

## ■第4回放射光科学賞受賞研究報告

### SPring-8 X線光学系の開発とコヒーレント X線光学の開拓

石川哲也 (理化学研究所 放射光科学研究センター)

#### 1. はじめに

日本で X 線領域の放射光が使われ始めたのは、1983年のフォトンファクトリー稼働時であり、その前年に博士課程を修了した筆者は、フォトンファクトリーの立ち上げに参加することになった。そこでは、BL15C および BL14B という、当時「精密 X 線光学」と呼ばれたステーション担当として、多数の共同研究者に恵まれた<sup>1-5)</sup>。フォトンファクトリーで5年7か月お世話になり、1989年1月1日付で、東大工学部物理工学科へ転出した。東大には7年3か月お世話になり、1996年4月に理研に移ったが、東大在籍中から SPring-8 には相当関わっており、駒込の旧理研跡地にあった大型放射光計画共同チームに足繁く通っていた。

理研に移ったときは、「マイクロ波物理研究室」の主任研究員という立場だった。二代前の主任研究員が霜田光一先生という由緒正しいレーザーの研究室なのだが、その主任研究員の椅子だけかりて、放射光の準備を進めていた。このとき理研のメンバーは上坪宏道先生をリーダーに、加速器の熊谷孝教先生、挿入光源の北村英男先生、利用の植木龍夫先生など、濃い先生方が集まっていた。私の担当として、光源と実験ステーションを繋ぐビームラインの建設統括が与えられ、当時1998年とされていた運転開始に向けて、様々な技術開発を進めることとなった<sup>6)</sup>。

往時からほぼ四半世紀を経過したが、その間 SPring-8 の整備に加えて、X 線自由電子レーザー SACLA の建設、仙台次世代放射光計画、また今後の SPring-8-II 計画などに、多少の貢献はできたのではないかと考えている。ここでは、SPring-8 や SACLA の整備の歴史を、限られた方向からではあるが、振り返ってみたい。

#### 2. SPring-8 の建設に当たって

SPring-8 は1992年から1089億円と6年の歳月を費やして完成した、世界最高電子蓄積エネルギーの第三代放射光施設である<sup>7)</sup>。141 ha の敷地は、兵庫県からの現物出資されたものであるが、国内で地盤の安定したところを探したところ、中国山地の固い岩盤にたどり着いた。兵庫県西部の赤穂郡、佐用郡、揖保郡の三郡境界の近くにある標高379 m の三原栗山という岩山の山裾を削って平らな岩盤基礎を作り、その上に蓄積リング棟を建設することによって、世界に類をみない安定な加速器施設を構築した。

第三代放射光施設とは、フォトンファクトリーのような第二世代施設が主として蓄積リング偏向電磁石で生成される放射光を利用するのに対して、加速器直線部に挿入された「挿入光源」利用に最適化された放射光施設である<sup>8)</sup>。挿入光源は、多極交番磁場に電子を通して各周期から出る放射光を重ね合わせて増強するものであるが、磁場が強くと光の干渉効果がないものをウィグラ、干渉効果をもつものをアンジュレータと呼んでいる。1980年代の第二世代放射光を用いて挿入光源の開発研究が進み、その性能の高さから、挿入光源を主体とした光源が企図されたのだ。第三代へ向けての動きは、低エネルギーリングから始まった。米国・バークレーの ALS やドイツ・ベルリンの BESSY-II がその魁だったが、台湾 TLS などが後を続いた。しかし、当時のアンジュレータ技術では、X 線を出そうとすると、高い電子エネルギーの蓄積リングを必要とした。ヨーロッパは EU で 6 GeV の ESRF 建設をすすめ、米国は 7 GeV の APS をアルゴンヌ国立研究所に建設することになった。そして日本は、世界最高エネルギーの SPring-8 を建設することになった<sup>9)</sup>。

SPring-8 では北村英男先生と山本樹先生が KEK で開発した真空封止型アンジュレータ<sup>10)</sup>を標準型アンジュレータとして採用することになり、特別に高エネルギーを必要とするビームライン以外は、アンジュレータを光源とすることにした。結果としてウィグラは BL08W の一本のみとなり、他の挿入光源はすべてアンジュレータとなった。アンジュレータ性能を引き出すために低エミッタンス化された高エネルギー蓄積リングでは、リング径が大きくなり、リング接線方向に引いたビームラインがリングから十分離れるためには、長い距離を必要とする。結果として、小さな光源を遠くからみることになり、空間コヒーレンスの向上が期待されていた。

第三代挿入光源からの X 線を取り扱うことは未経験の領域であり、先行する ESRF、APS と 3 Way Workshop を行ってお互いの経験を交換した。しかし、最高エネルギーの SPring-8 には海外の経験を越えた開発項目が多数あり、しかも開発要員の数は圧倒的に少なかった。ビームラインの建設は1995年から始めて、3年かけて10本の共用ビームラインを整備する予定だったが、建設途中で計画を1年前倒しすることになり、大急ぎでの開発が要請された。それに応えるため、ビームラインを標準化することによって、開発工数を削減するとともに、同一品目大量生産によって建設コストを抑制した。さらに、同じも

の複数建設によって建設速度を向上させた<sup>11)</sup>。

SPring-8 ビームライン建設での最大の課題は、高い空間コヒーレンスを試料位置で保存することであり、途中の光学素子での擾乱をどれだけ抑制できるかであった。特に、結晶光学素子での熱変形の抑制と全反射光学素子での形状精度の向上が大きな問題だったが、まずは結晶光学素子の熱変形の問題に対処することとした。偏向電磁石光源はPFのマルチポールウィングラと同程度以下の熱負荷なので、直接水冷Siで対処できると判断した。ウィングラは高エネルギーX線のみを使うので、低エネルギー成分をアップソーバで除去することにした。すると解決すべき問題は、アンジュレータでの熱負荷であり、トータルパワーよりもパワー密度が問題になる。冷却効率の高いピンポスト冷却や、結晶表面上でのビームフットプリントを幾何学的に広げてパワー密度を下げる回転傾斜回折配置等が考案されテストが行われたが、最終的には液体窒素での間接冷却に落ち着いた<sup>12)</sup>。

ビームラインコンポーネントや光学系の規格化・標準化を進めた結果、1997年の供用開始時に10本のビームラインの稼働が可能になり、5年後の2002年には45本のビームラインが稼働することになった。SPring-8の全ビームライン数が62本なので、最初の5年間で7割以上が運転開始したことになる (Fig. 1)。

### 3. 27 m 長尺アンジュレータと 1 km ビームライン

先行する ESRF や APS にはない SPring-8 の大きな特徴は、蓄積リングに設けられた4箇所30 m 長直線部と、1 km および300 m の長尺ビームライン設置のためのス

ペースである。

最初の長直線部アンジュレータは BL19 に設置された 27 m 真空封止型アンジュレータであり<sup>13)</sup>ビームラインも同時に建設された。標準的な Si 111 分光器を通した後で 10<sup>14</sup> の X 線フォトンフラックスが得られ、標準的な 4.5 m アンジュレータと比較すると約1桁大きくなっている。理想的なアンジュレータでの、長さの自乗倍と比べて小さいのは、電子ビームのエネルギー分散によって干渉性が落ちることが一因である。ここで建設された長尺アンジュレータは後の XFEL での長尺アンジュレータ建設の基礎となった。また大きなフォトンフラックスは、後に非常に先駆的な X 線非線形光学研究に利用されることになった<sup>14)</sup>。

1 km ビームラインは、標準長 (4.5 m) アンジュレータを備えた、理研ビームライン BL29XU<sup>15)</sup>を延長して建設した<sup>16)</sup>。2000年の6月に最初のビームが1 km エンドステーションに到達したが、アンジュレータのセントラルコロンが横30 mm 縦10 mm 程度に広がっていた。我々が最も驚いたのは、ビーム中にベリリウム窓からのスペックルパターンが観察されたことだ (Fig. 2)。これを見て、将来 X 線コヒーレンスが大変なことになる予感がし、また本格的なコヒーレント X 線光源を作らなければと思った。これが後の X 線自由電子レーザー SACLA の建設に繋がっていく。

### 4. X 線コヒーレンス

受賞記念講演では、X 線コヒーレンスに関連して、(a) 光学素子開発、(b) 利用研究、(c) 光源開発からいくつかのトピックスを選んで紹介した。ここでは、講演で紹介し

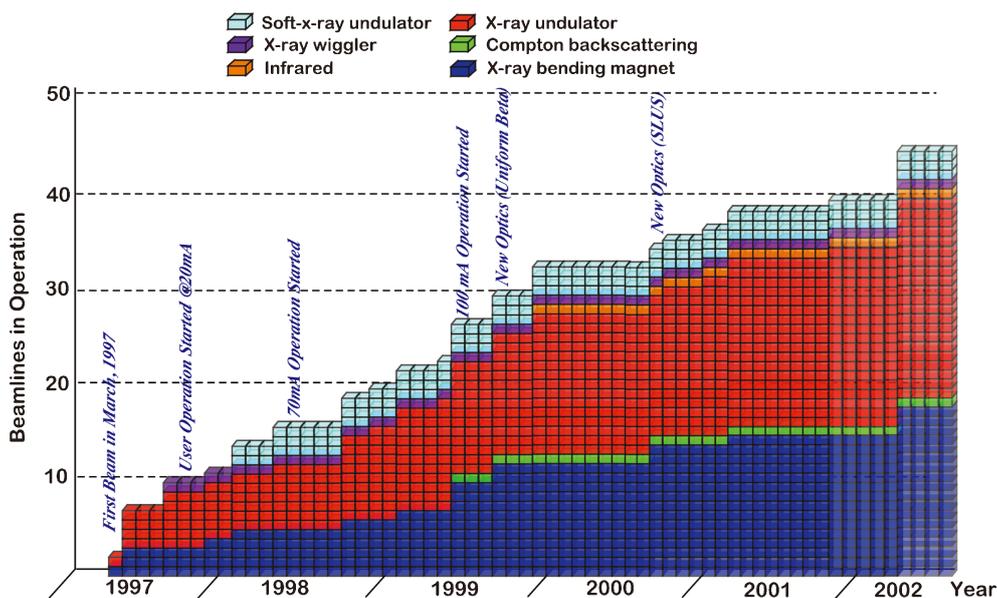
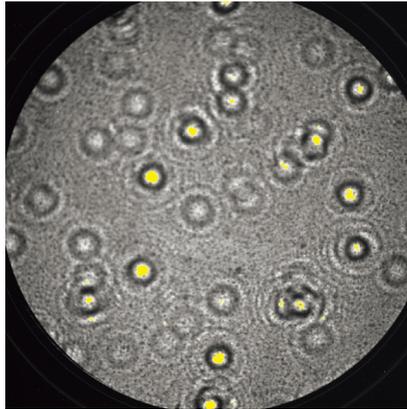


Fig. 1 (Color online) Chronological development of SPring-8 beamlines from FY1997 to FY2002.



**Fig. 2** (Color online) X-ray speckle pattern from a Be window observed at the 1 km endstation. Field of view: 0.48 mm×0.48 mm, Detector spatial resolution: 480 nm, X-ray wavelength: 0.078 nm.

きれなかった話題も出来るだけ加えたいと考えているが、紙数の制約もあり内容が薄くなりをお許しいただきたい。まずは大昔の話から：INSORでの軟X線ホログラフイーの最初の試み以来、軟X線でのコヒーレンス利用は色々なところで進められてきた。しかし、1980年代に、硬X線でのコヒーレンスという騒いでいたのはカナダのマーク・サットンと筆者の周りくらいだった。マークはスペックルから時間相関分光（レーザーでいうところのダイナミック光散乱）の方向に進み<sup>17)</sup>、一方筆者はフォトンファクトリーで全結晶の非対称反射で見掛けの光源を遠くに持って行くことによって、空間的コヒーレンスを向上させることに努力した<sup>18)</sup>。

光学素子開発で特筆すべきは、大阪大学の山内教授のグループと20年以上続けている、超高精度X線反射鏡開発と、それを応用した微小焦点X線集光システム開発であろう<sup>19)</sup>。大阪大学で開発された技術をジェイテック・コーポレーションに移して、この会社が世界中の放射光施設やX線自由電子レーザー施設に、スペックルフリーのX線光学素子を販売している。このミラーはOSAKAミラーと呼ばれて世界中の先端放射光施設で利用されているが、その完成に導いたことは1 km ビームラインの大きな成果であろう。20年以上の共同研究を通して、沢山の学生さんがSPRING-8で研究を行い、また学位を取り巣立っていった。そのうちの数名はSPRING-8に来て、基盤的な役割を担っている。

時間は前後するが、SPRING-8が立ち上がった直後には様々なX線光学研究を展開した。これらは、受賞講演時に全く触れなかったが、ここでは簡単に紹介したい。一つはダイヤモンドX線移相子であり、直線偏光のアンジュレータX線を円偏光に変換するものである。東大時代に菊田惺志先生のご指導の下、平野馨一氏の学位論文としてシリコンでの移相子の開発を行い、いくつかの応用研究を行ったが<sup>20,21)</sup>、SPRING-8で理研の基礎特研生だった鈴木

基寛氏にダイヤモンド移相子を用いた磁気研究用ビームライン開発を担当していただき、BL39XUが出来上がった<sup>22)</sup>。二つ目は、理研の研究室として取り組んだX線干渉計研究である。当時JASRIにいた矢橋牧名氏は、長尺アンジュレータビームラインBL19XLUを使い、14.4 keVで0.2 μeV以下のスペクトル幅をもつ超高分解能X線分光器を用いて、X線領域での強度干渉計を世界ではじめて構成し、SPRING-8のビームサイズ計測を行った<sup>23,24)</sup>。また、玉作賢治氏は、強度相関計測によって干渉条件が分かることを示し、分離型X線干渉計への道を拓いた<sup>25)</sup>。20年前には、X線を分離型光学素子で干渉させることは「神業」に近かったが、今ではSACLAのフェムト秒パルスを使うと干渉縞は簡単に観察できる<sup>26)</sup>。フェムト秒の間には光学素子は殆ど動かないためだ。

SPRING-8のビームライン立上げを行っていた1990年代後半、欧米ではX線自由電子レーザー建設に向けての動きが始まっていた。21世紀に入ったところに1 km ビームラインでコヒーレントX線をいち早く扱い、また長尺アンジュレータという自由電子レーザーに不可欠な技術開発を行ったSPRING-8には、当時X線自由電子レーザー建設計画を進めていたアメリカのSLACとドイツのDESYから、経歴を紹介してほしいという要請がたびたびあり、アンジュレータ開発責任者の北村英男先生と光学系開発責任者の筆者はたびたびSLACやDESYにでかけて議論した。これが、後日のSACLA建設に繋がっていくのだが、DESYで開催されたそのような会議に来ていたのが、Jianwei Miaoだった。彼は、NSLSのVUVリングでコヒーレント回折イメージング(CDI)の最初の実験を行ったが<sup>27)</sup>、分解能を上げるため硬X線の光源を探していた。最初、APSに行ったが、当時のAPSは安定性が良くなかったようで、会議中にこちらに寄ってきてSPRING-8は使えないかと言ってきた。二つ返事でOKといい、硬X線でのCDIを進めることになった。日本側のパートナーを後に北大に移った西野吉則氏にお願いした。今でこそCDIは隆盛を極めているが当時はまだ際物扱いだった。しかしながら、CDIに関して言うと、一つの分野がどのように育っていくかを間近で見ると良い機会になった<sup>28)</sup>。コヒーレントイメージングは、その後Ptychographyに進んで行ったが、現在東北大にいる高橋幸生氏がOSAKAミラーを活用した方式を進め、最近ではスペクトロスコーピーとの組み合わせも行われている<sup>29)</sup>。

SACLA利用開始後の、コヒーレンス応用研究の発展は目覚ましいものがあり、それだけでも本稿の3~4倍の長さになりそうだが、ここでは割愛して、光源開発に移ることにする。

## 5. コヒーレント光源開発

DESYやSLACでのX線自由電子レーザー開発に刺激

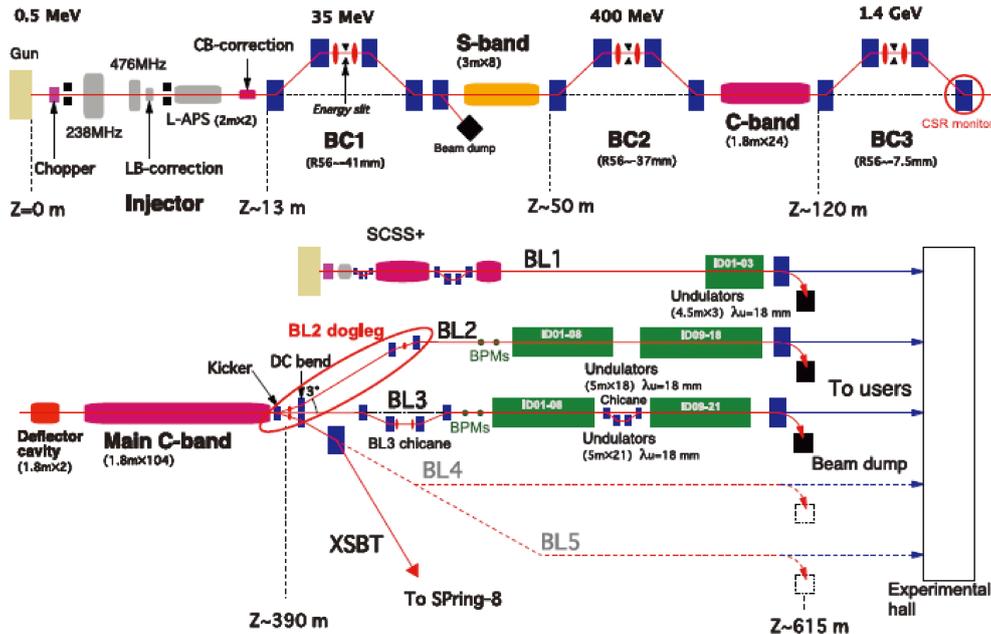


Fig. 3 (Color online) Schematics of the SACLA accelerator system: Top; from the electron gun to the CSR monitor downstream of the Bunch Compressor 3 (BC3); Bottom; downstream of the BC3 starting from the deflector cavity. The kicker downstream of the main C-band linac switches the electron beam path to BL2, BL3 and the injection line to SPring-8. The relocated test accelerator (SCSS) supplies the electron beam to BL1, which generates EUV-SX FEL.

された北村英男先生と筆者は、真空封止型アンジュレータを短周期化することによる低い電子エネルギーでの自発放射自己増幅 (Self-Amplified Spontaneous Emission: SASE) 型 X 線自由電子レーザーの実現可能性について検討を重ねた。そして2001年に理化学研究所の内部資金で要素技術開発研究を開始し、KEK から新竹積氏を主任研究員として招聘し、C-バンド空洞を利用した線形加速器と新しい考え方に基づく電子銃やバンチング系に開発をお願いしたところ、2003年ごろには基本的な要素技術開発を完了し、SASE型XFELに到達する見通しが立った<sup>30)</sup>。そして2004年から、原理実証機として250 MeVのCバンド線形加速器で極端紫外領域の自由電子レーザーを整備することとなった。一方で、やはり2004年ごろから、2006年に始まる第三期科学技術基本計画の中に「国家基幹技術」という新しい概念が入り、その候補選定が始められた。そこにX線自由電子レーザーを提案したところ採用されることとなり、2005～2010年の5年間で整備することになった<sup>31)</sup>。

SASEの原理は、低エミッタンス電子ビームが長いアンジュレータを通ると、電子と光の相互作用によって、電子が光の波長の空間密度変調を受け、アンジュレーター中でコヒーレントに振動することによって、コヒーレント光を電子の進行方向に対して放射するというものである<sup>32)</sup>。レーザー波長は、アンジュレータ放射の波長で決まるので、電子エネルギーを上げるか、アンジュレータ磁場周期を短くする、あるいはそれらの組み合わせによって、レー

ザー波長を短くすることができる。SLACやDESYでは、電子ビームエネルギーを上げる道を選んだので、線形加速器を長くする方向となった。一方、日本では真空封止型アンジュレータを使って磁場周期を短くすることによって、線形加速器のエネルギーを抑え、全体の長さも短くするという逆方向の考え方をとった。

こうして出来上がったのがSACLAであり、2011年6月に初発振を観測した<sup>33)</sup>。その後SACLAは様々な分野で利用が進んでいる。電通大の米田先生のグループはX線非線形光学分野での先駆的な研究を進め<sup>34)</sup>、また岡山大の沈先生のグループは、光合成タンパクPSIIの構造と機能に関する研究を進めた<sup>35)</sup>。光源自体も、2色レーザーの発振<sup>36)</sup>や、安定性を高めたシーディング技法の開発<sup>37)</sup>など、XFELの発展にとって重要な貢献を果たした。

2011年の完成時には、1本のXFELライン (BL3) のみでの運転であったが、その後線形加速器からの電子ビームを振り分けるマグネットを増設して、2本目のXFEL (BL2) も利用可能とし、さらに原理実証機と整備された試験加速器をSACLAアンジュレータホールに移設増強することによって極端紫外から軟X線領域でのFELライン (BL1) を整備して共用に供した。また電子振り分けマグネットからは、SPring-8に向かうビームトランスポートも整備され、SACLA線形加速器をSPring-8入射器として利用する計画が立てられた。これは、将来的な高輝度化されたSPring-8に高効率で電子ビームを入射するための低エミッタンス入射器として利用するものであるが、同



Fig. 4 (Color online) SACLA undulator hall

時に当初の1 GeV 線形加速器と8 GeV ブースターシンクロトロンによる入射系を不要なものとし、消費電力の低減に繋がるものである。最近のSACLAの概略図を、Fig. 3に示す。また、SACLA アンジュレータホールの写真をFig. 4に示す。

## 6. おわりに

筆者が放射光分野に足を踏み入れた時代は、いまから振り返ればまだ分野の揺籃期だったと思われる。それから40年を経過し、放射光という学術分野は大きく発展し、一方で相当な変質を遂げた。我々の身の回りで起こる、様々な現象は、突き詰めていくと原子の並び方と、そのまわりの電子の振舞いから理解することが出来るように思われ、放射光はそのような構造と機能を見るために不可欠な光である。いままで、どのように構造を知り、どのように機能を知るかという原理開発や方法開発が積層されてきて、多くの知識や経験が蓄積されている。

このような知識・経験をさらに進化させることは放射光科学としての一つの進みかたかと思われるが、一方で社会が解決すべき諸問題に今までに蓄積された「智慧」を応用して解決していく方向性も求められる。この場合の放射光利用者は必ずしも、現時点での放射光コミュニティのメンバーではない可能性が高いが、そのような新しいメンバーを躊躇なく組み入れながら発展していくことが、分野にとっては必須だと思われる。

この先数十年後、放射光分野がどのように発展していくかは、非常に楽しみであるが、その発展を牽引する放射光学会会員諸氏の奮闘を期待する。

## 謝辞

最後に、様々なご指導・ご薫陶を頂いた、高良和武先生、佐々木泰三先生、上坪宏道先生、菊田惺志先生に感謝する。

## 参考文献

- 1) T. Matsushita, T. Ishikawa and K. Kohra: *J. Appl. Crystallogr.* **17**, 257 (1984).
- 2) A. Iida, T. Matsushita and T. Ishikawa: *Jpn. J. Appl. Phys.* **24**, L675 (1985).
- 3) T. Takahashi, I. Takayama, T. Ishikawa, T. Ohta and S. Kikuta: *Jpn. J. Appl. Phys.* **24**, L727 (1985).
- 4) T. Ishikawa, J. Matsui and T. Kitano: *Nucl. Instr. Method* **A246**, 613 (1986).
- 5) Y. Kashiwase, M. Mori, M. Kogiso, M. Minoura, S. Sasaki and T. Ishikawa: *J. Phys. Soc. Jpn.* **55**, 4172 (1986).
- 6) Synchrotron radiation instrumentation. Proceedings, 5<sup>th</sup> international Conference, Stony Brook, USA, eds. J. B. Hastings, S. L. Hulbert and G. P. Williams, Published in: *Rev. Sci. Instrum.* **66** (1995) 1271-2390. 及び  
Synchrotron radiation instrumentation. Proceedings, 6<sup>th</sup> international Conference, SRI'97, Himeji, Japan, ed. H. Ohno, Published in *J. Synchrotron Rad.* **5** (1998) 133-1186.
- 7) <http://www.spring8.or.jp/ja/>
- 8) 例えば, D. Attwood and A. Sakdinawat: 'X-rays and Extreme Ultraviolet Radiation', Cambridge Univ. Press (2016).
- 9) 石川哲也: *応用物理* **74**, 429 (2005).
- 10) S. Yamamoto, T. Shioya, M. Hara, H. Kitamura, X. W. Zhang, T. Mochizuki, H. Sugiyama and M. Ando: *Rev. Sci. Instrum.* **63**, 400 (1992).
- 11) S. Goto, H. Ohashi, K. Takeshita, M. Yabashi, M. Yamakata, Y. Asano and T. Ishikawa: *Nucl. Instrum. Methods* **A467-468**, 813 (2001).
- 12) K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Mochiduki and T. Ishikawa: *SPIE Proceedings*, Vol. **4782**, 132 (2002)
- 13) T. Hara, M. Yabashi, T. Tanaka, T. Bizen, S. Goto, X. M. Marechal, T. Seike, K. Tamasaku, T. Ishikawa and H. Kitamura: *Rev. Sci. Instrum.* **73**, 1125 (2002).
- 14) K. Tamasaku, K. Sawada, E. Nishibori and T. Ishikawa: *Nature Physics* **7**, 705 (2011).
- 15) K. Tamasaku, Y. Tanaka, M. Yabashi, H. Yamazaki, N. Kawamura, M. Suzuki and T. Ishikawa: *Nucl. Instrum. Methods* **A467-468**, 686 (2001).
- 16) T. Ishikawa, K. Tamasaku, M. Yabashi, S. Goto, Y. Tanaka, H. Yamazaki, K. Takeshita, H. Kimura, H. Ohashi, T. Matsushita and T. Ohata: *SPIE Proceedings*, Vol. **4145**, 1 (2001).
- 17) M. Sutton, S.G.J. Mochrie, T. Greytak, S. E. Nagler, L. E. Berman, G. A. Held and G. B. Stephenson: *Nature* **352**, 608 (1991).
- 18) T. Ishikawa: *Acta Crystallogr.* **A44**, 469 (1988).
- 19) 例えば H. Mimura, H. Handa, T. Kimura, H. Yumoto, D. Yamakawa, H. Yokohama, S. Matsuyama, K. Inagaki, K. Yamamura, Y. Sano, K. Tamasaku, Y. Nishino, M. Yabashi, T. Ishikawa and K. Yamauchi: *Nature Phys.* **6**, 122 (2010).
- 20) K. Hirano, K. Izumi, T. Ishikawa, S. Annaka and S. Kikuta: *Jpn. J. Appl. Phys.* **30**, L407 (1991).
- 21) T. Ishikawa, K. Hirano and S. Kikuta: *J. Appl. Crystallogr.* **24**, 982 (1991).
- 22) H. Maruyama, M. Suzuki, N. Kawamura, M. Ito, E. Arakawa, J. Kokubun, K. Hirano, K. Horie, S. Umehara, K. Hagiwara, M. Mizumaki, S. Goto, H. Kitamura, K. Namikawa and T. Ishikawa: *J. Synchrotron Rad.* **6**, 1133 (1999).
- 23) M. Yabashi, K. Tamasaku, S. Kikuta and T. Ishikawa: *Rev. Sci. Instrum.* **72**, 4080 (2001).
- 24) M. Yabashi, K. Tamasaku and T. Ishikawa: *Phys. Rev. Lett.*

- 87, 140801 (2001).
- 25) K. Tamasaku, M. Yabashi and T. Ishikawa: *Phys. Rev. Lett.* **88**, 044801 (2002).
- 26) T. Osaka, T. Hirano, Y. Morikawa, Y. Sano, Y. Inubushi, T. Togashi, I. Inoue, K. Tono, A. Robert, K. Yamauchi, J. B. Hastings and M. Yabashi: *IUCrJ* **4**, 728 (2017).
- 27) J. Miao, P. Charalambous, J. Kirz and D. Sayre: *Nature* **400**, 342 (1999).
- 28) J. Miao, T. Ishikawa, I. K. Robinson and M. M. Mumane: *Science* **348**, 530 (2015).
- 29) M. Hirose, N. Ishiguro, K. Shimomura, D-N Nguyen, H. Matsui, H. C. Dam, M. Tada and Y. Takahashi: *Communication Chemistry Chem* **2**, 50 (2019).
- 30) T. Shintake, H. Tanaka, T. Hara, T. Tanaka, K. Togawa, M. Yabashi, Y. Otake, Y. Asano, T. Bizen, T. Fukui, S. Goto, A. Higashiyama, T. Hirono, N. Hosoda, T. Inagaki, S. Inoue, M. Ishii, Y-J. Kim, H. Kimura, T. Tanigawa, M. Kitamura, T. Kobayashi, H. Maesaka, T. Masuda, S. Matsui, T. Matsushita, X. Marechal, M. Nagasono, H. Ohashi, T. Ohata, T. Ohshima, K. Onoe, K. Shirasawa, T. Takagi, S. Takahashi, M. Takeuchi, K. Tamasaku, R. Tanaka, Y. Tanaka, T. Tanikawa, T. Togashi, S. Wu, A. Yamashita, K. Yanagida, C. Zhang, H. Kitamura and T. Ishikawa: *Nature Photon* **2**, 555 (2008).
- 31) 新竹積, 石川哲也: *日本物理学会誌* **64**, 160 (2009).
- 32) R. Bonifacio, C. Pellegrini and L. M. Narducci: *Opt. Commun.* **50**, 373 (1984).
- 33) T. Ishikawa, H. Aoyagi, T. Asaka, Y. Asano, N. Azumi, T. Bizen, H. Ego, K. Fukami, T. Fukui, Y. Furukawa, S. Goto, H. Hanaki, T. Hara, T. Hasegawa, T. Hatsui, A. Higashiyama, T. Hirono, N. Hosoda, M. Ishii, T. Inagaki, Y. Inubushi, T. Itoga, Y. Joti, M. Kago, T. Kameshima, H. Kimura, Y. Kirihara, A. Kiyomichi, T. Kobayashi, C. Kondo, T. Kudo, H. Maesaka, X. M. Marechal, T. Masuda, S. Matsubara, T. Matsumoto, T. Matsushita, S. Matsui, M. Nagasono, N. Nariyama, H. Ohashi, T. Ohata, T. Ohshima, S. Ono, Y. Otake, C. Saji, T. Sakurai, T. Sato, K. Sawada, T. Seike, K. Shirasawa, T. Sugimoto, S. Suzuki, S. Takahashi, H. Takebe, K. Takeshita, K. Tamasaku, H. Tanaka, R. Tanaka, T. Tanaka, T. Togashi, K. Togawa, A. Tokuhisa, H. Tomizawa, K. Tono, S. Wu, M. Yabashi, M. Yamaga, A. Yamashita, K. Yanagida, C. Zhang, T. Shintake, H. Kitamura and N. Kumagai: *Nature Photon.* **6**, 540 (2012).
- 34) H. Yoneda, Y. Inubushi, Y. Michine, H. Ohashi, K. Yamauchi, H. Mimura, H. Kitamura, T. Katayama, T. Ishikawa and M. Yabashi: *Nature* **524**, 446 (2015).
- 35) M. Suga, F. Akita, M. Sugahara, M. Kubo, Y. Nakajima, T. Nakane, K. Yamashita, Y. Umena, M. Nakabayashi, T. Yamane, T. Nakano, M. Suzuki, T. Masyda, S. Inoue, T. Kimura, T. Nomura, S. Yonekura, L-J. Yu, T. Sakamoto, T. Motomura, J-H. Chen, Y. Kato, T. Noguchi, K. Tono, Y. Joti, T. Kameshima, T. Hatsui, E. Nango, R. Tanaka, H. Naitow, Y. Matsuura, A. Yamashita, M. Yamamoto, O. Nureki, M. Yabashi, T. Ishikawa, S. Iwata and J-R. Shen: *Nature* **543**, 131 (2017).
- 36) T. Hara, Y. Inubushi, T. Katayama, T. Sato, H. Tanaka, T. Togashi, K. Togawa, K. Tono, M. Yabashi and T. Ishikawa: *Nature Commun.* **4**, 2919 (2013).
- 37) I. Inoue, T. Osaka, T. Hara, T. Tanaka, T. Inagaki, T. Fukui, S. Goto, Y. Inubushi, H. Kimura, R. Kinjo, H. Ohashi, K. Togawa, K. Tono, M. Yamaga, H. Tanaka, T. Ishikawa and M. Yabashi: *Nature Photon.* **13**, 319 (2019).

## ● 著者紹介 ●

**石川哲也**

国立研究開発法人理化学研究所 放射光  
科学研究センター

E-mail: ishikawa@spring8.or.jp

専門: X線光学

**【略歴】**

本文中に記載の通り。SPIE Fellow,  
OSA Fellow. 2012年紫綬褒章受章。