

洗濯機用デュアルロータ－DDモータ

Dual-Rotor Direct-Drive (Dr-DD) Motor for Washing Machine

森崎 昌彦
Masahiko Morisaki

吉川 祐一
Yuichi Yoshikawa

田代 裕一郎
Yuichirou Tashiro

李 虎
Hu Li

要 旨

日本の洗濯機市場で伸張しているドラム式洗濯機において、ドラムを駆動するモータはダイレクトドライブ方式が主流であり、モータの性能が洗濯機の性能に大きく寄与する。洗濯機の更なる性能向上のため、近年モータには洗濯と脱水の相反する2ポイントのバランス設計と、小型化・静音化・高精度化の要求がますます高まっている。これらの要求に応えるべく、業界初のデュアルロータ構造のモータを開発した。これにより、従来のシングルロータ構造のモータに比べ、出力密度を1.5倍に向上させることで体積を40%小型化し、コギングトルクとトルクリップルを大幅に低減させることで3 dBの低騒音化を実現した。

Abstract

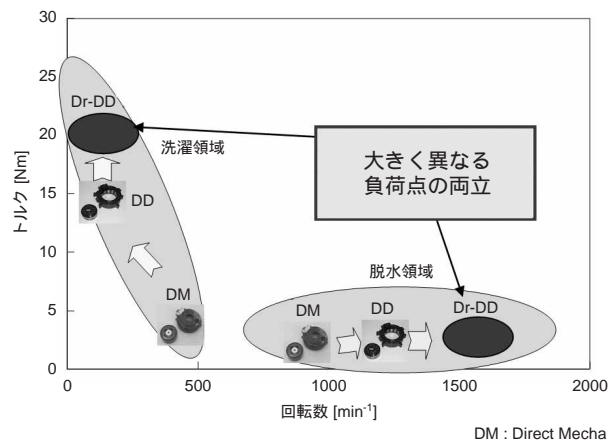
Nowadays in Japan, the market for drum type washing machines is growing. The method of operating the drum motor by using direct drive is very popular and the performance of the motor contributes greatly to the performance of the washing machine. Demands for motors to be smaller, quieter, and more precise while achieving a balanced design for both washing and spin-drying points are becoming very high. Therefore, the Dual-Rotor structure motor that can satisfy all the needs has been developed. Compared to the Single-Rotor structure motor, this Dual-Rotor motor has 1.5 times higher output density, 40% smaller motor size, and greatly decreased cogging torque and torque ripple. Because of all these factors, a reduction of 3 dB in noise value has been achieved.

1. はじめに

近年日本の洗濯機市場は、乾燥機一体型のドラム式洗濯機が伸張しており、洗濯性能や乾燥性能、時短・節水による省エネ、静音化などで大手各社は開発にしのぎを削っている。搭載されるモータは洗濯槽を直接駆動するダイレクトドライブ（DD）方式が主流であり、洗濯時の低速・高トルク、脱水時の高速・低トルクの相反する2ポイントの特性が求められ、これをいかにバランスさせた設計を実現するかがキーポイントである。さらには、洗濯機へのヒートポンプ搭載に伴うモータの小型化や、より小刻みな動きを実現するためのロータ位置検出精度の向上、洗濯時の更なる高トルク化と脱水時の更なる高速回転化、低騒音化など、求められる要求性能も年々厳しくなっている。本稿では、これらの要求に応えるため、新構造であるデュアルロータ構造のDDモータを考案し、業界トップレベルの高出力密度化、および低騒音化を実現したので報告する。

2. 洗濯機用モータの進化

洗濯機用モータは、洗濯機の進化とともに、メカ減速方式から、ダイレクトドライブ方式に適した形で進化してきた。第1図に、モータの進化の経過を示している。第1図に示すように、洗濯機用モータのトレンドとして、洗濯時は高トルク・高出力密度化、脱水時は高速・低騒音



第1図 洗濯機用モータの進化と要求性能

Fig. 1 Evolution and demand performance of motor for washing machine

化が加速している。そこで、小型・高効率モータとして、永久磁石をロータに埋め込んだ埋め込み磁石形モータ（Interior Permanent Magnet Synchronous Motor、以下IPMSMと記す）¹⁾などの検討がなされている。また、コイルの抵抗値を下げることによって銅損を低減する集中巻線方式²⁾が、洗濯機用モータへ適用されてきている。しかしながら、集中巻IPMSMは、振動・騒音に関する課題が報告されており、現状ではアプリケーション側での騒音対策がなされ、コスト増大の原因となっているため、モータ自身の更なる低騒音化が望まれている。

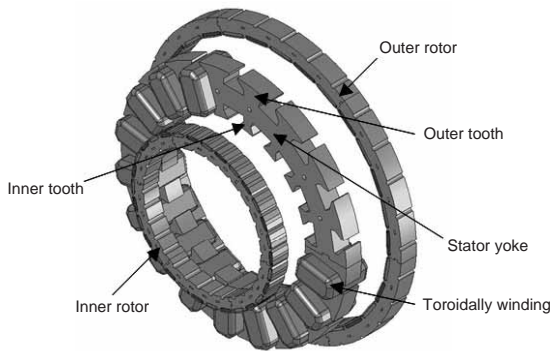
本開発では、集中巻と同様にコアに直接巻線を巻く方

法で、分布巻と同様の巻線配置となるトロイダル巻線を採用し、さらに1軸の出力軸に対し、インナーロータ・アウターロータの2つのロータで構成されるデュアルロータ構造³⁾とすることで、出力密度の向上と低騒音化の両立を実現した。さらに磁石には、近年、高磁束密度化が著しい希土類焼結磁石を採用し、ロータ構造はIPMSMとすることで、リラクタンストルクを利用し、更なる高出力密度化を実現した。

3. デュアルロータ構造モータの特徴

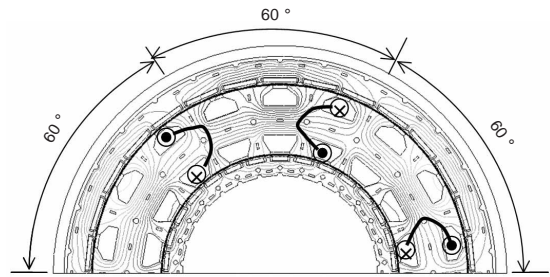
3.1 デュアルロータ構造

第2図に、今回開発したトロイダル巻線デュアルロータ構造のモータを示す。第2図に示すように、デュアルロータ構造のモータは、1つのステータをもち、ステータの内側と外側に、アウターロータとインナーロータの2つのロータを配置している。また、アウターロータとインナーロータは共に、ステータと微小なギャップをもっている。そして、アウターロータとインナーロータは1つの出力軸をもつように樹脂モールドにより連結されている。また、ステータには、トロイダル巻線でステータヨーク部に直接巻線が施されている。



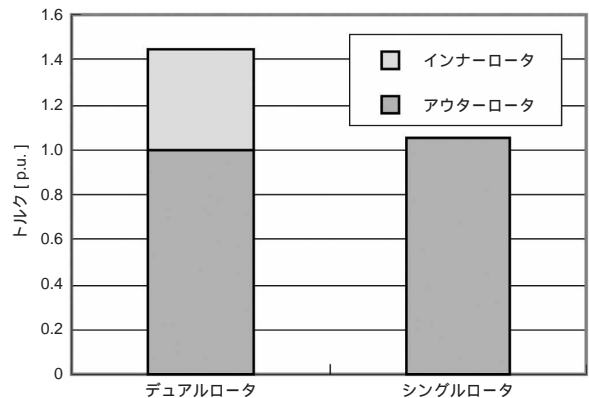
第2図 デュアルロータ構造のモータ形状
Fig. 2 Structure of dual rotor

第3図に、今回開発したトロイダル巻線デュアルロータ構造のモータの磁束分布と巻線配置を示す。第3図より、トロイダル巻線ではステータの内側と外側に巻線電流による磁束が発生する。従来のシングルロータ構造では、内側、外側どちらか一方の磁束を利用してトルクを発生するため、どちらか一方は無効な磁束となり、効率の低下やモータの大型化を招いていた。しかし、デュアルロータ構造とすることで、ステータの内側と外側に磁束が鎖交し、巻線磁束を100%トルクに寄与させることが可能となる。



第3図 磁束分布と巻線配置
Fig. 3 Flux distribution of toroidally winding

シングルロータとデュアルロータの出力トルクの比較を、第4図に示す。デュアルロータは、30極18スロットで、磁石には希土類焼結磁石を使用している。また、ここで比較対象としたシングルロータは、アウターロータタイプのモータを同一規格で最適化した48極36スロットのモータである。第4図の通り、シングルロータに比べてデュアルロータは、トルクが40%以上増加し、出力密度が大幅に向上することが確認できた。

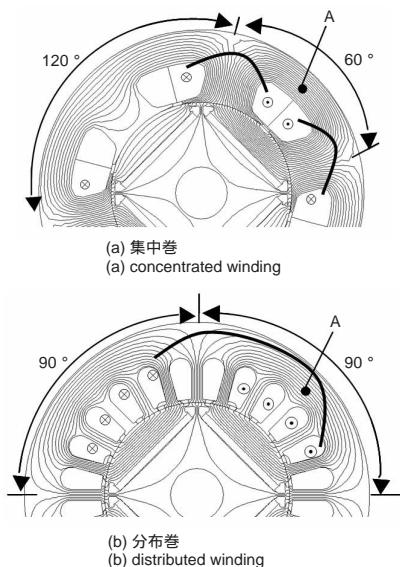


第4図 出力トルク比較
Fig. 4 Torque comparison

3.2 トロイダル巻線

モータは、巻線方式の違いにより、ステータコア形状・モータ構造・適用用途が異なり、また利点と課題も異なってくる。本稿で開発したモータには、集中巻巻線と分布巻巻線の利点を併せもつトロイダル巻線を採用した。

第5図に、集中巻・分布巻の巻線配置とその磁束分布を示す。集中巻は、各ティースに集中して巻線が施され、分布巻に対してコイルエンドが短縮されるため、モータの薄型化が可能である。しかし、分布巻においては、磁極ピッチが90°等間隔であるのに対し、集中巻は磁極ピッチが60°と120°となる。このため、集中巻は、分布巻に対しラジアル力が増大する傾向にある。第6図に、集中

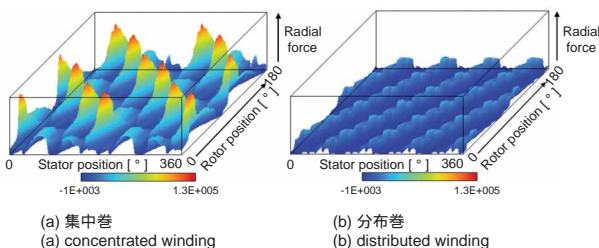


第5図 集中巻・分布巻の巻線配置とその磁束分布
Fig. 5 Comparison of winding arrangement and flux distribution

巻・分布巻のラジアル力の比較を示す。ラジアル力は、トルクに寄与する成分ではないため、ステータコアを吸引し騒音の原因となる。第6図より、集中巻は分布巻に比べ、ラジアル力が約4倍に増大していることがわかる。

トロイダル巻線は、第2図に示すように、ステータヨーク部に直接、集中巻で巻線が施されており、分布巻モータに比べてコイルエンド部が短縮され、モータを小型化することが可能となる。さらに、第3図に示した磁束分布より、巻線電流による磁束分布が従来の分布巻と同様に、60°等間隔に整列していることが確認できる。これは、トロイダル巻線を採用することにより分布巻の巻線配置となるため、ラジアル力が分布巻と同等になるためである。

以上のことから、トロイダル巻線デュアルロータ構造のモータとすることで、出力密度を大幅に向上することが可能であり、また磁束分布が分布巻と同じになるためラジアル力が低減でき、振動・騒音を抑制することが可能となった。



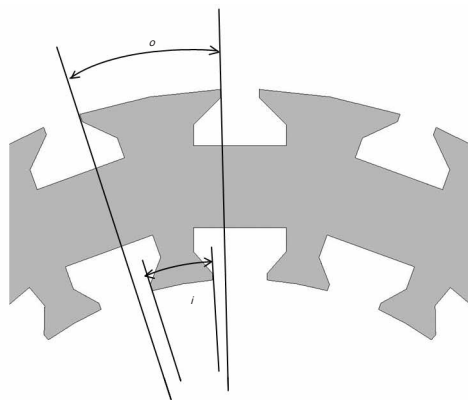
第6図 集中巻・分布巻のラジアル力
Fig. 6 Comparison of radial force

4. 低騒音化技術

デュアルロータ構造の特徴を生かし、騒音の主要因となるトルクの脈動（コギングトルク）を打ち消す方法を開発したので、下記に示す。

4.1 コギングトルクキャンセル方式

第7図に、コギングトルクを最小にするためのステータコアを示している。ステータコアは、ステータヨーク内外にアウターティースとインナーティースを配置しており、アウター・インナーのティース先端角度を θ_o, θ_i としている。アウターロータのコギングトルクを T_{o-cog} 、インナーロータのコギングトルクを T_{i-cog} としたとき、モータのコギングトルク T_{cog} は、(1) 式で表される。ただし、スロット数と極数の最小公倍数で表わされるコギングトルクの基本波成分のみを検討の対象としている。



第7図 デュアルロータ構造のステータコア
Fig. 7 Shape in stator core

$$T_{cog} = T_{i-cog} + T_{o-cog} = T_i \sin N + T_o \sin N(\theta_o + \theta_i) \dots \dots \dots (1)$$

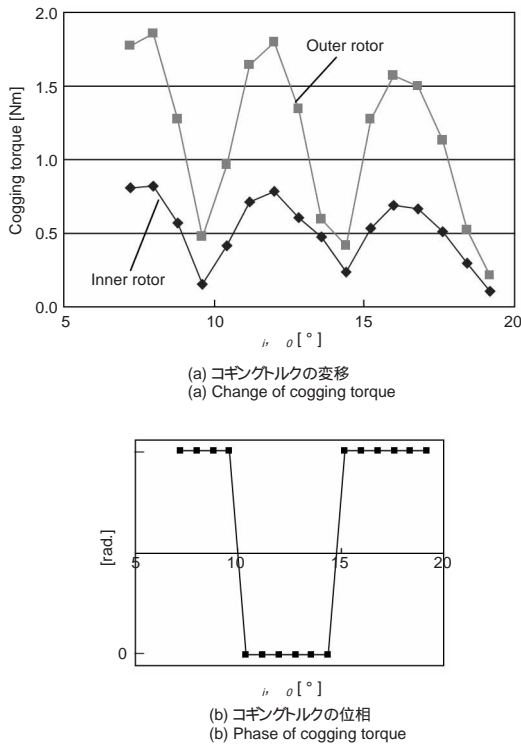
- T_i : インナーロータのコギングトルク振幅
- T_o : アウターロータのコギングトルク振幅
- N : スロット数と極数の最小公倍数
- : ロータ位置
- : 位相

(1) 式より、モータのコギングトルク T_{cog} は、 T_{i-cog} と T_{o-cog} の合計で表されることから、 $T_i = T_o = T$ で、なおかつ、位相が反転する T_{i-cog} と T_{o-cog} の組み合わせにすることで、(2) 式に示すように、コギングトルク $T_{cog} = 0$ とすることが可能であると考えられる。また、コギングトルクに高調波成分を多く含む場合は、本稿で提案している方法と同様に、高調波成分同士が打ち消しあうように、ティ-

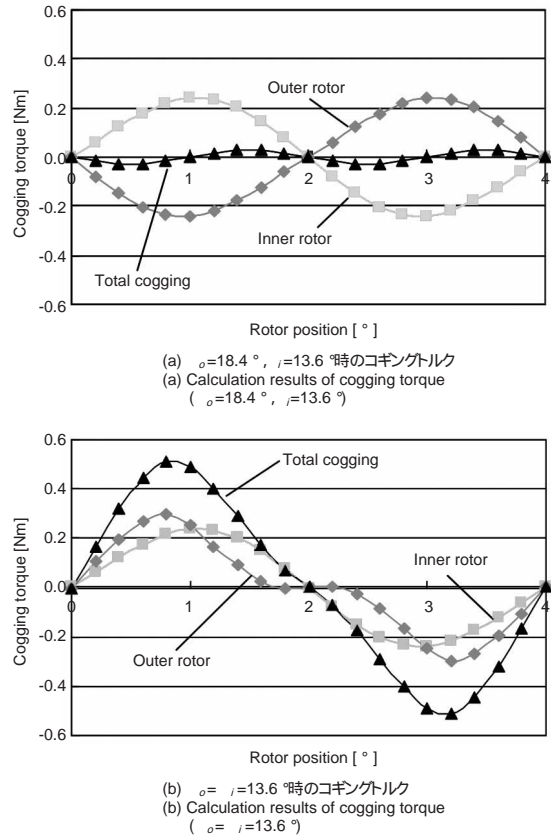
ス先端角度を組み合わせればよい。しかし、本稿では簡略化のために基本波成分のみで検討を行っている。

$$T_{cog} = T \sin N \theta_o + T \sin N(\theta_o + \theta_i) = 0 \dots \dots \dots (2)$$

そこで、アウターとインナーのティース先端角度 θ_o 、 θ_i を $7.5^\circ \sim 19.5^\circ$ まで変化させた場合のコギングトルク T_{i-cog} 、 T_{o-cog} を第8図 (a) に、位相 ϕ の変化を第8図 (b) に示す。第8図より、コギングトルクが最小となる変極点付近で、位相が反転していることが確認できる。以上のことから、アウターティース先端角度 θ_o を $7.5^\circ \sim 10^\circ$ 、 $15^\circ \sim 19.5^\circ$ の範囲とした場合、インナーティース先端角度 θ_i を $10^\circ \sim 15^\circ$ の範囲にすれば、位相を反転させることができる。また、同様にアウターティース先端角度 θ_o を $10^\circ \sim 15^\circ$ の範囲とした場合、インナーティース先端角度 θ_i を $7.5^\circ \sim 10^\circ$ 、 $15^\circ \sim 19.5^\circ$ の範囲にすれば、位相を反転させることができる。さらに、位相が反転している範囲内で、コギングトルクの値が同等となる θ_o 、 θ_i を選定すればよいと考えられる。よって、この場合、 $\theta_i = 13.6^\circ$ 、 $\theta_o = 18.4^\circ$ とすることで、コギングトルクを最小にすることが可能であると考えられる。また、上記の条件のときのコギングトルクを磁界解析により求めた波形を、第9図 (a) に示す。また、従来の設計法と比較する



第8図 ティース先端角とコギングトルクの関係
Fig. 8 Relation between teeth angle and cogging torque



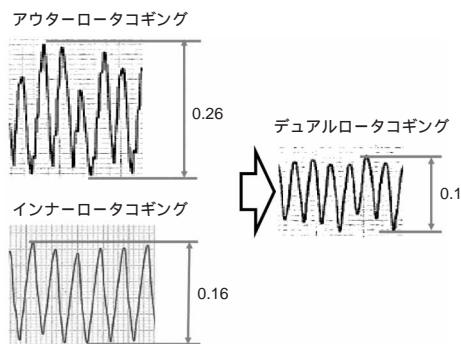
第9図 コギングトルクを磁界解析結果
Fig. 9 Finite element analysis results of cogging torque

ために、第9図 (b) に $\theta_i = \theta_o = 13.6^\circ$ の時のコギングトルク波形を示す。第9図から、本稿で提案する手法を用いた場合に、コギングトルクを95%低減することが可能であることが確認できた。

4.2 実機によるコギングトルク低減の検証

4.1節で述べたとおり、理論上は θ_o 、 θ_i を最適化することでコギングトルクはほぼ0にすることができる。しかし、実際にはコアの精度や組み立てのばらつきにより、若干コギングトルクは発生することが予想される。

そこで、コギングトルクキャンセル方式の有用性を確認するために、実機による特性確認を行った。アウターロータとインナーロータによるコギング成分の打ち消し効果を検証するため、片方のロータを取り外し、片方のロータのみでコギングトルクを測定した。第10図に、アウターロータのコギングトルク、インナーロータのコギングトルク、デュアルロータのコギングトルクを示す。第10図より、アウターロータのコギングトルクと、インナーロータのコギングトルクの打ち消し効果によって、片方のロータのみを用いるときよりも、デュアルロータ構造を用いることでコギングトルクを低減可能であること

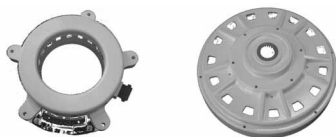


第10図 コギングトルクの実測結果
Fig. 10 Cogging torque measurement results

が確認できた。以上のことから、デュアルロータ構造モータでのコギングキャンセル方式が有効であることが確認できた。

5. 製品への展開

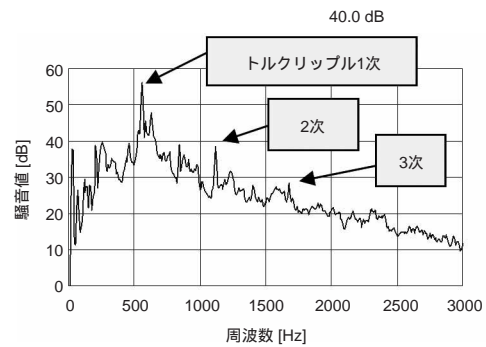
上述した技術を洗濯機用モータに展開し、開発したモータの概観と出力密度を、第11図に示す。内外ロータの2つのトルク発生原理を足し合わせることで、従来のシングルロータ構造のモータに比べ、出力密度を1.5倍、体積を40%小型化することができた。



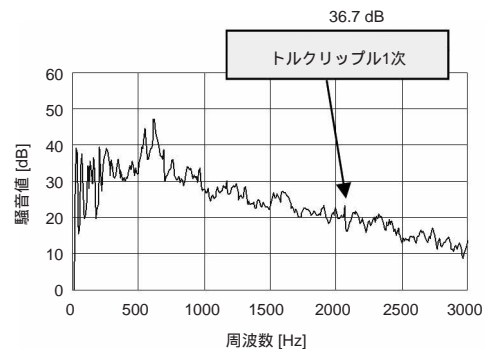
第11図 開発モータの概観と出力密度

Fig. 11 Dual rotor IPMSM and power density comparison

コギングトルクの低減効果や、ラジアル力の低減効果を確認するために、洗濯機に組み込んだモータの騒音測定を行った。第12図(a)に従来のシングルロータ構造のモータ騒音、第12図(b)に開発したトロイダル巻デュアルロータ構造のモータ騒音測定結果を示す。コギングトルクとトルクリップルを低減したことにより、3 dBの低騒音化を実現できた。



(a) 従来モータ
(a) Conventional motor



(b) 開発モータ
(b) Development motor

第12図 騒音特性結果

Fig. 12 Noise measurement results

6. まとめ

本稿では、小型・高出力密度化、低騒音化に対する取り組みとして、

- (1) トロイダル巻線デュアルロータ構造モータの基本構造
- (2) コギングトルクキャンセル方式

について報告し、従来モータに対して、出力密度1.5倍で低騒音な洗濯機駆動用DDモータを実現することができた。今後は、本技術を空調用モータなどへ応用展開していく。

参考文献

- 1) 本田幸夫 他：リラクタンストルクの有効利用をめざした多層埋込磁石構造PMモータ 電気学会論文誌D 117, No.7, p.898 (1997).
- 2) 村上浩 他：鉄損を考慮した集中巻IPMSMの回転子構造に関する一考察 電気学会論文誌D 121, No.5, p.597 (2001).
- 3) Roughai Qu, et al.: Dual-rotor, radial-flux, toroidally-wound permanent-magnet machines. IEEE Trans. On Ind. Applications 39, No.6, pp.1665-1673 Nov./Dec. (2003).

著者紹介



森崎昌彦 Masahiko Morisaki
モータ社 家電電装モータビジネスユニット
Home Appliance and Automotive Motor Business
Unit, Motor Company



吉川祐一 Yuichi Yoshikawa
モータ社 モータ開発研究所
Motor R&D Lab., Motor Company



田代裕一郎 Yuichirou Tashiro
モータ社 家電電装モータビジネスユニット
Home Appliance and Automotive Motor Business
Unit, Motor Company



李 虎 Hu Li
モータ社 モータ開発研究所
Motor R&D Lab., Motor Company