

## ビームライン光学技術シリーズ趣旨説明

大橋治彦 勸高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1  
E-mail : hohashi@spring8.or.jp

平野馨一 高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1  
E-mail : keiichi.hirano@kek.jp

### 1. はじめに

特別企画「放射光源」シリーズ(2003年 Vol. 16, No. 1 から2005年 Vol. 18, No. 1 まで全12回)に引き続き、「ビームライン光学技術」シリーズがはじまります。放射光利用分野の拡大に伴い増えている初心者ユーザや、物理系装置に馴染みの薄い化学・生物系などの学生を対象に、「放射光を使いこなすためのビームライン光学技術の基礎知識」を解説する約2年にわたる連載企画です。

「ビームライン光学技術は施設スタッフに必要な知識であって、なぜユーザが知らなければならないのか?」と疑問に思われる読者も多いかもしれません。そもそも初心者ユーザがビームライン光学技術を学んでどんなご利益があるのでしょ

うでしょうか? 一方、「初心者であろうが実験研究者ならば装置を理解しているはずで、ビームライン光学技術の基礎は放射光学会誌の読者には釈迦に説法である!」とお叱りの声が聞こえてきそうです。ところが、使い勝手の向上に伴いビームラインがブラックボックス化した結果、利用経験の豊富な方やビームライン担当者といえども、実験ステーションより少し上流の装置については理解が及ばず、進んだ実験を計画する際、思わぬ落とし穴に陥る場合があるようです。

そこで初回にあたる今回は、放射光を初めて利用した頃を思い起こしつつ、ビームラインとは何かについて、またビームライン光学技術を知る必要性について最初に述べることにし、それをもってこのシリーズの趣旨説明にしたいと思います。次に後半の部分では、ビームライン光学技術シリーズ全体の構成と概要をご紹介します。

### 2. ビームラインとは何か

ビームラインとは「光源で発生した光をユーザの用途に合うよう加工して安全に提供するシステム」です。百聞は一見にしかず、Fig. 1とFig. 2にX線と、真空紫外・軟X線の典型的なビームラインの写真を示します。Fig. 1のX線ビームラインでは、放射線遮蔽ハッチと呼ばれる鉛と鉄板でできた小屋がまず目に飛び込んできます。X線の

ユーザならば、実験中ハッチに出入りする際、インターロックシステムのボタンを何度も押す一連の操作を行います。ところが、Fig. 2の真空紫外・軟X線ビームラインではインターロックシステムで真空封止バルブを開閉しますが、ハッチはありません。しかし、試料を真空槽内に収納して高真空にしなければ光を使えません。

このような放射線遮蔽ハッチやビームライン真空系は、ユーザ利用実験に大きな制約を課すものです。たとえば、ハッチの大きさによって収納可能な実験装置の大きさが制限されますし、真空系の容量によって真空排気に要する時間が決まります。では、なぜハッチが必要なのでしょう

か? また、真空への要請はどのようにして決まっているのでしょうか? このシリーズでは、たとえば、このようなもっとも基本的な疑問にお答えするところからはじめます(第2回~第4回)。

もう一度2枚の写真を見比べると、分光器の形が大きく異なっているのがわかります。なぜ種類の分光器で真空紫外からX線まで広く走査しないのでしょうか? 何がビームラインのカバーするエネルギー範囲を制限しているのでしょうか(第4回~第6回)。

見かけは全く異なりますが、ユーザが必要としない光を取り除くしくみと、ユーザの用途に合わせて光を加工するしくみが異なるに過ぎません。このシリーズでは、ビームのエネルギー、形、偏光、コヒーレンス、パルス特性などを、ユーザの必要に合わせて制御する光学技術に関して、その物理的基礎と工学的基礎を平易に解説します。

### 3. ビームライン光学技術を知る必要性

#### 3.1 ユーザにとってのビームライン

ユーザにとってビームラインとは何でしょうか? ここで、「ビームライン」を「車」に、「放射光の利用」を「車の運転」に、「実験装置」を「道路」になぞらえてみます(Fig. 3)。車を運転する目的に色々あるように、放射光の利用目的も多種多様です。例えば産地推定のために微量元素の割合を知る、試料の特異な物性を理解するために構造や電子状態を決定する…等々。

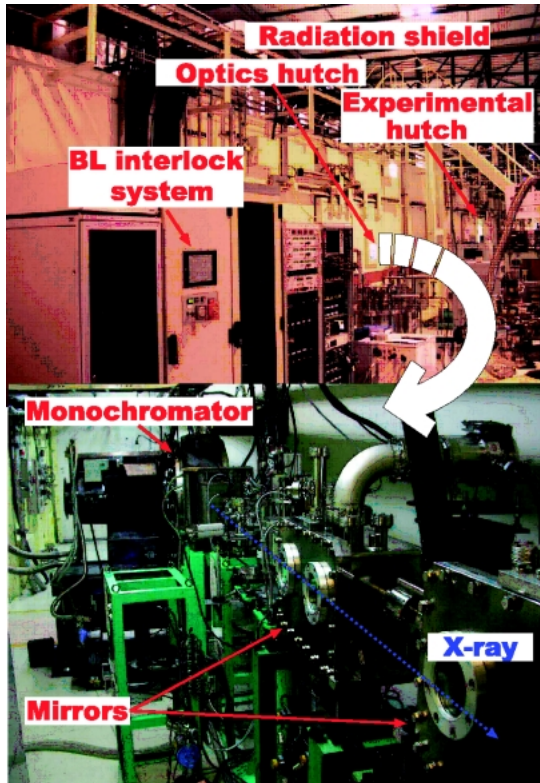


Fig. 1 X-ray beamline (SPring-8/RIKEN BL19LXU)

ユーザがビームラインを知ることは、教習所で車の仕組みを学ぶことと同じです。車を運転してどこかに行きたいから教習所に通います。車の仕組みを知りたいからではありません。また仕組みを習ったからといって、車を設計できるようにはなりません。しかし、各種の基本的なエンジンやミッションなどの構造上の違いを学ぶことを通して、高速走行向きか、悪路の走行が可能か、小回りの利く車なのか、自分の目的にあった車種を選ぶ最低限の基礎知識を習得します。また、運転中に異音などに気づいて対応できるようになるなど、安全走行に役立つこともあるでしょう。運転者（放射光ユーザ）の立場からすると、たとえ初心者であっても車（ビームライン）の仕組みを知ることは必要であることがわかります。

しかもそれは決して難しいことではありません。車の構成要素（エンジンの動力でタイヤを転がし、ブレーキとアクセルで制御する）は車種によらず基本的に同じです。それと同じように、ビームラインも多種多様に見えますが、その構成要素（光源、遮蔽、制御、各種の光学素子・光学系…）は同じです（Fig. 4）。

### 3.2 新規ユーザといえどもビームライン光学技術を知る必要がある

このシリーズでは新規に放射光利用をお考えの方を念頭に置いています。ひと口に新規ユーザと言っても実にさまざまです。試料作りやその応用に長けている方、新しい

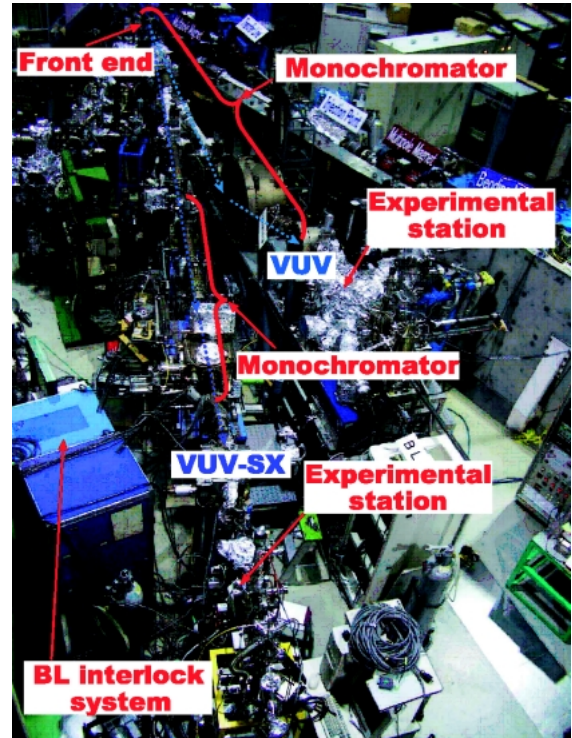


Fig. 2 VUV and soft x-ray beamlines (UVSOR II/IMS BL8)

検出器や手法を持ち込もうとする方などです。

例えば、ビームラインに試料だけ持ち込むユーザの場合を考えてみましょう。このようなユーザは、たとえ自分では運転できなくても、とりあえず車に乗せてもらえれば事足りる人といえるでしょう。運転できる知人に頼むか、タクシーでとりあえず目的地まで連れて行ってもらいます。これはつまり顔見知りのビームライン担当者や経験豊かなユーザと共同研究するような場合で、放射光利用のきっかけとして多いかもしれません。しかし利用が頻繁になると、多くの人は自ら車を選び自由に運転したくなるものです。そのようなとき、使用目的と経路に適した車を選定する知識が必要になります。

残念ながら、目的地さえ告げればあとは全自動で走行してくれるような便利な車は実用化されておらず、ビームラインも然りです。ただし、多くのユーザが見込まれる研究分野で、なおかつ測定手法がほぼ同一の場合には、使い勝手の良い専用のビームラインや実験ステーションが整備されています。いわば、定番の観光スポットを巡るガイド付きの定期観光バスのようなものです。例えば、タンパク質の構造解析用のビームラインでは、結晶さえ持ち込めば半自動測定して構造まで得られるように整備されています。このようなビームラインだけをご利用になる方も少なからずいらっしゃいます。放射光の有用性を世に知らしめてくれている重要な存在です。

しかし、定期バスしか知らない観光客は、奈良といえど大仏と鹿しか思い浮かべないかもしれません。これでは旅

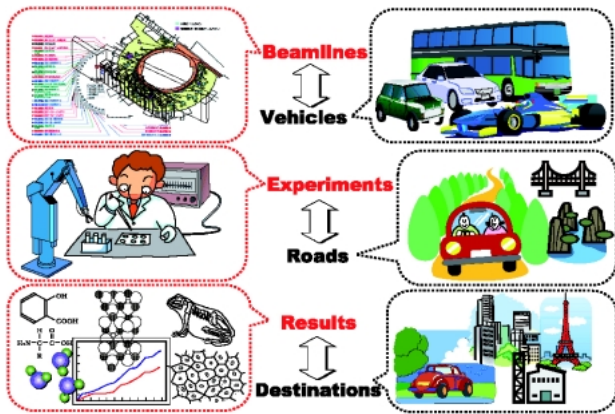


Fig. 3 Analogy between SR science and driving

の醍醐味を味わうことはできません。それと同じように、放射光施設や実験装置を単なるブラックボックスとしてしか見ていないユーザは、放射光の素晴らしい魅力や可能性をごく表面的にしか味わえません。そして表面的であるがゆえに、往々にして一定期間が経つと陳腐化してしまいがちです。さらに悪いことに、定期観光バスだけが車だと信じ込んでしまうと、たとえ自分の目的に合う車がすぐ隣にあったとしても、残念ながらそれに気づくことすらできないでしょう。

昨今では、新規ユーザ向けに専門の道案内人やガイドブックが必要との認識が広がっています。新規ユーザがビームラインや手法を選択するには、ビームライン担当者だけでは不十分だということです。ところが、多様化の一途をたどる利用ユーザに対して、案内人の養成が追いつかないという厳しい現実がもう一方であります。ですから、案内人の登場を待っていたのでは、目的地にたどりつくのがかなり遅れてしまうかもしれませんし、あるいは最悪の場合、目的地にたどり着けないかもしれません。ゆえに、ユーザは自衛措置として放射光に関する基礎知識を習得する必要があります。そうすれば、経路として高速道を使うのがいか一般道を使うのがいか、ユーザは車の性能に応じて自分で適切に選択できるようになりますし、誰よりも早く目的地に到達できる可能性もぐんと高まることとなります。逆に、車をいい加減に選んでしまうと、著しく燃費が悪かったり、通行料が高かったりして、目的地に達することができないかもしれません。例として、ビームラインに新しい検出器や分析装置を持ち込もうとしている新規ユーザを考えましょう。この場合、光量と光子密度のどちらを優先するのか、エネルギー分解能はどの程度必要なのかなど、必要最低限の要件を整理して選定しないと、努力の甲斐なく、期待する結果は得られないでしょう。

ビームライン光学技術シリーズでは、利用例を念頭に置きつつ、現在得られている光の性質を実例や数値をあげながら紹介していきたいと考えています。

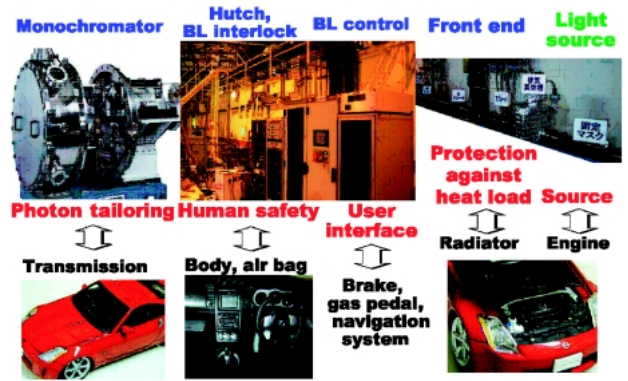


Fig. 4 Analogy between beamlines and vehicles

### 3.3 経験豊かなユーザもビームライン担当者もビームライン光学技術を知る必要がある

僭越かもしれませんが、このシリーズはビームライン担当者や経験豊富なユーザにとっても有意義なものになるであろうと自負しています。昔は運転手も同乗者も同じ町の出身で価値観を共有できましたが、いまやその背景は多彩です。同乗者に現在の車の能力を適切に理解してもらう努力を払わなければなりません。そのために初心者向けの自習書が必要とされているようです。特に大学や研究機関で学生や若手研究者の育成にあたっている先生方の中に、そのような自習書の必要性を感じている方が多くいらっしゃるようです。

黎明期の放射光ユーザの中には、オフロードバイクで山野を自在に駆け巡るライダーのような人々が居ました。彼らはバイクのメカに精通したライダーであり、道無き山野に道を切り拓き、絶景を誰よりも先に眺望する喜びを享受しました。このような人々は光源やビームラインの本質を理解している真のパワーユーザだったため、新しい実験装置や手法を開発して先駆的成果を挙げることができたのです。パワーユーザだったからこそ、貴重なビームタイムを活かしたのかもしれない。

しかし、最近の四輪車（放射光ビームライン）はバイクよりもずっと部品点数が多く、しかも用途が多岐に渡っています。ですから、最低限の構成要素は同じとはいえ、エンジン（光源）、ブレーキ（遮蔽、インターロック）、ミッション（分光器）などのすべてを見渡すことは、同乗者であるユーザだけでなく、運転手つまり担当者にとっても困難になっています。そこで、ビームライン光学技術を基本に立ち返って復習し整理することが、特に次代の放射光科学を担う若手研究者や若手技術者に求められています。この点を考慮して、本シリーズでは大胆にも(?)、老練な大先生方ではなく若手の(未熟な?)研究者や技術者を多数執筆陣に迎えることにしました。先達の経験に耳を傾けながら、百科事典的な専門知識の解説に陥ることなく、相互に連携を保ちつつシリーズを構成するよう心がけていきたいと思っています。

先進的ユーザは、今ある車（ビームライン）をチューンして世界的なレースに参戦します。また、第4世代のエンジン（光源）もデビュー間近です。どのような光源であっても車の構成要素（ビームライン光学技術）は必要です。各種の新しいエンジンの試運転が間近に迫っている今こそ、若手執筆陣が現状をまとめ、次世代のビームライン光学技術を検討する好機と言えるでしょう。そこで本シリーズでは、現状とそれを支えている基盤技術にとどまらず、ビームライン光学技術の今後の行方についても触れる予定です。

## 4. シリーズの概要

### 4.1 全体構成

本シリーズでは、ユーザの用途に合わせて効率よく光を供給するためにビームラインにどのようなしくみが用意されているのかを、次の3つの側面から取り上げます。①光を安全に取り出すしくみ、②光を加工するしくみ、③光を便利に扱うしくみです（Table 1）。各回の執筆者には次の点をお願いしてあります。

- (1) いずれの回も、対象となる光の性質や技術を、どのような利用例（あるいは場面）でユーザが目にするのか、導入部に盛り込むこと、
- (2) 各回でテーマとしている光の性質について、現在、得られている量の典型例あるいは先端例を、単位付きで例示すること。また何がその量を制約しており、今後、どのような発展があればどの程度の向上が見込まれるのかを十年程度のスパンで予測すること、
- (3) ユーザが陥りやすい誤りを事例として指摘すること（事例集としてこれらを最終回にまとめる予定）。

Table 1 ビームライン光学技術シリーズの全体構成と各回タイトル

回	分類	タイトル(案)
1	序論	ビームライン光学技術シリーズ趣旨説明
2	第1部 光を安全に取り出す	光を安全に取り出す（前編）
3		光を安全に取り出す（後編）
4	第2部 光を加工する	光のエネルギーを切り出す（基礎編）
5		光のエネルギーを切り出す（X線編）
6		光のエネルギーを切り出す（VUV・軟X線編）
7		光の形を整形する（反射鏡編）
8		光の形を整形する（回折・屈折素子編）
9		光の偏光を制御する
10		光のコヒーレンスを扱う
11	光の時間構造を使う	
12	第3部 光を便利に扱う	光を自在に操る制御
13		安定な光を使いこなすために

なお本シリーズでは、限られた紙面で事例とその背景にある基本原理を見通しよく解説することを目指しています。そこで、厳密さよりも平易さを優先することとし、取り扱うテーマについてもかなり絞り込むことにしました。そのため、不正確な点や欠けてしまう点が多々あるかもしれませんが、どうかこのような事情を予めご理解くださるようお願いいたします。もしビームライン光学技術についてさらに深く学びたいという方がおられましたら、より広範で専門的な教科書もいくつかありますのでそちらをご覧ください（参考文献1）～4）。

### 4.2 光を安全に取り出すしくみ（第2回～第3回）

ユーザがX線ビームラインを前にしてまざりする光景といえば、Fig. 1に示すように放射線遮蔽ハッチやインターロックシステムのグラフィック操作パネル、それに各種の警告灯あるいは真っ赤なアポートボタンでしょう。これらは安全に光を取り出すためになくてはならない、ビームラインの重要な構成要素です。

第2回「光を安全に取り出す（前編）」では、実験中ユーザがもっとも身近に操作するインターロックシステムや放射線遮蔽機器を取り上げます。光源から放射される有害な成分を取り除くために、ビームラインには放射線遮蔽ハッチやビームシャッター、ガンマストップそして各種のインターロックシステムが装備されています。人的保護の観点からビームラインが果たしている役割とその基本的考え方について述べます。また多くの施設ではアポートボタン（もしくは緊急停止ボタン）が取り付けられていますが、これを押すとどんなことが起こるのか、何のために装備されているのかについて、いくつかの実例をまじえつつご紹介します。

第3回「光を安全に取り出す（後編）」では、引き続き人的保護、機器保護の観点からフロントエンドの役割を解説します。日頃、ユーザが目にするのではないビームラインの最上流部ですが、どのような機器が何のために設置されているのか、いかなる観点で設計・管理されているのかについて紹介します。たとえば、最上流で光を遮るためのメインビームシャッター（MBS）は人的保護を担保する重要な機器です。昨今では、自動開閉させるプログラムをユーザが組めるようにしている施設もあるようです。しかし、機器の実態を全く知らずに駆動させたのでは、たとえば閉閉頻度を不用意に増やしてしまい、故障率を高める恐れがあるでしょう。他にも、フロントエンドには光学素子を過大な熱負荷から守るという役割がありますし、超高真空のための配慮も随所になされています。それらのことについても解説します。

### 4.3 光を加工するしくみ（第4回～第11回）

多くの人が放射光を利用しているのは、放射光には他の光源にない優れた特徴があるからです。第一の特徴は赤外

領域から X 線領域に至るまでの広いエネルギー領域をカバーしているという点です。また、指向性が高く、高輝度光が得られるという点も重要です。特に X 線領域では他の光源よりも遙かに高輝度です。さらに、偏光特性やパルス特性をも備えています。このように優れた特徴を持つ放射光ですが、これを実験のために有効利用するには、様々な光学素子や光学系を用いて光を加工することが必要になってきます。そこで、光のエネルギー、ビームサイズ、偏光、コヒーレンスそして時間構造を制御するためのしくみをご紹介します、パラメータごとに現状の典型的例や先端的例について、さらに将来への課題についても触れていきます。

#### 4.3.1 光のエネルギーを切り出す

先に示したように、使用するエネルギー領域が変わると、ビームライン全体の見かけも大きく変わります。その最大の原因の一つが分光器です。ですから、分光器はビームラインを象徴する機器であるとも言えるでしょう。では、なぜエネルギー領域によって分光器の見かけがこれほど変わるのでしょうか。第4回「光のエネルギーを切り出す（基礎編）」では、エネルギーを切り出すためにどのような物理現象を利用するのか、また回折格子や結晶の使い分けといった分光素子の基礎について述べます。

後続の「光のエネルギーを切り出す（X線編）」（第5回）と、「光のエネルギーを切り出す（VUV・軟X線編）」（第6回）では、それぞれのエネルギー領域で用いられている典型的な分光器を例示し、分光器デザインの背景や光学素子選択の物理的基礎について、また製造技術などによる限界について述べます。さらに、現在得られている分光器のスループット、エネルギー分解能やそれらの評価方法などについても紙面が許せば触れる予定です。

#### 4.3.2 光の形を整形する

ユーザにとって、実験ステーションでの光の大きさは重要なパラメータのひとつです。第7回「光の形を整形する（反射鏡編）」では、集光素子の代表例としてまず反射鏡を取り上げます。集光に加え、偏向、平行化、高次光除去など、反射鏡の持つ様々な役割を広く紹介します。さらに、鏡の大きさ、形状は多種多彩ですが、どのようにして選択されているのか、利用例とともに解説します。

引き続き、第8回「光の形を整形する（回折・屈折素子編）」では、反射鏡以外の各種の集光素子（ゾンプレートや屈折レンズ等）の原理や事例を紹介します。それぞれの集光素子の利点・欠点を併記し、エネルギーごとに現在得られている性能と、今後の技術的発展により見込まれる性能を予測します。

#### 4.3.3 光のさまざまな性質（偏光、コヒーレンス、時間構造）を扱う

偏光、コヒーレンス、時間構造は光の重要な性質ですが、放射光科学の世界では近年に至るまであまり注目されてきませんでした。そのため、これらのことに馴染みの薄い放射光ユーザは初心者に限らず多いようです。しかし次世代光源の登場を目前に控えている今、これらの性質はますます重要性を増しつつあります。

第9回「光の偏光を制御する」では、まず偏光とは何かについて解説し、偏光の代表的利用例について紹介します。また、偏光を制御する各種光学素子（偏光子や移相子等）について概観し、エネルギー領域別に偏光制御の効率や速度、得られる偏光度の具体例を紹介します。

第10回「光のコヒーレンスを扱う」では、そもそもコヒーレンスとは何か、コヒーレンスが必要とされる平易な事例を紹介し、コヒーレンスを保存する方法や破壊する方法について述べます。

第11回「光の時間構造を使う」では、放射光のパルス特性とその利用例を示し、時分割測定法や同期技術の基礎について紹介します。また、エネルギー領域別に利用可能なパルス幅や繰り返し周波数等について具体的な数値をあげて紹介し、今後の展望についても触れます。

著しく発展しているこれらの光学技術について、先端的事例を網羅することは紙面が限られているため困難です。しかし、重要文献に関する情報等も盛り込まれる予定ですので、今後の先端的利用への糸口になれば幸いです。

#### 4.4 光を便利に扱うために（第12回～第13回）

ビームラインには上述のような様々な機能を持つ機器が設置されています。第12回「光を自在に操る制御」では、これらの機器を制御してデータを集録するための制御システムについて解説します。ビームライン制御は何のために必要で、現在、何ができて、何ができないのか、ユーザが考慮すべき点は何かという視点で紹介いたします。たとえば画像データを扱う場合、解像度、分解能、バンド幅、転送速度、ストレージ量などに注意して、データ集録系を適切に選定・構築する必要があります。また、計測のオートメーション化やコラボラトリなどの新しい放射光利用形態の現状と未来についても触れます。

最終回では、「安定な光を使いこなすために（仮題）」として、シリーズ全体のまとめに加え、初心者ユーザが陥りやすい誤りやビームライン担当者の貴重な（情けない？）失敗談、それからユーザに知っていただきたいFAQを、各執筆者はもとより読者の皆様からも公募して紹介したいと考えています。

## 5. むすび

某放射光施設では年に平均230件以上もの“初めて”の

課題申請があります。これはその施設の全応募課題数の1/4~1/5の割合に当たります。放射光施設全体の統計は見当たりませんが、施設の数に限られていること、また初申請の件数は増えこそすれほとんど減っていないことなどを考慮すると、この数は少なめに見積もった「毎年、新規参入するユーザグループ数」とみなせるでしょう。このような新規ユーザグループの相次ぐ参入により、ユーザの業種、研究分野、利用形態も年々多様化しています。

ところで、新規ユーザは通常どのような過程を経て放射光実験に参入するのでしょうか？最初のステップとして多いのは、学会発表や学術誌などで実際の測定例を目にし、それで放射光に興味を持つようになるというケースではないでしょうか。さて、その次はいよいよビームライン選びです。幸いにもいくつかのビームラインが選択肢として見つかったとしましょう。実際には、地理的条件、競合の多寡、ビームライン担当者との関係、利用支援形態など、様々な“事情”がビームライン選びに影響を及ぼしているようです。しかし言うまでもなく、ビームライン選びで最も大切なのは光のパラメータです。ですから、ユーザは施設が提供する光のパラメータに関する情報を自分で「読み解く」ことができなくてはなりません。また、申請書を書くときも、自分が必要とする光のパラメータを適切に記述できなくてはなりません。さもないと、課題不採択で門前払いにあうかもしれません（ちなみに、ベテランユーザでも時々このような悲惨な目にあうことがあります）。このように、新規ユーザが放射光実験に参入するには、いくつかの関門をクリアしなければなりません。少しでもその手助けをすることが、本シリーズの大きな願いです。

ビームラインの性能を比較して自分の実験に最適なものを選択するうえで、基礎知識は重要であり必要不可欠です。このシリーズを通読いただくことで、ビームライン光学技術の基礎に触れていただき、既成の枠にとらわれない新しい利用が芽生えるきっかけとなれるように、執筆陣一

同努力して参ります。どうぞご期待ください。

最後に、本シリーズは柳下明前編集委員長のもとで企画され、浅学ではありますが我々が編集を仰せつかることになりました。構成にあたり理研・石川哲也主任に貴重なアドバイスを頂戴しました。また、本稿執筆ではJASRIビームライン技術部門の仙波泰徳氏をはじめとする多くの同僚や先輩にご意見を頂戴しました。ここに深く謝意を表し、今後ともご指導をお願いする次第です。

#### お願い

本シリーズでは、初心者ユーザが陥りやすい誤りやビームライン担当者の貴重な経験談を募集しております。最終回でご紹介したいと考えております。また、本シリーズに関してご意見・ご要望がございましたら編集担当（SPRING-8 JASRI 大橋治彦/hohashi@spring8.or.jp, KEK-PF 平野馨一/keiichi.hirano@kek.jp）までどうぞお便りください。

#### 参考文献

和洋を問わず放射光ビームライン光学技術に関して多くの専門書が出版されていますが、入手性を考慮して以下の文献をご紹介します。

- 1) 大柳宏之編「シンクロトロン放射光の基礎」(1996年丸善) 3章「放射光と真空工学」、4章「光学素子の基礎と応用」、5章「ビームライン」
- 2) 波岡 武・山下広順共編「X線結像光学」(1999年培風館) 4章「X線光学素子」、5章「X線結像光学系」、7章「基盤技術」
- 3) 富増多喜夫編著「シンクロトロン放射技術」(1990年工業調査会) 第8章「放射線遮蔽と施設の管理」、第9章「放射光ビームライン」
- 4) 渡辺 誠・佐藤 繁共編「放射光科学入門」(2004年東北大学出版会) 第5章「分光技術」