

船用発電機磁極鉄心の有限要素法による応力解析

根津紀久雄*・馬場宣裕**

Finite Element Stress Analysis of Marine Generator Cores

K. Nezu, N. Baba

In general, the generator core is considerably complicated in its configuration and is subjected to various types of load in running, and therefore, it is very difficult to make its overall stress analysis by applying the conventional stress analysis methods.

The authors carried out stress analyses on two kinds of marine generator cores which are subjected to inertia force, magnetic force and shrinkage surface pressure by means of the finite element method, and thereby clarified the deformation mode, the stress and shrinkage pressure distributions and the stress and shrinkage pressure changes caused by varying design parameters, in order to obtain optimal design data of the generator cores.

1. まえがき

有限要素法が構造解析の一手法として流行し始めてから久しいにもかかわらず、電気機器部品については、本来の設備目的が強度部材ではないということもあって、詳細な応力解析例は余りないようである。しかし明らかに設計ミスないし製造ミスに起因すると考えられる損傷事故例も跡を絶たない。したがって通常の設計計算法で寸法を確定された電気機器部品について、一度は詳細な応力解析を行っておくことも、か動中の事故を防止する上で有意義であろう。

本報告では、電気機器部品の一例として船用発電機の磁極鉄心を取りあげる。磁極鉄心は形状が複雑である上に、か動中に受ける力の種類も多い。例えば、形状については軸穴、通風口、巻線みぞ及びキーみぞなどが設けられており、また力については本体及び巻線の遠心力、固定子との間に働く磁気吸引力及び軸穴内面に作用する焼きばめ面圧などがある。これら個々の因子については、設計の段階で従来の材料力学的計算に組み込まれているが、複合して存在している場合の効果は有限要素法でなければ解析が困難である。

そこで形状については、軸穴、通風口、巻線みぞ及びキーみぞなどを忠実に考慮して構造をモデル化するとともに、力については遠心力及び磁気吸引力を負荷し、更に軸と磁極鉄心との間に焼きばめ温度に相当する温度差

を与えることによって焼きばめ面圧の効果を負荷して、有限要素法応力解析を実施し、各部の変形、応力分布及び焼きばめ面圧分布を求める。

更に、磁極鉄心の強度上考慮すべき問題点、すなわち、

- 1) 磁極鉄心に作用する諸種の力による応力が材料の許容範囲内にあること。
 - 2) か動中に遠心力及び磁気吸引力による鉄心の伸びのため締め代が減少し、軸と鉄心の間に緩みを生じないこと。
 - 3) 系統事故などによって生ずる過大のねじりトルクに対しても、鉄心が滑ることがないこと。
- の3点を判定基準として、締め代、通風口の位置及び大きさをパラメータとした鉄心の設計条件を検討する。

2. 解析方法

2.1 解析対象

本報告で解析の対象とした磁極鉄心は、図2及び図3に示すように打ち抜いたけい素鋼板を、キーを案内にしてソリッドの軸に焼きばめて積層コアを形成する方式のものである。積層コア全体を解析することは、鉄心間の相互作用及びクランパによる締め付けなどに、未知の因子が多く実行困難である。したがって今回は独立した1枚の磁極鉄心を解析対象とし、積層方向の影響因子は考えないことにする。

解析対象としたのは、A社製の船用発電機2種類（I

* 技術研究所 ** 機関部

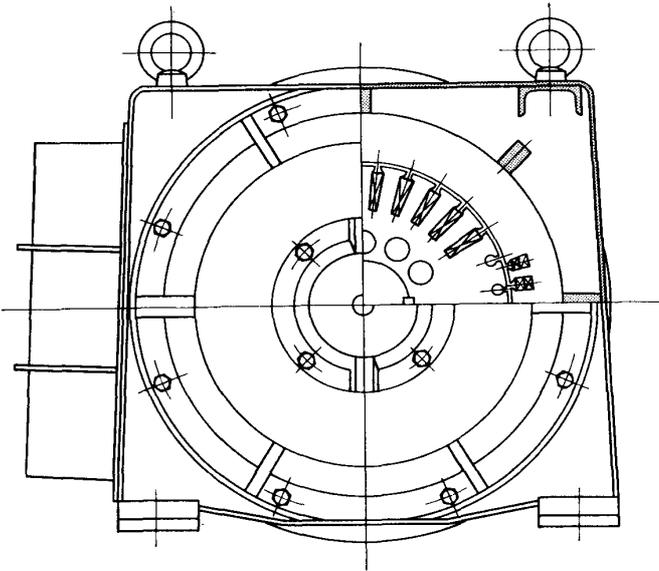


図 1 発電機組立断面図例 (I型)

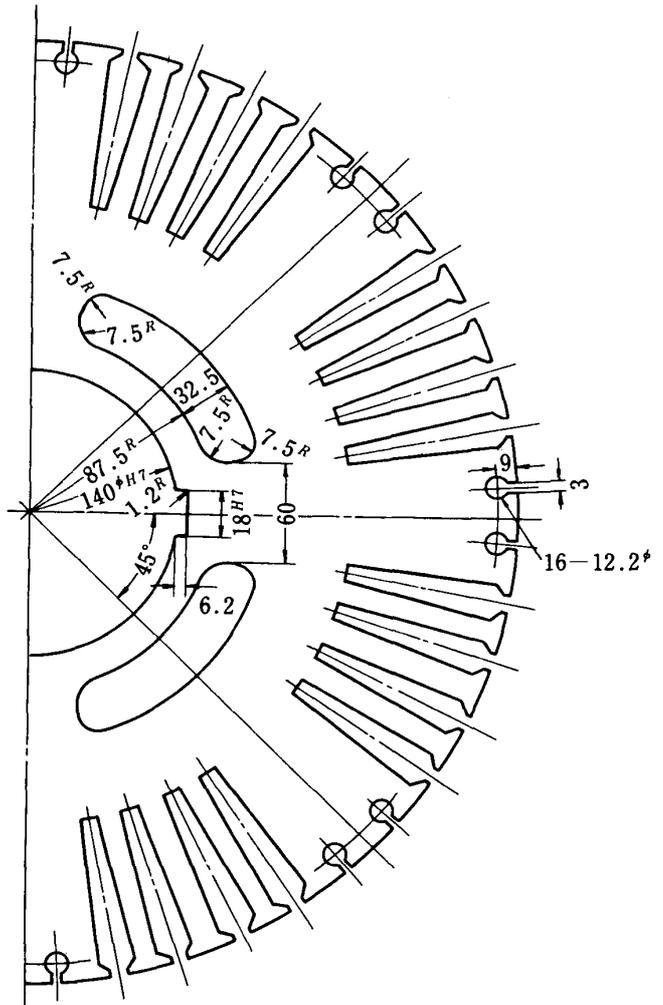


図 3 II型発電機磁極鉄心 (板厚 1.4 mm)

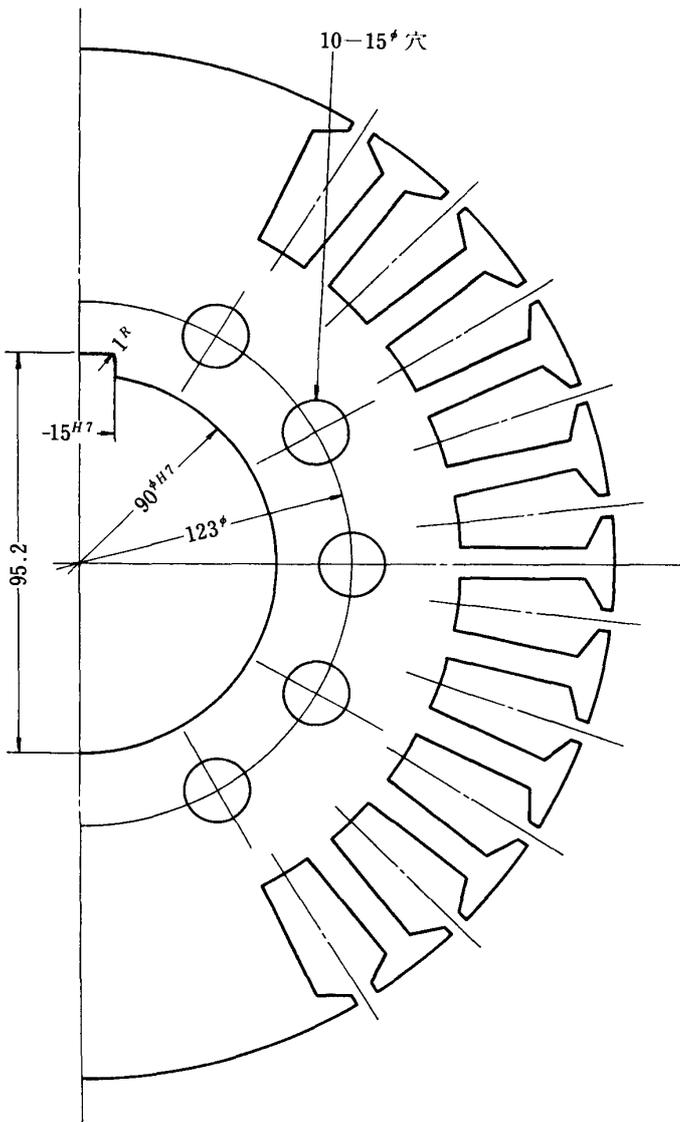


図 2 I型発電機磁極鉄心 (板厚 1.4 mm)

表 1 発電機主要目

	I 型	II 型
容量	60 kVA	180 kVA
回転数	3,600 rpm	900 rpm
鉄心材料	MP-40	MP-40

型及びII型と呼ぶことにする)であって、図1に例としてI型発電機の組立断面図を示す。また図2、図3にそれぞれI型及びII型の発電機の磁極鉄心を示し、表1にそれらの主要目を示す。これらを解析対象に選んだ理由は、回転数が著しく異なることと、通風の形状及び個数が異なっていることで、代表的な磁極鉄心例と考えられたからである。

2.2 有限要素化

解析対象として選んだI型及びII型の磁極鉄心の有限要素分割をそれぞれ図4及び図5に示す。これらの図に示すように、実機の四半分をモデル化しているが、厳密にはキーみぞの中心を通る対称軸で2分割すべきであ

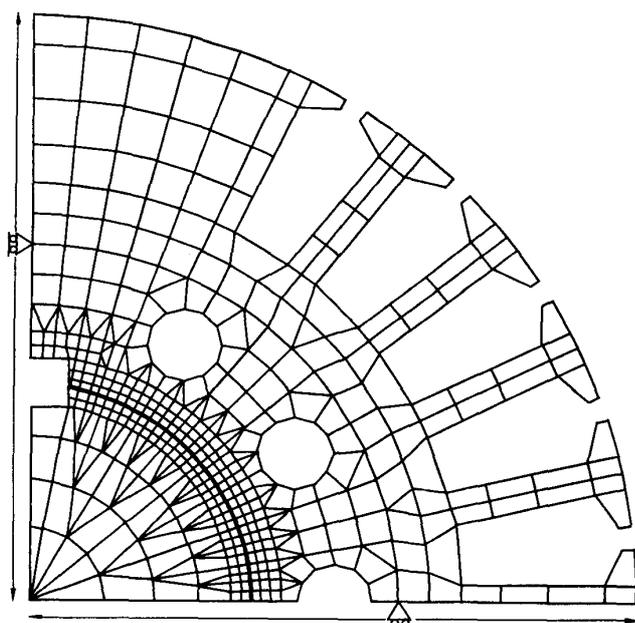


図 4 I型の分割様式

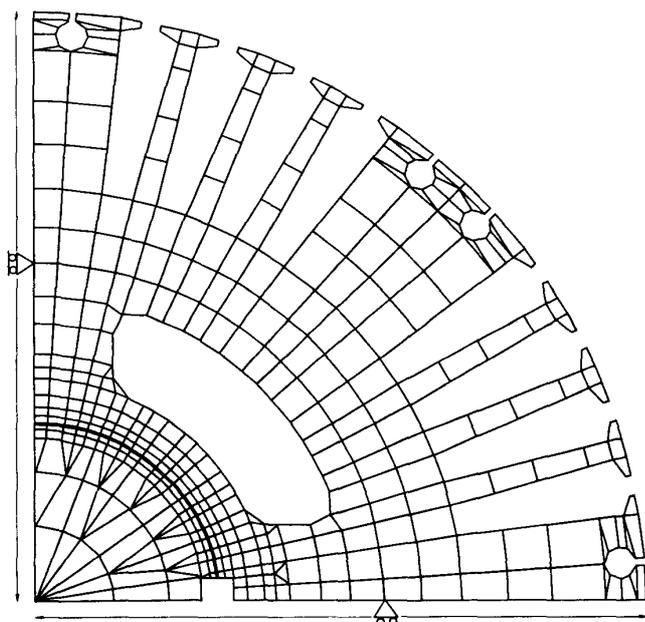


図 5 II型の分割様式

る。本モデルでは対称性からキーみぞが2本存在することになって、実機とは若干形状が異なってくるが、その影響は小さいと考えられるので、入力データ量削減の観点から四半分のモデルを設定した。

通風口の位置と大きさをパラメトリックに変化させるためには、通風口の輪郭を形成する節点の座標を変え、分割様式は変えていない。したがって通風口に接する要素の形状が若干変化することになる。また焼きばめ代を変化させるためには、軸と磁極鉄心との相対温度差を変える方法を用いているので、形状及び寸法は変化しない。

従来の材料力学の公式では焼きばめ面圧は円周に沿って一定であることが前提になっているが、磁極鉄心のように通風口のある場合には、焼きばめ面圧を一定とは考えにくい。厳密な面圧分布を知ることが重要であるにもかかわらず、この点が不明りょうのままであったことにかんがみて、本解析では面圧分布をも計算する。そのためには、軸をも含めた解析が必要となるので、図 4 及び 5 中には軸の要素分割をも含めてある。また軸の表面には薄膜要素をそう入してある(図の太線の部分がそれに相当する)。

2.3 計算条件

2.3.1 拘束条件

モデルの対称性から四分分割線上の節点をローラ支持として、剛体運動を防いでいる。これらの拘束法を図 4 及び 5 に要素分割と併せて示してある。

2.3.2 荷重条件

磁極鉄心本体及び軸の遠心力は、2.3.5 の比重量と表 1 の回転数とから体積力として計算し、各節点に自動的に割り振る。ただし実際の計算では表 1 の定格回転数に 20% のオーバースピードを見込んでいる。

巻線の遠心力は、1 スロット内の銅線重量から磁極鉄心 1 枚当たりの銅線重量を計算し、この値と表 1 の回転数とから集中力として計算する。この集中力をスロット先端の 4 節点に割り振る。実際の計算では銅線の重量中にウェッジ及びエポキシ被覆の重量として銅線重量の 20% を含め、また 20% のオーバースピードを見込んでいることは前記と同様である。巻線遠心力の計算表を表 2 に示す。

磁気吸引力は、ギャップ中の磁束密度から計算できるが、本解析に実際に使用した吸引力の分布を図 6 (I 型) 及び 図 7 (II 型) に示す。これらを表面力とみなして外郭の節点に自動的に割り振る。

したがって磁極鉄心内の節点には、分布荷重として本体の遠心力と磁気吸引力、集中荷重として巻線の遠心力が組み合わされて負荷されることになる。

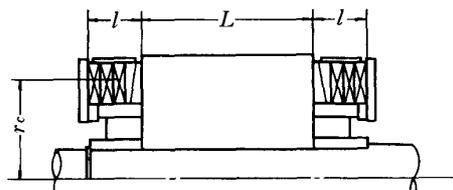
2.3.3 焼きばめ代

図 2 及び 3 に示す現製品の締め代は、I 型、II 型ともに 5/100 mm である。実際の解析では、鉄心を適当な温度に加熱して軸にそう入した後冷却過程に入り、鉄心が軸表面に接触するときの温度が、ちょうど鉄心の軸穴を 5/100 mm 膨張させる温度に等しいと考えて、軸と磁極鉄心の間これと等しい温度差を与える。

焼きばめ代の変化とともに、焼きばめ面圧及び鉄心内の応力がどのように変化するかを調べるために、焼きばめ代を 4/100、5/100 及び 6/100 mm の 3 通りに変えて

表 2 巻線遠心力の計算表

- ◎ 重量 $W=8.9 \times 10^{-6} \times A \times N_s \times L \times 1.2$
エポキシや被覆とウェッジの重さを見込む。
- ◎ 遠心力 $F = \frac{W}{g} \cdot r_o \cdot \omega^2$ ただし $\omega = \frac{2\pi \cdot N \times 1.2}{60}$
オーバースピードを見込む。



型	銅線 線径 d [mm]	1本の 銅線断 面積 A [mm ²]	1スロ ット内 銅線本 数 N_s [本]	積厚 L [mm]	コイル エンド l [mm]	1スロ ット 内 銅線重量 W [kg]	回転数 N [rpm]	銅線 重心 半径 r_o [mm]	1スロ ット 内 銅線 遠心力 F [kg]	スロ ット 数 [個]	スロ ット 内 全銅線 重量 [kg]	スロ ット 内 全銅線 遠心力 [kg]	備 考
													スロット内及 びコイルエン ドを含む全銅 線重量 [kg]
I型	1.4φ	1.54	146	190	108.5	0.456	3,600	101	961	20	9.12	1.92×10^4	20.8
II型	1.3φ	1.33	424	370	68	2.23	900	197	573	32	71.4	1.83×10^4	102

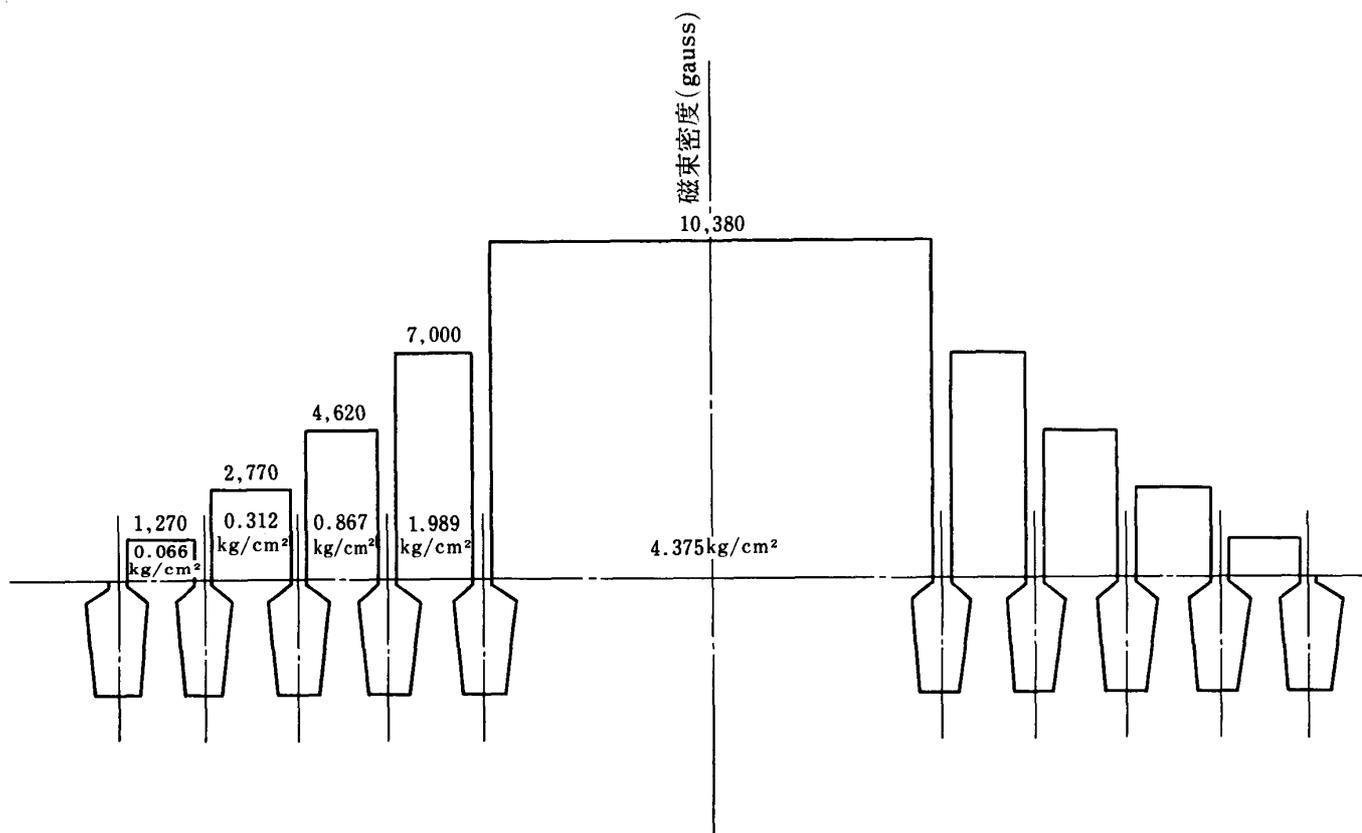


図 6 磁極表面における磁気吸引力 (I型)

いるが、これらに対応する鉄心と軸の温度差を一括して表 3 に示す。

2.3.4 通風口の位置と寸法

通風口の位置と寸法をパラメトリックに変化させることにより、焼きばめ面圧及び鉄心内の応力の変化を調べるために、位置と寸法をそれぞれ3通りに変える。その

場合通風口の位置は次のように定義する。I型では通風口が円形であるから、軸心からこの円の中心までの距離を位置と定義する。II型では通風口は図 3 に見られるように扇形であるから、扇形の中心、すなわち扇形を形成する内外2個の円弧の中心線の半径(円弧の中心は軸心と一致している)を位置と定義する。また通風口の寸

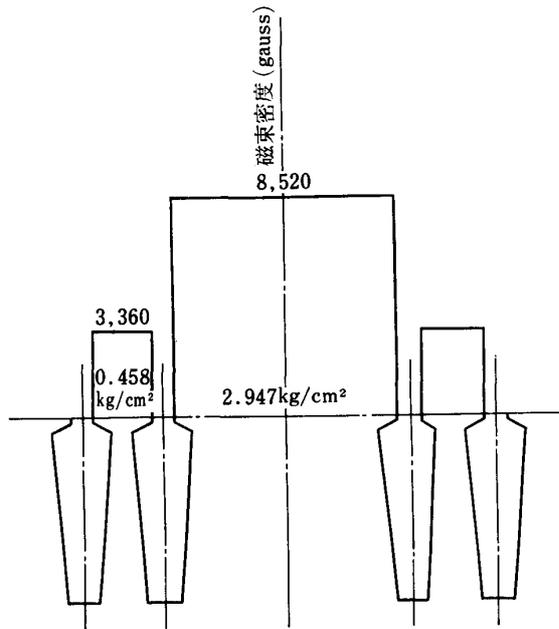


図 7 磁極表面における磁気吸引力 (II型)

表 3 締め代と相対温度差

締め代 (mm)	鉄心と軸の温度差 (°C)	
	I 型	II 型
4/100	37.79	24.29
5/100	47.24	30.37
6/100	56.69	36.44

法の定義は次のとおりである。I型では通風口の直径、II型では内外2個の円弧間の距離である。

I型では位置を 59.9 (寸法が 18.2mm の場合だけは要素分割の都合から 60.7 とする), 61.5 (現製品) 及び 63.1mm の 3 通りに変え, 寸法を 11.8, 15.0 (現製品) 及び 18.2mm と 3 通りに変える。解析モデルの番号と通風口の位置・寸法との関係を表 4 に示す。

表 4 I型の解析モデル番号

位置 (mm)	位置 (mm)		
	59.9	61.5	63.1
寸法 (mm)			
11.8	I-5	I-2	I-8
15.0	I-4	I-1	I-7
18.2	I-6	I-3	I-9

II型では位置を 101.75, 103.75 (現製品) 及び 105.75 mm の 3 通りに変え, 寸法を 28.5, 32.5 (現製品) 及び 36.5 mm の 3 通りに変える。解析モデルの番号と通風口の位置・寸法との関係を表 5 に示す。

表 5 II型の解析モデル番号

位置 (mm)	位置 (mm)		
	101.75	103.75	105.75
寸法 (mm)			
28.5	II-5	II-2	II-8
32.5	II-4	II-1	II-7
36.5	II-6	II-3	II-9

2.3.5 材料定数

本解析に使用した材料の物理定数を表 6 に一括して示す。表中の比重量は遠心力の計算に, 熱膨張係数は熱荷重の計算に, ヤング率とポアソン比は剛性, 熱荷重及び応力の計算に用いられる。

表 6 計算に用いた材料定数

比重量	$7.8 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$
ヤング率	$2.1 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$
ポアソン比	0.3
熱膨張係数	1.18×10^{-7}

2.3.6 使用プログラム

計算には当会所有のはん用弾性応力解析プログラム NKSAP 1 を用いた。このプログラムの詳細については、「NKSAP 1 使用説明書」を参照されたい。

3. 解析結果

2. に述べた方法で磁極鉄心の解析を行った結果の事例を以下に述べる。

図 8 はモデル I-1 (すなわち I 型の現製品) の変形

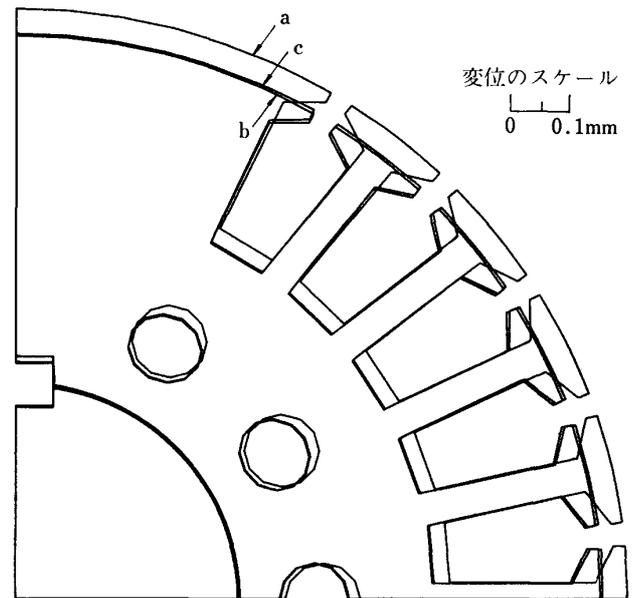


図 8 モデル I-1 の変形図

図であって、まず焼きばめのための相対温度差 47.24°C (縮め代 $5/100\text{mm}$ に相当) に昇温した a の状態から焼きばめ終了後の定常状態 b まで収縮し、更に運転中には遠心力及び磁気吸引力を受けて c の状態まで変形する。図から焼きばめのための熱膨張に比較すれば、遠心力及び磁気吸引力による変形ははるかに小さいことが分かるが、後者の変形が磁極鉄心の緩みを生じる程ではないにしても、焼きばめ面圧を相当低下させる原因になることは後述するとおりである。他の解析モデルの変形も大体これに似た傾向を示す。

図 9 はモデル II-1 (すなわち II 型の現製品) の変形図であって、図中の英字 a, b 及び c の状態は 図 8 の場合と同様である。ただし焼きばめのための相対温度差は表 3 に示すように 30.37°C (縮め代 $5/100\text{mm}$ に相当) である。焼きばめの熱膨張に比較すれば、遠心力及び磁気吸引力による変形ははるかに小さいこと、及び後者の変形が焼きばめ面圧の低下に寄与することは 図 8 の場合と同様である。他の解析モデルの変形も大体これに似た傾向を示す。

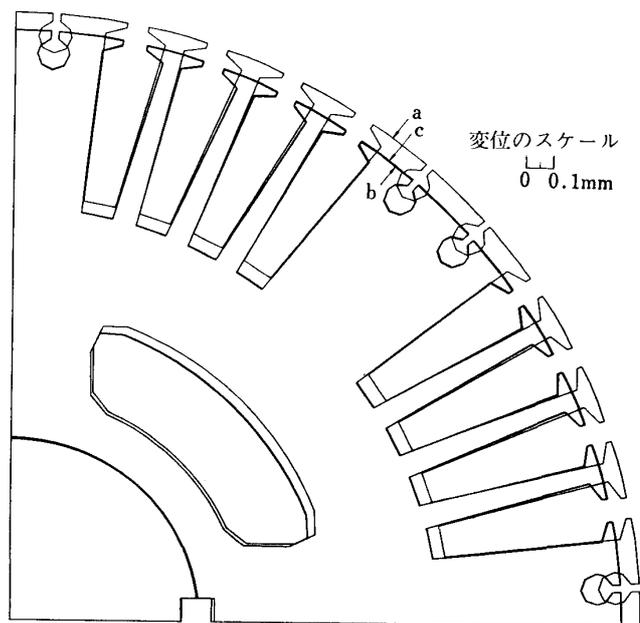


図 9 モデル II-1 の変形図

図 10 はモデル I-1 の縮め代 $5/100\text{mm}$ の場合の運転状態における等応力線を示す。図中の数字はミーゼスの応力のレベルを表す。同図から応力レベルの高い部分は、通風口周辺の軸心寄りの部分、軸穴の周辺及びキームぞの周辺である。他の解析モデルにおける応力分布も傾向はこれと同様である。

図 11 はモデル II-1 の縮め代 $5/100\text{mm}$ の場合の運転状態における等応力線を示す。図中の数字はミーゼス

応力レベル			
指標	応力値 (kg/mm^2)	指標	応力値 (kg/mm^2)
1	0.28	8	5.79
2	1.07	9	6.58
3	1.86	10	7.36
4	2.64	11	8.15
5	3.43	12	8.94
6	4.22	13	9.73
7	5.00	14	10.51
		15	11.30

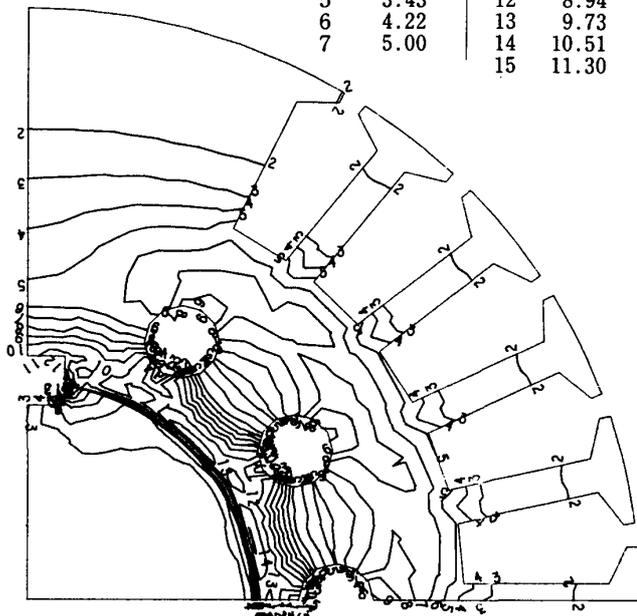


図 10 モデル I-1 の等応力線

応力レベル			
指標	応力値 (kg/mm^2)	指標	応力値 (kg/mm^2)
1	0.01	8	4.04
2	0.59	9	4.61
3	1.16	10	5.19
4	1.74	11	5.76
5	2.31	12	6.34
6	2.89	13	6.91
7	3.46	14	7.49
		15	8.06

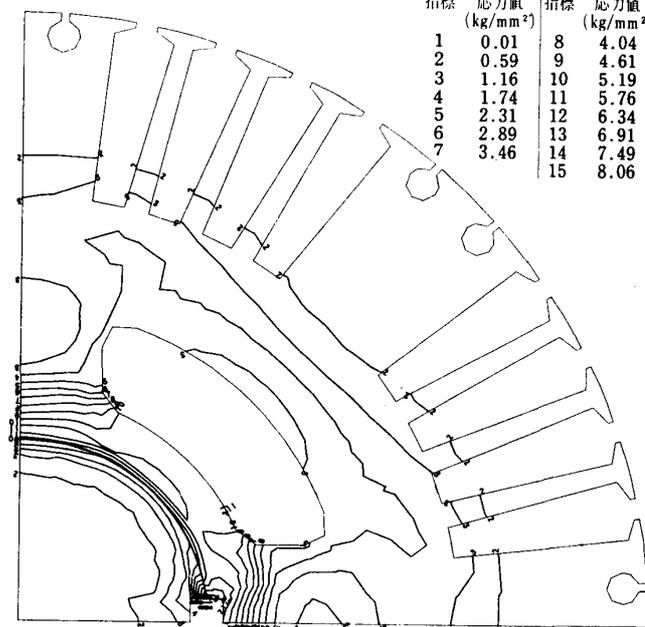


図 11 モデル II-1 の等応力線

の応力のレベルを表す。応力レベルの高い部分は 図 10 の場合と同様である。他の解析モデルにおける応力分布もこれと類似の傾向を示す。

図 12 はモデル I-1 の縮め代 $5/100\text{mm}$ の場合の面圧分布を示す。図中の英字 a は焼きばめ後の静止状態に

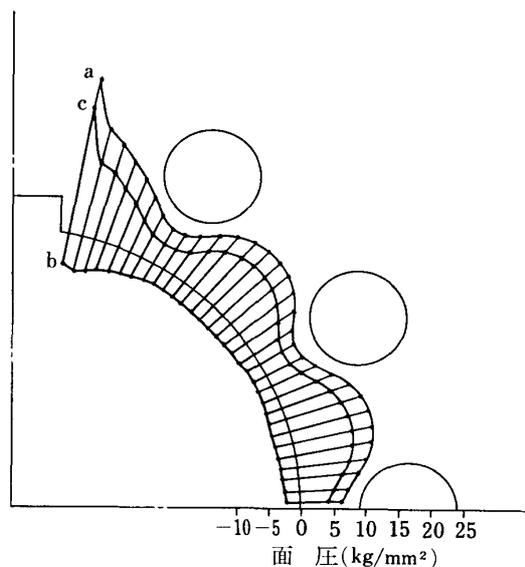


図 12 モデル I-1 の面圧分布 (遠心力, 磁気吸引力の影響)

おける焼きばめ面圧を表し, b は運転中の遠心力及び磁気吸引力によって発生する焼きばめ面圧の減少分を表す。したがって運転中の実際の面圧分布は a と b を重ね合わせた c の状態である。同図から焼きばめ面圧は円周に沿って一定ではなく, かなり変動していることが分かる。すなわち通風口のために剛性が低下し, 通風口直下では面圧が著しく低く, 通風口のないソリッドの部分では面圧が高くなる。他の解析モデルにおける面圧分布もこれと類似の傾向を示す。

図 13 はモデル I-1 の面圧分布が締め代とともに変化する様子を示す。図中の英字 a は締め代 4/100 mm, b は 5/100 mm (現製品) 及び c は 6/100 mm の場合の面圧分布である。解析には線形弾性理論を用いているの

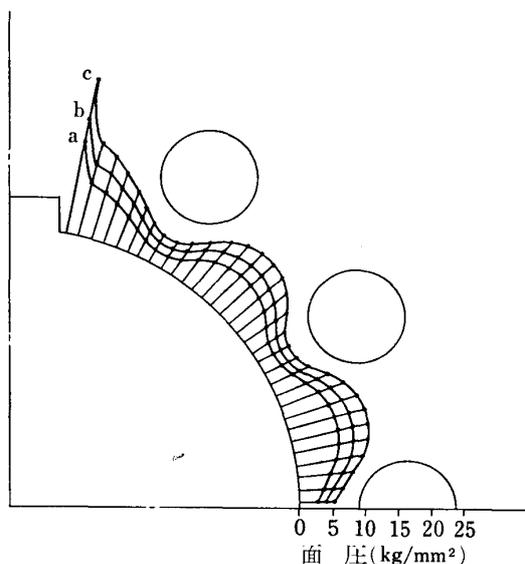


図 13 モデル I-1 の面圧分布 (締め代の影響)

で, 焼きばめ面圧は締め代の増加につれて直線的に増大することが分かる。同図は運転中の面圧分布であって, 図 12 の c に相当する面圧である。他の解析モデルにおける締め代に対する面圧分布の変化も, これと同様の傾向を示す。

図 14 は通風口の位置による面圧分布の変化を示す一例である。すなわち, 締め代を 5/100 mm (現製品) に保ち, かつ通風口の寸法も 15.0 mm (現製品) に保ち, 通風口の位置だけを 59.9, 61.5 (現製品) 及び 63.1 mm と 3 段階に変えたモデル I-4, I-1, I-7 の運転中の面圧分布である。図中の英字 a はモデル I-4, b は I-1, c は I-7 の面圧分布である。これから通風口の位置を軸に近づけるにしたがって, 通風口直下では面圧が低下するのに対して, 通風口間のソリッドの部分では逆に上昇することが分かる。したがって通風口の位置を軸に近づけるにつれて, 円周方向の面圧分布の変動が激しくなる。これらのモデルで締め代を変えた場合及び通風口の寸法を変えたモデル I-5, I-2 及び I-8 の組み合わせとモデル I-6, I-3 及び I-9 の組み合わせの場合にも, これと全く同様な傾向を示す。

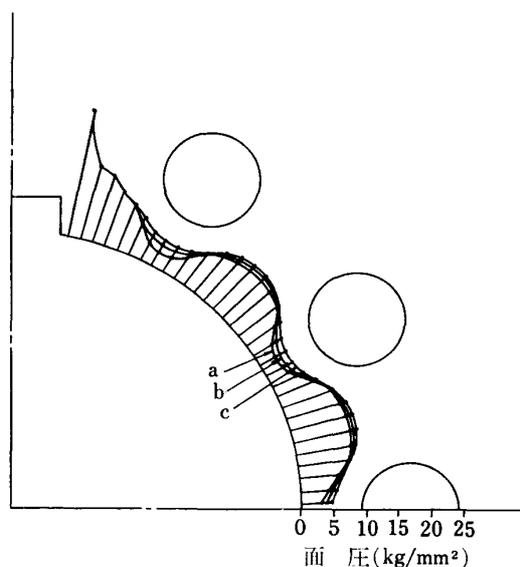


図 14 通風口の位置による面圧分布の変化

図 15 は通風口の寸法による面圧分布の変化の一例を示す。すなわち, 締め代を 5/100 mm (現製品) に保ち, かつ通風口の位置を 61.5 mm (現製品) に保ち, 通風口の寸法だけを 11.8, 15.0 (現製品) 及び 18.2 mm と 3 段階に変えたモデル I-2, I-1, I-3 の運転中の面圧分布である。図中の英字 a はモデル I-2, b は I-1, c は I-3 の面圧分布である。これから通風口の寸法を大きくするにつれて, 通風口直下では面圧が低下するのに対して, 通風口間のソリッドの部分では余り変化しないことが分かる。したがって通風口を大きくするにした

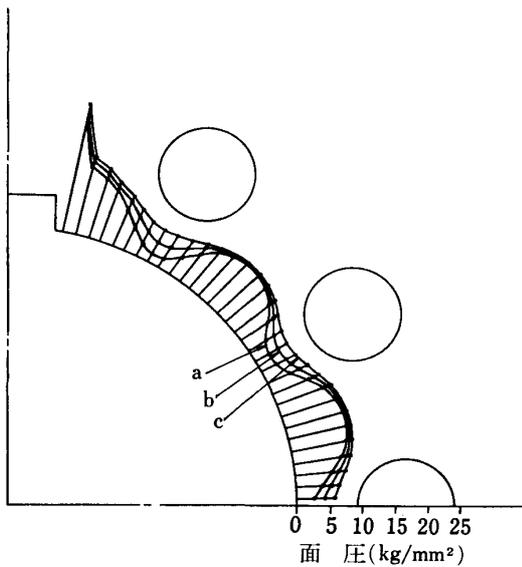


図 15 通風口の寸法による面圧分布の変化

がって、円周方向の面圧分布の変動が激しくなる。これらのモデルで締め代を変えた場合及び通風口の位置を変えたモデル I-5, I-4 及び I-6 の組み合わせと、モデル I-8, I-7 及び I-9 の組み合わせの場合にも、これと全く同様な傾向を示す。

図 16 はモデル II-1 の締め代 5/100mm の場合の面圧分布を示す。図中の英字 a は焼きばめ後の静止状態における焼きばめ面圧を表し、b は運転中の遠心力及び磁気吸引力によって発生する焼きばめ面圧の減少分を表す。したがって運転中の実際の面圧分布は a と b を重ね

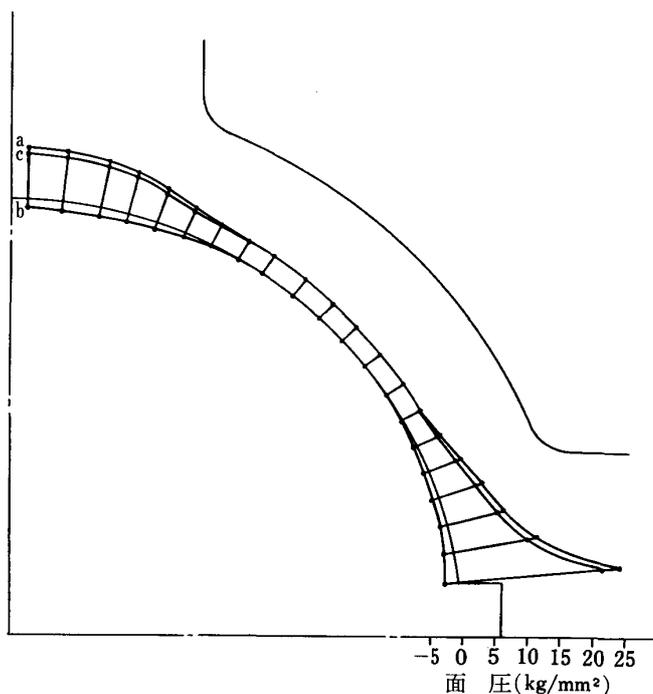


図 16 モデル II-1 の面圧分布 (遠心力, 磁気吸引力の影響)

合わせた c の状態である。同図から遠心力及び磁気吸引力による面圧減少分は全体的に小さく、通風口直下ではほとんど 0 に等しい。また焼きばめ面圧は円周に沿って一定ではなく、通風口直下で低く、両側のソリッドの部分で高くなっている。他の解析モデルにおける面圧分布も、これと類似の傾向を示す。

図 17 はモデル II-1 の面圧分布が締め代とともに変化する様子を示す。図中の英字 a は締め代 4/100mm, b は 5/100mm (現製品) 及び c は 6/100mm の場合の面圧分布である。焼きばめ面圧は締め代の増加につれて直線的に増大する。他の解析モデルにおける締め代に対する面圧分布の変化も、これと同様の傾向を示す。

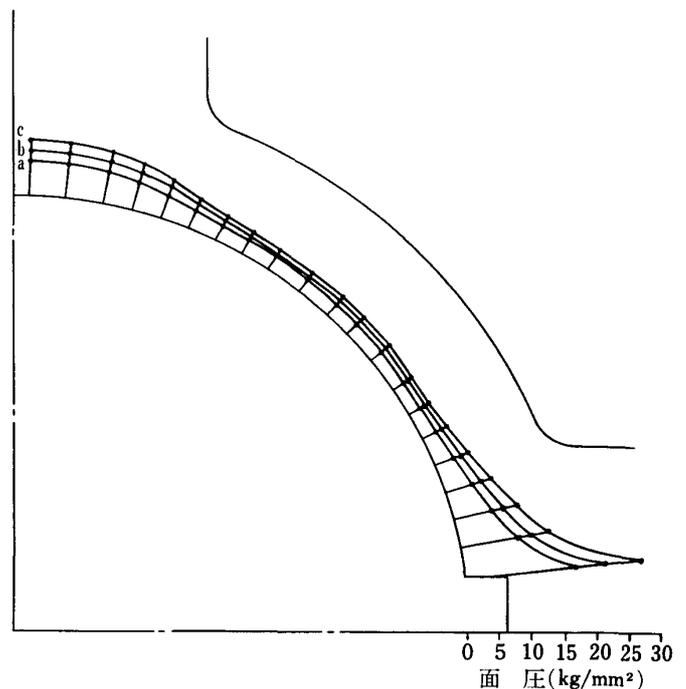


図 17 モデル II-1 の面圧分布 (締め代の影響)

II型の解析モデルにおける、通風口の位置及び寸法による面圧分布の変化は小さく、4. で平均面圧としても触れるので、本章では省略する。

4. 考 察

3. の結果及び解析結果を整理し直すことによって得られる諸結果について、まえがきに述べた観点から考察を加える。

4.1 変 形

図 8 (I型) と 図 9 (II型) に示すように、焼きばめ時の熱収縮による磁極鉄心の変形は軸心で 0 で外周に向かって次第に大きくなる。特に鉄心の軸穴表面について見れば、通風口の直下では変形が比較的小さく、ソリッドの部分が大きい。これは熱収縮によって発生すべき内力

が通風口の部分には存在しないからである。運転中の遠心力及び磁気吸引力による変形は非常に小さいが、これが焼きばめ面圧を相当低下させていることは前述のとおりである。特にI型のモデル I-6 では通風口の位置が軸に近く、かつ通風口の寸法が大きいので、締め代が小さい場合にキームぞに近い通風口の直下で軸と鉄心の間に緩みを生じるという結果が得られた。したがってこのような設計寸法はどうしても避けなければならない。

4.2 応力

図10 (I型) と図11 (II型) の等応力線から分かるように応力レベルの高い部分は、通風口周辺の軸心寄りの部分、キームぞの周辺及び軸穴の周辺である。軸穴の周辺は焼きばめ面圧が負荷されるために応力が高くなっているのに対し、通風口周辺及びキームぞ周辺では応力集中が起きて応力が高くなっていると考えられる。これら応力集中個所にある代表的な要素の最大主応力が締め代、通風口の位置及び寸法とともに、どのように変化するかを以下に述べる。

4.2.1 I型

図18 は最大主応力を縦軸に、通風口の寸法を横軸にとり、締め代と通風口の位置をパラメータにしたグラフである。図中右上がりの曲線は通風口周辺の要素の最大主応力であり、右下がりの曲線はキームぞ周辺の要素の

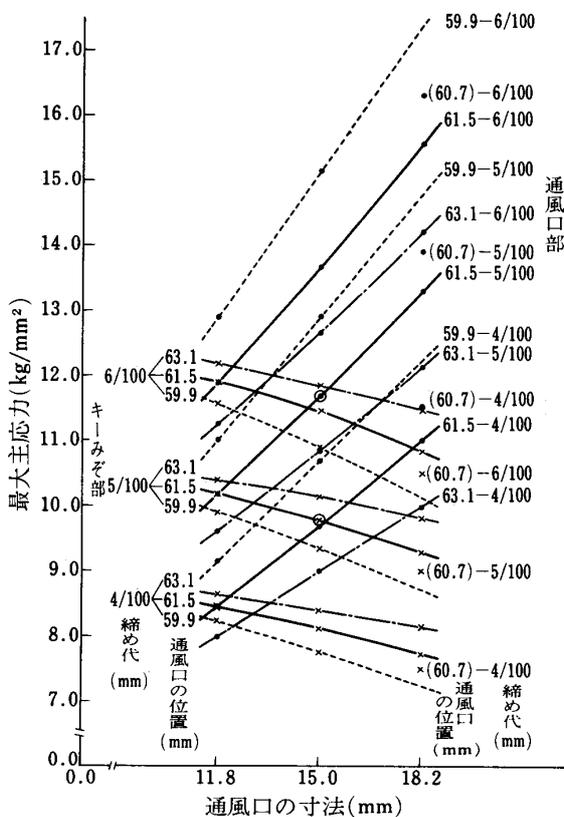


図18 通風口の寸法による最大応力の変化 (I型)

表7 通風口の最適寸法

通風口の位置 (mm)	締め代 (mm)	通風口の最適寸法 (mm)	応力 (kg/mm ²)
63.1	4/100	13.56	8.6
	5/100	13.56	10.3
	6/100	13.56	12.1
61.5	4/100	11.8	8.5
	5/100	11.8	10.2
	6/100	11.8	11.9

最大主応力である。また図の白丸は現製品の応力状態を示す。これから通風口周辺の応力は、通風口が大きくなるにつれて直線的に増大するのに対し、キームぞ周辺の応力は通風口が大きくなるにつれて減少する傾向がある。また両応力とも締め代の増加に対しては、直線的に増大することは、前述のとおりである。

複数の応力集中個所がある場合、それらの点における応力ができるだけ小さく、かつほとんど等しいという設計が可能ならば、非常に理想的である。図において実線同志、点線同志及び一点鎖線同志は、同一のパラメータ条件に対する曲線であるから、例えばキームぞ部の実線と通風口部の実線との交点を求めると、両応力が等しくなる最適の通風口寸法が決まる。このようにして求めた通風口の最適寸法を表7に示すが、実際の寸法は通風口の冷却効果を考慮して検討し直さなければならない。

表7において通風口の位置を現製品通り 61.5mm とすれば寸法は 11.8mm となり、現製品の 15.0mm よりかなり小さくなり、冷却効果が減少する。その代わりキームぞ部の応力がわずか高くはなるが、通風口部の応力が大幅に減少してくれる。通風口の位置を 63.1mm とした場合にも同様の議論が成立する。

図19 は通風口の寸法と締め代をパラメータとして、通風口の位置に対する最大主応力の変化を示す。図中右下がりの曲線は通風口周辺の要素の最大主応力であり、右上がりの曲線はキームぞ周辺の要素の最大主応力である。これから通風口周辺の応力は通風口が軸から遠ざかるにつれて低下するのに対し、キームぞ周辺の応力は上昇する。

4.2.2 II型

図20 は通風口の位置と締め代をパラメータとして、通風口の寸法に対する最大主応力の変化を示す。図中右上がりの曲線は通風口周辺の要素の最大主応力であり、右下がりの曲線はキームぞ周辺の要素の最大主応力である。また図の白丸は現製品の応力状態を示す。これから通風口周辺の応力は、通風口が大きくなるにつれて増大

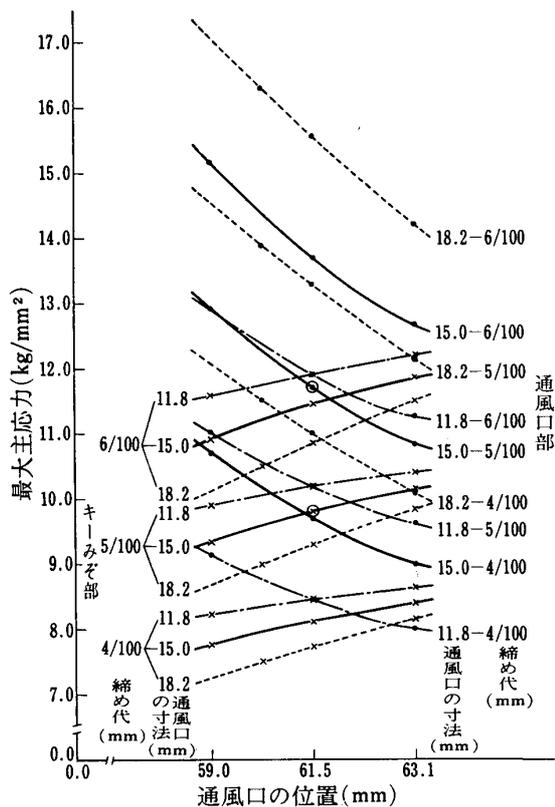


図 19 通風口の位置による最大応力の変化 (I型)

右上がりの曲線はキーみぞ周辺の要素の最大主応力である。これから通風口周辺の応力は、通風口が軸から遠ざかるにつれて減少するのに対し、キーみぞ周辺の応力は増大する。また現製品の寸法が最適値に近いことは、この図からも明らかである。

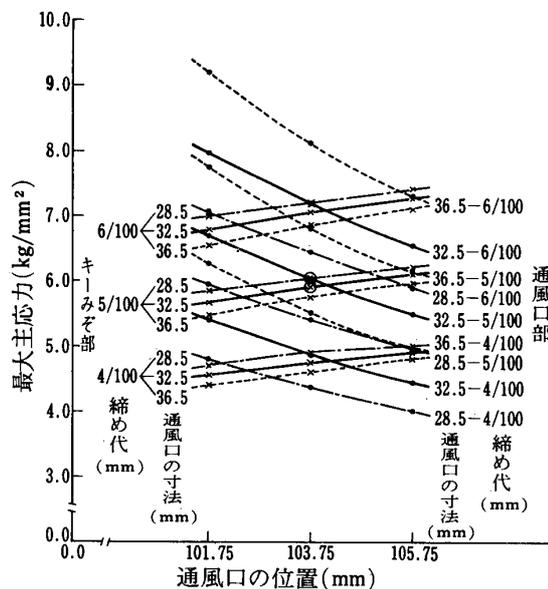


図 21 通風口の位置による最大応力の変化 (II型)

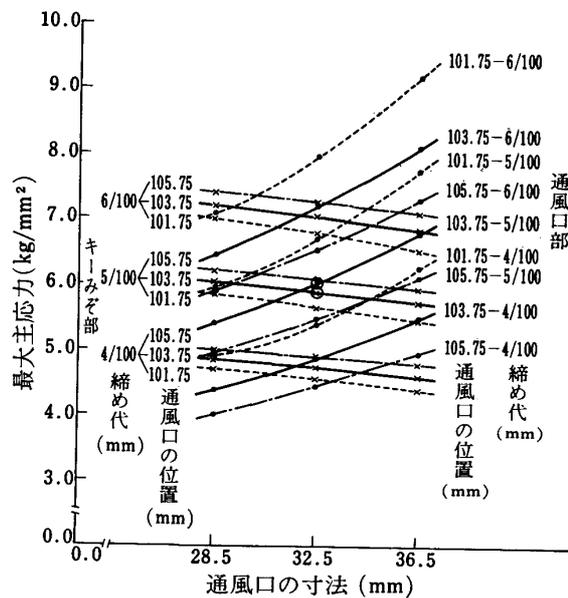


図 20 通風口の寸法による最大応力の変化 (II型)

するのに対し、キーみぞ周辺の応力は減少する。現製品の応力状態を表す白丸が互いに接近していることから、II型の設計寸法は、発生応力の点からは最適値に近いことが分かる。

図 21 は通風口の寸法と締め代をパラメータとして、通風口の位置に対する最大主応力の変化を示す。図中右下がりの曲線は通風口周辺の要素の最大主応力であり、

4.3 焼きばめ面圧

4.3.1 I 型

図 22 に通風口の位置と焼きばめ面の平均面圧又は全は握力との関係を示す。ただしこの場合のパラメータは締め代と通風口の寸法である。図 23 に通風口の寸法と平均面圧又は全は握力との関係を示す。この場合のパラメータは通風口の位置と締め代である。これらの図から平均面圧は通風口が軸から遠ざかるにつれて直線的に上昇し、また通風口が大きくなるにつれて直線的に低下し、締め代が大きくなるにつれて直線的に上昇する。図中の白丸は現製品の焼きばめ面圧を示す。通常の焼きばめ公式を用いて面圧を計算する場合、磁極鉄心に通風口があると、外円筒の外半径をどのように選ぶべきかという問題が生じてくる。今、面圧を白丸印の 2.46 kg/mm^2 として外半径を逆算すると 59.18 mm になり、この値は通風口の位置 (中心) よりわずかに内側に入った部分に、外半径を設定すべきであることを示している。

4.3.2 II 型

図 24 に通風口の位置と焼きばめ面の平均面圧又は全は握力との関係を示す。この場合のパラメータは締め代と通風口の寸法である。図 25 に通風口の寸法と平均面圧又は全は握力との関係を示す。この場合のパラメータは通風口の位置と締め代である。これらの図から I 型と

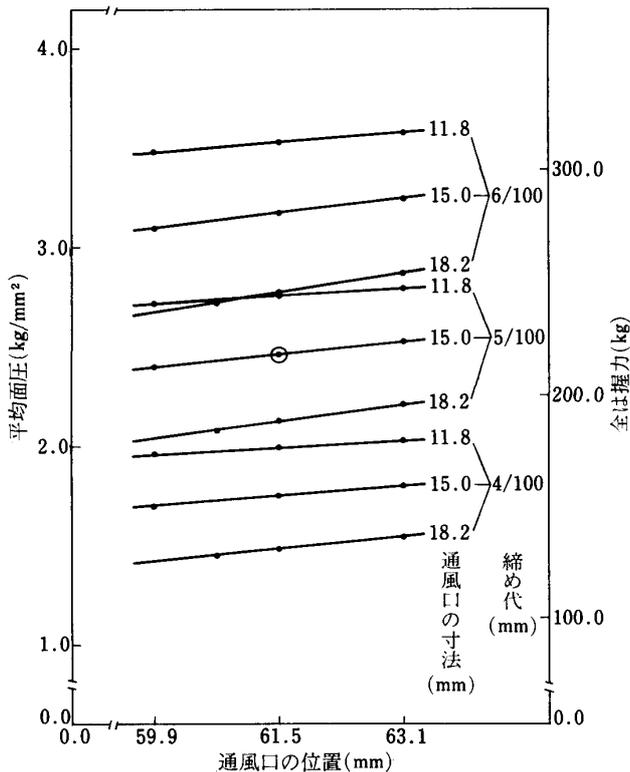


図 22 通風口の位置による面圧の変化 (I型)

同様に、平均面圧は、通風口が軸から遠ざかるにつれて直線的に上昇し、また通風口が大きくなるにつれて直線的に低下し、締め代が大きくなるにつれて直線的に上昇する。図中の白丸は現製品の焼きばめ面圧を示す。この面圧の値は 1.77 kg/mm^2 であるが、これから通常焼きばめ公式における外円筒の外半径を逆算すると、 96.33 mm となる。この値は軸心から通風口の内側までの距離の 10% 増しであり、I 型の場合の 9.6% 増しと同程度である。したがって円筒の焼きばめ公式を用いて面圧を計算する場合には、外円筒の外半径を軸心から通風口の内側までの距離の 10% 増し程度にとり、通風口間のソリッドの部分の影響を加味すべきである。

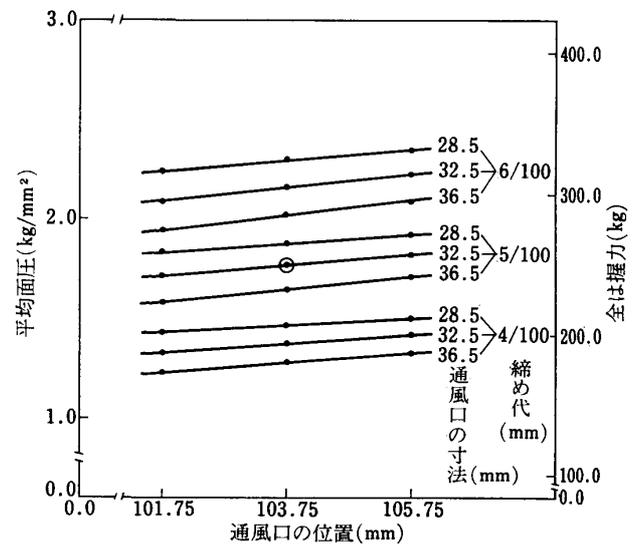


図 24 通風口の位置による面圧の変化 (II型)

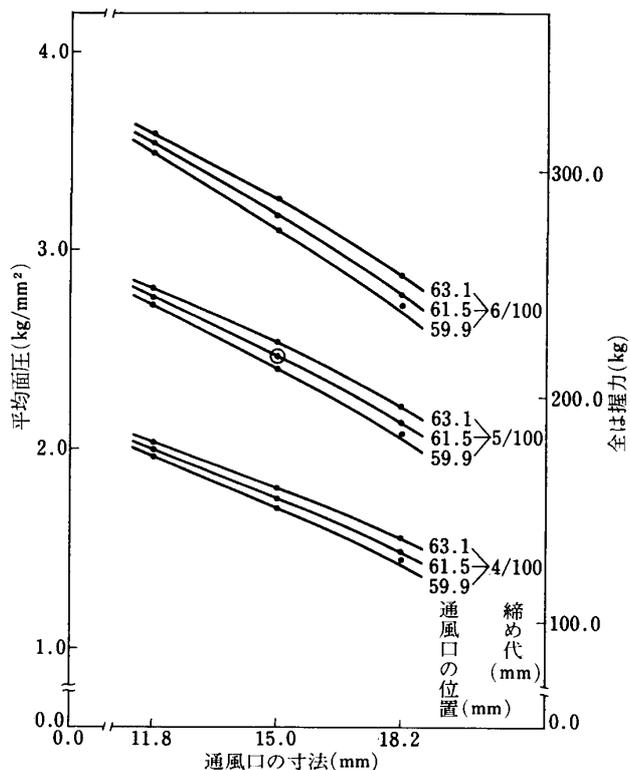


図 23 通風口の寸法による面圧の変化 (I型)

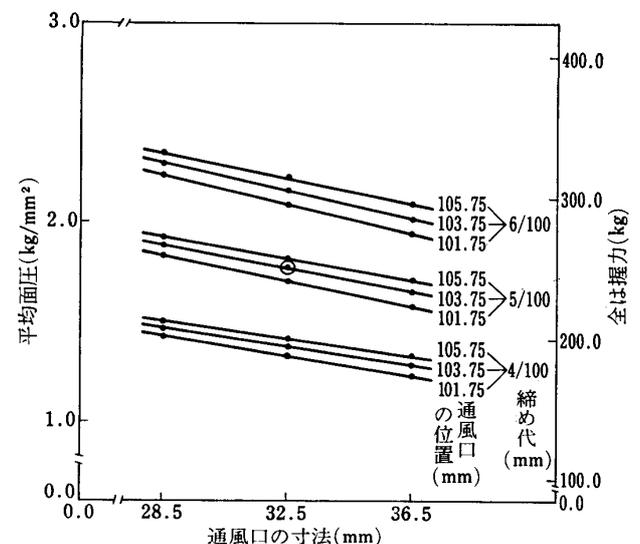


図 25 通風口の寸法による面圧の変化 (II型)

4.4 ソリッド部の長さや面圧及び応力との関係

通風口の位置と寸法を1個の変数にまとめるために、軸穴と通風口との間のソリッド部の長さを選び、これを横軸にとって最大主応力と焼きばめ面圧とをプロットしたグラフが図26 (I型)と図27 (II型)である。これらの図からソリッド部の長さを変数にとれば、最大主応力及び焼きばめ面圧は締め代をパラメータとして、ほぼ1本の曲線の上に乗るようである。特にI型のキーみぞ周辺の最大主応力及びII型の両最大主応力と面圧はその傾向が著しい。

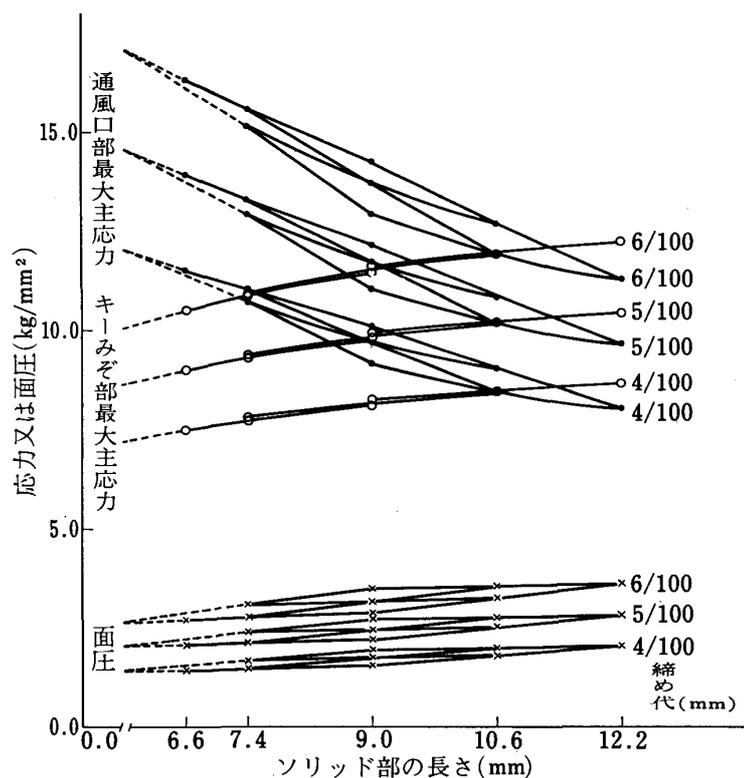


図26 ソリッド部の長さによる最大応力と面圧の変化 (I型)

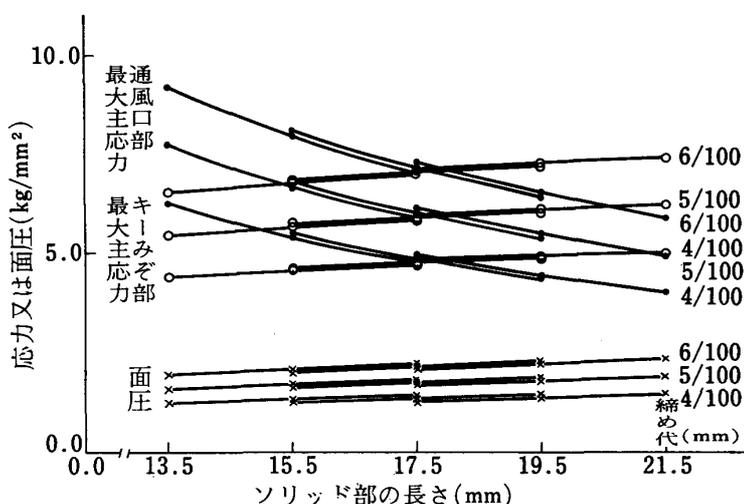


図27 ソリッド部の長さによる最大応力と面圧の変化 (II型)

I型及びII型を通じて、ソリッド部の長さが大きくなると、焼きばめ面圧とキーみぞ周辺の最大主応力は上昇するが、通風口周辺の最大主応力は低下する。特に前二者の上昇率よりも後者の低下率の方が大きい。したがってソリッド部の長さを大きくとると、面圧の上昇という望ましい結果が得られる半面、キーみぞ周辺の最大主応力が上昇してしまう。しかしこの上昇は通風口周辺の最大主応力の低下に比較すれば小さい値であって、むしろ後者の低下の方がメリットが大きい。

4.5 面圧と応力との関係

通風口周辺の最大主応力とキーみぞ周辺のそれとを比較すると、前者の方が大体大きいので、ここでは通風口周辺の応力と焼きばめ面圧との関係を調べる。平均面圧を横軸に通風口周辺の最大主応力を縦軸にとって、これまでの結果を再整理したグラフが図28 (I型)と図29 (II型)である。図中の数字は締め代、通風口の位置及び寸法を表し、白丸は現製品の状態を表す。これらの図から平均面圧と通風口周辺の最大主応力とはほぼ比例関係にある。またグラフは載せていないが、キーみぞ周辺の最大主応力も同様な傾向を持つ。

これらの図には最大主応力、平均面圧、締め代、通風口の位置及び寸法の情報がすべて含まれている。したがって鉄心の強度設計に利用すると便利である。例えば図28において、平均面圧を現製品の 2.46 kg/mm^2 から 3.5 kg/mm^2 程度にあげたいが、冷却効率の点から通風口の位置と寸法は変更したくないとすれば、最大応力が 11.7 kg/mm^2 から 13.7 kg/mm^2 程度に上昇することになる、といった利用の仕方が可能である。

4.6 ねじりトルク

発電機軸にかかる最大トルクを、トルク変動率 0.75 として計算した結果と、本解析による平均面圧から計算した摩擦トルクとを表8に示す。ただし軸と鉄心との間の摩擦係数を 0.1 とする。この表から摩擦トルクの方がはるかに大きいので、過大のねじりトルクに対して鉄心が滑ることはほとんどないであろう。

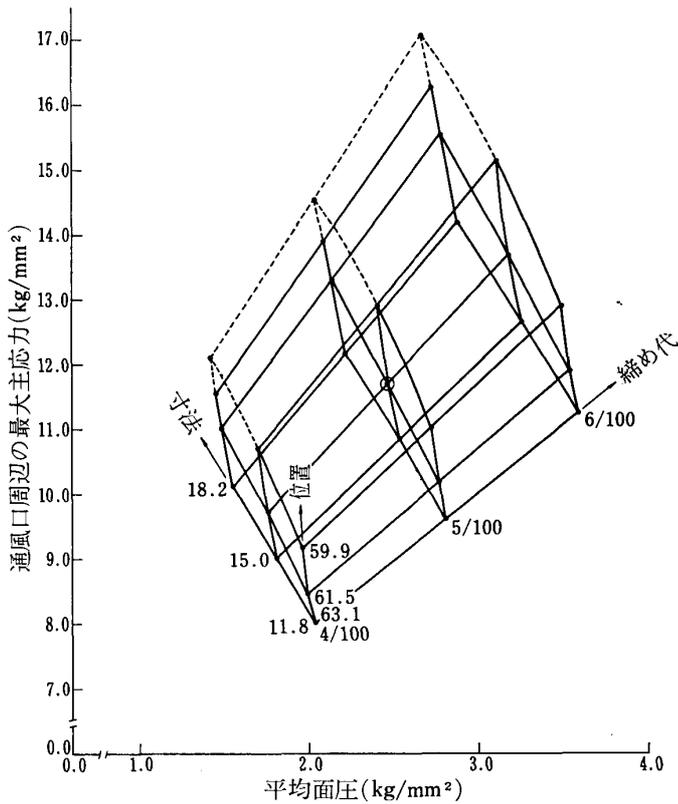


図 28 平均面圧と最大応力との関係 (I型)

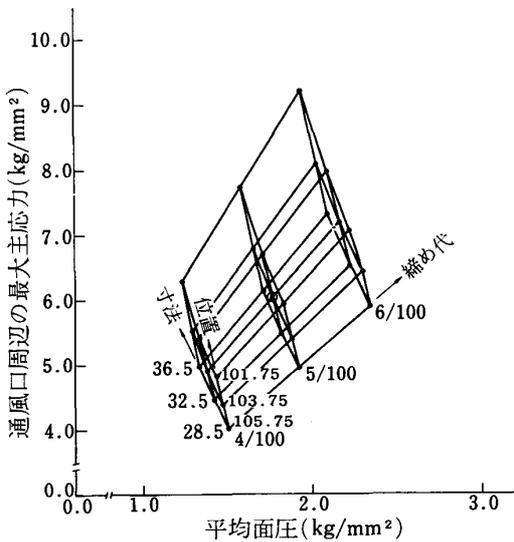


図 29 平均面圧と最大応力との関係 (II型)

表 8 摩擦トルクと最大トルク

型	平均面圧 (kg/mm ²)	摩擦トルク(1) (kg-m)	最大トルク(2) (kg-m)	(1)/(2)
I型	2.46	563.1	22.4	25.1
II型	1.77	1,933.8	268.8	7.2

5. 結 論

2種類の船用発電機の磁極鉄心を、軸を含めて有限要素法で応力解析した結果得られた結論を列挙すると以下のとおりである。

- 1) 運転中の遠心力及び磁気吸引力による変形は磁極鉄心の緩みを生じないまでも、焼きばめ面圧をかなり低下させる。本解析モデル中で通風口の位置が軸に近く、かつ通風口の寸法が大きい場合に、締め代を次第に小さくしていくと、通風口の直下で軸と鉄心の間に緩みを生じた例がある。
- 2) 運転中の発生応力は、通風口周辺の軸心寄りの部分、キーみぞの周辺及び軸穴の周辺で高い値を示すが、本解析では材料の許容応力範囲内に収まっている。
- 3) 通風口を大きくするにつれて、通風口周辺の最大応力は直線的に増加するのに対し、キーみぞ周辺の最大応力は減少する。通風口を軸から遠ざけるにつれて、通風口周辺の最大応力は減少するのに対して、キーみぞ周辺の最大応力は増加する。締め代を増加するにつれて、通風口周辺及びキーみぞ周辺の最大応力は直線的に増加する。
- 4) 運転中の焼きばめ面圧は軸穴円周に沿って一様分布せず、かなり変動している。すなわち、通風口直下で低く、通風口間のソリッドの部分で高いのが一般的傾向である。
- 5) 平均面圧は、通風口を大きくするにつれて直線的に減少し、通風口を軸から遠ざけるにつれて直線的に増加し、締め代を増加するにつれて直線的に増加する。
- 6) 円筒の焼きばめ公式を用いて、通風口のある磁極鉄心の面圧を計算する場合には、外円筒の外半径として軸心から通風口の内側までの距離の10%増し程度をとって、通風口間のソリッド部分の影響を加味すべきである。
- 7) 最大応力、焼きばめ面圧、締め代、通風口の位置及び寸法の間を1枚のグラフに表示できるので、鉄心の設計に有効である。
- 8) 現製品の鉄心の摩擦トルクは発電機軸にかかる最大トルクよりもはるかに大きく、過大のねじりトルクに対して鉄心が滑ることはほとんどない。

参 考 文 献

- 1) 河村博敏, 松倉欣孝 “大容量ブラシレス励磁機の機械的問題” 三菱電機技報 Vol. 49, No. 6, 1975
- 2) 日本海事協会技研 “NKSAP 1 使用説明書” 昭和51年
- 3) 竹内登一 “電気機械構造論” 工業図書, 昭和18年