受動形磁気ダンパの磁極形状の最適化*

金 森 満^{*1}, 石 原 好 之^{*2}

Shape Optimization of Magnetic Pole on an Electromagnetic Damper

Mituru KANAMORI and Yoshiyuki ISHIHARA

In this work, the optimum shape of the magnetic pole on an electromagnetic damper is determined by an optimization technique taking a serious view of a compact design. The Lagrange multipliers method was used for the optimization technique⁽⁹⁾. Firstly, damping coefficients were evaluated by the distribution of eddy currents occurred in the conducting slab. The distribution of eddy currents was calculated by the boundary element method combined with the finite element method. Secondly, each optimum shape of magnetic pole under several conditions was obtained by the optimization technique. Thirdly, each optimum pole shape was verified experimentally by comparison between the experimental value of the damping coefficient and the objective value.

Key Words: Vibration, Electrical Engineering, Electromagnetic Damper, Damping Coefficient, Magnetic Pole, Optimization

1. 結 言

受動形磁気ダンパは、減衰力が非接触で作用するため摩擦や疲労がない、オイルが不用なため真空環境に適する、構造が簡単で安定な減衰力が得られるなどの利点があるため、盛んに研究されてきている^{(1)~(10)}。磁気ダンパの設計にあたり、必要な減衰係数は動的シミュレーションによりあらかじめ決定できる。したがって、所望の減衰係数を有し、かつ最適な磁気ダンパを設計する最適化に関する研究は、極めて有意義である。

なかでも磁極の最適設計は、低コスト化、コンパクト化および軽量化を達成するために必要不可欠である。Schieber は、長方形磁極と導体板から成る電磁ブレーキに関して、低コスト化に着目し、長方形磁極の最適寸法を検討し報告している⁽³⁾。しかし、この報告では導体板の運動方向の幅を無限と仮定しており、磁気ダンパの設計にとっては実用的とは言えない。

著者らはすでに、正方形磁極を有する受動形磁気ダ

ンパに関して、導体板の最適形状を検討し報告している⁽⁹⁾。この報告では、有限要素法と境界要素法を併用し、ラグランジュの未定乗数法と感度解析により、導体板の最適形状を決定し、最適化手法の妥当性を明らかにしている。磁極の最適形状に関しても、この最適化手法が応用できる。

そこで本研究では、まず、所望の減衰係数を有し、かつ磁極面積が最小となる長方形磁極の最適寸法を数値解析により求めた。次に、最適な長方形磁極を有する磁気ダンパを試作し、実験的にその妥当性を確認した。また、長方形磁極に関して、最適な磁極の縦横の寸法比、導体板と磁極の最適面積比および無次元化減衰係数との相互関係について考察した。その結果をもとに、導体板形状が正方形でその面積がすでに決められている場合に、図からただちに磁極の最適寸法が得られる方法を提案した。さらに、所望の減衰係数を有し、かつ磁極面積を最小にする磁極の最適形状を数値解析により求め、実験的にその妥当性を確認した。

2. 解析モデルと最適化手法

2・1 解析モデル 図1に長方形磁極と導体板から成る磁気ダンパを示す。磁束密度 B の磁場内を導体板が速度 v で運動すると、導体内に渦電流が誘導さ

* 原稿受付 平成3年2月4日。

^{*1} 正員、舞鶴工業高等専門学校 (〒625 舞鶴市宇白屋 234)。

^{*2} 正員、同志社大学工学部 (〒602 京都市上京区今出川烏丸東入)。

れ、この渦電流と磁束密度の相互作用により、運動と反対方向に減衰力が発生する。これが磁気ダンパの原理である。導体板の中心を原点とする X - Y 座標を、図 1 のように導体板表面に設置する。磁極の X および Y 方向の寸法をそれぞれ A_p , B_p とし、導体板の X および Y 方向の寸法をそれぞれ a , b とする。導体板の厚さを t とし、導体板の運動方向は Y 方向とする。渦電流分布の解析領域は、対称性を考慮して、 X - Y 座標系の第一象限平面のみとする。領域 Ω_B は境界要素法で、領域 Ω_F は磁束密度が垂直に作用する磁極部の領域であり、有限要素法で解析する。解析で得られた渦電流密度と磁束密度の値より、減衰係数が算出できる。定式化および解析方法は文献(9)に示した。

2・2 最適化手法 最適化手法として、非線形性を考慮できるラグランジュの未定乗数法を用いた。定式化については文献(9)に示した。長方形磁極の最適化では、磁極の縦および横方向の寸法を設計変数 α_i とした。設計変数に仮想変位 $\delta\alpha_i$ を与え、設計変数の減衰係数に対する感度を求めた。磁極面積 S_p を一定に制約する条件のもとで、減衰係数が最大となる磁極形状、ならびに、所望の減衰係数を生じさせ、かつ磁極面積を最小にする最適寸法を求めた。繰返し計算過程で得られる磁極寸法の変化量が 5 mm 以上となる場合は、最大 5 mm となるようにスケーリングパラメータを設定することにより、発散を防止した⁽⁹⁾⁽¹¹⁾。収束の判定は、磁極寸法の変化量が 0.1×10^{-2} mm 以下のとき収束とみなした。

磁極形状の最適化では、磁極形状境界上の節点を 8

個とし、これらの節点と原点 O との距離を設計変数 α_i とした。図 2 に要素分割図の一例を示す。磁極形状境界上の節点は、節点と原点を通る直線上のみ移動できるとし、設計変数 α_i に仮想変位 $\delta\alpha_i$ を順次与え、減衰係数と磁極面積の感度を求めた⁽⁹⁾。初期形状がく形の場合、要素の方向性による非均一性が拡大されることが知られている⁽¹¹⁾。そこで、長方形磁極の最適形状を参考にして、なめらかな初期形状を設定した。発散を防止するため、繰返し計算で求められる節点の移動量が仮想変位量以上になるときは、仮想変位量程度になるように、スケーリングパラメータを設定した。

3・1 長方形磁極の形状特性 導体板を正方形とし、磁極面積一定のもとで、磁極の縦横の寸法比を種々変化させて数値解析的に減衰係数を求め、磁極の形状特性を調べた。図 3 にその結果を示す。導体板面積 S_c は磁極面積 S_p の 5 倍の一定値とした。導体板の厚み t は 5 mm、抵抗率 ρ は実測したアルミ板の値 $5.26 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ に渦電流の表皮効果の影響を考慮して $5.41 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ とした⁽⁷⁾。導体板の速度 v は、磁場振動の連成解析で得られた速度の最大値 0.13 m/s とした⁽⁷⁾。図 3 から、寸法比 A_p/B_p が 0.2 付近から増加するにつれて減衰係数 C も増加し、 A_p/B_p が 4.17 のとき減衰係数 C は最大値 23.918 N・s/m を示すことがわかる。さらに A_p/B_p が増加すると、減衰係数は減少する。以上の結果より、長方形磁極の最適寸法が存在することがわかった。

3・2 長方形磁極の最適化 図 4 に、減衰係数 C と寸法比 A_p/B_p の収束状況を、図 5 に磁極形状の収束状況を示す。磁極の初期形状を正方形とすれば、8 回の繰返し計算で最適形状に収束している。図 4 で示した減衰係数は、図 3 で示した最大値 23.918 N・s/m

図 1 磁気ダンパの解析モデル

図 2 有限・境界要素分割図

に収束し、磁極の寸法比 A_p/B_p は図3の4.17に収束している。これより、本最適化手法の妥当性が確認できる。

最適形状における渦電流分布の計算結果を図6に示す。減衰に寄与する渦電流は、磁極部 Ω_F の領域内で、導体板の運動方向と直角方向に生じる渦電流である。そのため、領域 Ω_F の渦電流はすべてこの方向に生じることが望ましい。しかし、図6から明らかなように、磁極端部で渦電流の方向変位があり、まだ磁極形状の最適化の余地が残されていることがわかる。

図5に示した磁極形状の収束過程において、磁極と導体板の運動方向の寸法比 b/B_p が増加するにつれて、渦電流路の広がりによって抵抗が減少し、その結果渦電流が増加し減衰係数が増加して行く。逆に、運動方向と直角方向の寸法比 a/A_p は減少し、磁極端部における渦電流の方向変化を大きくさせる⁽⁸⁾。しかし、磁極寸法 A_p が増加したことにより、図6に示したEF間を横切る渦電流が増加し、磁極の端部ほど渦電流密度が減少する。その結果、磁極端の渦電流の方向変化

も小さくなり、これによる減衰係数の低下も小さくなる。

次に、減衰係数の最大値 $23.918 \text{ N}\cdot\text{s/m}$ を制約条件とし、磁極面積を最小にする磁極の最適寸法を図7に示す。初期形状は図5の場合と同様であるが、収束過程は異なっており、12回で最適形状に収束している。収束結果は図5に示した磁極形状と全く一致している。これは双対性を表している。以上の検討より、本最適化手法は、双対性も満たしており、その妥当性が明らかとなった。

本手法を用いて、磁極面積を最小にする磁極の最適寸法を、種々の減衰係数の目標値に対して求めた。減衰係数の目標値、最適寸法、最適面積値を表1に示し、最適磁極形状を図8に示した。導体板は正方形とした。これらの結果より、導体板の運動方向の直角方向の最適寸法は、導体板寸法の約9割で、目標値の変化に対する変化は比較的小さいことがわかる。これに対し、導体板の運動方向の最適寸法は、目標値の変化に対して、比較的大きく変化していることがわかる。

図3 長方形磁極の形状特性
($B=0.4 \text{ T}$, $a=b=111.8 \text{ mm}$, $S_p=2.5 \times 10^3 \text{ mm}^2$)

図4 減衰係数および磁極の寸法比の収束状況

図5 磁極形状の収束状況(磁極面積を制約し減衰係数を最大とする場合)

図6 最適な長方形磁極における磁極部の渦電流分布の計算結果

図7 磁極形状の収束状況(減衰係数を制約し磁極面積を最小とする場合)

図8 減衰係数の目標値の変化に対する長方形磁極の最適寸法の変化

3・3 実験的検討 減衰係数の目標値が10, 20, 30 N・s/mの3通りの最適長方形磁極を有する磁気ダンパを試作し、それぞれの減衰係数を実験的に求め、目標値と比較検討することにより、計算結果の妥当性を確認した。図9に一例を示す。鉄心にはパーマロイを用い、磁極部分だけを取り換えられるようにしてある。鉄心には線径1.6φのコイルを2箇所巻き、励磁電流を与えることにより磁束を生じさせている。片持ばりに取付けた厚み5mmのアルミ板を間隔10mmの磁極間の中央部に挿入し、減衰自由振動波形を実測することにより減衰係数を求めた。実験装置および実験方法は文献(7), (8)に示した。ギャップ部の磁束密度はガウスメータで実測し、0.4 Tとなるように励磁電流を設定した。

減衰係数の目標値と実験値を表1および図10に示した。これらの結果からわかるように、両者はよく一致している。目標値30 N・s/mの実験値は、ばらつきが大きいので50回の平均値とした。標準偏差は4%程度である。また、これらの実験値は片持ばりの内部減衰係数を差し引いた値である。以上の結果より、本最適化手法で得られた最適形状の妥当性が確認できた。

3・4 最適寸法の一般化 ここでは、導体板の形状を正方形とし、その面積が与えられている場合、無次元化減衰係数を用いて、長方形磁極の最適寸法を求

める方法について提案する。無次元化減衰係数は、長屋らによって提唱され、次式で表される⁽⁴⁾。

$$C_0 = \rho \cdot C_{obj} / (B^2 \cdot t \cdot S_p) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 C_0 は無次元化減衰係数、 B は磁束密度、 t は導体板の厚み、 S_p は磁極面積である。 C_{obj} は、減衰係数の目標値、 ρ は導体板の抵抗率である。図8で示した減衰係数の目標値に対する無次元化減衰係数を求め、表1に示した。これらの値は文献(4)の値とよく一致している。また、 C_0 と磁極の最適寸法比 $(A_p/B_p)_{opt}$ 、および、導体板と磁極の最適面積比 $(S_c/S_p)_{opt}$ との関係を図10に示した。 B , t , ρ が変化した場合でも、この図を用いれば、所望の C_0 を生じさせる $(A_p/B_p)_{opt}$ 、および $(S_c/S_p)_{opt}$ を即座に求めることができ、導体板面積値が決まれば最適磁極寸法が決定できる。 C_0 を大きく設定すると効率はよくなるが、最適面積比 $(S_c/S_p)_{opt}$ が大きくなり、導体板が磁極に対して極端に大きくなる。 C_0 を小さくしすぎると $(S_c/S_p)_{opt}$ を小さくできコンパクトになるが、効率が著しく低下する。また、正方形導体板の面積を一定とした場合、 C_0 の増加に対して減衰係数 C_{obj} は減少し、 C_0 の減少に対して C_{obj} は増加する傾向がある。したがって C_0 と C_{obj} の両方が大きくなるように、図10の交点O付近の C_0 あるいは C_{obj} で設計するのがよい。

表1 最適長方形磁極の計算結果と実験結果

Damping coefficient Ns/m			Magnetic pole shape		
Objective C_{obj}	Experimen- tal C_{ex}	Dimension- less C_0	Size A_p	mm B_p	Area mm ² S_p
10.0	10.3	0.863	103.0	7.6	782.80
15.0	—	0.785	101.7	12.7	1291.59
20.0	20.4	0.712	101.5	18.7	1898.05
25.0	—	0.627	102.5	26.3	2695.75
30.0	29.6	0.525	104.7	36.9	3863.43

図9 最適長方形磁極を有する磁気ダンパ
($C_{obj}=10.0$ N・s/m)

図10 最適長方形磁極の計算結果と実験結果

4. 磁極の最適形状

図3で示した減衰係数の最大値 $23.918 \text{ N}\cdot\text{s/m}$ を目標値とし、磁極面積が最小となる磁極の最適形状とその渦電流分布を図11に示す。12回の繰返し計算で収束している。図6に示した長方形磁極の最適形状と比較して、磁極端部の渦電流の方向変化が少なく、ほぼ

図11 最適な磁極形状と渦電流分布
($C_{obj}=23.918 \text{ N}\cdot\text{s/m}$, $B=0.4 \text{ T}$, $S_c=1.25 \times 10^4 \text{ mm}^2$, $\rho=5.41 \times 10^{-8} \Omega\cdot\text{m}$, $v=0.13 \text{ m/s}$)

図12 最適な磁極形状の収束状況
($S_c=1.25 \times 10^4 \text{ mm}^2$, $\rho=5.41 \times 10^{-8} \Omega\cdot\text{m}$, $v=0.13 \text{ m/s}$)

図13 減衰係数と磁極面積の収束状況 ($S_c=1.25 \times 10^4 \text{ mm}^2$, $\rho=5.41 \times 10^{-8} \Omega\cdot\text{m}$, $v=0.13 \text{ m/s}$)

均一な分布となっており、減衰に寄与する渦電流成分が増加していることがわかる。最適形状の磁極面積は最適長方形磁極の面積より、約5%低減されている。また、計算で得られた磁極形状をスムージングすると、磁極の最適形状はだ円形に近いことがわかる。

次に、減衰係数の目標値を $25 \text{ N}\cdot\text{s/m}$ とした場合の磁極の最適形状を求め、この最適磁極を有する磁気ダンパを試作し、実験的に妥当性を確認した。最適な磁極形状の計算結果と収束状況を図12に示す。また、減衰係数ならびに磁極面積の収束状況を図13に、磁極

表2 減衰係数の目標値と実験値の比較

Damping Coefficient Ns/m		
Objective C_{obj}	Experimental C_{ex}	Standard Deviation
25.000	25.0	0.86

図14 磁極寸法の変化量 δa_i の収束状況
($S_c=1.25 \times 10^4 \text{ mm}^2$, $\rho=5.41 \times 10^{-8} \Omega\cdot\text{m}$, $v=0.13 \text{ m/s}$)

(a) 最適磁極形状

(b) 磁気ダンパ

図15 最適な磁極形状の磁気ダンパ

寸法の変化量の収束状況を図 14 に示す。これらの結果より、収束状況は良好で、13 回の繰返し計算で最適形状に収束していることが確認できる。図 12 の最適磁極をもつ磁気ダンパを試作し図 15 に示す。減衰係数の目標値と実験結果とを表 2 に示す。実験値はばらつきが大きく標準偏差は 3.3% であった。そのため、実験値は 25 回の平均値とした。減衰係数の目標値と実験値の平均値はよく一致している。以上の結果より磁極の最適形状の妥当性が確かめられた。

初期形状が適切でないと、不連続な形状に収束する場合がある。また、初期形状が変わると最適形状や磁極面積が変化することがある。このような場合は、初期形状を種々変化させて計算を行い、収束した形状の面積が最小となる形状を最適形状とみなした。

5. 結 言

正方形導体板を有する受動形磁気ダンパに関して、所望の減衰係数を有し、かつ磁極面積を最小にする磁極の最適形状を、ラグランジュの未定乗数法により求め、実験的にその妥当性を確認した。得られた結論を要約すると次のとおりである。

(1) 磁極面積一定のもとで、長方形磁極の縦、横の寸法を種々変えて得られた磁極の最適寸法と本最適化手法で得られた最適寸法はよく一致し、双対性も満

足しており、本最適化手法の妥当性が明らかとなった。

(2) 最適な磁極を有する磁気ダンパを試作し、減衰係数を実験的に求めた結果、目標値とよく一致し、磁極の最適形状の妥当性が明らかとなった。

(3) 無次元化減衰係数と長方形磁極の縦横の最適寸法比、ならびに、導体板と磁極の最適面積比との相互関係が明らかとなった。

最後に、本研究には舞鶴高専卒業研究生瀬戸桂氏の熱心な協力があつた。ここに記して感謝の意を表す。

文 献

- (1) Weinberger, M. R., *IEEE Trans. Aerosp. Electr. Syst.*, AES 13-2 (1977), 197.
- (2) Nikolajsen, J. L., ほか 2 名, *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 193 (1979), 331.
- (3) Schieber, D., *IEEE Trans.*, MAG 11-3 (1975), 948.
- (4) 長屋・小島, 機論, 47-424, C (1981), 1620.
- (5) 長屋・小島, 機論, 50-453, C (1984), 806.
- (6) 長屋, 文献(5)の 812 ページ.
- (7) 金森・石原, 機論, 54-502, C (1988), 1234.
- (8) 金森・石原, 機論, 56-527, C (1990), 1693.
- (9) 文献(8)の 1698 ページ.
- (10) 背戸, 機論, 56-525, C (1990), 1.
- (11) 加川・ほか 2 名, 電子通信学会論文誌, J 64-C-4 (1981), 223.