

氏 名 奥 康 成

学位（専攻分野） 博士(工学)

学 位 記 番 号 総研大甲第288号

学位授与の日付 平成9年9月30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 Proposal of Optimized Intravenous Coronary
Angiography System Using Two-Dimensional
Monochromatic Synchrotron Radiation

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 鎌田 進
教 授 安藤 正海
助 教 授 野村 昌治
助 教 授 山本 樹
助 教 授 小林 克己
教 授 西村 克之（茨城県立医療大学）
教 授 平山 英夫（高エネルギー加速器研究機構）

放射光を用いた静注法による心臓の冠状動脈造影は、簡便で安全であるためスクリーニング検査での実用化が期待されている。特に、二次元撮影方式では、動画像を得ることができ、心臓の動きに合わせて動く冠状動脈を他の血管系と容易に判別できることや、血流の情報を得ることにより、形態検査のみならず心臓の機能診断にも役立つという長所がある。

したがって本研究では、スクリーニング検査を目指した二次元方式の放射光冠状動脈造影用の放射光リングから光学素子を含むビームラインおよび検出器までを総合的に検討して、実用的なシステムを提案した。この提案では、次の2点について特に検討を行った。

(1) 二次元方式では、撮影面が大きいいため、被験者の身体で発生する散乱X線が検出器に相当量入射し、画像のコントラストが低下する問題点が指摘されている。そこで、この点に関して検討を行った。モンテカルロ法を用いた散乱X線のシミュレーションプログラムを開発し、撮像面に入射する散乱X線の特性の評価、およびその除去方法の検討を行った。さらに、散乱X線を含めた二次元画像をシミュレーションで作成し、画像コントラストの各種パラメータに対する特性を調べた。

(2) 二次元方式では動画像を得るが、一枚一枚の画像で心臓の動きによるブレが生じないように、各画像の短時間での撮影が必要となる。このためのストロボ撮影の技術、すなわち放射光を間欠照射する高速X線シャッターを開発し、システムの実用性を示した。このことは、臨床応用での被験者の被曝の低減に貢献している。

次に研究内容の詳細について示す。散乱X線シミュレーションでは、血管ファントームを単色X線で撮影した場合の画像を作成した。血管造影剤に一般に使われているヨウ素を想定し、取り出す単色X線のエネルギーはヨウ素のK吸収端の33.17keVとしている。血管ファントームは、人体を模擬した直方体のアクリル(厚さ100~200mm)に血管を見立てたパイプ状の溝(直径1~5mm)を設け、希釈された造影剤(ヨウ素重量濃度1~10%)を封入した被写体モデルである。散乱X線が多いとヨウ素の流れる血管の像のコントラストが劣化する。散乱X線を除去するのに、病院のX線検査で広く利用されているX線グリッドを用いることで画像のコントラストを向上させることが出来ると期待される。これは薄い鉛と木材などを交互に積層したものでコリメータのような働きで散乱X線を除去するものである。ところが、コントラスト劣化要因には散乱X線だけでなく分光結晶から同時に回折してくる3倍高調波99.51keVのX線が露光面に入射する。本研究では、開発したシミュレーションプログラムを用いて、散乱X線の画面への入射量を調べ、散乱X線と3倍高調波による画像コントラストの劣化およびX線グリッドによるコントラスト改善効果を定量的に解析した。

一方、高速X線シャッターの開発は以下のように行った。二次元方式の放射光冠状動脈造影では、X線検出器にII-TV系が採用されており、1枚の画像の読み取りを行うのに1/30秒かかる。ところが、心臓の拍動による画像のブレをなくすため、1枚の画像の露光時間を4 msec程度にしている。したがって連続照射の場合、露光時間以外は無駄な被曝となり、この手法を臨床に応用する場合は放射光を間欠的に照射し、さらに撮像装置の画像読み取りタイミングを同期させる必要がある。開発した高速X線シャッターは、放射光を間欠的に

透過させ、その透過タイミングを3種類の検出器で検知し、同期信号を出力することにより、被曝を最小限に押さえながら乱れない良好な診断画像を得るよう設計され、前もって同期のとれた良好な画像が得られることを実験で確認した。本シャッタを臨床応用に適用し、被曝線量を規定通りに抑えながら被験者にとって有用な情報を得られる画像を得た。

以上の成果を踏まえ、スクリーニング検査を目指した小型の放射光リングを用いた静注法による冠状動脈造影システムを以下のように概念設計した。まず、上記の散乱X線シミュレーションによるコントラスト解析で3倍高調波の許容割合を設定して、放射光の臨界エネルギーを決定し、リングを極力小さくするために電子ビームエネルギーを極力低く1.5 GeVとし、挿入光源磁場を実用的な範囲で極力大きい6.0 Tに設定した。次に画像上で認識できる血管系および造影剤濃度の要求（直径1mm、重量濃度1%）から血管の影のコントラストを求め、検出器の一画素に入射する33.17keVの光子数によって決まる量子ノイズの標準偏差と比較することより、必要な33.17keVの光子数を決定し、それを上記の実用性が示された高速X線シャッタの照射時間および以前に行われた要素実験から得た光学系反射率や、熱吸収窓の厚さ、撮像系検出効率などのビームライン条件から蓄積電流値500mAおよび挿入光源主ポール数5 poleを設定した。これらの基本仕様をもとにKEKの計算コードSADを用いて放射光リングを概念設計した。そして、本研究における成果および過去に行われた要素実験や臨床応用などの研究成果から、放射光リングから検出器までの全体をまとめ、放射光冠状動脈造影システムとして提案した。

論文の審査結果の要旨

奥康成君の博士論文は、心臓冠状動脈の画像診断システム開発に関する研究である。この研究は「単色放射光を用いた静注法による心臓冠状動脈造影法」に基礎を置いたもので、安全かつ簡便というこの方法の利点を生かし、心臓冠状動脈のスクリーニング検査の実用化を目指す一連の開発研究の一環に位置付けられるものである。

本論文中に示された同君の研究内容は次のようなものである。

(1) モンテカルロ法を用いた散乱X線のシミュレーションプログラムを開発し、撮影画像の品質低下を招く散乱X線や3倍高調波の影響を評価するための環境を整備した。此处で開発されたシミュレーションプログラムの有効性は、既存プログラムに依る計算との比較のみならず、高エネルギー物理学研究所のトリスタン入射蓄積リングおよびブルックヘブン国立研究所のX線リングで奥君が行なった放射光ビーム実験との定量的比較によっても確認されている。

さらに、人体を模した直方体アクリルに血管を見立てた管を穿ち、血管造影剤として希釈ヨウ素を封入、K吸収端(33.17 keV)に対応する単色X線で照射という条件下で、画像コントラストの各種パラメータに対する依存性を調べ、良好な画像を得るための必要条件を導く事が行われている。この中では、散乱X線の影響を抑制するX線グリッドの効果をシミュレーションと放射光実験の両者に基づいて検討し、最適設計値を求める事も行われている。

(2) 照射放射光の時間的構造を画像撮像システムの仕様に整合させるため、高速X線シャッターを設計および製作して、被験者の被曝線量を必要最小限に抑えることができるようにした。此处で製作された高速X線シャッターは、1996年5月に行われた世界初の2次元動画方式放射光冠状動脈造影の臨床応用に使用された。

(3) これらの成果を踏まえ、心臓冠状動脈の画像診断に最適な電子ビームエネルギー、ウイグラー磁石強度、ビームエミッタンスなどの光源パラメータを、放射光実験および計算シミュレーションの結果に基づいて提唱している。さらに、スクリーニング検査の実用化を念頭に置いて、画像診断システムの根幹を構成する医学専用放射光源加速器およびX線ビームラインシステムの概念設計を提示している。

以上の研究について審査委員会は、社会的要請の高い心臓冠状動脈診断の安全かつ簡便な方法の実用化に向けて、医療用画像診断装置のシステムの全体的見地から遂行された「各種パラメータの洗い出しと専用加速器の概念設計例の提示」という本論文の総合的性格を高く評価した。そして、この研究が数物科学研究科放射光科学専攻の博士論文としての内容に値し、更に、優秀な研究業績を挙げていると判断した。