

イメージを写す II (イメージングプレート)

山本雅貴 独立行政法人理化学研究所 播磨研究所・放射光科学総合研究センター
E-mail : yamamoto@riken.jp

1. はじめに

イメージングプレート (Imaging Plate, 以下 IP と略します) は、放射光ビームラインでの回折・散乱実験をはじめとした大強度 X 線利用実験の X 線イメージを記録する検出器として広く利用されてきました。これは、IP をその広大なダイナミックレンジを生かした積分型の 2 次元 X 線検出器として利用することにより、大強度 X 線においても数え落としがなく、また広い検出範囲において直線性の高い X 線イメージが記録可能なためです。現在では、半導体技術の進歩による CCD 検出器 (前号) やピクセル検出器 (次号予定) の登場により、リアルタイム性に劣る IP 検出器はその活躍の場が狭まりつつありますが、その大面積かつ高ダイナミックレンジという他の検出器では実現できない特徴を生かして、高精度かつ高分解能の回折実験には欠かすことの出来ない検出器として活用されています。

ここでは、まず IP の構造・動作原理や特徴を解説して、その性能を紹介します。その後、放射光利用研究で使用している X 線検出器としての応用例を紹介します。

2. イメージングプレート (IP) の概要と動作原理

2.1 イメージングプレートの概要

1980年代前半までは、X 線イメージングにはレントゲン写真に代表される様な X 線フィルムが利用されていました。しかし、X 線イメージに対して計算機処理に適したデジタル化の要望が高まり、富士フィルム株式会社は医療用として従来の X 線フィルムと全く異なる X 線検出原理に基づく、イメージングプレート (IP) を開発しました¹⁾。IP は、従来の X 線フィルムに比べて感度が高く、バックグラウンドノイズが低いので、低線量レベルで高精細画像が記録できます。また、その広いダイナミックレンジにより適正露光領域が広くさらに、現像のような化学処理を経ることが無いので品質の一定した X 線イメージの簡便なデジタル化を実現しています。医療用に開発された IP は、その製品化直後から高エネルギー物理学研究所 (当時) の雨宮らにより、X 線実験用の検出器として性能

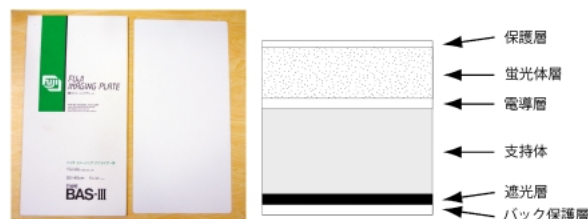


Fig. 1 IP (富士フィルム株 BAS-III) と IP の構造。

評価が行われました²⁾。その評価の結果、6桁という広いダイナミックレンジを持つ画期的な 2 次元 X 線検出器として利用可能であることが確認され、回折散乱実験等への応用³⁻⁵⁾がはじめられました。

IP は、X 線イメージを一時的に蛍光体に蓄積して、その蓄積イメージをレーザー光の刺激により順次読み出すことが出来ます。この放射線エネルギーがいったん蓄積され、後で熱や光などの励起によって再び蛍光を発生する現象は、一般に輝尽性蛍光発光現象とよばれています。IP はレーザー光による励起によって蛍光を発生する光輝尽発光 (Photo Stimulated Luminescence, PSL) 現象を利用したものです。

IP 本体とその構造を Fig. 1 に示します。IP は蛍光体層 (150 μm) を、プラスチックの支持体 (150-250 μm) と検出面の保護層 (10 μm) によりサンドイッチした構造を持つ柔軟なフィルムです。蛍光体層は、輝尽性蛍光物質 (BaFBr : Eu^{2+} , BaFBr に Eu^{2+} がドーブされている) の微結晶が高密度充填塗布されたものです。その蛍光体は、放射線全般に感度をもち、露光した X 線イメージにより蛍光体内部にカラーセンターが生成され、潜像として記録されます。これを、He-Ne レーザーの 633 nm のレーザー光で刺激すると、蛍光体に記録された X 線量に比例した 390 nm の輝尽蛍光を発生します。この輝尽蛍光強度を計測することにより、IP に記録された 2 次元の X 線強度分布を知ることができます。また、読み取りが終わったあと、全面に可視光を照射することによって、IP 内の残像を消去して繰り返して使用することができます。X 線の露出・記録イメージの読み出し・消去までの流れを Fig. 2 に模式的に示しました。

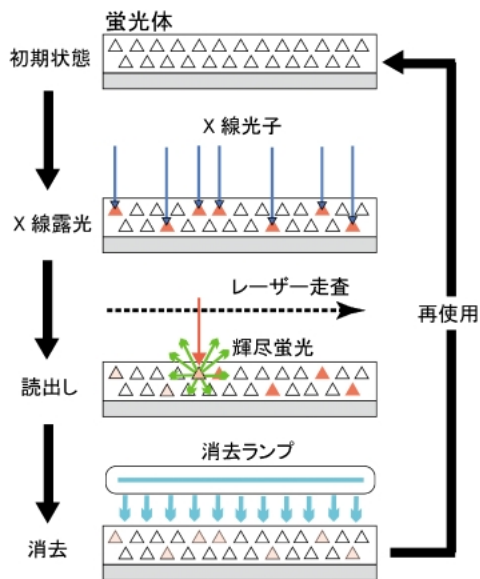


Fig. 2 IPでのX線イメージの記録から検出までの流れ。

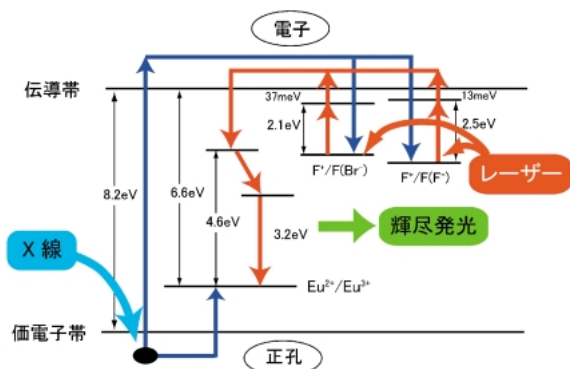


Fig. 3 IPの発光原理を示すエネルギーレベル図。

2.2 X線像記録の原理

ここでは、IPがどのようにしてX線を記録し、読み出せるのかについて、エネルギーレベル図 (Fig. 3) をもとにその発光原理を説明します^{6,7)}。

IPにX線が入射すると、輝尽性蛍光体 (BaFBr:Eu²⁺) のEu²⁺イオンの一部がEu³⁺イオンになり、このとき放出された電子は結晶中に存在している格子欠陥 (Fセンター) に捕捉され準安定なカラーセンターが形成されます。また、同時に生成した正孔はEu²⁺により捕捉されます。その後、蛍光体に可視光 (波長633 nm) を照射するとカラーセンターは消失し、電子が伝導帯を經由してEu²⁺にトラップされた正孔と再結合することで、蓄積されていたX線エネルギーが蛍光 (波長390 nm) として放出されます。また、その蛍光発光の寿命は0.8マイクロ秒程度¹⁾であり、これがIPの高速な画像読出しを可能にしています。

2.3 イメージングプレートの特徴

IPは積分型のX線検出器であり、放射光による大強度X線イメージを露光しても、原理的に数え落としの問題がありません。また、そのほかにも大きな検出面積や広いダイナミックレンジなど数々の優れた特徴を持っています。しかし、基本的にIPによるX線の検出はフィルム法であり、前項の原理で説明したようにX線露光後に独立したタイミングで記録イメージの読取りを行い、その読取りに数分程度の時間を必要とするため、X線チョッパーと同期した多重露光等の工夫無しには時間分割測定や実時間測定に適していません。ここでは、IPの特徴をその長所・短所の点からまとめました。

検出器としてのIPの長所として以下の項目が挙げられます。

- 1) X線に対する吸収効率が高く、しかもバックグラウンドノイズがほとんど無い。X線用フィルムと比べて20倍以上²⁾の感度がある。
- 2) 広いダイナミックレンジをもち、その蛍光は入射したX線線量と6桁にわたって比例関係にある。
- 3) IPはプラスチックをベースとしたフィルム形状として製作されるので、柔軟性が高く任意曲面の検出器が製作可能で、また検出面積の大型化が容易である。
- 4) レーザーによりX線イメージを直接デジタル値で読み出すことができるので、常に一定の条件で読出したデジタル画像が利用可能である。
- 5) 同一のプレートを繰り返し使用できるので、検出器として装置に組み込んで使用可能である。

一方で、IPの検出器としての短所としては、

- 1) 記録画像の読み取りに数分を要することから、リアルタイム性がない。
- 2) 位置分解能はX線フィルムや直接変換型の2次元半導体検出器に比べて劣っている。
- 3) 放射線照射後の時間とともに輝尽発光強度が減衰するフェーディング現象が観測される。

など、その利用時に工夫が必要な項目が考えられます。

2.4 イメージングプレートの読出し機構

ここでは、一般に利用されているIPの読取装置の構成を紹介します。IPの読取では、フォーカスしたHe-Neレーザー光を蛍光体面上で2次的に走査して、発生する輝尽発光強度を光電子倍增管 (Photo Multiplier Tube: PMT) で時系列信号として測定することにより、蛍光体層上に記録されたX線イメージを読出しています。一般的にIP読取装置では、ポリゴンミラー等による高速なレーザー走査と、IP本体もしくはレーザー光学系を低速で移動させるステージ走査を組み合わせ、2次元のレーザー光走査を実現しています。その読取機構の概念を Fig. 4に示しました。この様なフォーカスしたレーザービームでIPを走査して二次元画像情報を得る検出系における画

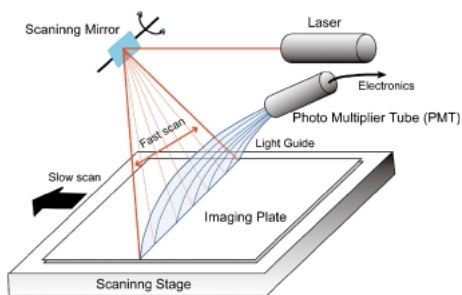


Fig. 4 IP 読出し装置の機構概念図。



Fig. 5 SPring-8 に共同利用機器として設置されている IP 読出し装置 (富士フイルム社製 BAS2500)。

素サイズは、画像情報を画像データとして取り込む (サンプリングする) 時間間隔とスキャン速度の積により計算される IP 表面のサンプリング間隔を表しています。したがって読出し画素サイズが直接、IP の位置分解能を示していないことに注意が必要です。

現在、放射光施設では富士フイルム社製の BAS2500 が IP 読取装置として多く利用されており (Fig. 5), IP に記録された X 線イメージを $50\ \mu\text{m}$ もしくは $100\ \mu\text{m}$ の読取画素サイズで、最大 $200 \times 400\ \text{mm}^2$ の読取範囲を読み取り可能です。また、その画像は画素あたり 16 bit (65,536 階調) のデジタル画像として記録されます。 $50\ \mu\text{m}$ の読取画素サイズで面積が $200 \times 400\ \text{mm}^2$ の IP の読出しに 5 分程度の時間がかかります。また、その場合の出力画像サイズは 64 MB になります。

3. イメージングプレートの特性

3.1 感度と検出効率

IP の X 線検出効率は非常に高く、X 線フィルムに対してその検出効率は 20 倍以上といわれています。特に低線量領域での感度向上は目覚ましいものがあり、微弱 X 線シグナルに対する X 線実験の高感度・高精度化に大きく貢献しています。また、IP は比較的高いエネルギー領域でも高い感度を持っており、30 keV 程度の回折実験にも利

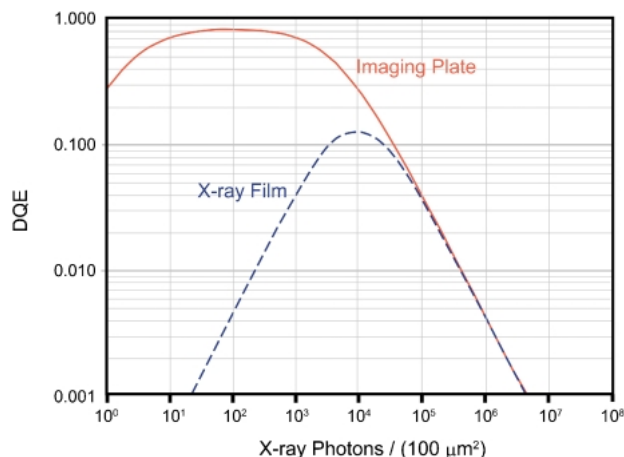


Fig. 6 IP と X 線フィルムの DQE の比較²⁾。

用されています。

検出器の感度を示す指標として、検出量子効率 (DQE: Detective Quantum Efficiency) が用いられることもあります。DQE は、入力信号の (S_i/N_i) と出力信号の (S_o/N_o) を用いて次式で定義されています、

$$DQE = (S_o/N_o)^2 / (S_i/N_i)^2$$

理想的な検出器では、入力信号の S/N が検出器により悪化することなく、そのまま出力信号の S/N となり、 $DQE = 1$ となります。両宮らにより計算された IP の $DQE^2)$ を Fig. 6 に示します。IP の DQE は広い X 線線量範囲で 90% 近い値を示し、特に低線量領域では X 線フィルムに比べて非常に高い感度を示しています。また、IP は X 線強度の低い領域と高い領域で、それぞれ DQE が小さくなる傾向にあります。低線量領域での DQE の低下は、蛍光読出し系のノイズに由来すると考えられます。また、高線量領域での DQE の低下は、読出し系全般の測定誤差に由来するものと考えられます。IP にみられるこうした低・高強度領域での DQE の低下は、科学計測用 CCD をベースとした X 線 CCD 検出器でも同様に観測され、積分型検出器では避けることの出来ない問題です。

3.2 ダイナミックレンジと直線性

IP のダイナミックレンジは広大で、IP 自身は 6 桁程度のダイナミックレンジを持っています。しかし、実際に利用される IP 検出器では、その輝尽蛍光の検出に光電子倍增管 (PMT) を使用しており、3 桁程度のダイナミックレンジしか持たない PMT では、1 本の PMT により IP の全ダイナミックレンジをカバーすることは出来ません。そのため、IP 検出器としてのダイナミックレンジと直線性は、どのような設計の蛍光検出系を使用するのかによって決まっており、多くの場合は検出範囲の異なる 2 本の PMT からの輝尽蛍光出力をつなぎ合わせるにより、

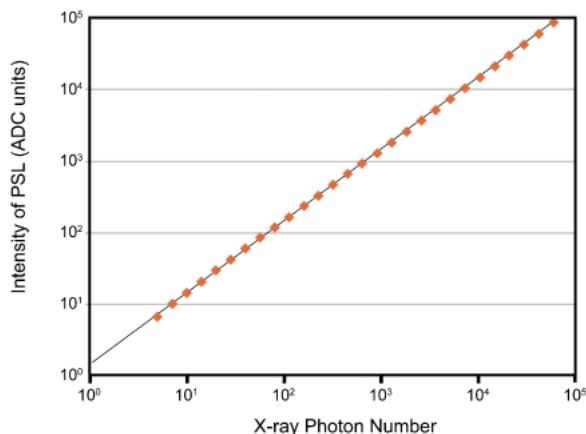


Fig. 7 IP の画素あたりの X 線強度に対する蛍光出力の直線性。

IP の 6 桁のダイナミックレンジとその感度範囲の直線性を実現しています。Fig. 7 に IP 検出器 (リガク社製 R-AXIS IIc) による直線性⁸⁾の測定を示しました。ここでは、ピクセルあたり 5 フォトンから 50,000 フォトンの X 線線量範囲で、その蛍光出力が相対誤差 4 % 以内の直線性を示しており、4 桁以上の直線性が確保されています。この広いダイナミックレンジは IP 最大の特徴として、大強度 X 線での実験に活用されています。

3.3 検出面積と位置分解能

現在、富士フイルム⁸⁾よりバイオイメージング用として市販されている IP (BAS-MS もしくは BAS-SR) がそのまま X 線実験に利用可能で、その標準サイズは 400 × 200 mm² と 250 × 200 mm² です。過去には、タンパク質結晶構造解析用巨大ワイセンベルグカメラ⁹⁾では 800 × 400 mm² の IP が利用されたこともあり、また次項で説明する IP 検出器の検出面積は 400 × 400 mm² です。このように、IP では大きな検出面積を比較的簡単に実現できます。

IP 自身の位置分解能は、蛍光体層での X 線の散乱による広がりによって決まっています。また、実際に検出される X 線イメージの位置分解能は IP 読取装置の位置分解能の影響が大きく、励起光としてのレーザービームのもっている大きさによるボケと、IP の蛍光体層でのレーザービームの散乱による広がりや位置分解能を決める要因となります。また、蛍光検出系の電気回路の時間特性等が位置分解能に影響を与えることもあります。

位置分解能は使用する IP のタイプによって異なります。電子顕微鏡での使用を想定した高分解能型 IP^{10,11)}として、富士フイルム⁸⁾より BAS-SR が製品化されています。高分解能型 IP では蛍光体層での赤色レーザービームの散乱による分解能低下を抑えるために、蛍光体層に青色色素が配合されており、その外観より Blue-IP と呼ばれています。一方、標準的な IP (BAS-MS) は蛍光体層が白色をしており以下では White-IP と表記します。

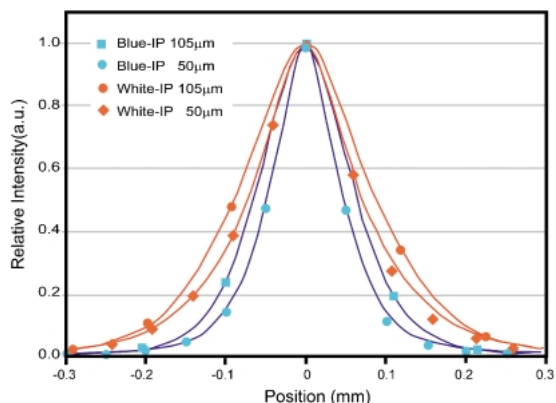


Fig. 8 IP の位置分解能。20 µm 幅の X 線を Blue-IP と White-IP で記録して、105 µm および 50 µm の読取画素サイズで測定したプロファイルの比較。

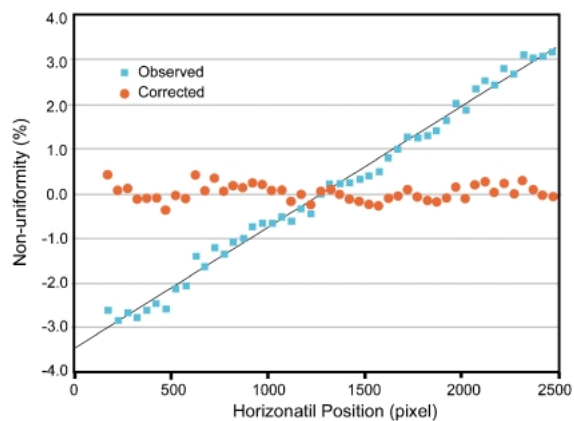


Fig. 9 IP からの輝尽蛍光出力と読出し光学系の開口数により補正した輝尽蛍光出力の位置依存性。

Fig. 8 で、Blue-IP と White-IP の位置分解能の違いを Point Spread Function (PSF) で評価した実験¹²⁾を紹介いたします。20 µm 幅の X 線ビームを、読み取り画素サイズ 50 µm で読出した場合の blue-IP の PSF は最大値の半値全幅が 83.7 µm、最大値の 10% 強度での全幅は 219.8 µm です。一方、white-IP では半値幅は 143.2 µm、10% 強度幅は 373.3 µm となっています。この様に高分解能型 IP の利用は位置分解能向上に効果的です。ただし、IP の PSF 形状はプロファイルの裾野が広がる傾向を示し、その頂点周辺はガウス関数で、裾野の部分はローレンツ関数によりよく近似されます。この様に、PSF の裾野が広がる性質を持った IP では、回折斑点などの先鋭的な形状を持った X 線イメージのデータ処理では、その積分領域や反射の重なりでの取扱いなどに注意が必要となります。

3.4 感度一様性

IP の検出面における感度の一様性は、多くの場合 IP 読取装置の検出一様性により規定されています。Fig. 9 にリガク社製 R-AXIS IIc を用いた、一様 X 線露光の読出し

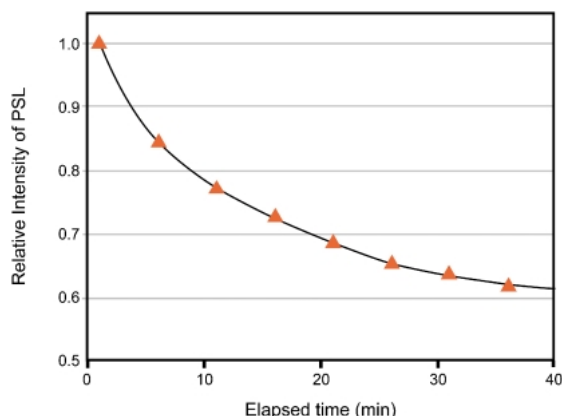


Fig. 10 IP 露光後の時間に対する蛍光量の相対強度変化。室温 (25°C) での結果¹²⁾。

プロファイルを示しました。この検出器の蛍光読出し系では、励起用レーザーおよび蛍光検出の PMT は固定で、蛍光検出用のレンズ光学系のみが走査ステージ上で移動するため、PMT への蛍光の入射効率が読出し位置に依存して変化します。そこで、PMT への蛍光の入射効率を装置パラメータとして補正することで、1%程度の感度一様性を実現しています。この様に、十分に調整した読出し装置を用いれば IP 自身の持つ感度一様性は 1%以下を実現可能です。

3.5 フェーディング

IP では、X 線露光終了後の読出しまでの経過時間が長くなるほど、蛍光の検出強度は、同一の露出を終了直後に読出した場合に比べて小さくなります。この現象をフェーディングと呼んでいます。X 線イメージを記録した IP の中では電子が励起され準安定状態に保持されており、輝尽蛍光の読出し過程によらずに熱的な効果によって一部の準安定状態の電子がエネルギーを失うことによりフェーディングが起きると考えられます。そのため、フェーディング現象は温度が高いほど顕著であり、5°C以下の温度ではフェーディングによる蛍光強度の低下はほぼ検出できません。また、X 線イメージの露出時間中にもフェーディングは進行しているため、その検出値には露出時間に対する完全な直線性がないことに注意が必要です。Fig. 10 に露光終了後の読出しまでの経過時間に対する蛍光量の相対強度変化の調べた実験¹³⁾を紹介しします。この様に IP では、フェーディング効果により検出蛍光強度が指数関数的に減衰するため、高精度にイメージの X 線強度を比較する実験では、X 線露光から読取までの時間管理が重要になります。

4. イメージングプレートの応用例

ここでは、IP の応用例として生命科学分野からタンパ

ク質結晶構造解析、材料科学分野から粉末回折と単結晶構造解析を紹介します。

4.1 タンパク質結晶構造解析

結晶構造解析とは、結晶からの回折斑点の積分強度を測定して、その結晶構造を決定する手法です。個々の回折斑点の強度を測定するための検出器や測定法は、古くはシンチレーションカウンタによる 4 軸回折計や X 線フィルムとドラムスキャナー等のデンシトメータの組み合わせが利用されていました。1980年代後半に入って、タンパク質の大きな結晶格子による間隔の詰まった多数の反射強度を迅速かつ高精度に測定する検出器として、IP 検出器や多線式ガス 2 次元検出器 (Multi-Wire Proportional Chamber)¹⁴⁾が開発され、1990年代半ば以降 CCD 検出器¹⁵⁾が一般的に利用されるようになりました。なかでも IP 検出器は、大面積かつ広ダイナミックレンジの特徴を生かして、数多くの回折斑点を低分解能から高分解能まで一度に記録することを可能にしました。

しかし、高輝度放射光ビームラインの実験では、IP 上に記録されたイメージの読出しがあまりに低速であり、秒単位の短い X 線露出時間との不整合が最大の問題となり、高速なファイバー結合型 CCD 検出器の登場により活躍の場が減少しつつあります。しかし、CCD 検出器は、ダイナミックレンジや検出面積の点では、IP 検出器に一歩譲るのが現状です。

そこで、1990年代後半から相次いで、IP の特徴を損なうことなく、高速読出しを可能にした高速 IP 検出器の開発が進められました。

ひとつは、SPring-8 において(株)ガクと共同で開発された 400×400 mm² の X 線イメージを 1 分の繰り返し周期で連続的に記録可能な IP 検出器です¹⁶⁾。その検出器の高速読出しの原理と外観をそれぞれ Fig. 11 および Fig. 12 に示します。IP による X 線イメージの連続的測定は、X 線イメージの記録・読出し・消去の 3 ステップの繰り返しにより実現されます。本装置では、3 枚の IP を使用して、上記の 3 ステップを並行処理することにより、検出器としての X 線イメージ記録の繰り返し速度を高速化しています。また、IP の読出しについても、レーザービームスプリッターを使用した回転式の 2 分岐レーザービームスキャナーによる円筒内周読み方式を採用しており、スキャナーヘッド 1 回転で 2 ラインのイメージ読出しを可能にしています。そのスキャナーヘッドを 2400 rpm で高速回転することにより、100 μm の読取画素サイズで 400×400 mm² の IP 読出し時間が 50 秒に短縮されました。本装置を設置した SPring-8 構造生物学ビームライン I (BL41XU) では、その大検出面積かつ高ダイナミックレンジ特性により、Fig. 13 に示したようにタンパク質結晶 (Endopolygalacturonase I¹⁷⁾) から 0.7 Å 分解能というサブアトミック分解能での回折強度測定が可能になりました。

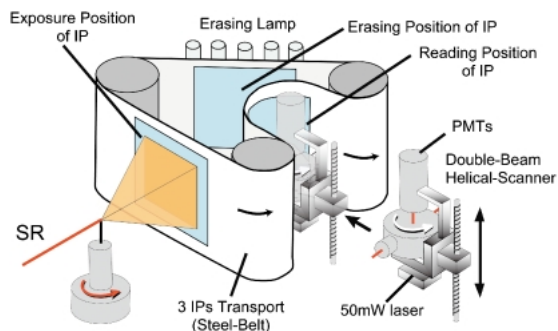


Fig. 11 大型高速 IP 検出器 (リガク R-AXIS V) の読出し機構。



Fig. 12 大型高速 IP 検出器 (リガク R-AXIS V) の全容。

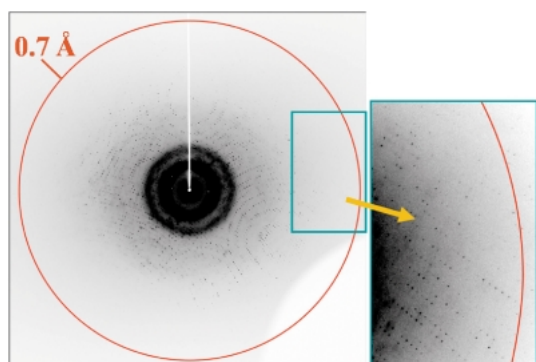


Fig. 13 タンパク質結晶の超高分解能回折像。

本検出器は、(株)リガクにより放射光ビームラインをターゲットに R-AXIS V として製品化されています。また、検出面積を $300 \times 300 \text{ mm}^2$ に縮小した、より高速かつ汎用的な検出器として R-AXIS VII が開発されており、タンパク質結晶構造解析だけでなく放射光ビームラインの小角散乱用検出器としても利用されています。

また、SPring-8 の大阪大学・蛋白質研究所の超分子複合体ビームライン BL44XU では、ウイルスなどの巨大格子結晶からの回折像を効率よく測定するために $400 \text{ mm}\phi$ の大型高速 IP 検出器 (DIP-6040 Bruker-AXS)¹⁸⁾ を設置しています。DIP6040は露光位置の周りの6回回転対称位置に6枚のIPと各IPに読出し機構を配置した検出器 (Fig. 14) です。この検出器では、高速連続測定のために6枚のイメージングプレートを中心の露光位置に順次切り替

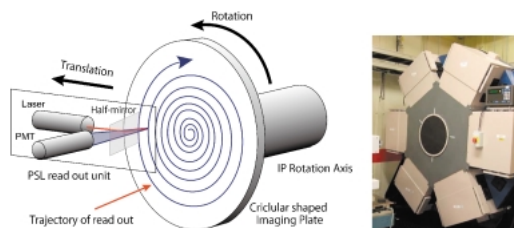


Fig. 14 大型高速 IP 検出器 (Bruker-AXS DIP-6040) の高速読出しの原理と外観。

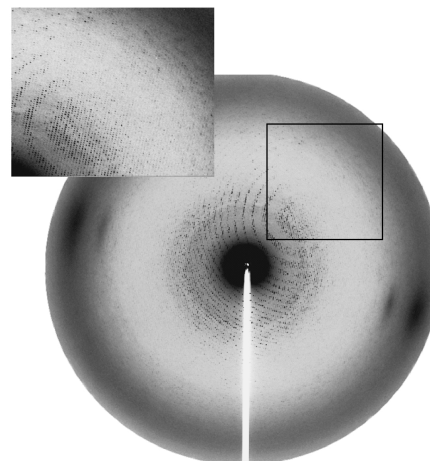


Fig. 15 巨大格子結晶からの回折像。

Table 1 タンパク質結晶構造解析用 IP 検出器

	R-AXIS V (RIGAKU)	DIP-6040 (Bruker-AXS)
使用 IP 数	3	6
受光面積	$400 \times 400 \text{ mm}^2$	$400 \text{ mm}\phi$
読出し方式	円筒内周読み	スパイラル
ピクセル数	4000×4000	4000×4000
ピクセルサイズ	$100 \mu\text{m}$	$100 \mu\text{m}$
出力階調	20 bit	16 bit
読出し速度	60 frame/hr.	120 frame/hr.

えながら測定を行い、1時間当たり120イメージの速度での連続測定を可能にしています。また本検出器では、IP 読出し機構を小型化できるスパイラル方式 (Fig. 14) を採用して、6個のIPに独立なIP 読出し機構を設置して並列読出しを行うことにより、連続測定の高速度を実現しています。

BL44XU では、本検出器により Fig. 15 に示したような $a = b = 631 \text{ \AA}$, $c = 351 \text{ \AA}$ という格子長を持ったウイルス様タンパク質 (PfVp) 結晶¹⁹⁾ などの巨大格子結晶から回折強度測定を可能にしました。

このように、高速 IP 検出器は CCD 検出器では簡単に実現できない大検出面積と広いダイナミックレンジを生かして、現在タンパク質結晶からの超高分解能測定や巨大格

子結晶の構造解析に利用されています。これらのタンパク質結晶構造解析用 IP 検出器の仕様を Table 1 にまとめました。

4.2 粉末回折

X 線粉末回折法は、リートベルト法等の解析法の発展より物質科学研究における重要な構造解析手法のひとつとして、現在さかんに利用されています。これは、その測定データが放射光利用により、実験室系と比べて非常に高い角度分解能と、強い回折強度を実現したことにより、構造解析の精度が飛躍的に向上したことも大きな要因と考えられます。

高い角度分解能と強い回折強度を実現した放射光粉末回折法では、その回折パターンを全ての散乱角で同時に測定し、なおかつ迅速に統計精度が高い回折データを収集することが求められています。そのため、柔軟なフィルム形状をした大型の IP を粉末回折計の 2θ 上に設置した湾曲検出面にセットすることで、広い散乱角範囲を同時に測定することが可能になりました。また、IP の高感度と高ダイナミックレンジ特性により、数 mg の微量試料から統計精度の高い粉末回折データが測定することが可能になりました。

Fig. 16 に SPring-8 の BL02B2 に粉末回折計として設置している大型デバイセラーカメラ²⁰⁾の写真を示しました。大型デバイセラーカメラは、 2θ 軸にカメラ半径 286.48 mm の湾曲型 IP カメラを搭載し、キャピラリーに封入した試料を ω 軸に固定して、X 線を露光して測定を行います。IP は黒い扇形のスリット部分の裏側にセットします。スリット幅は 10 mm で IP カメラを動かすことにより、 $400 \times 200 \text{ mm}^2$ の IP 上に最大 18 本の粉末回折パターンを記録できます。大型デバイセラーカメラで露光した IP は、実験ハッチの外側にある富士フィルム社製の

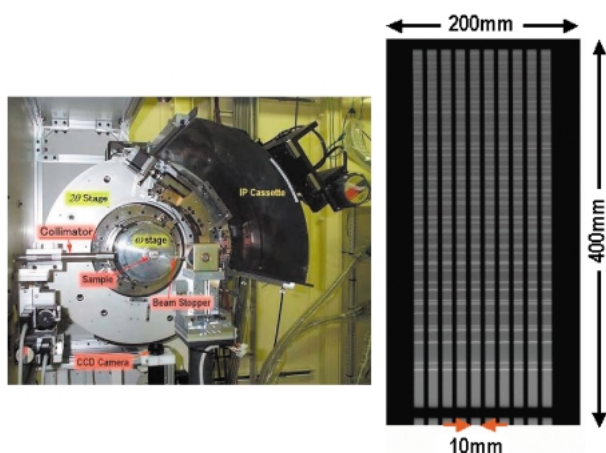


Fig. 16 大型デバイセラーカメラとデバイセラーパターン。大型デバイセラーカメラ上部の黒い扇形部分の裏側に IP がセットされ、粉末回折像が記録されます。

IP 読取装置 BAS2500により読み取りを行います。読取り分解能を $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ に設定することにより、IP 上の 1 画素が散乱角 0.01° に対応しています。IP により記録したデバイセラーパターンは専用の 1 次元切り出しプログラムで 1 次元の粉末回折データに変換して構造解析に利用されています。Fig. 16 (右図) に NIST の標準試料 CeO_2 のデバイセラーパターンを 10 回露光した X 線イメージを示しました。

4.3 単結晶解析

単結晶解析は、結晶中での分子構造や電子密度分布を正確に決定できる手法として、物質科学研究に重要な役割を果たしてきました。また、放射光を利用した最先端研究では、その高エネルギー特性・高輝度特性・パルス特性と組み合わせることにより単なる結晶構造解析だけでなく、極限条件下の構造研究あるいは構造ダイナミクスの研究に有用であると考えられています。そこで、より精密な単結晶の電子密度解析を実現するために、広いダイナミックレンジの回折強度を高い精度でかつ全ての逆格子点を取りこぼしなく測定する必要があります。

Fig. 17 に SPring-8 の BL02B1 に設置された単結晶からの高精度データ収集を目的とした大型湾曲 IP カメラ²¹⁾を示しました。

この装置では、 $350 \times 683 \text{ mm}^2$ という超大型 IP を湾曲検出面に利用することで 191.3 mm という大きなカメラ半径を実現しており、試料周りへの付帯装置設置の自由度を高めた汎用性のある設計になっています。さらに本装置は、IP の優れた定量性と X 線エネルギー依存性をもたない広いダイナミックレンジにより、目的とする電子密度分布レベルでの解析に必要な高分解能・高精度データ収集を実現しています。

本装置は超大型 IP の利用により、 $2\theta = -60^\circ \sim +145^\circ$ という広い測定角度範囲を実現して、CCD 検出器では測定不可能な 0.2 \AA 分解能という電子軌道を直接可視化可能な超高分解能での構造決定を可能にしています。

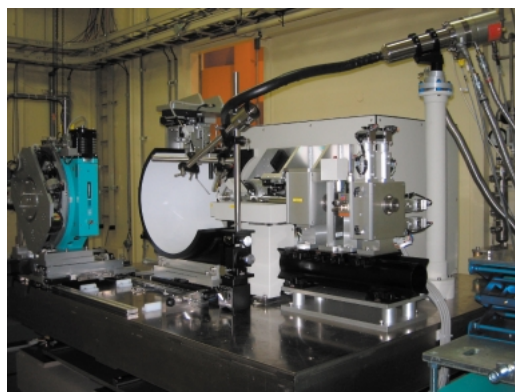


Fig. 17 SPring-8 BL02B1 の大型湾曲 IP カメラ。

5. おわりに

IP は、その高感度かつ広大なダイナミックレンジなど優れた性能や取り扱いの簡便さにより、X線フィルムやシンチレーションカウンターなどに比べて、測定時間の短縮や測定試料へのX線照射量の低減を実現しており、X線損傷を受けやすい有機化合物、タンパク質や生体試料の結晶や溶液などからの回折・散乱実験に大変有用な検出器として活用されてきました。また、ダイナミックレンジの広い積分型X線検出器として、数え落としの問題がないので、放射光ビームラインなどの大強度X線による回折散乱実験において大変有用なものになっています。

最近、富士フイルム㈱により、医療分野におけるIPのさらなる高感度・高画質化を目指してCsBr:Eu²⁺の柱状結晶からなる蛍光体層を持ったFocused Phosphor Plate (FPP)²²⁾が開発されています。FPPは従来のIPに比べて2倍近いX線の検出効率(DQE)を達成しており、画質を落とすことなくレントゲン撮影における被ばく線量の低減を実現しています。また、IPについても更なる高感度化のために、レントゲン撮影用IPでは蛍光体支持層を透明にした両面読み可能なものが利用されています。

このように、IPはその性能面での改良が続けられており、リアルタイム性や位置分解能ではCCD検出器やピクセル検出器などに比べて劣るものの、その広大なダイナミックレンジや大強度X線条件での利用可能性など、積分型検出器としてまだまだ有利な点があります。今後も、IPは読み取り方法の工夫など更なる改良を続けることにより、次世代光源の大強度短パルス光源が登場し、新しい放射光利用実験が行われる場面においても重要な役割を果たす可能性があるものと期待されます。

謝辞

本稿を執筆するにあたり多くの皆様にお世話になりました。特に大阪大学・蛋白質研究所の山下栄樹さん、理化学研究所・播磨研究所の加藤健一さん、高輝度光科学研究センターの杉本邦久さんには貴重なデータをご提供いただきました。深く感謝いたします。

利用情報

1. イメージングプレート
富士フイルム㈱
(<http://fujifilm.jp/business/index.html>)
2. イメージングプレート検出器

富士フイルム㈱

(<http://fujifilm.jp/business/index.html>)

㈱リガク (<http://www.rigaku.co.jp/index.html>)

Marresearch GmbH (<http://www.marresearch.com/>)

Huber Diffraktionstechnik GmbH

(http://www.xhuber.de/en/en_start.rsys)

参考文献

- 1) M. Sonoda, M. Takano, J. Miyahara and H. Kato: *Radiology* **148**, 833 (1983)
- 2) J. Miyahara, K. Takahashi, Y. Amemiya, N. Kamiya and Y. Satow: *Nucl. Instr. and Meth.* **A246**, 572 (1986).
- 3) Y. Amemiya and J. Miyahara: *Nature* **336**, 89 (1988).
- 4) Y. Amemiya: *J. Synchrotron Rad.* **2**, 13 (1995).
- 5) 雨宮慶幸: シンクロトロン放射光の基礎(大柳宏之編, 丸善), p. 588 (1995).
- 6) K. Takahashi, J. Miyahara and Y. Shibahara: *J. Electrochem. Soc.* **132**, 1492 (1985).
- 7) Y. Iwabuchi, N. Mori, K. Takahashi, T. Matsuda and S. Shinoya: *Jpn. J. Appl. Phys.* **33**, 178 (1994).
- 8) M. Sato, M. Yamamoto, K. Imada, Y. Katsube, N. Tanaka and T. Higashi: *J. Appl. Cryst.* **25**, 348 (1992).
- 9) N. Sakabe: *Nucl. Instr. and Meth.* **A303**, 448 (1991).
- 10) N. Mori, T. Oikawa, T. Katoh, J. Miyahara and Y. Harada: *Ultramicroscopy* **25**, 195 (1988).
- 11) M. Sato, Y. Katsube and K. Hayashi: *J. Appl. Cryst.* **26**, 733 (1993).
- 12) M. Yamamoto, T. Kumasaka, T. Uruga, N. Kamiya, H. Iwasaki and T. Ueki: *Nucl. Instr. and Meth.* **A 416**, 314 (1998).
- 13) T. Fujisawa, Y. Nishikawa, H. Yamazaki and Y. Inoko: *J. Appl. Cryst.* **36**, 535 (2003).
- 14) J. E. Bateman and J. F. Connolly: *Nucl. Instr. and Meth.* **173**, 525 (1980).
- 15) M. Suzuki, M. Yamamoto, T. Kumasaka, K. Sato, H. Toyokawa, I. F. Aries, P. A. Jerram, D. Gullick and T. Ueki: *J. Synchrotron Rad.* **6**, 6 (1999).
- 16) M. Yamamoto, T. Kumasaka, H. Yamazaki, K. Sasaki, Y. Yokozawa and T. Ishikawa: *Nucl. Instrum. Meth.* **A 467/468**, 1160 (2001).
- 17) T. Shimizu, T. Nakatsu, K. Miyairi, T. Okuno and H. Kato: *Biochemistry* **41**, 6651 (2002).
- 18) <http://www.protein.osaka-u.ac.jp/rcsfp/supracryst/BL44XU/beamline.html#DIP6040>
- 19) F. Akita, K. T. Chong, H. Tanaka, E. Yamashita, N. Miyazaki, Y. Nakaishi, M. Suzuki, K. Namba, Y. Ono, T. Tsukihara and A. Nakagawa: *J. Mol. Biol.* **368**, 1469 (2007).
- 20) E. Nishibori, M. Takata, K. Kato, M. Sakata, Y. Kubota, S. Aoyagi, Y. Kuroiwa, M. Yamakata and N. Ikeda: *Nucl. Instrum. Meth.* **A 467/468**, 1045 (2001).
- 21) 杉本邦久: SPring-8 利用者情報 **Vol. 14** No. 1, 36 (2009).
- 22) 岩淵康夫, 田崎誠二, 安田裕昭, 高須厚徳, 磯田勇治, 柏谷 誠, 細井雄一: 富士フイルム研究報告書, **No. 52**, 22 (2007).