なパラメータを最適化しながら多層膜を作製した。この較正手法には 3 段階ある。1 つ目では、各元素を単層成膜することで成膜レートを概ね取得する。2 つ目では、周期長がどの場所でも一定な多層膜のテスト試料を作製する。3 つ目では、周期長が場所に依りて変化するような多層膜テスト試料を作製する。必要に応じてこれら 3 つの較正手法を繰り返しながら、徐々に作製物を複雑にし、最後に本番の多層膜試料を作製する。

多層膜は通常 100 周期以上ないし各元素を 100 層ずつ以上積層することが多いが、較正作業中はスパッタ源の消耗を防ぐため、20 周期程度で作製した。また、成膜量の計算には、多層膜界面で起こる拡散層の厚みが考慮されていた。この拡散領域の厚みは、実験的に求められた値だという。その他、成膜作業中は真空排気ユニットの排気速度を調整し、プロセスガス量を減らして成膜していた。これら調整は装置内で対称となるように行われていた。

3.5.2. 試料の評価

評価作業は、Fig. 3 に示した X 線反射率測定器にて全て行われた。本測定器には試料の姿勢を自動で調整する機能が備わっており、例えば 3.5.1 項 1 つ目の較正作業で得られたチップ形状の試料は、等間隔で計測ステージ上に並べることで、自動で複数試料の反射率を計測できる。光子エネルギー 8048 eV の X 線を用いておよそ 6 度の射入射角まで計測し、得られたデータは標準的な方法でフィッティングが行われていた。つまり、Névo-Croce のモデル [16] を組み込んだ Parratt の法則 [17] で反射率を導出し、得られた計測データと理論値を比較しながら、界面粗さや厚みを算出していた。Dr. Morawe によると、本評価手法でおよそ 1 Å 以下の精度で膜厚が測れ

ているという。また、この評価プロセスでは、多層膜界面上で起こる元素同士の拡散が界面粗さとして表現されていた。場所に応じて周期帳に勾配がある多層膜は、X線ミラー短手に沿う方向でX線を入射し、X線進行方向に多層膜勾配が観察されないようにして評価した [12]。

これら評価手法や分析ノウハウは、特に大型のX線ミラーでは有効だが、X線反射率測定器のX線ビーム径が大きいため、小型ミラーへの適用は困難に思われた。小型ミラーは斜入射角の勾配が激しく、多層膜の周期長が局所的にも著しく変化する。例えば透過型電子顕微鏡 (TEM) による多層膜断面の観察で、間接的に小型多層膜ミラーを評価する必要性を感じた。

3.6. 多層膜の評価作業と集光性能の予測手法

結論を述べると、多層膜の評価を行った後、集光性能を予測する作業は行われていなかった。代わりに、設置予定のビームライン中でX線照射した様子に基づいて直接確認されていた。

その理由として、先述のプロセスで作られた多層膜がこれまでビームラインで十分機能していることが挙げられる。小型ミラーを作ってきた筆者は、作製した後に集光プロファイルを計算して放射光実験を行うか判断していた。そのため、本点は意外に思われたが、MLLの高い作製技術を反映していると考えられる。

周期帳に勾配がついていない均一な多層膜ミラーや、ミラー基板に単層のコーティングを施

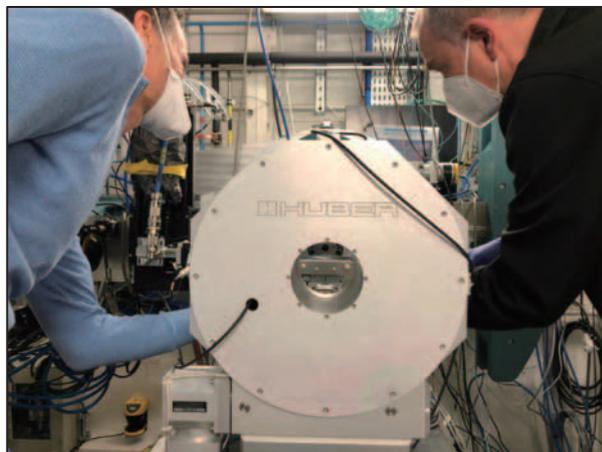


Fig. 5 BM05 でのミラー取付作業中

したものは、必要に応じて Fig. 5 で示すような BM05 の放射光で評価されていた。概ね $\theta - 2\theta$ 測定を行い、斜入射角変化による反射像及び反射率の変化を測定し、ビームライン外の評価結果と照らし合わせる作業が主だった。

4. 多層膜による集光理論の学習 (目的 2)

4.1. 背景

集光素子の開発は 1 nm を目標に進展していると考えられるが、実際に集光できるか、また、集光素子特性からその集光の様子を計算できるのか、理論的な裏付けは多くないように思われる。例えば、現在の X 線集光は可視光領域の光学理論の延長線上にあるが、原子スケールに迫る 1 nm 集光において、X 線ミラー表面の個々の原子による凹凸が無視できるのか、不明である。こうした議論は 1 nm 集光が実現していないために実証困難だが、日常的に 33 keV の硬 X 線を 12 nm 程度に集光する ESRF であれば、その手がかりを持つ可能性がある。そこで、以下の質問を準備し、議論することとした。質問と経験則に基づく回答を各々まとめて記載する。

4.2. 多層膜中の欠陥が X 線に及ぼす効果

Q1. 硬 X 線領域の中でも波長が原子スケールとなる範囲で、X 線は依然として多層膜中に明確な界面を見出せるのか。原子的な欠陥の影響が如実に現れる波長帯で、それら欠陥は鏡面反射の方向を変えるものとして働くのか、それとも散漫散乱を増やし反射率を下げ方向に働くのか。

A1. 33 keV の硬 X 線でも多層膜界面は明確なものとして機能していると考えられる。確かに、これまで MLL で作製された X 線ミラーでも、多層膜界面付近で重元素と軽元素が物理的・化学的に拡散している部分が少なからず存在する。しかし、12 nm 集光に関して言えば、エネルギーは集光点に集まっており、この事実は鏡面反射がなされていることを意味する。現状、X 線ミラーの界面粗さと反射率を記述する Névo-Croce

のモデルで良く説明できるような反射率が測定されており、多層膜欠陥は反射率低下として現れているものと実験的に理解している。

4.3. シミュレーション上での多層膜欠陥の表現

Q2. 仮に明確な界面を見出さない場合、反射面は原子サイズ程度の「ボケ」を持つものとしてシミュレーションで表現されるべきなのか。即ち、原子サイズ程度の有限小光源から発せられる2次波の重ね合わせとして反射X線は表現されるべきなのか。

A2. 上記A1.の経験的な理解を踏まえると、Q2の表現方法は適切ではないと考えられる。反射X線の位置をずらすのではなく、あくまで強度を低下させるものとしてシミュレーションでは考慮するべきではないか。

4.4. 多層膜欠陥が集光サイズに及ぼす影響

Q3. Q1及びQ2は、1 nmの集光点にX線を集める上で無視できる影響のものか。1 nm以上の集光サイズの膨らみが生じるという結論にならないか。

A3. 12 nm集光の範囲では少なくとも影響を感じていない。これは、多層膜中の欠陥が、反射方向を変える形状誤差ではなく、反射率を低下する界面粗さとして働くというA1.の認識を支持するものである、1 nmではやってみないと分からない。

4.5. 現在のX線集光理論の限界

Q4. X線集光は可視光領域の光学理論を適用して理解されているが、Q1及びQ2で議論した内容は、この適用の限界となりうるか。

A4. A1.の理解を踏まえると限界とはならない。M. Osterhoff et al. (2012)によると、可視光領域の光学理論はX線の1 nm集光でも適用されることになっている [18]。

4.6. X線集光シミュレーション

Q5. これまでのX線集光を計算する理論は全て反射面が明確に存在することを前提にしている。もし仮にこ

の前提が崩れた場合、有限要素法・有限体積法を応用できないか、あるいはその試みはあるか。例えば地震波の計算のように、スケールが大きく異なる地面や建物を混在させた計算は、マクロな集光素子近傍と原子オーダーの多層膜の計算に適するように思われる。

A5. 本点についてはDr. Moraweは数値シミュレーションに詳しい訳ではなく、またESRF内でのこのような数値シミュレーションを専門としている研究者に出会えなかったため、明確な回答を得られなかった。一方で、ESRFにかつて在籍していたDr. Osterhoffはいくつかこうしたシミュレーション手法について調査しており、その論文を当たるのが良いように思われた。

5. ESRFでの研究・就労環境体験（目的3）

5.1. 緒言

本章は研究には直接関与しないものも含む。世界的な業績がESRFでどのようにして生み出され、自分の研究がどのように見られるのか知るために、研究・就労環境を体感することを本目的とした。この目的に対して、以下小見出しに挙げる5つの活動を事前に提案した。

5.2. 自身の研究に対するフィードバック

Dr. Moraweを含む先駆的な研究者から、自身のこれまでの実験や博士課程の内容について意見をもらうことを目指した。

フィードバックの機会は大きく分けて3回頂いた。1回目は、XOGメンバー全員の前での発表である。小型ミラーに関する研究を概ね50分程度にまとめて発表した。Fig. 6に示す通り、XOGには滞在先のMLLの他、Mirror and Metrology Laboratory（以下MML）、Crystal Laboratory（以下CL）、Refractive Lensesのユニットが存在している [4]。これまで筆者が行った小型ミラーの研究は、小型ミラーの提案・設計、数値シミュレーション結果、作製・計測プロセスの開発、マニピュレーターの開発、集光実験結果、X線顕微鏡観察への応用結果という提

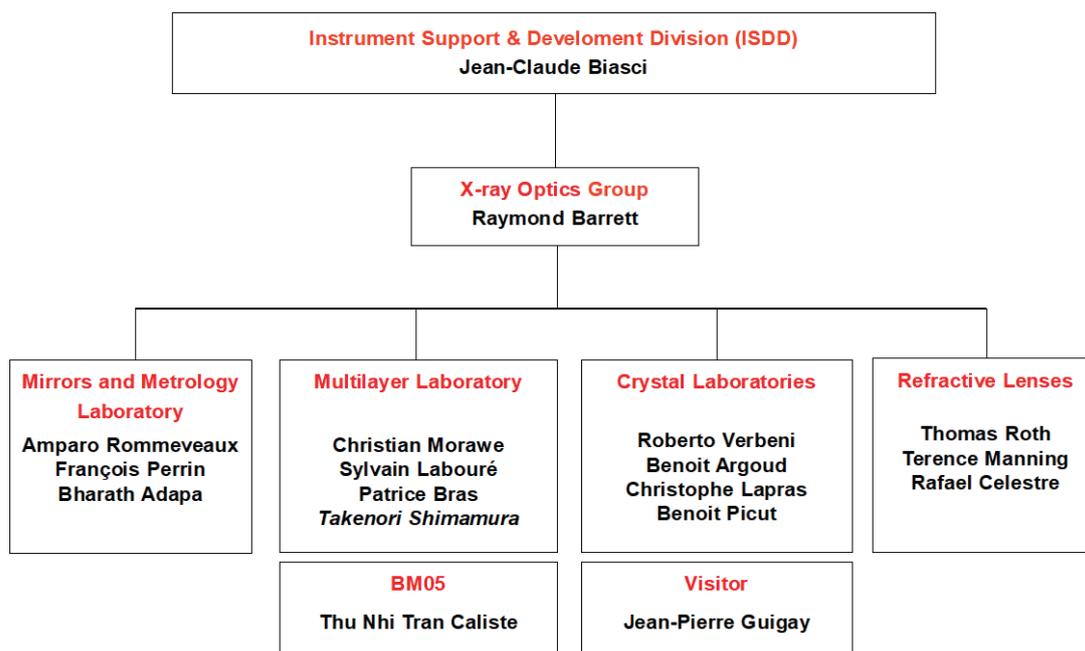


Fig. 6 X-ray Optics Group の構造 (Dr. Morawe による)

案から顕微実証までの一連の内容を含む。MLLからは加工について、MMLからは干渉計を用いた計測手法について、Refractive Lensesからはビームライン中での集光実験条件について、それぞれ専門的な質問・コメントを頂いた。また、XOGを統括するDr. Barrettには、既存の光学系との差別化や小型ミラーを活用したX線分析法について細かく質問・コメントをいただき、ユーザー利用を見据えた光学系開発を強く意識させられた。

2回目は、小型ミラー作製により踏み込んで、MLLのメンバーに発表した。3.4.2項で述べたとおり、真空度や様々な装置パラメタをフィードバック制御で調整するLMCSやCMCSとは異なり、所属研究室の成膜装置はシンプルに何も介入しないことで定常状態を作り出す。こうした装置設計コンセプトの違いや具体的な小型ミラー作製プロセスについて、開発した一連のプロセスを図解しながら説明した。議論が白熱し、合計6時間程度の会となった。小型ミラーは反射面に強磁性のNiを用いているが、同じ光学的性質を持ちながら強磁性ではないNi-V合金の使

用を勧められるなど、今後の自身の研究に直結するアドバイスも得られた。

3回目は、後述するMMLでの小型ミラー計測時である。ESRFの計測装置を用いて、日本で作製した小型ミラーを実際に計測することで、計測の間にどのような工夫がされているか、身を持って体感することができた。特にノイズ低減の工夫にはこれまで見過ごしていた内容が多かった。本点は6.1節で詳細を述べる。

5.3. ESRFで研究する博士学生との交流

ESRFにもPh.D. projectsが存在するが、コロナ情勢等を鑑みて可能であれば、これに参加する博士学生と交流することを目的とした。

ESRFのPh.D. projectsに所属する学生には出会えなかったが、所属していた学生で、現在ESRFにてポスドクをしている方々がXOGに在籍している。その方々の研究やキャリア選択の話を聞くことができた。また、UZH (University of Zurich)に所属する博士学生で、ID15を利用するユーザーと研究内容について意見交換する機会を得た。ここでは後者について述べる。

この博士学生は、生物系の手法開発を強みに独自技術で現象を観察する研究室 [19]に所属し、本人も手法開発を専門としている。具体的には、細胞を蛍光観察する際の信号強度を高める手法開発に取り組んでおり、その手法を放射光での観察にも応用している。よって、生体試料観察で用いられる手法と、放射光による観察手法の利点欠点を熟知しており、さらに試料として観察したい科学的対象も心得ている。ユーザーとビームライン開発側の架け橋となるような専門性を持つとも言える。対する筆者は、小型ミラーを顕微観察に応用する場面で、試料として神経細胞を選択しており、応用先が共に生物系ということで議論が盛り上がった。

お互いの得意分野の視点で、相手の研究の良さを最大限に活かす点を意見交換した時間が最も印象に残っている。筆者は放射光を基盤とし、相手の実験中に生じたトラブルに対して解決策を提案したり、放射光を利用した結果の解釈について一意見を述べたりした。また、nano-SIMS (secondary ion mass spectrometry) 等、生物系に関連し、元素分析において放射光の競合となりうる手法についても紹介し、相手の論文原稿の導入について感想を述べた。一方、相手方の専門性は生物系であり、筆者の小型ミラーを生物系に応用する過程について、こと細かにフィードバックいただいた。観察手法に対するコメントは勿論のこと、生物系で好まれるような論文の書き方やストーリー展開についても教示いただき、現在執筆中の論文について再考する良い機会となった。相手方の研究は今後有名紙に投稿される予定で、研究の進捗でも非常に刺激を受けた。

5.4. 改良された ESRF とビームライン等の視察

現在アップグレードが進められている ESRF を実際に見学し、どのようにビームラインが構成されているか現地視察することを目指した。新たな蓄積リングである ESRF-EBS (extremely brilliant source)が導入された ESRF 全体を回り、ID16A/B を見学した他、XOG 内のユニット全てを見学した。

5.4.1. ESRF-EBS 蓄積リングの運転状況

自然エミッタンスの改善により、輝度やコヒーレンスが格段に向上した ESRF-EBS について、筆者はユーザーとして利用していないため、直接感想を述べることはできない。ただ、どちらかというトラブルが話題に上がることが現在は多いようである。

例えば、5.3 節に登場した博士学生は ESRF-EBS の立ち上げ前にも実験をしており、当時と比べてビームアポートが増えたことを指摘していた。2021 年 11 月に行われた 5 日間の実験で 1 日に 1 時間程ビーム供給が滞り、長いものでは数時間復帰に要したという。ESRF の職員が出席する半年に一度の General Assembly でも ESRF-EBS の稼働率に言及があった。電流値の制御になんらかの異常が発生しているとのことだが、原因は不明で、一旦電子ビームを廃棄してから注入作業を行うことで対処しているという。本件に関しては対応が進んでおり、近いうちに解消されるということであった。

本点とは別に、毎週月曜日はメンテナンス日として ESRF 全体でビームを停止することが筆者には新鮮だった。また、このメンテナンス日のおかげで、次項のビームラインへの見学が実現された。

5.4.2. ビームライン ID16A/B

MLL の技術職員の方が以前作業していたご縁で、ビームライン ID16A/B を見学させてもらう機会を得た。Fig. 7 に ID16A/B 全体の模式図を示す。ID16A はナノ顕微イメージング (NI, nano-imaging) に適しており、クライオ観察に対応するため、実験ハッチ内の集光素子は真空チャンバー内に安置されている。生物系・医薬系・ナノ材料を対象に、X 線蛍光顕微観察や、ナノトモグラフィーが可能である。ID16B はナノ分析 (NA, nano-analysis) に適しており。対象は医薬系・生物系・惑星科学・環境科学・材料科学・ナノ材料と幅広く受け付けている。X 線蛍光顕微観察・X 線吸収分光・X 線回折・トモグラフィー等を単体だけでなく組み合わせる観察が可能

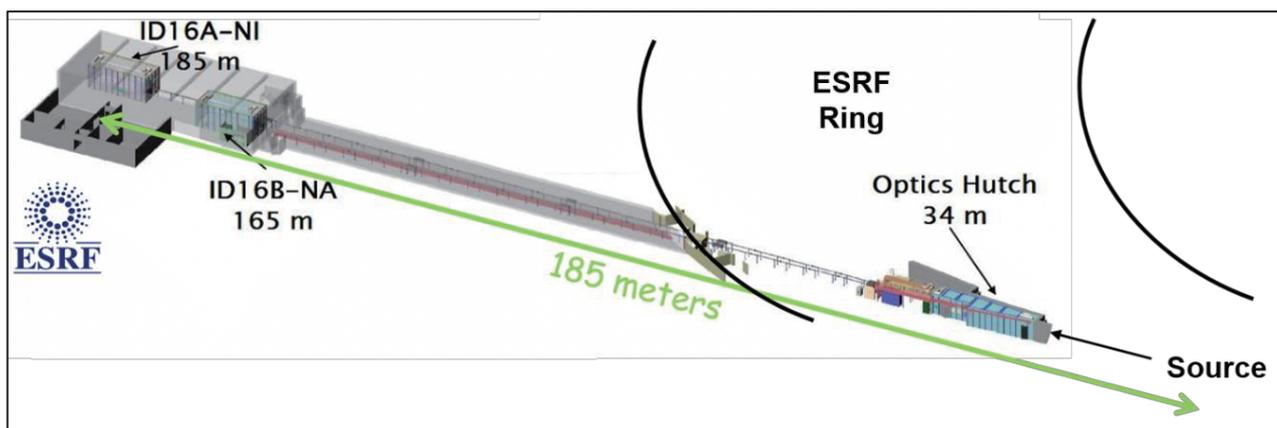


Fig. 7 ID16A/B の模式図 [20]

となっている。ID16B はピンクビームも使用できる。

当日は光学ハッチから実験ハッチまで全てを2名のエンジニアの方にご紹介いただいた。

ID16A/B の特徴は、硬 X 線にも関わらず、光源から実験ハッチに至るまで全て、X 線が真空ダクト内を通ることである。通常使用されるベリリウム窓等を失くすことで高品質なビームを提供するという。温度管理は厳密になされ、 ± 0.1 度程度で制御されていた。ビームは蓄積リング特有の水平方向に伸びた楕円形状をしており、光学ハッチ内に横方向のみを遮る補助スリットを設けて、仮想光源としていた。

ESRF の蓄積リング外にある環状道路の下に Fig. 8 で示すようなトンネルが通っており、実験ホールから別棟の実験ハッチに移動する。この別棟には、ID16A と B で異なる実験ハッチが存在する。ID16A は実験ハッチがクリーンルームとなっており、温度管理や振動の隔離がより厳密に行われている。光子エネルギー 17.0 keV か 33.6 keV の X 線が使用可能な多層膜ミラーを備えるが、前述の通り真空チャンバー内に設置されているため、全貌は見えなかった。ID16B は、集光光学系として作り込み型の多層膜ミラーと形状可変型ミラーの二つを備え、使用エネルギー帯に応じて使い分ける。集光光学系はアクリル製のチャンバーに真空下で収められ、炭素等による汚染を防ぐように維持されていた。このチャンバーの下流端には Si_3N_4 製の薄膜が貼られ、X 線の通り道となる。蛍光 X 線を検出す

る SDD (silicon drift detector) はディテクター素子が 7 つのものと 3 つのもの、計 10 個を同時に使えるようになっており、その他検知器も豊富に用意されている。なお、小型ミラーの実証実験では SDD の素子は設計の都合で 1 つだった。その実証実験を行った SPring-8 BL25SU の B ブランチに常設された SDD も素子は 4 つであり、検知器が強力だと感じた理由はここにある。

今回訪問した ID16A/B は、一次光源点から 160 m 以上離れた位置で集光する。ESRF 内では長尺のビームラインだが、ESRF では現在、その他多くのビームラインの延長が試みられている。SPring-8 と異なり、ESRF では光学ハッチや実験ハッチの他に、コントロールハッチも設置している。そのためか、現地滞在中は X 線線量計を身に付けずに実験ホールに入ることができ。各々が別々に遮蔽されているため、SPring-8

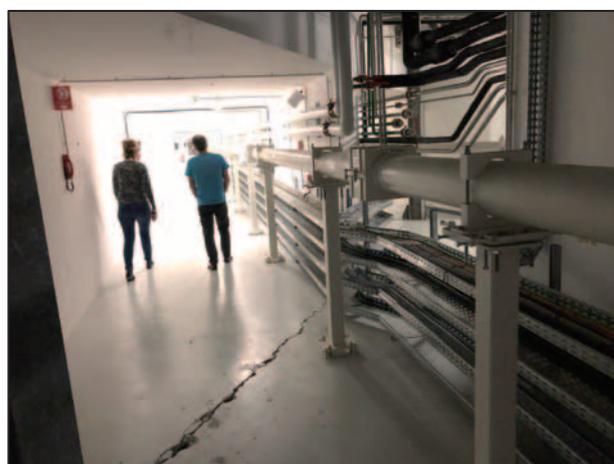


Fig. 8 ID16A/B 見学で実験ハッチに向かう途中

よりもブースが所狭しと並ぶ印象を受ける。加えて、ESRFは周長がSPRING-8よりも短いため、新規に装置を入れる空間が長年の開発で枯渇している。ID03のように全て装置を取り払い、ビームラインを一から作るものも見受けられた。一方で、ビームラインを延長することで外側にスペースを作り、新たな実験ハッチを設置し始めるものもあった。滞在中も、従来から使われた実験ホールが内側に、外側には新しく建てられた実験ホールが併設されており、各所で工事が進められていた。

5.4.3. Crystal Laboratory

X線ミラーとは直接関係ないが、ご厚意で5.2節に登場したCL [4]にてシリコン結晶分光器の作製現場を見学させていただいた。Fig. 9に展示されたシリコン結晶分光器の見本を示す。最も驚いたのは、こうした結晶分光器が手作業の研磨で作製されていたことである。



Fig. 9 Crystal Laboratory 入口に展示されたシリコン結晶分光器見本

まず、シリコンのインゴットから、作製するシリコン結晶分光器の形状に合わせて、ダイサワーや5軸加工機を用いて機械的に切り出す。次に、ラウエカメラを用いて試料の結晶方位を特定し、その情報を元に多数の研磨剤を用いながら手動で磨いていく。この機械的研磨の後に、各種ダメージを取り除くためにエッチングによる化学的研磨を行う。そして、より微細な研磨剤を用いた手作業の研磨によって、仕上げ加工を行うという。こうして1ヶ月程度かけて一つの分光器を作るということであった。チャンネルカットモノクロメータの場合、結晶に掘られた溝に沿って、溝の内側を研磨するため、より期間を要するという。

出来上がったシリコン結晶分光器は、MMLの光学干渉計で表面を観察し、ビームラインでも評価するという。計測はCLでは十分行えないため、精度の決定は概ねMMLに依るといった話だった。CL見学時点ではMMLに足を運んでおらず、計測精度を高めるためにどのような工夫がなされているのか、一層興味を持つ機会にもなった。

5.5. 現地研究者の研究・生活スタイルの体感

MLLやXOGの研究者と似た生活をし、どのように研究を進めるのか体感することを目指した。以下、XOGの場合と、ビームライン建設のような多くの部門が関わる場合について述べる。筆者がフルタイムでの就業経験を持たない学生であるため、至らない気づきも多くあるが、後半では個人的な洞察を記述していく。

5.5.1. XOG内での就業・研究スタイル

XOGの人々は裁量労働制を採用するものの、多くは9時-17時、平日のみの勤務で帰宅する。労働時間の分、業種が細分化され、分業が進む。例えば、日本では装置の保全保守・装置の条件出し・装置を使った科学的な業績出しは全て筆者1人で行わなければならないが、MLLではその全てにFig. 10に示すような技術職員(Mr. Laboure、写真左)・エンジニア

(Dr. Bras、写真中央右)・サイエンティスト (Dr. Morawe、写真右) が割り当てられている。各々が専門家として動いており、これまで日本で解決しなかった疑問も現地で聞けるなど、知識の深さを肌で感じた。

日本の所属研究室では、特に加工装置は自作されることが多く、使用装置を細部まで知るところを重視している。一方、XOGの成膜装置は企業から購入した高価なものを使用しており、開発のスタート地点が大きく異なる。装置等、サイエンスに直接関与しないものは外注等によって極力自分達で扱わず、直近の目標に向けて時間の効率化を優先する姿勢を感じた。MLLの装置に限れば、ハード面はMLLで維持し、装置を駆動するソフトウェアはビームラインと同じものが導入され、その保守はビームラインのソフトウェア担当によって行われている。MLLの装置は3.2節で述べた通りだが、これに限らず、MMLも保有する計測装置が多い。ESRF全てのビームラインに供給する光学系を準備する研究所と、あくまで一光学系を開発する筆者の研究の比較は不毛だが、人・モノ・財源で到底及ばないというのが率直な感想である。

MLLを始めとする専門家集団の中で、唯一全体を見回すのがXOGのトップDr. Barrettである。小型ミラーに関する筆者の研究について、提案から実証まで全ての段階に鋭い指摘を飛ばして下さるのも博士だった。



Fig. 10 Multilayer Laboratory のメンバー

5.5.2. 初めて経験した分業による研究

こうした分業には、「作業に融通が利かない」という欠点が挙げられる。例えばCMCSの立ち上げ作業の際、部品の不足・装置ソフトウェアの欠陥・一部構成部品の故障といったトラブルに見舞われた。こうした開発段階に起きる予想外の事態に対し、分業が裏目に出た場面があった。各々の専門性が高すぎてトラブルの担当が明確に決まらない局面、ソフトウェア担当等のESRF他チームの反応を待たなければいけない場面、製品の販売企業からの指示を逐一求めなければいけない時期等が該当する。これは、決してMLLメンバーの仲が悪いということではなく、例えばESRFソフトウェア部門と装置販売会社の双方が、装置ソフトウェア欠陥は相手の管轄と主張し、折り合いがつかないような状況も含まれる。XOGの研究者はジョブディスクリプション(職務記述書)に事細かに記載された事項に対して、仕事を行い評価を受ける。そのため、このジョブディスクリプションが想定しない新たな事態に対して、意図的に対応しない場合もあるし、そもそも専門分野故に対応できない場合もあるのだと感じた。

一方で、MLLでは分業が強力に活きていると感じたことも事実である。LMCSのようにルーティンで稼働している装置があり、多層膜の作製で既に実績を持っている。作製プロセスがある程度マニュアル化されており、日常的に多層膜ミラーを製造する段階に到達している。こうした状況では分業の方が作業負荷は分散され、円滑である。同じ組織でありながら、開発段階の内容とルーティンとしてこなす内容が併存しており、分業性の強みと弱みを同時に体感した。

その点、自身の小型ミラー開発は、筆者を中心にこれまで設計から顕微実証まで手掛けてきたが、開発段階としては身軽だったのかもしれない。反面、今後「ユーザーに使ってもらう」ことを考えると、これまでの自身の研究スタイルに限界を感じさせられる。研究段階に応じて柔軟に変化する姿勢の必要性を痛感させられ

た。5.5.4 項と合わせ、本反省は 5.5.5 項で述べる。

5.5.3. メンバー同士の交流

研究以外では、XOG 内で風通しが非常に良く、毎日コーヒブレイクで談笑する等、日本で見かけない落ち着いた雰囲気を感じた。労働時間を 35 時間とするフランスには、超過労働分を代休として相殺する RTT (Réduction du temps de travail) というシステムが存在する。代休の取得日次第で一月に二日有給が取得できることもあり、MLL のメンバーは月に 2 回三連休とする使い方をしていた。筆者の滞在中では、一週間程度のバカンスが冬・春・イースターと存在し、所属メンバーが研究に追い込まれている様子は見受けられなかった。その心理的余裕も相まって、XOG の方々には様々に気をかけていただいた。例えば、ESRF が位置する都市 Grenoble は冬季オリンピックが 1968 年に開催され、Fig. 11 に見るように、アルプスの麓に位置するスキー観光地である。最寄りのスキー場はバスで 1 時間程の距離で、XOG の中でスキーに行く企画に筆者も誘われた (悪天候で見送りとなった)。逆に、こうした数ヶ月に一回の 1~2 週間程度の長期休暇中は ESRF・企業を問わず多くの人が休むため、研究計画は念入りに検討する必要があった。物流や納品に要する時間も長く、進捗が生み辛い場面もあったが、方針の差異を感じて新鮮だった。



Fig. 11 Bastille 城塞から見る ESRF と ILL

5.5.4. ビームライン ID16A 建設時の分業

ID16A/B は従来から存在したビームラインを延長し、ナノ観察用に改良した比較的新しいビームラインである。その構造は 5.4.2 項で記載したが、本ビームライン建設には多くの部門が携わっている。MLL で作製された多層膜ミラーが設置されるだけでなく、X 線検知器、ミラーマニピュレーター、クリーンルーム化された実験ハッチの設計、ソフトウェア開発等、計 13 名の専門家が開発に携わっていたという。特に ID16A はナノ集光に特化しており、光子エネルギー 33.6 keV という比較的高エネルギーの X 線を 12 nm に世界で初めて集光している [3]。

5.5.2 項でも触れたが、ESRF の分業スタイルがどのようにして世界的な業績を生んでいるのか、筆者は興味を持ちながら滞在していた。開発段階のような予想外の問題が起こる状況では、分業の欠点が顕著になりやすい。理由の一つは、ジョブディスクリプションに規定された範囲内で仕事をするのが普通であり、その範囲を超えて作業しても評価されないどころか、職務規定に抵触する恐れがあるからである。もう一つは、職務外でも、自分の責任範囲を明確にする人が多いように思われたからである。筆者の周りには非常に親密で面倒見の良い方が多かった。それでも日常会話では「自分のせいではない」という言葉を聞く場面も多く、不足分を自身の頑張りで補おう、という発想は生まれにくいかもしれない。

多様な人と専門性を交えながら業績を生む秘訣を筆者なりに 4 つ考えている。1 つ目に、5.5.1 項で述べたように、量を稼ぐための人手は確かに多い。日本であれば 1 人で全て行いそうな作業でも、分業がとにかく進んでいる。プロジェクトの規模に応じて、2・3 人といった中途半端な分業ではなく、10 人・それ以上といった数で圧倒しており、少数精鋭でも敵わない成果量を生み出している。

ただ、人員が増えれば、自己主張が尊重される集団では収集がつかない可能性がある。2 つ目に、目的・目標が程々であり、かなり具体的で

細かい。例えば「X線集光・顕微鏡で世界一を目指す」のような、とかく上を目指すだけの目的はESRFでは出てこない。「33.6 keVを12 nm集光できる性能で、装置を使うユーザー目線で設計する」といった「現状で妥協できる目標」となる。定量的な指標を活用し、目的を構造化して目標設定する点は普通だが、個人的にはこの「ユーザー目線」が肝だと感じている。第3者の目線を導入することで、自ずと独りよがりの方向性を避ける意図が感じられる。そして、筆者が滞在した集団に限った話かもしれないが、少なくとも皆口先は世話好きである（お節介焼きなのか社交辞令なのか、筆者には分からない）。自分の専門性から見た「ユーザー目線」について好きなだけ語り、結果、あらゆる専門性から議論尽された具体的な一つの目標が企画の最初に完成されている印象を受けた。現実感ある具体的な数値設定に加え、人の特色を活かした具体的な内容の詰め方が、序盤で上手く働いているように感じられた。

3つ目に、余裕を感じる風通しの良さである。概ね、締切は目安であり、状況に応じて前後するのがこちらの習慣に思われる。そのため、過度にプレッシャーを感じる事が少ない。そして、二番目の理由の世話焼きにも通じるが、お喋りが好きである。目指す目標から関係無いことまで、全て喋る。喋る時間も長いし、喋る量も多い。自分が気になれば何でも尋ねる。おそらくだが、プロジェクトの進捗は早くない。それでも、自分の立場から疑問が生まれれば必ず解消する風通しの良さのおかげか、齟齬も生じず、後戻りすることがない。予想と違うものが完成することはまず無さそうだと感じた。

4つ目に、開発段階から利用拡大のフェーズへの移行は、装置的にも人間的にも非常に円滑である。開発段階からユーザーを見据えているため、ID16A/Bは、開発段階のシステムではなく、製品として完成しているというのが筆者の印象である。例を挙げると、他のビームラインと同じインターフェースやコマンドを使用してデータの取得が可能となっている。また、可能

な限りビームラインサイエンティストではなくユーザーが操作できるよう、試料の設置・調整・解析が簡便に行えるようになっている。出力データフォーマットも統一されており、大抵の分析には既に便利なソフトウェアが用意されている。誰でも使いやすい製品がある以上、ビームラインの開発が一旦終われば、ユーザー利用に不可欠な人員を除いて開発チームは解散できる。こうしたユーザーへの親和性とビームライン側の労力削減が相まって、ビームライン側はオペレーター業務ではなく設備開発に労力を傾けられる。一方、ユーザーは操作につまずきにくく、科学的な成果出しに集中することができる。

これまでに経験しない物事の進め方に触れ、別の解を垣間見たような気がした。放射光分野は巨大な装置と多様なユーザーに開かれている点が非常に独特だと感じている。それらを全てこなさなければいけないような圧力をこれまで勝手に感じていたが、自分の立ち位置を考えさせられるような経験だった。

5.5.5. 自身の研究開発プロセスとの比較

5.2節で触れたが、筆者は小型ミラーの開発について、設計から顕微実証までのプロセスを手掛けてきた。小さい装置ながら、遥か彼方のユーザー利用が少し見える段階まで来たように感じている。規模が全く異なる開発ではあるが、5.5.4項の4点と比較すると反省点が多い。

1点目の人手について、自分で進めることに拘り過ぎたと感じている。当然、指導教官・共同研究者・JASRIの方々には大変良く面倒を見ていただいたが、概ね、意思決定や実行は自分で手掛けるようにしていたつもりである。様々な経験を積めたこと自体に後悔はなく、感謝の念に堪えないものの、顕微実証に到達して自身が科学的側面に大きく踏み出した際に、単独で手掛けることの障壁に直面したように思う。

2点目の目標設定について、「ユーザー目線」という指標は自身の中になかったと感じている。これは以下2点の筆者の勉強不足によるも

のである。まず、放射光科学がどのように成り立っているのかを知らずに研究を始めたためである。加速器や物理背景を扱う純粋な放射光科学と、それらを計測技術として活用するユーザー利用分野が合わさる構造を理解していなかった。次に、ユーザー利用に関する調査不足である。既に完成された X 線分析手法には、ある程度データフォーマット等が存在している。そうした先人によって規格化された内容を知ることなく、その場の都合で多くを決定してしまったとも言える。研究目的を構造化し、数値目標に落とし込むことはできたものの、この「ユーザー視線」の有無は、最終的な完成物・到達地点を大きく変えているように感じる。

3 点目の時間的余裕・風通しについては、本点単独で見れば、少数精鋭で全てを手掛けるスタイルが活きたと考えている。上司も気さくで齟齬は発生しにくく、課題申請・実験課題という動かさない締切に向けて集中することができた。時間が無限に許されたとしても、優先順位や目標抜きに物事は進まないと考える筆者にとっては、この点は性に合っていたように思う。

4 点目の開発・利用拡大の移行については、2 点目に挙げた視点の欠如により、到達点が異なっていたことが大きい。筆者らが拡張してきたシステムは利用拡大を考えておらず、もしユーザー利用があるとしたら、構築したシステムを一つ一つ吟味し直す必要があるだろう。ユーザーが簡便に操作できるとは言えず、筆者がオペレーターとして付随する必要があり、筆者は設備開発と科学的な成果出しを中途半端に進めざるを得ない。

筆者は、ESRF や自身が行った研究スタイルについて、良い・悪いといった主張をするつもりはない。単純に、筆者個人に適合していたか、或いはこれまで以上に出来たことが無かったか、と反省させられる点が多かった。

5.5.6. 業務内容と研究業績評価手法の一致

放射光科学の研究は大規模な準備が必要となり、その準備内容は必ずしも「科学的」ではな

い、と筆者は考えている。例えば、5.4.2 項で登場した ID16A/B のような新たなビームラインを立ち上げ、新しい X 線計測手法を提供する場合を考える。このビームラインを使って観測された試料の現象は、過去に観測されなかったものが発見されており、人類の知識を拡大し、理学的だと言える。このビームラインの立上げ結果である 33.6 eV での 12 nm 集光 [3] は、光学的には X 線が集光可能だと分かっているため、真に発見ではかもしれない。計測科学としては新しいように思われる。さらに元を辿って、ビームラインに導入される集光鏡はどうだろうか。多層膜の開発や設計手法は既存のものを使用している。モノづくりの限界に挑戦するものであるが、これは理学的ではなく、もしかすると技術報告に留まるものかもしれない。

筆者の悩みは、「科学的」の指標に戸惑うことである。自然科学と同義に使われる「科学」は概ね理学と言い換えられるものだと筆者は理解している。工学と理学は、各々発明と発見を特徴とする異なる分野であるが、学術界では一貫して共通の「科学的」な指標で研究内容が評価されているように感じる。時折、この「科学的」とは単に「論理に基づけられた新規性」という意味なのだろうかと思問している。

こうした悩みは、研究者の評価に端を発する。例えば、放射光実験のために装置を作製したとしても、「科学的」かどうかは疑問が残る。そのため、装置を作製しているばかりでは理学と同じ土俵の「科学的」な研究業績は増えず、評価が上がらないため、十分な研究資源・環境が得られない。しかし、放射光実験にはこうした大規模な装置が不可欠である。こうした「分野で求められる作業」と「実際に行われる評価」のミスマッチが、大きな準備を要する放射光科学では多いのではないかと考えている。

上記の疑問を ESRF では感じていないのか、Dr. Morawe に質問する機会があった。博士は、放射光分野に起きうる問題だと理解を示した上で、こうした業務内容と評価の乖離は起きていないと答えた。「ジョブディスクリプションに

は論文の投稿頻度や内容についても事細かに書いてあり、それらを満たす限り、ESRF 内での評価は下がらない。サイエンティスト・エンジニア・技術職員等、ポジションがしっかり分かれており、業務内容が混在することはなく、評価も混在しない。むしろ、必要な業務を行っているにも関わらず評価されないのであれば、それはジョブディスクリプションやマネジメント側に問題がある。」との回答だった。

工学や理学、意思決定側と実行側が混ざり、様々に経験できたのがこれまで筆者の経験してきた研究であった。分業によって業務の幅が狭められることは、筆者としては「将来の先が見えてしまう」ようで物足りなく感じるものである。一方、こうした評価が適切になされていると迷わず答える博士の姿は、強く印象に残るものだった。

なお、フランスの雇用制度は非管理職 (Non-cadre) と管理職 (Cadre) とあり、後者は成果主義となる。博士は非管理職としての意見であることを申し添える。

5.5.7. 社会貢献への個人的な葛藤

日常会話はこなせない仏語レベルの筆者に対して、5.5.3 項に見るように、XOG の同僚達は何故こんなにも気さくにコーヒブレイクに誘ってくれるのだろうか。その場を生きるのに精一杯な身には、こうして自分から誰かを誘う気持ちはなかなか湧き出してこない。無味乾燥な人間のように感じられて、時々自身が情けなくなるものの、常にせわしなく動いている。

筆者が出会ったフランスの研究者は、日本と比べると圧倒的に実労働時間は短いが、でもだからこそ余裕があり、他人を気遣う気持ちが生まれているように感じた。「自分が満たされていないと他人に優しくできない。」コーヒブレイク中の同僚の笑顔は、筆者の心の引け目を映し出し、そう語りかけてくる気がする。そして、この姿勢を体現する同僚達は、「これも有り得るな」と筆者に感じさせるものだった。

僭越ながら筆者は、放射光による X 線は「計測の最終手段」と考えている。ラボベースで手軽に計測できる手段があれば、もちろんその手法の方が望ましい。ただ、最終手段故に物理学・生物学・医薬学・惑星環境学・材料科学といったあらゆる分野に開けているのが放射光であり、その可能性の拡大は、計測手法の下流に位置する科学や製品開発に甚大な影響を与えるはずである。この分野で小型ミラーを推し進めたら、今まで見えなかった世界が見えるのではないか。そして、微力ながら世界に貢献できないかという思いで、これまで牛歩ながら研究を進めてきた。先人が積み上げた内容を踏まえつつ、誰も成し得ていない道を突き進む必要があり、困難や苦勞が必ず伴うものと考えている。

一方で、自分が世界に貢献することは、自らを犠牲にして成し遂げるものなのだろうか。あるいは、先述のフランスで感じたように、自分が満たされて初めて行えるものなのだろうか。

実際には、貢献した事実が評価されて自らに還元され、その還元を元に、また新たな貢献への道が開かれる等、両者が相補的に起こりうるものだと考えている。ただ、筆者には、日本とフランスの研究スタイルはこのスペクトラムの両極端に位置しているように見える。その中間を想像することは難しく、二者択一の選択肢を提示されているように感じる。そして、その選択において、困難や苦勞を「自らの犠牲」と微かにも感じてしまう自分は、どちらに惹かれるのだろうか。

どちらの在り方が良い・悪いという話をするつもりはない。ただ、フランスでの経験はこれまでの自分の在り方に微かな痛みを残し、今後、自分自身はどう生きたいのか、将来像を考えさせるものだった。

6. その他に得られたこと

以下、渡航前には予定していなかったものの、収穫があった内容を記述する。

6.1. 計測ユニット訪問と小型ミラーの計測

5.2 節に登場した、XOG 中にある計測ユニット MML [4] を訪問して見学すると共に、日本から持ち込んだ小型ミラーの形状を測定する機会が得られた。以下、見学中に得られた知見の後に、小型ミラー測定について記述する。

6.1.1. MML の保有装置

MML は、フィゾー型干渉計を 2 台 [21,22]、非接触式型のプロファイラー (Long-trace profiler, 以下 LTP) を 1 台 [23]、マイケルソン型の顕微式干渉計を 1 台 [24]、シャック・ハルトマン波面センサを用いた形状計測器を 1 台 [25]、接触式のプロファイラーを 1 台保有する。

マイケルソン型の顕微式干渉計と接触式プロファイラーを除き、いずれの装置もステッチングを使用して、最大 1.2 m までの大型ミラーの計測を可能としている。特に LTP やシャック・ハルトマン波面センサはガントリーと呼ばれる両持ち梁構造をしており、この構造が 1 m 超えの花崗岩定盤で固定される巨大な装置である。筆者が訪問した際には、MooNpics [26] と呼ばれるプロジェクトで用いる大型基板がフィゾー干渉計に設置されていた。本プロジェクトは、欧州の放射光施設が共同で同じ基板を計測し、その計測結果を共有するラウンドロビンテストのことである。

マイケルソン型の顕微式干渉計もステッチング計測できるが、より小さな X 線ミラーを対象としている。MML の顕微式干渉計は検知器に回転ステージが搭載されており、これにより試料面との焦点距離を保ったまま角度を調整できると言う。通常試料側に回転ステージを設けると、回転ステージ中心と試料表面が一致していなければ、姿勢調整の際に並進運動してしまう。こうした微妙な位置ずれを気にしての構造だった。

干渉計と波面計は通常の計測で使用するものの、接触式プロファイラーは現在使用していないとのことであった。現状では非接触式の手法

で計測結果の妥当性が示している他、基板やコーティングへの傷が気になるためだと言う。

6.1.2. 非確率的な計測エラー対策 (温度)

MML は系統誤差に分類される温度ドリフトの影響を非常に気にしており、筆者には学ぶ点が多かった。以下 3 点挙げる。

1 点目に、これらの装置は全てクリーンルーム型の実験室に収められている。温度は ± 0.1 度で管理され、夏と冬で異なるものの、湿度も 50% ないし 40% で保たれている。全ての装置は自動化されており、リモートコントロールが可能である。そのため、計測したい基板を設置しておけば、自動で複数回の計測を行い、再現性の検証まで行える。こうした自動化によって極力人の出入りを減らし、クリーンルームの効果を最大限高めているという。

2 点目に、熱源の特定と切り分けが明確になされている。この例となる装置を 2 つ挙げる。どの測定装置も検知器を備えるが、本構成要素は熱源となる。シャック・ハルトマン波面センサの場合、ガントリーに取り付けられた検知器が冷却ファンと一体になっている。この検知器の冷却効率を最大限に高めるために、アルミホイールで熱源が覆われていた。また、通常、設置誤差は試料と検知器の距離分拡大されてしまうため、検知器を近づける方が望ましいとされる。この熱が試料に伝わらないように、検知器ができるだけ離されていたのも印象的である。もう一つの装置である顕微式干渉計の場合、空調によるステージ揺れや温度の揺らぎが測定に影響する。そのため、風防を装置周りに設置することが多いと筆者は考えているが、MML では風防を大きくとり、できるだけ検知器周りの排熱を効率化するように工夫していた。検知器だけでなく、駆動ステージについても、計測に必要なステージは自動、測定前にだけ必要な調整は手動とすることで、排熱を極力抑え、試料の熱変形を低減していた。

3 点目に、計測エラーの時間周期によって対応を変えていたことである。例えば、計測によく

散見される温度ドリフトは1時間程度のものである。顕微式干渉計の起動後に起こる温度ドリフトは、事前にダミーとして計測動作を繰り返させることで、定常状態に至らせる。最も印象的だったのは、試料に小型扇風機の風を微力ながら直接当てていたことである。温度ドリフトという非確率的な計測エラーを扇風機で低減し、空気の揺らぎという確率的な計測ノイズにした方が、平均化した際に常に同じ計測結果に収束するということがあった。1日周期でも温度ドリフトは計測されるが、上記のような事前の準備で取り除くことは難しい。こうした場合、例えば、1日かけて複数回データを計測した後に、2~3時間程度のまとまりで計測データを平均化する。その平均値がどのようにシフトしているかを見ながら、平均化するのに必要なタイムスケールを見極めるということだった。

小型ミラーは計測範囲が小さく、計測が早いことを利点とする。そのため、こうした長時間計測をこれまで筆者は経験したことがなく、温度ドリフトに対して疎かった。また、所属研究室では通常の空調に風防を設置することで計測環境を作り出しているため、日単位の安定性は担保できず、新鮮であった。

なお、放射光施設の実験ホールよりも湿度が高い点が気になるが、これは施設の空調設備が古いためである。夏と冬で最も安定しやすい条件を探索した結果、現在の温度・湿度状況に落ちている。この空調設備は筆者の滞在後の夏に一新される予定で、その間、MMLは3ヶ月閉鎖される。再開後、クリーンルーム環境が適切に維持できるパラメータや装置の動作状況を確認するということがあった。

6.1.3. 非確率的な計測エラー対策（その他）

大型ミラー計測に用いられるスティッチング計測は、隣り合う2次元平面の計測データを一部重複させるようにして大量取得し、それらデータをつなぎ合わせることによって、装置の視野より広域の計測結果を得る処理方法である。このスティッチング枚数が多くなると、隣接デー

タ同士の僅かな姿勢誤差によって、二次関数で代表されるシステムエラーが発生する [27]。過去には、ミラー計測と同時に参照平面を計測することでこの姿勢誤差を取り除く手法が提案され [28]、X線集光技術の改善に大きく寄与した [29]。ESRFでも本手法を試したものの、大きな改善が見られなかったため、現在では使用しないとのことだった。むしろ使用しないことでステージ構成を単純化し、計測を早くできるという。

楕円筒形状をしたX線ミラーの計測では、スティッチング計測中の測定場所に応じ、干渉計と試料の距離及び試料の傾きを毎回調整する必要がある。後者については、連続した曲面の計測であれば簡単に最適点を見つけられるため、焦点距離の調整と一括して行なっている。つまり、最も焦点が合う場所が試料中心に来るようなアルゴリズムとすると、焦点・試料の姿勢が自動的に決定される。そのため、スティッチング計測の初回のみ試料の傾きを探索させれば、計測中は1種類の調整アルゴリズムで済む。調整アルゴリズムは、試料表面の計測結果を基に光軸方向の試料位置・試料傾きを調整する。この調整を別個ではなく一つにまとめると、撮像枚数が少なく済み、計測時間を大幅に短縮できるとのことだった。

重力による変形を考慮するため、必要であれば、基板のマウントはビームラインと同じものを使用するという。2台のフィゾー型干渉計は、試料を上側から計測できるものと側面から計測できるものの2種類があり、それらの計測結果の比較でも変形の影響を低減できるという。

平らに置かれた参照基板の形状を計測の始めに取得することで、装置内部の光学系に起因するシステムエラーを較正している [30]。それだけでなく、干渉計の視野の周辺部は、基板曲面からの反射光で装置内部の光学系が収差を発生しやすいため [27]、干渉縞が発生しない視野中心付近のみを使用して計測していた [28]。小型ミラーはスティッチング計測が不要な程計測領域が小

さく、干渉計の視野内に収めることができるため、こうした工夫をしてこなかった。

精密加工において、基板の洗浄は全てを決めると言っても過言ではない。MML では有機物の付着はメタノールで拭き取っていた。筆者は半導体プロセスに倣い超純水を使用していたが、揮発速度が早いため、余計な付着物や水滴跡が残らないという。クロスについては、筆者同様、Texwipe による Cleanroom 用の布を使用していた。なお、フランス製の Kleenex でも代用できるという。埃等については、クリーンルーム用の清浄剤で、古い写真にも使われる Collodion を Si 基板に塗っているのが印象的だった。

Collodion を薄く表面に塗布して乾燥させるとシールのようなになるため、これを剥がすと埃も一緒に除去できる。本手法の利点は、表面性状に影響することなく、基板に埋め込まれているゴミまで取り除けることである。通常、超純水で洗浄しても、こうしたゴミは取りづらい。Si 基限定の手法だという。

MML では大型ミラーを計測することが多く、時にその曲率半径は数キロメートルオーダーになるという。こうした非常に緩やかな曲面を持つ X 線ミラーの曲率は、わずかなステッチング誤差で大きく変化してしまう。ピクセルサイズの較正結果でも値が変わる [31] ということで、小型ミラーでは考えが及ばなかった工夫が見受けられた。

計測エラーの対策で最も重要なことは、「必ず複数の手法で確認すること」だった。多数の計測装置を保有する MML らしく、フィゾー型干渉計と LTP の結果がおよそ 1 nm 以下の精度で一致するという。どんな基板でも一つの計測装置のみで評価することはないため、基板サイズにもよるが、通常 1 つのミラーの評価に 1 週間程要するという。

6.1.4. MML の確率的な計測ノイズ対策

6.1.2 項で見たような、原因が明らかな誤差を取り除いた後の計測誤差は偶然誤差と言える。こうした確率的なノイズの低減には平均化が効果

的である。特にステッチング計測の場合、ノイズの周期に応じて 2 通りの平均化がある。

1 つ目に、一計測視野内での平均化である。これは定点で複数枚取得し、同じ場所での取得結果のノイズを可能な限り低減する操作に相当する。取得枚数は予め、参照平面等の既知の形状のものを使用し、ノイズ低減に必要な平均化回数を評価することで算出する。MML では視野の中でも干渉縞がほとんど現れない範囲のみを用いるため、顕微鏡干渉計のスキャンが非常に短い。そのため、定点での平均化を 32 回行なっても 15 秒程で終了していた。

2 つ目に、一ステッチング計測同士の平均化である。MML ではステッチング計測を往復で行うことにより、行きと帰りの経路を混ぜて複数回ステッチング計測を行なっている。概ね、片道にかかる時間は 1~3 時間程度であるため、全てを平均化すれば、数時間周期の計測ノイズを低減できる。6.1.2 項で見たような時系列ごとに複数のグループに分けて平均データを確認する他、行きのみ・帰りのみの計測を平均化して、両者の結果が同じ値に概ね収束しているか確認していたことが印象的だった。こうした様々なグループ分けと平均化を以て、計測誤差が確率的なノイズであるか、ノイズであるなら収束しているかを判断していた。

日本で行なっていた小型ミラーの計測でも 1 点目のような平均化は行なっていた。一方で、計測環境の空調が通常のものであるため、長時間の安定性は期待できず、これまで 2 点目のような平均化及び解析はしてこなかった。計測の妥当性は常に日本でも気にしており、今後計測環境を見直したい。

6.1.5. 計測データ解析パッケージ PyLOSt

PyLOSt は Python Large Optic Stitching software の略である。Python でのデータ解析プロセスを視覚的・直感的に提供する orange data mining platform 上で起動し、大型ミラーのステッチング計測に必要なデータ処理を一括で提供する計

測データ解析パッケージである。現在、Windows と Linux 用に GitLab 上で公開されている [32]。

6.1.2・6.1.4 項で見たようなステッチング処理・平均化・その他多種の解析は手間がかかる。特に、60 往復分したデータを往・復路ごとや時系列ごと等で解析する、複数グループにまとめて描画する、異なる光学系の倍率の結果と比較する、となると解析に時間もかかる。PyLOS は各解析プロセスをノードと呼ばれる線で繋ぐことで処理の順番を定義できるため、出来上がった解析の全体像は地図のようになる。途中で解析手法を変えても特定の場所だけ解析を実行するだけで済み、全体を毎回実行する必要はない。筆者はデータ読み込みや解析を自前のソースコードで処理していたが、プログラミングに詳しくなくても手軽に大規模データを処理できる点で強力なツールだと感じた。

MML でも日常的に使用しており、普段使用する解析手法が公開されている。現在、ステッチングアルゴリズムを搭載したパッケージは様々なものが開発されているが、orange data mining platform は放射光分野では OASYS (OrAnge SYnchrotron Suite) 等でも使用されており、今後さらに利用が拡大するのではと感じている。

6.1.6. 小型ミラーの計測

これら見学の後に、マイケルソン型顕微式干渉計を用いたステッチング計測を小型ミラーに適用する機会をいただいた。Fig. 12 にその計測風景を示す。回転ステージ上に乗るガラス基板が小型ミラーである。

小型ミラーは、中心位置での曲率半径がおおよそ 150 mm である。従来の X 線ミラーは曲率半径が数十メートルオーダーであり、短くても数メートルであった。この急峻な形状のため、これまで計測手法の開発は、顕微式干渉計・接触式プロファイラー・ビームラインでの X 線を用いて行なってきた。結果、顕微式干渉計を使用し、ステッチングを行わない計測でこれまで

評価してきたが、MLL のステッチング計測と結果を比較することを試みた。

まず、MLL の計測アルゴリズムが小型ミラーに適用できるかを確認した。次に、様々な倍率でステッチング計測を行った。最後に、計測条件が最も良いと思われる倍率で再現性評価を行った。以下結果を述べる。なお、小型ミラーは二枚組であり、長いものと短いものが存在する。曲率が強い、短い小型ミラーの計測を先に行った。

急峻な曲面の計測のため、手動で焦点を合わせる場面もあったが、概ね計測アルゴリズムは正常に機能した。対物レンズには 2.5 倍、5 倍、50 倍とあり、2 倍の補助レンズを組み合わせたこともできる。日本で行った計測が 2.5 倍・10 倍のレンズによるものだったため、これと同じ倍率を用意するとともに、補助レンズ由来の誤差を懸念して 5 倍でも計測を行うこととした。2.5・5・10 倍全ての倍率でステッチング計測を行うとともに、小型ミラーを視野に収められ



Fig. 12 Metrology Laboratory での小型全反射ミラーの計測風景

る 2.5 倍に関しては定点観察のみの評価も行った。結果、定点観察結果と 5 倍及び 10 倍のステッチング計測結果は概ね一致した。反対に 2.5 倍のステッチング結果は 1 nm 程度ながらやや差が生まれる結果となった。これについては、2.5 倍の視野が大きく、内部光学系の収差を生む曲面の影響をより強く受けたためだと考えている。そのため、再現性の評価には、視野が最も狭く、干渉縞の本数が少ない、即ち平面として計測できる範囲が最も広い 10 倍を使用した。そして、20 回の往復つまり 40 回のステッチング計測を行った。

同様に、曲率半径がやや長い小型ミラーの計測も 2.5・5・10 倍で行った。短い小型ミラーの計測結果から、安定性を踏まえると計測は 1 時間程度で終了するのが望ましい。曲率半径が長い場合、2.5 倍でも干渉縞の本数は十分少なく、計測時間の都合を踏まえて 2.5 倍にて再現性評価を行った。その際、30 回の往復、つまり 60 回のステッチング計測を採用した。

これら計測データの解析は未だ定性的なものに留まっている。小型ミラーの形状誤差が MML と日本で一致することは確かめたもの、例えば曲率半径といった絶対形状の評価はまだ途中である。今後解析を進め、日本での計測結果と比較する。得られた計測の比較結果は小型ミラーの作製に関する論文の中で発表を予定している。

6.2. 国際学会への参加

ESRF 滞在中に、2 つの国際学会で発表した。1 つ目は、ドイツで開催された IWXM 2022 (7th International Workshop on Metrology for X-ray Optics, Mirror Design and Fabrication) であり、X 線集光素子の計測関連の発表が多い学会である。感染症の影響を鑑みてオンライン開催となり、ポスター発表を行った。小型ミラーの作製結果について発表し、主にドイツの PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt National Metrology Institute) や米国の Brookhaven National Laboratory の X 線ミラー計測に携わる研究者達か

ら、具体的なミラー評価手法について質問を受けた。

2 つ目は、日本で開催された XOPT 2022 (International Conference on X-ray Optics and Applications 2022) である。現地とオンライン開催を併用したハイブリッド形式であり、口頭発表を行った。小型ミラーを大型放射光施設 SPring-8 で評価し、蛍光 X 線顕微鏡観察に応用した結果を発表した。日本人研究者から、小型ミラーの具体的な設計や焦点深度内に試料を挿入する手法に加え、硬 X 線に小型ミラーを応用する際に考えうる X 線分析手法等について質問を受けた。

いずれの学会も XOG から発表・参加しており、特に IWXM はほぼ全ての XOG メンバーが参加していた。そのため、セッションの合間の休憩時間では、XOG メンバーがコーヒブレイクがてら集まり、直前の発表について議論する光景が見られた。例えば、作り込み型のウォルターミラー作製に関する発表では、計測手法として接触式プロファイラーが使用されていた。自身の小型ミラーも曲率半径が小さいため、計測手法の妥当性評価のために使用した経験がある。本計測手法の妥当性やこういった場面で使用できそうかといった話題で盛り上がった瞬間を特に記憶している。

6.3. 感染症と国際情勢変化への反応

感染症の影響が続く中、ESRF の研究環境がどのように適応しているのか、「新しい研究様式」を知ることを目指した。また、国際情勢の変化にあたり、ESRF の対応を共有すると共に、個人的に学んだことを記述する。

6.3.1. フランス国内の感染症状況と施策

フランスは 2020 年の人口が 6739 万人と日本の半分程であるのに対し、COVID-19 の波が深刻だった 2022 年 1 月 25 日頃には、1 日の新規感染者数が瞬間的に 50 万人を突破している。日本では 2 月 6 日に瞬間的に 10 万人の新規感染者を確認しており、これと比較して非常に大きな影響を受けた国と言える。日本と異なり、感染を遅ら

せるための行動制限等を設けることがなかったためか、感染者数のピークは鋭く立ち上がり、鋭く元に戻る傾向を示す（以上 Google の COVID-19 感染情報より）。

COVID-19 ワクチン接種率は同 1 月 25 日時点で 78.4%だが、当時接種可能だった成人のみを分母とすると、接種率は 90%に迫る勢いだった。その背景には、フランス政府が公共機関や飲食店で衛生パス（pass sanitaire）の提示を求めたためだと考えられる。この衛生パスは 1 月 24 日からワクチンパス（pass vaccinal）へと移行し始め、ワクチン接種の最終日から数えて有効期限内であることを証明する仕組みへと変化した。通常 2 回とされるワクチン摂取後から一定期間経過しても、ブースター接種によって有効期限を延長できる。筆者も日本でのワクチン摂取から半年経過するのを機に、フランスでブースター接種を受けた。その他、ワクチン摂取を済ませると COVID-19 感染症検査が無料となる。こうした摂取後の利点を踏まえると、実質的なワクチン接種及びブースター接種の義務化が行われていたと言える。

この仕組みを基本として、屋内や交通機関でのマスク着用義務は 3 月まで続いた。その後、ワクチンパスは解除となり、公共交通機関や病院等を除いてマスク着用義務も無くなった。高齢者や自衛する人以外、外を出歩くマスク姿の人はほぼ見かけない。気温が上がる春に向けて、人々の生活は感染症前の様子に戻っていくような印象を受けた。その中でも、濃厚接触を追跡するアプリは引き続き使用され、日本同様に、陽性者が周囲で検知された場合はスマートフォンに通知が来るようになっている。

6.3.2. ESRF 内での COVID-19 対策

先述のフランス国内の感染症対策より、ESRF 内での対策は厳格だと言える。まず、3 月以降でも建物屋内ではマスク着用が義務付けられ、その励行のために ESRF の Central Building にてマスクが無料配布されていた。敷地内の食堂はアクリル板による仕切りが個々人ごとに完璧になさ

れ、向かいで座る人の声が反射して時折聞こえない程である。使用された席は、食堂スタッフによって逐一消毒され、椅子を机側に傾けることで消毒済だと示す。一方、外部飲食店ではこうした仕切りがないため、集団での外食は極力控えるように通達されていた。会議室・実験室・実験ホール内のハッチには人数制限が明記され、密を避けるようになっている。ESRF 職員が陽性になった場合、直ちに敷地内の保健センターによって濃厚接触者の特定が行われ、必要であれば検査・隔離・消毒が行われる。感染者数は職員のメーリングリストに毎日通達され、感染者の最終出勤日・作業場所・濃厚接触者の人数が記載されている。筆者も同僚が度々陽性となり、保健センターで検査を受けた。

このように、フランス政府の施策に ESRF もすぐさま追従する訳ではない。筆者が滞在を開始した 1 月から少なくとも 4 月まではリモートワークが奨励されており、多くの事務職員が現地ではなく自宅から作業していた。XOG メンバーも週 2 日のリモートワークが奨励されていたという。MLL に関してはリモートワークで補えない実験が多いため、メンバー同士交代でリモートワークを行う他、通常の職員より現地作業を増やして実験を進めていた。ESRF ではリモートワーク用のシステムが予め準備されている。VPN を使って敷地外から自身の端末にアクセスできるため、感染症初期も特に混乱はなかったという。感染症が落ち着いた 5 月も働き方の選択肢としてリモートワークは引き続き認められ、育児等含む各自の都合に合わせて働けるように配慮されていた。

ミーティングは基本オンラインで行われ、半年に一度の General Assembly も全て zoom 上で行われた。一方で、ESRF 内のユーザーを集めたワークショップ（Users' Workshop や Science Day）や、外部から招聘した講師講演の現地中継（ILL-ESRF Colloquium や ESRF Scientific Webinar）等、各種イベントを月 1・2 回の頻度で積極的に開催しており、知的活動を止めない姿勢が随所に感じられた。講演内容は研究成果に

留まらない。例えば、考古学分野の科学者が講演者として招待され、感染症勃発後に重大な成果を上げた際の教訓をどのように ESRF の研究に活かすかが講演・議論されるなど、実践・実務的な内容も多い。こうしたイベントは ESRF に在籍する全ての人に参加可能であり、研究所全体として新しい学びの場を追求し職員に提供する活気を感じた。

6.3.3. 戦争と war

期せずして渡航時期が大きな国際情勢の変化に重なり、平和ボケとも呼べる自身の悠長さに気づかされる場面があった。

地理的に近いこともあり、ウクライナ情勢はフランスで頻繁に報道されていた。3月頭には国境付近での緊張を伝える報道が連日なされる。そして、ロシアの侵攻が始まった日のことだった。筆者が「戦争になってしまうのだろうか」と同僚と喋っていた際に、その1人は、「戦争は始まった」と真顔で返答した。その際、筆者は自分の至らなさによりやく気づき、「今、目の前にしていることが war なのか」と初めて実感したのだった。

2022年で28歳となる筆者は、恥ずかしながら生きている内に戦争を見るところはおそらく想像していなかった。記憶を辿ればイラク戦争、アフガニスタン侵攻、IS等、武力衝突はたくさん存在した。ただ、小学3年生の筆者には、イラク戦争はどこか遠い国の出来事で実感が湧かなかった上、この戦争は「正義」と「悪」の戦いだと勝手に認識していたかもしれない。その他の例は「戦争」として語られることはなかったように思われる。聞き慣れた言葉は「侵攻」だった。

戦争というと、第一・二次世界大戦が筆者には思い浮かぶが、日本で言う「戦争」は「多くの国が参加して、武力でお互いを攻撃している状況」のように一般市民には思われる。他には、宣戦布告の有無等、明確な用語の定義もあるだろう。今回の出来事は、関連諸国の支援を除けば、直接対峙する国はロシアとウクライナ

の二カ国であり、先の定義に照らし合わせると「戦争」とは呼ばないのかもしれない。あくまでロシアが物理的に進出している状況は「侵攻」と呼ばれるような気がするのだ。そのため、当初は invasion や aggression という言葉を使って同僚と会話をしていたが、そのうち、目の前の事象が war であると気づき、衝撃を受けた。

フランスから国内に帰ると、やはり今回の出来事はウクライナ侵攻と報道されることが多いように思う。試しに「ウクライナ 戦争」と調べると、検索上位に来る記事は BBC や CNN 等、海外メディアの翻訳記事が多いように見える。こうした言葉のニュアンスの違いは、今後の自分の考え方や主張を変えかねない。極端に言えば、日本の文脈で「今後戦争は起きていない」としても、海外の文脈では「war は勃発している」かもしれないのである。

侵攻開始日、同僚の携帯電話にかかってきた留学中の子供からの電話のトーンが、直面する事態の深刻さを物語っていた。そして、当然のように享受していた平和はたった数ヶ月で崩れ去るのかと実感した。

6.3.4. ESRF の国際情勢変化への対応

こうした個人的なショックを経て、事の甚大さをさらに痛感する場面があった。

ESRF は欧州の様々な国から出資を受けて運営されている。資金面だけでなく、職員も多様な国から集まる研究施設である [33]。半年に一度開催される General Assembly は 6.3.2 項でも登場したが、筆者も含め、こうした多様な職員が全員出席する重要な会合である。概ね1時間程度の内容であり、ESRF の施設長にあたる Director General が、主要な研究成果を始めとする直近半年の ESRF の進展や現状を紹介し、次の半年に向けた目標を示す、といった構成となっている。会の最後には職員との質疑応答が行われ、非常に活発な討論が見られる集会である。この集会が緊急事態という名目で3月23日に開催され、今回のウクライナ情勢に対して施設の決議が発

表された。決議は役員による投票で事前に決められたもので、筆者を含む関連職員全体に zoom で告知する形式となった。

その内容は、「ロシア政府・ロシア系の組織からの援助を停止し、それら組織に所属する研究者個人の利用を禁止する」というものだった。文面では当然のように聞こえるかもしれないが、実は、筆者は非常に驚いた。

侵攻から日が経っており、緊急集会開催の通知を事前に受けている。その時点で、軍事力を行使したロシア政府やロシア系の国営組織からの援助を ESRF が受け付けないことはある程度予想できる。一方で、この制裁で個人が対象になるとは思ってもみなかった。政治的・人道的な問題はそのレベルで対処されるべきであって、本来人類に平等に開かれる学問・科学的な土俵でこれを議論することは、問題を履き違えているように筆者には思われたのである。

顔をやや赤くして「現状起きている事象を見て、何もせずにはいられない」と怒り口調に語る役員も、筆者にはやや論点がずれているように思われた。その怒りは理解できるものの、果たして矛先は個人に向けられるべきなのだろうか。「ロシアを全て受け付けない」という結論は、議論の面でも効果の面でも果たして受け入れられるものなのだろうか。盛んに報道されるスポーツ大会への選手参加の是非と似た議論である。

後半の質問セッションで、外部の人間ながら筆者は上記の疑問をぶつけるか、非常に悩んでいた。質疑応答の序盤では、施設予算への影響や共著者に関連機関が入っている場合の対応等、上記の決定を受け入れた上での質問が多かったためである。しかし、後半で「今回の決議が何を目的としているのか不明確だ、この制裁で本当に効果があると言えるのか」といった決議本体に対する疑問の声も上がり、戸惑っているのは筆者だけではないと感じた。

この判断に至った事情について、筆者なりに理解はできる。ESRF の利用憲章には「平和目的に限る」といった一文があり、ロシア政府及び

国営組織がこれに反するという解釈である。こうした集団との関連の無さや、民間人攻撃への断固拒否を誓約書等で宣言させれば、個人利用は許されるのではないかと筆者は考えたものの、組織としては安全策を取り、「一律禁止」とする他なかったと拝察する。声明に対する筆者の戸惑いを述べたものの、ここでより強調したいことは、「宣誓書等で安全に使用される、という紳士協定の前提すら既に打ち壊された」という段階にまで達したのではないか、という点である。

公の声明はインターネット上でも閲覧可能だが [34]、筆者が出席した 3 月 23 日時点では、個人に対する制約として以下が挙げられていた。即ち、**2022 年度の割当済ビームタイムの取消・今後のビームタイム選考からの自動的な除外・共著含む論文著者としての ESRF 利用結果の出版停止**、であった。論文については現在査読中のものも含むという。共著に関係者が含まれた場合、研究への貢献を無視する訳にはいかないため、更なる通知がなされるまで当該内容は出版停止ということになる。質疑応答の際に、ロシア国籍で ESRF 所属の研究者や、フランスの大学に所属するロシア人学生で ESRF を利用するユーザーについて、その処遇が質問されており、そうしたケースは個別に対応するとアナウンスされていた。

個人的な感想であり、対応の良し悪しを論じる意図は筆者に無いが、少なくとも、**ウクライナ情勢の変化は各国の研究と無縁ではなく、放射光施設単位でも大きな動きがあることを念頭に置く必要がある。研究成果の出版まで影響を受けている以上、日本と海外での対応の差を意識しないと、国際的研究の足枷になりかねないと危惧する。**

6.3.5. 決議に対する個人的な反省

ロシア国籍の研究者も多く参加する ESRF で、上記のような個人を対象とした決議が取られたことに、筆者は衝撃を受けていた。過去に海外でウクライナ出身の学生にも出会ったし、ロシア

人の友人もいる身としては、大事なはその人の所属よりも、人格や尊重する考え方である。とはいえ、外部の人間ながら集会に出席し、今回の声明を受容したことには違いない。

筆者は主にNHKやBBC・CNN・NPRを情報源としている。フランス滞在中にテレビ番組をつけていることもあったが、端的に言えば、これらは全て「西側」の情報である。片方の側の情報を主に取得しており、ロシアメディアの情報が取り上げられると、それらは情報統制のための「フェイク」として紹介されることが多い。

この「フェイク」という言葉は、筆者は非常に危険な言葉だと考えている。情報のほんの一部でも虚偽とすれば、誤りだと簡単に主張できる。一方で、全てが正しいと証明することは非常に困難である。安易に使われれば、とある一視点の主張を強固にしていまいかねない。情報統制について議論されることが多いが、筆者も西側の情報に偏っている点では、情報統制を受けているのと変わらない。そして、その中には「フェイク」といった言葉で他の主張が排斥されている。

物事を判断する上で何かしらの色眼鏡は避けられないが、その色を薄める努力は可能だと筆者は考えている。それにも関わらず、ロシア語を理解しないこともあり、西側以外の主張を筆者は取り込めず、釣り合いが取れない。見聞きした点と点を繋いで解釈することは簡単だが、得られる情報は非現実的かつ衝撃的で、事象が都合よく切り取られていないか、慎重になってしまう。誤解を恐れずに言うならば「実はロシアで言われている内容の方が偏見は少なかった」「自分で情報を取りに行かなかったために、知っていたら支持しなかったであろう方針を支持していた」等、逆の立場になっていないだろうか。「正義」と「悪」で論じられることが多い中、ロシアが被害者となる「正義」の文脈は、この侵攻の前に無かったのだろうか。

国家間の争いは、政治的に上の立場に責任が行きがちである。故に、市民は責任をとる必要

がないかのようにあたかも麻痺してないだろうか。市民の自分は無責任に物事を考えていないか、非常に不安定な気持ちになる。大袈裟かもしれないが、今回のESRFの決議はこの状況を物語っている。役員が決めた方針として言われるがままに受容し、自分は無責任に物事を考えていないだろうか。

凄惨な景色は今起きていることであって、不安や葛藤を言い訳に思考停止してはいられない。死亡者の発表が異なる出来事は過去にもあるが、おそらく似た状況で起きてきたはずである。筆者は暴力を一切認めない。その立場の元、誰か歴史家の目線で語られる前に、何が起きているのか、憂鬱で凄惨な映像だとしても目に留める必要があると感じる。個々人として今何ができるかも大切だが、まずは自分がどう判断するかをせめて見失わないようにしたい。

戦禍に遭われた全ての方々にお見舞い申し上げますと共に、一刻も早い事態の収束を願う。

6.4. 長期滞在での気づき

過去に短期留学は何度か経験したが、全て学生として大学に滞在しており、留学生として住居等に何らかの恩恵を受けてきた。その点で、今回は、短くも異国に「住民」として滞在できたと感じている。

ビザ等は保有するものの、ESRFとは雇用関係にないため、今回は後ろ盾の無い個人として長期滞在している。通常1年以上住む際に必要な滞在許可・社会保険等の書類手続きが要求されたり、賃貸契約を締結しないものの連帯保証人を仏国に準備したりした。感染症の影響で事務手続きも進まない中、雇用関係に無い個人の滞在とあって、難しい局面が多かった。観光客と住民として過ごす違いである。

実は、日本出発の2時間程前に、滞在先がダブルブッキングでキャンセルになった旨を伝えるメールを受け取った。トラブルを想定し、最初1週間はホテルを別に予約していたため事無きを得たが、まさか備えが活きると思わず、事務の風土の違いを初めから噛み締めていた。

事務系の多くが早く帰宅することもあり、メールでのやりとりだと解決しないことも多いが、その一方で、直接滞在先・銀行・役所の受付に行くと、案外簡単に解決する。筆者の仏語がどんなに下手でも相手が辛抱強いのが印象的で、明らかに不機嫌そうな顔をしてもしらうことなく向き合ってくれる。フランスの人は世話焼きだと個人的な印象を 5.5.4 項で述べたが、自分が住む世界に存在する相手には真剣である。観光客として大目に見てくれそうなレストランの予約ならまだしも、住民ならではの手続きの際にもこの点を感じた。確かに帰宅も早く、仕事もお喋りが多いが、フランスの現地の人は、目の前に確固として存在する人に毎日忙しいのではないかと思った。

非英語圏を活かして仏語で生活できた点も収穫である。明らかにアジア系の筆者を見ると他国では英語で話しかけてくることが多い。それに対し、あたかも受け入れてくれているかのように、フランスの現地の人は仏語で話しかけてくれる。スーパーマーケット・地元の青空市場・パン屋・チーズ屋を訪れ、住民がどのように普段過ごすのか観察しながら拙い仏語で日々を送っていた。行きつけのレストランで大変良く面倒を見てもらい、フランス料理の食べ方で気になる点から Digestif と呼ばれる食後酒の文化まで、様々にご教示いただいた。滞在中に大統領選挙があったが、フランスでは選挙カーは存在せず、テレビでの候補者討議がメインである。極右派が台頭していることもあり、人々の反応は地域や職業で様々である。筆者に投票権

はないが、様々な人が候補者や政治構造について個人的に語ってくれたことも新鮮だった。

美食や歴史ある建造物、Fig. 13 のような欧州特有の雄大な自然を時に嘯みしめつつ、現地の人柄や人種・政治的な分断も垣間見た体験は、「観光客」の立場では不可能だった。現地に少し馴染めた経験は、今後の糧になると感じる。また、フランスという歴史ある国に触れ、国際情勢の変化を目の前にし、過去に同じようなことが何故起きて、先人はどう考えたのだろうと思いを馳せるようになった。「世界史を疎かにしたことを後悔している」と同僚に漏らしたところ、何故か笑われたのが印象的である。

7. 今後の研究の方向性

7.1. 研究成果発表

多層膜を施さない小型ミラーの計測内容は、自身が開発した手法や ESRF の計測技術の妥当性を示すものであり、原子スケールの再現性・正確性が求められる X 線集光素子の計測分野では重要な成果である。今後この検証結果を論文として公表する可能性があり、継続して議論していきたい。

今回は自身の研究のための技術習得を第一の目的としているが、その技術の多くは文献等で閲覧できない秘匿情報である。工学分野では、科学的でない装置固有のパラメータや工夫を論文として公開しないことが見受けられるが、個人的な利用目的という名目で、これら情報を今回現地で取得できた。得た情報を直接公開するこ

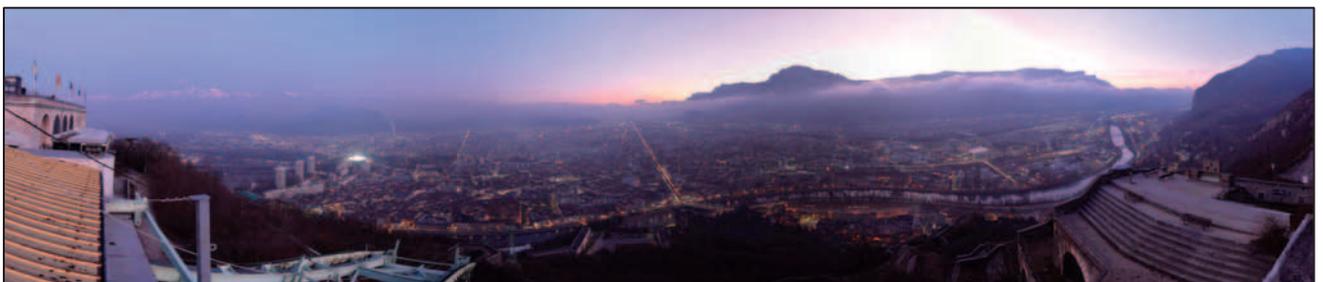


Fig. 13 Bastille 城塞から見る Grenoble の街とヨーロッパアルプス

とはないが、今後の多層膜の研究に活かしていきたい。

7.2. 方向性

今回の滞在により、X線を極限集光できる小型多層膜ミラーは作製可能だとする根拠がある程度得られた。習得した技術から、所属研究室保有の成膜装置の設計を見直し、多層膜作製装置に改造する。多層膜に使用する材料についても、日本で経験したことがない知見を得た。基本的な装置動作の試験や簡易的な多層膜の作製実験を通じて改造した装置の試験を行い、新設計の多層膜作製に挑戦する。

8. 謝辞

本渡航は独立行政法人日本学術振興会若手研究者海外挑戦プログラム、及び、公益財団法人高エネルギー加速器科学研究奨励会（以下、加速器奨励会）の国際交流助成のご支援を受けて実施されました。感染症情勢が見通せない中、延期されていた本渡航が急遽決定したにも関わらず、特に加速器奨励会には寛大にご対応いただきました。ここに記してお礼申し上げます。

滞りを快く承諾いただき、ご指導いただいた中でも特に Multilayer Laboratory の Dr. Christian MORAWE, Dr. Patrice BRAS, Mr. Sylvain LABOURE の名を記して深甚の謝意を表します。また、Metrology Laboratory の Dr. Amparo VIVO, Mr. François PERRIN、Compound Refraction Lens Laboratory の Dr. Thomas ROTH には計測について有益なアドバイスをいただきました。滞り中は X-ray Optics Group の皆さん、特に Dr. Ray Barrett, Mr. Benoît PICUT, Dr. Rafael CELESTRE に気にかけていただきました。ここに記して感謝申し上げます。

9. 特記事項

本報告書は個人的な所感を述べたものであり、特定の団体・集団との利害関係は一切ありません。なお、本稿の写真は個人的なものであり、ESRF に関わるものは掲載許可を頂いています。

参考文献

- [1] T. Shimamura *et al.*, *Proc. SPIE* **11492**, 114920P (2020).
- [2] 島村 勇徳ほか, 2021 年度精密工学会秋季大会 学術講演会講演論文集 543 (2021).
- [3] J. C. da Silva *et al.*, *Optica* **4**, 492 (2017).
- [4] R. Barrett *et al.*, *Synchrotron Radiat. News* **23**, 36 (2010).
- [5] Ch. Morawe *et al.*, *Proc. SPIE* **6705**, 670504 (2007).
- [6] Ch. Morawe *et al.*, *AIP Conf. Proc.* **1234**, 720 (2010).
- [7] Ch. Morawe, *Proc. SPIE* **12240**, 12240-2 (2022) [to be presented].
- [8] Ch. Morawe *et al.*, *Proc. SPIE* **10760**, 1076005 (2018).
- [9] Ch. Morawe *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **70**, 3227 (1999).
- [10] S. Matsuyama *et al.*, *Sci. Rep.* **8**, 17440 (2018).
- [11] 金 章雨ほか, 2012 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 1155 (2012).
- [12] Ch. Morawe *et al.*, *Proc. SPIE* **9588**, 958803 (2015).
- [13] 半田 宗一郎, 大阪大学博士課程論文 (2009).
- [14] M. Hu *et al.*, *Surf. Sci.* **513**, 530 (2002).
- [15] M. Hu *et al.*, *J. Appl. Phys.* **94**, 3492 (2003).
- [16] L. Nevo *et al.*, *Rev. Phys. Appl.* **15**, 761 (1980).
- [17] L.G. Parratt, *Phys. Rev.* **95**, 359 (1954).
- [18] M. Osterhoff *et al.*, *Proc. SPIE* **8502**, 850208 (2012).
- [19] D. Schulz *et al.*, *Cell Syst.* **6**, 25 (2018).
- [20] http://www.durablepower.eu/images/downloads/hoh/03_02_03.pdf [accessed on June 22, 2022].
- [21] A. Vivo *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **87**, 051908 (2018).
- [22] A. Vivo *et al.*, *Proc. SPIE* **10385**, 103850N (2017).

- [23] A. Vivo *et al.*, *Proc. SPIE* **7801**, 780107 (2010).
- [24] A. Rommeveaux *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **616**, 183 (2010).
- [25] B. Adapa *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **92**, 113103 (2021).
- [26] <http://www.calipsoplus.eu/joint-research-activities-jra/jra1-moonpics/> [accessed on June 22, 2022]
- [27] K. Yamauchi *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **74**, 2894 (2003).
- [28] H. Mimura *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **76**, 045102 (2005).
- [29] H. Mimura *et al.*, *Nat. Phys.* **6**, 122 (2010).
- [30] H. Yumoto *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **87**, 051905 (2016).
- [31] A. Vivo, *IWXM 2022 Day 2, Session 4* (2022) [presentation].
- [32] https://gitlab.esrf.fr/moonpics_stitching_2018/orange-pylost [accessed on June 22, 2022].
- [33] <https://www.esrf.fr/cms/live/live/en/sites/www/home/about/organisation/members-and-associates.html> [accessed on June 22, 2022].
- [34] <https://www.esrf.fr/home/news/general/content-news/general/statement-of-the-esrf-council-on-the-aggression-against-ukraine-1.html> [accessed on June 22, 2022].

加速器科学インターンシップ終了報告書

実習期間：2022年2月28日（月）～2022年3月6日（日）

新潟大学理学部4年 五十嵐拓朗

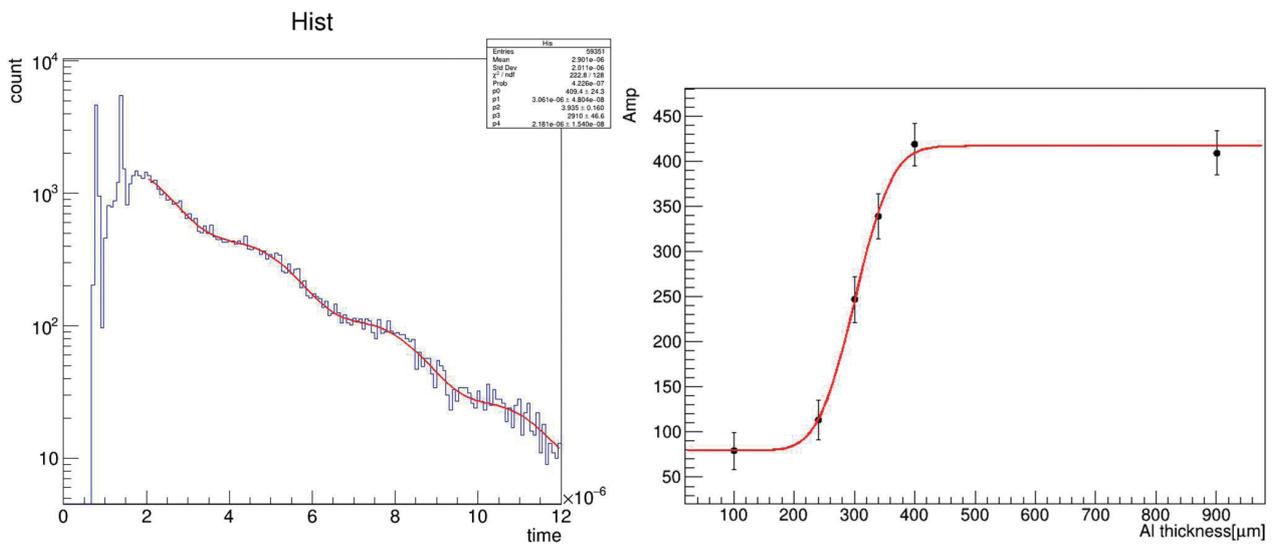
サフェスミュオン（表面ミュオン）の運動量を測定した。ビーム由来のミュオンのスピンの向きに対して磁場を印加した。これにより、ミュオンのスピンの歳差運動を測定することができ、アルミ標的の厚さを変化させることにより運動量を測定することができる。

実験ではトリガー1万発分を用いた。時間に対するカウント数をグラフに表す。この時、フィッティングを行うがフィッティング関数は

$$f(x) = [A] \sin\left(\frac{2\pi}{[T]}t + [\phi]\right) * \exp\left(-\frac{t}{[\tau]}\right)$$

をもちいた。

この測定を、Alの厚さ0,100,240,300,340,400,900 μm で行った。フィットによって得られた振幅を厚さごとにプロットしフィッティングをした。



ビームの測定結果 (Al 900 μm)

振幅の標的厚さ依存

表面ミュオンのビームをアルミやアクリルに当て、運動を止め測定する実験を行った。アルミの厚さを変化させ、どの厚さからミュオンが止まり始めるかなどを測定した。また、測定したデータを用いて自分たちでも解析を行い、プログラムの学習もできた。

課題研究のテーマとしてミュオンに関するシミュレーションを行ってきたが、実際の実験環境を見るのは初めてだった。実験施設のスケールや安全配慮などといった実際の現場だから感じられることが多く経験となった。

実際の研究の現場では、1つの測定で30分ほどかかることも多かった。それにより得られたデータを解析し考察、再度測定で30分ほど地道な作業であることを強く感じた。

シミュレーションでは数秒や長くなって数分で終わる内容が実際の実験では数十分になることに驚きがあった。

シミュレーションでは当たり前なのが現実起きると感動するものがあった。ミュオンビームに磁場を与えることにより、ビームの方向を曲げられることはシミュレーションで確認しており、理論や式として知っていたが、それを実際に測定観測することができた。実感がわき感動したことが印象強かった。

KEK インターンシップ報告書

大阪大学工学部環境・エネルギー工学科 4年 守實友梨

1. はじめに

本インターンシップは加速器の概要・操作の十分な理解のため、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 大谷将士助教の指導のもと 2022年3月1日～2022年3月11日の期間に実施されました。茨城県東海村 J-PARC の皆様に深謝いたします。

2. 実習概要

加速器に対する全般的な理解のため、J-PARC リニアックにおける上流部分の RFQ スタンドにおけるビーム出力調査やモニタによるビームの測定・及びシミュレーションとの比較を行った。また、J-PARC 内の施設見学や筆者の専門分野である BNCT 施設の見学を行い、知見を深めた。

2.1. RFQ スタンドにおけるビーム測定

2.1.1. ビームシミュレーションによる計算

ビームの測定の前に、TRACE 3D を用いてビームの挙動の確認を行った。TRACE 3D は転送行列を用いたビームダイナミクス計算が可能なシミュレーションソフトである。初めに RFQ スタンドの環境と同様に四極電磁石を配置し、該当する電圧を設定すると、想定されるビームエミッタンスと Twiss パラメータが出力される。

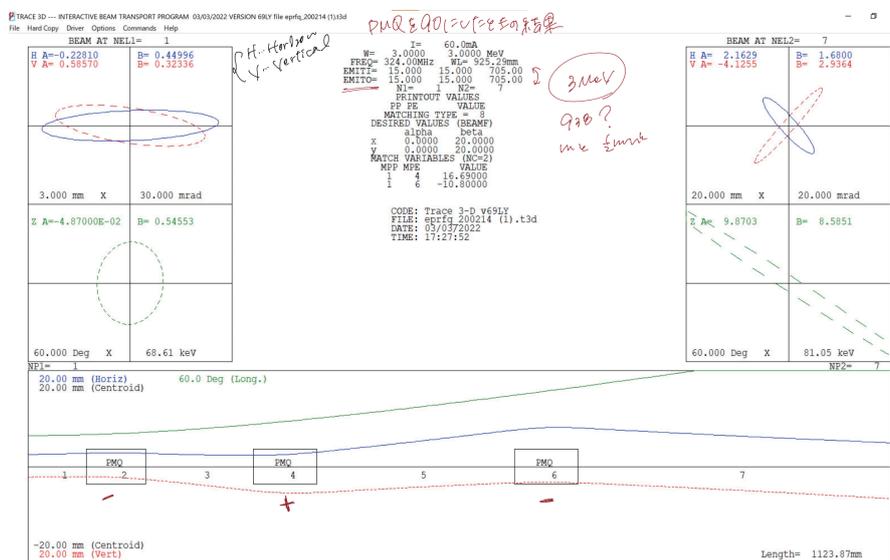


Fig. 1 TRACE 3D ビームシミュレーションの例

2.1.2. ビームエミッタンスの実測

RFQ は 3 MeV 程度の低エネルギーによる加速を行う。加速方法は高周波加速であり、これは荷電粒子の進行に加速の位相を合わせることによって行われる。今回は RFQ スタンドでのビーム出力とビームエミッタンスを測定した。RFQ テストスタンドでは四極電磁石が 3 つ使用されているが、今回は Fig. 2 に示すようにイオン源から最も離れた位置にある電磁石の電圧を変化させてビームの挙動を観察・測定した。

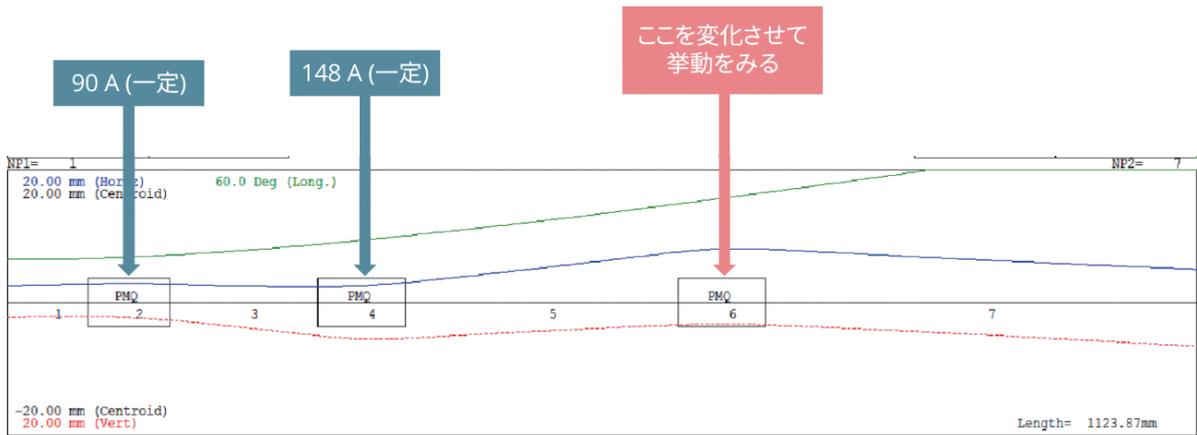


Fig. 2 ビームエミッタンス測定実験概要

2.1.3. 結果

エミッタンスモニターによる測定結果を Fig. 3 に示す。3つ目の電磁石である QM3 の電圧を強くすると、ビームの形状はより細くなった。ビームの傾きは電圧を変更しても相違が少なかった。

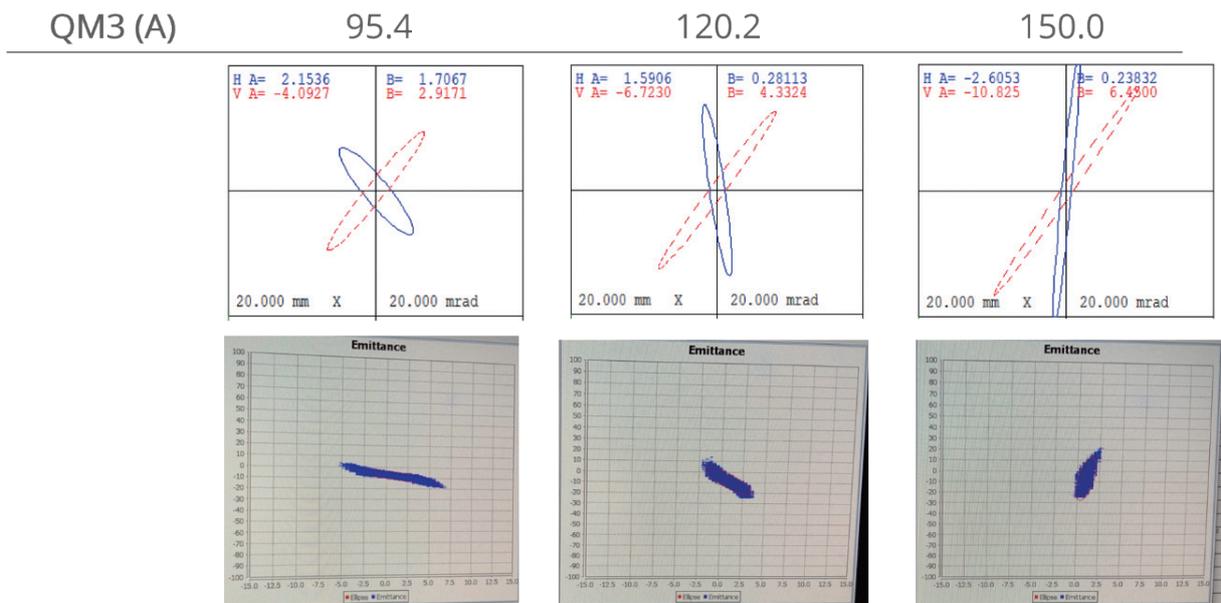


Fig. 3 測定結果とシミュレーションの比較

実験結果について Fig. 4 にプロットした。縦軸はビームサイズ、横軸は四極電磁石の K 値である。その後、プロットに基づいてカーブフィッティングを行った。フィッティングは以下の式を用いて行った。

$$\sigma = \sqrt{a(K - b)^2 + c} \quad (1)$$

(1)式でフィットすることで、フィッティングパラメータ a,b,c からエミッタンスの算出が可能である。

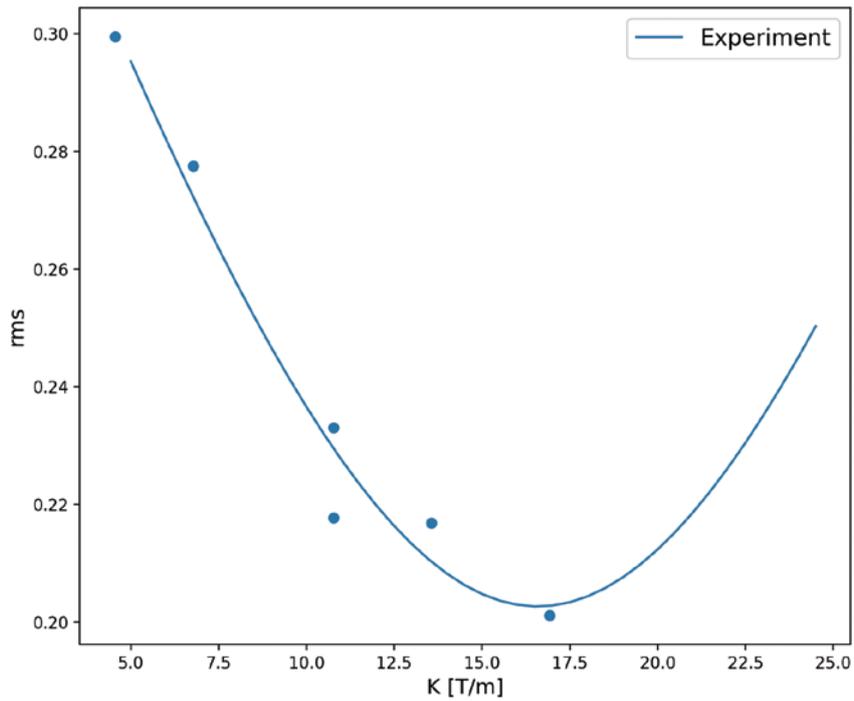


Fig. 4 測定結果のプロットとフィッティング結果

また、ワイヤーエミッタンスによる測定結果とシミュレーション結果・そのフィッティングについて Fig. 5 に示す。Fig. 4 と同様、フィッティングは (1) 式を用いて実施した。Twiss パラメータにおいて、 β は実験に比べ極めて近い値を得ることができた。Table. 1 にはシミュレーション結果と実験結果のフィッティングから得られた Twiss パラメータ・エミッタンスについて各々示す。

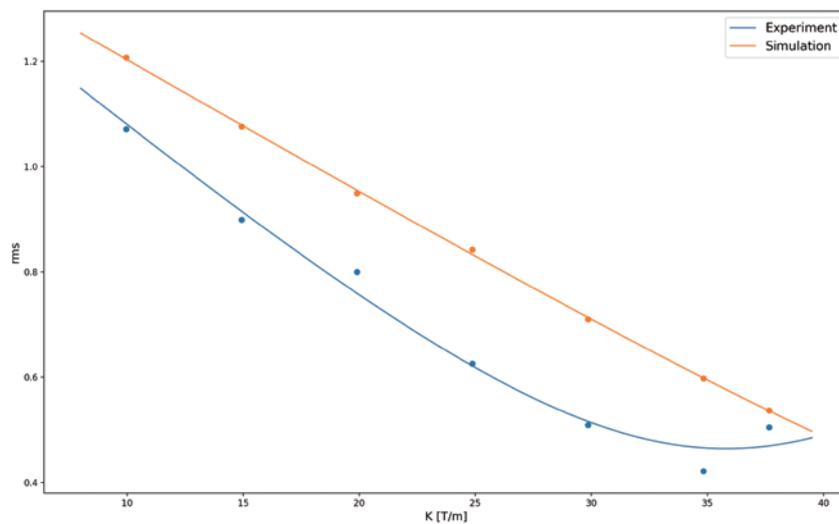


Fig. 5 ワイヤーエミッタンスモニタにおけるシミュレーションと実験結果の比較

Table 1 Twiss パラメータとエミッタンスの結果

	α	β	σ	ε
シミュレーション	-4.716	0.08634	0.0003428	1.361e-06
実験	-2.912	0.08136	0.0004963	3.028e-06

2.1.4. 考察

Twiss パラメータについて相違は少ないものの、エミッタンスではシミュレーションと実験の間に 3 倍程度の差が見られた。これは、シミュレーションでは空間電荷効果が考慮されていないためであると考えられる。空間電荷効果はビームのエネルギーが低い際に考慮せねばならないものであり、電子が互いにクーロン斥力を及ぼしあって伝導するようになる現象のことである。TRACE 3D では転送行列の計算のみであるため、空間電荷効果分だけ実験値と相違がみられると考えられる。

2.2. ミューオン加速器及び iBNCT の施設見学

現在設計・施工中であるミューオン加速器の見学を行った。ミューオン研究グループの研究者や博士学生の方々ににご協力いただき、現在設計中の加速器についての説明を詳細に頂いた。

また、自身の研究分野である BNCT についても知見を深めるため、筑波大の iBNCT 施設の見学も行った。筑波大学の熊田先生に BNCT の現状やプロジェクトについてご教授頂いた後、加速器や照射施設について案内頂いた。

3. 最後に

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設の皆様には大変お世話になりました。大谷助教をはじめ、研究室の方々にも研究のご紹介から滞在時の生活についても多くの助言を頂き、充実した滞在となりました。また、自身の研究分野である BNCT 施設だけでなく、学会でも良くお見掛けしていた熊田先生とも談義をすることができ素晴らしい機会になりました。最後に、インターンシップに携わる全ての方々に深く感謝申し上げます。

KEK 加速器科学インターンシップ終了報告書

東京理科大学 理学部物理学科 3年 須部実咲

実施日：2022年3月28日～4月1日

共同参加者：神戸大学 理学部物理学科 4年 濱田悠斗、山下智愛

指導教員：諏訪田剛 (KEK)

1. 実施概要

<ul style="list-style-type: none">• 3月28日 (1日目) 集合 KEK 紹介ビデオ 体験館見学 放射線業務従事者ビデオ PF、PF-AR 見学 cERL 見学 ATF、STF 見学 Belle- II 見学 Super KEKB コントロールルーム見学	<ul style="list-style-type: none">• 3月30日 (3日目) Super KEKB 入射器加速装置見学 実習準備 陽電子ビーム計測実習 実習で得られたデータ解析
<ul style="list-style-type: none">• 3月29日 (2日目) Super KEKB 入射器説明、見学、 コントロールルーム見学 KEK について講義 陽電子ビーム計測実習に向けての講義 計測実習の手順確認	<ul style="list-style-type: none">• 3月31日 (4日目) データ解析 発表準備、資料作り
	<ul style="list-style-type: none">• 4月1日 (5日目) 発表準備 発表 まとめ 解散

2. 実施内容

◎施設見学

• PF、PF-AR

PF と PF-AR は、電子の運動方向が変化するとき電磁波を放出することを利用して、フォトンファクトリーと言う名前の通り、電子を用いて 10 keV 程度のエネルギーの電磁波を生成し、生成された電磁波を用いた生命系などの様々な実験が行われている施設である。



- cERL

電子を加速させたあと電子のエネルギーを回収できるようにすることで、不要になった電子を捨てる時には低エネルギーになっていて、回収したエネルギーは再利用する、といった“エコ”な技術を確認するための実験施設である。

エネルギーを回収して電子を低エネルギー状態にすることができれば、捨てる時の心配をせず電子を高エネルギー状態にすることができる。

電子のエネルギーを吸収するのは逆側の直線部分では、電子を波々に動かすことで光を干渉させて、強いビームを作る実験も行われている。

- ATF

ILC を実現するために、ビームのエミッタンスを小さくする技術を確認するための実験施設である。エミッタンスとは簡単に言うとビームの広がりのようなものである。ILC で高エネルギーを実現するためには質の良いビームが必要となる。光電効果を用いた電子銃で電子を生成し、70 m 加速させて、マグネットやビームモニターでビームをよりよいものにしていく。このためには nm 単位でのビームの調節が必要になる。



- STF

ILC を実現するために、超伝導を用いて電子を加速させる技術を確認するための実験施設である。超伝導状態にするために液体ヘリウムを用い、低温で容器が収縮することも考慮した形になっている。抵抗をなくすために、内部はつるつるな状態にしないといけないため、硫酸とフッ酸で洗浄され不純物が混じらないように接合される。ILC を実現するためには 8000 個の超伝導加速装置が必要とされている。

- Belle-II

標準理論を超える理論を構築するために、電子と陽電子の衝突実験を繰り返して結果を解析し、現在の標準理論では説明のつかない現象を探索している測定施設。多数の国や機関が協力して運営を行っている。



・入射器

熱電子放出や光電効果を用いて電子を生成し、加速管を用いて電子をターゲットに衝突させることで陽電子ビームを作成している。

陽電子生成の詳しい方法については、発表資料に記載しております。

◎陽電子ビーム計測実習

入射器を2時間ほど実習のためだけに貸していただいて実習を行った。

陽電子ビームを生成していただき、カーソルを用いてオシロスコープの波形を測定する人、実験ノートにデータの記録を取る人、得られたデータをその場でグラフにプロットする人に分担を分けて行った。

実験できる時間は限られていたので、集中して行った。解析に必要な最低限の数のデータを取ることができたが、さらに数が多ければより深く考察できたかもしれない。

詳しい実習の内容と、得られた結果、考察は発表資料に記載いたしております。

◎実習を終えての感想

初日の施設見学で、今までは本などで知識として知っているだけだった施設の内部を実際に間近で見ることができ、また研究者の方から説明を受けて質問することができて、大変貴重な経験になりました。KEKでは、加速器で実験をして、得られた結果を解析して、理論研究にフィードバックするだけでなく、新しい加速器を開発したり今ある加速器をよりよくするにはどうしたらよいかを考え、加速器のソフトウェア・ハードウェア面で理論研究を行ったり実際に試してみたりする人がいたり、ビームを制御する人がいたり、そのための研究や計算をしている人がいたり、安全に実験が行われるように管理している人がいたり、非常に様々な仕事や様々な方の日々の尽力があって運営されているのだと感じることができました。

また、実際に入射器を使用させていただいて実習を行えたことはとても強く印象に残っています。2時間貸してくださり、ありがとうございました。

5日間の実習を通して、神戸大学の2人や諏訪田先生と質問したり話し合ったりする中で、考える力はもちろんですが、対話する力や議論する力の重要性を非常に痛感しました。この経験を活かして今後も精進して参ります。

貴重な経験をさせていただき、誠にありがとうございました。

公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会 奨励賞(西川賞・小柴賞・諏訪賞・熊谷賞)受賞者について (2021年度)

2021年度の奨励賞(西川賞・小柴賞・諏訪賞・熊谷賞)は、2022年3月に開催された選考委員会及び理事会において審議の結果、受賞者は次のとおり決定いたしました。今回は熊谷賞の受賞者はありませんでした。

なお、受賞者に対する奨励賞授与式は、5月30日(月)東京・アルカディア市ヶ谷(私学会館)において行われました。

1. 西川賞1

1) 受賞者氏名および所属機関・職名等

和田 道治 高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所・教授

宮武 宇也 高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所・名誉教授

2) 研究課題名：KISS(元素選択型質量分離器¹：KEK Isotope Separation System)とMRTOF-MS(多重反射型飛行時間測定式質量分光器²：Multi-Reflection Time of Flight Mass Spectrograph)の設計・建設・運転

3) 授賞理由

KEK素粒子原子核研究所の和田道治氏と宮武宇也氏は、理化学研究所和光キャンパス内にある素粒子原子核研究所和光原子核科学センターに、KISS(元素選択型質量分離器)と呼ばれる質量分析装置を設計・建設し、金・白金やウラン・トリウムなどの重元素合成の起源天体を解明する研究プロジェクトを進めてきた。両氏は多核子移行反応が、この領域の不安定中性子過剰原子核の生成に有効である事を実証し、これによって生成された不安定核を迅速にガス中で捕獲して、イオンのままあるいはレーザーイオン化の手法を駆使して低エネルギーの短寿命核ビームとして引き出す手法を開発した。上記のイオン操作技術は、ヘリウムガス中で減速・熱化した放射性同位体イオンを、高周波カーペットを用いて高速・高効率で補修し冷却されたRIビームに成形するものであり、あらゆる元素の高精度分光を可能としている。更に、KISSに多重反射型飛行時間測定式質量分光器(MRTOF-MS)を組み込んで、多種の原子核を分離せずに同時に高能率測定することが可能となり、短寿命原子核の質量を約 10^{-6} の高分解能で網羅的に測定することに成功した。これにより、多核子移行反応により生成した中性子過剰不安定同位体の系統的な精密核分光研究が初めて可能となった。

これを受けて、上記研究プロジェクトでは、放射性同位体の寿命、質量、崩壊様式、核モーメント、核荷電半径等の系統的測定が推進されている。宇宙における金・白金・ウラン、ト

¹ 選考時点では「元素選択型質量分離装置」として記載されていたが、修正依頼があったため修正する。

² 選考時点では「多重反射型飛行時間測定式質量分析器」として記載されていたが、修正依頼があったため修正する。

リウムなどの重元素合成の謎に迫る研究に新たな道を切り拓くことが期待される。

コンパクトで可搬性にもすぐれたこの装置は、測定対象の原子核に応じて多様な設置が可能であり、超重元素領域での原子質量測定においても威力を発揮している。

以上のことから和田・宮武両氏の本業績は、西川賞にふさわしい研究であると判断された。



西川賞受賞者

2. 西川賞 2

1) 受賞者氏名および所属機関・職名等

西村昇一郎 高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所・特別助教

神田聡太郎 高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所・助教

下村浩一郎 高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所・教授

鳥居 寛之 東京大学大学院理学系研究科・准教授

田中香津生 Paul Scherrer Institute・PSI fellow

2) 研究課題名：ミュオニウム超微細構造精密測定におけるラビ振動分光の研究

3) 授賞理由

本研究グループは、原子分光分野における新しい「ラビ振動分光」と呼ばれる手法を開発、実証した。通常の原子分光は、構成粒子の精密な情報を得るために、照射する光や電磁波の周波数を変化させながら吸収の大きくなる共鳴周波数を求めるのが一般的であるが、パワー変動などの要因により、精密測定が難しいという問題を抱えている。特に短寿命原子などの測定では、信頼性のある結果が得られていない。本グループでは、周波数を固定したままで、パワーに応じた時間応答を観測し、ラビ振動と呼ばれる現象を観測することで、その問題を克服しようとしてきた。ラビ振動とは、共鳴周波数からのずれと、パワーに応じて、時間応答が振動を示す現象であり、その存在自体は知られていたが、分光に応用した例はなかった。本グループは、J-PARCにおいて、 μ^+ 粒子と電子からなるミュオニウムを生成し、そのラビ振動を観察、それをシミュレーションと比較することによって、共鳴周波数を正確に導き、従来の精度を一桁凌駕する結果を得られることを示した。これにより、素粒子ミュオン(ミュオン粒子)の質量を高精度で決定して、量子電磁力学(QED)をはじめとする素粒子物理学の標準模型を検証することができることが期待されている。

本成果は、世界をリードする成果であるとともに、今後 J-PARC の性能が増強された暁のミュオン利用にさらなる発展が期待できる成果である。

以上のことから西村・鳥居・神田・田中・下村 5 氏の本業績は西川賞にふさわしい研究であると判断された。



西川賞受賞者

3. 小柴賞

1) 受賞者氏名および所属機関・職名等

中村 光廣 名古屋大学未来材料・システム研究所・教授

中野 敏行 名古屋大学大学院理学研究科・講師

2) 研究課題名：原子核乾板の技術革新と素粒子・宇宙線実験等への応用

3) 授賞理由

原子核乾板はミクロンオーダーの高い位置分解能を持ち、昔はよく使われていたが、顕微鏡を用いて人が飛跡を探すため解析に時間がかかるため、検出面積を大きくできないという問題があった。

中村光廣、中野敏行両氏は、原子核乾板をステージで動かし、顕微鏡を通した乾板の像をデジタル化し、それをコンピュータで解析して、飛跡検出を自動化するシステムを作り上げた。撮像素子やコンピュータや IT 技術の発展とともに、この自動飛跡検出技術も発展させ、原子核乾板をスキャンする速度は 1980 年ごろから 6 桁も向上している。

さらに、フィルムメーカーが乳剤を作らなくなったのを機に技術移転を行い、自前で各研究の目的に合わせた乳剤を開発し、乾板を作る技術も確立した。

これらの技術開発の結果、米国 Fermilab でタウニュートリノを世界で初めて検出した。また大量の原子核乾板を用いて、ヨーロッパ CERN から飛ばしたミュオンニュートリノが振動してタウニュートリノに変わる反応を初めて観測した。

さらに中村氏が教授となってからは、原子核乾板の応用範囲を大きく広げた。例えば T2K 実験でニュートリノの原子核反応を調べたり、気球で原子核乾板を上空に上げて高い角度分解能で天体からのガンマ線の方向を調べたり、宇宙線を用いて溶鉱炉やピラミッドや火山や原子炉を透視したり、粒子線がん治療への応用も行っている。さらに乳剤の改良によって、暗黒物質の探索を行い、超冷中性子を用いた重力の研究なども計画している。

中村氏は特に乳剤の開発と原子核乾板の応用、中野氏は飛跡の読み取りシステムの開発を主導してきており、両者の貢献は顕著である。また、彼らの開発した高速読み取りシステムは独創的で世界で随一であり、タウニュートリノへの振動実験など、国際的にも高い評価を得ている。

以上のことから中村、中野両氏の本業績は、小柴賞にふさわしい研究であると判断された



小柴賞受賞者

4. 諏訪賞 1

1) 受賞者氏名および所属機関・職名等

上坂 充 内閣府原子力委員会・委員長

2) 研究課題名：先進小型電子ライナックの開発と利用推進

3) 授賞理由

候補者である上坂氏は、長年にわたってSバンド・Xバンド電子ライナックおよびレーザー加速システムの研究開発を行うとともに、利用施設を高度化して加速器利用研究を推進してきた。

まず、東大原子力工学専攻のSバンド電子ライナックにおいて、1990年代に世界に先駆けて数百フェムト秒の極短パルスを発生させることに成功した。さらにこの電子パルスとレーザー光を高精度かつ高安定度で同期させ、ピコ秒時間分解ラジオリシスに供することができるよう、加速器施設を高度化した。その後も施設の高度化のための開発を継続的に行い、共同利用研究所として加速器利用研究に貢献し続けている。

次に、Xバンド電子ライナックにおいては、社会的課題への応用を目指して、可搬型の加速器を開発してきた。企業との共同研究によって開発された最新のシステムでは、加速管に $\pi/2$ モードを採用してビーム負荷の下での安定動作を実現し、構造物コンクリートや道路橋の劣化診断に用いられようとしている。

さらに、レーザー加速においては、2000年代初頭から放射線化学への応用を目指して装置開発を行い、放電キャピラリプラズマチャンネルとソレノイド磁場を用いて準単色電子ビームを発生させることに成功した。また、最近ではレーザー誘電体加速装置の設計開発も行っている。

上坂氏はこれらの研究開発で170本の研究論文を発表しているほか、国際会議などで多数

の招待講演を務め、多くの賞を受賞するなど、国際的評価も高い。さらに、これらの研究開発を通じて、数多くの人材を育成して学会や産業界に輩出してきた。

以上のように、上坂氏は長年にわたって加速器科学の発展に貢献し、顕著な業績を上げており、諏訪賞にふさわしい研究であると判断された。



諏訪賞受賞者

5. 諏訪賞 2

1) 受賞者氏名および所属機関・職名等

Geant4 日本グループ

代表

佐々木 節 高エネルギー加速器研究機構計算科学センター・教授

浅井 慎 Thomas Jefferson 研究所・シニア研究員

藏重 久弥 神戸大学大学院理学研究科・教授

村上 晃一 高エネルギー加速器研究機構計算科学センター・准教授

2) 研究課題名：物質と放射線との反応シミュレーションプログラム：Geant4 の国際的な開発運用

3) 授賞理由

Geant4 は放射線と物質との相互作用のシミュレーターとして、現在、世界で最も広く利用されている。加速器を用いた実験はもとより、人体への放射線の影響評価などを含む幅広い分野で、今やなくてはならないツールとして知られている。

Geant4 は、CERN で開発され 1990 年代まで高エネルギー実験の分野で使われてきた Geant3 を根本から見直し、オブジェクト指向言語 C++ を用いてゼロから再構築したものである。

日本グループが立ちあげたその開発計画は、CERN をはじめアメリカやヨーロッパ諸国の主要な機関が参加して国際的な開発プロジェクトに発展した。そして 1998 年、Geant4 の初版がリリースされるが、日本グループの貢献は極めて大きく、初版のコードにおいて日本グループが担当した部分は全体の半分にのぼった。日本グループは初版のリリースと同時にその普及と保守のための国際的な枠組作りも主導し、各機関や ICFA と交渉して MoU による国際的プロジェクト Geant4 Collaboration を立ちあげた。このコラボレーションにおいても代表者の 4 名をはじめとする日本グループが重要な役割を果たしながら現在にいたっている。

Geant4 は LHC での Higgs 粒子の発見に大きく貢献し、Belle /Belle II、T2K をはじめとする数々

の高エネルギー実験において不可欠なシミュレータである。さらに、日本グループは Geant4 の高エネルギー実験以外の分野への応用の拡大にも積極的に取り組んできた。特に粒子線治療においては、放射線効果のシミュレーション結果を人体画像とともにグラフィック表示するユーザーインターフェースを含めて開発し、国内のいくつかの粒子線治療施設で実用に供されている。最近では、GPU を利用した超並列計算に適応した Geant4 の開発を進めるとともに、宇宙空間における放射線の遺伝子への影響を詳細に評価する宇宙医療分野の課題に KEK およびボルドー大学等と共同で取り組んでいる。

以上のように、Geant4 日本グループは長年にわたって加速器科学の発展に貢献して顕著な業績を上げており、諏訪賞にふさわしい研究であると判断された。



諏訪賞受賞者



2022.5.30 公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会奨励賞授与式 於 アルカディア市ヶ谷

高エネルギー加速器科学研究奨励会 2021年度奨励賞の授与式開催 西川・小柴・諏訪賞の5件を表彰

公益財団法人高エネルギー加速器科学研究奨励会は、2021年度の奨励賞受賞者を決定し、5月30日

にアルカディア市ヶ谷(東京都千代田区)で授与式を行った。今回の奨励賞は西川賞2件、小柴賞1件、諏訪賞2件の合計5件となった。これら各賞は、加速器科学関連の研究分野で偉大な業績をあげた西川哲治氏、小柴昌俊氏、諏訪繁樹氏の各功績を讃えて設けられたものである。

授与式では同財団の幅澤二代代表理事(高エネルギー加速器研究機構理事)が開式のあいさつを行った。幅澤代表理事は「昨年度に前代表理事の高崎氏から代表理事を引き継いだ際に、この奨励賞についてより多くの候補を募ってさらに盛り上げていって欲しいと言われ、今まで以上にいろいろな方面において推薦をして頂いたところ、非常にレベルの高い研究内容の5件が奨励賞として決まり、



授与式参加者全員による記念撮影

非常にうれしい結果になりました」と感想を語り、受賞研究を高く評価した。次いで、各賞受賞者の発表と各賞審査結果の報告を選考委員会委員長の小関忠氏(高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設施設設

画・業務執行理事(高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設ダイヤモンドエロー)が開式のあいさつを行って終了となった。終了後には、受賞者と授与式に参加した全員による記念撮影が行われた。

長が行い、各賞の受賞者と研究テーマ、選考理由、研究内容について紹介した。続いて各受賞者に対し

幅澤代表理事が表彰盾と賞金を授与した。その後、各受賞者が登壇して受賞した研究の内容について発表した。最後に同財団の山口誠

【公益財団法人高エネルギー加速器科学研究奨励会】2021年度奨励賞受賞者と研究課題】
◇西川賞・和田道治氏(高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所教授)、宮武宇也氏(同名誉教授)「KISS(元素選択型質量分離装置: KEK's Isotope Separation System)とMRTOF-MS(多重反

射型飛行時間測定式質量分析器: Multi-Reflection Time Of Flight Mass Spectrograph)の設計・建設・運転」
◇西川賞・西村昇一郎氏(高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所特別助教)、神田聡太郎氏(同助教)、下村浩一郎氏(同助教)、鳥居寛之氏(同助教)、中野敏行氏(名古屋大学大学院理学研究科講師)「原子核乾板の技術革新と素粒子宇宙線実験等への応用」
◇諏訪賞・上坂充氏(内閣府原子力委員会委員長)「先進小型電子ライナックの開発と利用推進」
◇諏訪賞・Geant4日本グループ代表/佐々木節氏(高エネルギー加速器研究機構教授)、浅井慎氏(Thomas Jefferson研究所シニア研究員)、蔵重久弥氏(神戸大学大学院理学研究科教授)、村上晃一氏(高エネルギー加速器研究機構准教授)「物質と放射線との反応シミュレーションプログラム: Geant4の国際的な開発運用」

◇西川賞・和天道治氏(高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所教授)、宮武宇也氏(同名誉教授)「KISS(元素選択型質量分離装置: KEK's Isotope Separation System)とMRTOF-MS(多重反

射型飛行時間測定式質量分析器: Multi-Reflection Time Of Flight Mass Spectrograph)の設計・建設・運転」
◇西川賞・西村昇一郎氏(高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所特別助教)、神田聡太郎氏(同助教)、下村浩一郎氏(同助教)、鳥居寛之氏(同助教)、中野敏行氏(名古屋大学大学院理学研究科講師)「原子核乾板の技術革新と素粒子宇宙線実験等への応用」
◇諏訪賞・上坂充氏(内閣府原子力委員会委員長)「先進小型電子ライナックの開発と利用推進」
◇諏訪賞・Geant4日本グループ代表/佐々木節氏(高エネルギー加速器研究機構教授)、浅井慎氏(Thomas Jefferson研究所シニア研究員)、蔵重久弥氏(神戸大学大学院理学研究科教授)、村上晃一氏(高エネルギー加速器研究機構准教授)「物質と放射線との反応シミュレーションプログラム: Geant4の国際的な開発運用」

2022 年度公益財団法人高エネルギー加速器科学研究奨励会 奨励賞候補者募集要項

1. 趣 旨

加速器ならびに加速器利用に関わる研究において、特に優れた業績をおさめた研究者・技術者に次の4賞で構成される奨励賞を授与し、もって加速器科学の発展に資することを目的とする。

2. 各賞の応募条件

- 西川賞 : 高エネルギー加速器ならびに加速器利用に関する実験装置の研究において、独創性に優れ、国際的にも評価の高い業績を上げた単数または複数の研究者及び技術者
- 小柴賞 : 素粒子分野などの基礎科学における測定器技術の開発研究において、独創性に優れ、国際的にも評価の高い業績を上げた単数または複数の研究者及び技術者
- 諏訪賞 : 高エネルギー加速器科学の発展上、長期にわたる貢献など特に顕著な業績があったと認められる単数または複数の研究者及び技術者ならびに研究グループ
- 熊谷賞 : 研究開発、施設建設など長年の活動を通して、加速器や加速器装置への顕著な貢献が認められる企業の単数または複数の加速器関係者

3. 表彰件数 4 賞合わせて 5 件程度

4. 賞の内容 賞金（各賞 30 万円）及び表彰盾（各課題毎）を授与する。

5. 選考方法 推薦のあった者について公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会選考委員会で選考し、理事会において決定する。

6. 選 考 2022 年 12 月上旬

7. 提出書類 (1) 推薦書（当財団のホームページに掲載の様式による）
(2) 選考資料 研究業績に関する発表論文（3 編以内）のコピー（各 2 部）

8. 受付期間 2022 年 9 月 1 日（木）～ 2022 年 11 月 30 日（水）必着

9. 書類の提出ならびに問合せ先

公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会事務局
〒 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内
TEL・FAX : 029-879-0471
E メール : info@heas.jp
ホームページ : <https://www.heas.jp/>

受付番号	
受付年月日	年 月 日

公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会
奨励賞候補者推薦書

候補者	氏名（ふりがな）	所属・職
		候補者連絡先・email アドレス等
研究課題 / 業績名	(和文)	
	(英文)	
賞の種類 ^(*)	<input type="checkbox"/> 西川賞 <input type="checkbox"/> 小柴賞 <input type="checkbox"/> 諏訪賞 <input type="checkbox"/> 熊谷賞	
推薦要旨		
<p>年度 公益財団法人高エネルギー加速器科学研究奨励会 奨励賞候補者として、上記の者を推薦します。</p> <p style="text-align: right;">年 月 日</p> <p>公益財団法人高エネルギー加速器科学研究奨励会 選考委員会委員長 殿</p> <p>推薦者の所属機関・職・連絡先電話番号・email アドレス等</p> <p style="text-align: center;">推薦者名</p>		

(*) 授与する賞の種類については応募内容に応じて選考委員会に変更する場合がある。

候補者略歴 (生年月日(西暦) 年 月 日)

研究課題/業績及び推薦理由(候補者が複数の場合はその役割分担等も記載のこと)

2022 年度公益財団法人高エネルギー加速器科学研究奨励会 研究助成等応募要領

1. 趣 旨

本公益財団法人では、高エネルギー加速器科学及びその関連技術に関し、優れた業績を有する国内及び国外の研究者、技術者に対する研究助成を行う。

2. 助成の対象

- 1) : 加速器の原理、物理、技術に関する研究
- 2) : 加速器を用いる研究のための測定技術や装置の開発研究
- 3) : 高エネルギー加速器を用いる研究（但し共同利用実験等は除く）
- 4) : 我国の加速器科学振興のために特に必要と認められる研究

3. 助成内容

1) 研究助成

- (1) 高エネルギー加速器科学及びその関連技術に関し、優れた業績を有する国内、国外の研究者等に対する国内旅費等の助成
- (2) 高エネルギー加速器科学及びその関連技術に関する国内の研究機関に対する国内旅費等の助成

2) 国際交流助成

- (1) 高エネルギー加速器科学及びその関連技術に関し、優れた業績を有する国内の研究者等を国外に派遣する場合に必要とする旅費等の助成
- (2) 高エネルギー加速器科学及びその関連技術に関し、優れた業績を有する国外の研究者等を招聘する場合に必要とする旅費等の助成

3) 国際会議等助成

国内において開催する高エネルギー加速器科学及びその関連技術に関する国際会議・国際研究集会等で、高エネルギー加速器科学研究機関が主催する場合に必要な国内旅費及び会場費等の助成

4. 助成件数

年間それぞれ5件程度とする。

5. 申込時期

随時、但し助成金使用予定の1ヶ月以上前
ただし、受付期間は、原則として2022年4月から12月末日までとする。

6. 申込要領

下記書類を当財団宛に提出すること。（メール・PDF申請可）

(1) 当財団指定の研究助成申請書等に必要事項を記入した書類

様式1：研究助成申請書

様式2：国際交流助成申請書（研究発表等で国際会議等に出席する場合）

様式3：国際会議等助成申請書（国際会議等を主催する場合）

(2) 国際交流助成・国際会議等助成の場合は会議開催通知、プログラム、招聘状、会議での役割分担等研究の重要性が判断できるもの

(3) 旅費計算書（航空運賃見積書・領収書等を添付）

(4) その他必要と思われる書類

7. 決定通知

当財団選考委員会の審査を経て、申請後1ヶ月以内に助成決定通知書を申請者に送付する。

8. 助成金の支払い 申請者の指定口座へ振込みとする。

9. 報告の義務

助成を受けた者は、業務終了後、1ヶ月以内に研究等の「研究成果報告書（様式4）」及び「助成金使用実績内訳書（様式5）」を提出すること。

10. 申込書の請求、提出ならびに問合せ

〒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内

公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会

TEL・FAX 029-879-0471

E-mail : info@heas.jp

研究助成申請書

年 月 日

公益財団法人
高エネルギー加速器科学研究奨励会
代表理事 幅 淳二 殿

申請者氏名 _____

所属機関 _____

所属名 _____

下記の研究課題に対する助成を申請します。

記

研究課題（内容が把握できるよう表現してください）		
実施期間 年 月 日 ～ 年 月 日		
実施場所		
助成申請者に関する事項	申請者氏名	
	最終学校名 卒業年月	年 月
	学位名・学位授与大学名 取得年月日	年 月
	現在の研究分野	
	所属機関・職名	
	連絡先住所・ 電話（内線）	住所 Tel. E-mail

※共同研究の場合は、氏名欄は代表者

助成申請額	
-------	--

申 請 理 由
申請額算出内訳（使途概要）
<p>上記申請を適切と認めます。</p> <p style="text-align: center;">年 月 日</p> <p>所属機関</p> <p>所 属 名</p> <p>所属長職・氏名 _____</p>

- ※ 申請時に見積書・申請額算出内訳（使途概要）を記入すること。
- ※ 研究終了後1ヶ月以内に別紙「研究助成報告書（様式5）」及び「助成金使用実績内訳書（様式6）」を記入の上、当公益財団法人事務局まで提出すること。

国際交流助成申請書

年 月 日

公益財団法人
高エネルギー加速器科学研究奨励会
代表理事 幅 淳二 殿

申請者氏名 _____

所属機関 _____

所属名 _____

下記の国際交流に対する助成を申請します。

記

研究課題（内容が把握できるよう表現してください）		
実施期間 年 月 日 ～ 年 月 日		
実施場所（開催国・都市・機関等）		
助成申請者に関する事項	申請者氏名	
	最終学校名 卒業年月	年 月
	学位名・学位授与大学名 取得年月日	年 月
	現在の研究分野	
	所属機関・職名	
	連絡先住所・ 電話（内線）	住所 Tel. E-mail
※共同研究の場合は、氏名欄は代表者		
助成申請額		

申 請 理 由
申請額算出内訳（使途概要）
<p>上記申請を適切と認めます。</p> <p style="text-align: center;">年 月 日</p> <p>所属機関</p> <p>所 属 名</p> <p>所属長職・氏名 _____</p>

- ※ 申請時に見積書・申請額算出内訳（使途概要）を記入すること。
- ※ 研究終了後1ヶ月以内に別紙「研究助成報告書（様式5）」及び「助成金使用実績内訳書（様式6）」を記入の上、当公益財団法人事務局まで提出すること。

国際会議等助成申請書

年 月 日

公益財団法人

高エネルギー加速器科学研究奨励会

代表理事 幅 淳二 殿

申請者所属・職名

申請者氏名

主催機関名

主催機関代表者

申請者と主催機関との関係

下記の国際会議等に対する助成を申請します。

記

会議の名称	和文名
	英語名
会 期	年 月 日から 月 日 日間
開催場所	(都市・機関等)
参加者(国別)	
参加人員	人
助成申請額	円
連絡先住所・ 電 話 (内線)	住 所 Tel. E-mail

申 請 理 由

申請額算出内訳（使途概要）

上記申請を適切と認めます。

年 月 日

所属機関

所属名

所属長職・氏名

- ※ 申請時に会議・集会の概要を添付すること。
- ※ 申請時に見積書・申請額算出内訳（使途概要）を記入すること。
- ※ 研究終了後1ヶ月以内に別紙「研究助成報告書（様式5）」及び「助成金使用実績内訳書（様式6）」を記入の上、当公益財団法人事務局まで提出すること。

高エネルギー加速器セミナー OHO'22 は、現地開催とオンラインによるハイブリッド形式により開催されます。申込み、プログラムなどは下記を参照ください。

<https://conference-indico.kek.jp/event/175/>

<https://www.heas.jp>

第 38 回 高エネルギー加速器セミナー

超伝導電磁石技術

OHO'22



2022年 9月 6日(火) ▶ 9日(金)

開催方法  現地開催とオンラインによるハイブリッド形式

※状況により変更の可能性あり

参加者募集

<https://conference-indico.kek.jp/event/175/>

お問合せ oho22@ml.post.kek.jp / info@heas.jp

共催

公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会 (FAS)

<https://www.heas.jp>

〒305-0801 つくば市大穂 1-1 高エネルギー加速器研究機構内

TEL / FAX : 029-879-0471

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

国立大学法人 総合研究大学院大学 (SOKENDAI)



2021 年度 事業報告書

2021 年 4 月 1 日～2022 年 3 月 31 日

1. 研究に対する助成事業

応募無し（新型コロナウイルスの感染拡大の影響により国際会議等がリモート等により行われるようになったため）

2. 国際交流に対する助成事業

- ① 申請者 東京大学大学院工学研究科博士課程 2 年 島村勇徳
 （公財）高輝度光科学研究センター光源基盤部門 研究生
 （独）日本学術振興会特別研究員（DC1）

研究課題 X 線 1 nm 集光ビームのためのミリサイズ小型多層膜ミラーの検討及び作製

実施期間 2022 年 1 月 10 日～2022 年 5 月 15 日

実施場所 ESRF（欧州大型放射光施設・フランス）

- ② 申請者 高エネルギー加速器研究機構長 山内正則
 助成内容 外国人留学生奨学金への助成

3. 国際会議・国際研究集会等に対する助成事業

応募無し（新型コロナウイルスの感染拡大の影響により国際会議等がリモート等により行われるようになったため）

4. 研修会等の開催事業

（1）セミナー・施設見学会等の開催

No	実施期間	実施項目	開催機関・参加者等	備考
1	2021 年 9 月 7 日 ～10 日	高エネルギー加速器セミナー OHO' 21 の開催 (テーマ「次世代大型加速器 国際リニアコライダー— ILC —」)	高エネルギー加速器研究機構、総合研究大学院大学との共催 参加者 学生、研究機関、企業関係者等 161 名	参加費 無料 テキスト代 学生・賛助会員 無料 一般企業・研究機関等 2,000 円
2	2022 年 1 月 12 日	加速器施設探訪会	協力：高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設 賛助会員を対象 20 名募集 19 名参加 参加会員 (株) パルスパワー技術研究所 2 名 東京ニュークリア・サービス (株) 1 名 (株) 日立製作所 2 名 三菱重工機械システム (株) 2 名 ニチコン (株) 2 名 ニチコン草津 (株) 1 名 (株) 千代田テクノル 2 名 キャノン電子管デバイス (株) 2 名 太陽日酸 (株) 2 名 日本高周波 (株) 2 名 豊田通商 (株) 1 名	参加費等は無料

3	2022年 1月15日～ 3月14日	加速器科学インターンシップ への助成	高エネルギー加速器研究機構 大阪大学、京都大学、神戸大学、東京理科大学、名古屋大学、東海大学、新潟大学から3年・4年の学生計18名が参加	
4		科学と音楽の饗宴 中止		

5. 研究者および研究グループに対する顕彰事業

- ・2020年度奨励賞授与式は、コロナ禍でもあったことから5月27日高エネルギー加速器研究機構において開催した。
- ・2021年度奨励賞への推薦は、西川賞、小柴賞、諏訪賞に合わせて5件あった。
- ・選考委員会及び理事会の審議を経て、2021年度奨励賞として以下のとおり決定した。
受賞者、研究課題などは下記のとおり

No	賞名称	受賞者氏名	所属機関	職	研究課題
1	西川賞	和田 道治 宮武 宇也	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 同上	教授 名誉教授	KISS（元素選択型質量分離装置：KEK Isotope Separation System）とMRTOF-MS（多重反射型飛行時間測定式質量分析器：Multi-Reflection Time Of Flight Mass Spectrograph）の設計・建設・運転
2	西川賞	西村 昇一郎 神田 聡太郎 下村 浩一郎 鳥居 寛之 田中 香津生	高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 同上 同上 東京大学大学院理学系研究科 Paul Scherrer Institute	特別助教 助教 教授 准教授 PSI fellow	ミュオニウム超微細構造精密測定におけるラビ振動分光の研究
3	小柴賞	中村 光廣 中野 敏行	名古屋大学未来材料・システム研究所 名古屋大学大学院理学研究科	教授 講師	原子核乾板の技術革新と素粒子・宇宙線実験等への応用
4	諏訪賞	上坂 充	内閣府原子力委員会	委員長	先進小型電子ライナックの開発と利用推進
5	諏訪賞	Geant 4 日本グループ 代表 佐々木 節 浅井 慎 藏重 久弥 村上 晃一	高エネルギー加速器研究機構 計算科学センター Thomas Jefferson 研究所 神戸大学大学院理学研究科 高エネルギー加速器研究機構 計算科学センター	教授 シニア研究員 教授 准教授	物質と放射線との反応シミュレーションプログラム： Geant 4の国際的な開発運用

6. 加速器科学に関する知識の普及等の頒布及び出版物の編集及び刊行事業

No	出版物等の名称	発行
1	高エネルギー加速器セミナー OHO' 21 テキスト	9月発行済
2	高エネルギーニュース	4月、7月、12月、3月に発行済 計画 年4回
3	FAS だより (公益財団法人高エネルギー加速器科学研究奨励会 広報誌)	第22号 8月発行済 第23号 3月発行済

7. 理事会の開催

回	期日・時間	開催場所	議案及び報告事項
第30回	2021年4月23日 13:30～15:30	Web 会議	議 事 1) 決議事項 第1号議案 「2020年度事業報告書(案)承認」の件 事業報告附属明細書(案)を含む 第2号議案 「2020年度貸借対照表(案)、損益計算書(案)、損益 計算書内訳表(案)及び財産目録(案)承認」の件 監査報告書含む 第3号議案 「定款の一部変更」の件 第4号議案 「評議員会運営規則の一部改正」の件 第5号議案 「理事会運営規則の一部改正」の件 第6号議案 「特定資産運用規程(案)制定」の件 第7号議案 「2021年度事業計画の一部変更」の件 2) 報告事項 (1) 2021年度加速器セミナー OHO' 21 について
第31回	2021年6月11日 10:00～10:30	Web 会議	議 事 1) 決議事項 第1号議案 「代表理事、業務執行理事選定」の件 第2号議案 「2021年度事業計画書(奨励賞募集要件の変更)」の件 第3号議案 「選考委員会委員の辞任並びに選任」の件 第4号議案 「顧問の委嘱」の件 2) 報告事項 (1) 2021年度事業報告(中間)について
第32回	2022年1月27日 13:30～15:00	Web 会議	議 事 1) 決議事項 第1号議案 「2022年度事業計画書(案)」の件 第2号議案 「2022年度収支予算書(案)、正味財産増減計算 書内訳表(案)、資金調達及び設備投資の見込み」の件 第3号議案 「第26回評議員会招集」の件 2) 報告事項 (1) 2021年度事業報告(中間)について (2) 加速器セミナー OHO' 21 実施報告について (3) 第1回加速器施設探訪会実施報告について (4) 2021年度収支決算見込みについて
第33回決議 の省略の方 法による	理事会の決議が あったものとみな された日 2022年3月30日	—	議 事 議案 「2021年度奨励賞授賞者の選考に関する件」

8. 評議員会の開催

回	期日・時間	開催場所	議案
第24回	2021年5月27日 13:00～14:50	Web 会議	議事 1) 決議・承認事項 第1号議案 「2020年度事業報告書(案)承認」の件 事業報告附属明細書(案)を含む 第2号議案 「2020年度貸借対照表(案)、損益計算書(案)、損益 計算書内訳表(案)及び財産目録(案)承認」の件 監査報告書含む 第3号議案 「定款の一部変更」の件 第4号議案 「評議員会運営規則の一部改正」の件 第5号議案 「任期満了に伴う理事選任」の件 2) 報告事項 (1) 2020年度奨励賞の選考結果について (2) 特定資産運用規程の制定について (3) 理事会運営規則の改正について (4) 高エネルギー加速器セミナー OHO'21 について
第25回 決議の省略 の方法による	評議員会の決議が あったものとみな された日 2021年6月23日	—	議事 議案 「2021年度事業計画書(奨励賞募集要件)の一部変更」の件
第26回	2022年2月24日 13:30～15:00	Web 会議	議事 1) 決議・承認事項 第1号議案 「2022年度事業計画書(案)承認」の件 事業報告附属明細書(案)を含む 第2号議案 「2022年度収支予算書(損益計算書)(案)、正味財産 増減計算書内訳表(案)、資金調達及び設備投資の 見込みについて承認」の件 2) 報告事項 (1) 2021年度事業報告(中間報告)について (2) 2021年度収支決算見込みについて (3) 加速器セミナー OHO'21 実施報告について (4) 第1回加速器施設探訪会開催報告について (5) 賛助会員数について

9. 2021年度 収支決算監査

2022年4月5日 木村監事、古屋監事による監査受検

別添 監査報告書のとおり

2021年度 損益計算書（正味財産増減計算書）

自：2021年4月1日 至：2022年3月31日

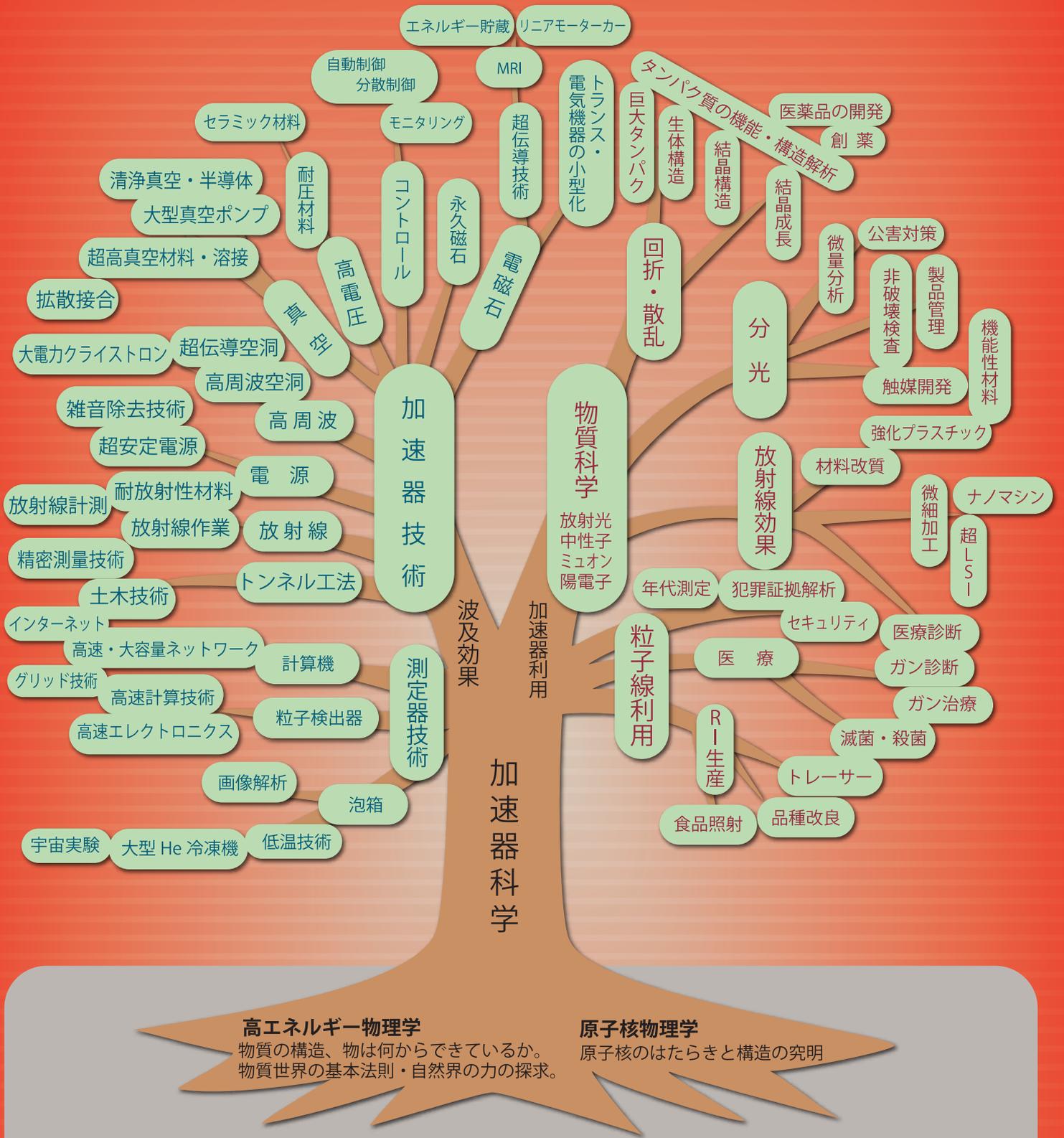
（単位：円）

科 目	当年度	前年度	増 減
I. 一般正味財産増減の部			
1. 経常増減の部			
(1) 経常収益			
基本財産運用益			
基本財産受取利息	1,864,759	669,449	1,195,310
特定資産運用益			
特定資産受取利息	94	4,470	△ 4,376
受取会費			
賛助会員受取会費	4,550,000	4,400,000	150,000
事業収益			
講習会等事業益	94,084	120,084	△ 26,000
受取寄附金			
会議・助成・寄附金	500,000	1,000,000	△ 500,000
雑収益			
預金受取利息	52	26	26
その他（返納金等）	0	0	0
経常収益計	7,008,989	6,194,029	814,960
(2) 経常費用			
①事業費			
研究助成費	0	0	0
国際交流助成費	1,200,000	0	1,200,000
国際会議助成費	0	0	0
その他の助成	0	0	0
講習会開催費	600,647	378,520	222,127
褒賞費	1,605,650	600,000	1,005,650
出版物頒布費	391,765	346,555	45,210
諸謝金	0	0	0
給料手当	1,434,734	1,370,807	63,926
旅費交通費	106,440	106,440	0
通信運搬費	41,902	40,992	910
什器備品費	82,500	0	82,500
消耗品費	100,996	44,184	56,812
賃借料	73,975	79,805	△ 5,830
光熱水料費	22,042	23,723	△ 1,681
雑費	9,075	25,613	△ 16,538
事業費合計	5,669,726	3,016,640	2,653,086
②管理費			
給料手当	1,434,731	1,370,807	63,924
会議費	0	0	0
旅費交通費	106,440	106,440	0
通信運搬費	90,499	75,263	15,236
什器備品費	82,500	76,340	6,160
消耗品費	107,675	87,701	19,974
賃借料	73,975	79,805	△ 5,830
諸謝金	55,000	55,000	0
光熱水料費	22,042	23,723	△ 1,681
雑費	42,369	35,440	6,929
管理費合計	2,015,231	1,910,519	104,712
経常費用計	7,684,957	4,927,159	2,757,798
当期経常増減額	△ 675,968	1,266,870	△ 1,942,838
2. 経常外増減の部			
(1) 経常外収益	0	0	0
(2) 経常外費用	0	0	0
当期経常外増減額	0	0	0
当期一般正味財産増減額	△ 675,968	1,266,870	△ 1,942,838
一般正味財産期首残高	126,318,977	125,052,107	1,266,870
一般正味財産期末残高	125,643,009	126,318,977	△ 675,968
II. 指定正味財産増減の部			
受取補助金等	0	0	0
III. 正味財産期末残高	125,643,009	126,318,977	△ 675,968

(公財) 高エネルギー加速器科学研究奨励会賛助会員一覧

2022年4月1日現在

	会 員 名		会 員 名
1	エーザイ (株)	31	日本高周波 (株)
2	S.P. エンジニアリング (株)	32	日本製鉄 (株)
3	(株) 大阪真空機器製作所	33	日本電磁工業 (株)
4	川崎設備工業 (株)	34	(株) 野村鍍金
5	キヤノン電子管デバイス (株)	35	浜松ホトニクス (株)
6	金属技研 (株)	36	(株) パルスパワー技術研究所
7	工藤電機 (株)	37	Bee Beans Technologies (株)
8	(株) ケーバック	38	日立金属 (株)
9	小池酸素工業 (株)	39	(株) 日立製作所
10	神津精機 (株)	40	V A T (株)
11	コカ・コーライーストジャパン (株)	41	富士通 (株)
12	(株) ジェック東理社	42	武州ガス (株)
13	秀和電気 (株)	43	(有) 双葉工業
14	真空光学 (株)	44	(株) マイテック
15	スキャンジノバ・システムズ (株)	45	(株) 前川製作所
16	セイコー・イージーアンドジー (株)	46	三菱重工機械システム (株)
17	太陽日酸 (株)	47	三菱電機 (株)
18	(株) 多摩川電子	48	三菱電機システムサービス (株)
19	(株) 千代田テクノル		
20	ツジ電子 (株)		
21	(株) 電研精機研究所		
22	東京ニュークリアサービス (株)		
23	東芝エネルギーシステムズ (株)		
24	(株) トヤマ		
25	長瀬ランダウア (株)		
26	NAT (株)		
27	ニチコン (株)		
28	ニチコン草津 (株)		
29	日新パルス電子 (株)		
30	(株) 日本アクシス		



発行 公益財団法人
高エネルギー加速器科学研究奨励会
 〒305-0801
 つくば市大穂1-1 高エネルギー加速器研究機構内 (職員会館2F)
 TEL・FAX: 029-879-0471
 E-mail: info@heas.jp
 URL: https://www.heas.jp/