

技術論文

新規巻線を活用した電動モータの性能検証およびその可能性

Verification of Electric Motor using First Adopted Winding and its Feasibility Study

土方 大樹
Hiroki Hijikata
石井 雄己
Yuki Ishii
平間 浩之
Hiroyuki Hiramama

建設機械用のモータでは、高出力化や小型化などによる出力密度の向上が求められている。コマツでは巻線の密度（占積率）を向上したモータの開発に取り組んでいる。巻線の占積率向上により、モータの高出力化や小型化だけでなく、冷却性能向上も実現できる。本稿では平板線と呼称する新規巻線を使用したモータの評価結果と建設機械への適用可能性について報告する。

In motors for construction machinery, there is a need to increase power density by increasing power or reducing motor size. Komatsu is working on the development of a motor with increased winding density (fill factor). Increasing the fill factor of a coil not only allows a motor to be more powerful or smaller, but also improves its cooling performance. This paper reports on the performance of a motor using a winding called "flat wire" winding, which we used for the first time in our motors, and its effects.

Key Words: 電動モータ, スイッチトリラクタンスモータ, 巻線

1. はじめに

近年、地球温暖化問題や燃料費高騰の対応として、自動車ではハイブリッド車や電気自動車が販売されている。建設機械においても、コマツは2008年よりハイブリッド油圧ショベルを販売してきた。ハイブリッド油圧ショベルに搭載される電動モータは、車体の旋回動作に用いる旋回モータと、エンジンの動力から発電し、かつ加速アシストを行う発電モータの2種類が使用される。特に発電モータはエンジンと油圧ポンプの間にビルドインした構成であるため、限られたスペースで高いモータ出力の実現、つまり出力密度の向上が求められている。

上記の要求に対して、コマツでは巻線の密度（占積率）を向上したモータの開発に取り組んでいる。巻線の占積率向上により、モータの高出力化や小型化だけでなく、冷却性能向上も実現できる。本稿では平板線と呼称する新規巻線を使用したモータの性能とその効果について報告する。

2. 発電モータの構成

発電モータはSR（Switched Reluctance）モータを採用している。SRモータは永久磁石を使用しないため、耐熱性に優れる特徴を有している。この優れた耐熱性により、高温となるエンジンと油圧ポンプの間にビルドインしたモータの信頼性を高めている。ま

た、永久磁石が無い場合、エンジンアシストや発電を行わない空転時の連れ回り損失が非常に小さく、車体の燃費低減に貢献している。

SRモータは図1に示すように、主に電磁鋼板と巻線から構成される。ステータの電磁鋼板に巻き回された巻線に電流を通電することで、電磁力が発生する。この電磁力にロータが引き寄せられることでトルクが発生する。巻線に流れる電流のオン/オフに伴い、電磁力もオン/オフが繰り返され、ロータ自体が連続的に回転する。この現象をトルク式で表すと、下記で説明できる^[1]。

$$T = \frac{1}{2} i^2 \left(\frac{\partial L}{\partial \theta} \right) \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 T : トルク、 i : 巻線に通電する電流、 L : インダクタンス、 θ : ロータ角度とする。また、SRモータの損失式を下記に示す。

$$P = P_{dc} + P_{ac} + P_i + P_m \dots \dots \dots (2)$$

ただし、 P ：モータ損失、 P_{dc} ：巻線の直流銅損、 P_{ac} ：巻線の交流銅損、 P_i ：電磁鋼板に生じる鉄損、 P_m ：機械損とする。本稿では巻線で生じる損失 P_{dc} および P_{ac} に着目した検討を実施する。

直流銅損は巻線に通電する電流と巻線抵抗から下記の式で表すことができる。

$$P_{dc} = Ri^2 \dots\dots\dots (3)$$

$$= \rho \frac{l}{S} i^2 \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 R ：巻線抵抗、 ρ ：巻線材料の抵抗率、 l ：巻線の長さ、 S ：巻線の断面積とする。

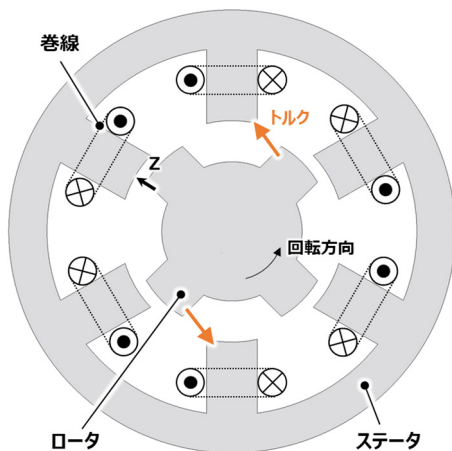


図1 SRモータの構造

次に交流銅損は巻線に鎖交する磁束が変化することで生じる損失であり、鉄損の渦電流損式と同様に下記の式で表すことができる^[2]。

$$P_{ac} = k_e \frac{(tfB_m)^2}{\rho} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 k_e ：渦電流損係数、 t ：磁束に垂直な方向の巻線厚さ、 B_m ：磁束密度最大値、 f ：周波数とする。式(4)および式(5)より、巻線の損失は下記3種に大別できる。

- ・ モータの動作点に依存： i, f, B_m
- ・ 巻線材料に依存： ρ, k_e
- ・ 巻線形状に依存： B_m, l, S, t

これらの分類をもとに、発電モータに適した平板線構造を検討する。

3. 平板線

3.1 平板線の特徴

従来巻線と平板線の断面構造の比較を図2に示す。スロットと呼ばれる巻線を配置する箇所において、従来巻線は断面が円形状のため、不要な隙間が生まれてしまい、占積率が低くなり、結果的にモータ全体の冷却性能も低下してしまう。一方の平板線は断面が四角の板形状のため、隙間を減らす事で占積率を高めることができ、冷却性能向上が期待できる。

また平板線は、巻線形状に依存するパラメータのうち、巻線の断面積 S を任意に変更できる特徴がある。巻線厚さ t を一定とすると、図1中のZ方向から見た巻線概略図(図3)で示す巻線幅Aと巻線幅Bをそれぞれ別の寸法に設計することができる。この特徴を利用することで、例えば最小の巻線幅Aとなる超扁平小型モータや、大きな巻線幅Aによる冷却性能向上、高出力化などさまざまな付加価値の実現が期待できる。本稿では巻線構造の違いによる冷却性能の比較を報告する。

	従来巻線	平板線
スロット断面形状	ステータコア 	ステータコア
占積率	低い	高い
放熱性	低い	高い

図2 従来巻線と平板線の比較

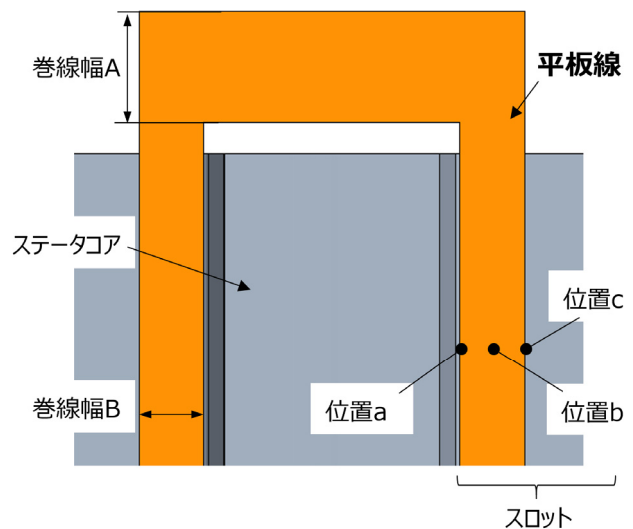


図3 巻線形状の概略図

3.2 巻線設計

冷却性能の比較を行うため、式(1)で示したトルクや、式(2)で示した損失を量産機と同等となるように設計する。電磁鋼板の形状、巻線材料、通電電流などを従来のモータと等しくした上で、交流銅損 P_{ac} の検討を行う。巻線形状に依存するパラメータのなかで磁束密度の最大値 B_m と巻線厚さ t の水準を設けて設計する。計算には有限要素法を用いた電磁界解析ソフトJMAG-Designerを使用する。

(1) 磁束密度の検討

前述したように B_m はモータの動作点に依存して増減する。一方で、スロットでは磁束密度の分布が生じるため、損失抑制のための巻線配置を検討する。計算に用いる動作点は最大出力時とする。軸方向に磁束密度の分布はないものと仮定し、円筒座標系の径方向成分と周方向成分それぞれを算出する。測定点は図3に示したスロット内の3点とする。

- ・ 位置a：ステータコア付近
- ・ 位置b：位置aと位置cの中間点
- ・ 位置c：ステータコアから最も離れた位置

磁束密度の計算結果を図4に示す。位置aにおける磁束密度の周方向成分を100%として比率で示す。位置aで示したステータコアに近いほど磁束密度が高くなり、位置cで示したステータコアから離れた位置では半減していることがわかる。径方向と周方向ともに同様の傾向である。一方で、径方向成分では周方向成分と比較して磁束密度が4割程度と低いことがわかる。つまり磁束密度の周方向成分による損失が支配的になるため、この損失を抑える巻線構造が必要と言える。以上より、周方向の巻線厚さ t を小さくし、かつ、ステータコアから離れた位置に巻線を配置する構造で設計を行う。

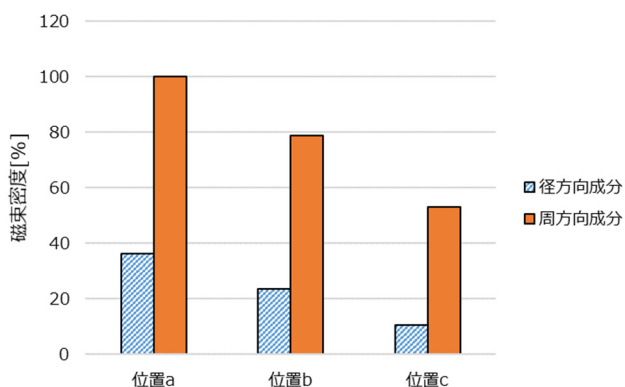


図4 巻線の磁束密度

(2) 巻線厚さの検討

巻線厚さ t を変更した際の損失比較を行う。直流銅損を従来巻線と同等となるように巻線幅AとBを調整して巻線断面積 S を変更する。計算に用いる動作点は同様に最大出力時とする。厚さ毎の損失解析結果を図5に示す。直流銅損を100%として比率で示す。同図より t の変更によって交流銅損が増減することがわかる。今回設計のモータにおいては、巻線厚さ1.5mmの場合に交流銅損が最小になることがわかる。以上より巻線厚さは1.5mmとして、位置aから離れた形状の巻線設計を行う。

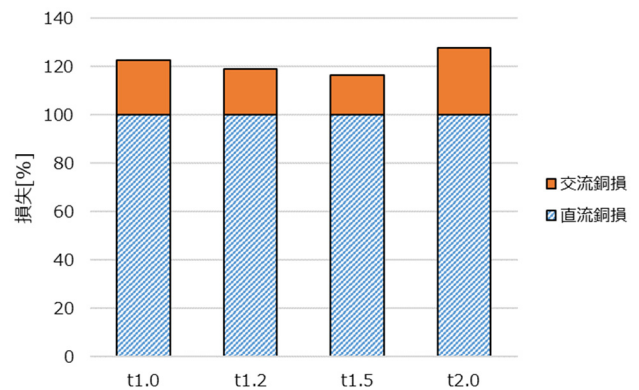


図5 巻線の損失比較

4. 実機評価結果

従来巻線を用いたモータを量産機，平板線を用いたモータを開発機として，実機実験にて評価を行う。本稿では絶縁性能，モータ性能，冷却性能の3点を示す。一般的に絶縁性能と冷却性能はトレードオフの関係にあるため，開発機が量産機と同等の絶縁性能を有していることを示す。次にモータ性能において，開発機と量産機が同等のモータ損失，つまり同等の発熱であることを示す。そのうえで，開発機は量産機よりも優れた冷却性能を有していることを示す。

4.1 絶縁性能

最初に絶縁性能の評価結果を図6に示す。建設機械に対する耐環境試験3種類を実施したあとの部分放電開始電圧を示しており，判定値を100%として比率で示す。同図より，すべての試験において判定値以上であり，平板線を使用した場合でも量産機と同等の絶縁性能を有していることが確認できる。

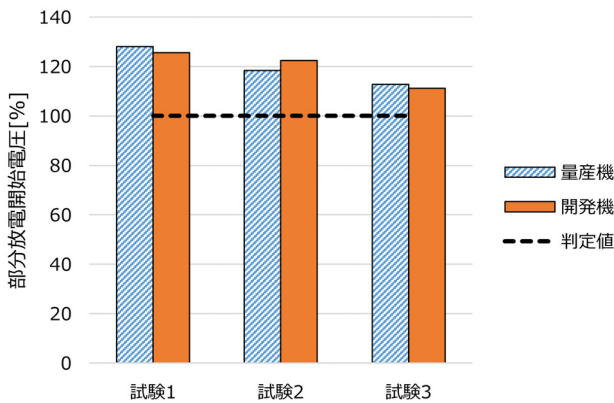


図6 絶縁評価結果

4.2 モータ性能

次にベンチ試験によるモータ性能評価結果を示す。図7に示すベンチ試験の構成であり，電圧や通電電流は量産機と開発機で等しい条件で試験を実施する。パワーアナライザを用いて，モータ入力とモータ出力の差からモータ損失 P を測定する。動作点は下記の3点とする。

- ・ 動作点1：低速大トルク
- ・ 動作点2：中速大トルク
- ・ 動作点3：高速中トルク

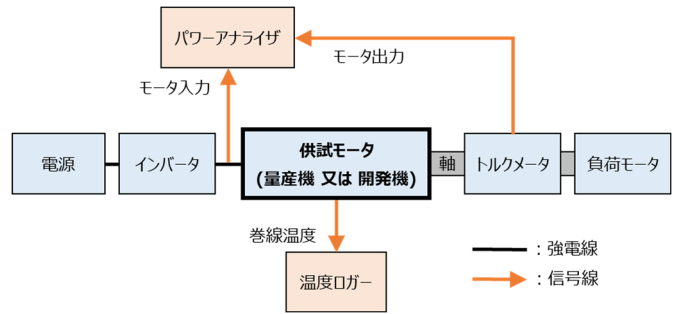


図7 ベンチ試験の構成

測定結果を図8に示し，それぞれの動作点の判定値100%として比率で示す。同図より，動作点1および動作点2において，開発機の損失が数パーセント増加していることがわかる。今回の設計では式(2)で示した損失のなかで， P_{dc} ， P_i ， P_m は量産機と開発機を同程度に揃えることができたが，一方で， P_{ac} を完全に揃えることが出来なかったと言える。理由は，最大出力時の動作点で P_{ac} が最小になるよう設計したが，他の回転数やトルクでは量産機同等まで小さくすることが出来なかったためと考えられる。特に大トルク時には式(5)で示した B_m が変わったため，開発機の損失が量産機よりも大きくなったと言える。開発機の巻線の発熱が量産機よりも数パーセント高い条件ではあるが，上記の駆動条件で冷却性能の評価を行う。

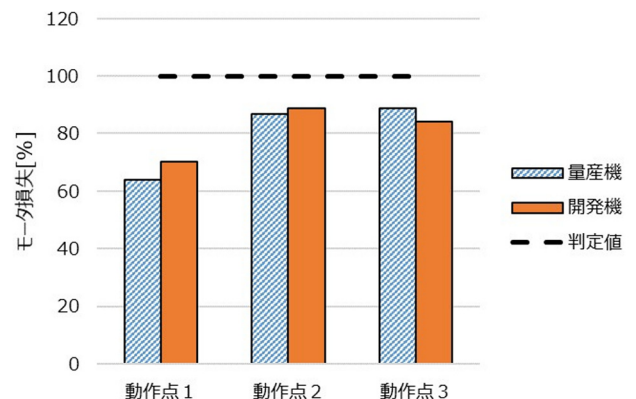


図8 損失測定結果

4.3 冷却性能

モータ損失の比較結果を踏まえ、冷却性能の評価を行う。巻線に複数の熱電対を取り付け、**図7**に示したように温度ロガーにて巻線温度を測定する。試験条件は前述した動作点2を用い、回転数は一定とする。トルクを変化させることで出力を増減した水準で試験を行う。

試験結果を**図9**に示す。長時間連続出力を行い、ヒートバランスした際の巻線の最高温度をプロットしたものである。同図より、低出力から高出力までのすべての動作点において、開発機の巻線温度が低下しており、最大で9%の温度低下が確認できたことがわかる。開発機の方が発熱の大きい条件にもかかわらず、巻線の温度は抑えられたため、平板線の高い冷却性能が確認できたと言える。本稿では同一回転数の結果のみを記載したが、他の動作点でも同様の結果が得られている。以上の結果から、平板線を使用した開発機の冷却性能向上を示すことができた。

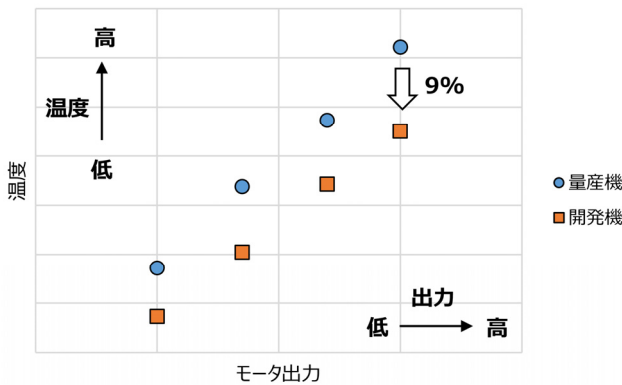


図9 ヒートバランス温度測定結果

5. おわりに

本稿では新たな巻線である平板線を使用したハイブリッド油圧ショベル用発電モータの検討結果を報告した。平板線は断面積 S を任意に変更できる特徴があり、量産機と同等の絶縁性能やモータ性能を達成可能であることを示した。更に発熱が大きい条件であるにもかかわらず、冷却性能においては量産機よりもヒートバランス温度を抑制できることを明らかにした。

本稿の検討において比較障害を無くすため、量産機と同等の損失になるよう開発機を設計し、冷却性能比較を実施した。平板線のポテンシャルを活かして巻線損失が最小となる設計をすることで、更なる性能向上が期待できる。今回の検討を発展することで、例えば温度抑制を活かしたモータなど電動コンポーネントの寿命向上、冷却性能向上を活かした同体積モータの高出力化や同出力モータの小型化、冷却システム簡易化によるコスト低減など、さまざまな付加価値の実現が期待できる。

また近年では、バッテリーで駆動する電動建設機械の開発が活発に行われている。特に欧州を中心とした都市土木用の小型建設機械では、電動コンポーネントの小型化や低コスト化が求められている。本稿で提案した平板線技術の今後の展望として、ハイブリッド油圧ショベルに加え、このようなバッテリー建設機械用の電動モータへの展開も考えられる。今後はさまざまな電動化の形態がある建設機械に対して、平板線を使用したモータの搭載検討を進めていく。本当の意味での成果は市場導入してからのお客さま評価であり、その日が来るのを待ち遠しく思う。

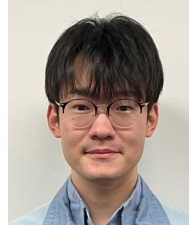
参考文献

- 【1】 森本雅之, 松井信之, 武田洋次, “リラクタンストルク
応用電動機 リラクタンストルク応用電動機の現状と動
向”, 電気学会論文誌D, 1999年, Vol. 119,
p.1145-1148
- 【2】 森本雅之, “入門モーター工学”, 森北出版株式会社,
2013年, P.55-57

筆者紹介



Hiroki Hijikata
ひじ かつ ひろ ます
土方大樹 2017年, コマツ入社.
開発本部 電動化開発センタ所属



Yuki Ishii
いし い ゆう ます
石井雄己 2019年, コマツ入社.
開発本部 車両第一開発センタ所属



Hiroyuki Hirama
ひら ま ひろ ゆき
平間浩之 2005年, コマツ入社.
開発本部 電動化開発センタ所属

【筆者から一言】

油圧モータよりも出力密度が低い電動モータの更なる高出力化, 小型化, 低コスト化は必要不可欠である。巻線だけで解決できる課題ではないが, 将来的な建設機械全体の電動化に貢献していきたい。