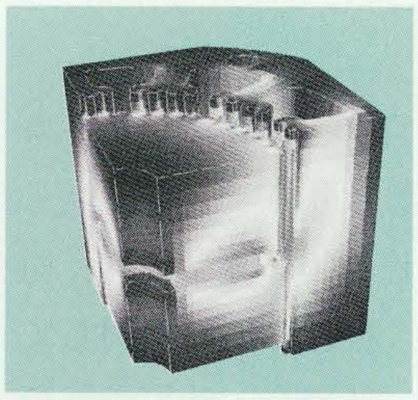
省エネルギーに貢献する高効率誘導モータ「Super Powerシリーズ」

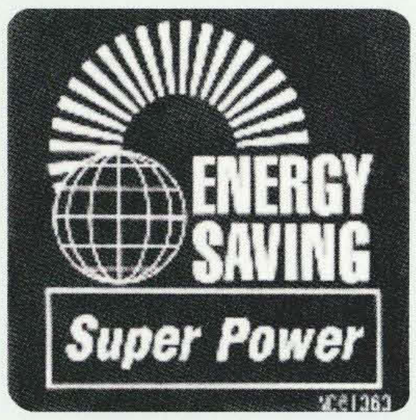
"Super Power Series" High-Efficiency Induction Motors for Saving Energy

森永茂樹　*Shigeki Morinaga*　小俣　剛　*Takeshi Obata*
小林孝司　*Takashi Kobayashi*　宮田健治　*Kenji Miyata*

(a)「Super Powerシリーズ」高効率誘導モータの外観



(b)高精度三次元電磁界解析像



(c)高効率誘導モータの表示マーク

高効率誘導モータ「Super Powerシリーズ」
小型・軽量の高効率誘導モータ「Super Powerシリーズ」は，高精度三次元電磁界解析を駆使したバランスのよい設計によって実現した。

1997年の地球温暖化防止京都会議でわが国のCO_2削減目標が決定され，各業界では省エネルギーのニーズが高まっている。工場では電力使用量の70%がモータを通じて消費されているため，モータの高効率化が強く望まれている。わが国では，高効率誘導モータを普及，促進するために，2000年7月に高効率誘導モータのJISが制定された。現在の標準誘導モータの効率を上げるためには，体格を大きくすれば達成できる。しかし，これではモータの置き換え時に問題が生じるため，高効率誘導モータは，標準誘導モータと同じ体格であることが望ましい。

日立製作所が開発した高効率誘導モータ「Super Powerシリーズ」では，解析技術，特に，高精度化を図った電磁界解析技術により，標準誘導モータのスロット形状やスロットコンビネーションの最適化を図り，JISの効率値を達成した。さらに，米国のEP法にも対応しており，業界トップクラスの小型・軽量化を実現している。

日立グループは，高度解析技術を駆使し，材料を含めたモータの高効率化を推進することにより，エネルギー問題に対する総合的な貢献を目指している。

1　はじめに

1997年の地球温暖化防止京都会議(COP3)で，地球の各エリアごとの温暖化ガス排出削減目標が設定された。わが国の目標は2010年をめどに1990年比で平均6%削減することであり，政府も規制強化と基準引き上げを施策した。規制強化には「省エネルギー法」を改正するとともに，トップランナー方式を採用することによって基準引き上げをねらったものである。

特に，産業部門でのエネルギー消費は国全体の50%以上であり，そのうち，工場での電力量の70%がモータを通して使用される。このため，工場全体のエネルギー効率向上が主目標として取り上げられ，モータ効率値に対するJIS(日本工業規格)の制定などに代表されるように，高効率モータの導入を加速することが期待されている。

ここでは，日立製作所の高効率誘導モータ「Super Powerシリーズ」と，標準モータの高効率化を図るための課題を解決する「高精度三次元電磁界解析技術」について述べる。

2　高効率誘導モータ「Super Powerシリーズ」の特色

開発した高効率誘導モータ「Super Powerシリーズ」(以下，"Super Power"と言う。)は，日立製作所の従来の標準誘導モータ「ザ・モートル」と同一体格でありなが

ら，さらに高効率である。

実負荷法で測定した“Super Power”と「ザ・モートル」の効率比較を**図1**に示す。“Super Power”は，JISの効率値と米国のEP法(Enegy Policy Act of 1992)の効率値を満足し，「ザ・モートル」と体格は同じでありながら，2～5%の効率向上を実現している。

また，モータ電気部の合理的な設計とアルミフレームの高冷却効果により，コイルの温度を約10～20 ℃低減した。その結果，コイル絶縁寿命は標準モータに比べて約2倍となり，軸受も長寿命化した。騒音と振動に関しては，「ザ・モートル」で定評のある，低騒音・低振動技術を踏襲した。

一方，“Super Power”を採用した場合，モータ価格は標準モータに比べて高くなる。しかし，運転期間を考慮するとモータの運転経費に省電力分の効果が生じ，これがコスト増を吸収することから，トータル経費を抑えることができる(**図2**参照)。

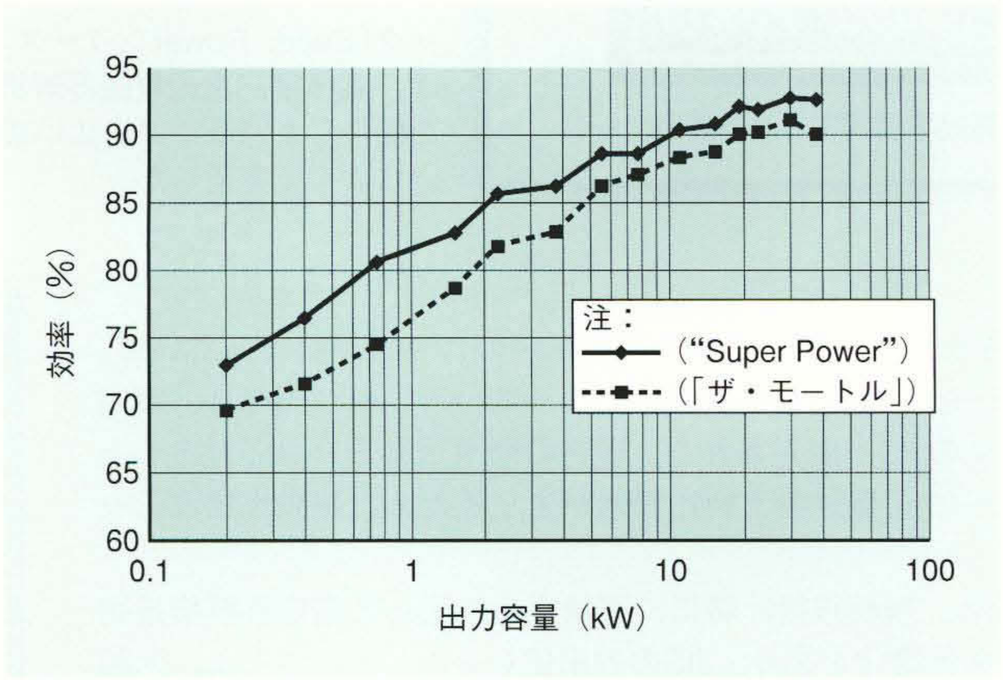


図1　“Super Power”と「ザ・モートル」の効率比較
“Super Power”では，「ザ・モートル」と体格が同じで，高い効率値が得られる。

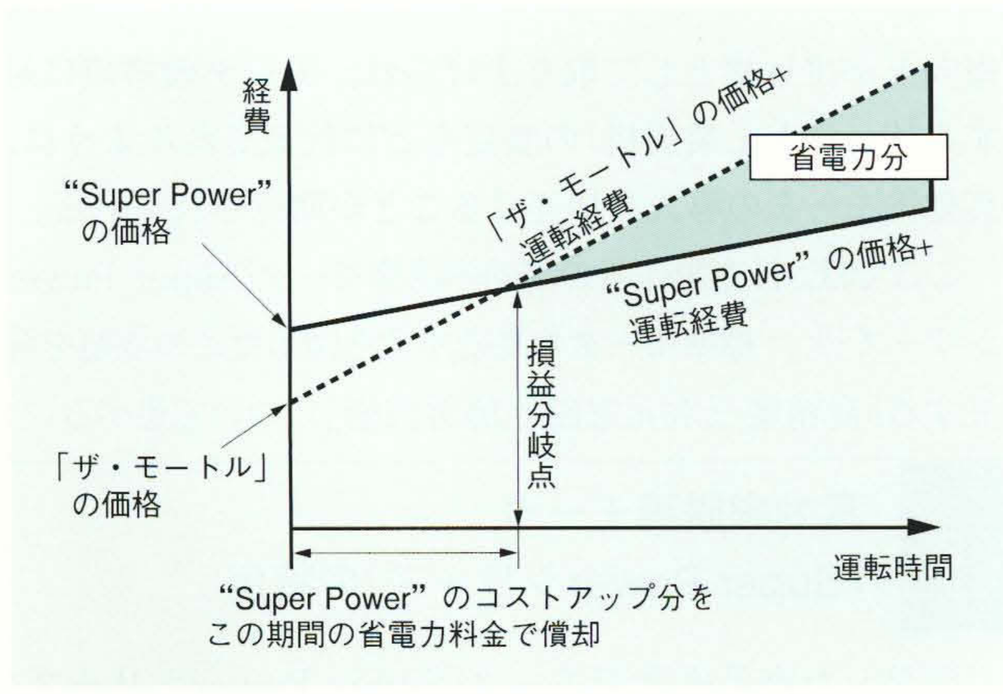


図2　“Super Power”の省エネルギー効果
“Super Power”を採用することにより，運転時間が長くなるほど，経費を節減できる。

表1　“Super Power”の標準仕様
広範囲な容量に対応して“Super Power”のシリーズ化を図った。

出　力	0.2～160 kW			
外被構造	全閉外扇型			
型　式	TFO-K(3.7 kW以下)，TFO-KK(5.5 kW以上)			
極　数	2	4	6	
同期回転速度 (r/min^{-1})	3,000/3,600	1,500/1,800	1,000/1,200	
定　格	連続			
電　圧	2極	4極	6極	電圧・周波数
	0.4～18.5 kW	0.2～15 kW	0.4～11 kW	200V 50/60 Hz 220V 60 Hz
	22～160 kW	18.5～160 kW	15～160 kW	200V 50/60 Hz 220V 60 Hz 400V 50/60 Hz 440V 60 Hz

“Super Power”の標準仕様を**表1**に示す。“Super Power”は同一取付け寸法の「ザ・モートル」と交換が容易であり，工場の駆動源として省エネルギー効果が期待できる。

3　高効率化の技術

“Super Power”の高効率化では，取付の互換性を持たせるために，標準誘導モータと同じ体格とした。

誘導モータには100年以上の歴史があり，これまで，電磁鋼板や絶縁材などの材料の進歩，さらに，軸受，モータ内部の冷却方法や生産技術などの改良・進歩により，小型・軽量化，高出力化が進められてきた。例えば，明治末期の誘導モータに比べて現在の誘導モータは，実に80%以上の小型化を実現している。

一般に，モータの出力Pは次式で表現される。

$$P \propto D^2 \times L \times B \times AC \times N$$

ここに，D：回転子外径，L：鉄心積厚，B：磁気装荷，AC：電気装荷，N：回転数

回転数を一定とした場合，出力Pは$D^2 \times L$，すなわち体格に比例し，次に，磁気装荷と電気装荷に依存する。さらに，磁気装荷は電磁鋼板の材質に，電気装荷は温度上昇つまり冷却にそれぞれ制限を受ける。したがって，モータの効率を上げるためには，損失を小さくすればよいことになる。モータの発生損失は，以下の4種類から成る。

(1) 機械損：軸受の摩擦損と冷却ファンの風損から成り，回転速度に依存する。

(2) 鉄損：鉄心内で磁界が変化することによって発生す

る。鉄心の磁束密度と電源周波数に依存する。

(3) 銅損：抵抗を持つ導線に電流が流れることによって発生する。電流値と導体の抵抗に依存する。

(4) 漂遊負荷損：上記以外の損失

モータの損失と負荷率との関係を**図3**に，損失に対する損失低減策を**表2**にそれぞれ示す。

モータの損失では鉄損と銅損が支配的であるため，この二つの損失に着目した。鉄損は使用する材料と磁束密度に依存することから，鉄損を低減するためには，全体の磁束分布のバランスを考え，局所的な磁束集中を避ける設計とすることと，低鉄損の電磁鋼板を使用することが重要である。

銅損は一次銅損と二次銅損に分けられる。一次銅損は固定子巻線の抵抗と負荷電流の二乗に比例するため，巻線の線径を大きくし，かつ巻線の端部を含めてコンパクトに装着することにより，損失を低減することができる。

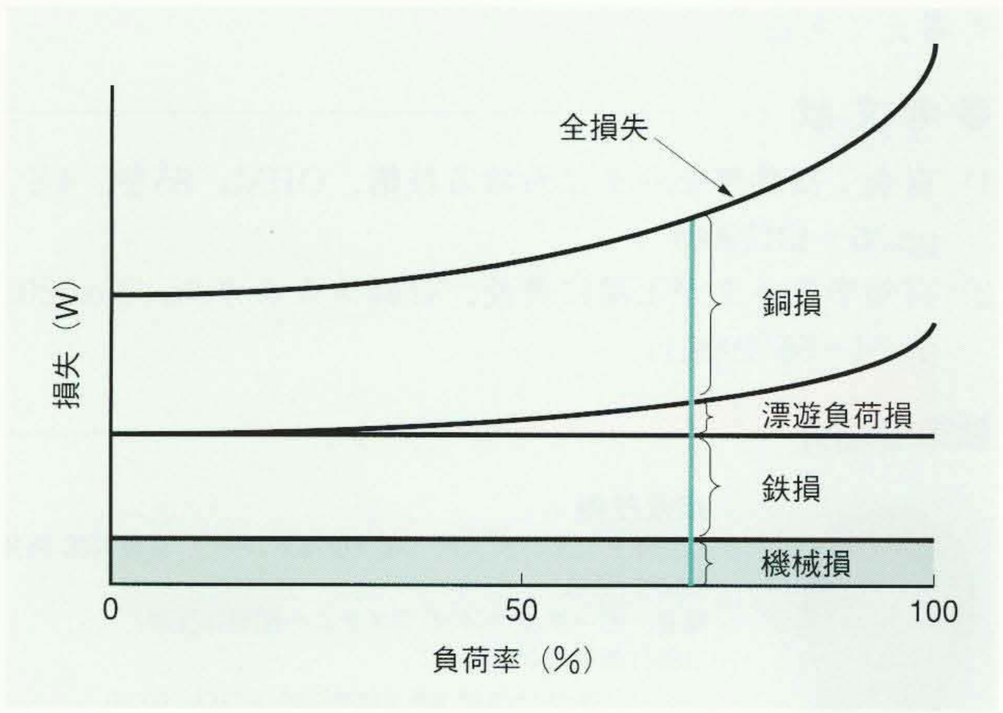


図3　モータの損失と負荷率の関係
各損失は，負荷率が上がるほど大きくなる。

表2　モータの損失低減策
各損失の低減策はさまざまあるが，総合的な対策が必要である。

損　失	低　減　策
機械損	● 冷却用ファンの低損失化 ● 低損失グリースの採用
鉄　損	● 磁束密度の減少 ● 低損失鉄心材料の採用 ● 薄電磁鋼板の採用
一次銅損	● 導体断面積の増加 ● コイル端長さの短縮 ● コイル占積率の向上
二次銅損	● 導体断面積の増加
漂遊負荷損	● 回転子スロット数とスキューの最適化 ● 空げき磁束密度の減少 ● 空げき長の最適化 ● 回転子溝絶縁処理

以上に述べたように，日立製作所の標準誘導モータ「ザ・モートル」と同一体格とする高効率誘導モータ“Super Power”では，電磁界解析技術，生産技術，および冷却技術を駆使し，バランスのよい設計とすることにより，高効率化を図った。

そのために新たに開発した高精度電磁界解析技術について以下に述べる。

4　高精度三次元電磁界解析ソフトウェア

“Super Power”の開発に当たって特に注力したのが，解析技術である。前章で述べた高効率化技術を実現するために，解析ソフトウェアでは，高速高精度の解法が必要となる。このため，通常の節点要素有限要素法よりも数倍高速な「辺要素有限要素法」を用いた。

辺要素有限要素法は，磁束の保存則を厳密に満足するための高精度な解法である。

高精度電磁界解析ソフトウェアの機能は以下のとおりである。

(1) 磁気飽和を伴う非線形過渡解析

(2) 永久磁石を含む電磁界解析

(3) 回転機解析(モータを回転させながらの解析)

(4) 外部回路(インダクタンス，抵抗)との連成解析

(5) 表面インピーダンス境界条件(表皮効果を高精度に評価)

以上のように，このソフトウェアにはモータに必要な機能が搭載されているため，開発段階での解析期間短縮が大いに期待できるものである。その特徴は以下のとおりである。

(1) 4種類(六面体，四面体，三角柱，ピラミッド)の混合要素により，多種多様なメッシュに対応

(2) モータ解析に不可欠なコイル電流や磁石磁化入力が簡便

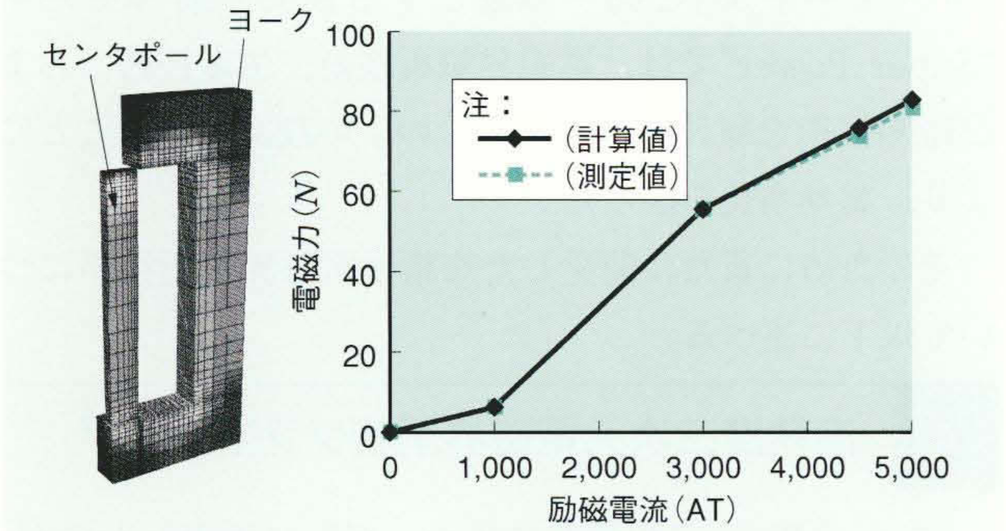
(3) 回転子・固定子間エアギャップの高速リメッシュ※1)により，任意の回転解析を実現

(4) 回転子と固定子の相互分離モデル化が可能

これらの特徴も，モータの電磁界解析に役立つ項目である。

このソフトウェアによって解析できる諸量は，モータの解析に必要な磁束密度，渦電流密度，電磁力とトルク，渦電流損失密度，任意ループの磁束，任意ループの

※1) リメッシュ：モータが回転するようなときメッシュを再度，構成し直す機能



(a) 解析結果　　(b) センタポールに働く電磁力

図4 国際標準問題20の解析結果

高精度三次元電磁界解析に辺要素有限要素法を採用することにより，計算値と測定値がほぼ一致する結果を得た。

誘起電圧，コイルインダクタンス，および電圧入力時のコイル電流であり，これらを表示するための使いやすいヒューマンインタフェースを持っている。

この解析ソフトウェアで国際標準問題20[※2)]を解析した結果を**図4**に示す。計算値は測定値とほとんど同じであり，高精度三次元電磁界解析ソフトウェアの精度の高さを表している。

5 高精度三次元電磁界解析技術の実現

“Super Power”の開発では，高精度三次元電磁界解析を用い，モータを回転させながら磁束のバランスを解析することにより，高効率優先のスロット形状，スロットコンビネーション，および高効率優先の鉄心形状を求めた。

“Super Power”の二次元電磁界解析結果を**図5**に示す。このように，コンピュータ上でモータを試作し，これを評価することにより，開発期間の短縮を図った。

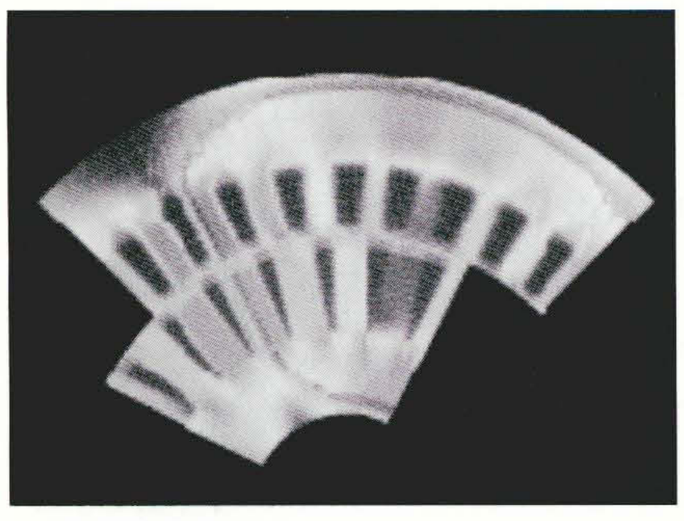


図5 “Super Power”の電磁界解析結果(回転時)

回転時の電磁界解析により，スロット形状などの最適化が容易となる。

※2) 国際標準問題20：IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)のMagnetics Societyにおける電磁界解析のベンチマーク(精度評価)用の問題

また，高効率化については，コイルの占積率の向上やコイル長の削減など新たな生産技術の確立をはじめ，電磁鋼板や電線など最新の高級材料を採用した。

今回のJISの制定ではモータの効率評価方法に変更があり，従来の円線図法に代わり，国際的にも標準となっている，非常に高い測定精度を要求する実負荷法で評価する。

6 おわりに

ここでは，2000年に制定されたJISの効率値を満足する高効率誘導モータ「Super Powerシリーズ」について述べた。

今後，永久磁石モータを含む高効率モータはますます重要視され，さまざまな機器に採用されていくものと予想される。

日立グループは，モータの解析技術をさらに高度化するとともに，モータのいっそうの高効率化を目指していく考えである。

参考文献

1) 森永：高効率モータにおける技術，OHM，85巻，4号，pp.36～40(1998)
2) 高効率モータが工場に普及，日経メカニカル，No.520，pp.54～55(1998.1)

執筆者紹介

森永茂樹
1972年日立製作所入社，産業機器グループ 開発本部 開発センタ 所属
現在，モータ ドライブ システムの開発に従事
計測自動制御学会会員
E-mail：morinaga @ gm. narashino. hitachi. co. jp

小林孝司
1981年日立製作所入社，産業機器グループ 開発本部 開発センタ 所属
現在，高効率モータの開発に従事
電気学会会員
E-mail：takoba @ gm. narashino. hitachi. co. jp

小俣 剛
1982年日立製作所入社，株式会社日立ドライブシステムズ モートル部 所属
現在，誘導モータの開発，設計に従事
電気学会会員
E-mail：obata @ gm. narashino. hitachi. co. jp

宮田健治
1981年日立製作所入社，日立研究所 情報制御第5研究部 所属
現在，電磁界数値解析に関する研究に従事
工学博士
日本物理学会会員，電気学会会員
E-mail：kmiyata @ hrl. hitachi. co. jp