U.D.C. 621.313.2.048:621.317.333:658.581

最近の直流機の絶縁診断と保全技術

Advanced Insulation Diagnosis and Maintenance of DC Motors

谷口正俊* Masatoshi Taniguchi
松延謙次** Kenji Matsunobu

一般に直流機は，過酷な負荷及び悪環境のもとに使用され，絶縁に関するトラブルとしては，メグ低下によるコイルの焼損及びレヤー絶縁，アース絶縁の経年劣化に起因するものが多い。これらの現象に対するメカニズムをモデル試験，実機調査結果から明確にし，メグ値の管理基準を提案するとともに使用条件が絶縁劣化に及ぼす影響，新しい非破壊試験法，点検のポイントについて述べ，今後の直流機の保全業務に対する考え方を明らかにした。

1 緒　言

直流機の事故原因を分析すると，悪質ダストの蓄積によるメグ低下が起因となる電機子巻線のレヤーショート，接地に基づくコイルの溶損，及び整流子ライザ部の短絡，溶損がある。また一方，過酷な運転条件により熱的，機械的，環境的に直流機がストレスを受け，経年的な絶縁劣化によりレヤーショート，接地が生じる場合がある。本稿ではメグ低下，絶縁劣化のメカニズムの検討を行ない，直流機の信頼性運転の面からの保全上のメグ値の考え方，運転履歴から絶縁劣化度を推定する方法，及び新しい非破壊的な絶縁診断試験法，目視点検の重要点について具体的に述べる。

2 絶縁の劣化要因

一般に直流機の絶縁物は，マイカ，ガラス，合成樹脂から成る固体複合絶縁物であるが，その絶縁システムの劣化要因として次の点が挙げられる。

(1) 電気的な劣化

絶縁層内部及び表面に悪質ダストが蓄積し，メグ値が0.1MΩ以下に低下するような状態では，440～1,000V程度の電圧でもトラッキング劣化(表面漏れ電流による局部的なアークによる劣化)を生じ接地に至る場合がある。

(2) ヒートサイクルによる劣化

起動・停止もしくは負荷変動によるもので，導線と絶縁層とのはく離，素線絶縁同士の摩耗，絶縁層内のボイドの拡大，絶縁層内部でのき裂の発生などに影響を及ぼす。

(3) 機械的な劣化

ミル用直流機の運転で，コイルが機械的に厳しいのは，圧延材のかみ込み時であり，最大2.5G程度の振動が加わり，しだいに減少する。これにより，劣化を受ける部分はスロット出口部とコイル曲がり部である。

(4) 熱 劣 化

熱劣化とは絶縁層のレジンの収縮，熱分解などによるボイドの発生，接着力の低下などによる劣化である。一般的に絶縁物の熱劣化特性は，アレニウスの反応則に従うと考えられ，10°C半減則が適用される。

(5) 環境劣化

直流機の環境劣化としては，金属酸化物，カーボンダスト，SO_4^{--}，Cl^-イオンなどを含んだ潮解性ダストなどの悪質ダストが蓄積し，絶縁層内部への悪質ダストの侵入による貫通絶縁耐力の低下，絶縁層の表面抵抗低下によるクリープ絶縁耐力の低下などによる劣化がある。

3 メグ管理の考え方

現在は，直流機を運転する場合のメグ値の規定はなく，温度，吸湿度，汚損度などによって著しく異なるものである。JEC(電気規格調査会)にも参考資料としてメグ値の最低値が記載されているが，実際には生産計画との関係で，この最低値を下回るメグ値で運転せざるを得ない立場に追い込まれ，大事故に至る場合もある。そこで，これまでの悪質ダストに起因する事故の調査，事故前のメグ値の状態，ダストの分析，及びモデル試験結果を総合的に検討し，メグ管理基準として0.1MΩ以上で運転することが妥当である旨の結論を得た。

3.1 付着ダストの特性

図1に汚損電動機から採取したダストを成分分析した結果と，ダストの付着量と絶縁抵抗の関係を示す。

(1) これらの結果は，A，B機のダストが95%RHの高湿度で0.1MΩ以下のメグ値を示しており，湿度に対して極めて敏感に反応するばかりでなく，導電性が高く，ダストを介して沿面放電を生じやすいということを示している。この原因はSO_4^{--}とCl^-が多いためで，分析時はこの成分に注意する必要がある。

(2) **図1**で，SO_4^{--}，Cl^-濃度と絶縁抵抗との関係についてまとめると**図2**に示すようになり，メグ値はイオン化した濃度に強く依存している。SO_4^{--}，Cl^-濃度が1%以上ならば悪質ダストと考えられる。

3.2 JECによる最低絶縁抵抗

我が国のJECが提案している最低絶縁抵抗Rminを**図3**に示す。

3.3 表面抵抗とトラッキング性

機器を停止し絶縁抵抗が低下した状態から電圧を印加するとき，沿面進路形成の危険が特に大きいということが考えられる。そこで，沿面距離をd=10mm，20mm，30mmに変え，任意の電圧を衝撃的に印加し30秒保持する実験を行ない，印加電圧とクリープ電圧が破壊するまでの印加回数を求めた。**図4**にその結果を示す。

(1) 表面抵抗0.01～0.05MΩのとき，印加電圧600V以上であると沿面距離が30mmでも表面損傷される。

(2) トラッキングが，印加する回数に影響することは注目すべきである。印加電圧600V，表面抵抗0.01～0.05MΩの印加

* 日立製作所日立工場　** 日立製作所日立工場 工学博士

付着ダスト成分 (wt%)

成分	C	Cu	SO_4	Cl	Fe	pH
A機	21.2	0.17	9.9	4.7	9.3	5.8
B機	35.2	0.16	7.0	2.5	8.0	6.1
C機	8.8	0.35	0.01	0.01	65.5	——
D機	20.1	0.2	0.05	0.1	49.0	——
E機	57.0	0.4	0.35	0.01	2.0	——

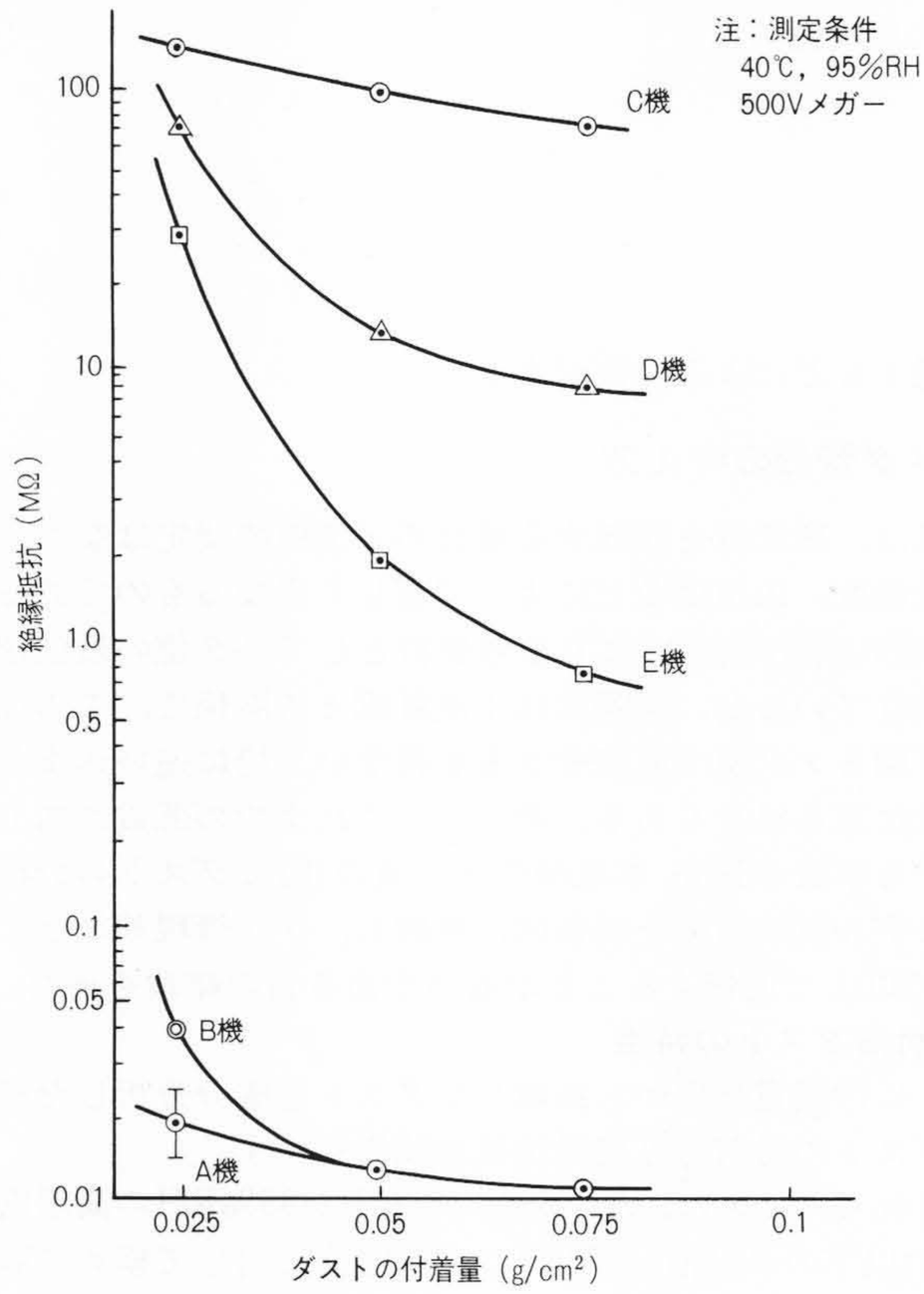

図1 ダストの絶縁抵抗特性 ダストの付着成分及び付着量と絶縁抵抗の関係を示す。いずれも実機から採取したものである。

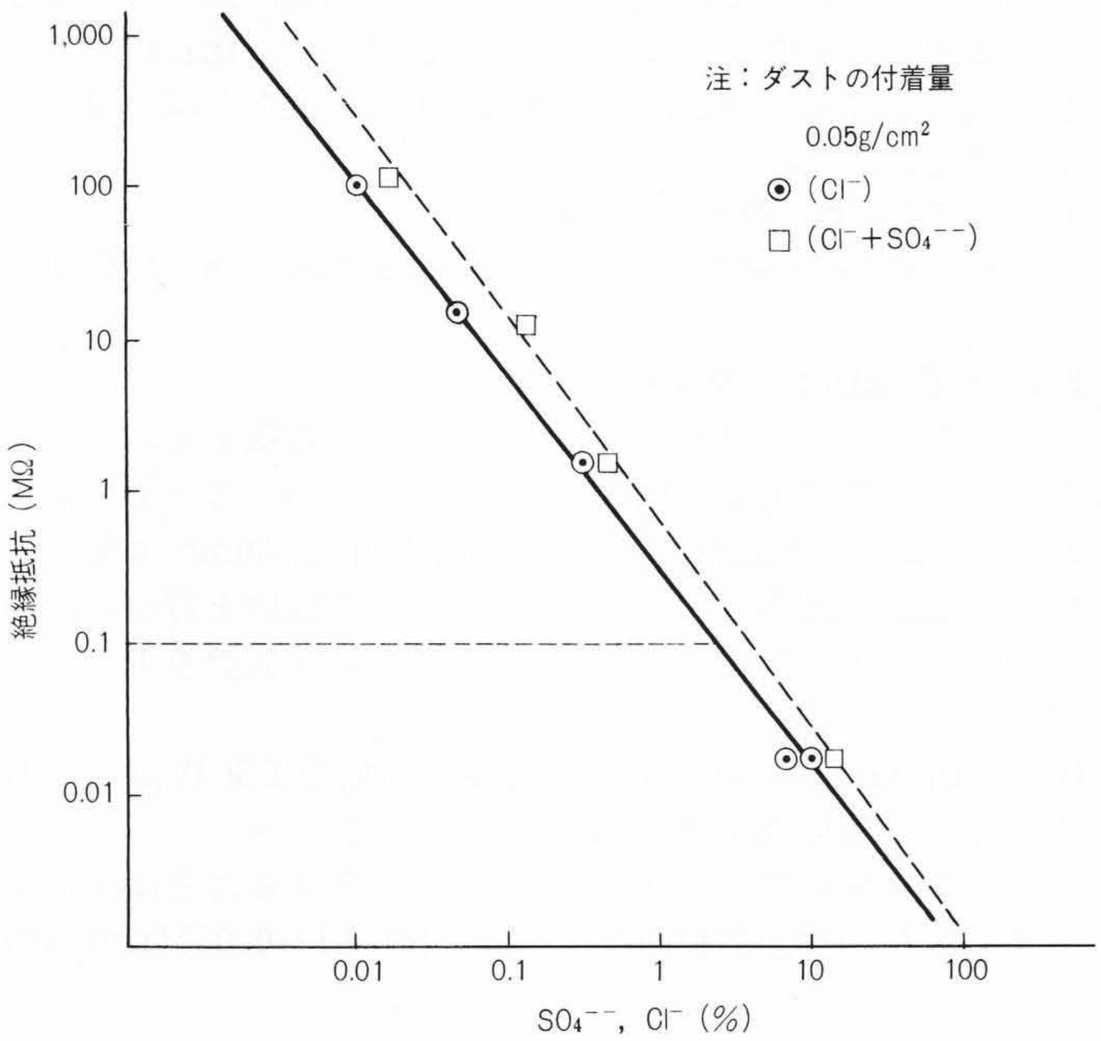

図2 SO_4^{--}，Cl^-濃度と絶縁抵抗特性 潮解性のSO_4^{--}，Cl^-を含んだダストは，これらの濃度により大きくメグ値が左右される。

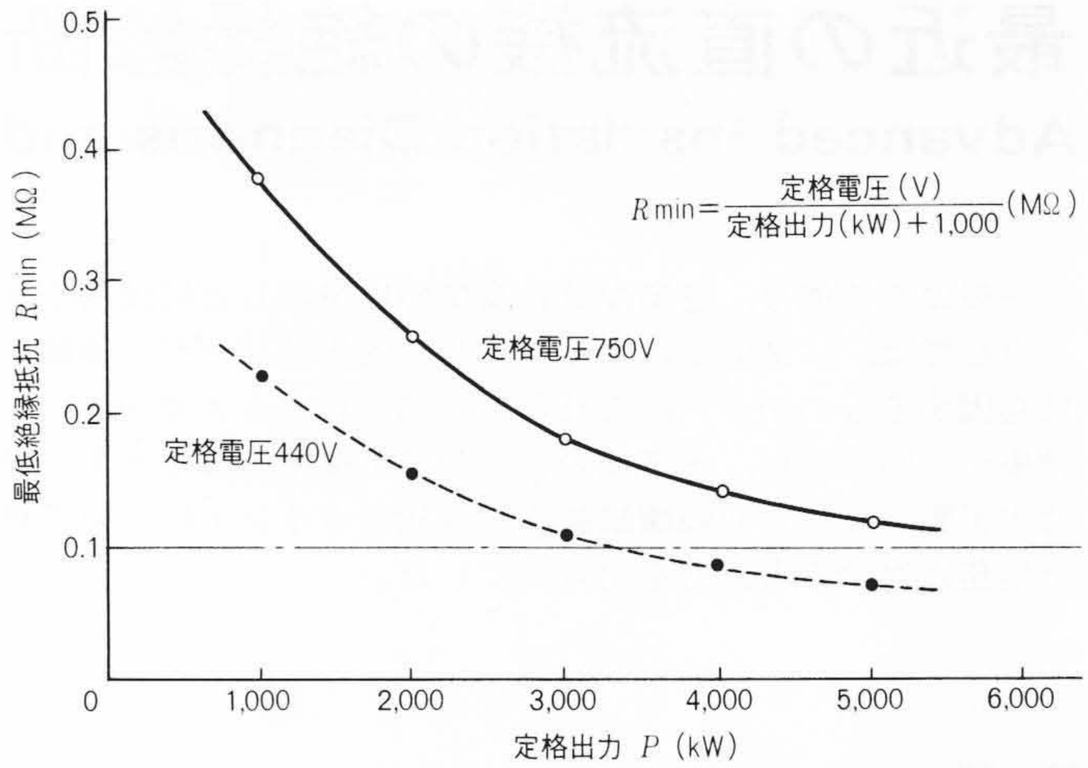

図3 定格出力と最低絶縁抵抗 JECが提案している最低絶縁抵抗値を示す。

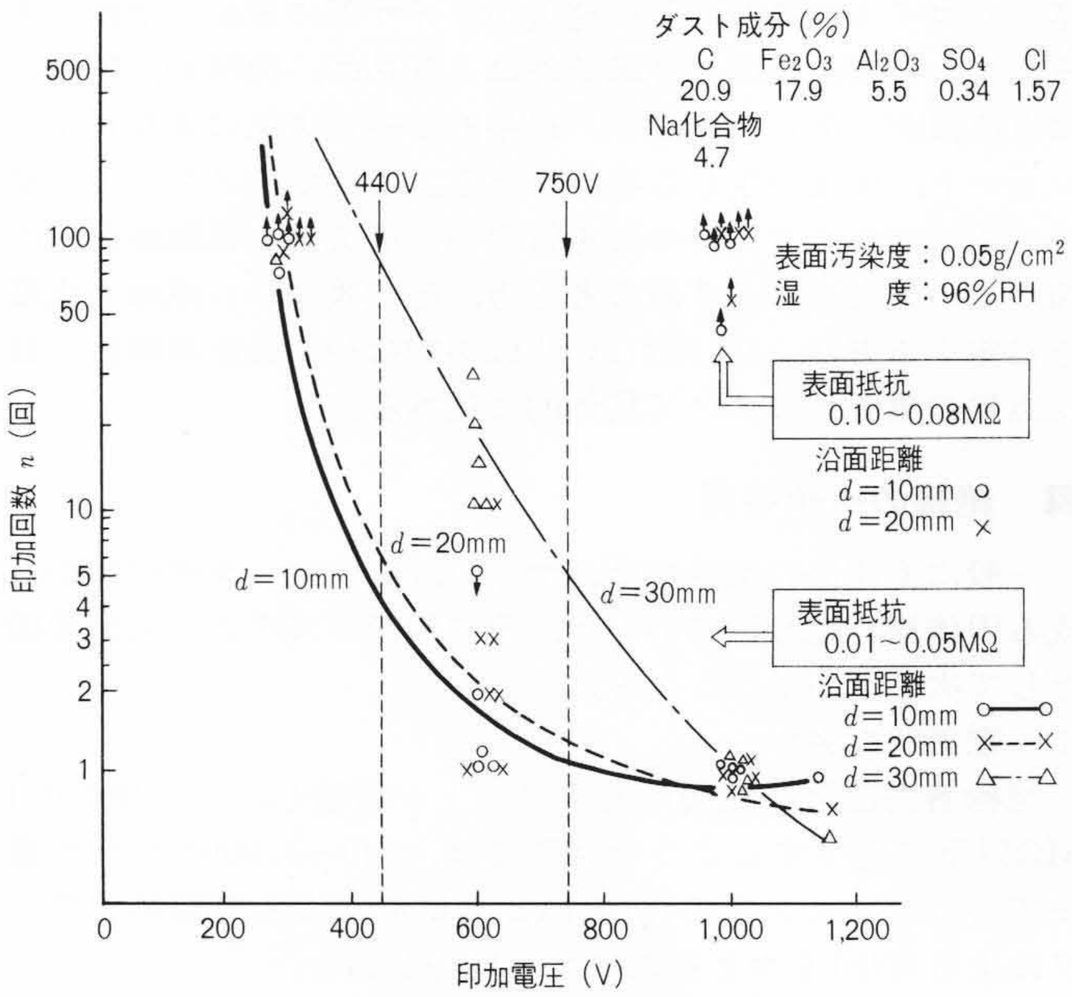

図4 表面抵抗とトラッキング性 表面抵抗値によりトラッキング性は大きく変化し，0.01～0.05MΩのメグ値に対しては，注意を要する。

回数が1～30回でクリープ破壊しているので，前に低いメグ値で起動できたからといって，次回もできるとは限らないことになる。

3.4 直流機事故当時の絶縁抵抗値

直流機のメグ低下が原因でコイル焼損事故に至ったと推定されるものにつき，どのくらいのメグ値で事故になっているかを調査した。事故直前のメグ値ははっきりしないので事故の3箇月前までに記録した最低メグ値でまとめた。その結果を**図5**に示す。

メグ低下が原因でコイル焼損などに至る場合，最低メグ値が0.1MΩを下回ると危険領域に入ると考えるべきである。

3.5 メグ値の条件による変化

メグ値の条件による変化を**図6**に示す。悪質なダストで吸湿した状態でメグ値の低いところから起動しようとした場合，A曲線に従ってメグ値は変化する。この曲線で事故は起動時の電圧を印加したとき，もしくは起動直後には起こらないが何パスか圧延し運転温度が上昇し，吸湿したものが蒸発してくると更にメグは低下し，メグの最低値(同図中②)の状態

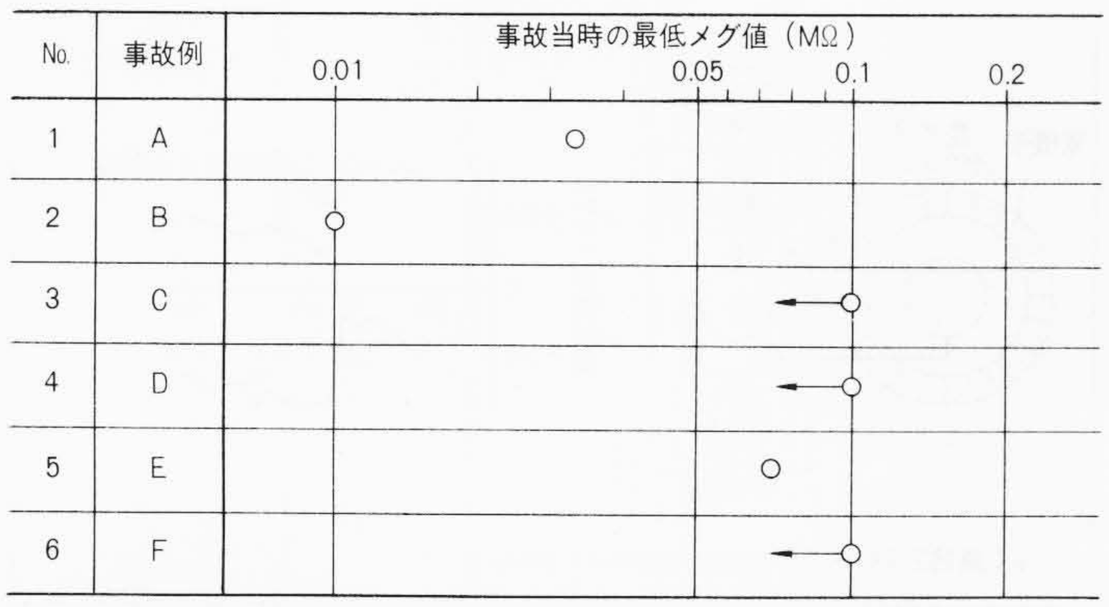

図5　事故当時の最低メグ値　事故直前のメグ値の記録はないが，事故前3箇月で最低メグ値はいくらであったかということでまとめたものである。

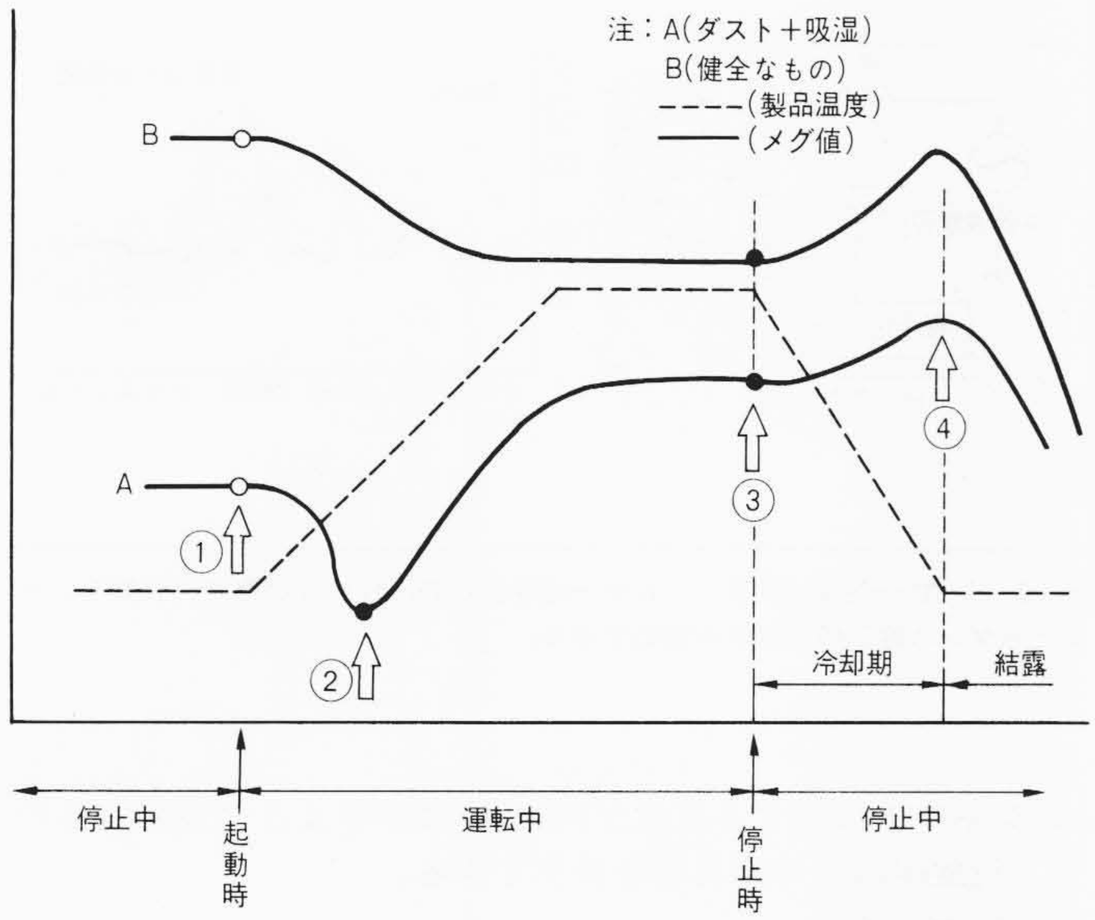

図6　メグ値の条件による変化　ダスト付着の多い直流機の場合は，環境条件，運転状態(温度)によってメグ値が大きく影響される。起動後にメグ値の最低がくる場合があるので注意を要する。

が最も危険になってくる。

3.6　メグ管理値の設定

JECの最低メグ値が0.1～0.4MΩ程度であり，コイル焼損事故に至っているメグ値が0.1MΩ以下，トラッキング現象の発生しないメグ値が0.08～0.1MΩ以上であることから，運転管理メグ値としては0.1MΩ以上が妥当と考える。また接地リレーの動作メグ値も0.1MΩ以上を妥当とし，運転時のどのような状態でもこの値を下回って運転しないようにすることを提案する。

4　大形電動機の故障の実態

あるユーザーが900kW以上の電動機の故障状況を詳細に報告[1]しているが，それによると部位別故障発生状況では，巻線に関する故障が140件中58件とトップで，41%を占める形となっている。また巻線故障のうち，絶縁劣化に基づくものと判定されたものが70%を占めている。巻線の絶縁劣化と判定された72台の交流電動機，直流電動機について確率寿命を求めたのが**図7**である。平均寿命は26.5年となっている。

ここでミル用直流機の寿命について考える。負荷的には一般電動機以上に過酷運転の方向にあり，更に最近は，制御理論及び装置の発達で，電動機容量の利用率が高くなってきていること，また特にミル用電動機に関しては，圧延材料のインゴット重量の増加によるかみ込み時の衝撃トルクの増大などが影響して，一般電動機より寿命的には短い傾向にある。以上からミル用直流機の寿命は，平均的には15～20年程度と考えている。

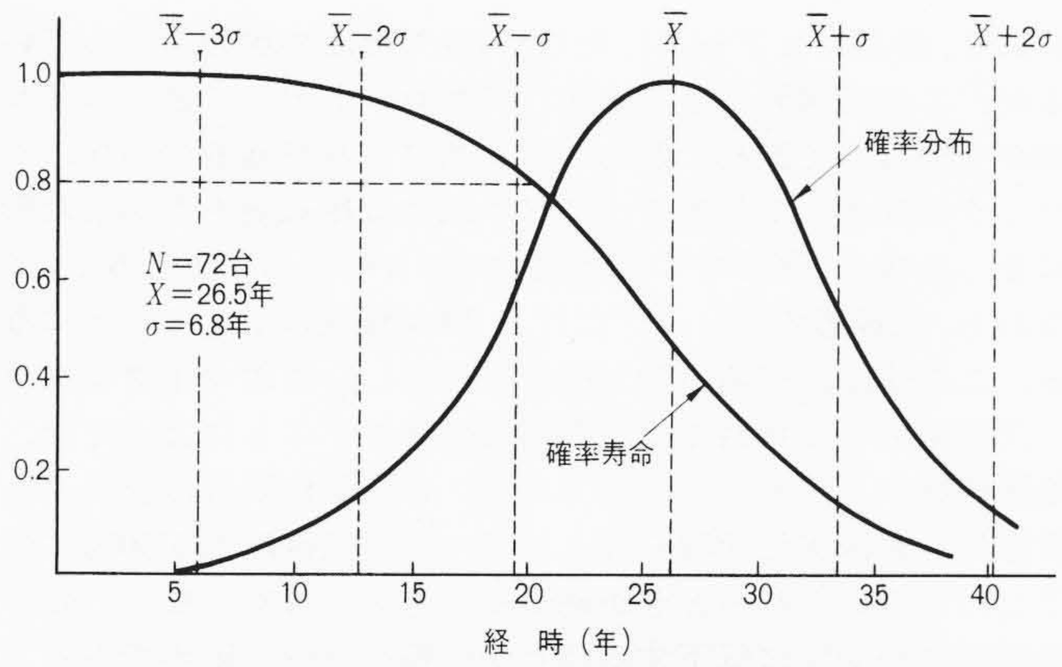

図7　大形電動機の絶縁劣化による寿命分布　電動機の一般的な平均寿命としては26.5年となっているが，使用条件の厳しいミル用直流機では15～20年程度と考える。

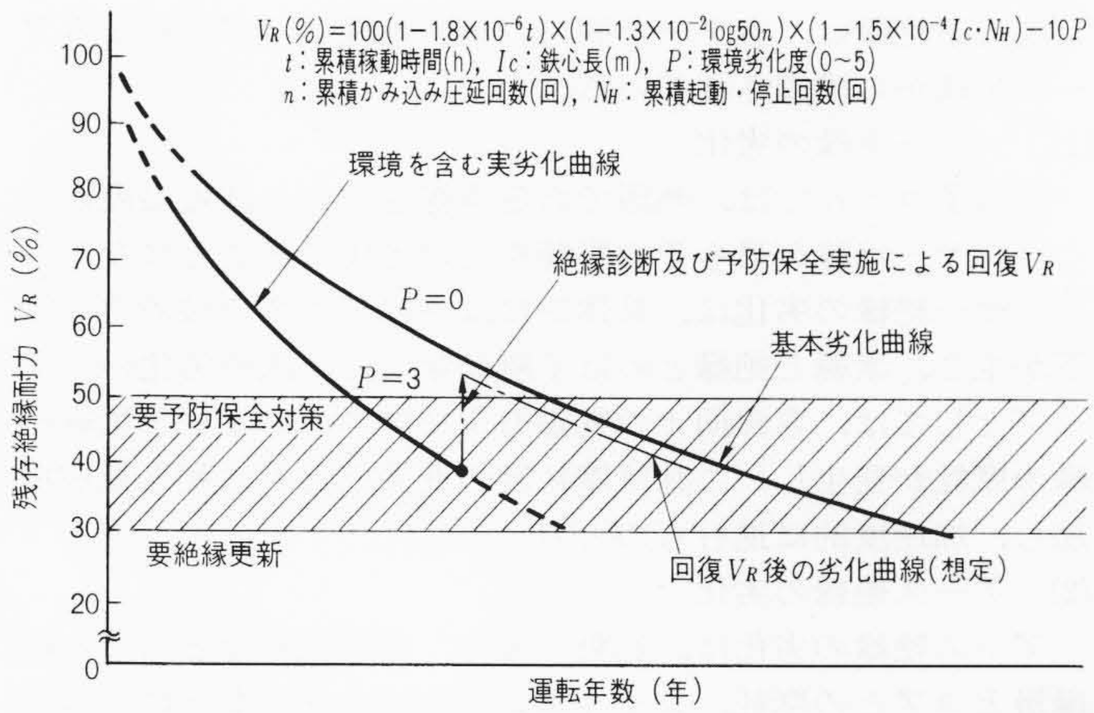

図8　経年絶縁劣化曲線と予防保全　V_Rは，熱，熱サイクル，機械振動に起因する残存絶縁耐力の基本的劣化分と，環境劣化度Pによる分とで構成される。

5　運転履歴からの残存絶縁耐力推定

日立製作所は熱劣化，振動劣化，ヒートサイクル劣化及び環境劣化の影響を調べるため，モデル試験，実機確認試験などを実施し，残存絶縁耐力(運転による劣化分を差し引いた現在もっている破壊電圧) V_Rを導いた[2]。その結果を**図8**に示す。

(1)　環境劣化(雰囲気のダストの絶縁層への付着，侵入による化学的な劣化)分に対しては，メグ値の状況により，洗浄作業，ワニス処理などを実施することで回復させることができるので，絶縁更新の判断基準としては，環境劣化度$P=0$のときの基本劣化曲線がポイントとなる。

(2)　コイル絶縁更新管理限界について考える。絶縁物の寿命判定基準としては，IEC (International Electrotechnical Commission)が寿命点(End Point)を「絶縁破壊電圧では初期値の50%低下点，引張り強度，曲げ強度では初期値の50%低下点」と定義している。一方，一般にミル用直流機のB種絶縁は，レヤー絶縁，アース絶縁を合わせて約1mm程度の厚さ

があり，新品時にアースに対して10kV程度の耐力をもっているが，この絶縁層が経年劣化してスロットの出口部，コイル曲がり部などで振動，熱的ストレスにより絶縁層の白化，クラックの発生した状態で，ミクロ的には絶縁層を貫通した形になった場合，気中での絶縁耐力は3kV/mm程度である。すなわち，絶縁層のギャップだけで3kV程度は耐えることになる。この値は，初期の30%程度に相当し，このマイクロクラックの発生した状態では，雰囲気の悪性ダストによっては，絶縁破壊する不安定な状態である。日立製作所は以上の点を考慮し，絶縁劣化管理方針として，残存絶縁耐力が50%に低下したと考えられるときが絶縁更新を図る目安となり，残存絶縁耐力が30%に低下する時点が信頼性運転の限界であると考えた。

6 絶縁診断技術

6.1 絶縁の劣化

電機子絶縁は，各ターン間のレヤー絶縁とコアに対するアース絶縁から構成されている。

(1) レヤー絶縁の劣化

電機子コイルでは，熱源である素線部がいちばん温度が高く，レヤー絶縁が最もその影響を受け劣化することになる。

レヤー絶縁の劣化は，具体的には絶縁ワニスの接着力の低下が生じ，素線と絶縁とのはく離が起こる。次の劣化のステップとしては，素線同士の電磁力及び熱伸びによって素線絶縁の摩耗が発生し，これは摩耗度の進展とともに動き量が増加し，加速度的に進むものと考える。

(2) アース絶縁の劣化

アース絶縁の劣化は，起動・停止，負荷変動などによる絶縁層とコアとの摩耗，コイルエンドがバインドなどによって熱伸びが拘束されることによるコイルのスロット出口での曲げ応力疲労，起動時及び過負荷時の電磁力による曲げ応力疲労，そして過負荷時の温度上昇による熱的な劣化などが主となる。

アース絶縁の劣化した状態では，ダストや吸湿の影響を受けやすくなり，メグ値の低下につながる。このように絶縁層内部までダストなどが侵入した状態になると，スチーム洗浄などを実施しても完全にダストを除去することが困難となり，メグ値の回復が十分にできない状態になる。

6.2 絶縁診断

(1) 目視点検(重要ポイント)

(a) コアダクト部からの白い粉の発生の有無

起動・停止，負荷変動の激しい機械では，アース絶縁とコアとの摩耗により白い粉の発生が見られる。特に過負荷使用される機械では，高温状態での摩耗となるため，白い粉が発生しやすい。

(b) コイルエンド絶縁部のクラックの有無

起動・停止，負荷変動による熱伸び，起動時，過負荷時などの電磁力により，コイルのスロット出口部及びR部，並びにバインド端部の曲げ応力によるクラックが発生する。初期では，表面の仕上げワニス程度のクラックであるが，更に進むとアース絶縁層内部まで進展してゆく。

(2) アース絶縁診断

HIT(Hitachi Insulation Tester：日立直流機絶縁診断装置)を開発し，アース絶縁，レヤー絶縁の弱点部の検出を実施している。**図9**(a)に示すように，隣接する整流子セグメントに通電し，シャフトに対する電流電位を微小電圧計(内蔵)で測定する。対地絶縁抵抗が局部的に低いコイルがある場合には，シャフトに対する電位が同図(b)に示すように急変するので，対地絶縁の局部異常を検出できる。

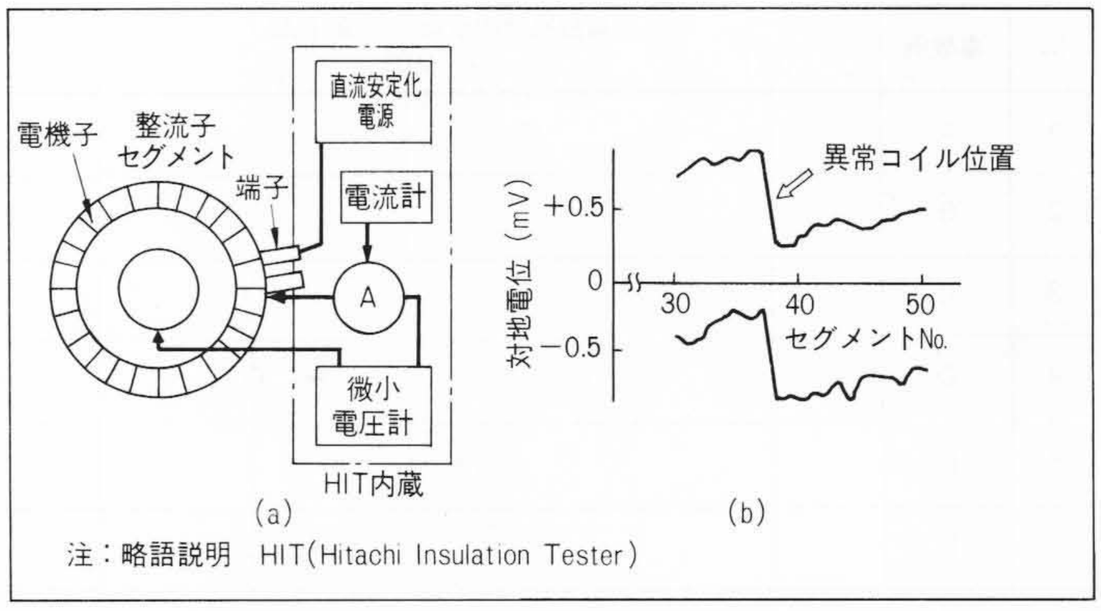

図9 アース絶縁診断 アース絶縁でのメグ値の低下点を，対地電位の変化で検出できる。

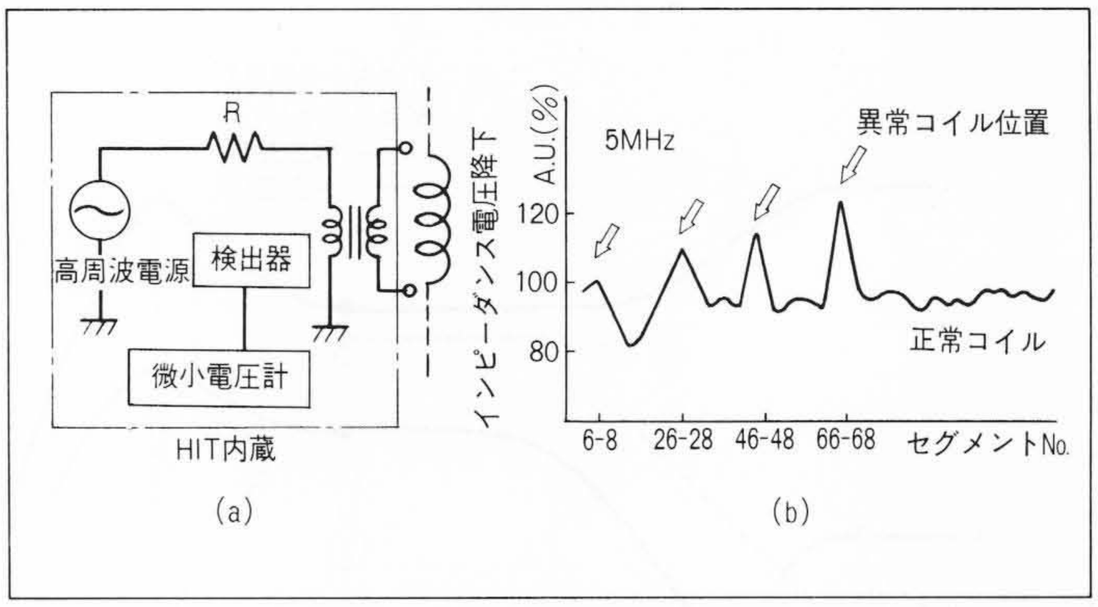

図10 レヤー絶縁診断 レヤー絶縁劣化の度合い及び異常劣化部を，インピーダンス電圧降下度から検出できる。

(3) レヤー絶縁

図10(a)に示すように，一つのコイルを形成する複数ターンの回路に高周波電流を流し，コイル端子間の電圧を測定する。レヤー絶縁抵抗が局部的に低いコイルがある場合，及びレヤー絶縁の摩耗などによりレヤー間距離が局部的に小さくなっている場合，レヤー間静電容量Cが変化し，インピーダンス電圧降下のばらつきとなって測定され，同図(b)に示すようにコイル端子間の電位が急変するので，レヤー絶縁の局部的異常を検出できる。

7 結　言

以上直流機の電機子巻線の絶縁劣化に関するメカニズムを明らかにした。またメグ低下に対しては，0.1MΩ以上での管理を推奨するとともに，アース絶縁，レヤー絶縁に対する点検のポイント及びHITを使用しての非破壊試験による定量的な劣化度の判定法を提案した。現在実機でデータを蓄積中であり，運転履歴からの寿命推定と合わせ，総合的な判断によって絶縁劣化を把握し，精度の高い保守管理法としてまとめていきたい。今後共ユーザーを含む関係方面の賛同と協力が得られれば幸いである。

参考文献

1) 登古：大型電動機の保守，製鐵研究，305号，1981
2) 松延，外：ミル用直流機の絶縁診断と寿命予知，日立評論，**65**，12，869～872(昭58-12)