

最近の大形直流電動機における機械耐力の向上

Recent Development of Mechanical Durability of Large DC Motors

圧延用を主体とする大形直流電動機の機械的耐力の向上を目的として、実物大モデルを含む各種モデルにより、応力、疲労強度、共振特性などの一連の実験を行った。

その結果、軸方向剛性の均一化機能をもった「 Δ アーム形電機子スパイダ」を適用することにより、スパイダの機械的耐力を飛躍的に向上させた。また、ロール外力がライザに伝達されるメカニズムの詳細解析過程で、トラス状「 Δ ライザ」の新構造を開発し、その共振周波数を外力の周波数の数倍とし、かつ外力に対する減衰率を増すことにより、ライザの機械的耐力の向上に成功した。

その他、キーレスストレート形軸端、ダブルコッタキー方式及びすみ肉溶接方式の電機子鉄心—スパイダ締結部に関する疲労試験の結果、新方式の機械的耐力が従来方式よりも高いことを確認した。

園部 正* *Tadashi Sonobe*
 森野信幸* *Nobuyuki Morino*
 竹内 守** *Mamoru Takeuchi*
 服部敏雄*** *Toshio Hattori*

1 緒 言

圧延用直流電動機の性能を左右する重要なファクタの一つは、「機械的耐力」である。機械的耐力向上の問題点は、電機子スパイダ、ライザ及び軸端部に集中していることにかんがみ、日立製作所は数年来、これらのテーマに総力を挙げて取り組んできた。これに当たっては、ユーザーの協力により実現した現地実働負荷試験の結果が有効に活用され、また、FEM(Finite Element Method:有限要素法)により精度の高い評価が可能となった。ここに、最近の技術的成果の一端について紹介する。

2 新技術とその効果

2.1 Δ アーム形電機子スパイダ(特許申請中)

従来のスパイダは、軸方向に複数列配置された周方向ステータによりトルクを伝達する構造であったため、トルクが剛性の高いステータ部に集中し、特に電機子鉄心とスパイダの締結部の耐力を低下させる原因となっていた。

図1は、新規に開発された Δ アーム形電機子スパイダ¹⁾(以

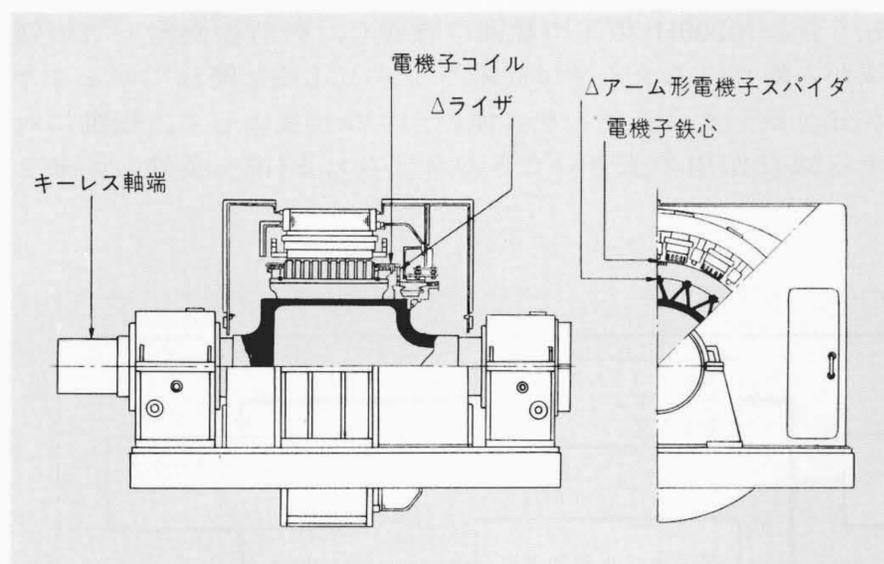


図1 最近の大形直流電動機の構造 Δ アーム形電機子スパイダ, Δ ライザ, キーレス軸端などの採用により、高耐力及び軽量化が図られている。

下, Δ アームと略す。)を適用した直流電動機の全体構造を示すもので、従来の周方向ステータの代わりに2枚1組みのアームを軸外周に Δ 状に配置し、軸方向の剛性を均一化することにより耐力の向上を図ったものである。

図2は Δ アームを介して電機子鉄心から軸へ力が伝達される状況を、有限要素法により解析した例を示すもので、アーム断面の応力レベルがほぼ均一で、いわゆる力線が流れない

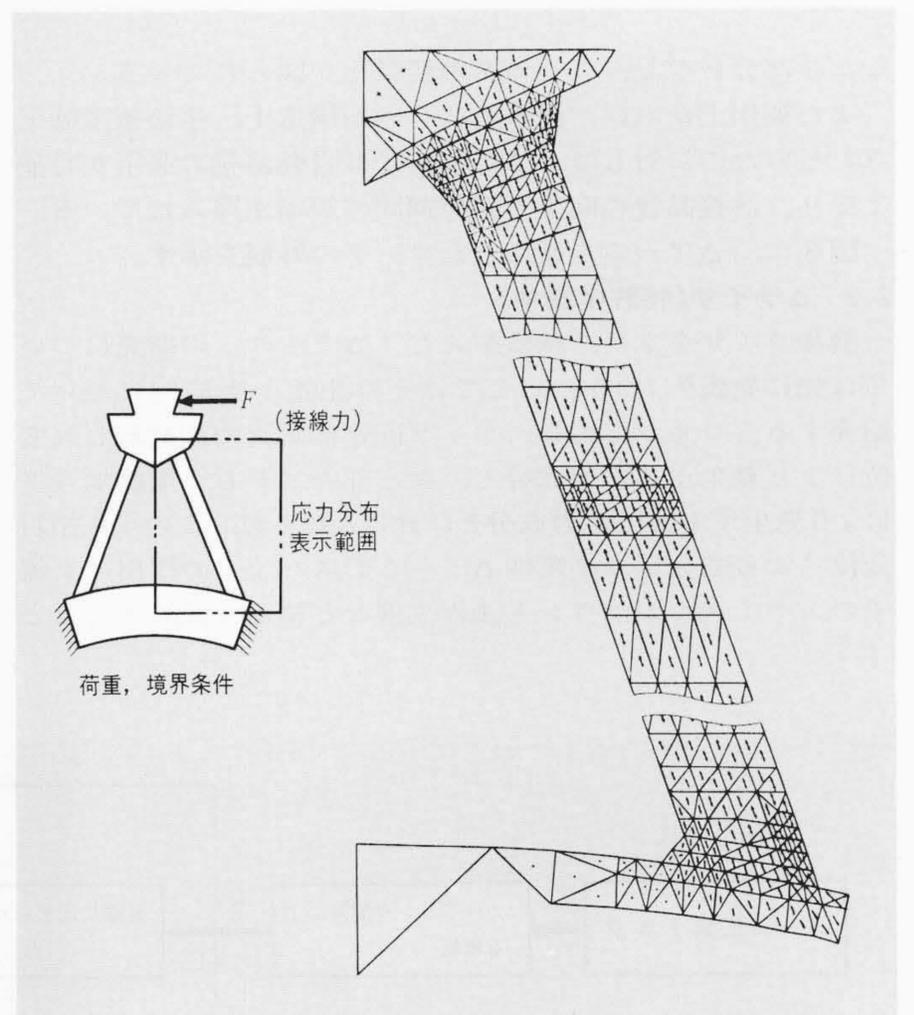


図2 有限要素法による応力計算例 矢印は、 Δ アーム内に発生する応力の大きさと方向を示している。

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所機械研究所 *** 日立製作所機械研究所 工学博士

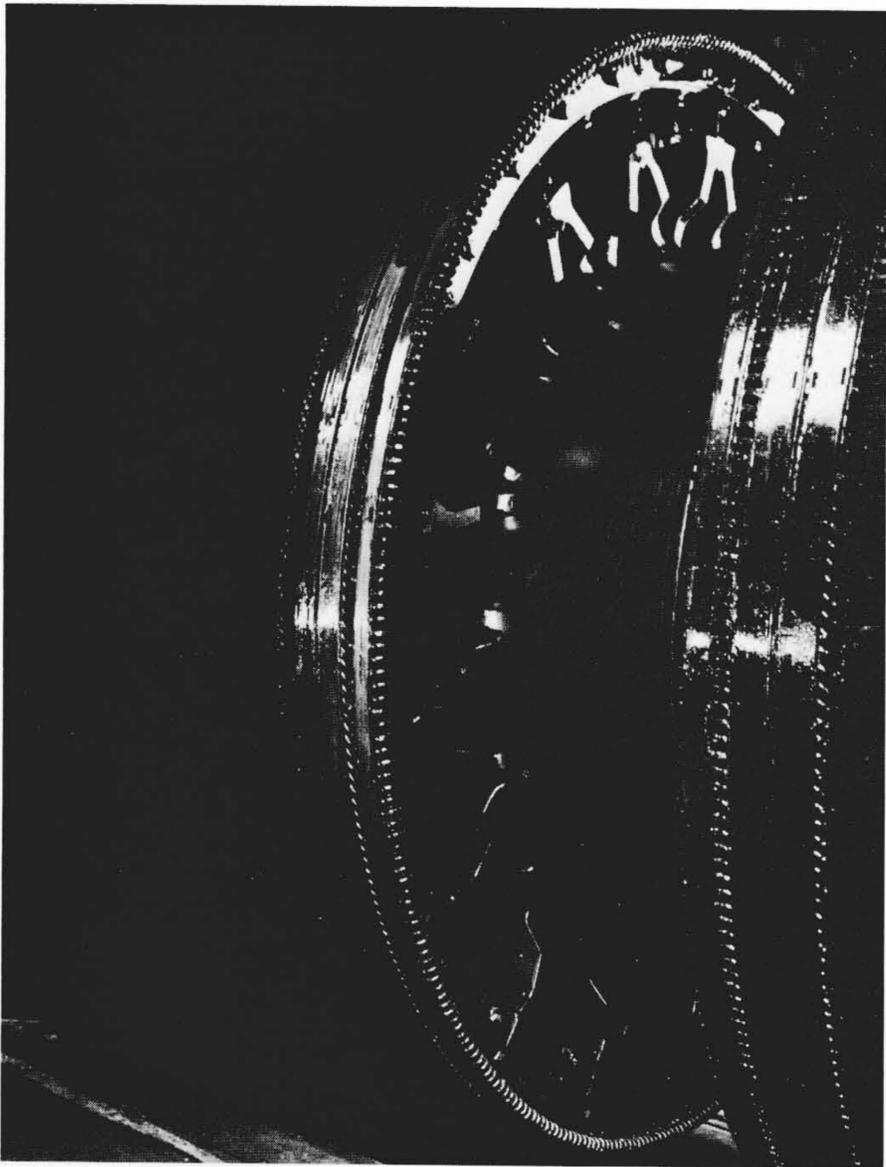


図3 Δアーム形ロータ 2×2,250kW, 40/80rpm 圧延用直流電動機二重電機子の中軸構造に、Δアームを適用した例を示す。

むだな部分がなく、スパイダの軽量化が図られている。

また製作上からは、従来のステーが構造上、手溶接で施工されていたのに対して、Δアームでは自動溶接の適用が可能となり、溶接品質の向上と製作期間の短縮が図られている。

図3に、Δアームを適用したロータの外観を示す。

2.2 Δライザ(特許申請中)

隣接ライザをトラス状に組んだ「Δライザ」の開発については先に発表²⁾したが、ここではその性能と実施例について紹介する。ライザ応力は、ライザ固定部両端の相対ねじれ変位により発生する応力成分と、固定部両端からの振動加速度により発生する共振応力成分とに分けられるが、このうち相対変位による成分は、高剛性Δアーム形スパイダの採用、整流子のスパイダへのマウント法の改善などにより低減すること

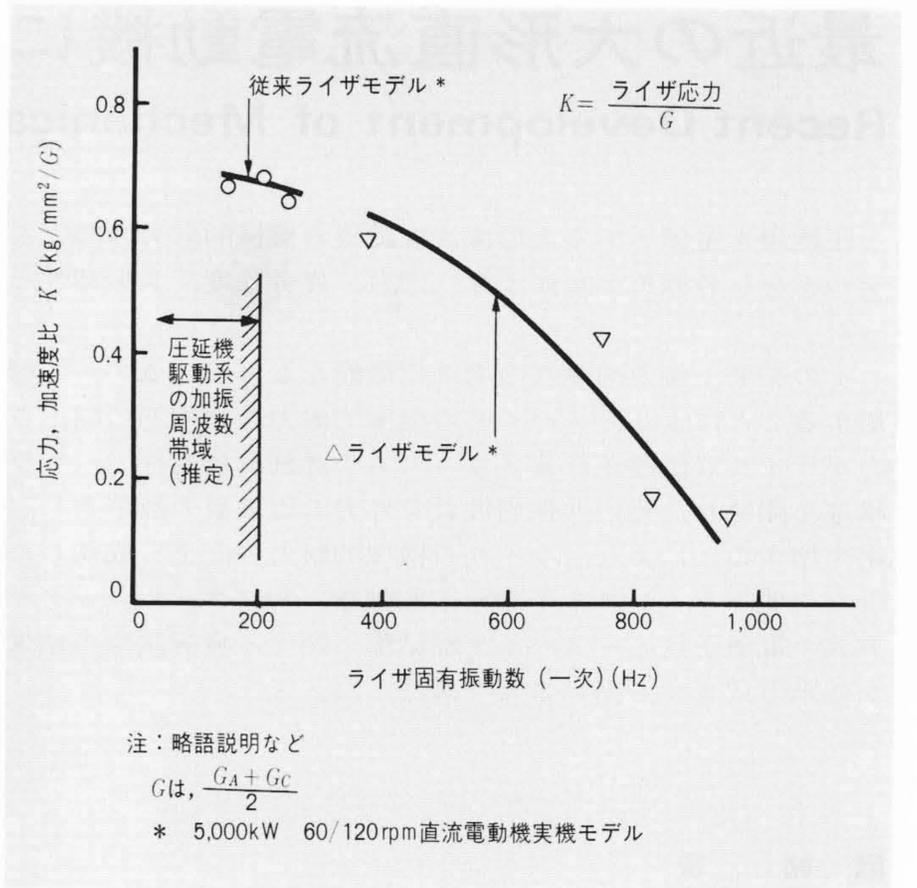


図5 ライザの性能比較 従来ライザモデルはライザの長さを変えたものを、またΔライザモデルは長さと同軸の寸法を変えたものを製作した。

が可能で、かつ軸トルクの大きさにより正確に把握できるが、実働応力上問題となるのは正常でない運転時、(例えば駆動系の過大なバックラッシュ、過大スリップ、スピンドルの異常振れまわりなど)に発生する高調波成分を含んだ異常外力に、ライザが共振して発生する応力である。図4は共振によるライザ応力の発生メカニズムを示すもので、この場合ライザ応力は基本的に軸端に印加される外力に共振して発生するから、ライザの応力を下げる上で、ライザの固有振動数を前記外力の振動数から離すことが重要である。図5は、振動試験³⁾により確認された5,000kW、60/120rpm 圧延用直流電動機実物大ライザの性能を次式で表わされる K (応力、加速度比)と固有振動数との関係で示したものである。

$$K = \frac{\text{ライザ応力}}{\text{振動加速度}}$$

計算及び現地測定によれば、駆動系外力の周波数は異常運転も含め約200Hz以下の範囲に存在し、固有振動数がこの領域から離れたΔライザは従来ライザと比較し優れていることが分かる。またΔライザの他の大きな特長として、振動に対する減衰作用の大きいことが挙げられる(同一条件の従来ラ

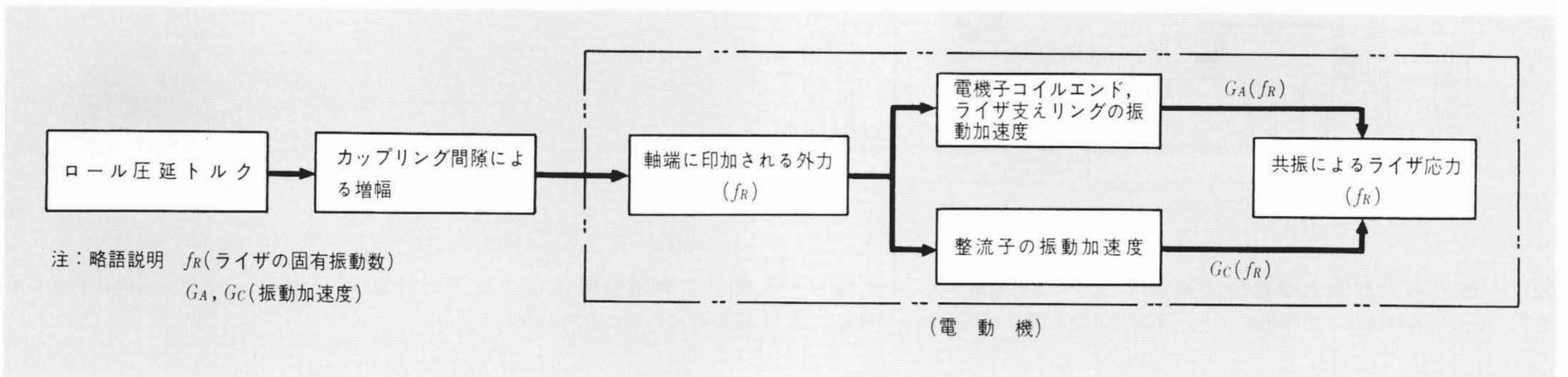


図4 共振によるライザ応力の発生メカニズム 共振によるライザ応力は、軸端に印加される外力の周波数スペクトル中、ライザの固有振動数に等しいスペクトルで励振され、大きな応力を発生する。

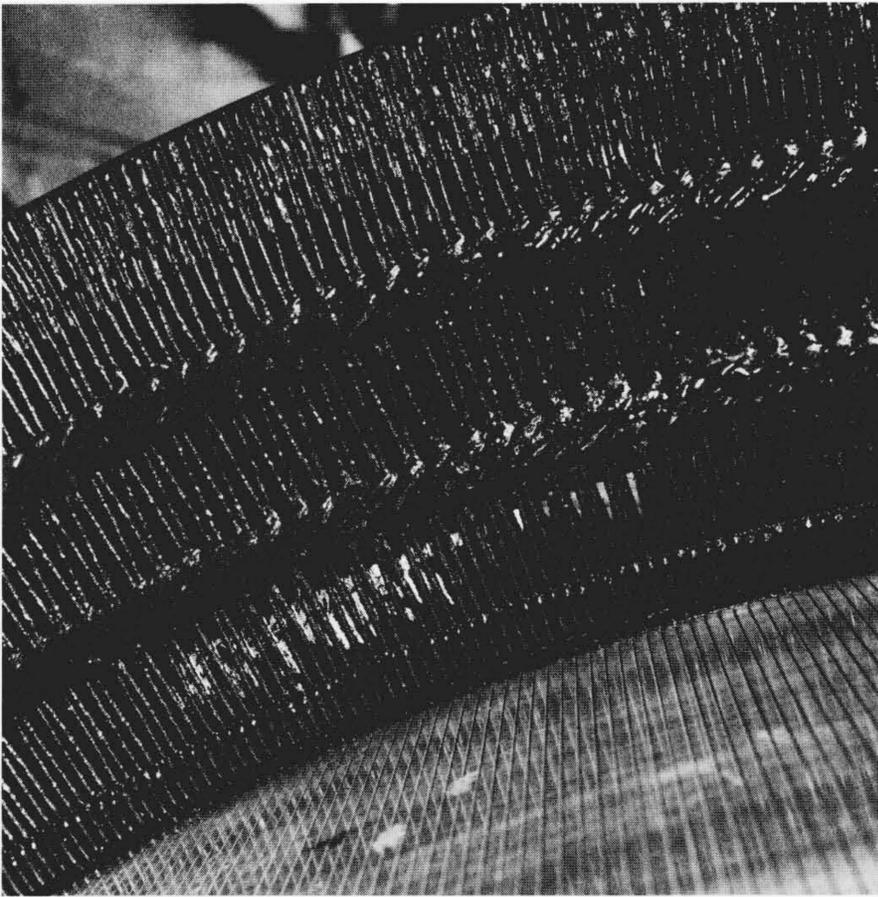


図6 Δライザ 本機(3,000kW 55/125rpm圧延用直流電動機)は、Δライザの採用でライザ支えリングを省略できた。

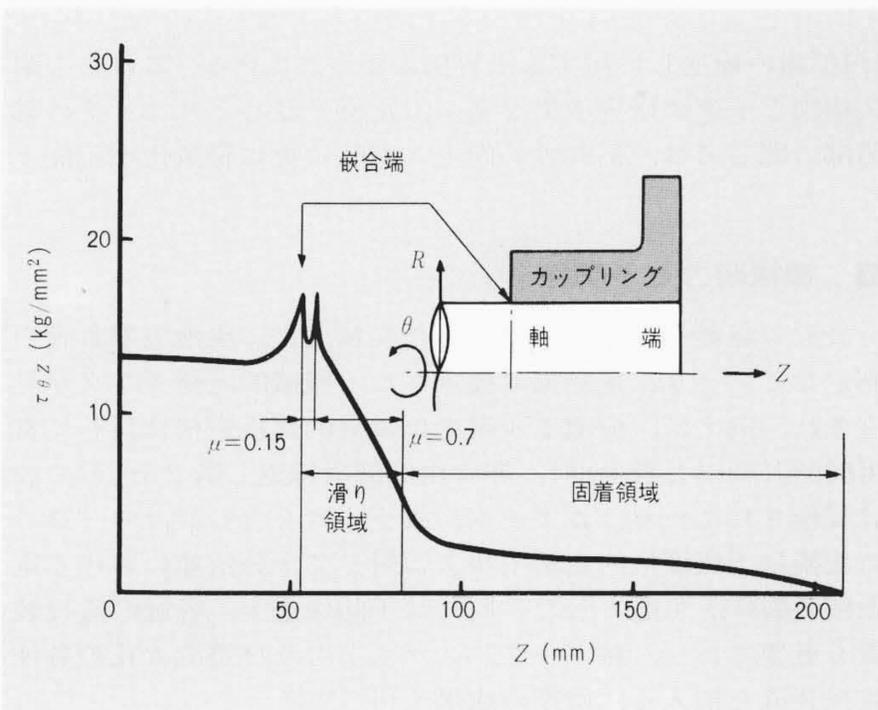


図7 $\tau_{\theta z}$ の軸方向分布 [$\tau_{\theta z}(\text{nom}) = 125\text{MPa}$] 計算に用いた嵌合部の摩擦係数 μ は、嵌合端での軸端~カップリング間の相対ねじり変位の測定結果をもとに決めている³⁾。

ライザに対し約5倍)。これはライザに発生する周方向の振動エネルギーをライザ固定部根本へ伝達し吸収する手段として、従来ライザが剛性的には最も弱い板厚方向の曲げ剛性で伝達されていたのに対して、Δライザは剛性的に最も強い半径方向の引圧剛性で伝達されるためである。図6に、実機に適用したΔライザの外観を示す。

3 改良技術とその効果

3.1 軸端締結部

直流電動機軸端とカップリングの締結については、従来の接線キーと焼ばめを併用する方法に代わり、焼ばめによる摩擦力だけでトルクを伝達する新締結法の適用を行ない、これ

により軸端締結部の耐力向上と軽量化を実現した。

まず、従来の接線キー併用方式とキーをなくした焼ばめ方式の軸端締結部にねじり負荷が加わった場合の、軸端~カップリング間の接触特性を考慮した応力解析を行なった。図7に一例として、キーのない軸端締結部の嵌合部のねじり応力($\tau_{\theta z}$)分布を示す。この結果をもとに、嵌合部の疲労強度を予測し、図8に示す軸端締結部モデルを用いた疲労試験結果と比較したものを、まとめて図9に示す。計算値は実測値と比較的よく一致しており、新構造(キーレスストレート形)は、従来形に比較して約1.8倍の疲労強度をもっていることが明らかになり、これにより軸端径を約20%低減することが可能となった。

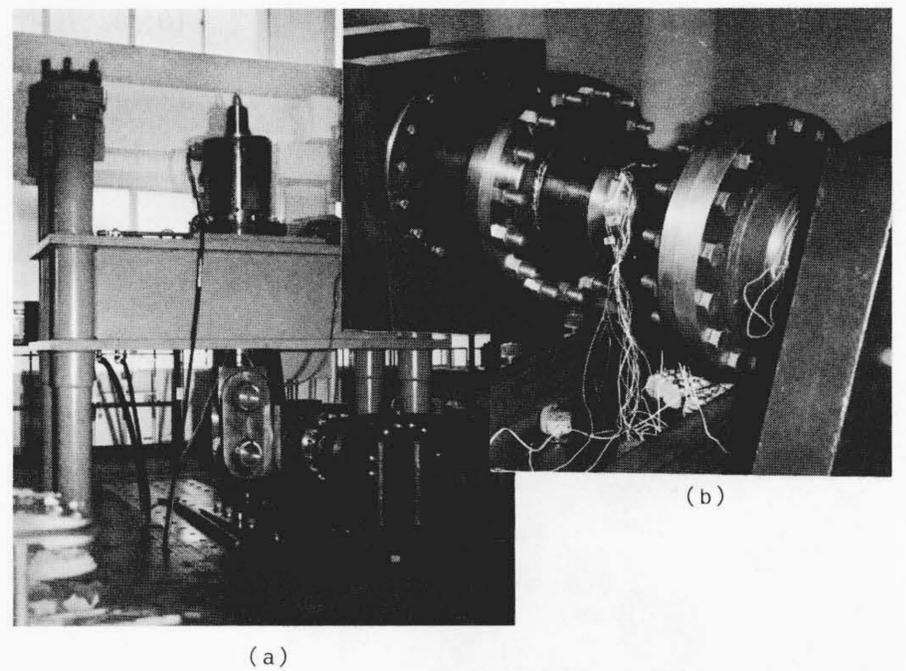


図8 軸端締結部モデル疲労試験 (a)は±24t·mのねじり疲労試験装置の全体を示す。(b)は大形試験片(φ140)の取付状況を示し、2組みの締結部を同時に試験することにより信頼性を高めている。

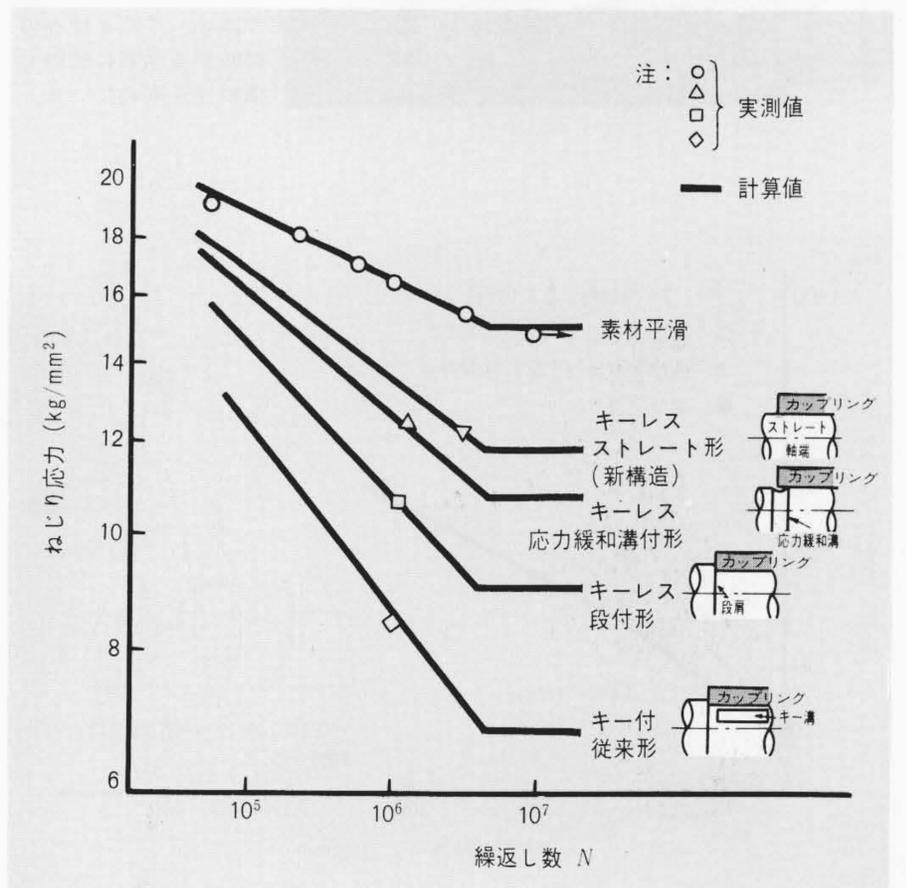


図9 各種軸端締結部のS-N曲線 図中の実線は応力解析結果と素材(SF55A)のS-N曲線を基に予測したS-N曲線を、また各種の印はそれぞれの実測値を示す。キーレスストレート形は、従来形に比べて約1.8倍強度が増している。

3.2 電機子鉄心とスパイダの締結部

電機子鉄心とスパイダの締結部の強度は、電動機の機械的耐力を左右する重要な部位であり、分塊ミルなどの重ショックマシン用には、従来のすみ肉溶接方式と最近開発したダブルテールコッタキー方式(特許申請中)とを、工期、顧客ニーズ、納入後のメンテナンスなどを総合して使い分けているが、信頼性を確認する目的で、実物大全体モデル²⁾によるねじり試験及び部分モデルによる疲労試験を行なった。

締結部には、トルクによる周方向繰返しせん断力と遠心力、磁気吸引力及び鉄心とスパイダの温度差による半径方向引張力が同時に作用するが、これらの荷重に対する応力解析を有限要素法により行ない、この解析結果を基に疲労試験を実施した。図10に部分モデルと疲労試験の状況を示す。

図11, 12に、それぞれダブルテールコッタキー方式及びすみ肉溶接方式の疲労試験結果を示す。前者は、 2×10^7 回、後者



図10 電機子締結部モデル疲労試験 ±60tの引圧疲労試験装置とモデルの取付状況を示す。半径方向力をタイトニングロッドで加え、また2組みの締結部を同時に試験し信頼性を高めている。

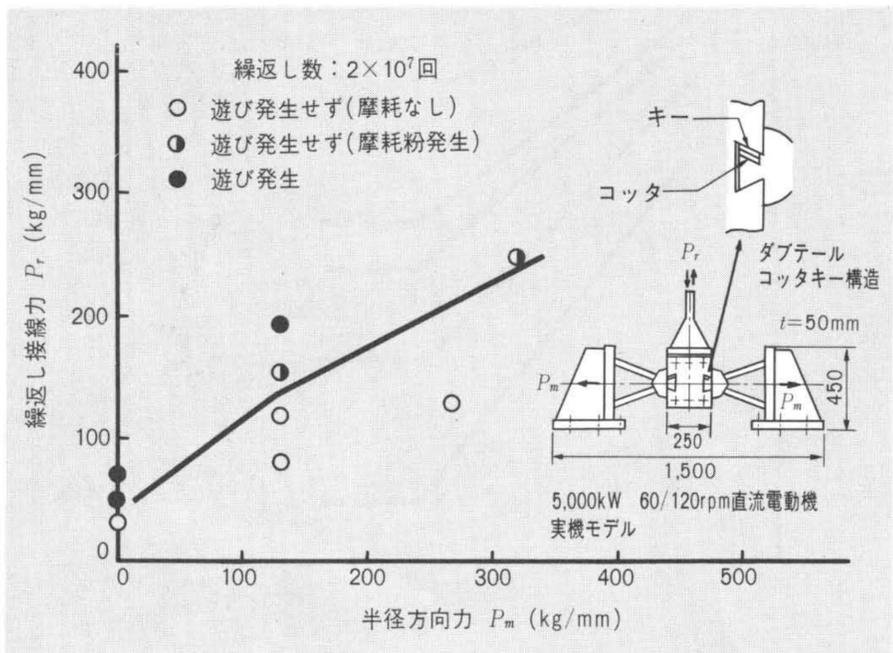


図11 ダブルテールコッタキー方式の耐久力線図 繰返し接線力は、半径方向力の増大とともに大きくなることから、ダブルテールコッタキー方式は従来のダブルテール方式(半径力 $P_m=0$)よりも極めて優れていることが立証された。

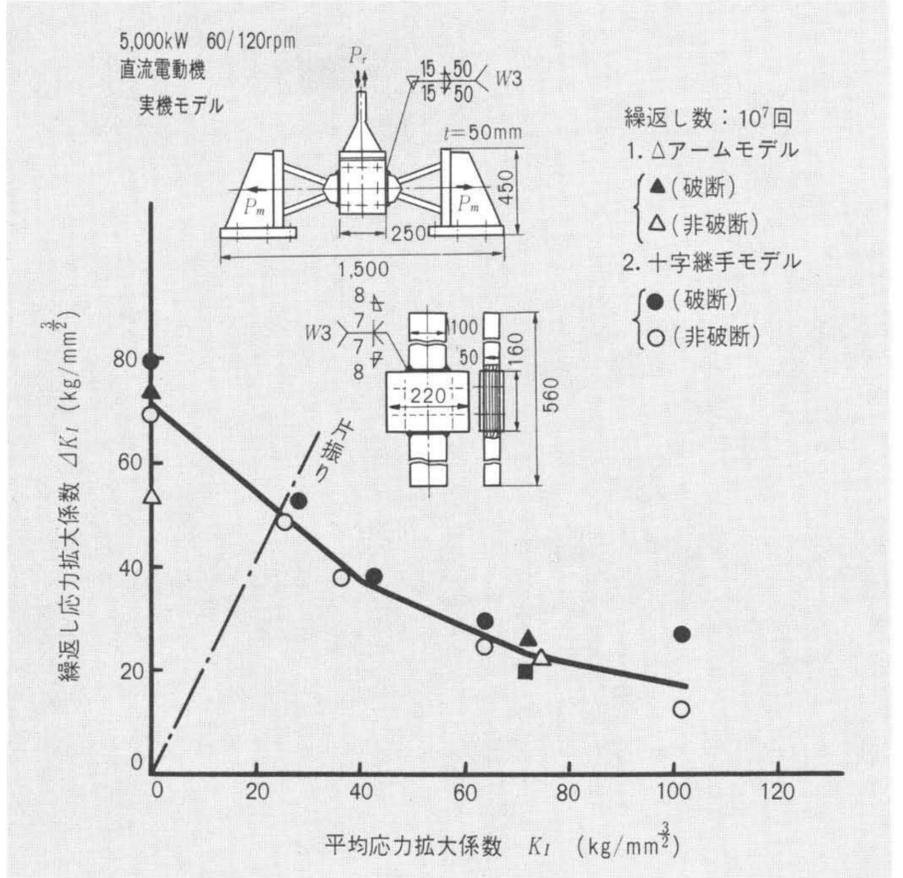


図12 すみ肉溶接方式の耐久力線図 十字継手モデルは引張り応力下の疲れ強さ、Δアームモデルは半径方向引張り平均応力下での繰返しせん断強さを求め、いずれも応力拡大係数で整理した。

は 10^7 回の繰返しに対する限界値が示されている。これらの耐久線図と一連の研究成果を基に、電機子鉄心とスパイダの締結部に関しては、信頼性の向上と同時に更に軽量化が可能となった。

4 機械耐力と予防保全

最近の駆動系ねじり振動計算の高精度化、現地実働負荷の測定などにより、電動機に要求される機械的定格トルクが見直され、例えば、分塊ミル用では電氣的銘板定格に対して常用600%(繰返し数 ∞ 回)、非常用850%(繰返し数2万回)で設計製作されている。Δアーム、Δライザを含む最近の一連の新技术は上記機械的定格トルクに対して十分信頼のおける電動機の製作を可能とした。同時に予防保全上、各種の監視装置も重要であり、軸トルク、スラスト力及び整流火花の各種監視装置を納入し、所期の成果を得ている。

5 結 言

圧延用大形直流電動機の機械的耐力向上を目的とした最近の技術成果のうち、(1) 軸方向に均一な剛性をもつ「Δアーム形電機子スパイダ」、(2) 高い共振周波数と減衰率をもつ「Δライザ」、(3) キーレスストレート形軸端、(4) ダブルテールコッタキー式締結構造の概容について述べた。これら新構造と各種監視装置の適用により、大形直流電動機の機械的耐力の向上に貢献できたと考えているが、引き続きユーザーの指導を希望するものである。

参考文献

- 1) 真柄, 外: 最近の圧延機用電気品の動向, 日立評論, 58, 701~706 (昭51-9)
- 2) 齊藤, 外: 圧延プラント用電気システムの最近の動向, 日立評論, 61, 635~640 (昭54-9)
- 3) 服部, 外: 締めばめ軸継手のねじり疲労強度, 日本機械学会講演論文集, 780-13, 241~243 (昭53-10)