

概要

駆動用モータは低速低負荷運転から高速回転まで幅広い運転領域で高効率が求められ、効率マップで特性が評価される。駆動用モータの最高効率は95%以上であり、1%オーダーでの改善検討が行われているため、モデルベースでモータの性能を評価するためには精度として実測に対し誤差1%以内が要求される。

本稿では、シミュレーションベースの効率マップと実測の効率マップの比較を行い、2つの効率マップの差異および差異を生じている要因を分析した。結果、PWM キャリアによる高調波鉄損と交流銅損の影響が比較的大きいことが分かった。

1. 課題

自動車駆動用など高効率モータの開発、設計において、試作レスを目指しシミュレーションで検証、性能評価を可能とするためには、シミュレーションの効率には1%以内の誤差が要求される。モータの効率は出力、言い換えればトルクと損失から導出される。ここで効率1%誤差を達成するためにトルクおよび損失に許容される誤差を見積もると表1になる。トルクと同程度の精度が損失にも求められることがわかる。

一般的にシミュレーションは2次元モデルで応力や加工がない理想的な状態で行われる。結果として実測のマップと差異が生じる。それはモータの効率を決める損失要因を十分に考慮しないためである。例えば、モータを駆動するPWM インバータによる時間高調波（以下キャリア高調波）の影響^{[1][2]}、近年車両駆動用モータで採用例が多い角線によるヘアピンコイル中の渦電流損失^[3]（以下交流銅損）である。さらに、モータのコアを電磁鋼板で製造する際に加わる応力^[4]や加工歪^{[5][6]}により実機では素材の電磁鋼板の損失が増大する（いわゆるビルディングファクター）。効率1%の誤差達成のためにはこれらの要因を考慮する必要がある。

表1 効率誤差1%を達成するために許容される誤差

	トルクの許容誤差(%)	損失の許容誤差(%)
効率90%の場合	10	11
効率95%の場合	18	21

2. 検証用モータ

ここでは効率マップを評価するモータおよびモータを駆動する制御/インバータを説明する。実機の提供及び測定はスズキ株式会社が担当した。

効率マップ測定比較

2.1 モータ

実機検証に用いたモータは埋込型永久磁石同期モータであり、形状（全体の 1/8 部分）を図 1 に示す。モータの仕様の一部を表 2 に示す。

2.2 制御/インバータ

図 2 に制御/インバータのブロック図を示す。制御系ではモータの電流が電流ベクトル指令値となるように PI 制御で電圧指令値を生成している。dq 軸の非干渉制御項を考慮している。PWM インバータは三角波比較法を用いておりキャリア周波数は 12kHz である。また、4 μ s のデッドタイムを設けた。

表 2 検証用モデルの仕様

項目	値
極数	8
スロット数	48
最大トルク/最大出力	30Nm/10kW
磁石	希土類焼結磁石

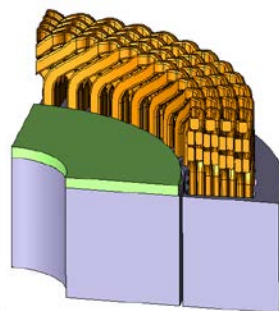


図 1 効率マップ評価対象モータ（全体の 1/8 部分）

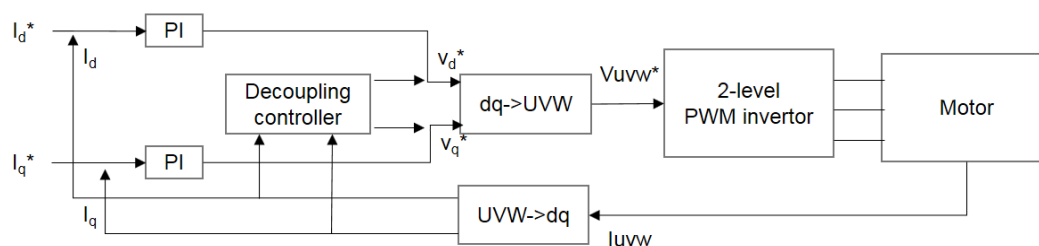


図 2 制御/インバータのブロック図

効率マップ測定比較

3. 測定システム

測定に用いたシステムを図3に示す。対象モータはダイナモで速度制御される。鉄損はトルク計にて測定したトルクに回転数を乗じた出力から電力計で計測した電力、コイルの温度で補正した巻線抵抗から算出した直流銅損、機械損を差し引くことで求める。そのため、実測の鉄損内にはコアの鉄損以外のコイルの交流銅損やその他の漂遊損失が含まれていることになる。効率の測定範囲は回転数 2,000~12,000rpm、負荷 2~30Nm である。マップ上の格子点における動作条件（電流指令値）は最大トルク/最小電流法をベースとして決めた。

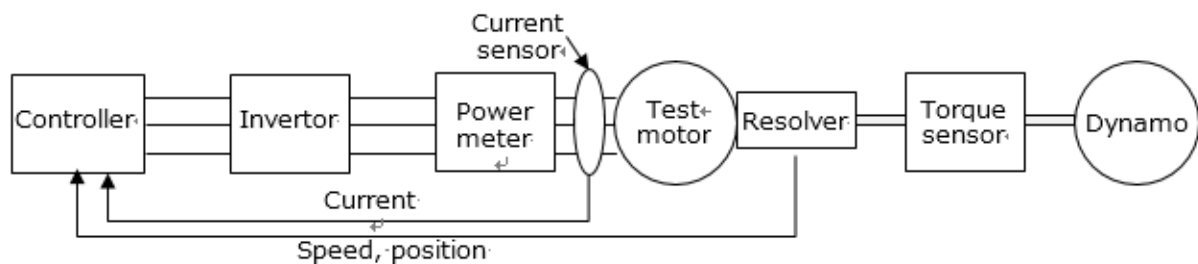


図3 測定システム

4. シミュレーションモデル

今回、モータの損失、効率の精度を左右する要因を分析するために、それらの要因を考慮しないモデル（以下、ベースモデル）と考慮したモデル（以下、高精度モデル）の2つのモデルで効率マップの計算を行い、実測と比較した。ここでは2つのモデルおよび解析に用いた手法を説明する。表3に両者の比較をまとめる。

4.1 ベースモデル

ベースモデルは二次元解析モデルである。磁界解析モデルを図4に示す。ベースモデルには正弦波電流を通電し、制御/インバータは考慮しない。コイルの素線はモデル化せず、交流銅損を考慮しない。コアの磁気特性、鉄損特性は素材の電磁鋼板そのままの特性を用い、ビルディングファクターを考慮しない。また、鉄損の計算方法は拡張スタインメッツ法を使用した。

表 3 ベースモデルと高精度モデルの比較

	ベースモデル	高精度モデル
モデル次元	二次元	二次元/三次元併用
電流	正弦波	インバータキャリアを考慮
交流銅損	未考慮	スロット内コイルは二次元モデル コイルエンド部は三次元モデルで考慮
磁気特性、鉄損特性	素材特性	ビルディングファクターを考慮
鉄損モデル	拡張スタインメッツ法	プレイモデル+1D 法
ステータコア表面渦電流損	未考慮	三次元モデルで考慮

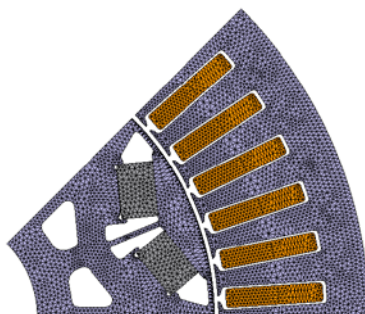


図 4 ベースモデルのメッシュ分割図

4.2 高精度モデル

高精度のモデルの磁界解析モデルを図 5 に示す。高精度モデルでは図 6 に示す様な連成の仕組みで図 2 に示した制御/インバータもモデル化し、PWM キャリア成分を考慮した。電流制御系の指令値は実測と合わせた。コイルの素線 1 本 1 本をモデル化し、交流銅損を考慮する。コアの磁気特性、鉄損特性はビルディングファクターとして応力と加工歪を考慮する。また、鉄損の計算方法はマイナーループの損失が拡張スタインメッツ法より正確なプレイモデル+1D 法に異常渦電流損失モデルを加えた手法^[7]を用いる。

高精度モデルでは効率マップ全体は二次元解析で評価するが、二次元解析で評価できないコイルエンド部の交流銅損、漏れ磁束によるコア表面の面内渦電流損に関しては低速（低負荷、高負荷）、最高効率、中速、高速の代表 5 点で三次元解析を行い、二次元解析に対する補正値を見積もった。

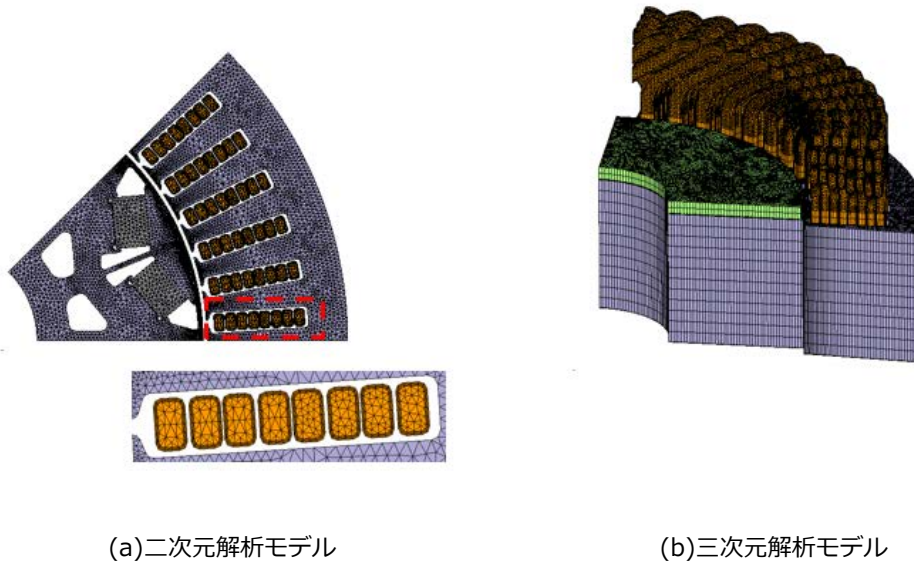


図 5 高精度モデルのメッシュ分割図

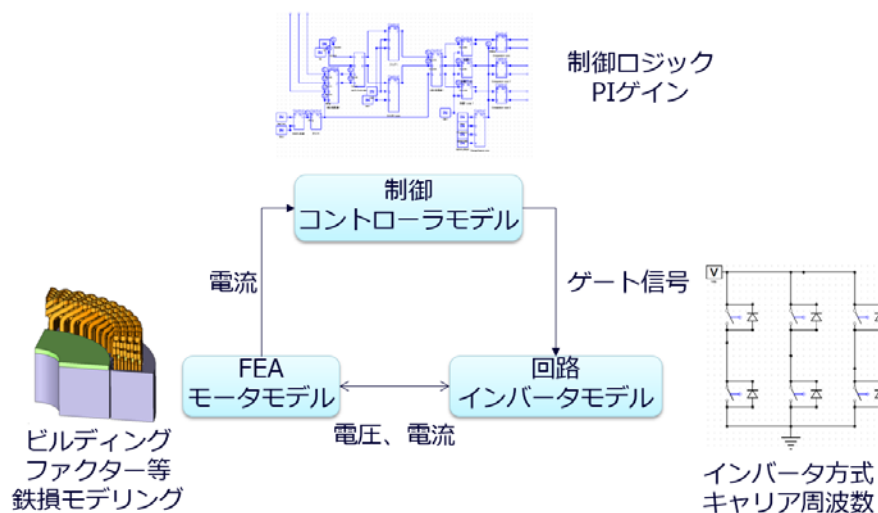


図 6 高精度モデルの連成解析手法

4.3 高精度モデルの時刻刻み、メッシュ分割検討

高精度モデルでの FEA/回路解析の時間刻みは PWM の搬送波（三角波）のピークをサンプリングできるように 4 の整数倍であることが望ましい。事前検証でキャリアの影響が大きい低速、低負荷条件でキャリア 1 周期(=1/12,000 s)を 8 分割では精度不足で、24 分割は 12 分割と 1%程度の差に収まっていたため 12 分割を採用した。PWM キャリアによる鉄損を解析することが目的の 1 つであるため、キャリア 1 周期に対する

効率マップ測定比較

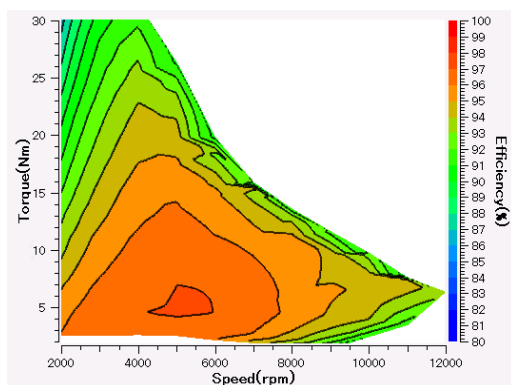
分割数は回転数によらず固定とした。したがって低速ほどモータの電気角 1 周期に対する解析ステップ数が多く、高速ほど少ないことになる。

コイルの電流分布による交流銅損を評価するためにコイル表面には厚さ 0.2mm を 4 分割した層状のメッシュを作成した。この分割数は事前検討でコイルの渦電流分布を求め、その分布を表現できる分割数をコストと精度の観点から決めた。

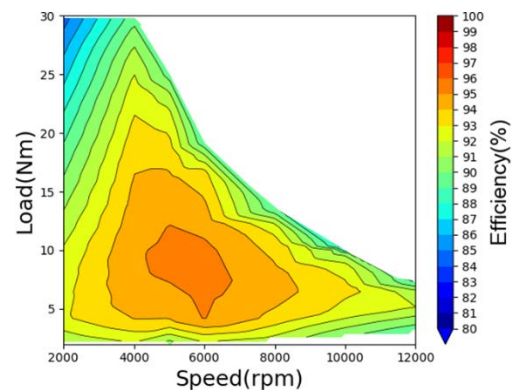
5. 効率マップ比較結果

5.1 ベースモデルの効率マップ

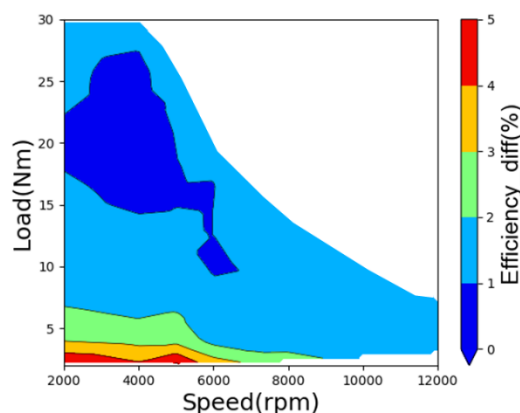
ベースモデルで得られる効率マップと実測との比較を図 7 に示す。ベースモデルでは実測効率と低速/低負荷で 4% 以上、それ以外の領域では 2% 以上の差となっており、ほとんどの点で要求精度を満たしていない。



(a) ベースモデル



(b) 実測



(c) ベースモデルと実測の差

図 7 ベースモデルの効率マップ

効率マップ測定比較

5.2 高精度モデルによる効率マップの高精度化

ここではベースモデルに対し、実測との差を生じている鉄損の構成成分を高精度モデルで加えることで効率マップが高精度化されることを示し、各構成成分による寄与度を分析する。

5.2.1 PWM キャリアによる高調波鉄損

PWM キャリアによる鉄損の増加率を図 8 に、効率マップ（ベースモデルに PWM キャリアの寄与を加えたマップ）を図 14-(b)に示す。今回、回転数に寄らずキャリア周波数は全域で一定としたため、キャリアによる鉄損は回転数や負荷に大きく依存しない。そのため、キャリア成分の寄与は低速ほど大きくなっている。効率マップはおよそ 5,000rpm 以下の低負荷領域で変化が大きい。

5.2.2 交流銅損

ベースモデルの銅損に対する交流銅損の増加率(交流銅損/直流銅損)を図 9 に、効率マップ（ベースモデルに PWM キャリア、交流銅損の寄与を加えたマップ）を図 14-(c)に示す。交流銅損は主としてスロット漏れ磁束やギャップからスロット開口部を通して侵入する磁束がコイルに鎖交することによって生じるため、周波数、すなわち回転数が高いほど寄与が大きくなっている。また、直流銅損が低いほど交流銅損の寄与が相対的に大きくなるため、弱め磁束に移行し、電流が増加する直前の 6,000rpm、2Nm 付近でも寄与が高くなっている。効率マップでは 5,000rpm 以上で変化が見られ、高速ほど影響が大きい。

5.2.3 応力

フレーム焼嵌時の応力による鉄損増加率を図 10 に、効率マップ（ベースモデルに PWM キャリア、交流銅損、応力の寄与を加えたマップ）を図 14-(d)に示す。応力は主にヒステリシス損失を増加させるため、低速域で寄与が大きくなっている。また、負荷に関しては高負荷で磁束密度が飽和に近づくことと応力の影響が小さくなること、負荷が下がると圧縮応力が加わるバックヨークの鉄損が低くなることから中間の負荷で寄与が高くなる傾向にある。効率マップへの寄与は全体に影響があるが、低速でやや大きい。

5.2.4 加工歪

加工歪による鉄損増加率を見積もった結果を図 11 に、効率マップ（ベースモデルに PWM キャリア、交流銅損、応力、加工歪の寄与を加えたマップ）を図 14-(e)に示す。本モータでは応力よりは影響が小さい。低負荷ほどやや影響が大きくなるのは、歪の鉄損に対する影響が低磁束密度ほど大きいためである。効率マップへの寄与は応力よりは小さいが全体的に効率を下げている。

5.2.5 表面渦電流損

三次元モデルで評価されるステータコア表面の渦電流による鉄損の増加率を図 12 に、効率マップ（ベースモデルに PWM キャリア、交流銅損、応力、加工歪、表面渦電流の寄与を加えたマップ）を図 14-(f)に示す。面内渦電流損失は概ね回転数の二乗に比例するため高速ほど影響が大きく、またコアロスが低下する低負荷ほど影響が大きくなる。効率マップへの影響は小さいが、高速域でやや低下している。

5.2.6 マイナーループ

プレイモデル+1D 法によってマイナーループ損失の精度を向上させることによる鉄損の増加率を図 13 に、効率マップ（ベースモデルに PWM キャリア、交流銅損、応力、加工歪、表面渦電流、鉄損計算手法の寄与を加えたマップ）を図 14-(g)に示す。本モータでは最大で低速/低負荷領域の 5%程度と鉄損計算手法による差異は小さかった。本モータではキャリア周波数が 12kHz と比較的高く、渦電流損失が支配的でプレイモデルの寄与が小さいこと、磁束波形が歪む進め位相領域ではメジャーロープの振幅が 1T 以下でマイナーループの直流重畳の影響が小さいことが原因として考えられる。

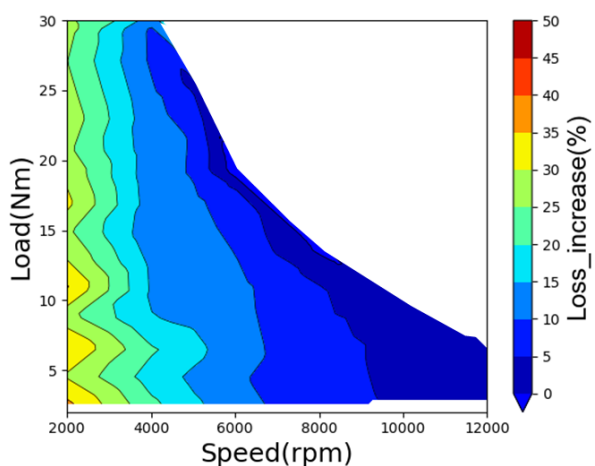


図 8 PWM キャリアの寄与

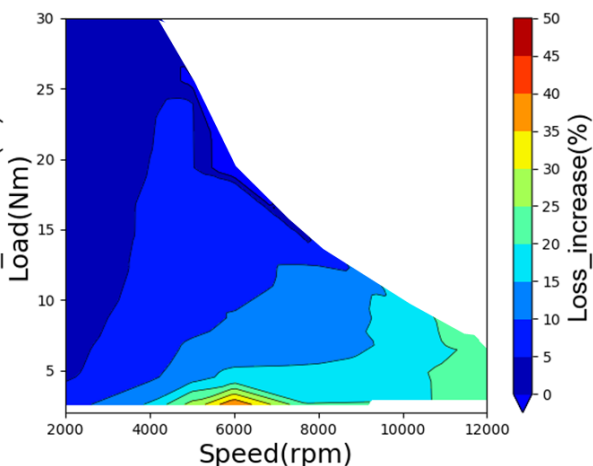


図 9 交流銅損の寄与

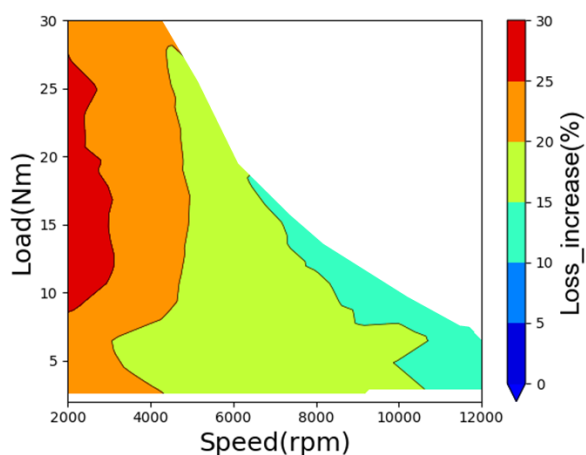


図 10 応力の寄与

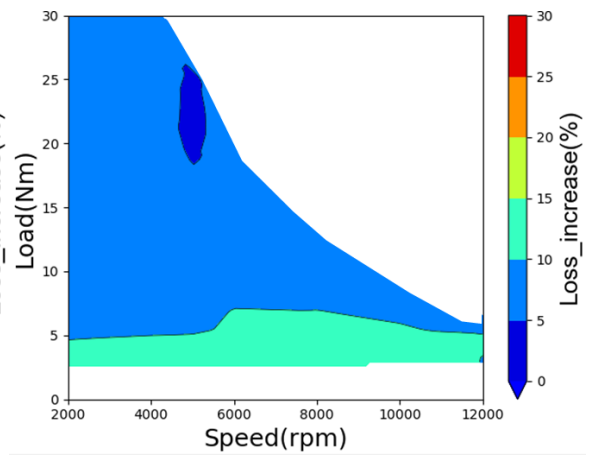


図 11 加工歪の寄与

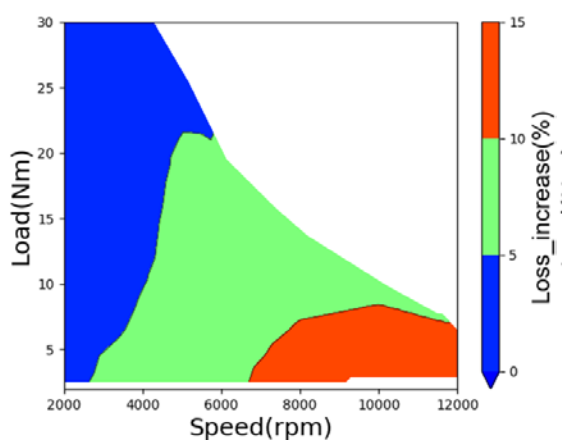


図 12 表面渦電流の寄与

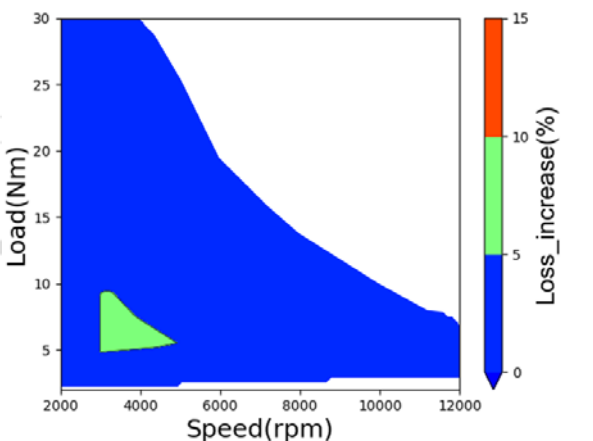
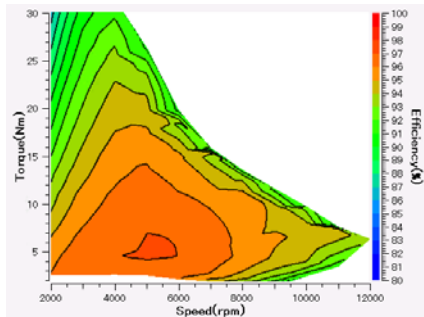
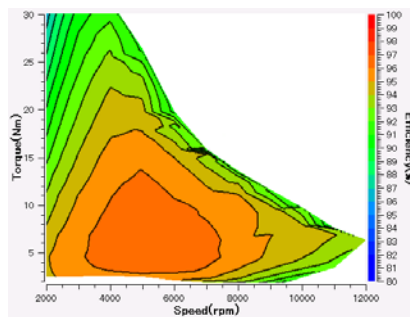


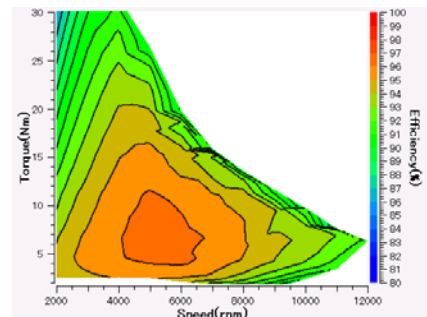
図 13 マイナーループの寄与



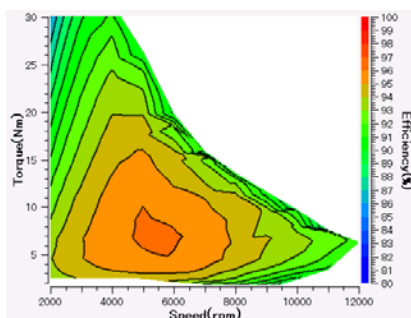
(a) ベースモデル



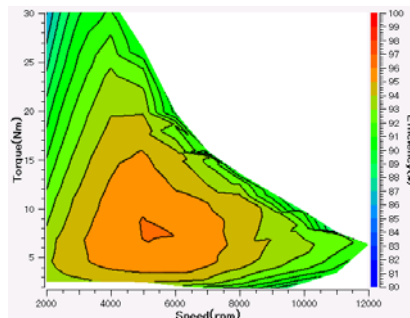
(b) (a)+PWM キャリア



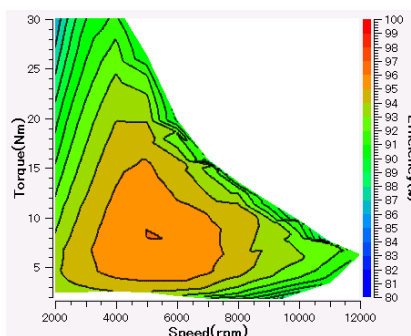
(c) (b)+交流銅損



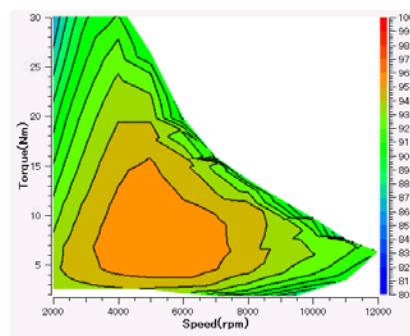
(d) (c)+応力



(e) (d)+加工歪



(f) (e)+表面渦電流



(g) (f)+マイナーループ

図 14 効率マップの推移

5.4 高精度モデルの効率マップ

5.3 で分析した各構成要素による鉄損増加分を加え得られた、高精度モデルの効率マップを評価した結果を図 15 に示す（実測値は再掲）。高精度モデルによる各構成要素を考慮したことで低速の数点を除いて実測効率と要求精度の 1% 以内収まっている。

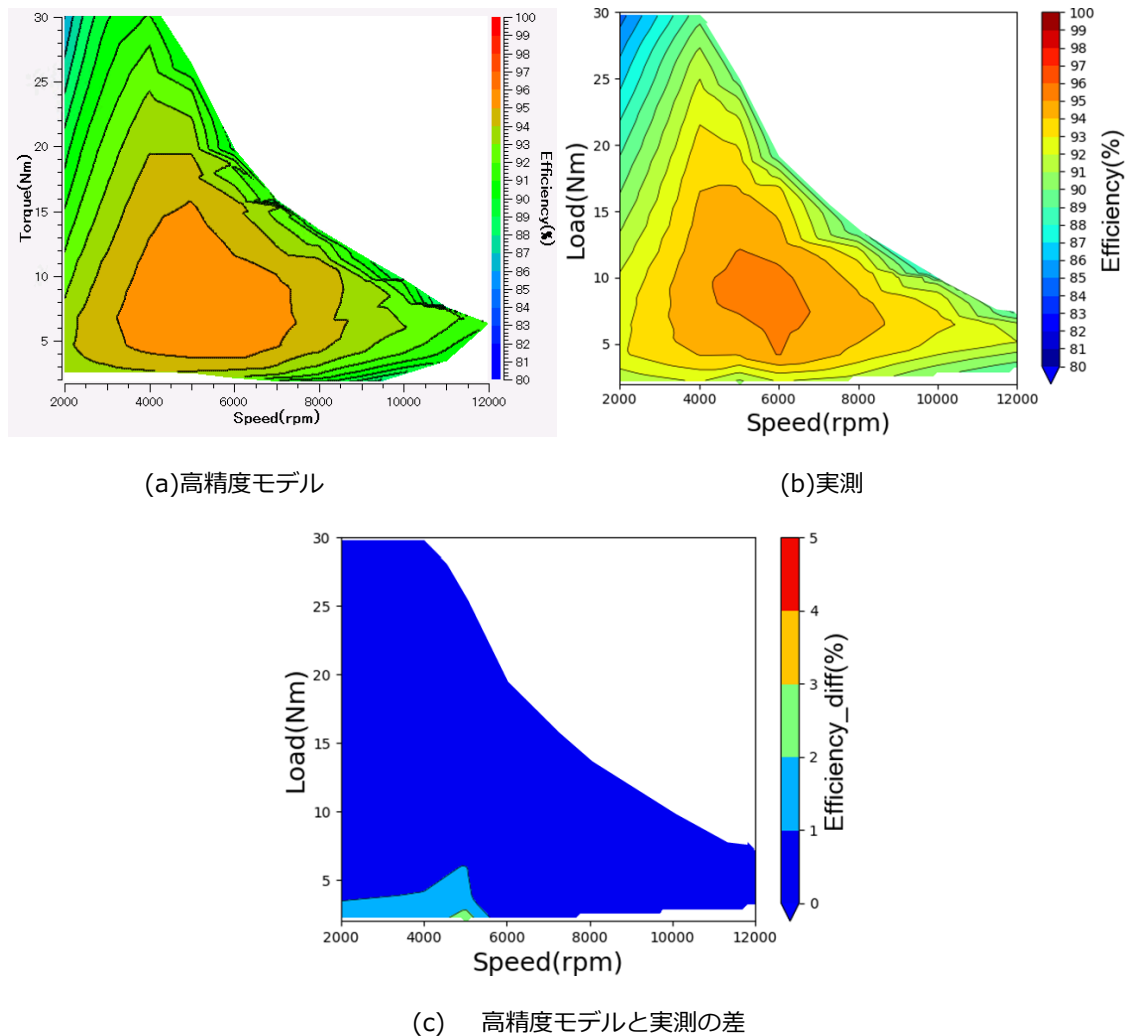


図 15 高精度効率マップ

6. まとめ

- ・ 正弦波電流を入力とし、交流銅損やビルディングファクターを無視したベースモデルでは実測効率と乖離が大きく要求精度を達成できない。
- ・ 実測差を生じている要因を考慮した高精度モデルにより実測効率、鉄損を再現し、これらの要因を考慮することの重要性が示された。
- ・ 高精度モデルでも低速の数点ではまだ 1%以上の乖離が見られ、今後の実測および解析の両面からの精度調査が検討課題として残されている。

謝辞

本研究の一部は一般社団法人 日本自動車工業会の支援を受けて、理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を利用して実施した（課題番号 hp180141）。

7. 参考文献

- [1] 丸山、高橋、涌井、初瀬、「PWM インバータ駆動永久磁石モータの鉄損に関する考察」、電学論 D, vol.134, No.5, pp.479-485(2013)
- [2] 山崎、寺井、富樫、「埋込磁石同期電動機におけるインバータキャリアを考慮した特性評価の高速化に関する検討」、電気学会全国大会(2018)
- [3] 青山、鄧、赤木、砂山、三輪「京コンピュータを用いた大規模電磁界解析－磁石形同期モータの導体渦電流損失に関する検討－」、電学静止器・回転機合同研資、**SA-18-023, RM-18-023**(2018)
- [4] 中野、藤野、谷、大穀、都出、山口、有田、吉岡、「鉄心内部の応力分布を考慮した高精度鉄損解析手法」、電学論 D, vol.129, No.11, pp.1060-1067 (2009)
- [5] 脇坂、開道：「無方向性電磁鋼板の鉄損に及ぼす加工歪み・応力の影響」、電学回転機研資,**RM-98-26** (1998)
- [6] 成田、山田、佐野、三村、赤津、植田、「加工歪の影響を考慮した材料モデリングの検討」、電学静止器・回転機合同研資、**SA-15-095, RM-15-133**(2015)
- [7] 「異常渦電流損失の高精度化 (2)」、JMAG ホワイトペーパー、[W-MA-111] (2019)

お問い合わせ

JMAG ビジネスカンパニー

TEL:03-5859-6007

info@jmag-international.com

※記載されている製品およびサービスの名称は、それぞれの所有者の商標または登録商標です。