

急冷薄帯磁心と熱分布

RAPIDLY QUENCHED RIBBON-FORM SOFT MAGNETIC MATERIALS AND THE TEMPERATURE DISTRIBUTION

中村秀男 早野誠治 斎藤兆古
H. NAKAMURA S. HAYANO Y. SAITO

法政大学 工学部
COLLEGE OF ENGINEERING, HOSEI UNIVERSITY

1. はじめに

変圧器や電動機の鉄心に使われている珪素を約3%含む珪素鉄合金は、電気鉄板としてよく知られている。現在、世界中で年間約150万トン製造されているという。飽和磁化、透磁率および電気抵抗が高く、また安価であることから広く用いられている。一方、小型高性能化という時代の要求に伴い、この分野でも更に特性の優れた新材料の開発が待たれている。又、エネルギー節約の観点から、方向性珪素鋼板を作製する際の工程の簡略化、および鉄心として動作しているときの鉄損を軽減する必要性が生じてきた[1]。

本稿では、鉄損を軽減するということの予備知識として、鉄損によって機器に生じる熱の大きさや温度分布および強制冷却したときの効果という側面からこの問題について検討を加えた。

ところで、電気機器の設計あるいは最も適切な使い方をしようとする場合、その使用条件はもとより温度上昇を適確に推定することが重要であり、従来から盛んに行なわれている。たとえば、熱伝導方程式を解くものや等価熱回路網を作成し、これを解いて温度上昇分布を求めるなどの方法がある[2, 3]。前者は適用範囲が狭く一種の簡易法である。後者は回路網の構成、熱抵抗や熱源の設定が設計者の判断で行なわれるため、形状や材質の分布が複雑になったり、経験的な新しい機器などには適用が困難になるという問題点をもっているが、現在も実用化されている[4]。

さて構造分野から発展してきた数値解析の手法である有限要素法は、よく知られているようにその特徴が複雑な形状や材質の計算対象に高い適合性があることから、近年ではこの手法が電気機器の温度計算に用いられている。しかしながら、その適用例が少ないことが不思議に感じられるほどである[5, 6]。

その理由としては、従来の有限要素法では空気や水素などの流体中における温度計算が困難であったので、強制冷却の効果の取扱いに不都合な点が生じたものと考えられる。ここでは、これらの状況をふまえて温度計算に強制冷却の効果を取入れる一つの方法を提案し、例として直流機電機子の温度分布をシュミレーションした結果と実機による実測値との比較を示した。

2. 有限要素法

ある物体の温度分布を求めるということは、現象を支配する(1)式に示すポアソンの方程式を設定された境界条件のもとに解くことである。即ち、最小エネルギーの原理を応用して汎関数を求め、その汎関数を最小値にするような温度分布が求める解である。

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla \phi) = -f \quad (1)$$

ただし, λ [w/°c m]; 熱伝導率
 ϕ [°c]; 熱的ポテンシャル
 f [w/m]; 熱源

である。

エネルギー最小の原理(変分原理)を適用すれば(1)式の汎関数Fは次式で与えられる。

$$F = \int_V \{ \lambda/2 |\nabla \phi|^2 - f\phi \} dv + \int_S \phi (\partial \phi / \partial n) ds \quad (2)$$

ここで, $\partial \phi / \partial n$ は境界における法線方向の微係数を表わす。

今, 第1図. に示した領域について考えるとき, (2)式のなかで境界に関する項は, 強制冷却空気に面していない領域では零になる。即ち, 内部領域においては次の(3)式となる。

$$F = \int_V \{ \lambda/2 |\nabla \phi|^2 - f\phi \} dv \quad (3)$$

しかしながら, 強制冷却空気に面している領域においては, 同次ノイマン条件が汎関数の最小化の過程で自動的に満足されない。そこで, (2)式の右辺第二項の表面積分に何んらかの意味をもたせる必要がある。

事実, 我々はこの境界条件を無視して(3)式に基づいて計算したら, 実測値とはかけ離れた結果を生じた。これは, 例題として選んだ直流機電機子の回転表面における強制冷却の効果を考えに入れなかったためである。

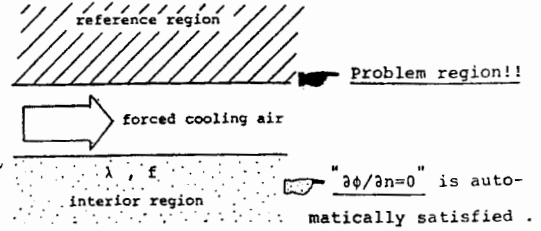
そこで, 我々はすでに報告されている国鉄の車両用主電動機の電機子に関する回転表面熱伝達の実験式をこの問題に適用してみた[7]。これらの実験式は次式の形で表わされている。

$$\alpha = \alpha(u_i, N, a, b, c) \quad (4)$$

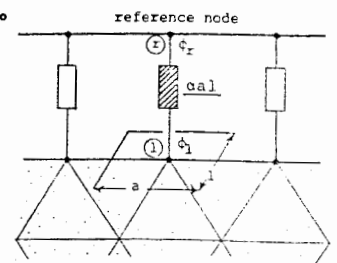
ここで, u_i , N はそれぞれ各部における冷却空気の流れ方向の速度と回転速度である。 a , b , c は各部における設計仕様に基づいた定数である。

(4)式を使って(2)式の表面積分の項は次式のように変形することができる。

$$\int_S \phi (\partial \phi / \partial n) ds = (\phi_a^2 / 2) \int_S \alpha ds \quad (5)$$



第1図. 強制冷却空気がある場合の境界領域。



第2図. 第1図の要素分割。

ただし、 ϕ_d は問題としている節点 \textcircled{r} と表面上の節点 $\textcircled{1}$ との間のポテンシャルの差として表わしている。従って、強制冷却領域を含んでいる汎関数は次式のように表わすことができる。

$$F = \int_V \{ \lambda/2 |\nabla\phi|^2 - f\phi \} dv + (\phi_d^2/2) \int_S \alpha ds \quad (6)$$

3. 離散化

説明を容易にするために、一次三角要素を用いて第1図. に示した領域を第2図. に示すような簡単な有限要素に分割すると、(6)式の表面積分の項は節点 $\textcircled{1}$ と節点 \textcircled{r} との間の一要素として置き代えることができる。さらに、節点 $\textcircled{1}$ における(6)式の表面積分は次のようになる。

$$F_b = (\phi_d^2/2) \int_S \alpha ds = \{ (\phi_1 - \phi_r)^2 / 2 \} \alpha a l \quad (7)$$

ただし、 a 、 l 、 ϕ_1 および ϕ_r は第2図. に示した通りである。そこで、(7)式で表わした汎関数 F_b の最小化を行うと結局、次のような形となる。

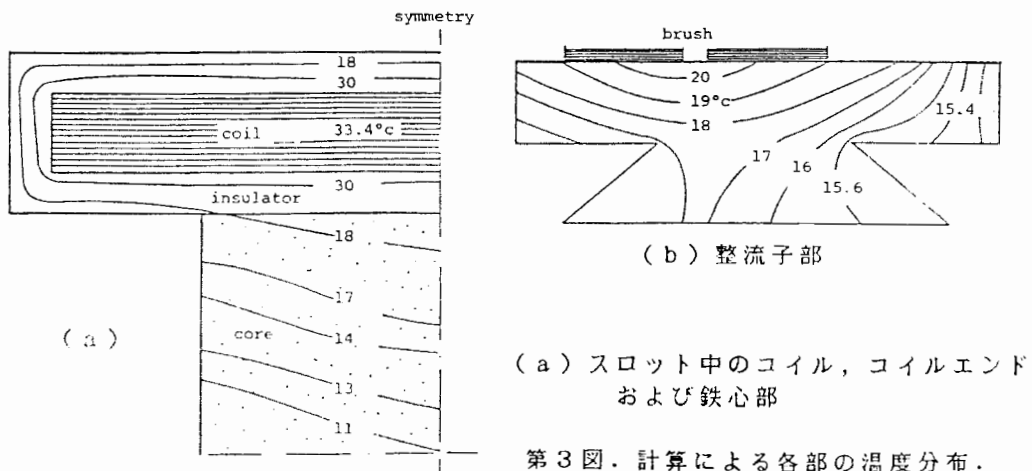
$$\partial F_b / \partial \phi_1 = (\phi_1 - \phi_r) \alpha a l \quad (8)$$

結論として、節点 $\textcircled{1}$ と節点 \textcircled{r} との間の要素は $\alpha a l$ として与えられる。境界面上にあるその他の節点についても同じ手順で求めることができる。

4. 計算例

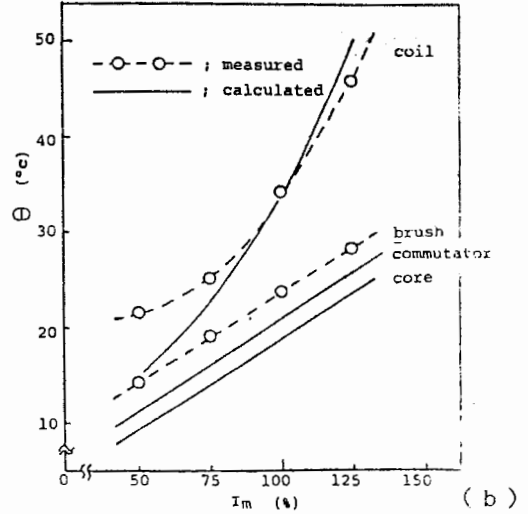
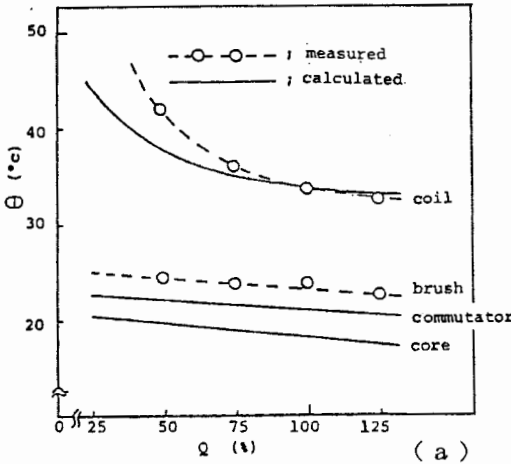
上記の理論的展開の妥当性を確かめるために、直流機電機子の各部にこの方法を適用してみた。(a) 鉄心および絶縁物で囲まれているスロット中のコイル、(b) 強制冷却空気と直接接している整流子。

第1表. に供試機の定格と設計要目を示した。又、第3図. (a)、(b) はそれぞれの部分の温度分布を示し、第4図. (a)、(b) は温度上昇の代表点の実測値と計算値との比較を示した。



第1表. 供試機の定格と設計要目.

Rating		Dimension		
Output(Cont.)	[KW]	4.2	Diameter of the armature [mm]	175
Rotating speed	[r.p.m.]	1350	Armature length [mm]	150
Cooling air	[m ³ /min]	4.5	Diameter of the commutator [mm]	120
Ventilating system	Forced air cooling		Commutator length [mm]	65



5. おすび

(a) 温度上昇 Θ と強制冷却空気 Q との関係
 (b) 温度上昇 Θ と電機子電流 I_m との関係

急冷薄帯磁心を電気鉄板として製品化し、電気機器に使用したときに生ずるであろう温度分布の問題を取上げた。そして、直流機電機子を例にとって強制冷却が温度分布に与える効果について有限要素法を用いて計算する方法を述べた。数学的には少し不自然な形の箇所があるかも知れないが、計算値と実測値はよく一致しこれらの問題に対する一方法として利用できることが分った。

第4図. 計算値と代表点の実測値の比較.

急冷薄帯磁心そのものについての製造、加工技術および特性については、数ある文献に譲る形となった。しかし、はじめにも述べたように鉄損を含む各種の損失による熱の問題は、機器設計上欠くことのできない事項であるので、本稿が今後の研究を行なう際のの一助となれば幸いである。

参 考 文 献

- (1) 荒井, 津屋; 第47回 新材料研究会報告 昭和58年7月(1983)
- (2) 山村, 山崎; 電気学会雑誌 41-36, P.648, 昭和41年4月(1966)
- (3) 山崎, 山村; 電気学会論文誌 50-B2, P.453, 昭和50年9月(1975)
- (4) 山崎, 他; 鉄道技術研究報告 NO.1116, 昭和54年10月(1979)
- (5) A.F.Armor and M.V.K.Chari; IEEE Trans.Power Apparatus and Systems PAS-95,P.1643 (1976)
- (6) 内藤; 電気学会雑誌 97-3, P.184 昭和52年3月(1977)
- (7) 山崎, 山村; 電気学会論文誌 48-B63, P.493 昭和48年10月