最近の中形電動機技術

針江　博史(はりえ　ひろし)　　千田　悦博(せんだ　えつひろ)　　南部　勤(なんぶ　つとむ)

1　まえがき

誘導電動機は，構造が簡単で堅ろうであり，取扱い・保守が簡便であることから，産業界の主動力源として，各種用途に最も多く用いられている。誘導電動機の歴史は古く，基本的な理論や構造については，ほぼ確立された製品ではあるが，材料，解析技術，製造技術の進歩とともに，その性能は日々向上しており，制御技術，パワーエレクトロニクスの発展とともにその用途，適用分野は拡大している。

高効率，低騒音，高信頼性，保守の省力化などの社会的ニーズにこたえ，富士電機はこれまでもタイムリーに時代に適合した系列を開発してきた。本稿では，最近発表した新系列中容量三相誘導電動機「R90 シリーズ」を中心に最近の中形電動機技術を紹介する。[1]

2　R90 シリーズ

2.1　標準化範囲と構造

R90 シリーズは，全閉外扇形では枠番225～450，出力範囲 55～1,000kW，開放形では枠番200～450，出力範囲 55～1,250kW を対象にしている（**図 1**）。その代表的な外観を**図 2** に，断面構造を**図 3**，**図 4** に示す。

R90 シリーズの特長の一つは，冷却方式の改善によるリブ冷却方式全閉外扇形の適用範囲拡大である。最近は屋外設置の増加，保守の省力化のために全閉外扇形が圧倒的に多くなってきているが，リブ冷却方式は空冷熱交換器搭載形よりも単純で堅ろうな構造のため，保守上および製作上からも好ましい構造である。従来からリブ冷却方式の適用範囲の拡大に努めてきたが，冷却性能からくる制約のため，500kW（4 極機ベース）以上の電動機では冷却性能のよい空冷熱交換器搭載形が採用されてきた。従来のリブ冷却機が内気非循環であったのに対し，R90 シリーズでは**図 3**

図 1　大中形誘導電動機の標準化範囲

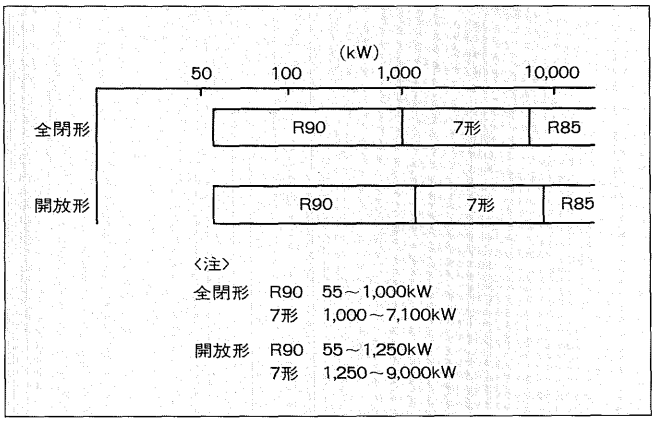
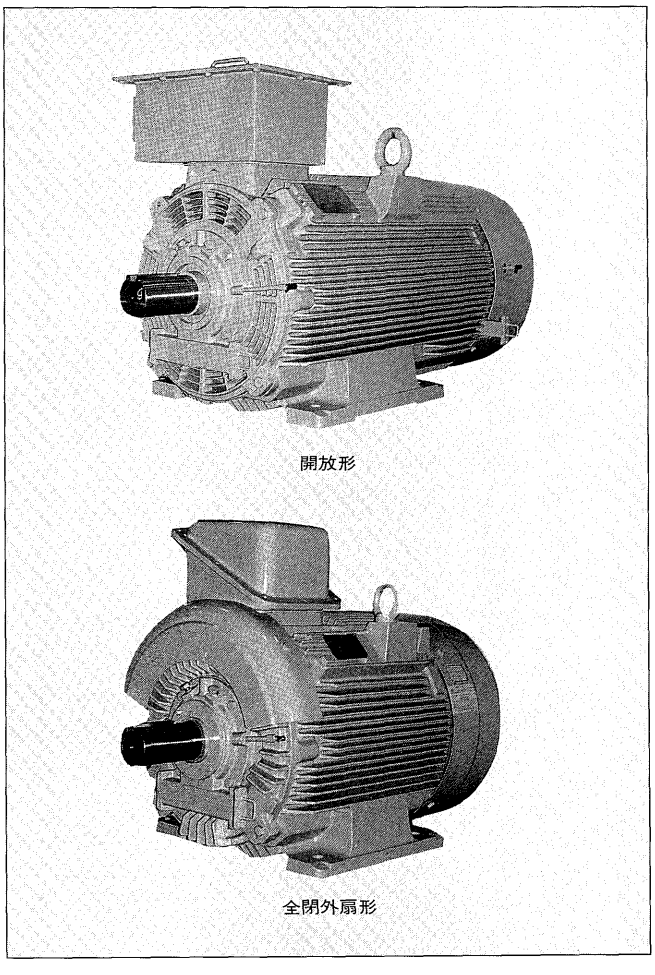


図 2　R90 シリーズの外観

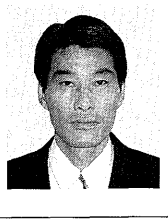


針江　博史

昭和50年入社。回転機の開発・設計に従事。現在，(株)富士電機総合研究所回転機技術開発部課長。

千田　悦博

昭和52年入社。回転機の開発・設計に従事。現在，鈴鹿電機製作所回転機設計部課長補佐。



南部　勤

昭和50年入社。回転機の生産技術業務に従事。現在，鈴鹿電機製作所製造部課長。

に示すように，特殊形状の高圧力内部ファンで内気を循環させることにより，冷却効果を上げた内気循環リブ冷却方式を採用した。この結果，従来500kWが経済的な出力限度とされていたリブ冷却方式の適用範囲を1,000kWまで拡大することができた。

従来，開放形機には開放形専用固定子枠を用いていたが，300kW程度を超える出力範囲となると需要が少なくなるため，鋳鉄ではなく鋼板溶接構造としていた。R90シリーズでは開放形機と全閉外扇形機の固定子枠の共用化を図り，開放形機の通風冷却は固定子枠内外部併用通風方式を採用した。**図4**に示すように，枠内に設置された内部ファンで枠内を直接冷却するほかに，外部ファンで枠の表面に配置したリブ間に冷却風を流して冷却している。この新しい冷却方式の採用により，1,250kWまで制振性の高い鋳鉄固定子枠で製作可能となった。

2.2 R90の特性

R90シリーズのもう一つの特長は，アルミかご形回転子の採用である。これによる性能向上のうち，主なものについて述べる。

2.2.1 高慣性負荷および高始動頻度特性

高慣性負荷および高始動頻度において特に考慮しなければならない点は，かご形回転子導体の強度である。アルミかご形回転子は，従来の銅バーと銅の短絡環をろう付けする方式に比べ，接合部のない一体鋳造なので本質的に高い信頼性が得られる。また，導体断面の増大と導体－鉄心間熱伝導の向上により始動時の温度上昇が低く抑えられ，温度こう配も小さくなるため熱応力が減少し，許容始動頻度で約2倍，許容負荷GD^2は約50%増大した。

2.2.2 防爆回転機

安全増防爆機は，拘束時の回転子導体の温度上昇値により電動機の体格が左右されることが多い。R90シリーズは，アルミかご形回転子の採用により拘束時の回転子温度上昇を約30%，内気循環方式により運転時の回転子温度上昇を約20%低減した。これにより非防爆機に対する出力低減率を従来機に比べ半減することができた。

また耐圧防爆機については，従来は爆発に対する強度上の理由から周上にパイプを配置したフレーム構造としていた500～1,000kWクラスの電動機も，リブ冷却方式で対応可能となった。

図3　全閉外扇形構造断面図

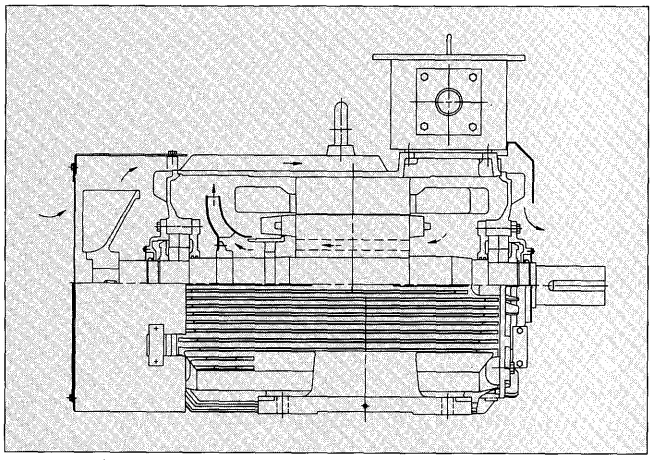
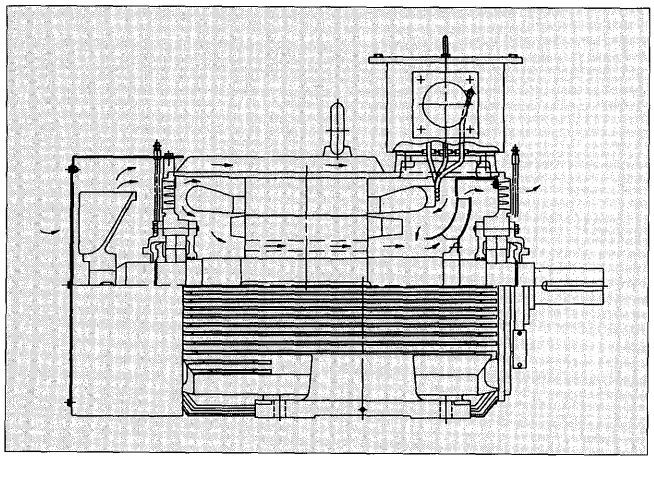


図4　開放形構造断面図



3 解析技術

R90シリーズの開発には多くの解析技術が適用されているが，その幾つかを紹介する。

3.1 温度解析技術

現在，回転機の絶縁種別はF種が一般的であるが，小形・軽量が要求される輸送用などの特殊用途では，H種以上の絶縁が採用され始めている。機器の温度上昇限度が上がるにつれて，局部的な過熱や熱応力の集中が無視できなくなってきており，定常状態における温度分布はもとより，過渡状態での温度分布を正確に把握することが一層重要となってきている。温度分布の解析法の一つは，熱回路網を用いた解析である。主に入力の手軽さから設計段階での有力な手段として活用され，細部の温度分布解析はノード数を増加し，計算精度の向上を図っている。また，最近のコンピュータのダウンサイジングにより，ワークステーション機能が飛躍的に向上しているため，有限要素法を活用してさらに細かい温度分布解析も行われている。有限要素法による温度分布解析例（固定子鉄心，固定子コイル，回転

図5　有限要素法による温度分布解析

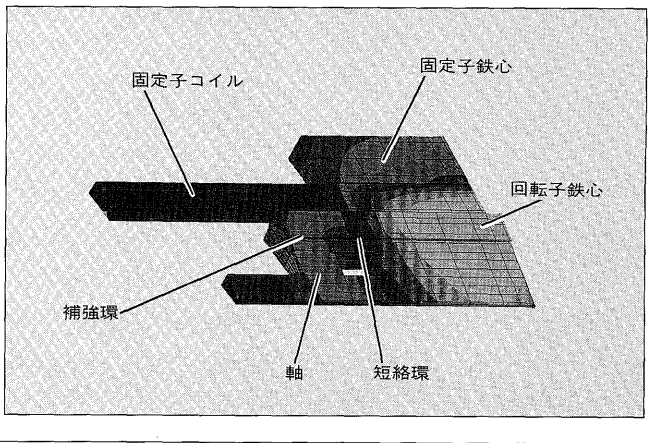


図6　有限要素法による応力解析

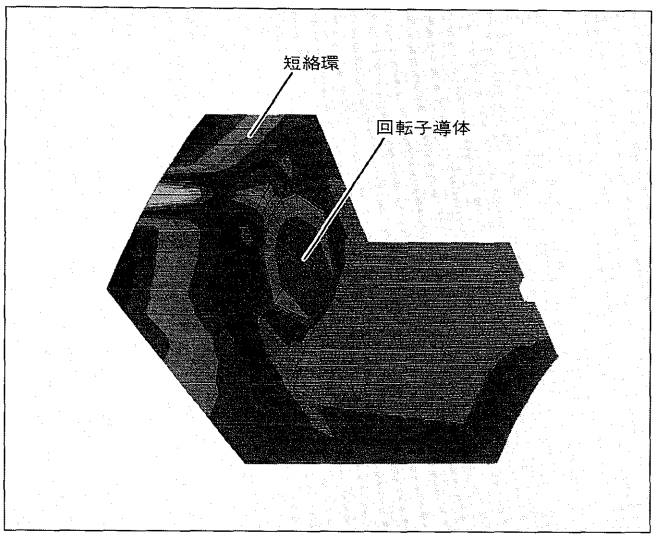


図7　電動機振動解析ステップ

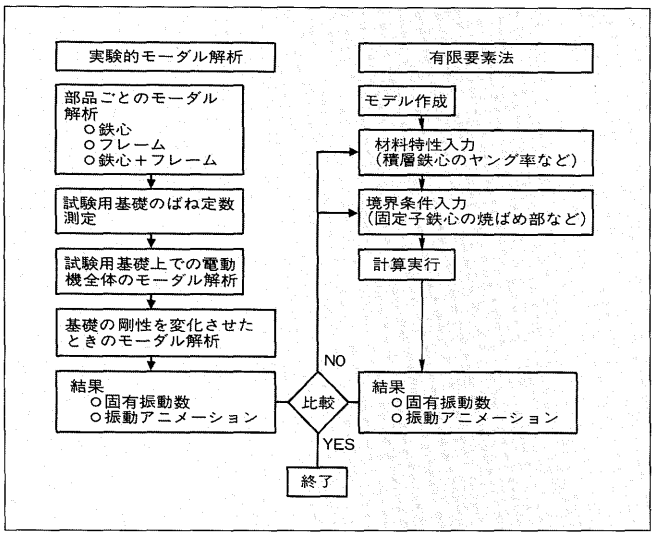


図8　有限要素法による振動解析

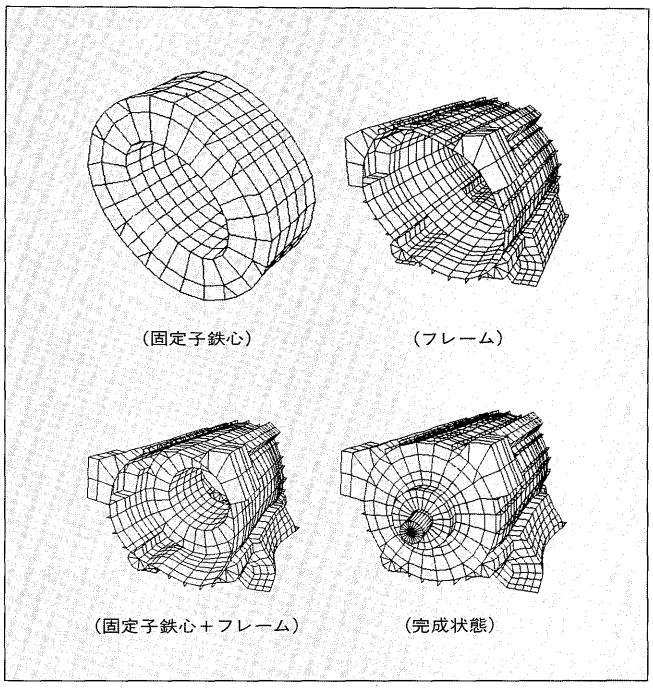
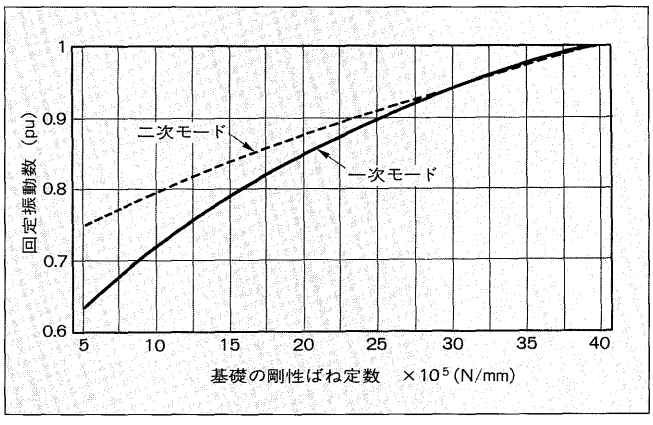


図9　基礎の剛性の変化による電動機固有振動数の変化



子鉄心，短絡環などを１スロットに分割して解析）を**図5**に示す。

3.2　応力解析技術

応力解析には，解の精度を上げるために要素の分割を細かくしていく方法（H法）と，要素内で仮定する変位の高次関数を適用するP法を用いた有限要素法とを併用している。

回転子の応力解析を行うには遠心力による応力のほかに，過渡状態および定常状態の熱応力も考慮する必要があるため，前述の温度分布解析結果を入力条件として，各部の応力分布を三次元のソリッドモデルで計算している。特殊な形状をした回転子の短絡環と導体の応力解析の一例を**図6**に示す。

3.3　振動解析技術

R90シリーズでは，電動機が据え付けられる基礎の剛性を考慮して回転機全体の固有振動数を算出し，工場での振動試験結果から現地運転における振動を予測している。基礎の剛性の変化による固有振動数の変化を把握するために，まず電動機単体での値を正確に予測する必要がある。このため，モーダル解析により得た実測値と有限要素法による計算値を比較し，計算上ポイントとなる部分の定数を推定して類似機に対する計算精度を向上している。**図7**にそのステップを示す。実験的モーダル解析では固定子鉄心単体，フレーム単体，鉄心を挿入したフレームおよび完成状態の４ケースの固有振動数を測定し，得られた結果から積層された固定子鉄心の等価弾性係数，リブフレームの等価剛性などを逆算し，その材料特性を有限要素法の入力条件としている。固定子鉄心，フレーム，鉄心を挿入したフレームおよび完成状態の有限要素法による一次モードの計算結果を**図8**に示す。計算結果は実測値とよく一致しており，電動機単体での固有振動数の正確な予測が可能となっている。これにより，基礎の剛性が変化したときの固有振動数の変化も精度よく求められるようになった。基礎の剛性が変化したときの固有振動数の変化の計算結果を**図9**に示す。

4 可変速運転にかかわる技術問題

三相かご形誘導電動機とインバータを組み合わせた可変速システムは，省力化や省エネルギー，製品の高品質化などのニーズや優れた保守性のため産業界で広く用いられている。誘導電動機をインバータで駆動する場合の問題点，留意点は，次のように大別される。

(1) インバータ出力に含まれる高調波に起因する問題
(2) 低速域での冷却能力の問題
(3) 商用周波数以上の高速運転での問題
(4) その他（サージ，軸電圧など）

ここでは，これらのうち，冷却，騒音，サージの問題について紹介する。

4.1 冷　却

一般に誘導電動機の冷却は，軸上に取り付けられた自己冷却ファンによって行われる。この場合，冷却風量は回転速度の低下につれて減少するため，低速域では冷却能力が低下する。電動機の発生損失が冷却能力の低下に見合って減少すれば問題ないが，そうでないときは電動機の枠番を大きくしたり他力冷却ファン付きにしなければならない。

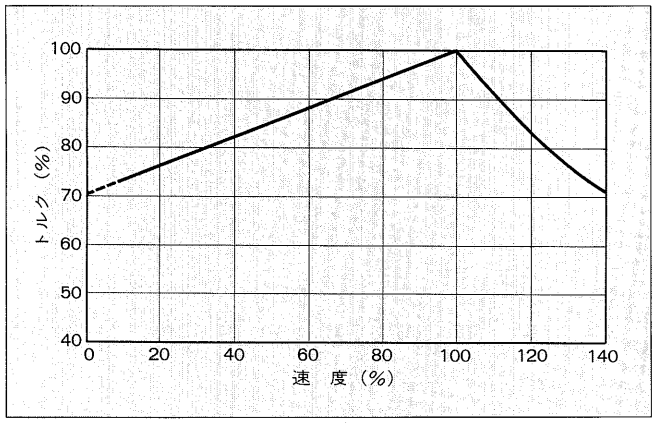
この発生損失と冷却能力の関係は，負荷のトルク特性と密接に関係している。一般に，ポンプやブロワのような二乗低減トルクの場合は自己冷却ファンでよいが，定トルク負荷の場合は注意を要する。

図10は，自己冷却ファンでインバータ駆動したときの回転速度と許容トルクの関係の一例を示す。ここで，回転速度の100%は基底速度（50Hzまたは60Hz）を示す。トルクの100%は，インバータ出力の高調波成分を考慮したインバータ用電動機の定格トルクを示す。低速域では，冷却能力の低下によって許容トルクが低下するので，この許容値を超えて運転する場合は，他力冷却ファン付きにする必要がある。

電動機の損失には，鉄損，一次銅損，二次銅損，漂遊負荷損，機械損がある。一般のV/F一定制御では，定トルク負荷の場合，一次銅損と二次銅損は回転速度によらず一定であるが，鉄損と漂遊負荷損は回転速度の低下とともに減少する。一方，他力冷却ファン付きでは冷却風量は回転速度に関係なく一定であるため，回転速度の低下とともに温度は低下する。

空冷熱交換器形を採用していた容量クラスでは，定トルク負荷の場合，内気用と外気用の他力冷却ファンが別々に必要であった。一方，R90シリーズでは内気風量低減による温度上昇寄与分が小さいため，他力冷却ファンは外気用の一つで済み，空冷熱交換器がないこととあわせて非常に小形化されている。

図10　インバータ駆動電動機の出力特性



4.2 騒　音

誘導電動機をインバータで駆動するときの騒音は，商用電源で運転するときに比べて，インバータの高調波成分のために増加する。(社)日本電機工業会の技術資料によれば，低圧汎用電動機をインバータで駆動する場合の騒音は，商用電源時に比べておよそ5～15dB増加するといわれている。[(2)]

ここでは電圧形PWMインバータで誘導電動機を駆動したときの電磁騒音について概説する。

固定子巻線によって作られる回転磁界には空間高調波が多数含まれているが，PWMインバータ駆動誘導電動機ではさらにキャリヤ周波数に関係した側帯波が重畳される。また，回転子導体に流れる電流により回転子溝数に依存する巻線高調波が発生する。

両者の相乗作用によって空げきに生じる電磁力波のモードの周波数は，正弦波電源駆動時に比べて下記の周波数が追加される。

モード：$P\ (6g_1+1)\pm(g_2N_2+P)$

周波数：$f_c \pm \left\{1+g_2\frac{N_2}{P}(1-S)\right\}f_f$

ここで，P：極対数

g_1：0，±1，±2・・・

g_2：0，±1，±2・・・

N_2：回転子溝数

f_c：キャリヤ周波数に依存する側帯波周波数

f_f：基本波周波数

S：すべり

図11は，基本波周波数と電磁力波周波数の関係の一例を示す。破線の正弦波電源駆動時に対して，PWMインバータ駆動時は実線の成分が追加される。

電磁騒音は，電磁力波の周波数と構造物の同一モードの固有振動数が合致もしくは近づいたときの共振現象である。インバータ駆動の場合には，一般に可変速運転をするので，頻繁に使用する速度範囲に共振点がこないように配慮する必要がある。

4.3 サージ

近年では比較的大容量の電動機もPWMインバータで駆動されるようになり，しかも電力用半導体素子のスイッチング速度は高速化の一途をたどっている。これに伴って，電動機の巻線には電圧急しゅん度の大きなサージが繰り返し印加されることになるため，絶縁的な責務がますます過

図11　基本波周波数と電磁力波周波数の関係

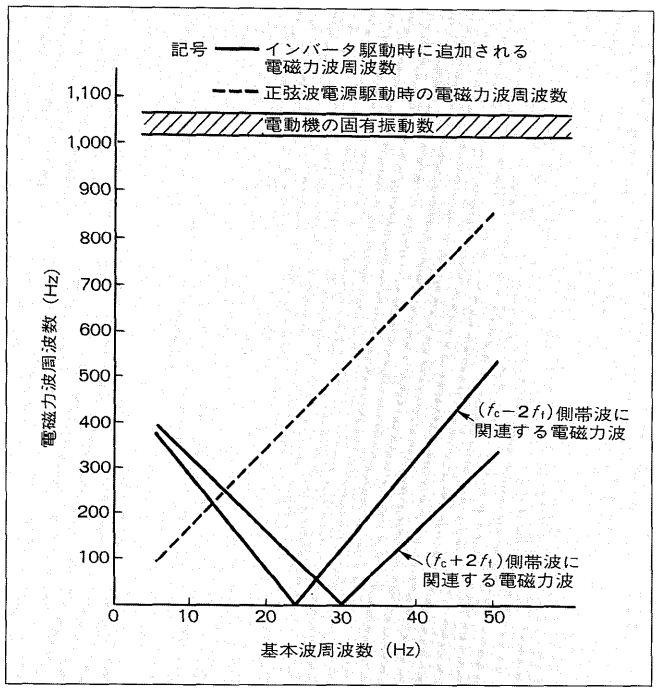


図12　サージ電圧波形の一例

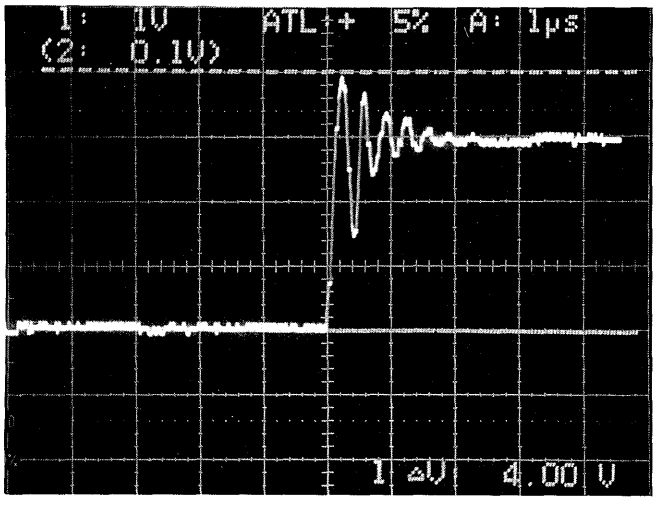
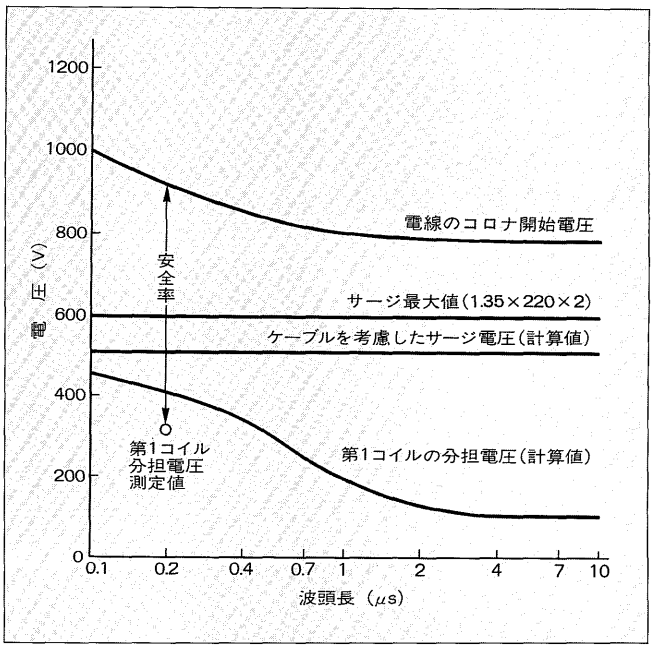


図13　サージに対する電線絶縁耐力の評価



酷となってきている。

さらに，インバータと電動機を接続するケーブルを伝搬する際の反射現象や透過現象によって大きなサージ電圧が電動機巻線内に進行する。このサージ電圧は，インバータ直流中間回路の直流電圧の最大2倍に達する。このサージ電圧が巻線内に侵入すると，電動機端子に最も近い始端コイル（第1コイル）に最も高いサージ電圧が印加されることになる。

したがって，サージに対しては絶縁システムとして次の点を考慮しなければならない。

(1)　サージ電圧に対する対地絶縁強度

(2)　第1コイルのサージ分担電圧に対する素線絶縁強度

次に，電動機とインバータを組み合わせたときのサージの実測例を示す。供試機の仕様は次のとおりである。

・電　源：電圧形PWMインバータ（IGBT）
　　入力電圧 220V

・電動機：4.5kW　170V　50Hz　6極
　　星形結線　2層分布巻
　　1相あたり18コイル（1コイル9ターン）

電動機とインバータを8mのより線（単心3本，5.5mm²）で接続し，無負荷運転（60Hz）したときの電圧を測定した。

図12は，電動機端子間で観測したサージ電圧波形の一例を示す。この波形から波頭長はほぼ0.2μsと読み取れる。なお，波尾長部分の電圧振動は，直流中間回路の静電容量とリアクタンスの共振と考えられる。

この例では，電動機端子部におけるサージ電圧測定値は400～448Vであり，理論値508Vとほぼ一致する。また，第1コイルに分担するサージ電圧は約320Vであり，分担率は約0.75であった。

図13は，サージに対する電線絶縁耐力の評価例を示す。図から供試機で使用した電線のコロナ開始電圧に対して，第1コイルの分担電圧は十分余裕があることが分かる。[3]

このようにインバータ駆動電動機に関しては，使用する電線のコロナ開始電圧，インバータ直流中間回路電圧および素子の種類を考慮したうえで信頼性の高い絶縁システムを採用している。

5　巻線絶縁および製造技術

高圧巻線の絶縁についてはエポキシ樹脂を真空加圧含浸するF種絶縁の全含浸が，また，低圧巻線の絶縁においてもF種絶縁が多く用いられている。特定用途に対しては高圧ではH種，低圧ではH種や耐熱400℃のセラミック系絶縁も用いられるようになった。一方，回転子導体についてはアルミ鋳込み構造の適用拡大が図られている。

ここでは，製造技術動向の一端として，低圧巻線用のインサータマシンと回転子用アルミ低圧鋳造技術を紹介する。

5.1 低圧巻線用のインサータマシン

低圧巻線絶縁の性能は電線，絶縁材料の特性ばかりでなく，巻線作業に負うところも大きい。小形機の巻線作業は自動化（コイル巻き，コイル入れ，成形作業を統合機械化したもの）が主流であるが，中形機は小形機に比較して，多機種，小ロット生産であることから手作業で行われてきた。R90シリーズの開発を機に，固定子スロットにコイルを挿入する工程を機械化したコイルインサータマシンを導入した。インサータマシンは，プルロッド式挿入ユニット，鉄心クランプユニット，ベッドおよび制御盤で構成されており，簡単な操作（半自動）で一人作業が行えるものである（**図14**）。インサータマシンの導入に合わせ，設計上も鉄心スロット数の統一，コイル形状や溝絶縁形状などの改良を行い，複数機種の生産に柔軟に対応できるようにしている。さらに，巻線絶縁の品質についても十分な実験・検証を行っている。コイル挿入時の電線皮膜の損傷防止のため，機械的損傷に強い電線の採用，コイル挿入ブレードの改良，すべりのよい溝絶縁を採用するなどして，手作業によるコイル入れと同等以上の絶縁品質が得られるようになった。コイルインサータマシンの導入は絶縁品質の安定化と将来における熟練技能者の不足にも対応できるものである。

5.2 アルミかご形回転子低圧鋳造

中形電動機のアルミ回転子の範囲を拡大することは製造技術面で大きな合理化テーマの一つであった。従来技術のダイカスト法では品質面で限界があり，大形回転子に適用することは困難であった。富士電機は高品位のアルミ回転子鋳造が可能な低圧鋳造法の開発に取り組み，実用化に成功し，大形回転子，高速回転子への適用が可能となった。

図15，**図16**に低圧鋳造装置の概略を示す。加熱炉で均一予熱した金型を誘導加熱装置で局部予熱し，温度こう配を持たせたのち，低圧鋳造装置で鋳造する。鋳造品の欠陥として最も発生しやすいものに，指向性凝固未達による上部短絡環のひけ巣欠陥があげられるが，金型予熱において積極的に温度こう配を持たせることと，鋳造後の各部冷却を段階的に行うことにより，ひけ巣欠陥の発生しない指向性凝固を実現することができた。

図14　インサータマシン

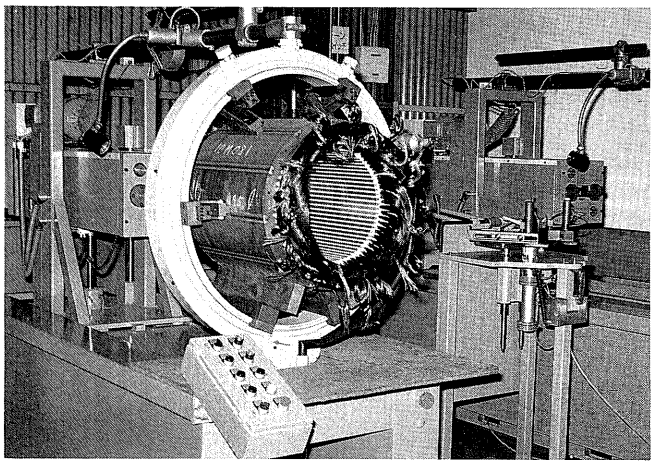


図15　低圧鋳造装置

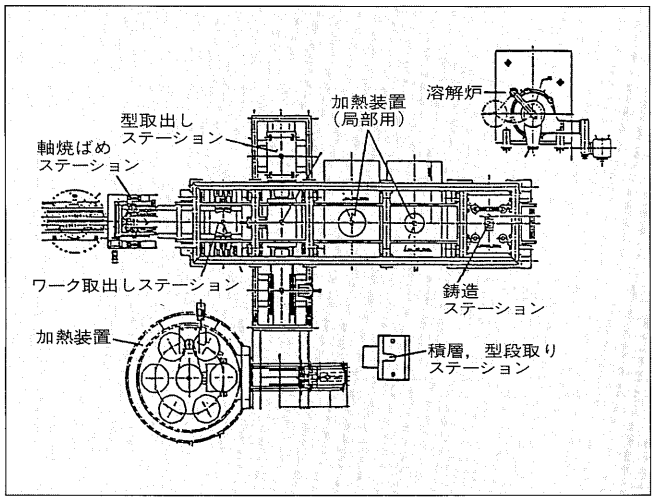


図16　低圧鋳造装置

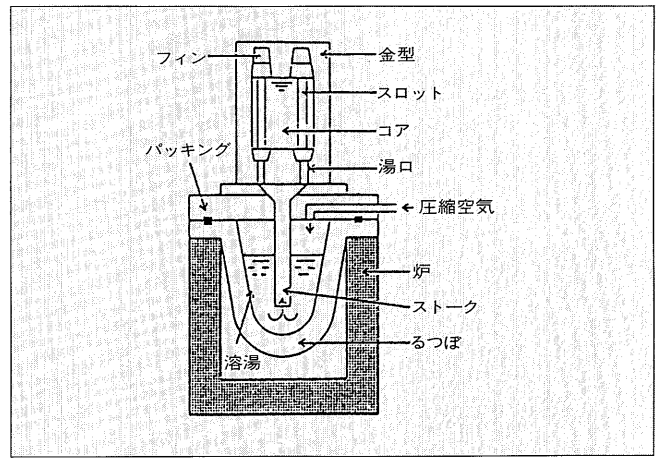
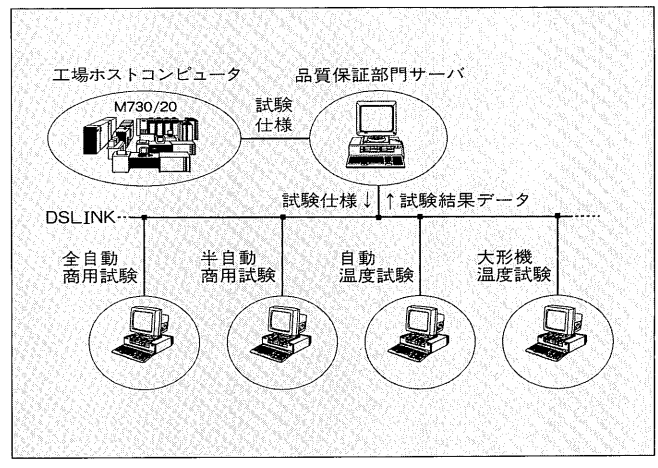


図17　回転機試験・評価システム構成



6 品質保証技術

近来の高品質化・多仕様化・短納期化などのニーズに対応するため，中形電動機の試験，評価，品質管理面などの品質保証技術のコンピュータ化による合理化に取り組んでいるので，その一端を紹介する。

図17に試験，評価システムの概要を示す。工場ホストコンピュータとLANで接続した品質保証部門サーバにより設計および試験仕様を処理するとともに，LANで試験現場と接続し，各種試験データを処理する。試験データは自動計測，記録が可能であり，温度試験設備については監視，制御も含めて自動化され，昼夜無人運転ができるようになっている。

これらの品質保証部門サーバには，別のパーソナルコンピュータレベルで管理された既納品の履歴，各種データも取り込み，中形電動機のCATシステムを構築していく計画である。さらに，これらのシステムを設計，製造部門でもリアルタイムに利用できるようにして，中形電動機工場のCIM計画の基礎システムとしていく。

7 あとがき

R90シリーズを中心に最近の解析技術・製造技術の概要を紹介した。回転電機はよく成熟製品といわれるが，今後とも基本的な製品はもとより新材料や可変速技術の発展とともに新しい分野への展開が望める機種である。

それに伴い，解析技術，製造技術もより高度なものが求められている。今後もさらに改善努力を続け，顧客各位に満足のいただける製品を提供していく所存である。

参考文献

(1) 藤井章ほか：新系列中容量電動機R90シリーズ「エクセレントパワーモータ」，富士時報，Vol.64，No.6，p.366-373（1991）

(2) 一般用低圧三相かご形誘導電動機をインバータ駆動する場合の適用指針，日本電機工業会技術資料，No.169（1990）

(3) 芳賀弘二ほか：エナメル巻線の部分放電開始電圧とV-n特性，平成4年電気学会全国大会講演論文集，No.383（1992）

最近公告になった富士出願

〔実用新案〕

公告番号	名称	考案者	公告番号	名称	考案者
実公平 5-46216	燃料電池	広田 俊夫 近藤 香 鴨下 友義	実公平 5-46705	オープンショーケースの広告体支持装置	小林 初夫
実公平 5-46217	燃料電池発電装置の微粉塵捕集装置	山崎 善文	実公平 5-46707	ショーケースの棚装置	小林 初夫
実公平 5-46257	変流器	松本 吉弘	実公平 5-47463	複合半導体装置	重兼 寿夫
実公平 5-46314	冷媒沸騰冷却装置	藤原 宏和	実公平 5-47479	大電流用整流素子	塚田 剛三
実公平 5-46341	負帰還増幅器	山村 精仁 石川 誠	実公平 5-48347	密閉容器内接触子の絶縁操作ロッド	加藤 信一 磯崎 優 土川 幸
実公平 5-46621	自動販売機の扉ロック装置	田中 経康			

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。