

- (2) 板垣乙未生, 矢沢彬: 東北大学選鉱製錬研究所
彙報, **27** (1971), 217.
- (3) W. Oelsen: Arch. Eisenhüttenw., **26** (1955), 19,
253, 519.
- (4) 幸塚善作, 大石敏雄, 森山徐一郎: 日本金属学会
誌, **32** (1968), 136.
- (5) K. Itagaki and A. Yazawa: Trans, Japan Inst.
Metals, **18** (1977), 825.
- (6) M. Kawakami: Z. anorg. Chem., **167**(1927), 345.
- (7) A. Yazawa, K. Itagaki and T. Azakami: Trans.
Japan Inst. Metals, **16** (1975), 687.
- (8) N. Engel: Acta Met., **15** (1966), 557.
- (9) M. Hansen: Constitution of Binary Alloys,
McGraw Hill, (1958).
- (10) A. K. Jena and J. S. Ll. Leach: Acta Met.,
14 (1966), 1595.
- (11) 高橋洋一, 横川晴美: 熱測定, **3** (1976), 45.

時分割X線回折法とその応用

橋爪 弘雄*

Techniques and application of time-resolved X-ray diffraction

Hiroo HASHIZUME

Engineering Research Institute, Faculty of Engineering,

The University of Tokyo

Yayoi 2-11-16, Bunkyo-ku, Tokyo 113

A data collection system has been described which permits time-resolved studies of X-ray diffraction diagrams obtained from structures varying on millisecond time scale. The system utilizes a linear delay-line position sensitive counter linked to an on-line computer. Time-resolved data-collection is performed by inducing the structure change in the specimen at a regular time interval, by dividing a complete duration of the structure change into many successive time slices and by accumulating in computer memory X-ray data from many repeated cycles of measurement. The system has been used to study with a time resolution of 25 ms equatorial diffraction diagrams from contracting skeletal muscle in isometric and isotonic conditions. The intensity ratio I_{10}/I_{11} has been found to decrease to as low as 0.5 in isometric twitch, but level off at about 1.0 in isotonic twitch under small load.

はじめに

Position sensitive counterなる語を初めて耳にしたのは1971年であったと思う。当時、私たちは工学部の高良研究室で、蛍光板とイメージ・オルシコン撮像管を用いるX線テレビを使って、結晶構造解析のための回

折強度データを迅速に集める研究をしていた。¹⁾ しばしば薬学部の高橋洋一教授に議論をしていただいたが、ある時、比例計数管の一種であるが光子の入射位置を判別できる検出器(PSPC)があることを聞いた。当時はテレビの仕事が忙しかったので格別の興味を持たなかったが、後に、ロンドンへ留学していた医学部(当時)の松原一郎氏が送ってくれた文献コピーで、それがGabrielとDupondの開発した最初の実用的X線回折用

*東京大学工学部 講師

PSPC²⁾であることを知った。それは、1968年にBorkowskiとKoppが開発した方法³⁾——比例計数管の陽極を高抵抗線で作し、その両端に現われるパルスの立上り時間の差を測定して光子の位置を決める方法——を使っていた。この形のPSPCは理学電機でも作られたことがある⁴⁾。しかし、高抵抗線(カーボン蒸着した石英線)がX線で損傷され、安定に長期間使用できなかったため、やがて、後から開発された金属線を陽極とする陰極電荷分割形(通称三角カソード形)^{5, 6)}や後述のマルチ・ストリップ陰極遅延線形にとって代られた。

ふつうのX線回折の対象は、定常的あるいは準定常的な構造である。これに対し、時分割X線回折法は迅速に変化する構造を対象とし、過渡的状態やダイナミクスを調べる実験法である。その原理はFig. 1に示

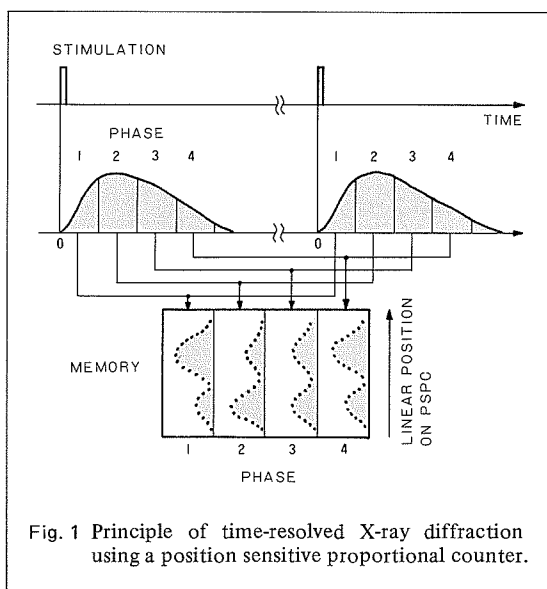


Fig. 1 Principle of time-resolved X-ray diffraction using a position sensitive proportional counter.

すように、変化の期間を連続する多数の時相に分割し、各時相で位置敏感形検出器によって記録した回折X線を多数回の反復測定によって蓄積し、一連の動的回折像を得るのである⁷⁾。このような実験法が可能になり、速やかに変る構造がミリ秒の時間分解能で調べられるようになったのは、強力なX線発生器と高能率の検出器(PSPC)と高速メモリが実用化したからである。私たちが時分割回折法を企画したのは、テレビの仕事が一段落した1974年であった。検出器としては、応答が速く計数形の位置敏感形比例検出器を使い、データ収集にオンライン計算機を使うことを考えた。X線源は理学電機のロータフレックスRU-200形回転対陰極形X線発生装置を購入した。実験法と機器の開発が当面の目的であったが、応用対象として、松原氏から提案された筋肉の収縮を想定した。装置系開発のためにチームを作り、光学系、検出器、電子回路、計算機プ

ログラムの製作を手分けして進めた。検出器班はまず始めに、理学部(当時)の近藤都登氏と原子核研究所の渡辺研一氏の指導を受けて有感面積 $4 \times 3 \text{ cm}^2$ の小型のマルチワイヤー比例チェンバー(MWPC)を作り、エポキシ板の枠に2mm間隔で張った多数の陽極線が独立の比例計数管として働くことを確めるなどして、経験をつんだ⁸⁾。後に装置改良の主役になり、また、筋肉の実験を行なった雨宮慶幸君は大学院に入ったばかりであった。MWPCはCERNで開発され、高エネルギー粒子の位置検出に使われていたが、これをX線二次元検出器として使い、蛋白質の回折データを迅速に測定しようとする試みはXuongなど⁹⁾によって1972年頃から始められていた。私たちはMWPCを一次元検出器として使い、筋肉の小角反射が測定できる性能を得ることに努めた。陰極線信号を遅延線で読み出す技術¹⁰⁾を泉隆俊氏(中部工大)に教えてもらい、また、彼の設計で有感面積 $6 \times 4 \text{ cm}^2$ のMWPCを作った。始めのうちはプリアンプが発振したり、ノイズが除けずひどく苦労したが、いろいろ改良を重ねて、一年後に0.25mmの位置分解能が得られるようになった¹¹⁾。この検出器で、薬液に浸した神経ミエリエン¹²⁾や緩伸長した収縮筋¹³⁾の小角反射を測定し、有用性を確かめると同時に、これらの試料の構造変化を秒程度の時間分解能で解析した。この間に間瀬精士氏(理学電機)がチームに加わり、検出器の性能改良と後述のデータ転送装置の完成に大きく貢献した。後者は中島春彦氏(東大工)が基本設計をしたものである。

1. マルチ・ストリップ陰極遅延線読み出しPSPC

スリット形の光学系を用いて筋肉の一方方向の構造を調べる目的には、検出器の窓高は通常1cmあれば充分である。そこで、MWPCの陽極線の数減らし、これを1本にした。このようにして、マルチストリップ形PSPCの原形ができた。Fig. 2は、その後の改良が加

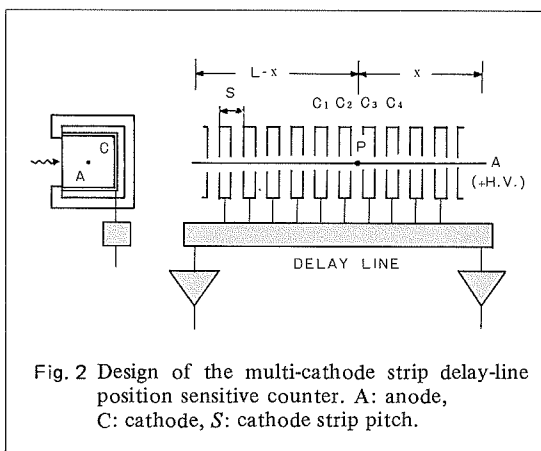
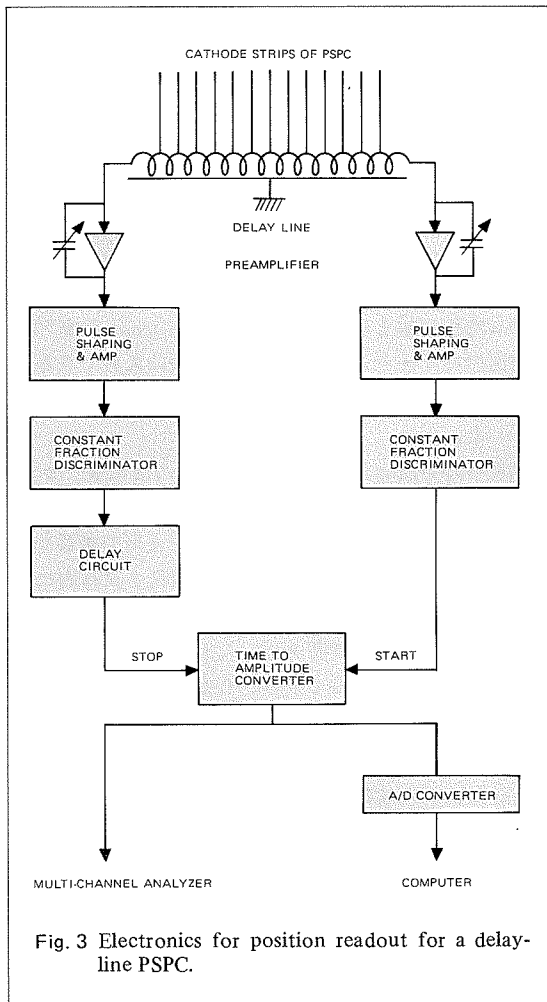


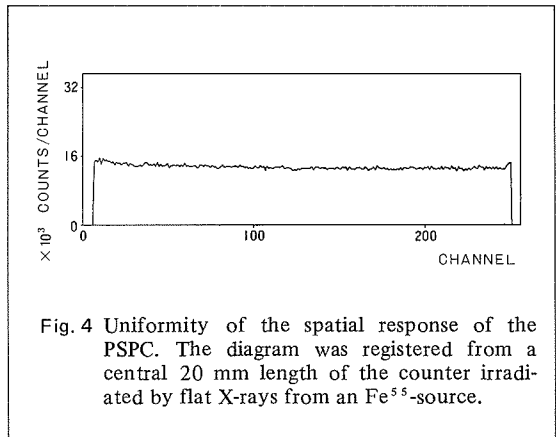
Fig. 2 Design of the multi-cathode strip delay-line position sensitive counter. A: anode, C: cathode, S: cathode strip pitch.

わったものの構造を示す。信号陰極Cはピッチ2mm、幅1.5mmの多数の金属ストリップで作られ、陽極線A上で起る個々の放電事象からなるべく振幅が大きく高さの揃った信号パルスを引き出せるよう、Aを三方からとり囲んでいる⁷⁾。各ストリップは電磁遅延線のタップ(タップ間遅延時間10~20 ns)に直結されている。入射X線によって、A上の点Pで電子がなだれが生ずると、Pに対向する数本の陰極ストリップC₁~C₄に誘導電荷が生じ、遅延線内を左右に分れて伝播する。遅延線の両端にパルスが到達する時間の差はPの位置xに比例するから、これをFig. 3のような回路系で測定してxを決



めるのである。このようなアナログ方式は1光子の処理時間が5~10 μ sとやや長いが、市販の回路を使って0.1~0.2mmの高位置分解能が得られる。私たちが最も苦労したのは、約6cmの有感長に亘って一様な感度——正確には、位置決定の微分直線性——を実現することであった。感度不均一性には性質の異なるいくつかのタイプがあり、原因を予測して一つ一つつぶして行っ

た¹⁴⁾ マルチストリップと同じピッチを持つ不均一性は、上述の回路系で決められるxが数本のストリップに跨る誘導電荷分布の重心であって、Pの座標そのものではないことに起因する。ストリップの構造や陰極間距離をいろいろ変えてテストを繰り返し、最終的にFig. 4に示す均一性を得た。微細な不均一性がまた残



っているが、筋肉の鋭い小角反射を測定する目的には、ほとんど問題にならない。しかし、反射線の形や小さなピークの生成・消滅を研究する場合は邪魔になるから、改良の余地がある。較正曲線を使って補正を施すことも可能である¹⁵⁾。筋肉の実験で使うCuK α 線に対しては、キセノンを主成分とする計数ガスを加圧して、約80%の検出効率を実現した。

私たちがマルチストリップ陰極遅延線読み出しPSPCを研究した頃、理学電機では製品化が進んでおり、工場の人々と情報や経験を交換することができた。便宜を計ってくれた方々に感謝したい。余談になるが、このPSPCはヨーロッパではガブリエル・カウンタと呼ばれている。筆者は、オルセー(フランス)で開かれたシンクロトン放射用装置の会議(1977年)で、A. Gabrielが生物試料実験用に私たちのものに大変良く似た検出器を作り¹⁶⁾ 同じく不均一性の問題に悩んでいる¹⁷⁾ ことを知った。グルノーブルの作業場で実物を見せてもらったが、位置分解能や均一性などの性能は私たちの方が優れていた。

2. データ収集法

Fig. 3の時間振幅変換器の出力を市販の多重波高分析器に入ると、PSPCの検出した一次元的X線強度分布がデジタル値で記録され、ブラウン管やチャート紙に出力できる。また、最近の多重波高分析器にはプロセッサや磁気ディスクが付いたものがあり、次々と測定した強度分布を比較的迅速に記憶装置に格納したり、また、簡単な数値処理を施したりできる。そこ

で、もし、研究対象とする構造変化が緩慢であれば、適当な露出時間をかけつつ、変化の進行に追従して逐次、X線回折像を記録していける。私たちはこれを逐次測定法と呼んでいる。⁷⁾ Fig. 5はその例で、高温で焼

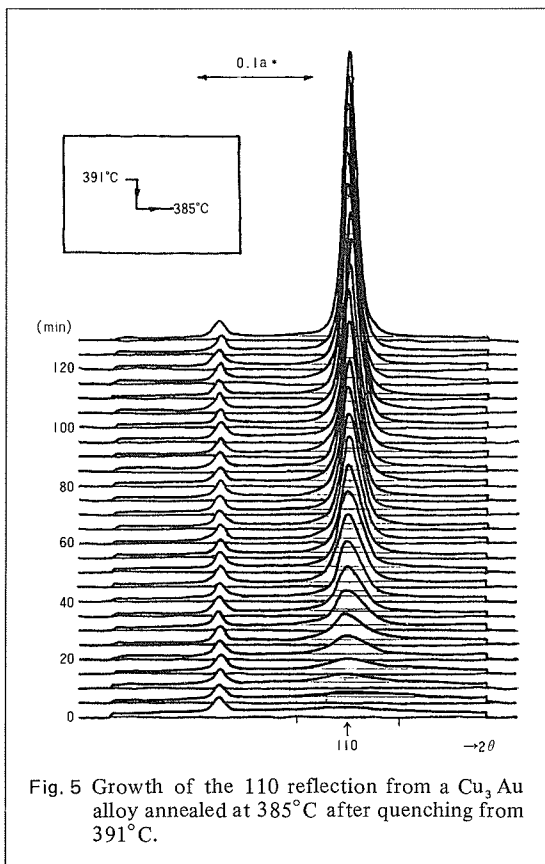


Fig. 5 Growth of the 110 reflection from a Cu_3Au alloy annealed at 385°C after quenching from 391°C .

純した Cu_3Au 合金を変態温度の直下に急冷した後、規則化の過程を調べるため、110ブラッグ・ピークの成長を5 minごとに測定したもの¹⁸⁾である。文献¹²⁾も同じ方法を使っている。しかし、速い(たとえば1sの)変化を多数(たとえば40個)時相に分けて見たいとなると、これでは追いつかないし、1回の測定では各時相に小数の光子しか計測されないで、測定を繰り返してデータをためなければならない。これを実行するには、大容量のメモリと特殊なメモリ制御装置が必要である。私たちはこれにミニコンを利用した(Fig. 6)。PSPCの出力を計算機にとり込み、計算機の主記憶を計数蓄積メモリとして用いたのである。計算機であるからメモリの制御——データをどんな形式で蓄積するか——はプログラムで行なえる。ミニコンへのデータ取り込みは次の方法によった。X線光子はPSPCでランダムな時間に検出されるが、そのたびに光子座標値を8ビットのデジタル値になおし、計算機の外部のバッファに一時記憶する。計算機は一定時間(=22 μs 、また

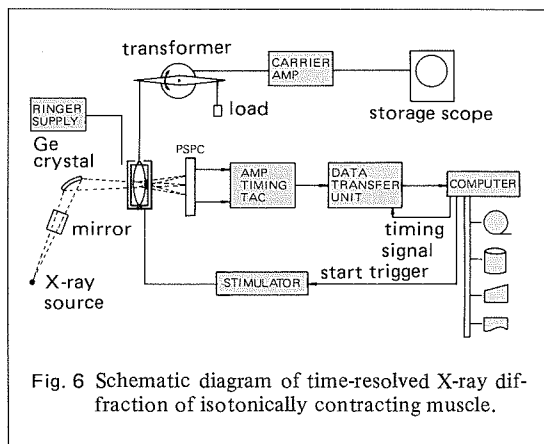


Fig. 6 Schematic diagram of time-resolved X-ray diffraction of isotonic contracting muscle.

は、40 μs)ごとに、このバッファの内容を搬用インターフェイスを介してCPUのレジスタに読み込み、プログラムで指定された形式でメモリに記憶する。座標値のAD変換と一時記憶を行なうのがデータ転送装置である。データ記憶形式としては、a)通常の計数メモリと同様にADD-ONEを行なう形式、b)取り込んだ光子座標値を端から書きならべる形式を開発した。^{15,19)} 時分割時相の幅と数は、それぞれ最小1ms、最高70個の範囲でパラメータとしてプログラムに入力できる。その他、各種のオフラインデータ処理用プログラムを製作した。

私たちの方法は、i)大きな外部メモリを必要とせず、ii)データ収集形式をプログラムで指定でき、iii)X-Yプロットやグラフィクスなど計算機の入出力機器が利用でき、また、iv)目的とする構造変化を試料内に惹起する「刺激」をプログラムでトリガーしたり、得られたデータをもとに判断を下したりして、実験をオンライン制御することができる。しかし反面、データのメモリへの格納をソフト(アセンブラ)で行なうため、その時間が系全体の不感時間を規定し、10,000cpsを超える計数率下では数え落しが無視出来なくなる。私たちのミニコンは今ではやや旧式となったFACOM U-200で、最新の機種を用いればこの点は2~3倍改善される。しかし、いずれにしても計数速度の点では外部メモリ方式が優れている。

3. 時分割X線回折法による収縮中の筋肉の動的解析

3.1 骨格筋の構造と筋肉滑り説

骨格筋は生体組織としてはまれに見る規則正しい構造をしている。アクチンという蛋白質を含む細いフィラメント(直径約50 $\text{\AA}$ 、長さ約1 μm)とミオシンという蛋白質を含む太いフィラメント(長径約100 $\text{\AA}$ 、長さ約1.6 μm)が、格子常数約400 $\text{\AA}$ の二重六方格子を形成し、長手方向にも1.5~3.7 μm の周期で規則正しく並んでい

る。(Fig. 7)ウサギの腰筋やカエルの縫工筋の横断切片の電子顕微鏡写真を見ると、フィラメントが結晶模型のように整然と並んでおり、どうしてこんな構造が生体内にできたのか、不思議になる。運動という動物にとって本質的な機能が筋肉の収縮に起因し、その収縮はフィラメントの規則的配列と切離しては考えられないから、なおさらである。

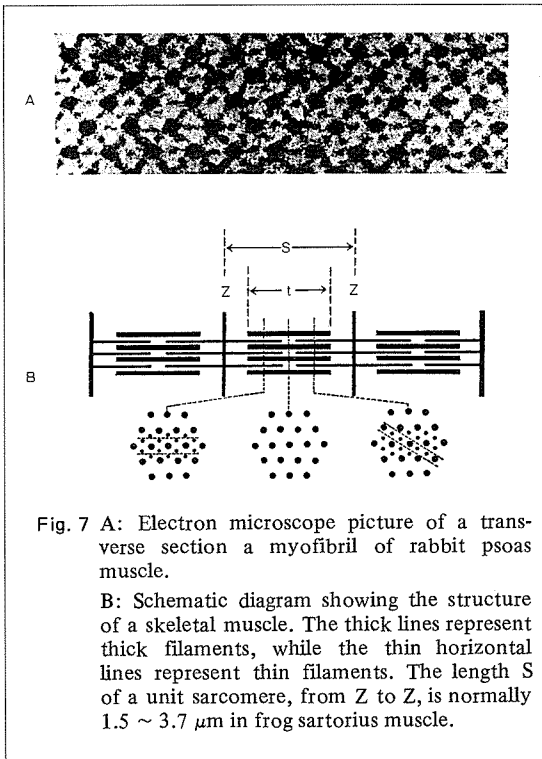


Fig. 7 A: Electron microscope picture of a transverse section a myofibril of rabbit psoas muscle.
B: Schematic diagram showing the structure of a skeletal muscle. The thick lines represent thick filaments, while the thin horizontal lines represent thin filaments. The length S of a unit sarcomere, from Z to Z , is normally $1.5 \sim 3.7 \mu\text{m}$ in frog sartorius muscle.

動物の体から取り出した新鮮な骨格筋は、 $2\theta = 0.2^\circ \sim 1^\circ$ の小角領域に二種類の鮮鋭なX線反射を与える。筋長に垂直な赤道線上に現われる数組の強い反射と、筋長に平行な子午線上に並ぶ一連の反射である。前者はフィラメント格子から生じ、後者は個々のフィラメントの周期的分子構造から生ずる。これらの反射の強度は筋肉の生理的狀態によって著しく変化する。たとえば、新鮮な弛緩筋では最内側の赤道反射(1,0反射)がその外側の1,1反射より約2倍強いが、筋肉が生理活性を失なって硬直すると、その強度が逆転する。子午反射の強度分布も、この二つの状態で顕著に異なる。これと対照的に、長さを一定に保った筋肉の反射線の位置は生理状態にほとんど影響されない。これらの事実は、電子顕微鏡で確認されたフィラメント長不変の事実とともに、H.E.HuxleyおよびA.F.Huxleyが提唱した「筋肉滑り説」^{20,21)}の重要な根拠を成した。筋肉滑り説は、太細二種類のフィラメントが長さを変えことなく滑り合うことによって筋肉が収縮する説である。滑りを

起こす力は、太いフィラメントの表面から突出する多数の蛋白質構造体クロスブリッジが、細いフィラメントとの間の空間を10ms程度のサイクル周期で往復運動し、細いフィラメント上の特定の部位と反応して結合・解離を繰り返す結果発生するとされる²¹⁾。この反応が筋肉のCaイオン濃度で制御される機構は、江橋たち²²⁾によって解明された。クロスブリッジの運動と細いフィラメント上における分子反応の機序の解明は、筋収縮の中心的研究テーマである。

3.2 等尺性単収縮時の時分割X線回折

収縮中の筋肉からX線小角回折像を記録する試みは、PSPCの出現以前に写真法を使って行なわれた^{23,24)}。しかし、長時間の露出中に筋肉の状態が変わってしまうため、クロスブリッジの運動を研究するのに必要な高時間分解能回折像は得られなかった。私たちは、まず、両端をクランプして長さを一定に保った食用ガエルの縫工筋を電流パルスで刺激して等尺性単収縮を起こさせ、時分割赤道反射像を25msの分解能で記録した。Fig. 8^{15,25,26)}において、刺激によって1,0反射は急速

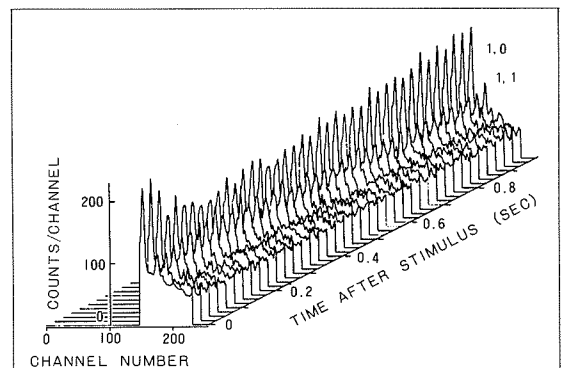


Fig. 8 Time-resolved equatorial diffraction diagrams recorded from isometrically twitching frog sartorius muscle. Only the right halves are shown for clarity. The numbers on the abscissa give channel number of the analyzer, the ordinate represents count in each channel for the second to the 39th diagrams, and the third axis represents time after stimulus. The time resolution of the data collection is 25 ms. The foremost diagram was sampled for 2 sec when muscle was at rest between stimuli. The data were collected from 120 twitches repeated at a 10 s interval and were processed to give the 1, 2, 1 running average for each diagram. Sarcomere length of muscle $2.4 \mu\text{m}$. A mirror-monochromator optics was used with a line focus ($0.1 \times 1 \text{ mm}$) on a copper target of a X-ray generator operated at 40 kV and 30 mA.

に減弱し、1,1反射は増強し、その後約1sかかって徐々にもとに戻る様子が良くわかる。滑り説では、このよ

うな強度変化は、静止筋では太いフィラメントの表面に留まっていたクロスブリッジが収縮筋では細いフィラメントの近くへ移動する結果生ずると説明される。Fig. 7 Bからわかるように、六方格子の1,0面は太いフィラメントだけから成るのに対して、1,1面は太いフィラメントと細いフィラメントを1:2の割合で含む。したがって、大きな散乱質量を有するクロスブリッジが太いフィラメントから細いフィラメントへ移動すれば、1,0面の散乱能が減り、1,1面のそれは増える。Fig. 8の1,0および1,1反射の強度は、二つの格子面の散乱能、すなわち、移動したクロスブリッジ数の時々刻々の変化を反映している。定量的議論は二つの反射の強度比 I_{10}/I_{11} を用いて行なわれる。Fig. 9 は時分割法で測定

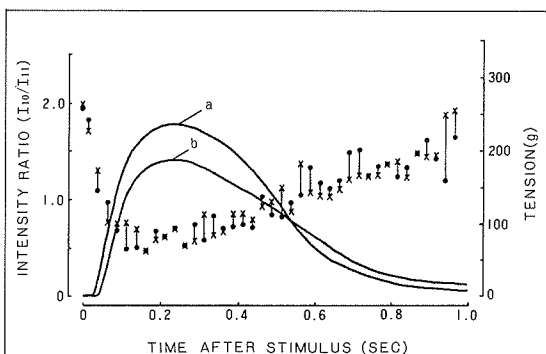


Fig. 9 Typical time course of change in the intensity ratio $I_{1,0}/I_{1,1}$ observed with a frog sartorius muscle during isometric twitch. Circles represent data points measured from the left halves of the recorded diagrams, while crosses are data points measured from the right halves. Twitches were repeated 120 times. The initial sarcomere length was $2.4 \mu\text{m}$. Curves a and b show the isometric tension at the first and the 120th twitches, respectively.

した I_{10}/I_{11} 値を刺激後時間に対してプロットしたものである。刺激前の静止時に2.1であった I_{10}/I_{11} は刺激後急激に減少し、約100ms後に最小値0.5に達し、その後約1sかかって刺激前の値を回復することがわかる。硬直した筋肉ではほぼ全部のクロスブリッジが恒常的に細いフィラメントに結合しているが、その場合、 I_{10}/I_{11} 値は約0.25である。議論が大雑把になることを覚悟して、 I_{10}/I_{11} 値を細いフィラメントの表面にいるクロスブリッジ数の間に一義的直線関係を仮定すると、以上の観察事実から、等尺性単収縮時に移動するクロスブリッジの最大数は全体の約85%であることがわかる。二種のフィラメントとクロスブリッジの六方格子内における配置を仮定してモデル計算²⁴⁾を行えば、実験的 I_{10}/I_{11} 値を使ってそれぞれのフィラメントの周りにいる時々刻々のクロスブリッジ数(相対数)を算出できる。上記の大雑把な値はモデル計算の結果²⁷⁾とよく合っている。

Fig. 9の実線は、X線実験と同時に測定した筋張力を示す。張力は I_{10}/I_{11} 値によく似た時間的経過を約100msだけ遅れてたどることがわかる。この事実は、張力発生クロスブリッジの運動と密接に関係していること、前者が後者の結果であることを示している。

3.3 等張力性単収縮時の時分割X線回折

次に私たちは、杉晴夫教授、田中秀洋、為安司氏(帝京大学医学部)と協力して、等張力性単収縮時の骨格筋の時分割X線回折を行なった。^{15,25,26)} Fig. 6はその時の実験配置を示す。等張力性収縮は、筋肉が一定の荷重を引きずりつつ、長さを減ずる収縮である。Fig. 10は荷重が非常に軽く、筋肉の発生し得る最大強力2~3%の場合結果である。 I_{10}/I_{11} の経時的挙動は大体において等尺性収縮時と似ている。しかし、その最低値は約1.0で等尺性収縮時より明らかに大きい。前と同様に、 I_{10}/I_{11} 値と細いフィラメントの近くにいるクロスブリッジ数の直線関係を仮定すると、軽荷重の等張力性単収縮時に移動するクロスブリッジの最大数は全体の約60%であることがわかる。小さな張力は少数のクロスブリッジが細いフィラメントと反応すれば発生し得ると考えられるから、この値は定性的には理解できる。しかし、この場合、筋肉は実際に短縮し長さを減じているから、 I_{10}/I_{11} 値と移動クロスブリッジ数の関係は等尺性収縮時と異なっていることも予想され、量的については今後の研究が必要である。Fig. 10に見られ

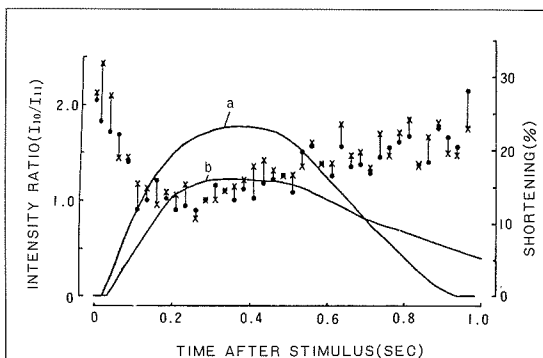


Fig. 10 Typical time course of change in the intensity ratio $I_{1,0}/I_{1,1}$ during isotonic twitch of a frog sartorius muscle under a small load ($0.025 P_0$). Circles represent data points measured from the left halves of the recorded diagrams, while crosses are data points measured from the right halves. Twitches were repeated 120 times. The initial sarcomere length was $2.4 \mu\text{m}$. Curves a and b show the degrees of shortening at the first and the 120th twitches, respectively.

るように、この場合も分子構造(I_{10}/I_{11} 値)の変化は生理機能(短縮)の発現に先行して起る。

私たちは中荷重の等張力性単収縮についても実験を行なった。^{15,19,25)} その結果、荷重が最大張力の20~30%の場合 I_{10}/I_{11} の最低値は約0.5で荷重無限大の等尺性単収縮時と有意な差がないことがわかった。このことは、筋肉の発生する張力は移動するクロスブリッジ数に必ずしも比例しないことを示すように見えるが、詳細な議論は将来の研究に待たなければならない。

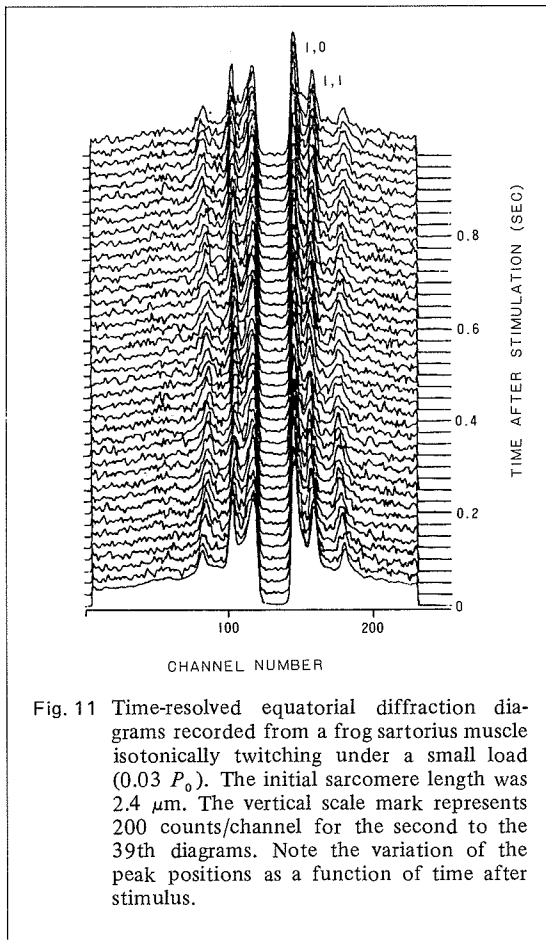


Fig. 11 Time-resolved equatorial diffraction diagrams recorded from a frog sartorius muscle isotonicly twitching under a small load ($0.03 P_0$). The initial sarcomere length was $2.4 \mu\text{m}$. The vertical scale mark represents 200 counts/channel for the second to the 39th diagrams. Note the variation of the peak positions as a function of time after stimulus.

Fig. 11は軽荷重の等張力性単収縮時の時分割回折像を縦にずらして並べたものである。この図で、1,0および1,1 反射のピークが描く軌跡は直線ではなく、わずかに内側(低角側)に湾曲している。図を目の高さに持ち上げ、紙面すれすれの方角から眺めると、湾曲がよく見える。ピークの低角側への変化は、格子面間隔の膨張を示す。筋肉が短縮すれば、長さが減った分だけ断面積が増え、六方格子の反射面間隔が広がることが予想されるがFig. 11から面間隔 d を求め、 $1/d^2$ を短縮度から算出した筋長に対してプロットすると、原点を通る直線が得られる。このことは、フィラメント格子の単位胞体積は筋肉の短縮中常に一定に保たれることを示している。

4. 将来の展望

私たちが時分割X線回折法の研究を始めた頃からX線回折の実験に次々と新しい着想や技術がとり入れられ、急速な進歩が始まったように思われる。検出器の分野では、ここに述べた1次元PSPCの他、2次元PSPCも近い将来実用化される見通しである。²⁸⁾ これらの検出器は現状のままでも極めて有用であるが、今後さらに不感時間を短かくし、計数速度を高める努力がされよう。位置決定の高速化には、光子座標が直接デジタル量で得られる回路方式が有利である。遅延線を用いるPSPCでは、700MHzのクロックで時間差を直接デジタル量に変換する試み²⁹⁾ が行なわれている。また、マルチストリップ陰極を抵抗鎖でつなぎ、両端に現われる電荷量を高速AD変換した後デジタル割算を行なう方法³⁰⁾ 各ストリップに個別の増巾器とAD変換器をつけ、特殊なプロセッサで重心座標を算出する方式³¹⁾ は、実用化に近い。これらの方法では、 $1\mu\text{s}/1$ 光子の速度が得られる見込がある。

比例計数管が到達し得る最高計数率は、気体中の陽イオンの易動度で決定される。陽極線のある個所で電子などが生ずると、その附近の約0.2mmの陽極線が、陽イオン塊が離脱するのに必要な約 $20\mu\text{s}$ の間、不感になると言われている。³²⁾ この値を信用すれば、陽極線長10cmの1次元PSPCの限界数率は 25×10^6 cps、同20mの2次元PSPCのそれは 5×10^9 cpsになる。いずれにしても、計数管自身は現在実現可能などのような位置決定回路よりも高速である。検出系の高速化は、分割回折法の時間分解能を現在のミリ秒程度からマイクロ秒程度に高めるためにも、また、シンクロトロン放射の高強度に対峙するためにも、是非研究されねばならない。

私たちは今まで時分割回折法で主に生体組織の動的構造を調べてきた。しかし、この方法は他のいろいろな対象に応用できることは明らかである。各種結晶の相変態、溶液酸素蛋白の形態変化、非晶質の結晶化、液体や熔体凝固などは興味深い研究対象である。

以上の研究は高良和武教授(高エネルギー研)が企画され、筆者に実行の機会と指導をあたえられたものである。装置開発、製作に携わった研究室の同僚諸氏、御助言や御協力をいただいた他の多くの方々に深謝する次第である。

参考文献

- (1) H.Hashizume, K.Kohra and Y.Oguro: J. Appl. Crystallogr. **8** (1975), 249.
- (2) A.Gabriel and Y.Dupont: Rev. Sci.Instrum. **43** (1972), 1600.

- (3) C. J. Borkowski and M. Kopp : Rev. Sci. Instrum. **39** (1968), 1515.
- (4) 遠藤成章, 間瀬精士, 山本英宜 : 日本結晶学会誌 **17** (1975), 238.
- (5) R. Allemand and G. Thomas : Note Tech. LETI /MCTE, Grenoble, No. **1056** (1974).
- (6) T. Izumi : SSRL Report No. 78/04(1978), **VIII**77.
- (7) 橋爪弘雄 : 日本結晶学会誌 **21** (1979), 84.
- (8) H. Hashizume et al. : Ann. Rep. Eng. Res. Inst. Fac. Eng. Univ. Tokyo **34** (1975), 227.
- (9) N. H. Xuong, S. T. Freer, R. Hamlin, C. Nielsen and W. Vernon : Acta Crystallogr. **A34** (1978), 289.
- (10) T. Izumi : Jpn. J. Appl. Phys. **14** (1975), 1581.
- (11) H. Hashizume, Y. Amemiya, K. Kohra, T. Izumi and K. Mase : Jpn. J. Appl. Phys. **15**(1976), 2211.
- (12) H. Hashizume and N. Masaki : Arch. Bioch. Biophys. **186** (1978), 275.
- (13) H. Suzi, Y. Amemiya and H. Hashizume : Proc. Japan Acad. **B53** (1977), 178.
- (14) H. Hashizume, K. Mase, Y. Amemiya and K. Kohra : Nucl. Instrum. & Methods **152** (1978), 199.
- (15) 雨宮慶幸 : 学位論文, 東大工学部, 1979.
- (16) A. Gabriel : Rev. Sci. Instrum. **48** (1977), 1303.
- (17) A. Gabriel, F. Dauvergne and G. Rosenbaum : Nucl. Instrum. & Methods : **152** (1978), 191.
- (18) 元宏友美 : 修士論文, 東大工学部, 1978.
- (19) Y. Amemiya and H. Hashizume : J. Fac. Eng., Univ. of Tokyo **B35** (1979), 313.
- (20) H. E. Huxley and J. Hanson : Nature **173**(1954), 973.
- (21) A. F. Huxley : Progr. Biochem. Biophys. **7**(1957), 255.
- (22) S. Ebashi and M. Endo : Progr. Biophys. Mol. Biol. **18** (1968), 123.
- (23) H. E. Huxley and W. Brown : J. Mol. Biol. **30** (1967), 383.
- (24) J. C. Haselgrove and H. E. Huxley : J. Mol. Biol. **77** (1973), 549.
- (25) H. Sugi, Y. Amemiya and H. Hashizume : Proc. Japan Acad. **B54** (1978), 559.
- (26) Y. Amemiya, H. Sugi and H. Hashizume : Cross-Bridge Mechanism in Muscle Contraction, ed. H. Sugi and G. H. Pollack, p.425, Univ. of Tokyo Press (1979).
- (27) I. Matsubara and N. Yagi : J. Physiol, **278** (1978), 297.
- (28) 間瀬精士, 飯高洋一, 橋爪弘雄, 高良和武 : 日本結晶学会昭和54年度年会, 昭和54年11月。
- (29) G. Rosenbaum : SSRL Report 78/04, **VIII**69(1978)
- (30) 小橋秀一, 持木幸一, 長谷川賢一, 関口晃 : 日本原子学会 秋の分科会 **B45**, 昭和53年10月。
- (31) 泉隆俊 : 高エネルギー研検出器研究会, 昭和54年3月 (KEK Reportに掲載予定)。
- (32) G. Charpak : Nucl. Instrum. & Methods **152** (1978), 185.

技術ノート

X線ディフラクトメトリに於ける 光学系と分解能および強度

岩井 哲*

はじめに

X線の回折現象は、その情報として回折線の回折角、強度、および形を与え、これらの情報から物質の種類

や状態を知ることに使われる。回折角の測定についてはすでに報告した¹⁾今回は用いるX線光学系と回折線の分解能および強度について検討し、測定目的に適したX線光学系の常数の選択について述べる。同一X線条件下では分解能と強度は相反する関係にあるのでそ

* 理学電機機分折センター