磁気ダンパの磁束密度変動と導体板の形状効果*

金 森 満^{*1}, 石 原 好 之^{*2}Fluctuation of Flux Density and Shape Effect
of Conductor Slab on Electromagnetic Damper

Mituru KANAMORI and Yoshiyuki ISHIHARA

The fluctuation of flux density and shape effect of conductor slab on an electromagnetic damper, which consists of rectangular magnetic poles and a conductor slab, are clarified by the finite element analysis and an experimentation. Firstly, we measured the flux density distribution near magnetic poles by the use of Hall elements, while the conductor slab vibrating in the magnetic field. The result verifies the numerical result in our first report. Secondly, attenuation coefficients were obtained under several dimensional ratios of conductor slab to magnetic pole, experimentally and numerically. The experimental result agreed well with the numerical result. Thirdly, a relation between conductor shape and eddy current distribution is also discussed numerically.

Key Words: Vibration, Electrical Engineering, Electromagnetic Damper, Finite Element Method, Eddy Current, Attenuation Coefficient

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、その応用研究が盛んに行われてきている^{(1)~(5)}。しかし、導体が磁場中を運動する際の磁束密度の変動に着目し、この現象を明らかにした研究は極めて少ない。著者らはすでに、長方形磁極と長方形導体板から成る基本的な受動形磁気ダンパを取り上げ、磁場振動の連成問題として取扱い、導体板に生じる渦電流が磁場に及ぼす影響を、有限要素法により定式化し、磁極付近の磁束密度の変動を解析し報告している⁽⁶⁾。この報告では、磁極端部にホール素子を挿入し、磁束密度の変動を実測し、解析結果を検証している。しかし、磁極端部一点のみしか実測しておらず、磁極付近の磁束密度分布の変動については、実験的に検討されておらず、現象を正確に把握するまでには至っていない。

導体板が無限に広いとした解析的研究は多く報告されているが、設計に重要な導体板の形状効果を検討した研究は少なく、長屋らによる報告のほかには見受けられない^{(7)~(9)}。しかし、これらの報告では、磁極端部の磁束密度の時間的変化の影響が考慮されておらず、実験的な検討もなされていない。また、導体板の形状が渦電流分布に及ぼす影響についても、詳細な検討がなされていない。

そこで本研究では、長方形磁極と長方形導体板から成る受動形磁気ダンパを取り上げ、磁極部の4箇所にホール素子を挿入し、磁場中を導体板が振動する場合の磁束密度分布の変動状態を実験的に明らかにし、解析結果の妥当性を確認した。また、磁束密度分布の変動の主要因とその対策について考察を加えた。さらに、導体板の縦および横方向の寸法を種々変えて実験ならびに数値解析を行い、導体板の形状が減衰係数に及ぼす影響を明らかにした。本実験は、長屋らの報告⁽⁷⁾を裏付ける意味においても、有意義であると思われる。さらに、導体板の形状が渦電流に及ぼす影響について、数値解析結果により検討を加えた。

2. 実 験 方 法

図1に磁気ダンパを示す。実験装置の詳細は文献

* 平成2年3月24日 関西支部第65期定時総会講演会において講演、原稿受付 平成元年1月23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通烏丸東入）。

(6)に示した。磁極付近の磁束密度分布の変動を実測するために、図2に示す磁極の4箇所にホール素子を挿入する。ホール素子は、旭化成電子(株)の薄形高感度(HW-302C, $2.35 \times 2.7 \times 0.95$ mm)のものを使用した。各ホール素子のホール電圧と磁束密度の関係を校正しておき、ホール電圧をA-D変換しコンピュータに取り込み、磁束密度を測定する。図3にこの自動計測システムを示す。本実験では、導体板に減衰自由振動を与えた場合の磁束密度分布の変動を実測した。初期変位として、下向きに5 mmを与えた。導体板には高さが130 mm、幅500 mm、厚み5 mmの銅板を用いた。

減衰係数は次のようにして実測した。加速度ピックアップをはりに取付け、振動波形をコンピュータに取り込む。その半サイクルごとの複振幅の比より、次式の関係を用いて減衰係数を求めた。

$$W_1/W_2 = W_2/W_3 = \dots W_i/W_{i+1} = \exp\{C\tau_d/4m\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで W_i は複振幅、 τ_d は周期、 m は本実験モデルを一自由度とみなした場合の等価質量を表している。複振幅 W_i を縦軸に W_{i+1} を横軸にとり、最小二乗法により直線の傾きを求め、平均的な複振幅の比を求めた。導体板としてアルミニウム板を用い、縦横の寸法を種々変えて実験を行い、導体板の形状が減衰係数に及ぼす影響を調べた。

3. 磁束密度分布の変動

図4に、導体板に減衰自由振動を与えたときの磁束密度変動の実験結果の一例を示す。実験値は平均値と

図1 磁気ダンパ

図2 ホール素子の挿入位置

図3 磁束密度の自動計測システム

の比で示している。図2においてホール素子につけた番号が、図4での番号と対応している。図4(a)は励磁電流が1 A、図4(b)は励磁電流が2 Aの場合である。励磁電流が増加すれば、磁束密度の変動率は減少することがわかる。また、励磁電流の増加に伴い、導体板の減衰が大きくなり、その結果、磁束密度変動の減衰も大きくなっている。磁極の端へいくほど磁束密度の変動が大きく、中央ほど小さい。また、磁極の上半分の変動の位相は等しく、下半分の位相も等しい。磁極の上部と下部では、変動の位相が 180° ずれていることがわかる。励磁電流が2 Aの場合の各サイクルのピーク時の磁束密度分布を図5に示す。図5から、磁束密度分布はほぼ直線的に変動し、導体板の振動が減衰するにつれて、磁束密度変動も減衰している様子がうかがえる。励磁電流を変化させた場合、また、導体板にアルミニウム板を用いた場合も、ほぼ同様の結果が得られた。文献(6)に、同様の条件で、磁場振動の連成を考慮し、有限要素法とルンゲ・クッタ法を併用して解析した結果を示した。両者を比較すると、磁極付近の磁束密度分布の変動状態が良く一致しており、解析手法の妥当性が確認できる。

磁束密度分布の変動要因を考察するために、導体板に生じる渦電流が励磁する磁束分布、いわゆる反作用磁界のみを解析し、その結果を図6(c)に示した。この解析では、図6(a)に示す渦電流分布の解析値を使

(a) 励磁電流 $I = 1.0$ A の場合

(b) 励磁電流 $I = 2.0$ A の場合

図4 磁束密度変動の実験結果(銅板使用)

用した。この反作用磁界の分布は図7に示すように、ほぼ直線的な分布となっている。図6(b)に導体板が静止しているときの磁束分布の解析結果を示す。図6(c)の等ポテンシャル線のポテンシャル幅は図6(b)のものに比し、約4%と小さい。導体板が振動しているときは、静的な磁界に反作用磁界が重ね合わさった分布になると考えられる。以上の結果より、磁束密度を変動させる主要因は、渦電流によって励磁される反作用磁界であることが明らかとなった。

本研究では、導体板は比較的低速で運動するため、反作用磁界は小さい。しかし、高速で運動する場合には、渦電流の増加に伴い、反作用磁界も大きくなると考えられる。反作用磁界が減衰係数に及ぼす影響は、その分布がほぼ直線的に変動することから、磁極部の磁束密度の増加分と減少分がほぼ同じとなり、その結果、減衰係数に及ぼす影響は小さくなると考えられる。しかし、磁束密度変動が増加すれば、磁性材料の磁化特性の非線形性に伴う磁気飽和により、磁束密度の増加分が減少し、その結果、減衰係数を低下させると考えられる。反作用磁界を低減する方法の一つに、けい素鋼板を、導体板の運動方向の直角平面内で積層することが考えられる。このようにすれば、磁極部分の磁気抵抗が増加するため、渦電流が誘起する磁界を減

小さえることができると考えられる。

4. 導体板の形状効果

図8に、導体板と磁極の寸法比に対する減衰係数の変化を示す。導体板の寸法が変化した場合の渦電流分布の計算結果を図9に示す。有限要素法による定式化ならびに解析手法は文献(6)に示した。図8の実験値と計算値はほぼ一致しているが、寸法比 b/β が2以下のところで、両者の差が大きい。この原因として、図9(a)からわかるように、寸法比 b/β が減少するにしたがって、フリンジング磁束で生じる渦電流と、減衰に寄与する渦電流の方向が逆になり、互いに打ち消し合う渦電流が増加すること、また、導体板の振動変位により、磁極位置の非対称性が、寸法比 b/β の減少に伴い大きくなり、その結果抵抗が増加し渦電流が減少することが考えられる。図8から、減衰係数が急激に減少し始める寸法比は、 b/β が約3、 a/α が約2である。この結果は、振動方向の寸法比をより大きくする必要があることを示している。長屋らは、シンプレックス法により検討した導体板の最適形状は、運動方向に、より長くなることを報告している。本実験結果は、この報告を裏付けるに十分と思われる。また、寸法比 a/α を3付近より増加しても、減衰係数はほぼ一定で

図5 磁束密度分布の変動の実験結果（銅板使用、励磁電流 $I=2.0$ A）

図6 有限要素法による数値解析結果

図7 磁極部における反作用磁界の分布

あることがわかる。

図9(c)と図9(b)を比較すれば、寸法比 a/α が減少することにより、磁極内の渦電流の方向変化が増加している。図10には、減衰力に寄与する渦電流の Z 方向成分の分布を、磁極中心線から Z 方向への距離をパラメータとして示した。以上の結果より寸法比 a/α の減少は、渦電流の減少よりむしろ、磁極内の渦電流の方向変化を増加させ、その結果減衰に寄与する渦電流成分が減少し、減衰係数を低下させることがわかる。図9(c)と図9(a)を比較すれば、磁極内の渦電流の方向変化は見受けられない。図11に、寸法比 b/β を変化させた場合の、磁極中心付近の渦電流分布を示す。これらの結果より、寸法比 b/β の減少は、磁極上下の渦電流路の幅の減少に伴う抵抗増加により渦電流を減少させ、その結果減衰係数を低下させることがわかる。

図8 導体板と磁極の寸法比に対する減衰係数の変化 (アルミニウム板使用)

図9 導体板形状の変化に対する渦電流分布の変化

5. 結 言

長方形磁極と長方形導体板からなる受動形磁気ダンパに関して、導体板が磁場中を振動する際の、磁極付近の磁束密度分布の変動、ならびに、導体板の形状が減衰係数に及ぼす影響を明らかにした。得られた結論を要約すると、次のとおりである。

- (1) 磁極付近の磁束密度分布は、導体板の振動方向の磁極端で最大となるように、ほぼ直線的に変動する。
- (2) 磁束密度分布の変動の主要因は、導体板に生じる渦電流が励磁する反作用磁界である。
- (3) 振動方向の導体板と磁極の寸法比の減少は、

図10 減衰力に寄与する渦電流成分の分布 (計算結果)

図11 b/β の変化に対する渦電流分布の変化 (計算結果)

抵抗を増加させ、渦電流を減少させる。振動方向に直角方向の寸法比の減少は、渦電流の減少よりむしろ、渦電流の方向変化に大きく影響を与え、その結果減衰係数を低下させる。

(4) 導体板と磁極の寸法比が3付近以下になると、減衰係数は減少する。

最後に、本研究には舞鶴高専昭和62年度卒業研究生 橋根弘典氏、奥田博治氏の熱心な協力があつた。ここに感謝の意を表す。なお、本研究の解析は、京都大学大型計算機を利用したことを付記する。

文 献

- (1) 小島, 潤滑, **28-3** (1983), 177.
- (2) Hagiwara, T., *Bull. Earthqu. Res. Inst.*, **12** (1934), 482.
- (3) 背戸・山之内, 機論, **44-378** (1977), 542.
- (4) 小島・山川, 精密機械, **46** (1980), 1395.
- (5) Weinberger, M. R., *IEEE Trans. Aerosp. Electr. Syst.*, **AES-13-2** (1977), 197.
- (6) 金森・石原, 機論, **54-502, C** (1988), 1234.
- (7) 長屋・小島, 機論, **47-424, C** (1981), 1620.
- (8) 長屋・小島, 機論, **50-453, C** (1984), 806.
- (9) 長屋・小島, 機論, **50-453, C** (1984), 812.