

X線管装置の焦点移動量低減技術の開発

Development of Technique to Reduce Displacement of Focal Plane for X-ray Tube

関 善隆 ¹⁾	Yoshitaka Seki	円谷 喜明 ¹⁾	Yoshiaki Tsumuraya
土肥 元達 ¹⁾	Motomichi Doi	廣川 浩一 ³⁾	Koichi Hirokawa
壇 芳彦 ²⁾	Yoshihiko Dan	中野 正寛 ³⁾	Masahiro Nakano
秋田 浩二 ²⁾	Kouji Akita		

¹⁾株式会社日立メディコ 技術研究所

²⁾株式会社日立メディコ 医療機器事業本部

³⁾株式会社日立メディコ CTシステム本部

CT装置における固体検出器の普及に伴い、X線管装置の焦点移動による画質劣化を防ぐ種々の技術が必要である。現在まで実用化されている技術には、機械的に焦点移動を補償する機構や画像データ上での補正アルゴリズムがあるが、コストアップやリコン時間延長などの欠点を伴っている。そこでX線管装置自体でこの問題を解消するため、焦点移動量を低減する技術を開発した。

焦点移動の要因は、陽極の熱膨張と遠心力によるたわみである。熱膨張の大きい部材はロータと固定部であり、構造力学と金属材料学の両面から検討を重ね、高強度ろう付けと複合構造の鋳造技術を確立した。また、X線管球をロータの熱膨張の方向とは逆方向に熱膨張させる陽極支持部へ新材料を開発適用し、効果を増大させた。スキャンの高速化に伴うたわみは、陽極全体の大径化による高強度な構造設計を行い、高剛性軸受をはじめとする新しい陽極構造を実用化した。以上の技術開発により、焦点移動量は従来の1/10に低減することができ、補償機構や補正アルゴリズムが不要となり、固体検出器付CT装置において良好な画像を得ることができた。

With prevalence of solid state detectors in CT scanner systems are becoming necessary various techniques to prevent degradation of image quality due to focal spot displacement of the x-ray tube unit. The already existing techniques are mechanisms to mechanically compensate focal spot displacement and correction algorithms applied on image data, but they have the disadvantages of cost-increase or longer reconstruction time. To solve this problem by the x-ray tube itself, the technique to minimize focal spot displacement has been developed.

Focal spot displacement is caused by swelling of the anode due to thermal expansion and flexion of the anode due to centrifugal force. In running x-ray tube, the rotor and the fixing part have higher temperature than the others. Then they have greater thermal expansion. We have conducted investigations in the fields of both structural mechanics and metallic material science and as the result, the high strength brazing technique and casting technique of compound structure have been established. In addition, the newly developed material was applied to the anode supporting component that expands to the opposite of the direction of the rotor expanded with heat. And it increased the correction effect.

The flexion of the anode due to high speed scanning is minimized with the new design including adoption of high-strength structure in a larger diameter of the anode and high-rigidity bearing for the rotor. The above development of the new technologies allows the focal spot displacement to be reduced 1/10 of the conventional displacement, thereby the compensation mechanism and correction algorithm are no more required and excellent image quality has been obtained by the CT system with the solid state detector.

Key Words: X-ray Tube, Displacement of Focal Plane, Ring Artifact

1. はじめに

X線管装置において、X線の発生効率を高く入力99%以上が熱となる。このため管球内のターゲットをはじめ陽極部材は他の部材に比べ激しく温度上昇し熱膨張する。これが焦点移動の主因で、検出器直前ではmm単位を超える移動となる¹⁾。焦点移動の現象は古くから知られ、従来のX線装置で

はそれほど問題にはならなかったが、X線CT装置、特に固体検出器を搭載したCT装置では、図1のようなリングアーチファクト²⁾を生じさせ、画質劣化の原因になる。これを解消する技術は既開発され、X線管装置全体、あるいはX線を絞るコリメータを機械的に動かして焦点の移動を補正する機構、

あるいはリングアーチファクトを画像データ上で消すアルゴリズムがあるが、前者はコストアップ、後者はリコン時間延長の欠点を伴う。したがってX線管装置自体で焦点移動を解消すれば、CT装置に大きなメリットをもたらすことができる。

ここでは独自に開発したX線管装置の焦点移動量低減技術について述べる。

2. 焦点移動の原因と解決技術

陽極が熱膨張すると、図2のようにターゲット焦点は陰極方向に移動する。またスキャンの高速化とともに大きくなる遠心力により陽極がたわみ、そのために焦点が熱膨張と同方向に移動する。焦点移動の原因はこの二つで、熱膨張による移動量はたわみのそれより約3倍大きい。

(1) 熱膨張の要因分析と技術開発

陽極各部の温度上昇を実測と熱伝導解析で詳細に調べた。図3は熱伝導解析結果の一例で、この温度上昇に各材料の熱膨張係数を乗じて部材ごとの熱膨張量を算出した。陽極部材

の熱膨張量においてロータと固定部が70%を占める(図4左)。そこでこれら二つの部材に対し、次の構造を開発し熱膨張量を減少した。

固定部は軸受の排熱機能を維持するため内円筒を銅とし、その外側を覆う外円筒を高強度で低熱膨張率のモリブデンで構成する二重管構造として(図5(a)、特許出願中)、真空鋳造炉で慎重に表面処理と温度管理のもと製作している。

ロータは1000 のターゲットを回転支持するため、高温での強度と高い精度が要求される。従来はモリブデンとステンレスを接合しているが、ステンレスの熱膨張率はモリブデンに比べ3倍大きいので、開発品はステンレスをモリブデンに置き換え、軸受を内包する大径部で接合する構造とした。大径になるほど、熱膨張差が大きくなり、接合部は過大な熱応力が生じるため、はく離し易くなる。これを解決するため、構造力学と金属材料学の両面から検討を重ね、低熱膨張ロータを開発した(図5(b)、特許出願中)。

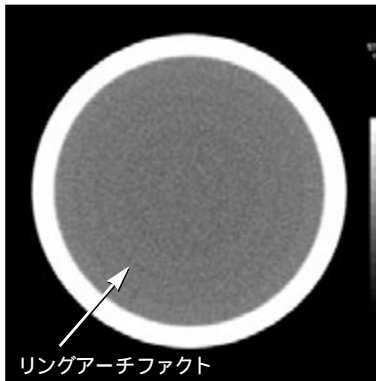


図1：焦点移動によるリングアーチファクト例

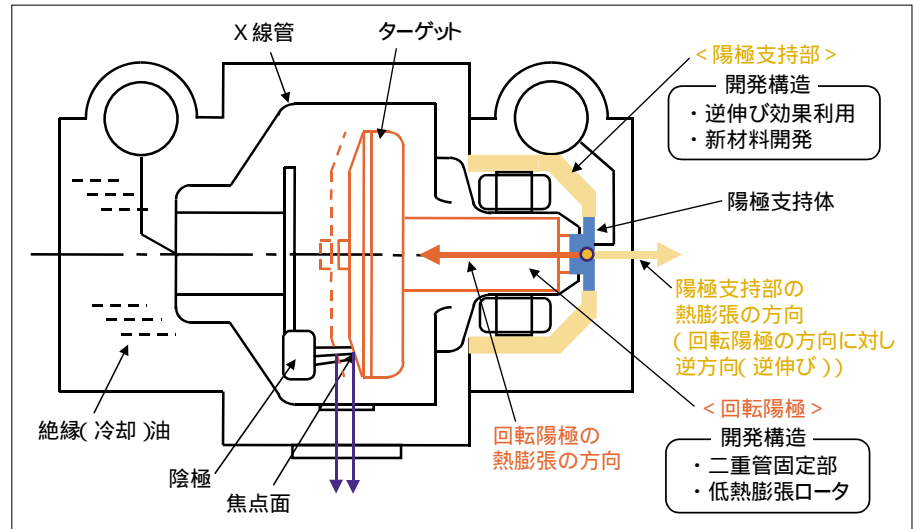


図2：X線管装置の焦点移動と開発構造

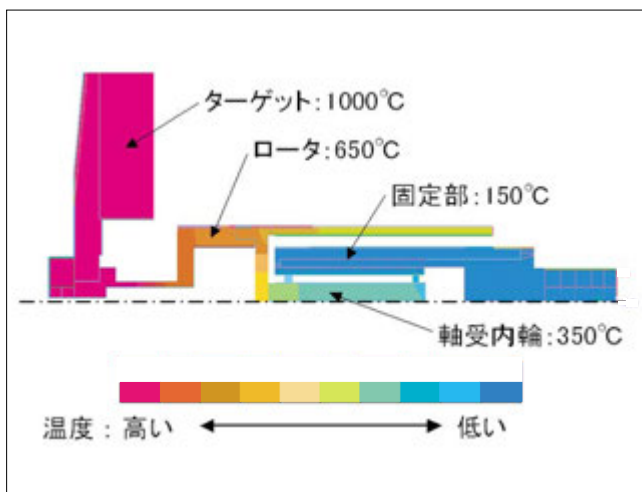


図3：陽極熱伝導解析

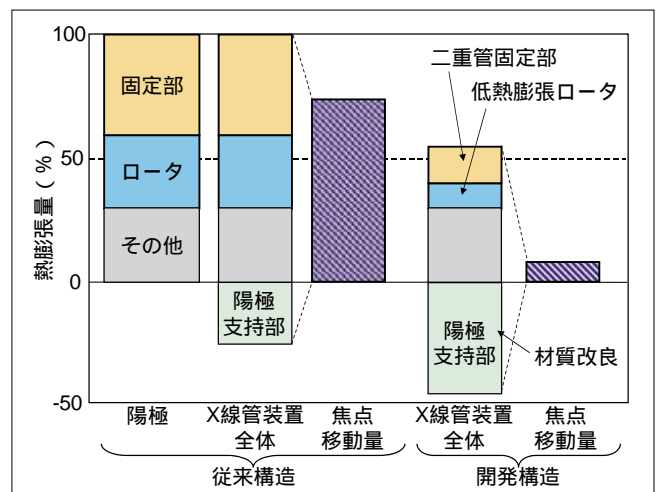


図4：陽極熱膨張量の要因分析

X線管球は、ハウベと呼ぶ容器のなかで絶縁油に満たされて支持されている。陽極支持部は、図2からわかるように温度上昇すると、管球を陰極とは逆方向に引張り(以下逆伸びという)、陽極の熱膨張を打ち消す作用を持つ。そこで高電圧絶縁性と耐熱・耐油性に優れ、熱膨張率が大きいエポキシ系樹脂を樹脂メーカーと新たに開発し、材料の特性を活用する構造設計を行い開発品に適用した。従来構造に比べ、1.8倍の逆伸びをもたらす(図4右)。

陽極の温度を下げるのは、熱膨張量の低減のみならず、軸受潤滑の長寿命化をもたらす。固定部の端部は絶縁油に浸っており、ここからの放熱向上による固定部温度の低減策を検討した。図6は固定部と接続し、油中に広い面積で浸る陽極支持体の材質と表面仕上げを変え、モデル実験で放熱効果を調べた結果である。材料の熱伝導率を高める効果とともに表面の粗面化が有効である。走査型電子顕微鏡(SEM)により表面を拡大観察すると、粗面化した表面は μm レベルの凹凸が形成されており、この凹凸により油が熱伝達境界層で搅拌されて放熱性が高まる。

(2)遠心力によるたわみの解決方法

構造解析の結果、遠心力により陽極をたわませてターゲットを傾け焦点を移動させるのは、軸受の曲げ変形が最も大きいことがわかった。このため従来の軸受より大幅に直径を太くしたX線管用軸受を新たに採用し、それに適合するよう固定部、ロータなどを大径化し高剛性とした。図7は、大容量ターゲットをロータが支持し、サブセカンドの高速スキャンで遠心力を生じさせた際の変形を強調して図示したものである。この解析結果から遠心力による変形の様子を比較すると、高剛性化した新軸受構造が従来構造に対し大幅にたわみを減少させることがわかる。

CT装置のスキャン速度が高まるとX線管や検出器を搭載する回転架台も変形する。陽極のたわみによる焦点移動は、スキャナ側の変形により影響を受けるので注意を要する。

3. 焦点移動量の測定方法

単体で焦点移動量を測定する場合は、図8(a)に示すX線管装置の放射窓にピンホールを固定し、そこから所定の位置まで離れた精密X-Yテーブルを設ける。X-Yテーブルは二方向にマイクロメータで動き、極めて微少な位置決めができる。テーブルの内側は四角に大きくくり抜いてあり、そこにタングステン線で作った十字線を張り、図8(a)で十字線の上側にX線フィルムを設置できるようになっている。

基準とする初期の焦点位置が十字線の中央にくるように位置決めし、その後X線管に荷荷を入力して陽極を加熱した状態で十字線を撮影すると、焦点がターゲットの移動によって十字線位置に対し初期に比べて移動する(図8(b))。この測定器はCT装置に取付けられ、陽極の熱膨張のみならず、高速スキャンのたわみによる焦点移動も測定できる利便さを持つ。

CT装置での焦点移動量の測定は、X線管装置をスライス方向へ機械的に動かして、あらかじめ焦点移動量と検出器に入射するX線量の変化を求め、相関図を作成する。実際には、検出器表面にその半分を覆う遮蔽版を置き、焦点移動に

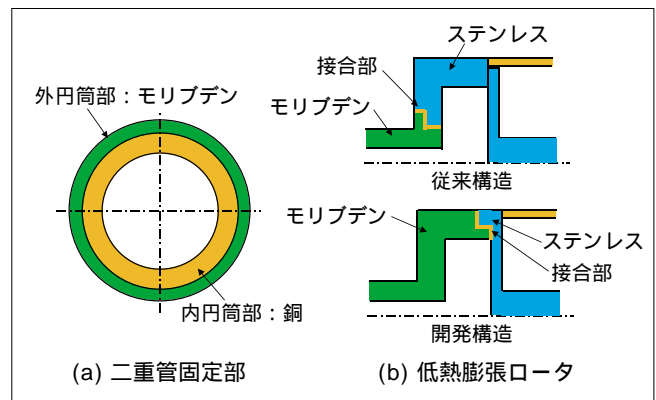


図5：陽極の焦点移動量低減構造

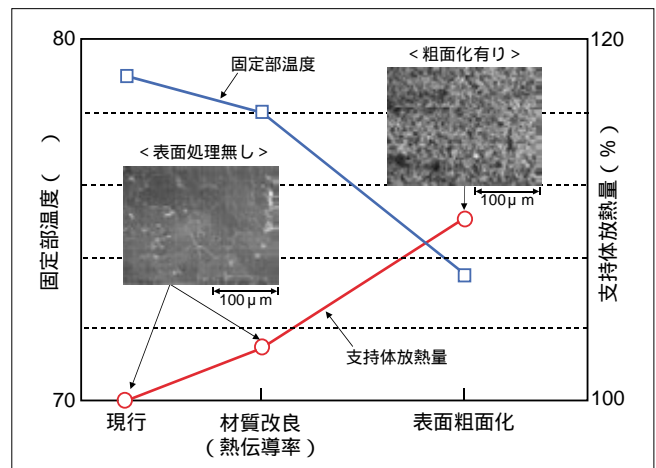


図6：陽極支持体の放熱向上

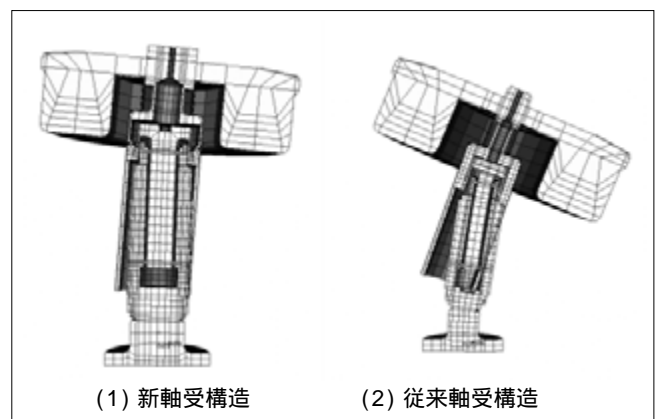


図7：遠心力解析結果

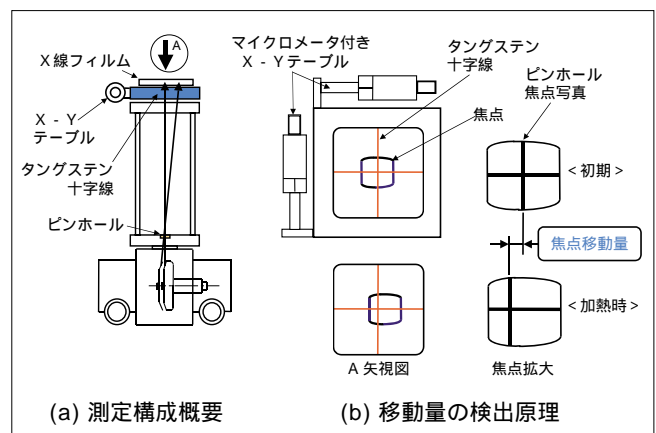


図8：X線管装置での移動量測定法

よる線量の変化を増幅させる。所定のX線管蓄積熱量での線量を基準とし、任意の蓄積熱量での線量を測定し、基準値との差から焦点移動量を求める(図9)。

4. 開発品における移動量低減効果

(1)熱膨張による移動量の低減

陽極の熱膨張量は各部材の温度上昇とともに大きくなるので、動的な変動、すなわち入熱量や時間との対応を調べる必要がある。特に油中でX線管球を支持し、逆伸び作用を持つ陽極支持部材の温度上昇は、陽極の熱膨張を有効に打ち消すために時間遅れを極力小さくする必要がある。

図10は開発品の焦点移動量を熱解析から予測した結果で、大容量X線管装置に蓄積熱量が100%になるよう、10分間の休止をはさんで3回繰り返した際の各部材の温度変化と、そこから算出した熱膨張による焦点移動量を求めたものである。

上段縦軸の焦点移動量は、従来構造の実測最大値を100%とした。図中のプロットは新構造焦点移動量の実測値で、休止前後の変動で解析との差はあるが、全体的には比較的一致し、従来構造に比べて焦点移動量は10%に低減している。蓄積熱量の立ち上がり部は、逆伸びの熱膨張量が時間遅れする

ため、移動量が20%に大きくなるが、比較評価は各部材の温度が飽和した時点で行っている。

CT装置搭載における焦点移動量の低減効果を図11に示す。図11は単体測定とCT装置搭載測定との移動量を比較したもので、試験に用いたサンプルは、次のA、Bである。

A.....二重管固定部のみを採用したX線管装置

B.....Aに加え、低熱膨張ロータを併用した本開発の焦点移動率軽減構造X線管装置

縦軸はAの最大移動量を100%とした。AとBの差は単体測定では40%、CT装置で36%とその差は4%と少なく、単体測定の高信頼性が確認できた。

5. おわりに

以上、X線管装置の焦点移動量を低減する技術を紹介した。これらの技術を採用した開発品は、従来品に対し熱とたわみによる合計の焦点移動量が1/10に低減し、CT装置の機械的補償機構やリコン時間を長くする補正アルゴリズムが不要でリングアーチファクトの生じない良質な画像を得ることができた。

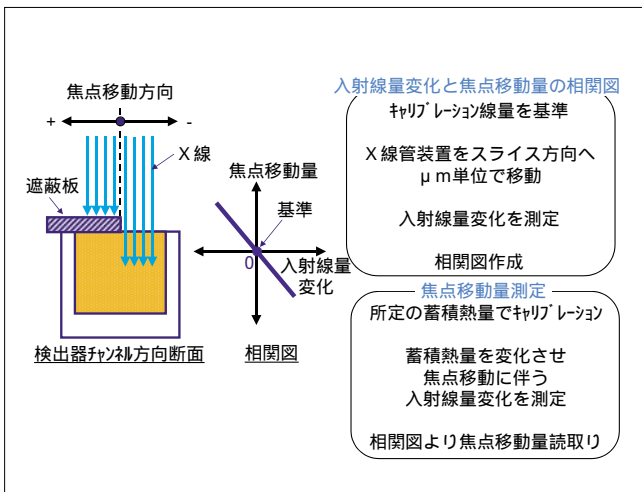


図9：CT装置での移動量測定法

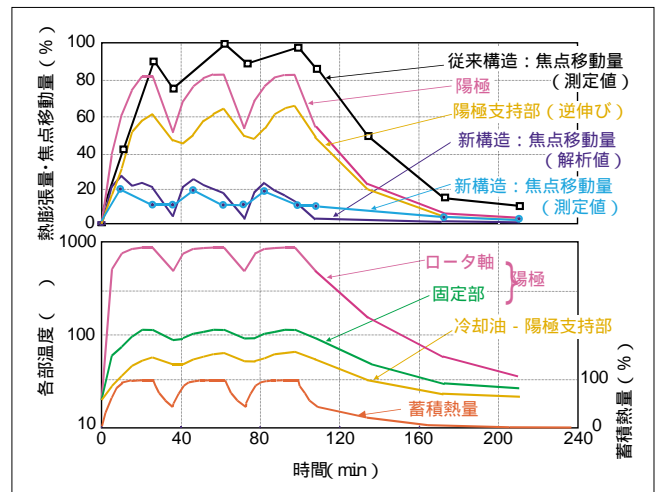


図10：各部の温度変化と熱膨張量・焦点移動量の解析

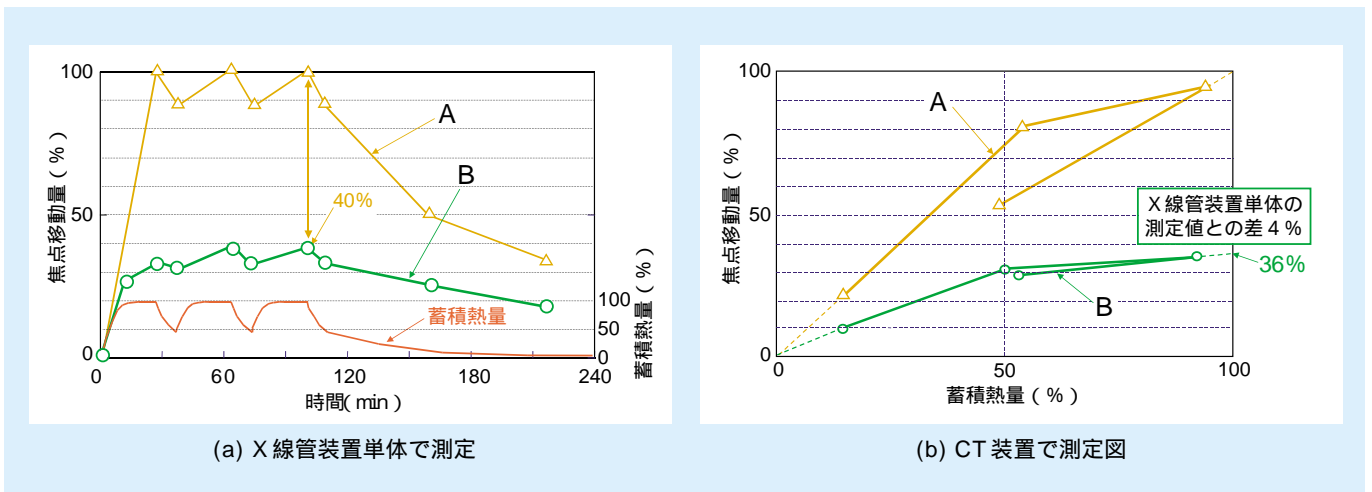


図11：焦点移動量測定結果

本開発品のX線管装置を図12に、それを搭載したCT装置を図13に示す。

今後、普及が期待される高機能マルチスライスCT装置では、焦点移動によるチャンネルの欠落を防止する目的で、スライス厚にマージンを設ける場合があり、無効被曝の恐れが生じる³⁾。この問題をCT装置側で解決する選択肢もあるが、X線管装置でこれを解決するべく、焦点移動量をさらに低減しゼロを目指すことが今後の課題である。



図 12 : 本開発の X 線管装置



図 13 : 本開発の X 線管装置を搭載した CT 装置

参考文献

- 1) 工藤正幸：LightSpeed QX/iの技術紹介：INNERVISION(15・8), 2000
- 2) 瓜谷富三, ほか：医用放射線科学講座13：放射線診断機器工学：医歯薬出版(株), 1997
- 3) 工藤正幸：マルチスライスCT Mx8000について：INNERVISION(15・8), 2000