

MicroStrip Gas Chamber が切り開く 新たな X 線画像解析法

谷森 達, 西 勇二, 青木 俊介
越智 敦彦, 西 泰朗

東京工業大学理学部*

Development of MicroStrip Gas Chamber as a new X-ray Imaging Area detector

Tooru TANIMORI, Yuji NISHI, Shunsuke AOKI,
Astuhiko OCHI and Yasuro NISHI

Department of Physics, Tokyo Institute of Technology

We have developed the two-dimensional MicroStrip Gas Chamber (MSGC) with a 10 cm × 10 cm detection area and the ultra fast read-out system specified to this. MSGC was made using Multi-Chip Module (MCM) technology, and has a very thin substrate of 17 μm thickness, thousands of anodes and back strips both with 200 μm pitches.

The new read-out system, in which the hit addresses of the electrodes were sequentially encoded to the hit positions by synchronous clock, handles much data of 10⁷ events/s from MSGCs. This enable us to get sequential fast and fine digital images. Furthermore, since MSGC is a real photon counting detectors, all timing of photon with the accuracy of a few ten ns and energy are recorded. We report on the performance of this MSGC system as a real time Area detector and discuss the abilities of this system, which may give dramatical changes in X-ray science.

1. MSGC の原理と構造

MicroStrip Gas Chamber (MSGC) はまだほとんど知られていない新しい検出器であるが、数年以内には新しいリアルタイム X 線画像装置として実用化されることを期待されている。

MSGC は原理的には全く多線比例計数管 (MWPC) と同じガス増幅を利用した検出器である。ただ、IC 微細加工技術を用い、図 1 に示すように基板 (Substrate) 上に数十 μm 幅のアノード、カソード電極を交互に形成し、MWPC と同様な構造を基板 (Substrate) 上に作るワイヤレス型ガス比例計数管であり、1988年フランスの Oed によって考案された¹⁾。MWPC においては、ワイヤーに働く静電気力による反発力の為、ワイヤー間隔としては 1 mm 程度が限界であった。しかし MSGC では、ストリップを基板上に印刷する為 200 μm 程度という電極間隔の狭さが容易に実現できる。これにより 100 μm 以下の位置

分解能を得る事ができる。

MSGC 上のドリフト電極の間のガス層で粒子線によってガスがイオン化されその電子が電気力線に沿ってアノードに達し、アノード近傍の高電場によってなだれ現象による増幅作用を受ける。増幅された電子がアノードから、また正イオンがカソードから信号として検出される。MWPC などのガス増幅型検出器では電子のドリフト速度が ~10⁶ cm/s であるのに対し、正イオンのドリフト速度は ~10³ cm/s と電子に比べ千倍程度遅い。この為、高計数率の状態ではイオンが電極付近で飽和しなだれ現象を阻止する効果が生じる。この効果により MWPC の動作は非常に不安定になり大強度 X 線、粒子線に対して使用できなかった。一方、MSGC はイオンが数十 μm しか離れていないカソードにすぐに吸収されるため飽和効果が起こりにくく MWPC の千倍以上である 10⁷ cps (Count Per Second)/mm² に及ぶ粒子線強度でも動作出来る。このよう

* 東京工業大学理学部 〒152-8551 東京都目黒区大岡山 2-12-1
TEL 03-5734-2081 FAX 03-5734-2389 e-mail tanimori@hp.phys.titech.ac.jp

Structure of 2D-MSGC

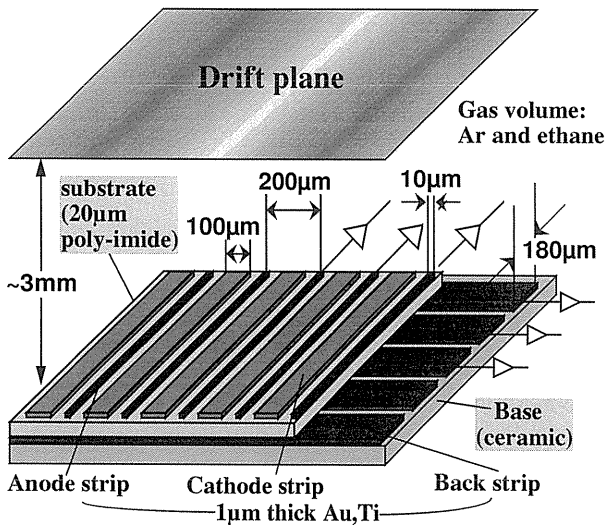


Figure 1. Structure of 2-dimensional MSGC.

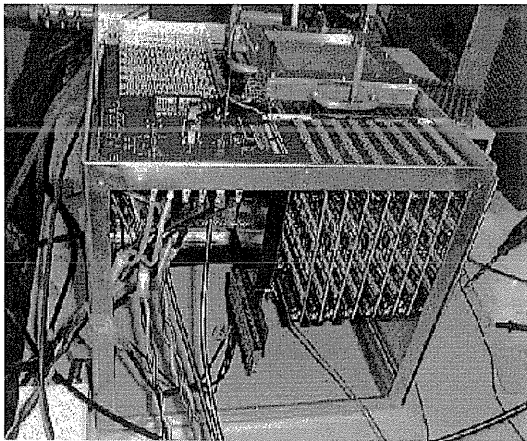


Figure 2. Set up of MSGC 10 cm² detection area.

な特徴により MSGC は大強度放射光、加速器のための検出器として、出現時から大変期待されていた。

東工大グループは1991年から独自に、bare LSI Chip を実装する Multi-Chip-Module (MCM) 技術を用いて MSGC を開発している^{2,3)}。この MSGC の特徴は図 1 にあるように substrate に厚さ約 20 μm のポリイミド薄膜を用い、その薄膜の下層にアノードと直行する Back Strip 電極をやはり 200 μm 間隔で形成している事である。この BackStrip に誘起される信号を使って 2 次元座標読み出しを可能にしている。さらに我々が開発している MSGC は MWPC と異なり任意の形状で電極を形成することが可能ならば、ポリイミドのようなフレキシブルな素材を使用しているので将来は曲面型の形状も可能と考えられ、画像検出器として最適である。一方、他の多くの MSGC に関する開発は厚さ数百 μm のガラスをサブストレートに用いた、高エネルギー加速器実験のための荷電粒

子飛程検出器として、1 次元 MSGC の開発が中心となっている⁴⁾。さらには MSGC の製作は IC 製造工程を利用するので性能の揃った検出器が、回路のように量産出来る特徴がある。ほとんど手作業で製作し、性能も不揃いであった MWPC とはこの点も大きく異なる。

このように MWPC に比べ非常に優れた特性を持っているが、MWPC を一度扱った人ならすぐに気づくようにアノード近傍で起こる増幅作用で作られる正イオンが電極付近のサブストレート上に付着し、その空間電荷効果でゲインの低下を引き起こしてしまう。そのため、現在、サブストレートの材質として、各種の誘電体の選択、さらにイオン注入法などによって最適な抵抗値を見出す研究が盛んに行なわれている。我々はポリイミドの表面に有機チタニウムをコーティングし、表面抵抗をコントロールしている。その他、電極間の放電対策など、我々は MSGC に対して多くの開発を行ない、その基本性能を今まで調べてきた。これら基礎開発については文献^{2,3,4)}を参照されたい。

このような研究により最近開発された 10 cm 角 MSGC 装置を図 2 に示す。

2. 画像処理システム

100年近く使用されてきたフィルムに変わり、計算機への情報伝達が圧倒的に有利な電子的な X 線画像処理装置の使用が盛んになってきた。実際、Imaging Plate (IP)、X 線カメラやファイバ一束と CCD を組み合わせた装置などの積分型検出器が使用されるようになってきた。積分型検出器は発生時間やエネルギーといった各 X 線の粒子としての情報はすべて失われてしまうが、大強度でも容易に測定でき、高画質な画像を短時間で与えてくれる。さらにこれらの装置はコンピュータとオンラインで結合できるために高速の情報処理が可能になり、広く使われるようになってきた。ただ、像の歪み、ダイナミックレンジ、位置分解能などそれぞれに欠点もある。特に積分型であるため、X 線の時間情報がなく最近注目を集めている反応そのものを実時間で捉えていく動的解析には対処するのは容易ではない。

これを可能にするには X 線の粒子情報を取り込める微分型画像検出器が必要となる。しかし、画像を構成するには数十万点以上の情報が必要となり、MWPC を使用した場合、大強度ビームが使用できず膨大な露出時間がかかってしまい、実際ほとんど画像処理に利用されることはなかった。さらに、たとえ大強度下で動作する微分型画像検出器が開発されたとしても、取り込まなければならない情報に新しく時間軸、さらにはエネルギー軸までもが加わりデータ量は毎秒数 MB 以上となる。これを連続的に処理出来て始めて動的解析に利用可能なリアルタイム画像解析システムとなる。このように情報処理システムにおいても、従来、MWPC に用いられたアナログ的(遅延線や電荷分割法)手法では到底この大量のデータを処理すること

は不可能である。MSGCのような多次元情報を得られる理想的な画像装置の開発の最も重要な鍵は、実はこの膨大な情報を高速に処理するためのデジタル的処理方法の開発であり、これを実現しないとMSGCの実用化は意味がないのである。

MSGCのような2次元座標をX, Y軸方向の独立な電極から読みとる画像検出器はその検出器の信号幅以上の周波数で読むことは困難となる。そのため、アナログ信号処理が必要なMWPCでは μs 程度のパルス幅が必要となり 10^5 Hz程度の信号処理能力が限界であった。しかし、MSGCは狭い電極間距離のためにパルス幅が20 nsと非常に短く、信号があった近接した複数の電極の位置の単純平均をとるだけで $100\ \mu\text{m}$ 以下の位置分解能が簡単に達成できる(MWPCなどでは各電極の信号量による重み平均でしか1 mm以下の位置分解能はでない)。そのため各電極のパルス高を記録しないでヒットした電極の位置のみを記録するデジタル処理方式が可能になる。

我々が実際にMSGC用に考案、開発したシステムのブロック図を図3に示す。高速高計数率を実現するためにMSGCの各信号線にIC化された高速アンプおよびディスクリミネータをつけてパルス化し、デジタル処理によって座標変換を一気に行なう事を考えた。そして入力信号から入射X線の位置を判断するまで全てハードウェアで処理を行う事で高速化を実現しようと試みた。

この為に我々はまず、プリアンプ、ディスクリミネーター一体型ボードの開発を行った。このボードの写真を図4に示す。シェーピングプリアンプにはパルス幅が20 nsecのLeCroy MQS104Aを、ディスクリミネーターにはLeCroy MVL407Sを用いた。アノード、バックストリップの各ストリップに誘起された信号は、MQS104Aにより増幅された後、同一ボード上にあるMVL407SによりECL規格1ビットのデジタル信号に変換される。前に述べた通り、ここでストリップのパルス高は捨てられ、各ストリップはヒットがあったか無かったかの1ビットデジタル信号にそれぞれ変換される。そしてこのECL信号は、VME上に構成されている高速データ収集システムに入力され、2次元座標に変換される。プリアンプ及び、ディスクリミネーターの2つのICチップは1チップで4チャンネルの信号処理が可能であり、一枚のボードには16個のチップを実装してあるので、合計64チャンネルの処理が図4にある一枚のボードで可能である。10 cm角MSGCはアノード、バックストリップそれぞれ512チャンネルずつあるので、このボードが8枚ずつ計16枚がMSGCのマザーボードの裏側に直接接続されている(図2参照)。

プリアンプボードからのECL信号を受ける高速データ収集システムは、9U-VME規格上に6枚のボードで構成されている。高速データ収集システムの写真を図5に示す。4枚のボードは座標変換ボードで、1枚がメモリボ-

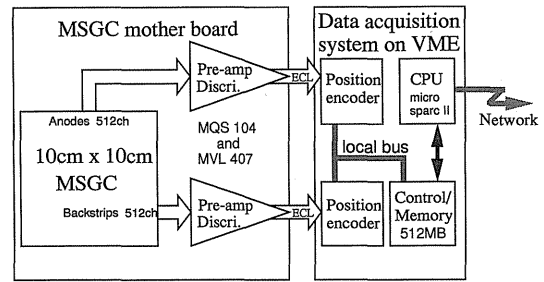


Figure 3. Block diagram for MSGC data acquisition system.

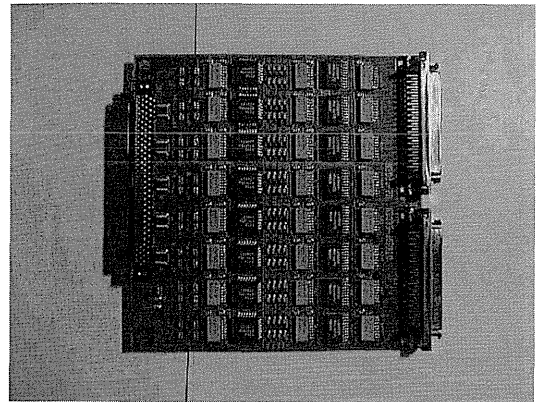


Figure 4. 64 channel pre-amplifier and discriminator board.

ードである。さらにこれらを制御するためのCPUボードからなっている。プリアンプ、ディスクリボードによってパルス化されたX線の位置情報は非同期的に座標変換回路に入力される。この座標変換回路のブロック図を図6に示す。連続した信号を不感時間無しに最も効率良く処理するには、信号と各処理課程を同期化しパイプライン処理を行えばよい。まずデータラッチ回路により、非同期的な入力パルスはクロック毎の同期的な信号に整形される。1気圧のアルゴン等のガスを利用した場合、5 keV程度以上のX線によって生成される電子雲は通常 $200\ \mu\text{m}$ を越えるため、MSGCからは複数の連続したストリップがヒットする。複数本の連続した電極(クラスタ)から信号が入力した場合、その平均値の電極を計算している。実際のX線による信号か、または電気ノイズかは同じクロック内にアノード、バックストリップ双方の信号が検出されたこと、さらにそれぞれの電極列にヒットした電極のクラスタが1つしかないことを要求することにより完全に判断できる。クロックにより整形された入力信号は、以降クロック同期の位置エンコーダ回路によって処理される。多入力信号の処理の複雑さから、データのエンコードには数クロック必要であるが、我々のシステムでは、内部処理をパイプライン化することによって、1クロック当たり1イベントのデータを処理できる独自のの方法をとっている。

1024チャンネルにも及ぶ多入力信号の回路を効率良く実現するため、信号処理の回路素子としては、PLD

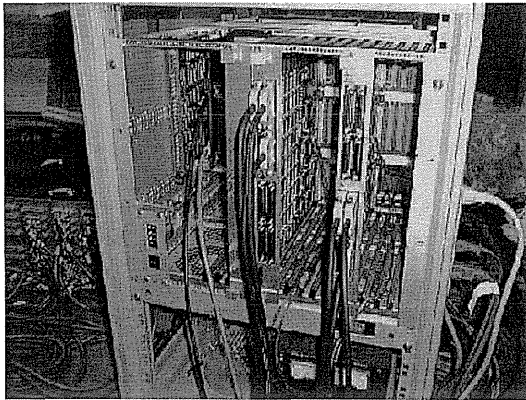


Figure 5. Picture of DAQ system.

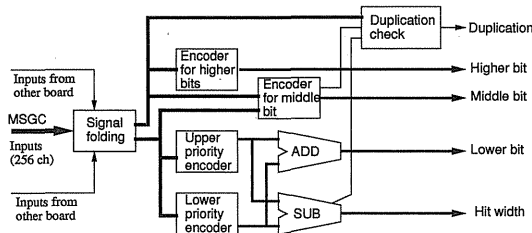


Figure 6. Block diagram for MSGC position encoding system.

(Programmable Logic Array) を集積化した LSI, CPLD (Complex Programmable Logic Devices) を用いている。これには Altera 社製の EPM7256E と EPM7192E を用いた。これによって、回路開発の時間を大幅に短縮し、高性能の処理回路を非常に小さな面積で実現することができた。現在データ収集クロックは 10 MHz であるが、最高 20 MHz で動作するように設計されており、20 MHz での動作は現在試験中である。

そして、この座標変換回路によってエンコードされたデータは J-3VME バスを通して制御メモリボードに送られる。メモリボードは 512 M byte の容量をもっている。そして一つの X 線によるデータは X, Y 軸それぞれ方向に関する 20 bit の位置データと、4 bit のタイミングデータ、そして ADC からのエネルギー情報が 8 bit 幅で構成されている。よって 1 イベントあたりのデータが 4 byte 幅を使うので、現在のメモリボードで 128 M のデータを一度に貯える事が可能である。メモリーボードに格納された X 線の情報は VME バス上の CPU ボードに送られディスクに記録される。CPU ボードには FORCE 社の CPU-5V もしくは CPU-7V を用いている。それぞれのボードには microSPARC (110 MHz) または turboSPARC (170 MHz) の CPU が搭載されている。メモリボード上のメモリは CPU ボードの内部メモリと同様にアクセスできるので、X 線画像の動画をリアルタイムでコンピュータの画面に出すことが可能である。さらにオンライン動画処理をするために高速ネットワークを介して外部の高速なワーク

ステーションにデータを転送する事もできる。

このシステムにより、毎秒数十～数百フレームの X 線動画画像を得ることができる。実際に X 線の高速連続写真を得ることに成功しており、例えば、図 7 に示したのは、MSGC の前面でペンダントを毎秒約 1 周させた時の X 線透過像である。それぞれの絵は 25 ミリ秒毎のスナップショットである。この時の MSGC による X 線の計数率は 1.3 Mcps であった。

次にこのシステムのデータ収集速度を調べる為に行った試験結果について述べる。図 8 が 10 MHz でシステムを動作させた時の評価結果である。横軸が MSGC で 1 秒間に吸収された入射 X 線強度で、縦軸が 1 秒間にデータ収集システムにより処理されたデータ数である。実線は理論曲線であり、プロットされた点が実測値である。この図にあるように、最高で 3.2 Mcps のデータ収集速度を達成した。データ収集システムは、1 クロックに 1 イベントしか扱えないようになっている。MSGC がストリップ状であることから 1 クロック内に 2 イベント以上の X 線の入射があると、入射位置の候補は 4 点になってしまい、X 線の入射位置を同定することが出来ない。この事から、2 イベント以上の X 線が 1 クロック内にあったデータは取り込まないようになっている。しかし X 線は通常ランダムに入射してくるので、余りにも大強度の X 線に対しては、図 8 の右側のように飽和をおこし、データ処理効率は下がってしまう。ランダムな X 線源に対する 1 サイクル当たりのイベント数はポアソン統計に従うが、この内 1 イベントの時の場合有効なデータとなるから、データ収集速度 R は、

$$R(r) = r \cdot \exp(-r/c) \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 r は MSGC で吸収される X 線のレートで、 c はデータ収集のクロックサイクルである。この式から、 R は $r=c$ の時最大値 c/e をとる事がわかる。10 MHz の時の最大値は 3.7 Mcps で、図 8 に示した測定結果はこの式と良く一致し、最大データ収集レートの 3.2 Mcps はほぼ理論限界までの性能を発揮させる事に成功した事がわかる。これは毎秒 100 フレーム程度の実タイム画像がとれる能力であり、現在、広く使用されている CAMAC を用いたシステムにと比べて 1000 倍以上の処理能力がでることがわかった。

また、信号入力タイミングは、数 10 nsec の精度で同時に記録しているので、ミリ秒オーダーの時分割測定が可能である。これ以外にも現在は未だ実現していないが、エネルギーも FADC (Flush ADC) と組み合わせることにより取り込むことが出来るように設計されている。

3. 10 cm 角 MSGC

我々は昨年まで 2 次元 5 cm 角 MSGC を用いて MSGC

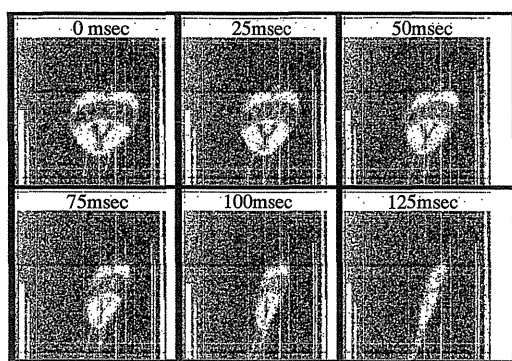


Figure 7. Snap-shots for X-ray transmission image of a moving pendant.

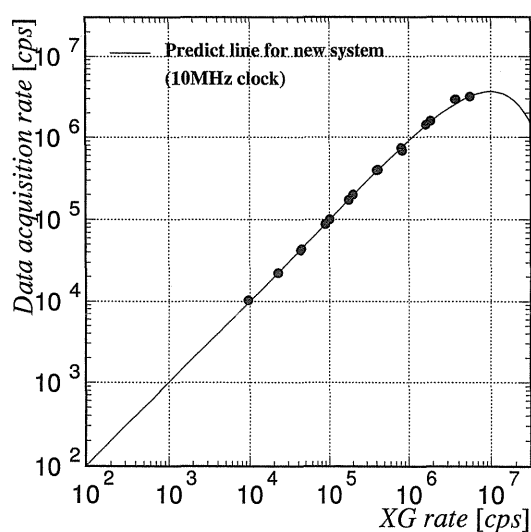


Figure 8. Result of DAQ rate.

及び回路システムの基本試験を行ない、今年度から10 cm 角 MSGC (アノード、バックストリップ各512チャンネル) を高速データ収集システムと共に立ちあげている。未だ幾つかの修正が必要ではあるが、プリアンプ等の高密度化に伴う発振等の問題もほぼクリアし X 線の 2 次元像及び、動画の撮影に成功している。ここでは、10 cm 角 MSGC と高速データ収集システムを用いた試験結果について述べる。

まず、5 cm 角 MSGC から得られた回路基板の透視 X 線画像を図 9 に示す。この基板は、直径 300 μm のスルーホールが 600 μm ピッチで空いており、基板には正方形の金メッキされた部分がある。図 9 において 300 μm 径のピンホール列や基板のパターンがはっきり見える。MSGC のイメージはデジタルであるために無限のダイナミックレンジを持っており、またその中から、プラスチックの領域か金属の領域を通過したといったわずかな密度変化も捉えることが出来ることをこの図は示している。(図 9 中央に見える正方形の構造が金メッキ部分。) また、構造上当然ではあるが像の歪みも全く無い事もこの図から

見てとれる。実際に像の歪みを測定したところ 0.5% (500 μm) 以下であった。

次に SPring-8 BL-45 に於いてコラゲーンの X 線小角散乱回折の撮影を行なった結果を図 10 (a) に示す。これを射影したヒストグラムが図 10 (b) である。この時のカメラ長は 2.2 m で入射 X 線のエネルギーは 12.4 keV である。図 10 (b) から歪みが無いため左右の対称性が良い事や、ハローなどの影響によるピークの潰れがない事が見てとれる。また、5 cm 角 MSGC による位置分解能などの詳しい性能は文献 3) にある。

しかし、10 cm 角の MSGC に於いては場所による感度の違いといった、5 cm 角では余り見られなかった問題点が出てきている。これは、10 cm 角においては放電によるストリップ破壊の確立が上がったため、増幅率が 5 cm 角の時と比べてほんの僅か低い為に生じている事かもしれないが、現在のところこの感度のむらは 8 keV の X 線に対し 5% にもなっている。この原因は現在調査中であるが、おそらく絶縁層の厚さの非一様性によるものであろうと考えている。感度の違いを無くすには検出面全体の電極幅、絶縁層厚がマイクロン以下の精度の様な MSGC を作る必要がある。現在使用中のものは最初の試作器であり、この点に留意したものの製作中である。

現在のデータ収集の方法が各チャンネルを独立にプリアンプで増幅し、その信号をディスクリミネーターでデジタル化して処理を行なっている事から、場所による多少の増幅率の違いは、各ストリップに生じる信号の大きさが閾値電圧より十分大きければ、問題にはならなくなる。現在 MSGC によるガス増幅率は 300 程度のところで動作させているが、この値は閾値電圧を越えるか越えないかのぎりぎりの値である。あと僅かでも増幅率があがれば、場所による感度の差は殆んどなくなると考えている。

この為に様な MSGC を製作する努力以外に、キャピラリープレートを中間ガス増幅器として用いる複合型 MSGC を発案し、すでにキャピラリープレートが中間ガス増幅器として動作する事を確認している。基礎特性試験は現在進行中であるが、キャピラリープレートに僅か 10 倍程度の増幅率を持たせるだけで増幅率は 3000 にも達し、感度のむらが殆んどない MSGC を作る事ができる。また、キャピラリーに増幅率を持たせる事により、MSGC のアノードとカソードの間に印加する電圧を下げられるので、現在問題になっている放電によるストリップの恒久的損傷といった問題もほぼ無くなり、実用に耐えられる MSGC が実現できると考えている。

4. MSGC による新しい画像解析

つぎに MSGC の特性を活かした画期的な X 線画像解析法の可能性について述べていきたい。MSGC で単なる連続 X 線画像を取るのではなく、高質画像や時間、エネルギー情報を活かした新しい X 線画像解析法を開発するた

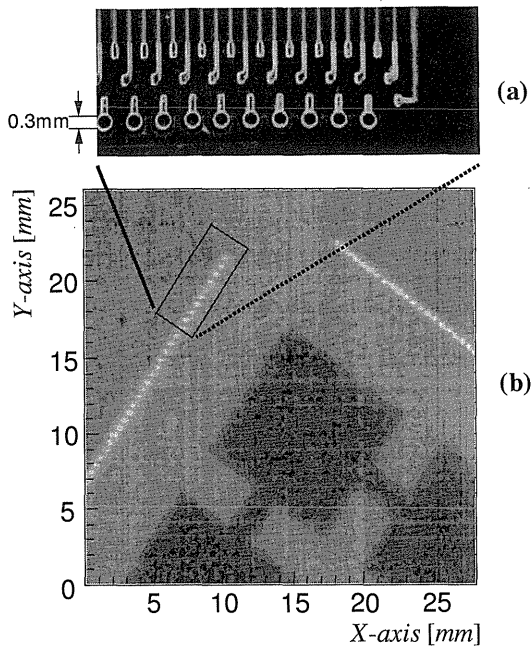


Figure 9. X-ray transmission image of a circuit board.

めの試みを X 線発生装置や放射光を用いて行なっている。特に1996年12月に KEK Photon Factory で、1997年12月には SPring-8 でそれぞれ放射光によるビームテストを行なった。

4.1 時間情報を利用した Wissenberg 法

2次元の X 線検出器を用いて、3次元的な構造を持つ結晶の構造を調べる場合、何らかの方法で3つ目の軸を加えなければならない。単色 X 線を用いる場合は試料となる結晶を回転させ、回転角毎の回折写真を撮影する。この方法として従来は、制限された回転角以内に結晶を振動させて写真をとる振動法や、回転に合わせて検出面をずらせていく Wissenberg カメラが使われて来た。しかし MSGC は高時間分解能を持つために検出器を固定させた状態で、結晶を一定角速度で回転させると、各々の回折光の入射位置、及びその回折光が現れるタイミングから結晶の回転角の関係を知ることができる。このことから MSGC の高い位置分解能を利用して得られる2次元像に、さらに時間軸 (= 位相角) を加えて3次元的な回折斑点を容易に得ることができる。

図11はある結晶の MSGC による3次元回折像 (X, Y 軸および時間軸) である。3次元空間上に回折斑点が特定の時間毎に現れているのがはっきりとわかる。

位置と結晶の回転角が得られれば、これだけで結晶面の特定が可能となる。従来のワイゼンベルグ法では結晶面の指数づけをするのに“結晶の軸だし”、“正確なフィルムと結晶の同期”が必要であったが、MSGC ではいずれの作業も必要ではなく、また1枚の像をとるための手間も極めて小さい。さらに、得られたデータを3次元的に処理

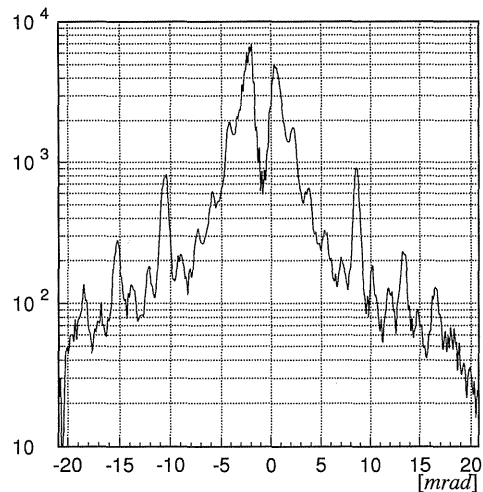
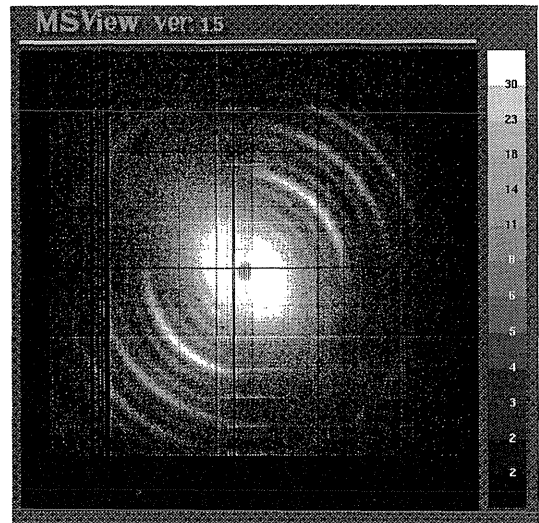


Figure 10. Small-angle diffraction pattern of collagen irradiated by 12.4 keV X-ray.

することで、通常の2次元イメージを処理するのに比べ、ノイズと信号の分離が非常に容易になる。画像の中でノイズと斑点の分離をするのは、それぞれの濃度差を利用するだけであるが、さらに回転角の情報を用いることでバックグラウンドを大幅に改善できる。X 線回折像は X 線ビームとある角度条件 (約2度幅) を満たした時のみ発生する。つまり位相角の情報があれば、位相に関係のないノイズを約200分の1に減少することが簡単に出来てしまう。図12 a 及び12c はこの方法を用いてノイズをカットした後とカットする前を表したものである。底面の軸は X を表しており、高さの軸はイベント数を表している。図12b は図12 a の一つの小さな回折ピークの位相軸方向の分布である。この図を利用することによりノイズを大幅にカットできるのがよくわかる。このように、MSGC による新種の結晶解析法は、得られる情報量、精度に関して画期的な成果をもたらすと考えられる。

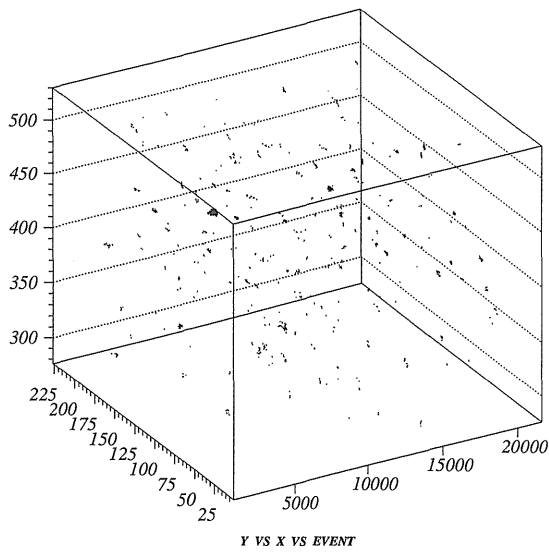


Figure 11. Three dimensional diffraction pattern.

4.2 Laue 法およびその他のアイディア

MSGCでは、X線のエネルギーも精度は10~20%と荒いが測定可能であるため、白色X線を用いてラウエ写真を撮る場合、各斑点を構成するX線の波長を知ることができる。従来のラウエ写真は、結晶の逆格子空間上の反射球上への射影をとっており、ラウエ条件を満たす斑点がどの波長のものであるかという情報を得ることはできなかったため、既知の情報を用いて各点の指数を類推していく手法をとっていた。これに対し、MSGCを用いると、逆格子空間そのものを直接観測できることになり、未知試料の結晶構造の解明が非常に簡単になる。こちらは試料を固定したままリアルタイムの像が撮影できるという点で、時間とともに変動する試料の逆格子像を直接捉え、物質の変化の過程を追っていくことも可能となる。

4.3 蛙の骨格筋の小角散乱回折画像

蛙の骨格筋の小角散乱は時分割解析の良い例として挙げられる。SPring-8において10 cm角MSGCを用いて撮影した蛙の骨格筋の小角散乱像が図13である。今回の測定は単に静止面の撮影を行う事しか出来なかったが、この試料は電気信号により、格子間隔が変化し散乱光の発生位置が変化する事が知られている。先にも述べたように、MSGCと我々が開発したデータ収集システムをもちいれば、この試料に与えられた電気信号からの入射X線の時間の遅れを全X線に対し記録する事が可能である。よって生物試料の外部刺激による変化の時定数を求める事がMSGCを用いる事により可能となるであろう。

4.4 単結晶の光励起の時分割測定

最後に実際に行なった時分割測定として、単結晶の光励起の時分割測定について述べる。単結晶の光励起反応と

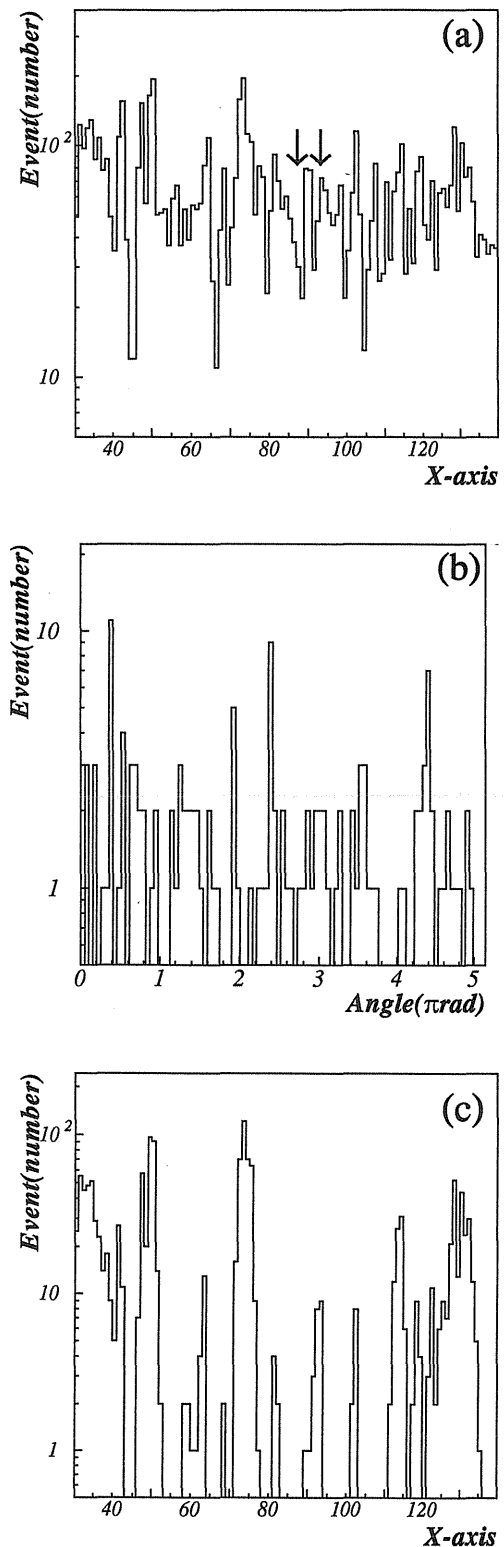


Figure 12. (a): before noise reduction (b): Event distribution as a function of rotation angle (c): after noise reduction.

は、光の吸収により励起され、結晶の格子定数が変化する反応で、その存在が報告されてはいたが、その時定数についての測定はなされた事がなかった。今回我々は、MSGCと新型データ収集システムを用いてこの時分割測

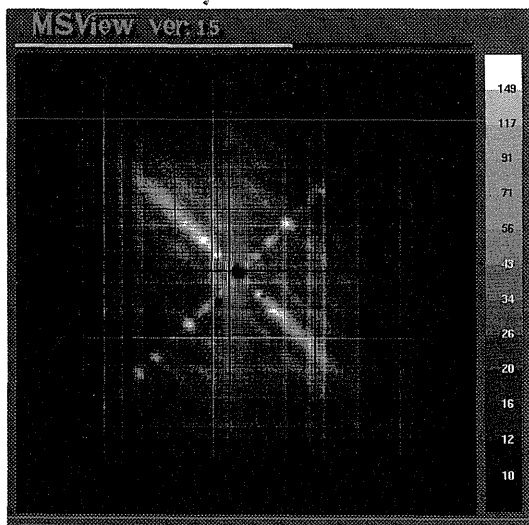


Figure 13. Small angle diffraction pattern of frog skeletal muscle irradiated by 12.4 keV X-ray.

定に成功した。用いた結晶は $[\text{BU}_4\text{N}]_4[\text{Pt}_2(\text{P}_2\text{O}_5\text{H}_2)_4]$ という白金化合物で、光励起によるピークの変化は僅か 0.03 度である。 $2\theta=34.7^\circ$ のスポットに注目した、散乱角の変化を示したのが図14である。この測定においては、通常の X 線発生装置を用いている事もあり、一回の測定では十分な統計量のデータを得る事は不可能である。しかし現在のシステムは X 線一発一発の時間情報を記録しているので、光の照射したタイミングをシステムに取り込み、一定間隔で光のオンオフを繰り返したデータを何周期にも渡り測定することで、全データを 1 周期に畳み込む事が可能である。この方法により十分な量のデータを得る事が可能となる。今回の測定においても、100秒おきにシャッターを開閉をする測定を繰り返し行ない、データを 1 周期に畳みこんでいる。図15は熱による散乱角の変化を示した図で、温度上昇とともに、散乱角が増加している事がわかる。この光励起の実験においては、光による効果と熱による効果の分離をする事が非常に困難であるが、欠かせない要素である。しかし MSGC を用いて測定した図14 (a) 及び、光照射直後を拡大した図14 (b) の結果をみると、光によって約 2 秒の時定数で、散乱角が減少し、その後、熱により約 50 秒の時定数で散乱角が増加している事がわかる。このように、MSGC 高速性を生かす事により、通常は分離が困難な 2 つの減少も、はっきりと区別することができる。

このように、周期的な反応や変化を起こすことが出来る実験に対しては、MSGC は X 線すべての入射時間を同期クロックの精度、つまり数十 ns の精度で記録しているので、1 周期に畳み込むことで、数十 ns 間隔の連続した画像の変化を追うことが可能になる。この事により、蛋白質や生体反応などを直接捉えることが出来るかも知れない。また異なったエネルギー領域の動画像を一度に取り、オン

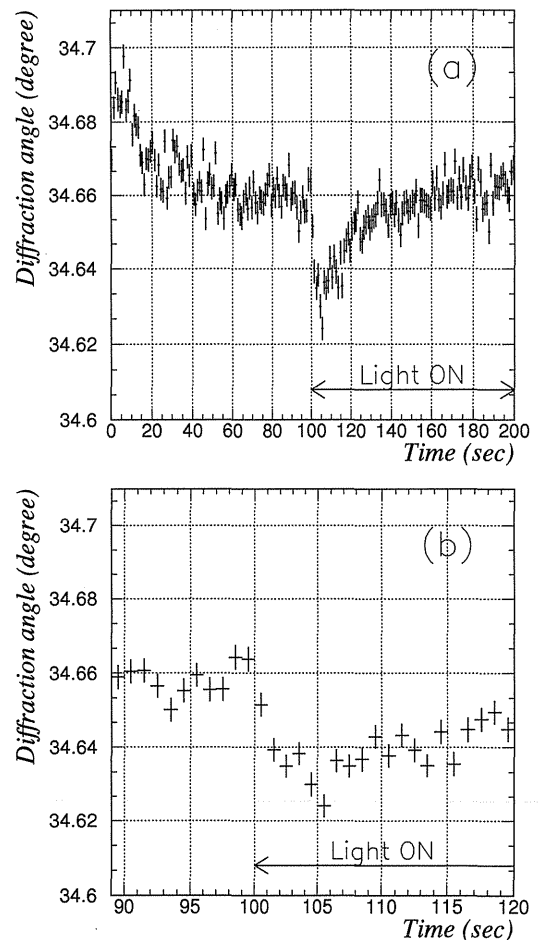


Figure 14. Movement of the diffraction peak in the photo excitation.

ラインで幾つかのエネルギーの X 線像を同時に取ることも簡単に出来、医学的な応用も可能かも知れない。このように非常に広い分野で X 線解析の質的变化をもたらすことを期待している。

5. 実用に向けて

MSGC は上記のような魅力的な検出器ではあるが、しかし世界の放射光施設ではまだ MSGC の利用を本格的に研究している所がほとんどないのも事実である。ガス増幅を物質の境界面である表面で安定に起こすのは難しく、また MSGC は狭い範囲に高電圧をかけるので放電による電極の破壊などの問題がある。これは材料の物性的な特性ばかりでなく、電極の加工精度、サブストレートの平面度など、IC の製作技術によるところが大きい。我々は、東芝の優れた色々な IC 加工技術を応用し、10 cm 角という実用的な面積の MSGC の製作が可能になった。実用化の最も障害と思われる電極破壊の問題を克服するために現在、構造上の改良、電極の材質などの研究や工作精度の向上を急いでいる。また最近動作確認に成功したキャピラリーを中間増幅器として用いるハイブリッド型 MSGC を完成出

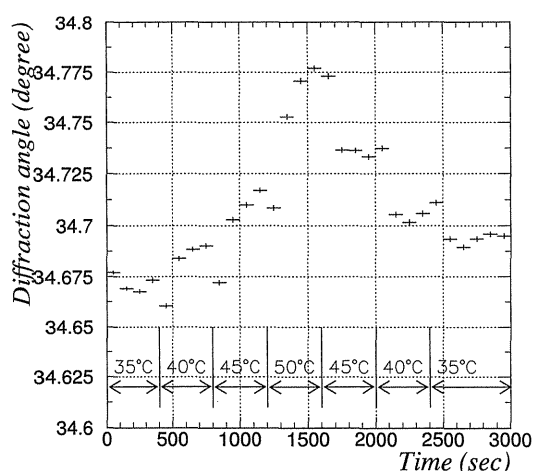


Figure 15. Movement of the diffraction peak in the temperature variation.

来れば、この問題もほぼ克服できると考えている。

近い将来、MSGCが今の液晶テレビぐらいのX線画像装置になり、広く使用されることを夢見ながら開発を続け

ている。

最後にこのMSGC開発を支援していただいている理研・生物物理グループ、高輝度センター検出器グループに深く感謝します。またこの開発は科学振興事業団(CREST, JST)の戦略的基礎研究推進事業の研究領域「極微細領域の現象」の「X線解析による分子の励起構造の解明」(研究代表者 東工大 大橋教授)の支援を得、行なわれています。特に実際の結晶解析を指導していただいた東工大、大橋研の方々に感謝します。さらに実験施設を使用させていただいたKEK放射光施設、SPring-8に深く感謝致します。また開発の技術的援助および実際に製作していただいた東芝・基板技術部、原子力計装システム部に感謝します。

引用文献

- 1) A. Oed: Nucl. Instr. and Meth. **A263**, 351 (1988).
- 2) T. Nagae et al.: Nucl. Instr. and Meth. **A323**, 236 (1992).
- 3) T. Tanimori et al.: Nucl. Instr. and Meth. **A381**, 280 (1996), 及びこれらの論文中的引用文献.
- 4) F. Sauli: Proc. Int. Workshop on Micro-Strip Gas Chambers, Legnaro, Italy (1994).

きいword

マイクロストリップガス検出器 (MSGC)

1998年フランスのOed等によって提案された、ガス増幅を利用した放射線検出器。従来の多線式比例計数管(MWPC)は、静電反発力の為ストリップ間隔を1mm程度までしか狭められなかったが、MSGCはワイヤーの代わりにリソグラフィ技術を用いて絶縁体の基板上にマイクロオーダーのストリップを形成する事により、数100 μm の電極間隔を実現させている。これにより、位置分解能の向上はもとより、大強度ビーム下での安定動作、信号の立ち上がり時間の高速化が可能となる。

X線画像装置

近年さまざまなX線画像装置の開発が行なわれており、代表的なX線画像装置としては、Imaging Plate, X線ビデオ, Image Intensifier, Fiber CCD, MWPC等があげられる。