

学振未来開拓

放射光による生体高分子結晶解析用高速高精度高分解能 自動データ収集システムの開発研究経過報告（その2）

坂部 知平

はじめに

日本学術振興会未来開拓推進事業の産学連携研究費で開発中の全自動データ収集システムの基本計画及び予想される性能については本誌3, 2, 77-88 (1997) の未来開拓欄に、亦メーカーの工場に於ける製作過程については同じく本誌4, 2, 61-81 (1998)の未来開拓欄に記載した、この他細かい問題点や解決策については本誌各号の活動報告、特に5,3,28-34 (1999) では詳細な報告を記載しているため、ここでは出来るだけ重複を避け、ある程度大きな仕様変更や達成された性能、更に将来性能を何処まで上げ得るか等について記載する。尚、今年度開発の付加を予定している新機能についても言及する。

本システムはメカニズム部、制御部、自動軸立て機構及びサーバーを含む計算機部とデータプロセスのためのソフトウェアから構成されている。この内前3者を総称してgalaxyと命名した。これはIPを担当した宮原諄二氏が付けた名前ギリシャ語の天の川と言う意味である。

メカニズム部分は1999年3月に物質構造科学研究所・放射光施設・実験ホールのBL6Cに設置された(写真1)。光軸方向に5.2mもあるPFでは最大級のハッチであるが狭く感じられる。モノクロメータハウスとカメラ部の間に居る人をスケールにして捕らえればこの装置の大きさが理解できよう。メカニズム部は下記の要素からなり、参考までに各部の重量を併記した。

カメラ部	4,020Kg
搬送台車部	1,205Kg
消去前搬送部	350Kg
読取、消去、ベース部	2,790Kg
IPカセット部(2個)	940Kg
総重量	9,305Kg

2000年3月には制御部が設置され、galaxyの道具立てが揃った。また、低温吹き付け装置及び小型X線発生装置による均一露光装置が読取部に付加された。

装置の開発研究期間は5年でありその中の大雑把な割り振りを表1に示す。最初のアイデアに従い仕様を書き上げるのが1/5、設計図をもとに打ち合わせをしながらメーカーが製作し設置するまでが更に2/5、その後、使用しながら仕様変更を行い予想通りの性能を出すのに残りの2/5の時間や工夫を必要とするものである。従って設置した時点が折り返し点と言っても良からう。尚、モノクロメーター、GUIによる操作方法に関する事項および自動軸立て機構、自動データプロセス、計算機及び大型サーバーを含む安全性の高い高速ネットワークシステム等についてはまたの機会に報告する。



写真1 . P F の B L 6 C に設置されたGalaxy

表1 . 放射光による生体高分子結晶解析用高速高精度高分解能
自動データ収集システムの開発の年次計画

～1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001～
アイデア誕生	仕様書き上げ	設 計	メカ部製作	制御部の製作	総合チェック 改良	共同利用研究 付加機能の 実用化
	R&D	ハッチの製作				
		大型サーバー と計算機による secure なネット ワーク				

．搬 送

1 . 圧搾空気による搬送

自動化で最も気掛かりなことのひとつが搬送である。500Kg弱もある2個のIPカセットを正確にしかも迅速且つ安全に運ぶ必要がある。図1に示すようにカメラ前搬送部からカメラ部、搬送台車部から読取部及び消去前搬送部から消去部などへの移動は圧搾空気によりロボットアームを作動させている。動作は機敏でパワーもあり申し分なかったが、アームの先端に取り付けられていた磁気センサーが時折誤作動することが分かった。この誤作動は指向性の大きい磁気センサーに取り替えることにより解決した。

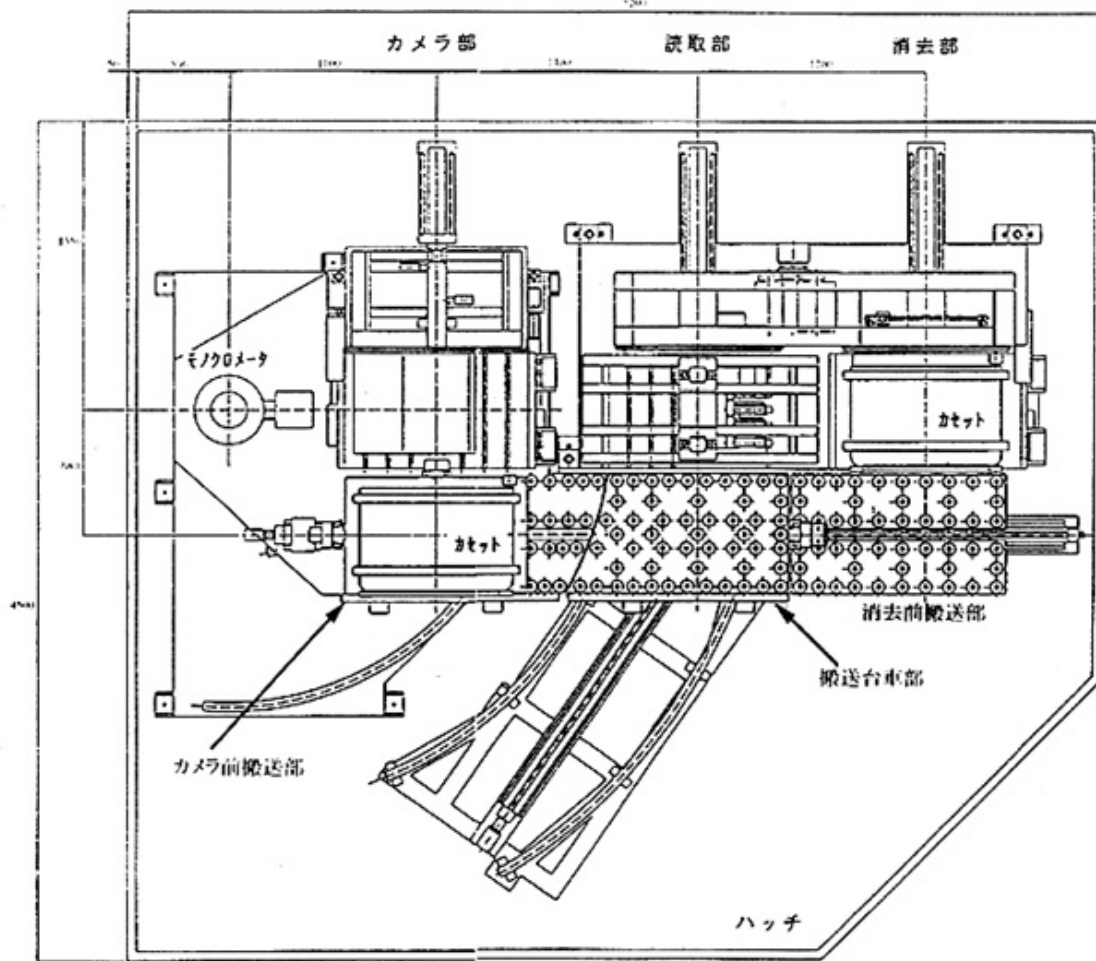


図 1. Galaxy 機械部の平面略図

2. ボールネジによる搬送

カメラ前搬送部から搬送台車部及び消去前搬送部から搬送台車部への移動はボールネジ回転により移動するロボットアームにより行われている。このアームの移動はスムーズである。倍速の移動も可能性について検討中である。

3. 搬送台車部

搬送台車部はカメラ前搬送部から受け取ったIPカセットを2 アークに添ってボールネジの回転に依って移動し、読取部或いは消去部前搬送部に渡すため、或いはこれらの逆搬送を行うためのものである。台車自身が動くため、移動中の事故がないようIPカセットの固定や移動速度に注意を払った。しかし一寸したタイミングのズレで固定金具兼移動時のガイド用ローラーユニットが次の動作の障碍になることがあり、結局移動の際はIPカセットを下から押し上げて、ボールベアリングから切り離す方式に大幅な仕様変更を行った。この改良により、2 アーク上の移動速度を倍速に出来る可能性が出てきた。

この他、搬送台車部は高さも夫々の場所で変化させる必要がある。これにはパルスモーター駆動による4個のジャッキを用いているが、IPカセットの重量が大きいので高速移動は

難しい。現在水平移動が終了してから上下移動を行っているが、これを同時に行うことにより効率を上げることを検討中である。

4. 今後の目標

現状では一連の搬送時間即ち、消去部からカメラ部への搬送時間とカメラ部から読取部への搬送時間の和は約4分であるが、上記の改良により3分間に短縮出来る予定である。安全性を十分考慮した上で更に時間短縮を目標にした改良を検討中である。

. カメラ部

1. 初期の仕様

これまでのカメラと徹底的に異なる点は、従来のは検出器が下流にあったため、カメラ部は十分広い空間を自由に選べた。しかし今回の装置では全てが円筒形IPカセットの内側の空間内に納めなければならない。これは困難な要求であるがそれでも下記の1点を除き初期の仕様は概ね達成された。1点というのは、此まで経験したことのない500Kgもの重量物であるIPカセットがカメラ部に乗ると試料位置で100 μ m程下がることである。此は放射光X線が床から1200mmに放射されそこからIPカセットの高さを引くと、カメラベースとして残される空間は500mm強しかない。その狭い空間に多くの作動機構を組み込む必要があるため、生じたものである。幸い、カメラの下がり方は再現性があるため、カセットを入れた状態でX線が結晶位置(回転軸)を通るよう調節することにした。

2. 低温吹き付け装置

既成の低温吹き付けは1m近い大きな吹き付けノズルをカメラの横に置き、結晶の斜め上から結晶に冷気を吹き付ける。本装置では上流に向かって結晶の右側は回転機構などカメラ本体があり、左側はIPカセットの搬送機構があるため、両側が塞がっている。更に、試料結晶近傍はコリメータ、可動スクリーン、ヘリウムチェンバー、顕微鏡、その他多くの機能素子があり、低温吹き付け装置を取り付けることは到底不可能に思われた。このためスタート時点では小型低温吹き付け装置を開発し、取り付けることは考えられなかった。しかし、低温吹き付けの必要性が極めて大きいので、上記試料近傍を細かく検討し少しの変更を加えた。その結果、曲がったノズルと空間に適した小型の温度制御キャビティーを作り、熱交換機はカメラの背後に置くことで、低温吹き付けノズルを組み込める可能性が出てきた(図2)。平成10年度よりこの開発に取り組み、平成11年度に完成した。

メーカーの測定によると窒素ガスを用いた場合制御できる温度範囲は室温から100Kである。次期ビームタイムで実用試験を行うことを予定している。メーカーが測定した性能を図3に示す。これは横軸がノズルからの距離、縦軸にその点の温度を示したものである。試料から5ミリの点がおよそ101K迄下がる。ヘリウムチェンバーの内側は外気と遮断されているため、シースガスの流量を減らせ得る。このため更により結果が得られるものと思っている。1次冷却はヘリウムで行うが、吹き付け気体は空気中から分別した窒素ガスを用いる。従って液体窒素や窒素ポンペを必要としない。しかし窒素を吹き付けると窒素によるX線の散乱のためバックグラウンドが上がる。即ち、ヘリウムチェンバーの意味が無くなる。そこで、実際には窒素の代わりにヘリウムガスを冷却して吹き付けることも出来るよう

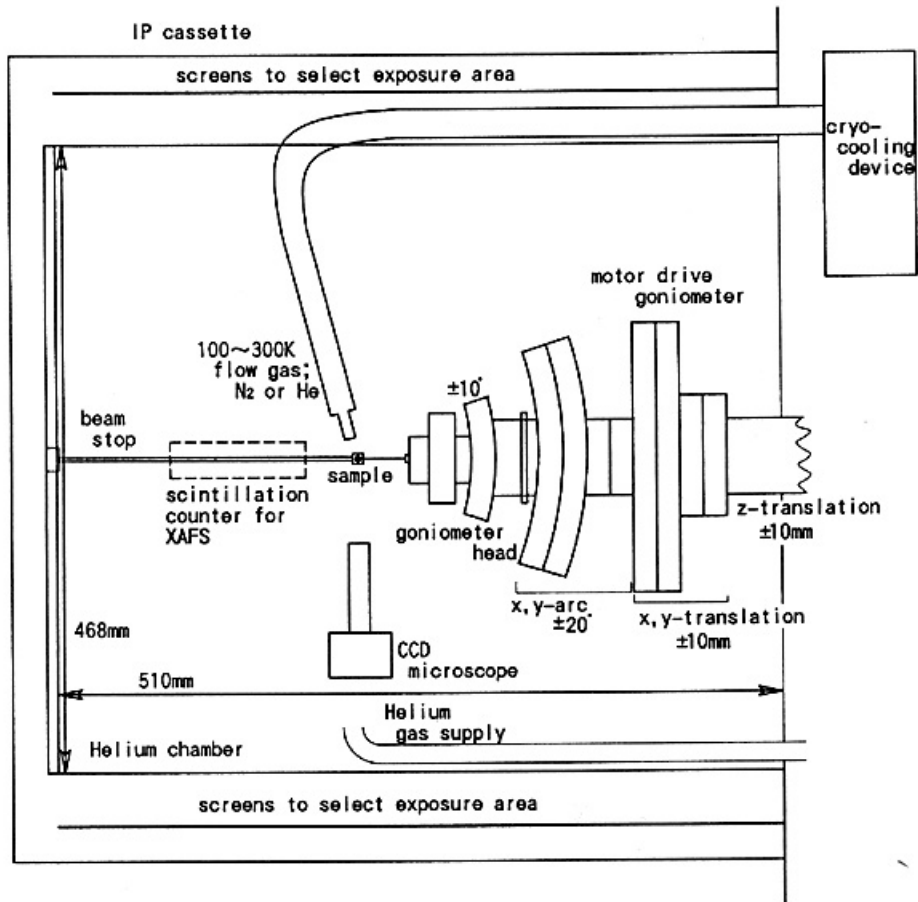


図2. カメラ部を下流から見た略図

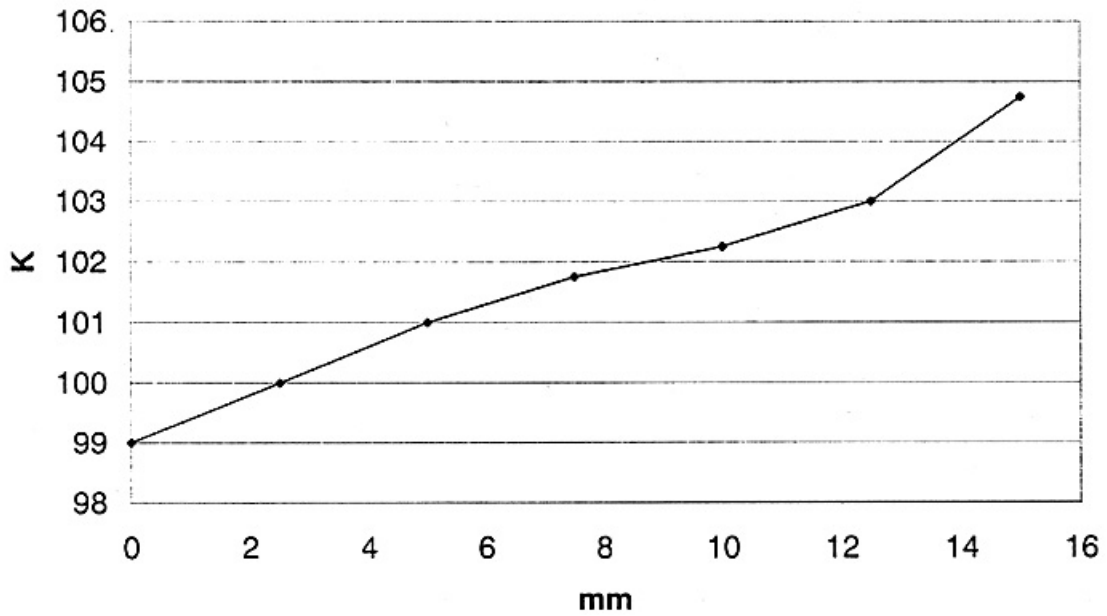


図3 試料低温吹き付け装置の試料位置と温度の関係

にしてある。ただし、ヘリウムの比熱は小さいので、試料結晶が何処まで冷却されるか今後検討を行う必要がある。

この低温装置を使って時分割実験を室温より低い温度で行うことが可能である。なお高温実験を行う際には実験目的に合わせたセルの設計、製作が必要である。

3. 今後の作業予定

3-1. 位相差測定機能の付加

X線回折で位相を実験的に求めるのは極めて困難とされてきたが、1998年11月17日から25日まで台北の新竹で行われた第4回SRRC利用者会議で台湾清華大学の張石麟教授によりリゾチームの結晶を用い、同時反射の干渉を利用して位相を直接求める方法が発表された。実験は4軸型回折計を用いているため、未だ測定された位相の数は少ないがこれは今後実用化すべき重要な研究発表であった。本装置に1/10,000度の精度でカメラの μ 回転機構を付加すれば、実用に供せられる速度で干渉データを得ることが出来ると判断し、張教授に意見を求め、可能であるとの判断を得た。 μ 回転にはカメラ全体を動かす必要があり、しかも1/10,000度の精度を出すことは大変な作業ではあるが、位相を実測することは極めて重要なことであるのでこれを実行する必要がある。 μ 回転を行うと現状のコリメーターは使用できなくなる。そこでモノクロメーターの2アーム上に4象限スリット2個及び試料結晶直前にピンホールで且つ距離可変型の第3スリット(ピンホール)を付加する必要がある。これらの改造は可成り大掛かりではあるが、重要性が大きいので本年度内に実行する。ただし本格的な実験は本プロジェクトの終了後となる予定である。

3-2. 自動光軸合わせ機能

放射光X線の位置変動や波長を変化させた時自動的にカメラの光軸をX線ビームに合わせられるよう位置敏感型イオンチェンバー(1)を使用して自動光軸合わせ装置を年度内に作成する。

. 読取装置部

1. フォトマル、ADCを含む測定系の性能

アンプ系の性能は波長特性、直線性、及びノイズに依って決まる。なお、本システムに対してのフォトマルの選択や使い方が適切かどうかなどについては浜フォトの水島さん(169委員会の委員)から多くの指示を頂いた。

1-1) 波長特性

アンプ自身のノイズが如何に小さくてもアンプに入力される信号にノイズがあればS/Nは下がる。その原因としては フォトマルのダークカレント、 フォトマルの振動、 フォトマルの外部電磁場に依るもの、 フォトマル高圧電源変動、 宇宙線などの粒子がフォトマルを直接ヒットするもの、 同じく宇宙線など高エネルギー粒子がIPをヒットしイメージを作るため生じるもの、 その他、等が考えられる。この内、 、 は夫々の原因を取り除くことで減少できるが、 、 、 は事実上避けがたい。幸い とは無視でき

る量ではないが画像信号に対し、パルス状に現れるノイズであるため区別がし易い、は高エネルギー粒子のIPに対する入射角により異なるノイズを発生するので、一概に言えない。

はフォトマルの光電子変換の過程で生じるランダムな波長領域を持つノイズである。此はカソード（光電面）と第一アノード間の供給電圧が100V以上あれば、フォトマル自身のS/Nとして次式で表せる量である。

$$S/N = 1.75 \times 10^3 (I_k / B)^{1/2} \dots\dots\dots 1$$

但し I_k はフォトマルの陰極電流（ μA ）

B はアンプの波長領域（MHz）である。

この様な理由により、波長領域の制限は上記、 I_k 、 B の何れにとっても有効に働く。そこで本装置に最適な波長領域を推定する（2）。

IP上に記録される回折像はX線ビームのサイズや試料結晶形状、大きさ、その他の回折方位などにも依るが、多くの場合半値幅は0.3~0.5mmの範囲内にある。大変粗い近似だが、IPカセットの読取方向の回折像が正弦波で近似できると仮定し、半値幅を考慮して、予想される周期は1mmと仮定する。一方IPカセットの半径は400mmで、秒速2回転の速度で読み取る。従って $2\pi r \times 2 = 5026.5 \text{ mm/秒}$ の速度で読む。この中に周期1mmの正弦波が入る数、即ち周波数は5026Hzである。今後、倍速回転に挑戦するのでそれが成功すると10kHzになる。単純に考えると波長領域は0-10kHzになるが、回折像の形は正弦波からずれているので、それをフーリエ級数的に補う意味で0-20kHzが一定の利得になるようにするのが理想的であると仮定した。20kHzを越える波長領域については、フーリエ級数打ち切り効果によるゴーストを減らす意味で、ADC直前にLCRに依る1段のフィルターを設けて減衰させた。横軸を対数表示で周波数を、縦軸はリニアで100Hz時の増幅率（出力電圧）を基準に%で表示した減衰曲線を図4に示す。これは $L = 1.0 \text{ mH}$ 、 $C = 0.02 \mu\text{F}$ 、 $R = 240 \Omega$ の場合である。20kHzまでは全くフラットで、50kHzで50%、100kHzでは10%迄減衰している。

実質的な周波数領域： $B = 50 \text{ kHz}$ （0.05MHz）、陰極電流： $I_k = 0.2 \text{ nA}$ を式1に代入するとSN比110を得るのでフォトマルからのノイズは約1%程度である。しかし、初期の実測値はそれより遙かに大きなノイズがフォトマルから出ていた。このノイズは後述する1アースを埋設することで解決出来た。

1-2) 直線性

0-10Vの範囲で16bitのADCが使われている。プリアンプの入力に1M Ω の抵抗を介して電圧を掛け、アンプ出力をADC直前で計測した。入力には10, 15, 20, 30kHzの4種類を用いた。何れも出力電圧が1.2V迄、大変良く直線性が保たれた。

1-3) ノイズ

アンプ系のノイズについては本誌5, 30~31頁に詳細な報告を行ったので、ここではその後行った実験結果を基に要点のみ記載する。アンプのノイズは極めて小さいにも拘わらず、一様露光したIPを読み取るとIの3~4倍のノイズが入る。先ず印荷電圧のノイズを考え、フォトマル寸前でフィルターを入れるなど多くの試みを行ったがノイズは消えなかった。次にレーザー光源の強度変化を疑い、フォトダイオードで変動をチェックした。至る所をシールドしてみたが効果はなかった。読取部をどういじって見てもノイズ

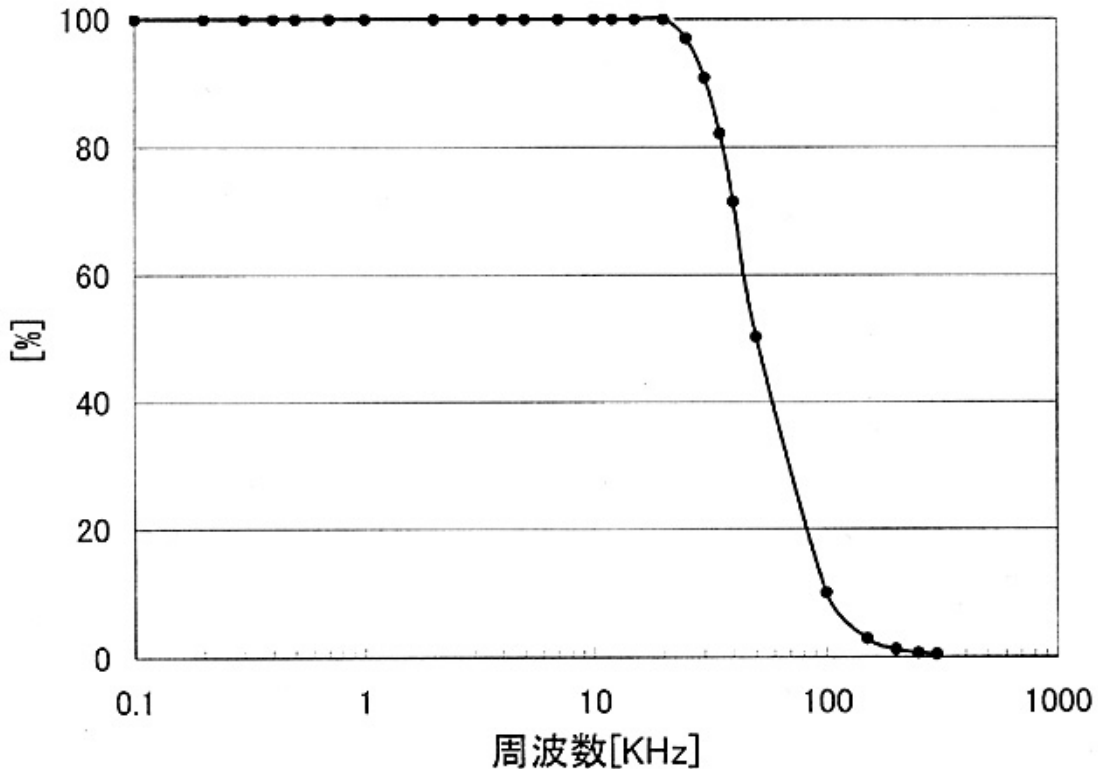


図4 . 減衰フィルターの周波数特性

は下がらない。考えあぐんだ結果、1969年当時、名古屋大学でヒルガーワット社製の4軸型自動回折計を購入した際、メーカーから1オームアースを要求されたことを思い出し、急遽1アースの埋設を発注した。埋設されたアースは0.8であった。装置だけでなく、外部からの電磁波を防ぐため、ハッチもこのアースに繋いだ結果ノイズは半分以下に減少した。

2 . 空間分解能

2 - 1) 画素サイズ

IP 読取中常に励起用のレーザーは点灯し、読取ヘッドからは絶えず情報がADCに送られているが、サンプリングされるのはADCのゲートが開いた瞬間だけである。そこで25 μm おきに4回読みそれらを加算し、1画素(100 μm ×100 μm)としている(2)。此によりS/Nを上げることは出来るが、端での測定は当然隣の情報を取り込んでおり分解能は下がる。この他、IPの場合カラーセンターはX線照射位置より滲み出る、また読取の際照射されるレーザー光もIPの感光剤内を迷走しカラーセンターを励起する。此が先読み現象であり、分解能を下げる大きな要因である。幸い、富士写真フィルム宮台技術開発センター袴田正志氏から貴重なデータ頂くことが出来たので図5に掲げた。此は今回のIPカセットにセットしたIPと同種のSTVAと群青入りの高空間分解能用IPを比較したものである。何れの場合もIPに10 μm のスリットを被せ、¹⁴Cを線源として露光したものを富士写真フィルム(株)製のBAS2500により50 μm ステップ或いはBAS5000

により25 μm で読み取ったものである。強度はピーク点が同じ値になるようノルマライズされている。 ^{14}C から出る放射線は線であるためIPの極く表面で吸収され、線の滲みは少ないと考えられる。従って、このプロファイルに広がりがあるのは殆ど励起用のレーザービームが感光剤の中を迷走して広がったためと考えられる。

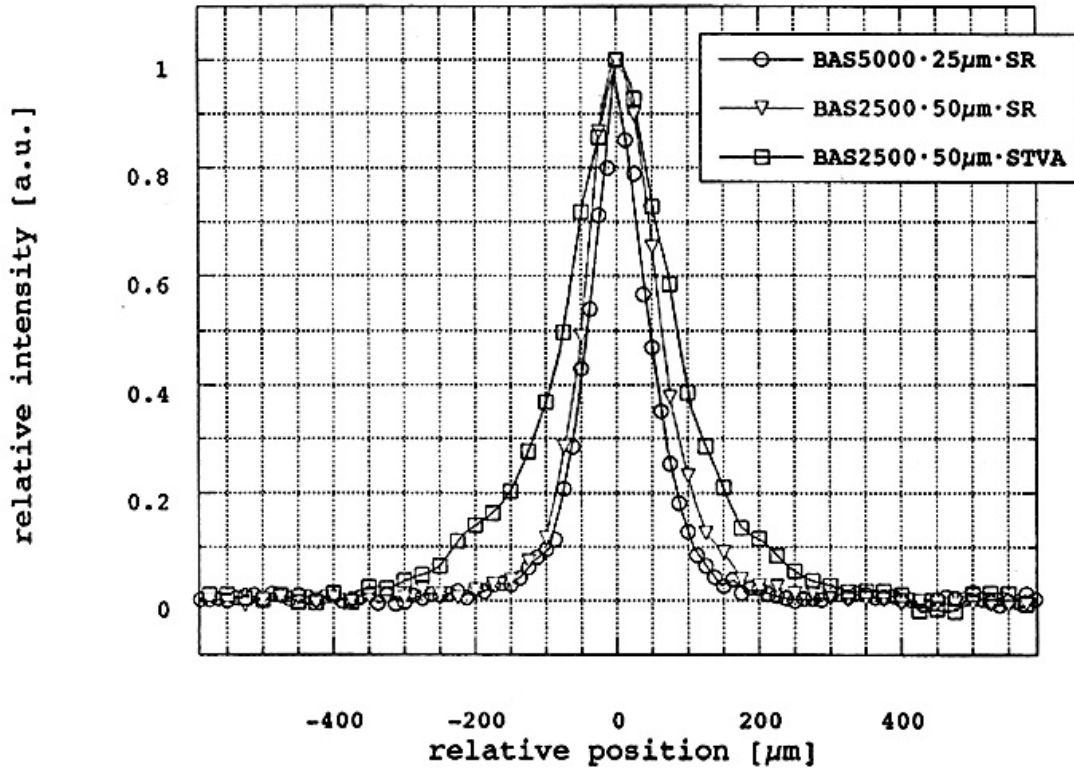


図5 . 先読み効果による線幅増加プロファイル

この図よりSTVA ()の半値幅は160 μm である。感光剤の厚みは230 μm であるがGalaxyで使用しているIP感光剤の厚みは250 μm であるため、感度はより良いが半値幅は少し広くなると思われる。X線は感光剤の奥深くまで入るため更に半値幅は増すと思われる。これらを総合すると現有のIPカセットを用いた場合の半値幅は200 μm 程度と考えるのが良さそうである。従って画素サイズを200 μm \times 200 μm にすると、読み取り速度が倍になり、メモリーが1/4になる、更に先読み効果も減少するのでピーク値が高くなる等の効果がある。それに対し、群青入りのIPであるSR (O)の場合 蛍光体層の厚みが120 μm であること、群青が入っていること、等のため感度は約1/4になるが半値幅は90 μm である。従ってこの場合は画素サイズとして100 μm \times 100 μm を採用するのが良いと推定される。今年度内に群青入りのSR系のIPカセットを2個製作する計画ある。

2 - 2) 実測プロファイル

0.2 mmのコリメータを用いて記録したリゾチーム結晶の回折像を画素サイズ100 μm \times 100 μm で読み取ったプロファイルの一例を図6に示す。印と濃線はIPカセット

の回転方向、印と薄線は水平方向のプロファイルを示す。夫々の半値幅(Full Width at Half Maximum)は $290.5\ \mu\text{m}$ と $320.5\ \mu\text{m}$ である。両者殆ど差がないことから、2 - 1) で述べた $25\ \mu\text{m}$ 置きでの読取による空間分解能の低下は実際には観測されなかったこと及び1 - 1) で述べた波長領域の設定は十分な余裕があると言える。例えば波長領域が $3\ \text{kHz}$ 当たりから減衰をしている場合には回転方向の半値幅が広がる筈である。第6図よりバックグラウンドの測定は中心から $500\ \mu\text{m} \sim 600\ \mu\text{m}$ の位置で行う必要があるため、隣接する回折点が $1.0 \sim 1.2\ \text{mm}$ 以上離れている必要がある。

これ以上位置分解能を上げるためには、群青の入ったIPを用いる必要がある。

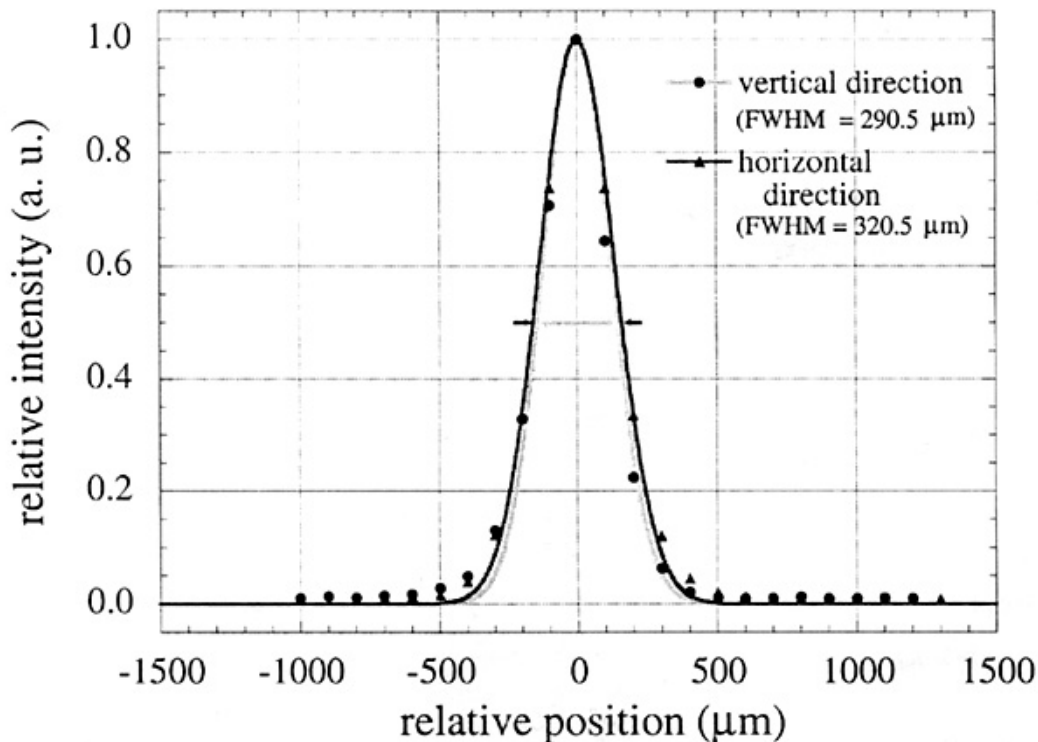


図6 . galaxyに於ける反射点の縦、横断面の強度プロファイル

2 - 3) 対策

ピクセルサイズを $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ と $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ を切り替えて使用できるようにする。亦群青の入ったIPを用いた高分解能用IPカセットを利用することにより解決できる。

3 . IPカセットの横揺れ

3 - 1) 滑車と回転音

IPカセットは4個の滑車に乗っている。円筒軸方向の押さえも4個のベアリング付き滑車である。この内上流に向かって左側(手前方向)の滑車にはバネが入って常時カセットを手前に押す様に設計されている。最初精度を上げるため全てに鋼材の滑車を用いたが、音が激しいのとIPカセットと同じ材質ではIPカセットの接触面が摩耗する可能性が大きいと考え、これらをナイロン滑車に替えた。この処置により、回転音は十分小さくなった。

3 - 2) 動力伝達と揺れによるノイズ

数百キログラムもあるカセットを回転させ或いは停止させるには大きなIPカセットとそれを支え且つ動力を伝える滑車間に十分な摩擦力が必要である。そこで最初は4個の滑車を全て動力伝達用として製作された。しかしIPカセット1回転当たり約17回の周期を持つ正弦波に近い揺れの他にそれより大きな不規則な揺れが観測された。この不規則な揺れは下流側の滑車を動力から切り離し自由回転にすることにより取り除くことが出来た。このヒントから、テスト後カセット#1の動力滑車を1個にして残り全ての滑車にベアリングを入れてフリー回転としたが、流石に此では動力の伝達不足が起き、回転方向に回転斑が生じた。そこで上流側のシャフトに取り付けた2個の滑車を動力用とし、下流のシャフトに取り付けた2個の滑車はベアリング付きにした。

3 - 3) 横揺れと強度変化(ノイズ)

一様露光したIPを読み取る際横揺れがあると先読み量が変わる。このため次のラインを読み取る際、その変化分に相当した強度変化を生じノイズとして現れる。積分強度を求めるときは加算により強度変化は相殺されるので横揺れによる強度変化は積分強度としての精度を下げることは少ないと思われるが、一般的に検出器の精度を表すDQE値には影響する。

周期的な横揺れは横方向のベアリング付き滑車に僅かな偏芯があるためと思いつき特に精密加工したものをを用いた結果横揺れは小さくなったものの未だ残った。そこで滑車の変わりにMCナイロンブロックを用いたところ、周期性は消滅したが不規則な横揺れが観測された。それより困ったことに、MCナイロンブロックは比較的摩擦は少ないがベアリング入りの滑車に比べると摩擦が大きく、その為IPカセットの回転に斑を生じ画像が乱れる現象を生じた。ベアリングタイヤの形状を変えることや、回転音は大きくなるが精度を上げるため金属滑車にすべきか、或いは金属滑車を表面処理する等現在対策を検討中である。

・ 振動写真

以下の実験はすべてカセット#2のみを用いて行われた。Galaxyで撮影した振動写真を写真2, 3, 4に示す。これらの写真はヘッドごとの補正は行っていない。

共通な実験条件を下記する。

試料名：Tetragonal Lysozyme

波長： 0.89

振動角： 8度

回転速度：1度/12秒

振動回数： 6回

コリメータ：0.2mm x 0.2mm の2点コリ

垂直方向の分解能の限界：1.7

水平方向の分解能の限界：1.8

上流より見た写真であるが、何れにも縦線により5分割されている。これは5個読み取りヘッドがあるため、右より第1, 2, 3, 4, 5ヘッドと命名している。読み取り方向も右から左である。最初の1回転は読み取り方向(回転方向即ち縦方向)の先読み以外、先読みによる強度の減少がないため第2ライン以降より強度が大きく現れる。それに対し、900ライン(最終ライン)近傍は次の領域先端の近くであるため先読み効果が重なり、強度が

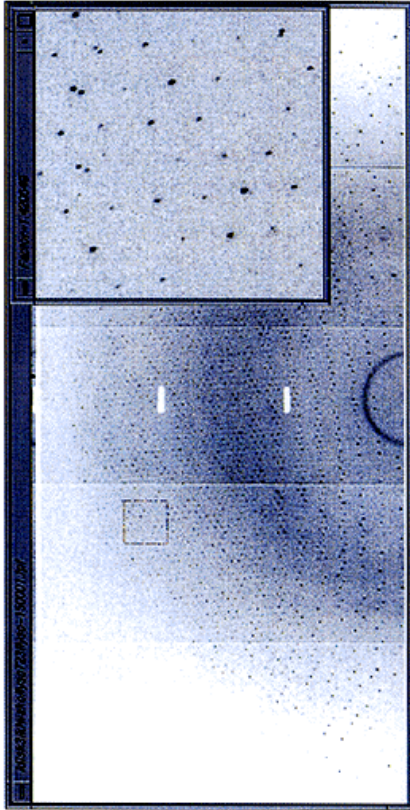


写真3 PF, BL6CでGalaxyにより撮影されたTetragonal Lysozymeの振動写真。
Asymmetric setting, 開口角; 3.0°, 振動角; 8°, 振動回数; 6回、露光時間
: 1度/1.2秒。

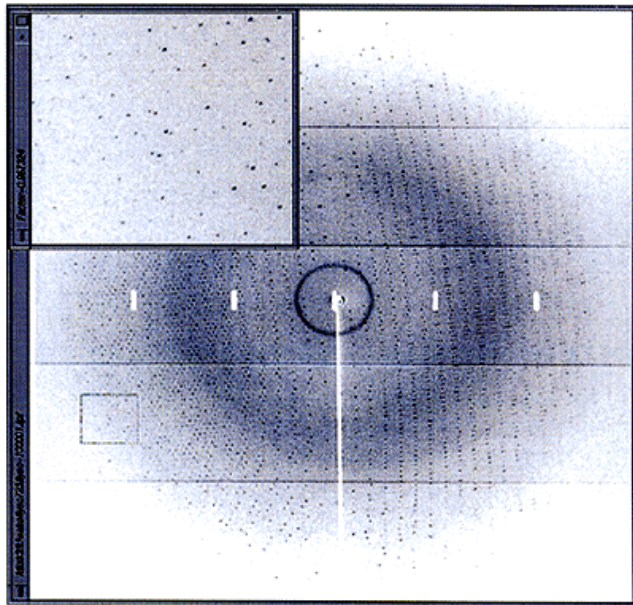


写真2 PF, BL6CでGalaxyにより撮影されたTetragonal
Lysozymeの振動写真。
Symmetric setting, 開口角; 6.0°, 振動角; 8°, 振動回数;
6回、露光時間; 1度/1.2秒。

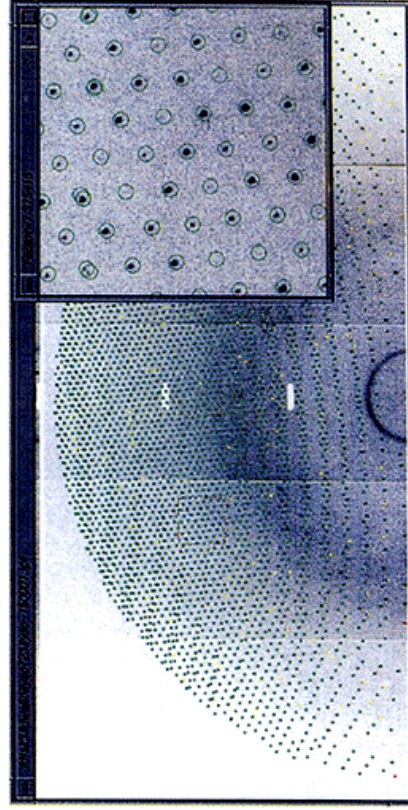


写真4 回折写真(写真3)に得られたマトリックスより計算された回折斑点の位置
を重ねたもの。

落ちている。第1ヘッドはIPの端を僅かにはみ出した所から読み出すために縦線は見えない。今年秋のビームタイムのできるだけ早い時期に位置感度むら補正を行える様にする。

写真の中央付近に円形の散乱がみられるが、これはコリメーター出口に貼ってある厚手のマイラーによる散乱と思われる。このマイラーは全く不用なので取り除く予定である。また、何も写っていない矩形の部分が縦方向に見られるが、これは入射X線の通り道として10度置きに開けた穴である。写真の中央から水平に右半分の細いラインはビームストッパーによる陰である。細い線で囲った四角形の部分を拡大した図が載せてある。もっと十分拡大しないと見えないが、PFは第2世代のSR光源でありしかもBL6は偏光電磁石からのビームであるにも拘わらず、回転角1度当たり12秒の露光時間で写真の端まで回折像が写っている。

写真2はSymmetric Settingで開口角(Aperture size)を60度にセットしたものである。

写真3,4はAsymmetric Settingで開口角を30度にセットしたものである。写真3より方位マトリックスを求め、simulationパターンをかぶせたものが写真4である。両者は良い一致を示している。

. 成果報告

なお、これまでの研究成果のうち単色X線による時間分割蛋白質結晶学に関する部分は本年8月21日から25日までベルリン工科大学で開催された第7回放射光装置技術国際学会(SRI2000)の2日目Protein Crystallographyのセッションで坂部知平が口頭発表を行った。発表の内容は後日出版される(3)。

参考文献

(1) "A Position-Sensitive Ionization Chamber for Diffraction Studies at Synchrotron Sources"

K. Sato, H. Toyokawa, Y. Kohmura, T. Ishikawa and M. Suzuki
Proc. SPIE, (1999). **3774**, 114-121

(2) "Large-Format Imaging Plate and Weissenberg Camera for Accurate Protein Crystallographic Data Collection Using Synchrotron Radiation"

K.Sakabe, K.Sasaki, N.Watanabe, M.Suzuki, Z.G.Wang, J.Miyahara and N.Sakabe
J.Synchrotron Rad. (1997). **4**, 136-146

(3) "Automatic Weissenberg data collection system for time-resolved protein crystallography"

Noriyoshi Sakabe, Kiwako Sakabe, Tsuneyuki Higashi, Noriyuki Igarashi, Mamoru Suzuki,
Nobuhisa Watanabe, Kyoyu Sasaki
Nuclear Instruments and Methods Section A (in press).