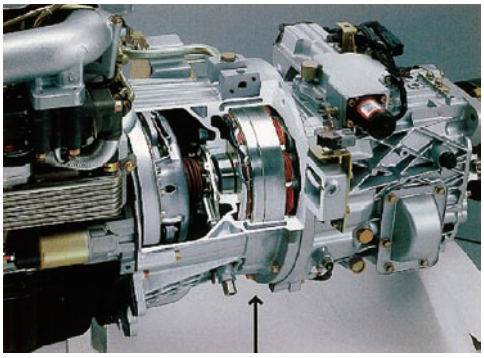
特 集 論 文



ハイブリッド小型トラック用モータ・インバータの開発

Development of Motor and Inverter for a Light-duty Hybrid Truck

藤原謙二[*1] Kenji Fujiwara
加藤義樹[*2] Yoshiki Kato
岡田真治[*3] Shinji Okada
高橋慎治[*3] Shinji Takahashi
南 恒二[*3] Koji Minami
山本紀文[*4] Norifumi Yamamoto

近年地球温暖化防止や資源確保の観点から，自動車に対する燃費，排気規制が強化されており，年々環境対応車へのニーズが高まりつつある．当社では，ハイブリッド車用試作機向けのモータ・インバータを各自動車メーカに納入しており，2006 年５月よりハイブリッド小型トラック向けに供給を開始した．本稿ではモータ・インバータの設計から製作における信頼性確保の概要を紹介する．

1. はじめに

近年，地球環境に与える自動車排気ガスの影響が全世界的に取り上げられるようになってきた．米国ではカリフォルニア州自動車排出ガス規制法，日本では新長期排出ガス規制，欧州では排出ガス規制等があり，またブラジルではクリーン燃料としてエタノール等の代替燃料の製造に注力している．京都議定書では世界各国が CO_2 削減目標を取り決め，特に地球温暖化防止に動き始めている．産業別にみると自動車の CO_2 排出量の比率はかなり高くなっている．

地球環境の問題以外に化石燃料の可採年数の問題も加わり，石油消費量を少なくする技術の開発がメーカの重大な使命となりつつある．わが国の石油消費量は年間約３億リットルでその 35 %が自動車用燃料である．自動車の排気ガスには CO_2，NOx，PM 等が含まれているが，CO_2 は地球温暖化，NOx，PM 等は環境汚染を招いており，燃費改善，排ガス規制が世界レベルで強く要求される状況になっている．ここ数年間の米国におけるガソリン高騰に合わせるかのように，自動車メーカはハイブリッド車の市場投入拡大及び新たな開発を加速させている．

当社では 1970 年代よりサーボモータ技術の開発に着手し，特殊車両，産業機械等に適用してきた．当社モータの特長である小型軽量が評価され，2000 年より各自動車メーカにハイブリッド車用試作機向けモータ・インバータを納めてきた．2006 年には長期の実車検証を終了し，同年５月よりハイブリッド小型トラック向けモータ・インバータの量産を開始した．

本稿では当該モータ・インバータの設計から製造における信頼性確保を主体に，開発状況について紹介する．

2. ハイブリッド小型トラック向けモータ・インバータ

当社モータの小型軽量かつ高出力という特長をいかし，モータは自動クラッチと機械式自動変速機の間にコンパクトに組み込まれている．モータだけによる発進を可能とし，減速時にはエンジンと切り離すことにより効率良くエネルギを回収する．さらに，このコンパクト化は，ベース車両の部品共用化も実現した．図１に当社モータが搭載されたハイブリッド小型トラック，図２に当社が開発したハイブリッド小型トラック用インバータを示す（掲題写真は同モータを示す）．

3. モータ・インバータの設計

ハイブリッド車用モータは，一般産業用と比べてより小型軽量化，広範囲な運転領域，高効率が要求され，

図１　ハイブリッド小型トラック（三菱ふそうトラック・バス(株)提供）

[*1] 神戸造船所先端機械・宇宙部主席
[*2] 神戸造船所先端機械・宇宙部 EV モータ技術課主席
[*3] 神戸造船所先端機械・宇宙部 EV モータ技術課
[*4] 西菱エンジニアリング(株)電気制御技術部装置制御設計課主席

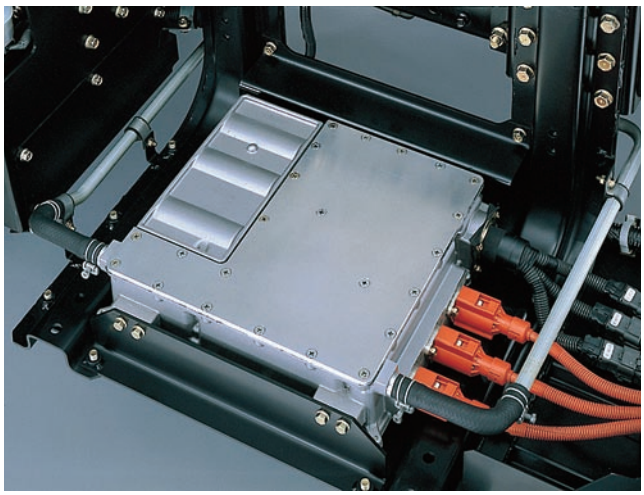


図２　ハイブリッド小型トラック用インバータ

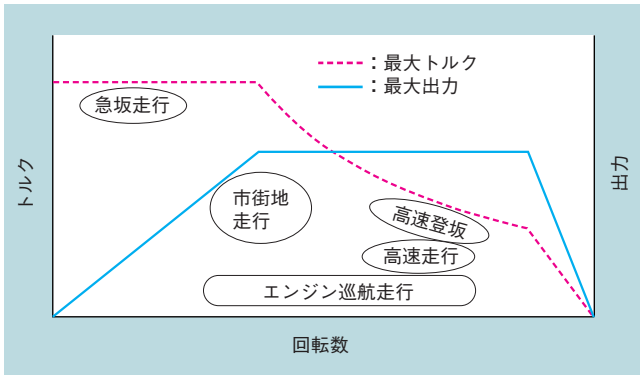


図３　ハイブリッド車用モータの性能曲線

表１　設計ツールに入力する要求仕様

項目名	記号	単位	入力値
(1) 最大トルク	Tmax	Nm	＊＊＊
(2) 最高回転数	Nmax	rpm	＊＊＊
(3) 最大電圧	VBr	VDC	＊＊＊
(4) 最大電流	Imax	Arms	＊＊＊
(5) ステータ外径	Do	mm	＊＊＊
(6) 最大出力	Pout	kW	＊＊＊

設計ツールによる出力データリスト例
■モータ諸元……電機子抵抗，インダクタンス，トルク定数等
■性能特性……N-T 特性，出力特性，温度特性，効率マップ
■損失……銅損，鉄損，風損等
■運転特性……連続運転時温度トレンド
10-15モード運転時温度トレンド
任意運転パターン時温度トレンド

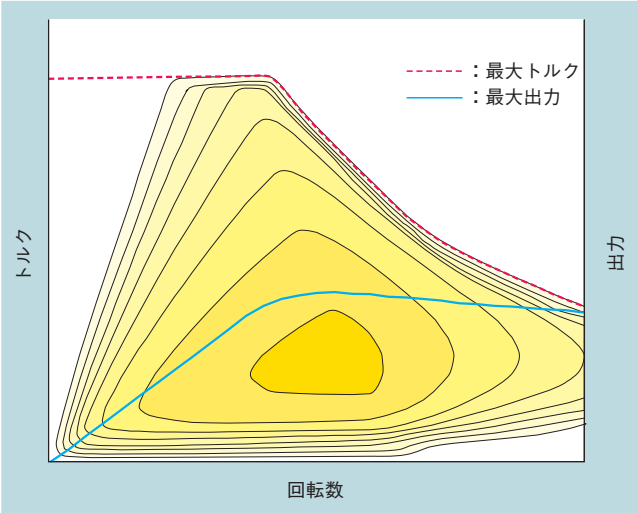


図４　N-T 特性及び効率マップ（出力例）
等高線上のマップは効率分布であり，中央に向かうにつれ，高効率となる．

且つ高い信頼性が求められるため，次の手順で設計を実施している．

3. 1　ハイブリッド車用モータに対する要求

図３に各走行モードとモータの性能関係を示す．ハイブリッド車用モータは各走行状況によりその目的に応じた性能が要求される．当社ではモータの極数とスロット数を最適化することで，①トルク安定性の向上（マグネット磁束の高調波成分を低減），② マグネット及びマグネットワイヤの最大有効活用，③ 磁気抵抗の低減を実現した．この結果，当社従来型に対し，約 60 %の小型軽量化を達成した．

3. 2　ツールによる自動設計

設計ツールに表１の要求仕様を入力すると，下記のデータリストが出力され，モータ・インバータの基本設計が完了する．設計ツールは，試作実績データを基に改良を加え，高精度化（± 5 %以下）を図った．目標性能を達成するために必要なモータの設計諸元が短時間で得られる設計ツールは，設計工数の大幅な削減にも繋がった．出力例として，図４に N-T 特性及び効率マップを，図５に連続運転時温度トレンドを紹介する．

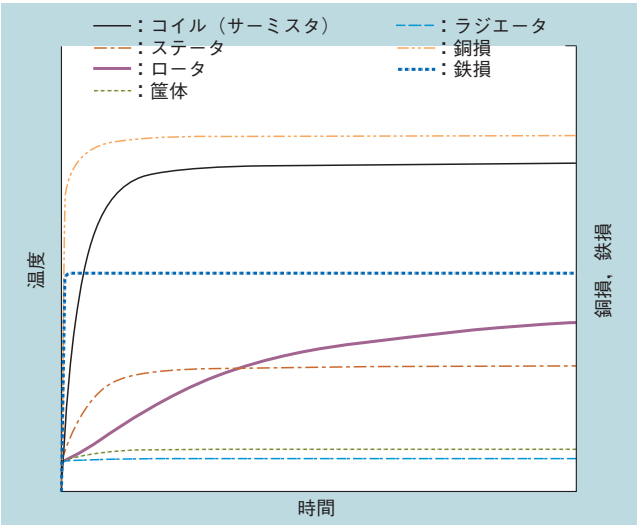


図５　連続運転時温度トレンド（出力例）

3. 3　解析による設計検証

モータ構造や取付条件が大きく変わる場合には，設計初期に二次元，三次元での磁場，熱，振動解析を実

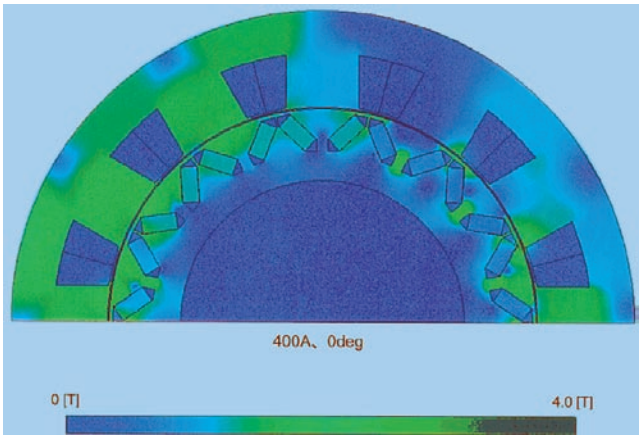


図６　磁場解析結果（出力例）

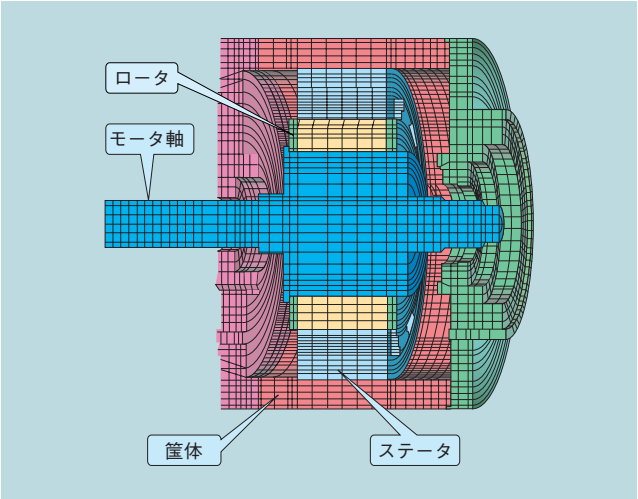


図７　振動熱強度解析のデジタルモックアップ例

施し，設計目標通りの性能が達成できるか検証し，設計精度向上に努めている．一例として，ハイブリッド車用モータの磁場解析結果を図６に，振動熱強度解析のデジタルモックアップ例を図７に示す．

3. 4　構成部品の選定

インバータはモータと異なり，各種電子デバイスを多数用いるため，設計ツールによる熱解析だけでなく，式(1)に基づく電子部品の故障率をいかに低減するかが重要な課題と考えている．

$$\text{故障率 } \lambda(t) = \frac{\text{対象期間中の総故障数}}{\text{母数}\times\text{動作時間}}\ (\text{Fit}) \qquad (1)$$

注：Fit（Failure In Time）= 10^{-9}/hour

特にパワー素子はインバータ構成部品の中で発生する損失が最も大きく，性能とコストの両面を左右する重要部品である．当社はモータの力率を上げ，信頼性の高い小容量のパワー素子にて目標出力を出すことに成功している．さらにインバータの設計，特に電子回路設計においては，スクリーニング，エージング等によって初期故障率の低減を，また長寿命実績部品を選定することで増加型故障率の低減を図っている．当社では航空・宇宙，原子力産業向においても電子部品の信頼性向上に努めており，これらの技術を集約してこの重要課題に取り組むこととしている．

4. モータ・インバータの製造

自動車部品に対する品質システム（表２に品質システムコアツールを示す）をベースとして生産ラインを構築，当社モータに適合する自動巻線機を開発した．現在生産中の製品品質はバラツキが少なく工程能力は良好である．今後，品質システムの基本を日々追及して品質向上，維持に努めて顧客のニーズに応えていく計画である．

表２　コアツール

APQP	先行製品品質計画
PPAP	生産部品承認プロセス
FMEA	故障モード影響解析
MSA	測定システム解析
SPC	統計的工程管理

5. ま　と　め

ハイブリッド小型トラック向けに量産を開始したモータ・インバータを事例として，設計から製作の信頼性向上に関する概要を紹介した．

地球環境に優しい自動車として，全世界でハイブリッド自動車，天然ガス車等，様々な方式の開発が取り組まれている．モータを使った自動車のみが有する特長としてエネルギの回生が挙げられ，モータによる回生エネルギの効果がどれだけ得られるかが重要となる．また，燃料電池が低コストで開発された場合はモータがまさしく自動車の駆動源となる．今後，技術開発をより強化し，低コスト，高性能モータの開発を推進してゆく．

藤原謙二

加藤義樹

岡田真治

高橋慎治

南恒二

山本紀文