

X線CT診断装置用 大口径ダイレクトドライブモータの小型化技術

Miniaturization Technologies for Large-Caliber DD Motor for CT Scanners

横山 光之

信藤 康孝

■ YOKOYAMA Akiyuki

■ SHINDO Yasutaka

近年、X線CT（コンピュータ断層撮影）診断装置は、患者の体格制限を緩和する大口径化と、装置の設置性を向上させる小型化の両立が課題となっている。

東芝メディカルシステムズ(株)が2013年4月にフルモデルチェンジしたAquilion™ PRIMEの開発において、ガントリ内ユニットの小型化とレイアウトの大幅変更による装置本体の小型化を図った。そこでは、X線源や検出器を回転させる中空のダイレクトドライブ（DD）モータの小型化が重要な役割を果たした。DDモータの出力を従来レベルに維持したまま小型化するため、モータの巻線配置、磁石の形状を適正化した。これにより、新しいAquilion™ PRIMEは当社従来比で、体積を34%、質量を28%低減することができた。

There has been an ongoing need in the field of computed tomography (CT) scanners in recent years for both expansion of the inside aperture of the gantry to ease the physical restriction on patients, and downsizing of the equipment to save installation space.

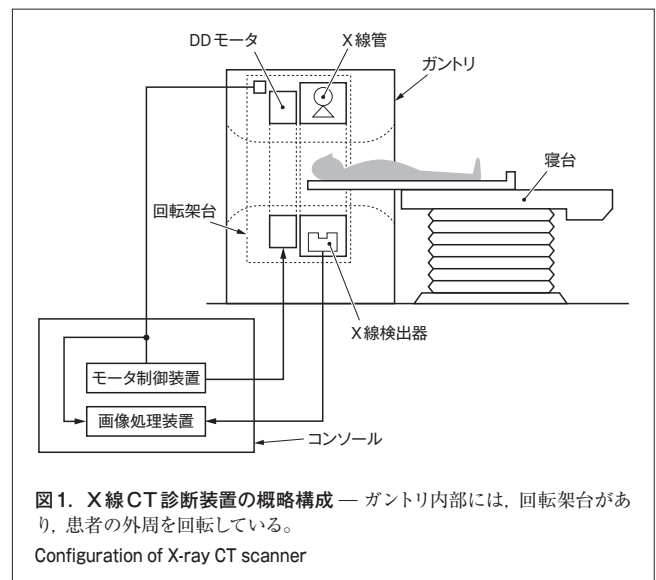
In the Aquilion™ PRIME, a high-end multislice CT scanner released in April 2013 by Toshiba Medical Systems Corporation, miniaturization of the units in the gantry and downsizing of the equipment have been realized by changing the unit layout. Miniaturization technologies for the hollow type large-caliber direct drive (DD) motor, which rotates the X-ray tubes and detectors, played a critical role in the development of the Aquilion™ PRIME. The specifications of the DD motor, including the winding arrangement, and form of the permanent magnets, were optimized to reduce the size to a minimum while maintaining the conventional output level. As a result, the new Aquilion™ PRIME achieves reductions in volume and weight of 34% and 28%, respectively, compared with our conventional models.

1 まえがき

X線CT（コンピュータ断層撮影）診断装置は、人体の断面像を撮影する装置であり、短時間で臓器に関する多くの情報を取得することができる。また、ヘリカルスキャン技術やX線検出器の多列化により、静止した2次元画像から、動きのある3次元画像を再構成できる⁽¹⁾。X線CT診断装置の概略構成を図1に示す。ドーナツ形状のガントリ、患者を載せて撮影位置まで移動する寝台、及び画像の再構成や表示を行うコンソールで構成される。

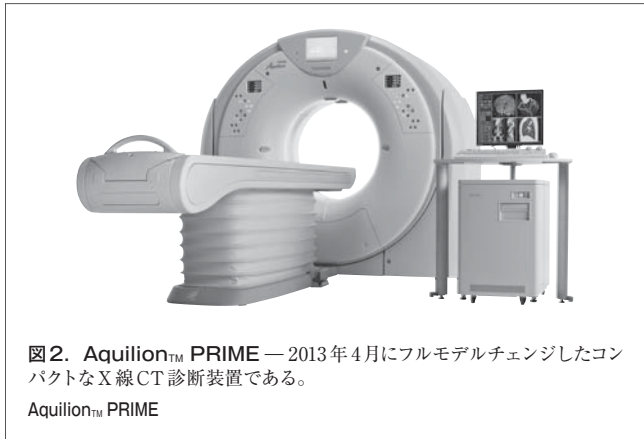
東芝メディカルシステムズ(株)は、2013年4月にマルチスライスCTシステムの最上位機種であるAquilion™ PRIMEのフルモデルチェンジを行った。この装置は、撮影能力の向上、高画質、及び低被ばくを実現し、0.5 mm×80列（160スライス）のX線検出器と、ガントリ1回転0.35 sの高速撮影といったハイスペックの機種である。

他機種よりも広い開口径を維持しながら、施設の限られた設置スペースに柔軟に対応できるように、ガントリ内ユニットの小型化とレイアウトを適正化した。これにより、当社従来比で体積を34%、質量を28%削減し、コンパクトな本体を実現した（図2）。この装置の小型化のためには、回転架台に搭載



される大口径ダイレクトドライブ（DD）モータの小型化が必須であった。

ここでは、ガントリ構造の見直しと、新規設計した大口径DDモータの小型化及びそれに伴う磁石形状の適正化について述べる。



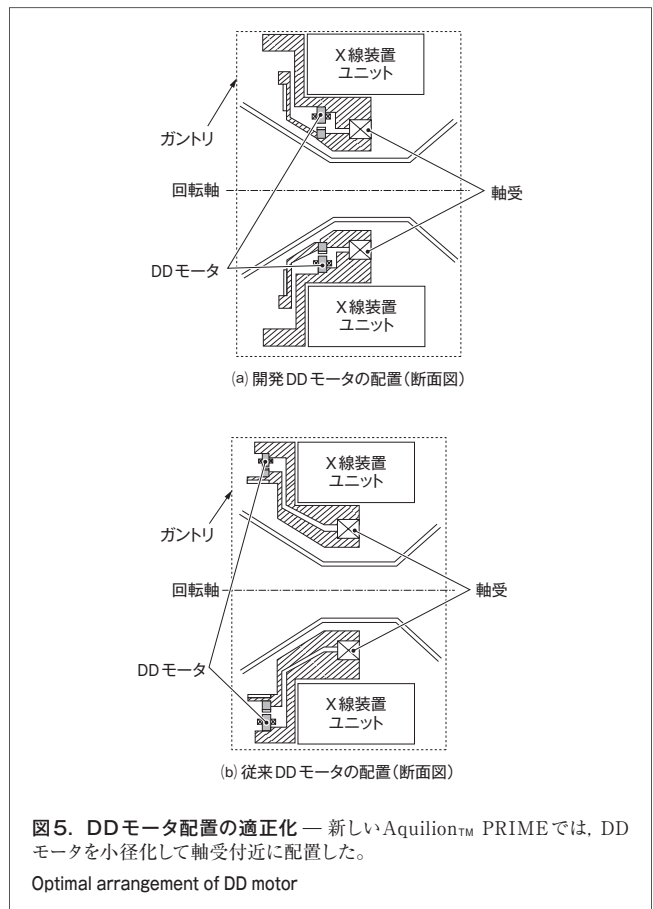
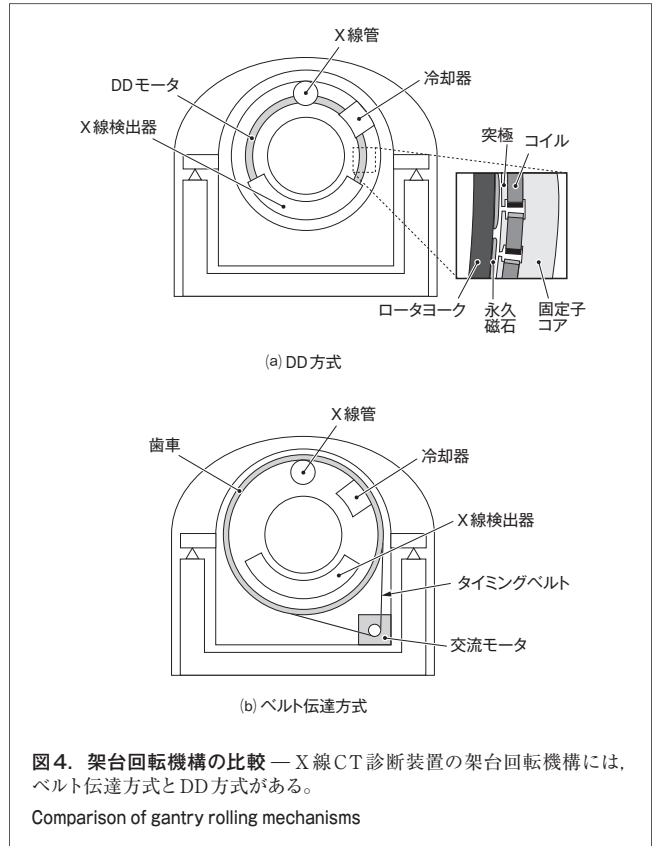
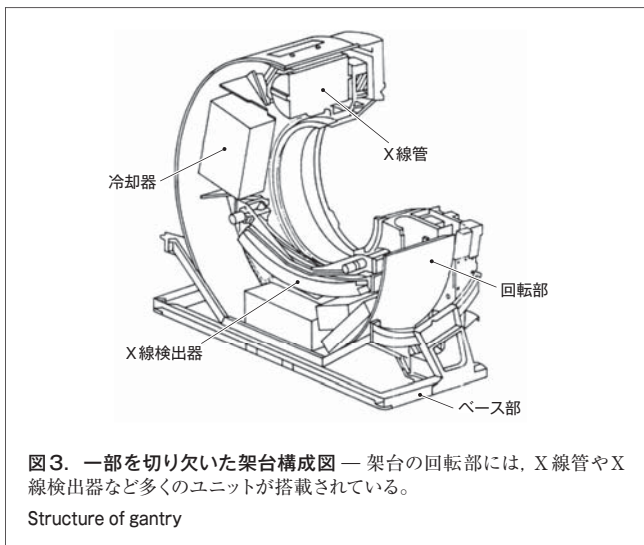
2 架台回転機構

ガントリは架台とも呼ばれ、その内部は、X線管などを搭載した回転部と、それを支えるベース部（固定部）により構成されている⁽²⁾。架台構成を図3に示す。

撮影時は、X線管や冷却器など多くの重量物を搭載した回転部が、高速で回転している。DDモータ搭載以前の回転機構には、タイミングベルトを使ったベルト伝達方式を採用していた。しかし、高速化に伴って、歯車とタイミングベルトの歯当たりによる振動と騒音が増大した。

そこで当社は、上位機種種のAquilion™シリーズに大口径モータを用いて非接触で直接回転させるDD方式を1998年に採用し、低振動化と低騒音化を実現した⁽³⁾。DDモータは、中空構造をしており、円周上に固定子（コイル）と回転子（永久磁石）が配置されている（図4）。

従来のDDモータは、以前にタイミングベルトと歯車があったスペースに配置していた。今回、X線CT診断装置の小型化のため、構造を全面的に見直し、DDモータも軸受付近に配置して小型化を実現した（図5）。



3 DDモータの小型化設計

DDモータの小型化を設計するにあたり、永久磁石からの磁束を有効利用する割合を更に向上させることを目指した。この割合は、永久磁石からの磁束に対して実際にコイルを鎖交する磁束量を指標とする、巻線係数で表される。短絡分を除いた全ての磁束が鎖交する場合の指標を1.0として、設計上1.0にできるだけ近づけることが望ましい。

しかし、DDモータは、銅損を低減し巻線工程を容易にできる集中巻き方式を採用しており、巻線ピッチと磁極ピッチを完全に一致させることは困難である。そこで、同相コイルを隣接させ、かつ巻き方向を逆巻きにする方法で、巻線係数を1.0に近づけることとした。この場合の巻線係数は、短節巻係数 k_p に加え、分布巻係数 k_d を導入することで、その積として算出できる。

k_p は、巻線ピッチ m と磁極ピッチ p から式(1)で算出され(図6)、今回の k_p 設計値は0.9945とした。

$$k_p = \sin\left(\frac{m}{p} \times \frac{\pi}{2}\right) \quad (1)$$

k_d は、同相の巻線をいくつかの突極に分散して巻いた状態から式(2)で算出される(図7)。

$$k_d = \frac{\sum_{i=1}^n \cos\left(\theta_i \times \frac{\pi}{180}\right)}{n} \quad (2)$$

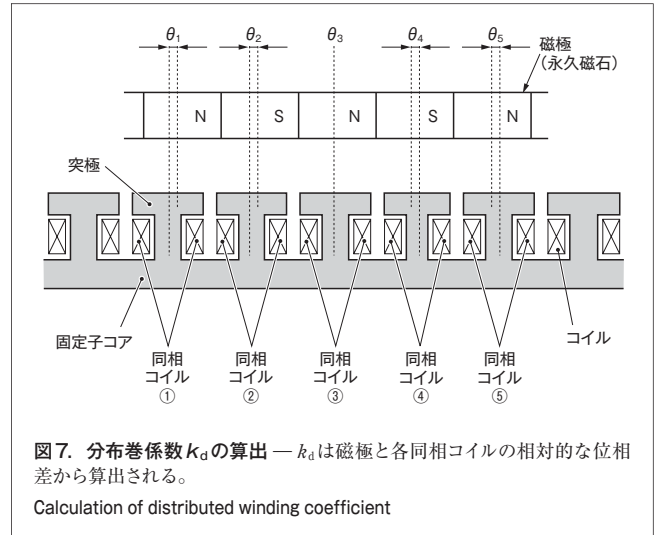
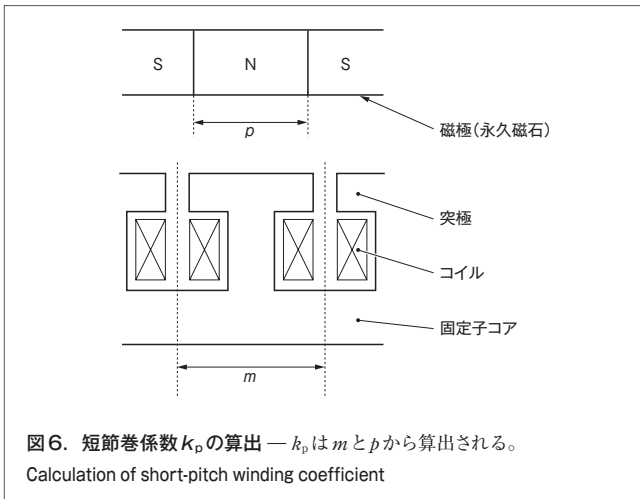
θ_i : 磁極中央と各同相コイル中央との位相差

n : 同相コイル数

今回の巻線配置は、同相コイルを5個連続して突極に巻回し、 k_d は、0.9567とした。

最終的な巻線係数は、 k_p と k_d の積から、0.9514となる。

これにより、今回の巻線配置ではモータ出力に起因する磁束量を約10%増大でき、モータ体積として10%低減できた。今回開発したDDモータを図8に示す。



また、この巻線配置は製造面でも大きなメリットがある。すなわち、モータ巻線はノズル方式の自動巻線機を用いて固定子コアの突極にコイルを巻回するが、一般にU相、V相、及びW相の異なる相を順番に巻いていく。そのため、同相コイルを次の突極に巻回するときには、直径が1m以上ある固定子コアを回転移動させながら作業する必要がある。しかも、固定子コアの慣性モーメントが大きいため、回転移動速度は極めて低速であり、巻線工程に時間が掛かる。そこで、突極に同相コイルを5個連続して配置することで、作業中の回転移動距離を短くし、並列接続する本数及び結線箇所も削減して作業時間を短縮している。

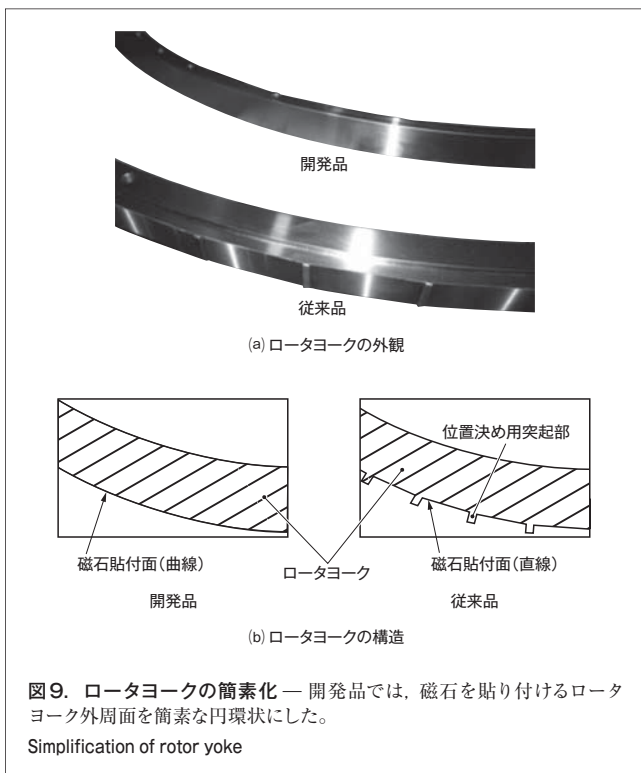
一方、同相コイルが偏在するデメリットとして、回転部に偏芯力が作用することが挙げられるが、今回の設計では、同相コイル群を回転中心に対して相互に向かい合うように配置することで、偏芯力を相殺している。

4 磁石形状の適正化

DDモータは、ネオジム磁石を多く使用するので、貼付作業を容易にすることが必要である。

従来、磁石とロータヨークとの貼付面を平面にして、ロータヨーク外周には、位置決め用の突起部を設けていた(図9)。今回、ロータヨーク加工を簡素化するため外周を円環状にし、専用の磁石位置決めジグを製作した。磁石の貼付面を平面から曲面に変更し、磁石中央部の厚さを5.0 mmから4.5 mmに10%薄くした。また、磁石の中央部と端部の厚さ比を適正化して誘起電圧のひずみ率を同等にし、DDモータのトルク変動を低減している。

モータの小型化に伴い、磁石厚さを10%低減したが、巻線係数が10%向上したことにより、鎖交磁束量を同等にすることができた。



5 あとがき

巻線配置と磁石形状を適正化し、モータ出力を維持したままモータ体積を10%低減した、コンパクトなAquilion™ PRIME用のDDモータを開発した。また、同相コイルの巻線配置を工夫し、巻線工程の製造性を向上させた。

今後も、X線CT診断装置の撮影性能の向上に対応するために、DDモータの更なる高出力化、低振動化、及び低騒音化技術の開発に取り組んでいく。

文 献

- (1) 内蔵啓幸 他. 3大疾患の診断に活躍するCT装置. 東芝レビュー. 62, 1, 2007, p.11 - 15.
- (2) 山中健史 他. CT装置の回転バランス調整技術. 東芝レビュー. 66, 9, 2011, p.36 - 39.
- (3) 渡邊尚史 他. 全身用X線CT装置 Aquilion™. 東芝レビュー. 54, 2, 1999, p.57 - 60.



横山 光之 YOKOYAMA Akiyuki

生産技術センター 制御技術研究センター研究主務。
モータ及び磁気応用機器の開発に従事。
Control Technology Research Center



信藤 康孝 SHINDO Yasutaka

東芝メディカルシステムズ(株) CT事業部 CT開発部主任。
X線CTスキャナの設計・開発に従事。日本機械学会会員。
技術士(機械部門)。
Toshiba Medical Systems Corp.