



## 放射線医療・被曝そして宇宙ガンマ線観測にも有効な ダイヤモンド・コンプトン・リコイルテレスコープ(DCRT)の開発

柏木 利介\* 日比野 欣也\*\* 奥野 祥二\* 内堀 幸夫\*\*\* 北村 尚\*\*\*  
高島 健\*\*\*\* 矢島 佳央理\*\*\*\*\* 横田 護\*\*\*\*\*

### Development of Diamond Compton Recoil Telescope

Toshisuke KASHIWAGI\* Kinya HIBINO\*\* Shoji OKUNO\* Yukio UCHIHORI\*\*\*  
Hisashi KITAMURA\*\*\* Takeshi TAKASHIMA\*\*\*\* Kaori YAJIMA\*\*\*\*\*  
Mamoru YOKOTA\*\*\*\*\*

#### 1. はじめに

ダイヤモンドは宝石としての価値が高いだけでなく、近年は半導体としての価値が注目されている。ただし、n型半導体ができていないことと共に、良好な大面積な素材が得られていない問題がある。最近、CVD法によって直径4inch程度の大面積の物ができているが、単結晶素材は得られておらず、電子デバイスの製作の実用化の見通しは立っていない現状である。しかし、これらの問題点が解決されれば、ダイヤモンド半導体産業設立というブレイクスルーを迎える可能性はあると思われる。最近はやりのカーボン・ナノ・テクノロジーもダイヤモンドから、ナノ・チューブやフラーレンを考えて

いくべきであり、その基礎としてのダイヤモンドの性能を明らかにして行くことは重要な観点であろう。

本研究では、単結晶であり、ダイヤモンドの本質的な性能を表していると思われる超高压合成法によって製作されたIIaダイヤモンドを用いて放射線センサを製作し、その動作を確かめ、ダイヤモンド・コンプトン・リコイル・テレスコープ(DCRT)の開発を行っていくものである。これは、DCRT開発と共に、将来のダイヤモンド産業にむけて、諸問題が解決されたときのために、今からダイヤモンド本来の性能を実証しておくべきである、という観点も持っている。

ところで、ダイヤモンドの本質的な性能を確かめるためには、我々は放射線を使用することが、最も良い方法の一つであると考えている。つまり、ダイヤモンドが半導体デバイスとして有効であるということを立証するためには、ダイヤモンド内部で、電子、正孔というキャリアがどの程度良好に動くことができるかを測定することが重要である。例えば、数MeVのエネルギーを持った $\alpha$ 線をダイヤモンドに入射することで発生するキャリアは数1000個程度であり、その電荷収集が良好に行われるということは他の電子デバイスよりも高度な要求がある。つまり、放射線入射によって発生したキャリアを精度良く検出することができれば、他のダイヤモンドデバイスは当然良好に働くと思われる。放射線入射という様な高度な計測を目指すことは、単にDCRT開発に役立つだけでなく、同時に様々なダイヤモンド電子デバイス開

-----  
\*助教 情報システム創成学科

Assistant Professor, Dept. of Information Systems  
Creation

\*\*准教授 物理教室

Associate Professor, Institute of Physics

\*\*\*放射線医学総合研究所

National Institute of Radiological Sciences

\*\*\*\*宇宙航空開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

\*\*\*\*\*東邦大学

Department of Physics, Toho Univ.

\*\*\*\*\*神奈川県立向の岡工業高校

Mukainooka Technical High School

発にも貢献し、またダイヤモンド半導体産業設立への是非を確かめている実験でもありと考えている。

## 2. DCRTの開発

ダイヤモンドは原子番号が低い(Z=6)、光電効果を起こしにくく、約10keVのエネルギーを超えたX線・ガンマ線に対して、ほとんどがコンプトン散乱を引き起こす素材である。DCRTはそのコンプトン散乱の飛跡を計測することによって、入射してきたX線・ガンマ線の入射方向やエネルギーを測定する装置である。

現在、医療現場ではレントゲン撮影やCTスキャン装置において人体に対してX線が多用されている。また、これらの測定では多量の放射線量を照射しなければ鮮明な画像を得ることはできない。なぜなら、現存する装置では、一個のX線に対して写真乾板などを反応させるのではなく、多量のX線を入射させないと映像を見ることができないのである。簡単には、約10年間、X線医療検査を受け続けた人は1/1000程度の確率で、放射線被曝から、ガンが誘発すると言われている。

これに対してDCRTでは、人体を透過し、装置に入射してきた一個のX線の飛来方向やエネルギーを測定することができるため、放射線による検査の際に被曝する線量を軽減することができる。もし、このDCRTが実現化すれば、患者に対して現在よりも約1/100程度の被曝線量に抑えることができると考えている。また従来の装置を用いた物より、より鮮明な画像が得られると考えている。

また、このDCRTは医療関係だけでなく、宇宙に於けるX線・ガンマ線観測に関しても、今までの装置では考えられなかったような飛来方向決定精度とエネルギー決定精度を持った観測を行うことができると考えている。

10keV~10MeVのエネルギー範囲の詳細な宇宙ガンマ線観測は他のエネルギー範囲と共に重要であるが、あまり行われていない。このエネルギー範囲の宇宙ガンマ線観測は1991年打ち上げられたCOMPTEL衛星によって行われ、750keV~30MeVのエネルギー範囲の観測が行われた。その後、2002年にINTEGRAL衛星が打ち上げられ、20keV~10MeVのエネルギー範囲のガンマ線観測が行われた。このINTEGRAL衛星に搭載された検出器はCOMPTEL衛星に搭載された物に対して優れた物であったが、エネルギーが低い宇宙X線観測で行われている様な高い精度の観測が行われて来なかったのが現状である。そのために、次の世代ではさらに精度の高い検出器が必要でありDCRTが最適であると考えて

いる。

以上の様な観点で、本研究ではこのDCRTという装置の基礎研究を行っているのである。そして、このDCRTが普及されると、全世界でレントゲン検査やCTスキャン装置に組み込まれていくことになるだろう。また、宇宙X線・ガンマ線の観測装置としても、独壇場の計測機器になると考えている。

## 3. ダイヤモンド・センサの性質と応用

ダイヤモンド・センサは個体センサとして代表的なシリコン・センサに比べて、遜色の無い性能を有する可能性があることが昔から示唆されていた。1960年代、主に旧ソ連のグループによって、天然ダイヤモンドによる放射線センサ開発が行われていたが、良好な素材の入手が困難であったため研究開発は進まなかった。近年、人工ダイヤモンドの研究開発が急速に発達し、良好な素材が得られる様になったことで、我々はこのダイヤモンド・センサの開発を再開している。

このダイヤモンド素材を用いたセンサには以下の様なシリコン・センサには考えられない特徴を備えている。

### (1)エネルギー・バンド・ギャップが広い

シリコンでは1.12eVのエネルギー・バンド・ギャップを持つことに対して、ダイヤモンドでは5.5eVの広い値を持っている。これは、冷却を必要としなくても高エネルギー分解能(エネルギー決定精度)を持つセンサができることを意味している。センサのエネルギー分解能はキャリアの発生の揺らぎで決まることになるが、エネルギー・バンド・ギャップが広いことはその揺らぎをおさえることになる。またシリコンで作られた電子デバイスはエネルギー・バンド・ギャップが狭いために、高温環境下で動作できないが、ダイヤモンドの場合は高温環境に強く、実際に300℃の環境でα線を検出した例もある。また高温に強いことは、センサばかりでなく、他の電子デバイス、特に高温下で働くトランジスタなどへの応用が検討されている。

エネルギー・バンド・ギャップが5.5eVと広いことはもう一つの利点がある。それは光センサへの応用である。半導体光センサが測定できる長波長限界はエネルギー・バンド・ギャップで決まる。シリコンの場合は1100nmであるが、ダイヤモンドは230nmが長波長限界になる。人間の目に感じる可視光は500nmあたりであるから、ダイヤモンドは可視光に感じない光センサができることを意味している。これは宇宙を考えると、太陽からの可

視光に感じない、紫外光だけに感じるセンサを作ることができたり、このセンサを用いた紫外線天文学などという分野が開けてくる可能性も持っている。また、日常の生活に於いても、紫外光にしか感じないセンサがあれば、可視光、赤外光と区別した計測ができる様になり、セキュリティ関係の特別な応用が考えられるかもしれないであろう。

## (2) キャリアのスピードが速い

シリコンに比較して、ダイヤモンドは数倍、キャリア(電子・正孔)のスピードが速い。これは高速のセンサを作ることができることを意味している。またトランジスタなどをもし製作できるとしたら、同様に数倍速く動作する電子デバイスを製作できることになる。

## (3) 漏れ電流が小さい

センサを形成する場合、シリコンの場合は nA 程度の漏れ電流になってしまうが、ダイヤモンドの場合は pA という 3 桁低い値である。これは電流雑音ノイズが下がることを意味しており、高エネルギー分解能センサになりうることを意味している。

## (4) 誘電率が低い

シリコンに比べ、ダイヤモンドの誘電率は半分程度である。これはセンサの静電容量を小さくすることができることを意味しており、静電容量ノイズを抑えることができる。この観点でも高エネルギー分解能のセンサができるということである。

## (5) 放射線損傷に強い

ダイヤモンドはシリコンに比べてバインディング・エネルギーが大きいため、放射線損傷に強いと言われているが、正確な計測はまだ行われていない。もし、そうであれば、特に放射線環境に厳しい、素粒子実験、原子核実験、原子炉周辺での使用に適していると言えるだろう。

## (6) 原子番号が小さく 6 である。

シリコンの原子番号は 14 であり、ダイヤモンドの原子番号は 6 である。前述した様に原子番号が低い素材は光電効果を起こしにくく、低いエネルギーから X 線・ガンマ線に対してコンプトン散乱を引き起こす。そしてコンプトン散乱の飛跡を計測することによって、入射してきた X 線・ガンマ線の入射方向やエネルギーを測定するといった DCRT という装置を我々は提案し、開発しているのである。

また、原子番号が低く光電効果を起こしにくいことは、素粒子実験の際には有利になる。これは 10~100keV 程度のガンマ線バックグラウンドの無い、粒子線センサが可能であるということも意味しているのである。

さらに、原子番号が人間の等価原子番号の 7.4 に近いということも利点がある。つまり人体等価検出器としての応用が考えられる。

現在、混合放射線場における人体に対する放射線被曝線量とその影響を正確に計測する測定器が無いことはあまり知られていない。

特に宇宙から降り注ぐ放射線に対する人体への被曝は問題である。1 万 m の高度にある飛行機内での被曝、さらに上空の 400km 程度にあるスペースシャトルやスペース・ステーションでの被曝、などを測定することは難しい。それらの位置での飛行体に降り注ぐ宇宙からの放射線の程度は解っている。しかし、それらが総合的に人体に対してどの様な影響をもたらしているのかは正確には解っていない、ということである。その原因は明らかであり、一言で放射線と言っても様々ものがあることに起因している。X 線、ガンマ線などの電磁波、中性子線、陽子線、アルファ線、重粒子線、等である。これらの放射線は人体に対して様々な反応を起こし、エネルギーを付与することになる。また、放射線の種類だけでなく、例えば X 線、ガンマ線に関してはエネルギーが低ければ原子番号の 5 乗に比例し、エネルギーが高くなれば原子番号に比例したエネルギー付与を人体に与えることになる。つまり混合放射線場における人体に対する放射線被曝が複雑な問題になるのは、放射線には、様々な種類があることと共に、その入射エネルギーによって被曝効果が異なる点にある。

ここで考えられることが一つある。様々な種類、そしてエネルギーを持った放射線のエネルギー付与は放射線を照射される物質の原子番号によって決まる、ということである。つまりこれは人体と同じ原子番号を持ったセンサがあれば、上記のような多種の放射線が存在する混合場において人体に対する被曝効果を本質的に、かつリアルタイムで計測できることになる。そして、ダイヤモンドを素材にしたセンサができれば、この様な計測が可能になる。なぜならダイヤモンドの原子番号は 6 であり、人体の等価原子番号の 7.4 とほとんど同じ値を持った素材だからである。

## (7) ダイヤモンドは(n, α)反応を起こす。

現在、D-T 核融合炉においてプラズマイオン温度測定を行うためにダイヤモンド・センサの使用が検討されて

いる。これは発生する 14MeV の中性子がダイヤモンド内部で  $C-12(n, \alpha)Be-9$  の反応を起こし、反応によって生じたアルファ線を計測するものである。現在、特にロシアを中心とする他のグループがこの反応を確認しているが、彼らが使用しているダイヤモンド・センサがあまり良好とは思われないため、良い結果が出されていない。我々も、今後この為の検出器開発にも関わり、核融合炉建設の発展に寄与していきたいと考えている。

#### 4. 人工ダイヤモンド・センサの製作

人工ダイヤモンドは様々な種類があり、我々はそれらの素材に対してセンサとなりうるかどうかのテストを行った。今までにテストした素材は、超高压合成法によって製作された I b 型(窒素不純物が入っておりイエローダイヤとも呼ばれている)、II a 型(高純度ダイヤ)、II b 型(ボロン不純物が入っておりブルーダイヤとも呼ばれる)、CVD 法によるダイヤモンド、である。

これらの素材をテストした結果、センサとして使用できる物は II a 型の物だけであった。I b 型は窒素が含まれているが、この不純物レベルはダイヤモンドのエネルギー・バンド・ギャップ(5.5eV)の伝導帯の 1.7eV 下に位置していることで、放射線によって発生したキャリア(電子・正孔)がトラップされ、信号として取り出せないと考えられる。II b 型はボロンが多く不純物として含まれている。ダイヤモンドにとって、ボロンをドーピングしてやることによって p 型の半導体ができるが、その濃度は数 10ppm 以上と多すぎ、センサに電極を着け、放射線に有効な空乏層を作りだそうとしても、空乏層の厚さが広がらず、センサには成り得なかった。CVD 法によるダイヤモンドは単結晶になっておらず、発生したキャリアに対して様々なトラッピング・センターが存在することが原因で、センサとしては使用できなかった。現在、CVD 法によるダイヤモンドは直径 4inch  $\phi$  程度の物が得られていることから、この製法によって、もし単結晶素材が作られる様になれば、現在の超高压合成法にとって替わるダイヤモンド製造法になり、また、大きなセンサを製作することができる様になると期待している。

さて、センサとして使用できる物は II a 型の物だけであったが、この素材は高純度ではあるが、少量のボロンが含まれていることが解っている。現在、その濃度を正確に測定する方法が無く、0.1ppm 以下であるということだけが解っている。ボロンが含まれているということは、高純度ダイヤモンドと呼ばれているが、高比抵抗の p 型素材であると考えらるべきであろう。

現在、センサ製作に使用しているダイヤモンド素材は 3×3mm から 10×10mm の面積を持ち、厚さは 100~300  $\mu$ mt 程度である。また厚さの精度は 0.5%以内である。この素材をまず、酸や有機溶剤で洗浄した後、片面に DLC(Diamond Like Carbon)を着け、800°C程度の高温で数時間の水素終端処理を行っている。その後、さらに洗浄を行い、ガラスエポキシの樹脂に糊で接着し、DLC を着けた面からは金を、反対側の面からはアルミニウムを抵抗加熱方式の真空蒸着装置によって着けている。

先程、述べたようにダイヤモンドは p 型になっており、アルミニウム面とショットキーバリアーを形成する。放射線に有感な空乏層はこのアルミニウムを着けた直下から電圧を印加するにしたがって逆の面に広がっていくことになる。

ここで問題になる事は DLC を着けた面である。ダイヤモンドの様にエネルギー・バンド・ギャップが広い半導体は、ほとんどの金属とショットキー特性を持ってしまいが、我々が行っている様に金属を蒸着する前に DLC を着けておくことでオーミック電極を形成することができるのである。実際に構成したダイヤモンド・センサの断面図を図 1 に示す。

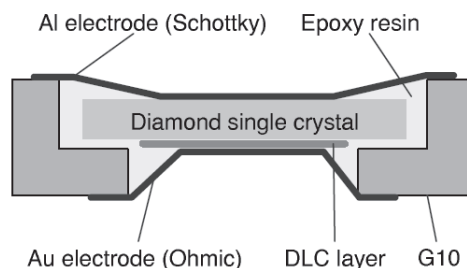


図 1. ダイヤモンド・センサの側面断面図

#### 5. ダイヤモンド・センサによる計測結果

我々は II a ダイヤモンドを用いて製作されたダイヤモンド・センサに対して様々な放射線源や重粒子を照射するテストを行った。以下にその結果を示す。

##### (1) アルファ線による測定

Am-241 からの  $\alpha$  線を照射した場合のエネルギー分解能を図 2 に示す。この図で解る様に、5.486MeV, 5.433MeV, 5.389MeV の  $\alpha$  線の分布が良好に検出されていることが解る。また、エネルギー分解能も 15.4keV(FWHM)の値が得られている。シリコン・セン



サでの値は 10keV(FWHM)であるから(1)、この結果はダイヤモンド・センサがシリコン・センサに匹敵した値を持っていることを意味している(2,3)。

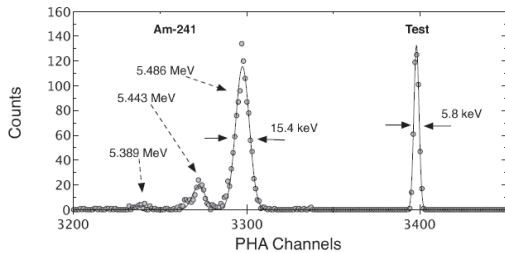


図 2. ダイヤモンド・センサに Am-241 からの  $\alpha$ 線を入射させた場合のエネルギー・スペクトル

### (2) 重粒子線による測定

アルファ線による測定は、アルファ線のダイヤモンド内部での飛程が $\sim 20\mu\text{m}$ 程度しかないことから、ダイヤモンド・センサの表面付近のキャリア(電子・正孔)の収集ができていないかどうかを示しているにすぎない。

そこで我々のグループでは、放射線医学総合研究所の HIMAC 重粒子加速器を用いてダイヤモンド・センサを突き抜けていく様な高いエネルギーを持った重粒子を用いて、ダイヤモンド内部で発生したキャリアが確実に収集されるかどうかのテストを行った。

実験では、加速された Fe 粒子ビームをアクリルとアルミを用いて破砕核にしたうえで、同時にエネルギーを変化させた場合に検出された  $dE \times rE$  スキャッタープロットを図 3 に示す。この結果はダイヤモンド・センサを  $dE$  とし、その背後に 7.7mm の厚肉の Si(Li) 検出器を置き、これを  $rE$  とした結果である。図から明らかに解る様にダイヤモンドでエネルギーをある程度付与し、 $rE$  である Si(Li) 検出器で Fe 粒子が止まったことを示す良好なラインを見ることができた。ダイヤモンド・センサを用いてこのような元素弁別を Fe という高 LET 重粒子に対して得られたデータは過去には無く、世界で初めての結果だろう。

また、この実験において、我々が製作しているダイヤモンド・センサは、内部で発生したキャリアも良好に収集されていることを意味していると言えるだろう。

### (3) X線・ガンマ線による測定

ダイヤモンド・センサを Cd-109 からの X 線に照射した場合の結果を図 4 に示す。22.1keV の X 線のエネルギー入射に対して、8.0keV(FWHM)のエネルギー分解能が得られている、またガウス分布を示しておらず、低エネ

ルギーに尾を持つエネルギー分布になっている。

通常、シリコン・センサで計測した場合はさらにエネルギー分解能が良く、きちんとしたガウス分布が得られることで、ダイヤモンド・センサで得られた値はシリコン・センサに比べて良い値とは思われないと考えられがちだろう。しかしそうではなく、このダイヤモンド・センサで計測されたエネルギー分布の結果は光電効果とコンプトン効果の両方が影響を与えた結果である。シリコン・センサでは原子番号が大きい(Z=14)、光電効果が支配的になり、ピークを形成するのであるが、ダイヤモンド・センサは原子番号が 6 と低いことで、低エネルギーまでコンプトン効果が現れることになり、このようなスペクトルが得られているのである。またこのコンプトン効果を利用できるという良好な結果を示しているのである。

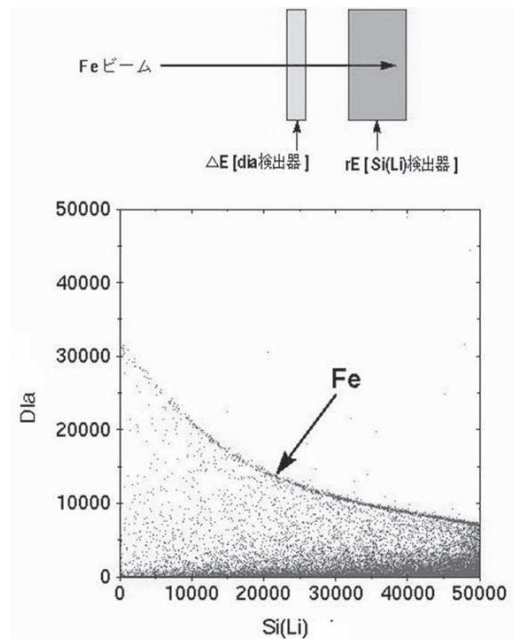


図 3. Fe 重粒子の入射エネルギーを変化させ、ダイヤモンド・センサに入射させた場合のスキャッタープロット。(dE(ダイヤモンド・センサ)  $\times$  rE(Si(Li) 検出器))

また、図 5 に Am-241 からの 60keV のガンマ線を照射した場合のスペクトルを示す。60keV のピークは得られていないが、これは当然の結果であって、数 10keV 程度のガンマ線入射では、ダイヤモンド・センサはコンプトン効果が支配的になるためピークが得られず、ノイズレベルに近いところにスペクトルを持つようになる。また、

この結果はシミュレーションと一致した予想どおりの結果となっている。

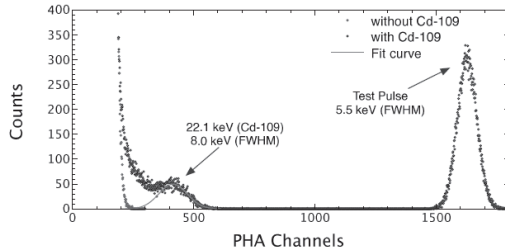


図 4. Cd-109 からの X 線をダイヤモンド・センサに照射した場合のエネルギースペクトル

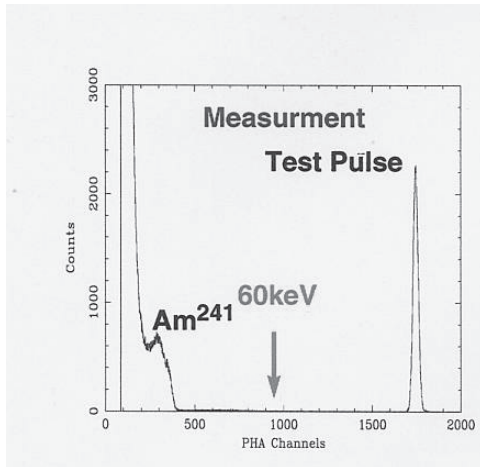


図 5. Am-241 からのガンマ線をダイヤモンド・センサに照射した場合のエネルギースペクトル

## 6. DCRT のシミュレーション

ダイヤモンドをコンプトン・リコイル・テレスコープの素材として用いる最大の利点は、ダイヤモンド素材の原子番号( $Z=6$ )が小さいことにある。このため、特に低エネルギーでは光電効果ではなくコンプトン効果の影響を多く受ける。そのため、このタイプのテレスコープとしてはシリコン( $Z=14$ )や、カドミウムテルル( $\text{CdTe}$ :  $Z=50$ )などを素材とするセンサと比べてコンプトン効果を起こしやすく有利である。

図 6 にダイヤモンド、シリコン、 $\text{CdTe}$  に対して、エネルギーが異なった入射ガンマ線に対する各効果のシミュレーションを表す。図中では、各センサに対する光電効果(Photo-Electic)、コンプトン効果(Compton)、電子

陽電子対生成(Pair Creation)が発生する確率を表している。図で明らかなように、他のセンサに比べて、ダイヤモンド・センサのコンプトン効果領域が、約  $10\text{keV} \sim 10\text{MeV}$  と広いことが解るだろう。

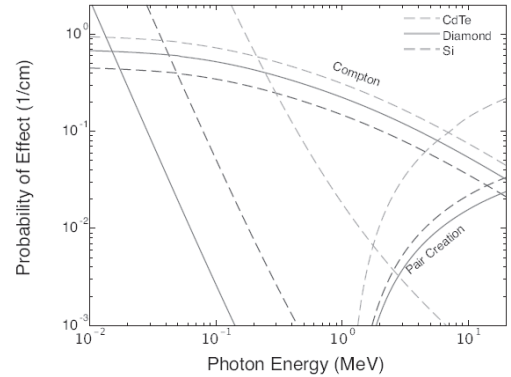


図 6. ダイヤモンド、シリコン、 $\text{CdTe}$  に入射したガンマ線の各相互作用の確率

例えば、ダイヤモンド・センサを数枚重ね、X 線、ガンマ線を入射させると、コンプトン散乱を続けていくことになり、最終的にエネルギーが低くなった時点で全エネルギーが吸収されることになる。この性質を利用してやると、X 線、ガンマ線の入射方向と共に、全エネルギーを決定することができるのである。現在のシミュレーションでは一つの  $500\text{keV}$  のエネルギーを持ったガンマ線に対して、 $0.5$  度程度の角度分解能(入射角度の決定精度)が得られている。

ところで、飛来方向の入射方向を決定するには、数層に重ねられた各々のダイヤモンド・センサの、どの位置でコンプトン効果が生じ、リコイルした電子の飛跡を明らかにすることが重要である。また、DCRT の検出効率はその程度であるのかを明らかにすることが必要である。

このため、ストリップタイプのダイヤモンド位置センサを数層置き、その背後に原子番号が大きく、光電吸収を起こしやすく、エネルギーを測定することに適している  $\text{CdTe}$  センサを置いた DCRT の構造でシミュレーションを試みた。また、シミュレーションでは、モンテカルロ・シミュレーション EPICS code を用いた(4)。

ここで DCRT は、 $4\text{cm} \times 4\text{cm} \times 0.5\text{mm}$  からなるダイヤモンド位置センサを 20 層積み上げ、その下に  $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 4\text{cm}$  の  $\text{CdTe}$  センサを置いた構造とした。この様子を図 7 に示す。また、この図の中では  $500\text{keV}$  のガンマ線が、ある層のダイヤモンド・センサでコンプトン散乱し、リコイル電子を散乱させている一つの例を示し

ている。この様な DCRT を想定して、1回のコンプトン散乱を引き起こした場合だけでなく、多重コンプトン散乱を引き起こした場合の飛来方向の検出効率のシミュレーションを行った。この結果を図8に示す。

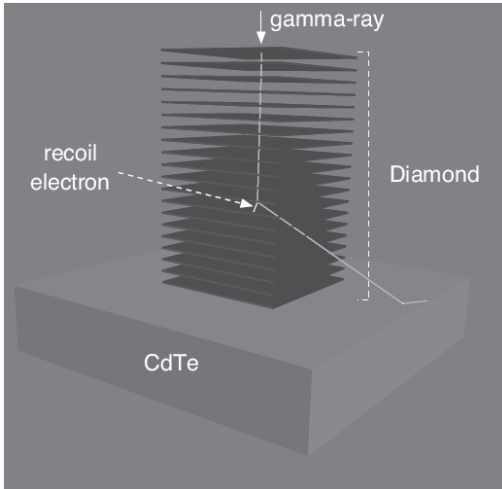


図7. 今回、シミュレーションを行ったDCRTの構造。あるダイヤモンド・センサで500keVの入射ガンマ線がコンプトン散乱している例を示している。

この図の中で○は入射ガンマ線がコンプトン散乱してCdTe 検出器内で止まり、入射方向と共にエネルギーが決定できたイベントを表し、●は多重コンプトン散乱してDCRTの外に出てしまったイベントを示している。これはガンマ線がダイヤモンド・センサに衝突する際、まっすぐに進む場合だけでなく、跳ね返ってしまったり、横に散乱される確率を持っていることによる。また、エネルギーが高くなるとCdTe 検出器をも突き抜けていくイベントも生じてくることになる。また、エネルギーが高くなるにつれて20層のダイヤモンド・センサでは足りず、検出効率は下がっていく傾向にある。

今回の条件でシミュレーションした結果、20keVでは24%、200keVでは13%の検出効率が得られた。この結果はDCRTが約10keV以上のガンマ線に対して有効な検出装置であることを示している。しかし、検出効率はあまり高くない。これはダイヤモンド・センサの下だけにCdTeが置いてある構造になっているからではないかと考えている。検出効率を増加させるためには、ダイヤモンド・センサの側面もCdTeで取り囲むような構造が良いのではないかと思います、現在検討を行っている。

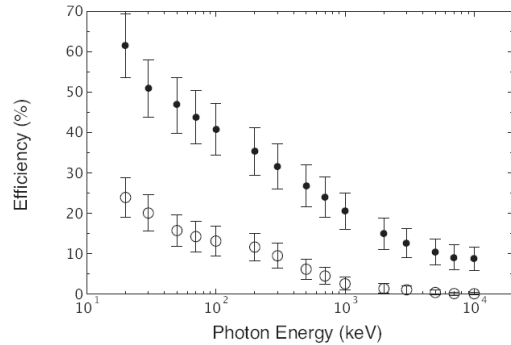


図8. 20層のダイヤモンド・センサを用いたDCRTの検出効率のモンテカルロ・シミュレーションの結果

#### 参考文献

- (1)Knoll, G.F.:Radiation Detection and Measurement, 3<sup>rd</sup> edn. Wiley, New York(1999)
- (2)「人工ダイヤモンドを用いた放射線検出器の開発」 柏木利介、奥野祥二、吉田賢二、日比野欣也、NEW DIAMOND 第50号 vol.14.No.3(1998)21-22
- (3)Kashiwagi, T., et. al.: Investigation of basic characteristics of synthetic diamond radiation detectors. IEEE Trans. Nucl. Sci. 53, 630(2006)
- (4)Kasahara, K.:<http://cosmos.n.kanagawa-u.ac.jp/> (2007)
- (5)Hibino, K., Kashiwagi, T. et al : The design of diamond Compton telescope. Astrophys Space Sci(2007)309: 541-544