

大容量直流回転電機の整流特性の検証

Verification of Commutation for Large D.C. Machines

大形直流電動機の単機大容量化、低慣性・小形化を図るに当たって、大きな要因となる整流性能に関しては電子計算機により精密な整流計算を実施し、必要な詳細検討を行なうことができる。今回、8,400kW二重電機子直流電動機的设计段階で、一連の精密な整流計算を実施して、最適補極形状を求め、電機子巻線の最適短節度は $\frac{1}{2}$ スロットピッチであること、トレッペン巻電機子では回転方向により無火花帯の幅が大幅に異なることを明らかにした。また、無火花帯を実機で確認した結果、計算結果と実測値とがよく対応していることを明らかにした。

茂木正二* Motegi Shōji
田原和雄* Tahara Kazuo
松井孝行* Matsui Takayuki
森野信幸** Morino Nobuyuki
野崎哲裕** Nozaki Tetsuhiro

1 緒 言

プラント産業や車両に対する可変速駆動システムに組み込まれる直流電動機は、過酷な運転が繰り返され、過負荷耐力、寿命、保守及び信頼性の確保が必要となる。近年、省力化に対処して単機大容量化、低慣性・小形軽量化を指向してH種絶縁の採用、機械的強度や剛性の向上が図られている。耐熱性が向上すれば電機子の電気装荷を大きくすることができ、機械的強度が大きくなれば高速化が可能になるので、製作限界を高められる。しかし、慣性を低減するには電機子外径を小さくし、軸長を長くする必要がある。したがって、整流コイルのインダクタンスが大きくなり整流は厳しくなる。すなわち、機械寸法を決める大きな要因である整流改善技術が伴わなければ、多くのニーズに対処することはできない。一般に、大形電動機の整流の難しさの指標(以下、 M 値と略す)は次式で表わされる。

$M = \text{定格出力(kW)} \times [\text{最高回転数}(\text{min}^{-1})]^2 / \text{基底回転数}(\text{min}^{-1})$ この値は、非可逆回転直流電動機では $2.36 \sim 6.0 \times 10^6 (\text{kW} \cdot \text{min}^{-1})$ であるといわれる¹⁾。これまで、整流理論は種々の形で紹介されているが、近年、電子計算機を用いた整流解析が報告され^{2), 3)}設計段階で整流現象を定量的に検討できるようになっている。この論文は整流計算方法について説明するとともに、実機の補極形状、電機子巻線仕様を決定し、無火花帯を確認した結果、計算結果とよく対応していることを明らかにした。対象機は M 値が単電機子当たり $4.6 \times 10^6 \text{ kW} \cdot \text{min}^{-1}$ となる可逆回転圧延用8,400kW二重電機子直流大形電動機である。図1に日立製作所の大形直流電動機の M 値の推移を示す。

2 整流解析の概要

2.1 整流回路の構成

直流電動機の整流回路は、整流コイルの抵抗を r_j 、自己インダクタンスを L_j 、整流起電力を e_j とする集中回路定数で表わし、非整流中の電機子巻線を定電流源で表わすと図2のように示すことができる。同図で R_j は、摺動中のブラシの接触面積が時間的に変化し、電圧降下が電流に対して非線形であることを考えた接触抵抗である。各整流コイル間の相互インダクタンスは、インダクタンス行列で考慮する。これより、電流則基本カットセット方程式、電圧則基本閉路方程式⁴⁾を求める必要がある。そして、整流コイルのインダクタンス電流

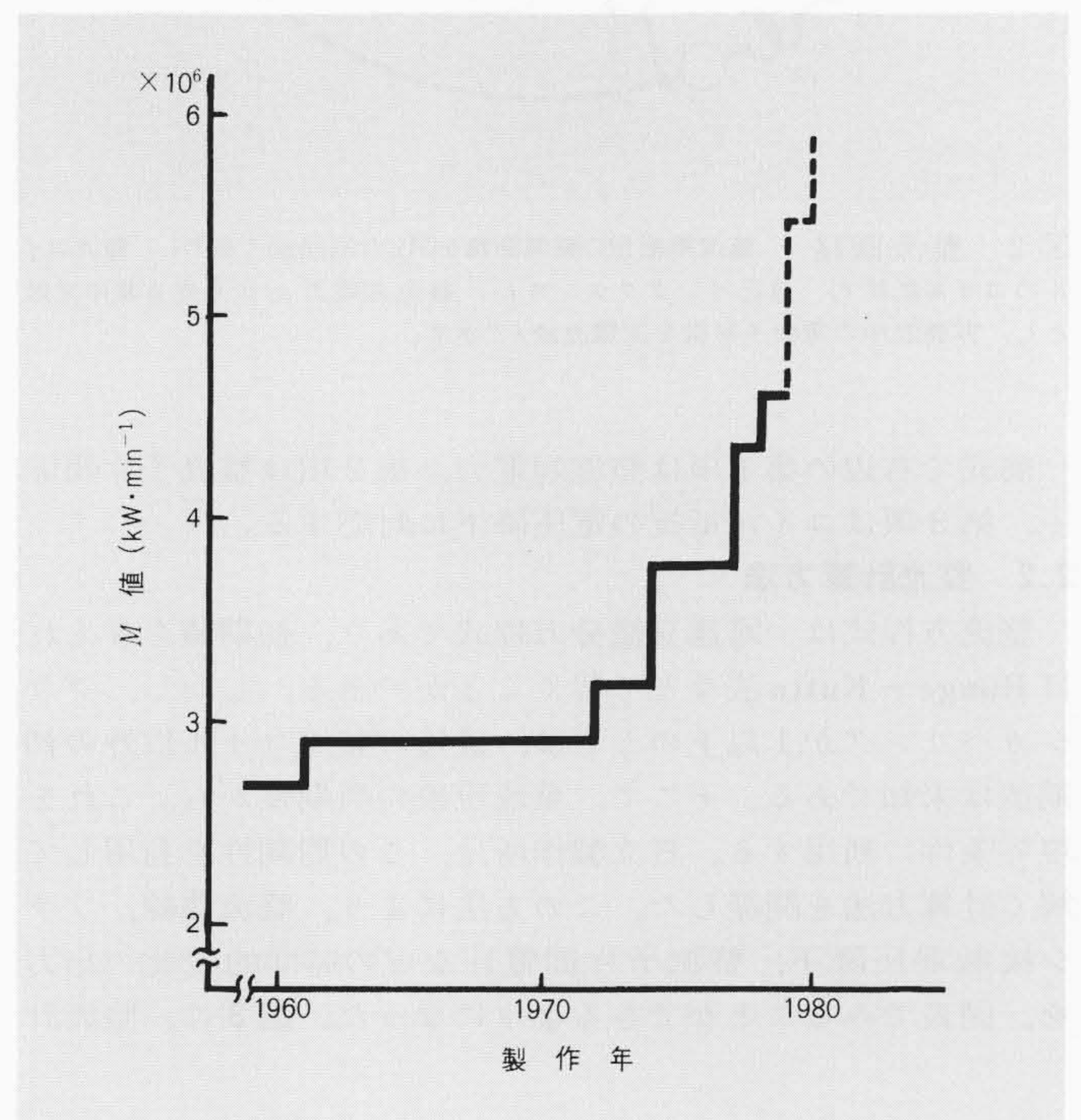


図1 大形直流電動機的主要製作実績 日立製作所での主要大形直流電動機の製作実績と単電機子当たりの M 値の推移を示す。

$[i_L(t)]$ について整理し、次式の整流方程式を得る。

$$\frac{di_L(t)}{dt} = L^{-1} \left\{ F_{VL}^T V_V(t) + F_{RL}^T R_R (-F_{RL} i_L(t) - F_{Ri} i_L(t)) - F_{rL}^T R_r F_{rL} i_L(t) \right\}$$

ここに L^{-1} : インダクタンス行列の逆行列

F^T : F の配置行列

R_r : 整流コイル抵抗から成る $n \times n$ 次行列

F_{RL} : R_j と L_j との接続を表わすカットセット行列

F_{VL} : e_j と L_j との接続を表わすカットセット行列

F_{Ri} : R_j と I_j との接続を表わすカットセット行列

F_{rL} : r_j と L_j との接続を表わすカットセット行列

V_V : 各整流コイルの整流起電力ベクトル

R_R : 各整流子片とブラシとの接触抵抗

* 日立製作所日立研究所 ** 日立製作所日立工場

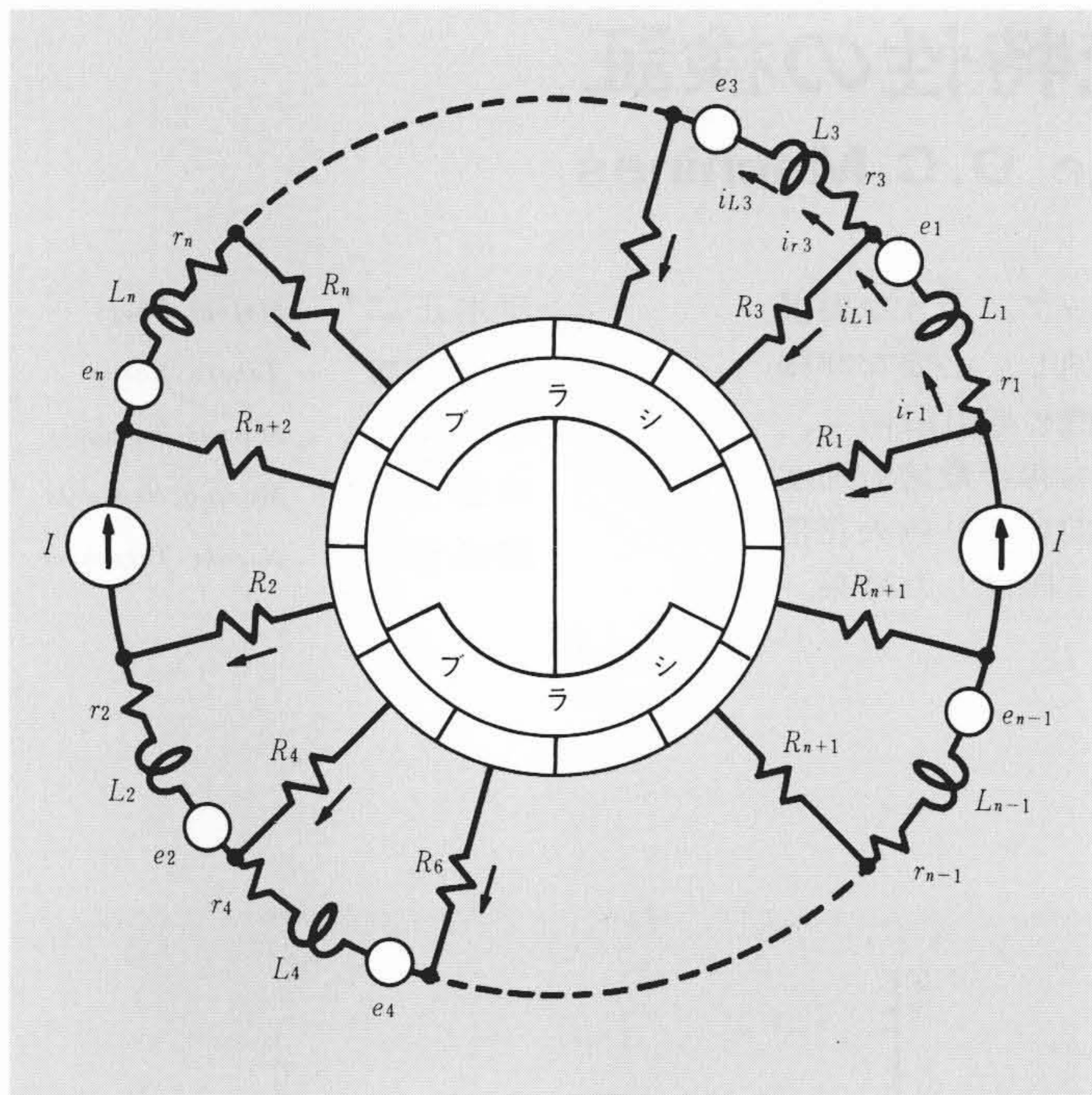


図2 整流回路 直流電動機の整流回路を閉じた回路網で表わし、整流コイルのコイル抵抗 r_j 、自己インダクタンス L_j 、整流起電力 e_j から成る集中定数とし、非整流中の電機子巻線を定電流源 I で示す。

前式で右辺の第1項は整流起電力、第2項は整流子片間電圧、第3項はコイル抵抗の電圧降下に対応する。

2.2 整流計算方法

整流方程式は一階連立微分方程式であり、初期値を与えれば Runge-Kutta 法などで解くことができる。しかし、ブラシカバリングが1以上のときは、最後の整流コイル以外の初期値は未知である。そこで、整流現象の周期性から、これを境界条件に利用する。日立製作所は、この周期性を利用して解く計算方法を開発した。この方法により、整流曲線、ブラシ接触電圧降下、整流子片間電圧などの時間的変化の出力を、図表でみることができるようになった。図3に、整流計

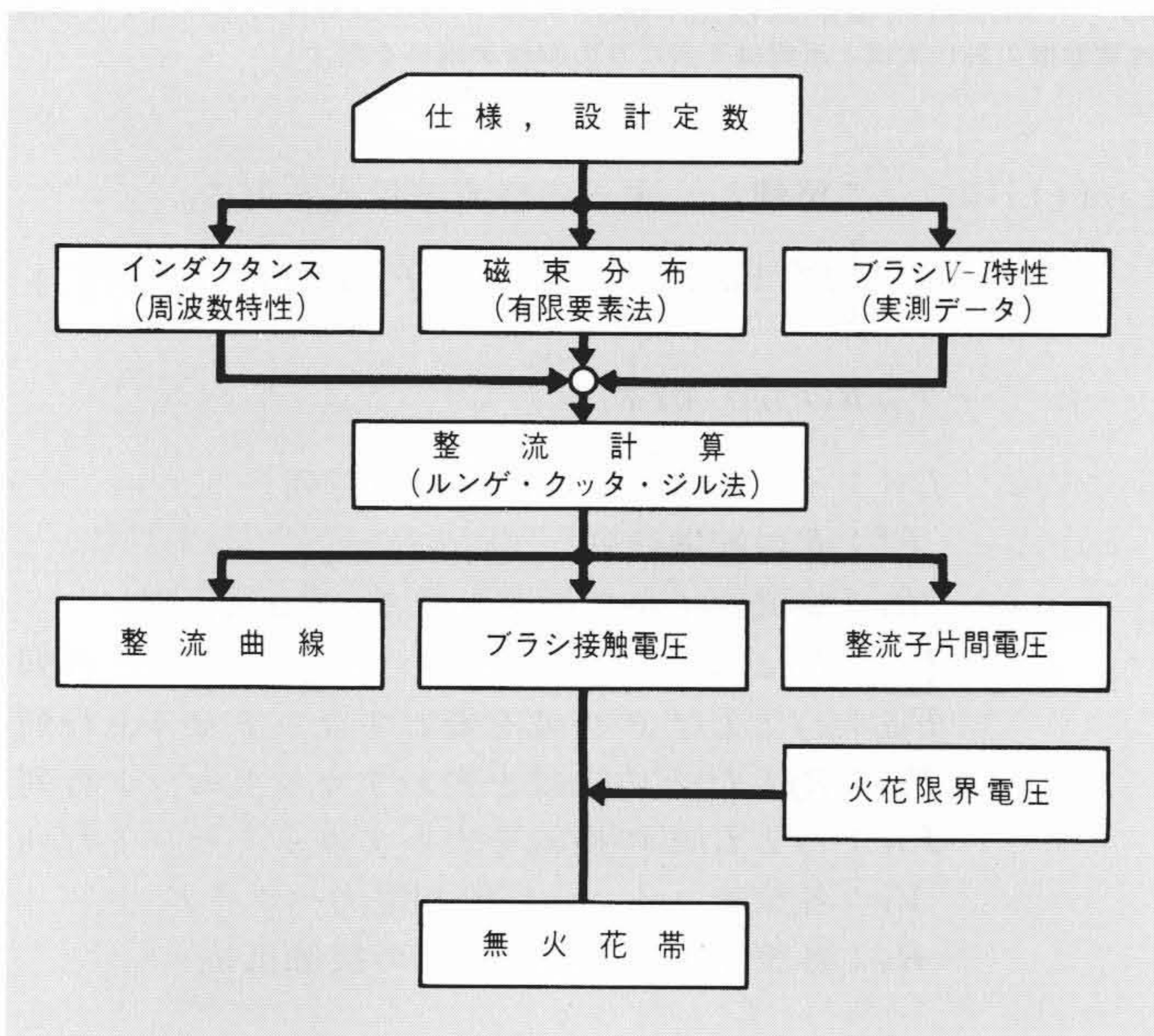


図3 整流解析のフローチャート 整流現象を電子計算機で定量的に解析する場合の手順を示す。

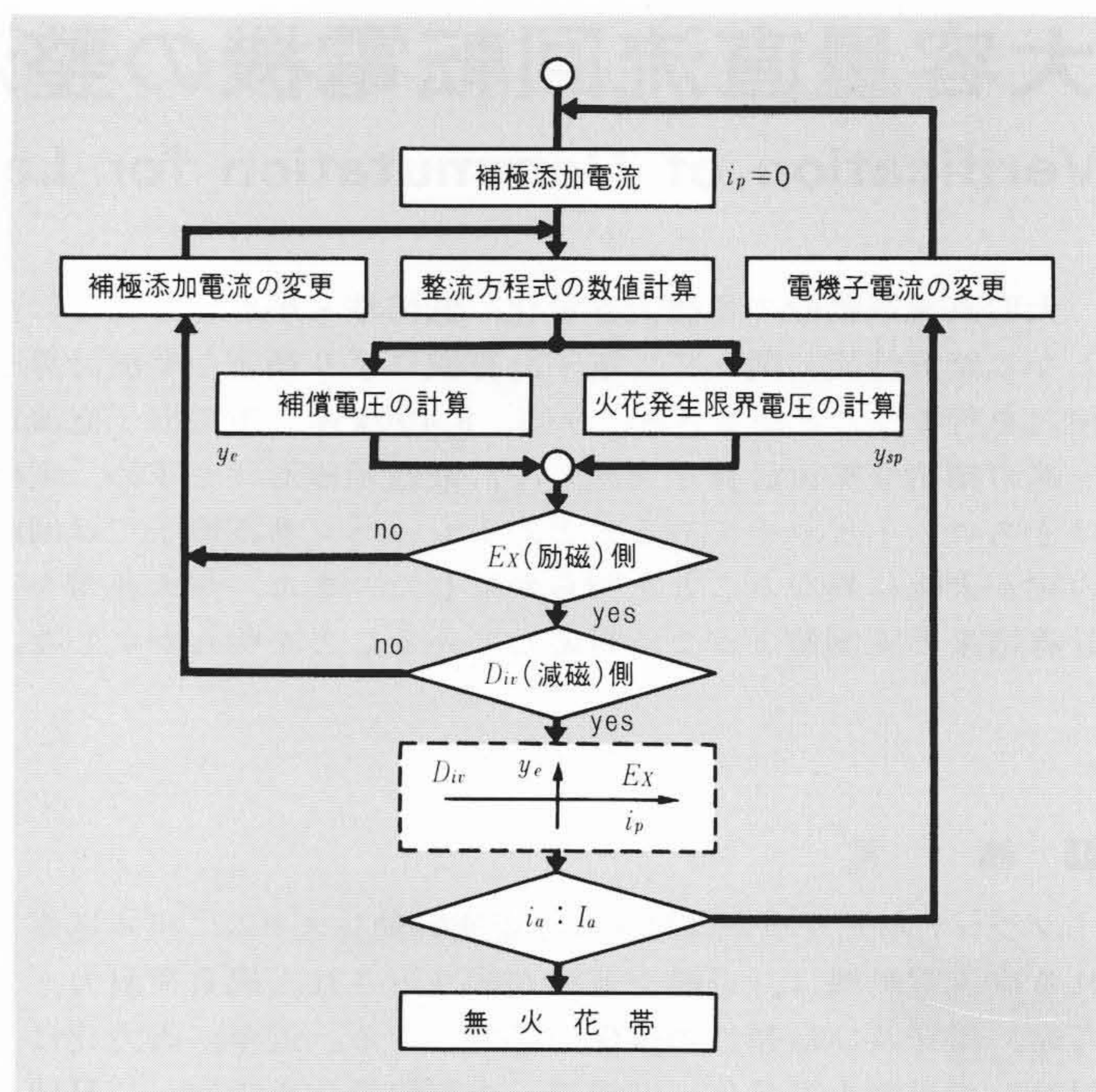


図4 無火花帯の計算フローチャート 電子計算機により無火花帯を計算するときの手順を示す。

算のフローチャートを示す。

2.3 無火花帯計算方法

ブラシ火花は、ブラシと整流子間の接触電圧が火花発生限界電圧(3.2V)を超えると発生する。図4に無火花帯計算のフローチャートを示す。各補極添加電流での補償電圧(y_e)は整流方程式の数値計算から求める。ここで、補償電圧(y_e)はブラシ接触電圧降下の諸項からリアクタンス電圧の項を除いた残りの項を表わす。この補償電圧(y_e)が火花発生限界電圧(y_{sp})より小さい範囲が無火花帯の幅となる。このようにして、各整流コイルについて求めて重ね合わせると、各整流コイルの無火花帯の重なり合った部分が総合した無火花帯となる。このようにして、肉眼観察と同様の無火花帯を求めることができる。

3 実機による整流計算検討

以上に述べた整流解析法を用いて 8,400kW 直流電動機 135/385 min⁻¹ (ブラシカバリング 4.24) の整流検討を行なう。対象電動機は H 種絶縁の採用による回転子の重量と GD^2 (慣性モーメント) の低減、 Δ 形スパイダの採用による機械的耐力の向上、冷間一体曲げラミネートヨークの採用など、最新の技術が折り込まれている。以下、設計段階で行なった補極形状、磁束分布、電機子巻線、短節度などの検討結果について説明する。なお、電機子巻線のスロット中の導体配列と接続を図5に示す。

3.1 補極形状と補極下の磁束分布

補極の磁束分布は図6(a)のように実機の2次元構造図の要点を節点とする自動要素分割を行ない⁵⁾、有限要素法を用いた電磁界解析により同図(b)、(c)に示すように求める。電機子巻線の短節度を考慮して合成した補極下の磁束分布から求める整流起電力と整流コイルのリアクタンス電圧との関係は、整流開始側では整流起電力をリアクタンス電圧より小さくし、整流終期側ではリアクタンス電圧より大きくする。図7に図6(b)、(c)の磁束分布の計算結果から求めた強め界磁と弱め界

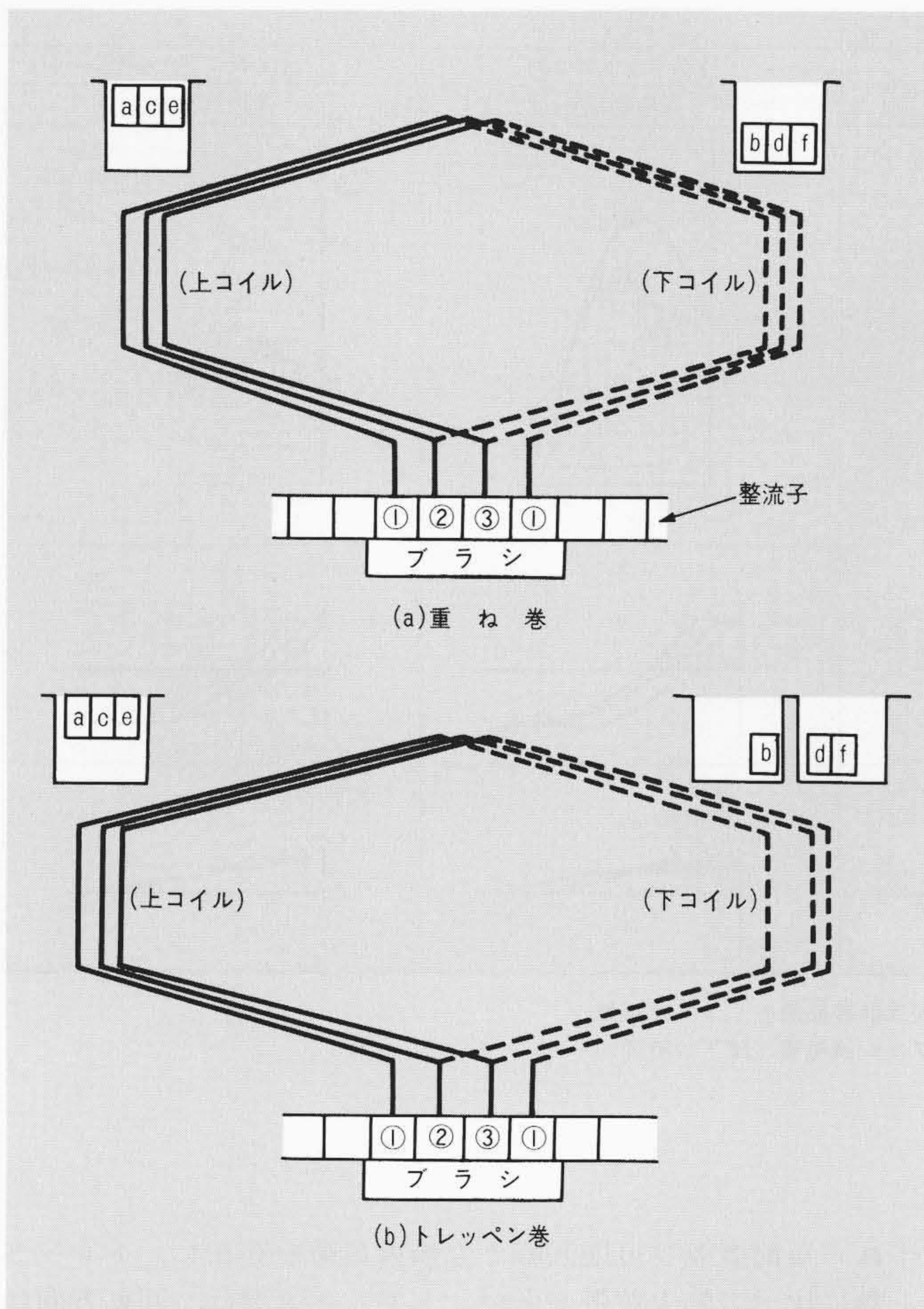


図5 電機子巻線の接続図 重ね巻とトレッペン巻の接続図を比較して示す。

磁時の補極下の電機子表面入射磁束分布を示す。強め界磁時は主極漏れ磁束の影響がある。

3.2 電機子巻線方式と短節度

電機子巻線の短節度を大きくすると、各整流コイル間の相互インダクタンスを小さくできるので、リアクタンス電圧を小さくできる。そのために、大形直流電動機には短節度 $\frac{3}{4}$ スロットピッチが多く用いられる。しかし、大容量化に伴い主極と補極間の空間的な距離が小さくなる傾向にあり、主極の

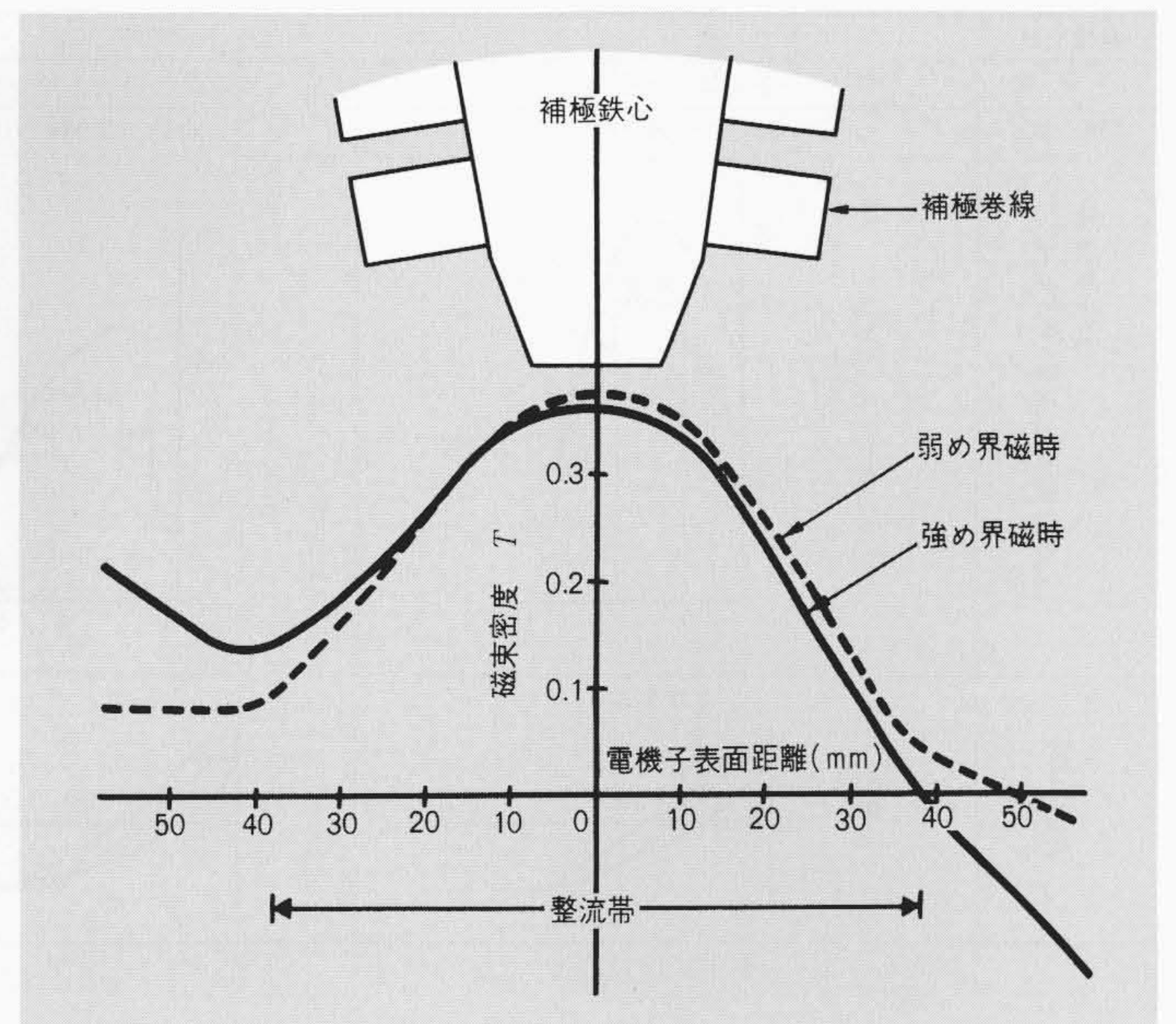


図7 補極下の磁束分布 整流起電力を求めるための補極下の8,400kW直流電動機の磁束分布の計算結果を示す。

漏れ磁束の影響が大きくなる。通常の重ね巻に対して短節度 $\frac{1}{2}$ と $\frac{3}{4}$ スロットピッチにつき、補極下の整流起電力と整流計算結果は図8に示すように求められる。短節度を $\frac{3}{4}$ スロットピッチにした場合、リアクタンス電圧(E_r)の最大値は小さいが、整流起電力(E_c)は主磁束の漏れの影響により、整流開始側と終期側でリアクタンス電圧(E_r)との差が大きい。したがって、短節度は整流補償の良好な $\frac{1}{2}$ スロットピッチを採用すべきであることを示している。

次にトレッペン巻について検討する。この巻線は、短節度の異なる2種類のコイルから成る。通常の重ね巻と異なる点は、各整流コイルの整流起電力の大きさとインダクタンスの求め方である。トレッペン巻に対する整流方程式は、通常の重ね巻と同様に磁気回路の対称性から等価二極機の考えを適用する。整流起電力と整流計算結果は、図9に併記する。

3.3 無火花帯の比較

通常の重ね巻とトレッペン巻の短節度が、 $\frac{1}{2}$ 及び $\frac{3}{4}$ スロットピッチについてブラシ出口の無火花帯の幅を算出すると、表1に示すように求められる。これより、通常の重ね巻はい

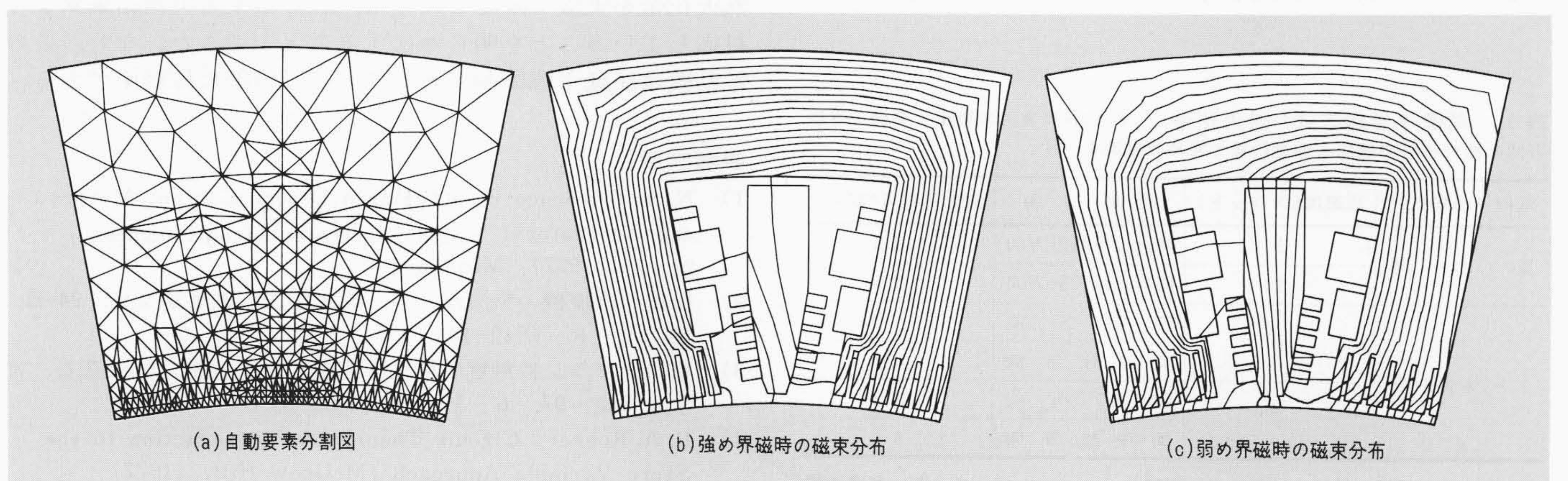


図6 補極鉄心形状と磁束分布(100%負荷時) 8,400kW直流電動機の固定子形状の最適化に対して適用した磁界解析(FEM)の自動要素分割図、磁束分布の計算結果(強め界磁、弱め界磁)を示す。

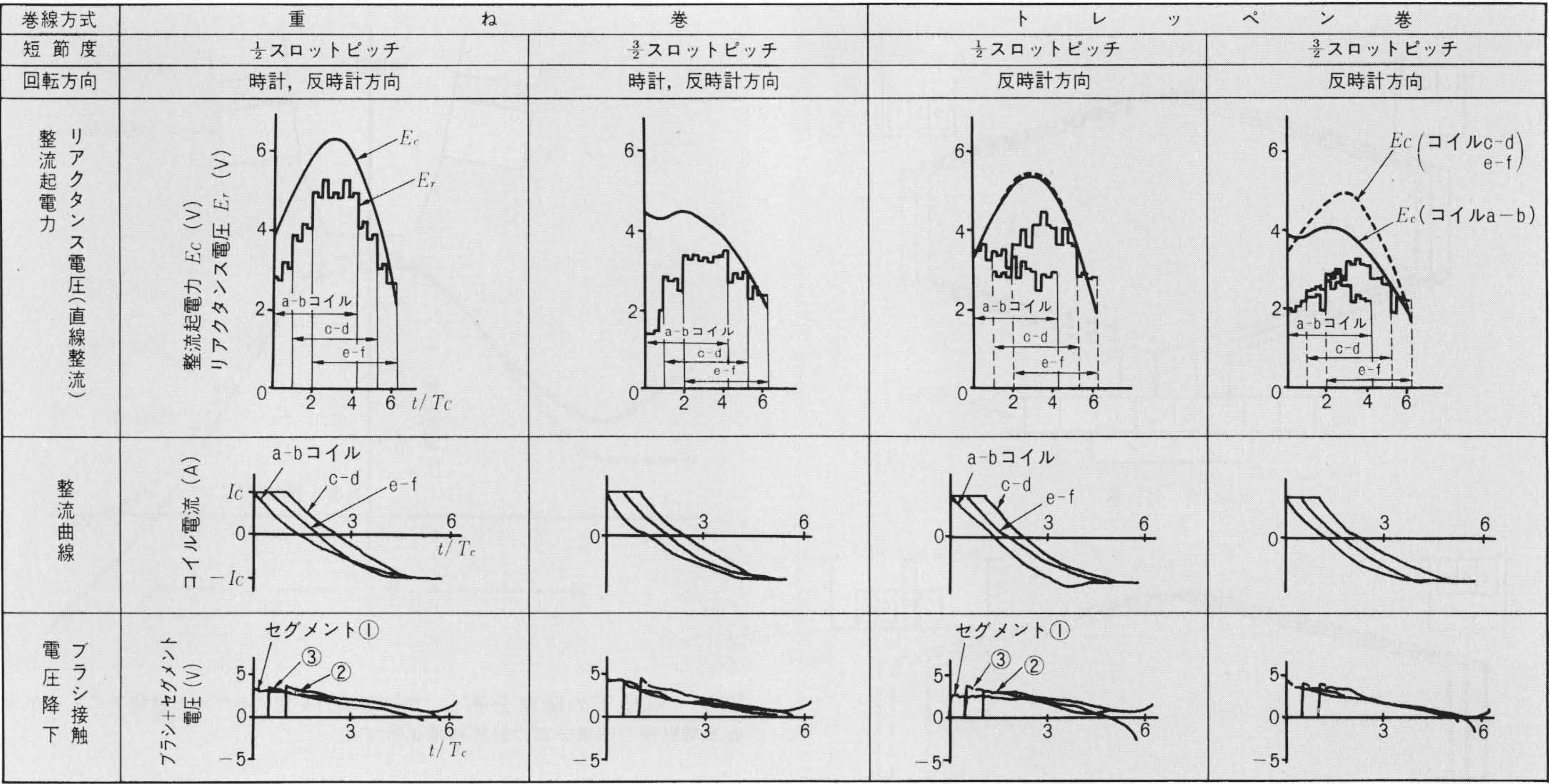
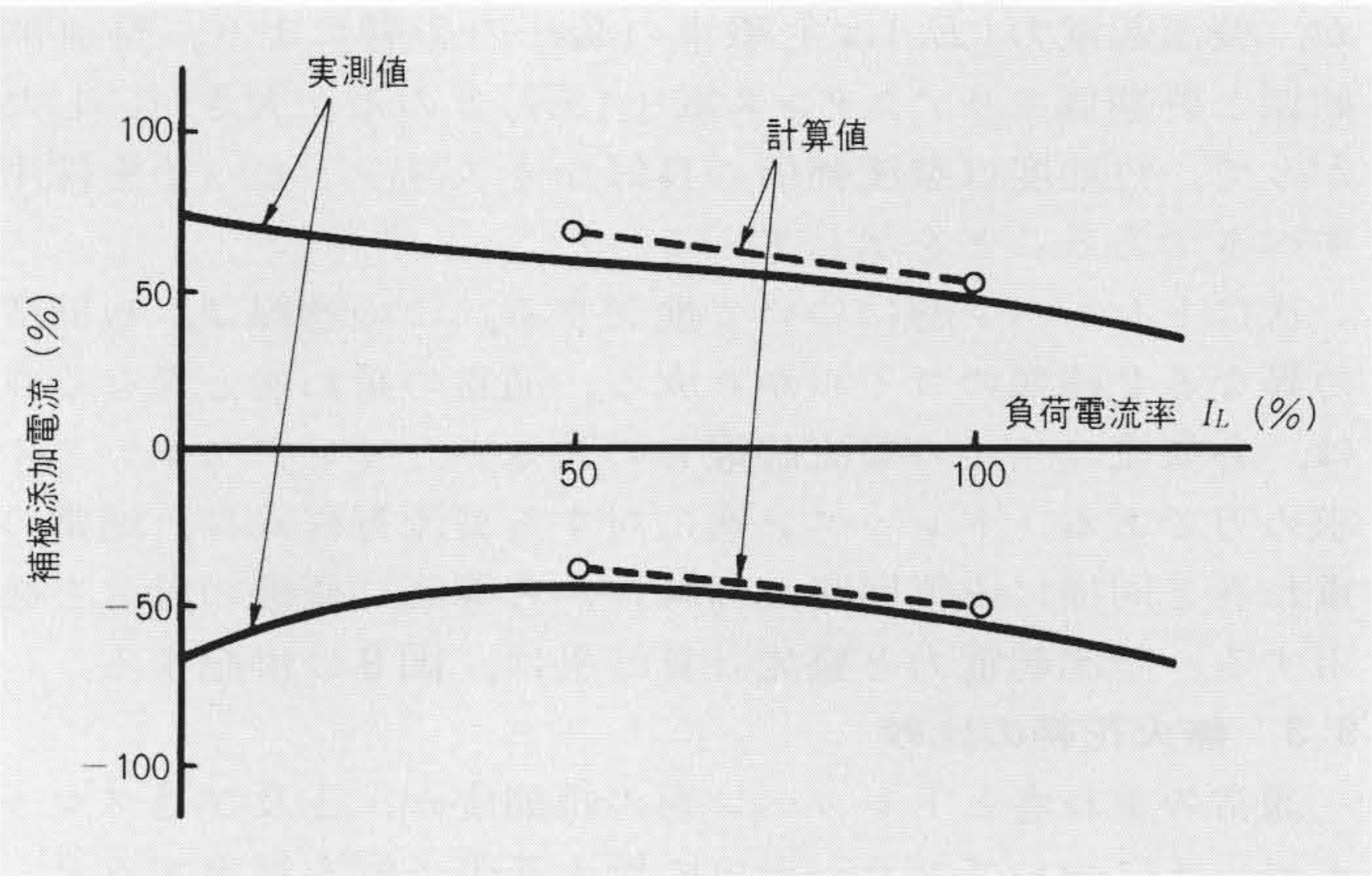


図 8 電機子巻線方式に対する整流計算結果 電機子巻線方式に対する整流計算結果として、直線整流を仮定したリアクタンス電圧と整流起電力の関係及び各整流コイルの整流曲線、ブラシ接触電圧降下の時間的变化を示す(図 6 参照)。



注：補極添加電流(%)は、100% 負荷時の無火花帯幅の補極添加電流を100%とする。

図 9 無火花帯の計算値と実測値 8,400kW 直流電動機での整流解析に基づく、ブラシ出口の無火花帯の計算値と実測値を比較して示す。

表 1 電機子巻線方式と無火花帯 8,400kW 直流電動機で電機子巻線方式と無火花帯の関係を整流計算で求めた結果を示す。

電機子巻線方式	短節度(スロット)	回 転 方 向	無火花帯の幅(%)
重 ね 巻	$\frac{1}{2}$	時計, 反時計方向	1 0 0
	$\frac{3}{2}$	時計, 反時計方向	9 5
トレッペン巻	$\frac{1}{2}$	時 計 方 向	0
		反 時 計 方 向	8 8
	$\frac{3}{2}$	時 計 方 向	2 2
		反 時 計 方 向	4 1

注：1. 無火花帯の幅(%)は重ね巻、短節度 $\frac{1}{2}$ スロットピッチの無火花帯の幅を100(%)とする。
2. 強め界磁、100%負荷時の値を示す。

ずれの短節度及び可逆回転とも無火花帯が存在し、トレッペン巻に比べて無火花帯が広い。トレッペン巻は、回転方向により無火花帯の幅が異なる非対称性をもつ。また、両巻線とも短節度は $\frac{1}{2}$ スロットピッチのほうが、より広い無火花帯をもっている。

対象機の計算値と実測値の無火花帯は、図 9 に示すようになる。

4 結 言

直流電動機のブラシと整流子の接触電圧の非線形性、整流コイルのインダクタンスの変化、整流起電力の時間的变化並びに電機子巻線のトレッペン巻及び短節度を考慮できる整流解析に基づいて、8,400kW 直流電動機的设计段階で整流計算を行ない、補極鉄心形状を求め、適合する電機子巻線短節度が $\frac{1}{2}$ スロットピッチであることを明らかにした。トレッペン巻電機子では、回転方向により無火花帯の幅が大幅に相違する。無火花帯を実機で確認した結果、計算結果と実測結果がよく対応していることを明らかにすることができた。なお、この電動機は圧延主機駆動用として、目下順調に稼動中である。

参考文献

- 1) N. A. Tischenco et al.: Large Direct Current Motors and Generators, World Electrotechnical Congress, 21~25 (1977), Moscow
- 2) 松田：直流機の整流作用の一般解析法，電学論文集，94-B, 10, 1~8 (昭49-10)
- 3) 松田：ブラシ接触電圧特性を考慮した直流機の無火花帯，電学論文集，97, 6, 17~24 (昭52-6)
- 4) R. A. Rohrer: Circuit Theory "An Introduction to the State Variable Approach"; McGraw-Hill, (1972)
- 5) 川上，原：有限要素法のための自動分割手法の開発，電学全国大会予稿，878, (昭54-4)