

論文の内容の要旨

論文題目 放射光 X 線 μ CT 技術の高度化とその応用

氏名 上杉 健太郎

はじめに

X 線 CT 法は非破壊検査法の一つで、測定対象領域を破壊することなく内部観察を行える手法である。これは Radon(1917 年)により証明された理論に立脚している。Hounsfield は 1973 年に、人間の内部を可視化するための、X 線 CT 装置を世界で初めて開発した。その後、医療用の X 線 CT 装置は改良を重ねられ、現在では一般的な医療診断装置として多数稼働している。

また、X 線 CT 装置を材料分析に使用する試みも進んでいるが、医療用装置では空間分解能が不足している。いくつかのメーカーから X 線管球を光源とする CT スキャナーが販売されているが、空間分解能では約 10 ミクロン程度しか達成できていない。

一方、放射光を光源とする X 線は光束密度の高い X 線を発生可能である。放射光 X 線を利用する事で、これまでの X 線光源では不可能であった X 線 CT 装置の、高空間分解能化・高速化・定量的な線吸収係数の取り扱い、が可能となる。そこで本研究では、大型放射光施設 SPring-8 において、放射光 X 線を利用した X 線 CT 装置の開発を行った。特に、定量的な情報を得られる X 線 μ CT 装置の開発・測定技術の高度化、さらにそれらの装置の様々な応用研究への適用を目的とする。

装置の基本構成と画像再構成について

図 1 に X 線 CT 装置の模式図を示す。X 線 CT 装置は比較的単純な構成をしており、X 線光源・分光器・試料ステージ・検出器からなる。それぞれの構成要素が、CT 像の空間分解能

やデータの定量性に影響を及ぼすため、必要とする空間分解能や撮影速度に応じた動作精度と安定性が要求される。画像再構成には Filtered back projection(FBP)法と数学的に等価である Convolution back projection (CBP)法を用いた。これにより、投影像からの画像再構成を精度良く、高速に行う事が出来る。

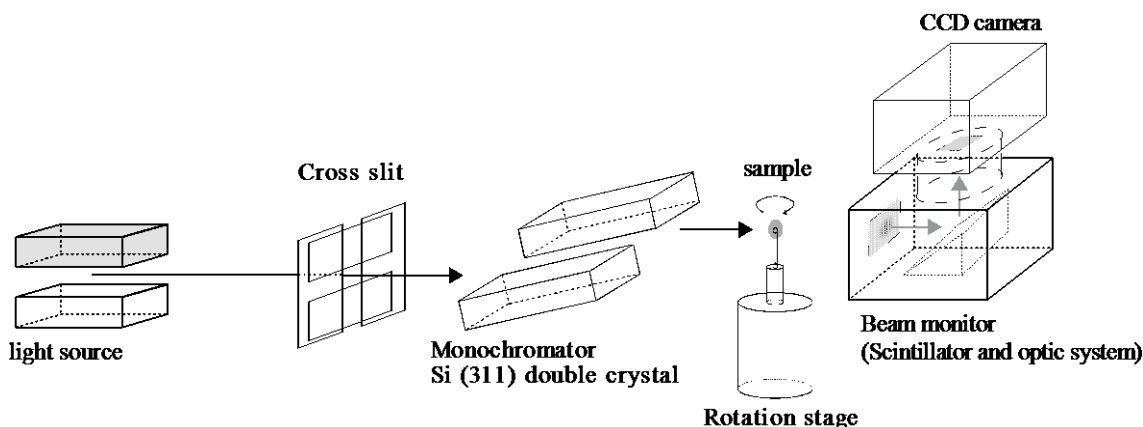


図 1. 投影型 μ CT 装置の模式図。光源・分光器・試料ステージ・検出器、により構成される。図中では分光結晶は Si (311) と記述されているが、測定条件により Si (111) や Si (511) に変更される。

装置開発と評価

X 線 CT 測定に用いる画像検出器に関して、CCD カメラを利用した可視光変換型の検出器であるファイバカップル(FC)式とレンズカップル(LC)式の比較検討を行った。ここでは、FC 式の検出器を、既存の LC 式検出器で使用されている蛍光体と CCD 素子を採用し、開発した。したがって、空間分解能・検出効率・歪などの検出器の特性に関して FC 式と LC 式の直接比較を行う事が可能である。

FC 式と LC 式の大きな違いは、蛍光面における可視光の伝送光学系である。FC 式は LC 式に比べ 4 倍程度高い検出効率を有するが、局所的な像の歪が大きく、CT 撮影で使用するには歪み補正が必要である。また、FC 式は倍率とカメラの交換が不可能であるため、試料や観察する現象に適した検出器を使用しにくい。一方 LC 式はレンズの交換により、容易に倍率を変更し得る。また、カメラも交換可能なため、例えば高ダイナミックレンジなカメラと高速度カメラを入れ替えるなどすれば、比較的 low コストで特性の異なる検出器として使用することが可能である。また FC 式ではファイバーのサイズよりも小さな画素サイズの検出器にすることが出来ないため、高空間分解能化は難しい。このことから多くの X 線 CT 実験においては、比較的自由度の高い LC 式検出器を使用することとした^[1]。

次に LC 型検出器を使用して、単色 X 線を用いた場合の線吸収係数の再現性のチェックと校正曲線を求めた。試料は数種類の金属と酸化物を用いた。この結果、線吸収係数が 10cm^{-1} 程度の領域までは、計算値と実験値は線形の関係にあるが、これよりも高い値では応答は非線形となる。この理由は複数考えられるが、高調波の影響と検出器の特性による物と考

えられる^[2]。

放射光 X 線 CT 装置の場合、X 線は平行光と見なして良く装置の空間分解能は検出器の空間分解能と同等まで向上できる（ただしその他の装置の動作精度も必要）。この場合、空間分解能は約 1 ミクロンまで向上できた。しかし、これ以上の空間分解能を達成するには、X 線顕微鏡光学系を使用しなければならない。本研究では X 線用対物レンズとしてフレネルゾーンプレートを利用した光学系を採用した^[3]。これにより、空間分解能は約 200nm まで向上した。

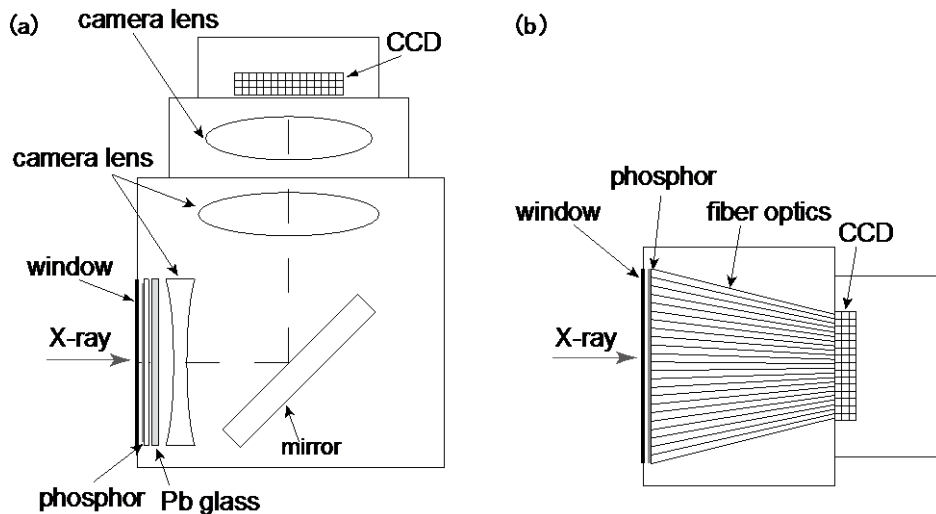


図 2. CCD 検出器の概略図。(a) LC 式。X 線は左から入射し、蛍光面にあたり可視光を発生させる。可視光はタンデムレンズ系をとおり、CCD に投影される。BM5 と CCD カメラはフィリップスマウントで接続されている。(b) FC 式。蛍光面はテーパファイバーの入射面側に直接貼り付けられている。出射面側は CCD に直接貼り付けられている。

応用研究例

SPring-8 では上記で開発された X 線 CT 装置を利用して様々な応用研究が行われているが、ここでは代表的な物に関して結果を例示する。

本研究では、宇宙探査機はやぶさが持ち帰った、S 型小惑星イトカワの粒子の初期分析を行った。装置の最高空間分解能は 200nm 程度であり、照射 X 線エネルギーは 7keV と 8keV を用いた。この程度の空間分解能で鉄の K 吸収端(7.11keV)を挟んだ 2 つのエネルギーで撮影する事で、それぞれの粒子に含まれる鉱物種とその配置・形状を明らかにする事が出来た^[4]。この結果、イトカワ表面から持ち帰られた粒子は、地球に落ちてきている隕石のうち最も多い物である LL4-6 の普通コンドライトと同等の組成比である事が示された。また、S 型小惑星は太陽系内に最も多く存在するタイプの小惑星である。普通コンドライトはこれまでこの研究で S 型小惑星を母天体とする物質と考えられ研究されてきたが、この研究で

その推測が裏付けられた事になる。X線 CT 測定により、粒子の形状を求める事も出来た(図 3)。これによるとイトカワから持ち帰られた粒子は、衝突により生成した物であり、月のレゴリスよりも風化や摩耗が進んでいない事が分かった。

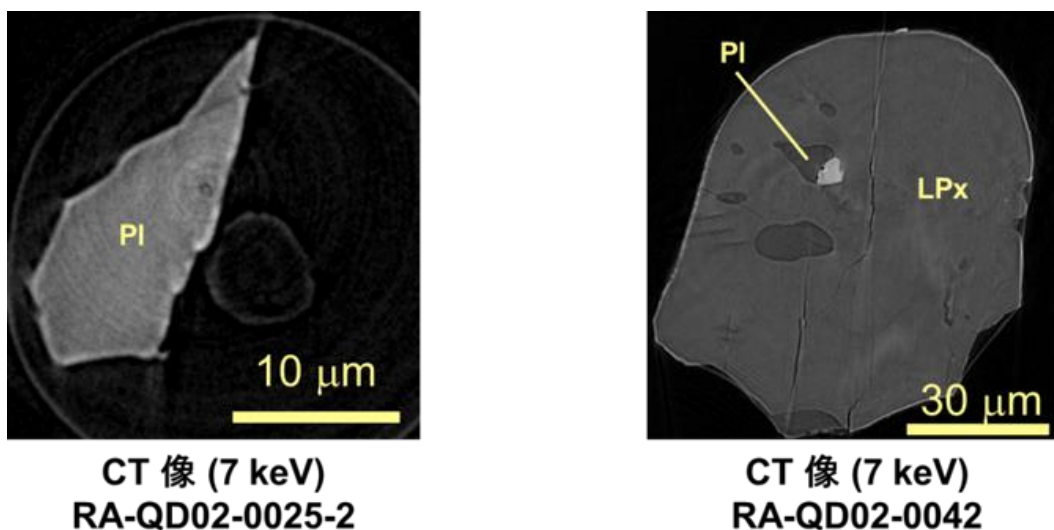


図 3. 様々な形状を持つイトカワ粒子の CT 像。40 粒子のうち 30 粒子は左側のようなシャープなエッジを持った物だった。残りの 10 粒子は右のような丸みを帯びた形状だった。左のような粒子が摩耗し右側のようになったと考えられる。

まとめ

本研究では、放射光 X 線を用いた X 線 CT 装置を開発した。単色 X 線を用いる事で、物体の持つ線吸収係数を定量的に取り扱える事を示した。また、高空間分解能化も行われ、最高分解能約 200nm を達成している。これ以外にも高速化も行われており、1 スキャンの最短時間は数秒、繰り返し動作現象をストロボ撮影する場合には、数ミリ秒の時間分解能を達成する事が出来た。

この装置を利用して、生物・地学・材料などの分野において様々な利用研究が行われている。

参考文献

1. Uesugi, K., Hoshino, M. and Yagi, N., *J. Synchrotron Rad.*, 18, (2011) 217–223
2. Tsuchiyama, A., et al., *American Mineralogist*, 90 (2005) 132-142
3. Uesugi, K., Takeuchi, A. and Suzuki, Y., *Proc. of SPIE*, 6318 (2006) 63181F
4. Tsuchiyama, A., et al., *Science*, 333 (2011) 1125