

氏名	塩 飽 秀 啓
学位（専攻分野）	博士（学術）
学位記番号	総研大甲第8号
学位授与の日付	平成4年 3月16日
学位授与の要件	数物科学研究科 放射光科学専攻 学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	X-Ray Characterization of a Lapped Asymmetrical Silicon Crystal for an Intravenous Coronary Angiography System Using Synchrotron Radiation
論文審査委員	主 査 教 授 岩 崎 博 教 授 松 下 正 教 授 安 藤 正 海 教 授 升 島 努（広島大学） 助教授 大 隅 一 政 助教授 雨 宮 慶 幸

論文内容の要旨

[研究の狙い]

放射光を用いた医学利用のひとつとして、心臓自身に酸素や栄養分を供給する冠状動脈系を静脈から造影剤を注入する非侵襲的診断を目指した、簡便でしかも安全な撮影システム—単色X線を用いるK吸収端差分法—の開発が行われている。この方法は、造影剤（ヨウ素）のK吸収端前後の、2種類の単色X線で撮影した画像間の差分を取るもので、差分を行うことによりこのK吸収端近傍でほとんど吸収係数に差の無い軟部組織や骨などを消去し、造影剤のある撮影目的部位のみを高コントラストで抽出する方法である。本研究は心臓冠状動脈の高画質X線透過像を得るために必要な積分反射強度が大きくエネルギー分解能の良い単色X線を得ることができる分光素子の製作法とその素子の評価と、この光学系を用いて撮影した画像の評価、さらに研磨面からのX線回折の実験的モデル構築を目的とした。

[研究の方法]

結晶による回折において、積分反射強度を増加させる経験的な方法のひとつである表面を研磨する容易かつ簡便な方法に着目し、研磨剤砥粒（結晶研磨状態）とX線の反射率、半値幅、積分反射強度の関係を①結晶の材質、②反射指数、③非対称角度 α をパラメータとして、表面を研磨した単結晶の物理的特性評価を行った。

研磨面の回折現象を検討するため、研磨により生じた結晶表面近傍の歪み構造を電子顕微鏡（断面TEM、SEM）、微分干渉顕微鏡、X線トポグラフィ等により観察した。また、測定エネルギーを変え消衰距離の変化と研磨結晶による反射率、半値幅、積分反射強度との関連性、回折強度曲線のカーブフィッティングからモデルを検討した。

[新しい知見]

次の新しい知見が得られた。

1. 材質

研磨したシリコン単結晶では、研磨による格子歪にもかかわらず回折強度曲線の反射率は大きく低下しない。それに対しゲルマニウム結晶は研磨によって反射率が大幅に低下（十数％）し、半値幅が極端に増大（約150秒）するので診断用の分光素子として必要とされるエネルギー分解能を満たさないことが分かった。

2. 反射率に

シリコン結晶 $\alpha = 0^\circ$ (111) 面1200番研磨は70％、 $\alpha = 0^\circ$ (311) 面1200番研磨は65％、 $\alpha = 5^\circ$ (311) 面1200番研磨は70％あり、研磨した結晶を二結晶配置で利用できることが示唆された。2回反射によってビームが水平方向に進行するので、臨床応用にとってこのことは重要である。さらに2回とも非対称反射を用いて実用上人体に適用できるビームサイズに拡大できる利点がある。

3. 積分反射強度

メカノケミカル研磨した結晶と比較して、積分反射強度を容易に一桁増加させることができた。Si (311) において、10倍から20倍強度を増加できた。

4. 積分反射強度および半値幅の増加と研磨剤粒径との関係

積分反射強度の増加は研磨剤の粒系に関係して増加する傾向が見られた。粒系の対数値に積分反射強度が比例する。また粒系の対数値と半値幅が比例することが分かった。10倍から15倍の拡大。このことから、目的にあったエネルギー分解能、強度を持つX線を結晶を加工することである程度任意に選択できることが分かった。

5. 回折強度曲線のカーブフィッティング

研磨した結晶からの回折強度曲線は、ガウス関数とコーシー関数の和でかなりよくフィッティングできた。しかも、両関数の寄与率は、研磨剤の粒系に関係して変化することが分かった。

6. 二次元画像における研磨の効果

分光結晶に研磨結晶を用いた画像では、研磨剤砥粒の空間分解能に対する寄与は小さく充分適用できることが分かった。

また、研磨により歪んだ結晶格子の様子を透過型電子顕微鏡によって観察した結果、数ミクロンに渡り結晶に格子歪やクラックが生じていることなど回折メカニズムを考察する上で、重要な結果が得られた。

[まとめ]

表面を研磨した結晶からの回折について、初めて系統的、かつ定量的に評価を行った。また、結晶表面を研磨するという容易な方法により、エネルギー分解能をあまり低下させることなく、積分反射強度を増加することができた。

論文の審査結果の要旨

塩飽秀啓の論文にまとめられた研究は放射光を用いた非侵襲性静脈注射による心臓冠状動脈における撮影システムの開発において主要構成要素の一つである非対称研磨モノクロメーターの開発を行なったものである。

まず上記プロジェクトにおいてはモノクロメーターにより単色にした放射光X線により沃素を主体とする造影剤が通過する冠動脈の造影を容易にするために1)76%重量比ある静脈注射された造影剤の沃素濃度は心臓、肺、心臓を経て冠動脈へ到達する時点で5%程度になっている。2)患者への負担を軽減するために本来細長い放射光ビームに対して患者の患部を上下に走査するのではなく心臓全域をカバーする大きさの単色ビームであることが望ましい。このことを実現する上で非対称カットした単色モノクロメーターを用いるという選択を行った。単色化されたビームサイズが150mm×150mm前後、エネルギー幅150eV前後にもっていく上で大きい結晶が得られ、散乱強度も十分に得なければならないという材料上の制約を考慮すれば、シリコンおよびゲルマニウム単結晶に限られ、塩飽君はこの2種の材料について主に回折結晶学的観点から考察を行なった。まずゲルマニウム単結晶はシリコン単結晶の半値幅のほぼ2倍あるためモノクロメーターとしては有望であるが研磨に対しては反射率が極めて急激に降下し、さらに半値幅の急激な増加が見られ、全体として積分強度は砥粒サイズに比例して無歪み結晶の場合のおよそ20倍まで増加することが分った。結論としてはゲルマニウム単結晶は上記目的のモノクロメーターとしては反射率が急激に落ちこむ理由により排除せざるを得ない。

一方シリコン単結晶は極めて本目的に適う結晶である事が判明した。研磨による半値幅の増加は少なくエネルギー分解能が悪くならず、積分強度はゲルマニウム単結晶の積分強度におとらない無歪み結晶の時の20倍前後であることが判明し十分積分強度を必要とする本研究の目的に適うことが明確になった。しかも重要なことは研磨による反射率の減少が顕著でない。塩飽君はこの事実を用いて医学利用において重要である水平ビームを作成する上で2結晶モノクロメーターを構成することが十分可能であることを初めて示したことは大きい功績である。

以上のごとく各種砥粒をもちいたシリコン単結晶の非対称反射による積分反射強度の変化を深く考察し、古くから問題提起されていた研磨結晶の積分強度の増加について定性、定量考察にはじめてメスが入れられたと考えられる。日本が誇る歪んだ結晶におけるX線の波動場に関する加藤および高木による2つの理論の発展として本研究のような歪みの大きい結晶におけるX線波動場の理論適考察へ端緒を与えたものと評価でき博士論文として十分の内容をもっていると結論される。