

学術論文

アンペール力を付加した交流誘導浮上方式の諸特性評価

Evaluation of characteristics of a new maglev method by adding ampere force to ac induction type system

大路 貴久^{*1}(正員), 佐藤 正章^{*1}, 飴井 賢治^{*1}(正員), 作井 正昭^{*1}

Takahisa OHJI(Mem.), Masaaki SATO, Kenji AMEI(Mem.), Masaaki SAKUI

This paper examines each relation between levitation force and phase difference, gap distance, plate temperature, and electric power in a new maglev method. The proposed method can generate not only the conventional induction force but ampere force. It was verified that the levitation force exist as passive force with the change of the air gap in the vertical direction. In the conventional ac induction type maglev and the proposed method, surface temperature of an aluminum plate and input power of each electromagnet were compared under the same levitation force. As a result, it was clarified experimentally that the proposed method is more advantageous about a heat problem of the plate.

Keywords: magnetic levitation, induction type, eddy current, non-magnetic thin plate, ampere force.

1 はじめに

反発力を利用する磁気浮上方式(反発式)の一つに誘導浮上式がある。誘導浮上式の特徴の一つとして、二つの物体間に働く力のうち、互いの物体が対向する方向(ギャップ方向)に受動的な力が発生する点が挙げられる。この受動的な力が安定であれば、基本的には能動制御は不要であり、その分メカニカルクリアランスは十分確保する必要がある。別の特徴として振動減衰が小さい点があり、誘導浮上式でも吸引式のように浮上体を能動制御し減衰力を付加する例もある[1]。

発生する力の特徴とともに、渦電流に伴うジュール熱が発生するのも大きな特徴である。誘導浮上式には、物体の相対運動による誘導浮上と交流磁場を利用した誘導浮上の2種類が存在し、前者は、JR マグレブに代表される大型輸送・搬送システム[2]、後者は、アルミニウム等の非磁性金属薄板の搬送[3]や電磁浮遊炉[4]などの適用例がある。可動子側が起磁力源となる前者の場合、固定子側の導体(レール)で生じる熱は十分に伝導し拡散する。しかし、固定子側が起磁力源となる後者の場合、浮上体の体積が制限されるため熱容量が小さく浮上体の温度上昇が問題となる。電磁浮遊炉のように浮上体に発生する熱自体を利用すれば問題は無いが、金属薄板の搬送では、長時間稼働時には浮上力の低下を引き起こすため、冷却のための間欠運転な

ど工夫が必要である。

筆者らは、交流誘導浮上式による非磁性金属薄板の熱上昇を軽減しながら浮上力を高める方法として、ローレンツ力を利用した浮上力増大法を提案している[5]。これは、通常の交流誘導浮上式における電磁石配置に対し、別電源で励磁された交流電磁石を追加することで、導体中の渦電流が誘導反発力の発生に寄与するだけでなく、二次的な浮上力の発生にも寄与し、同程度の渦電流でも浮上力を増大させることができる方法である。この方式に対し、電源からの入力電圧の位相差に対する浮上力特性や、励磁周波数・金属薄板の厚さと浮上力との関係について報告した[6,7]。

本稿では、提案した浮上力増大法に対し、力に関する特性として、各電磁石への入力電流の位相差と浮上力の関係や、浮上力の受動支持性について調査する。また、熱に関する特性として、従来の交流誘導浮上方式と提案する浮上方式での熱の発生状況を比較し提案方式の有効性を実験的に確認する。(以降、「ローレンツ力」は電場中で荷電粒子が受ける力の意を含むため、本稿では外部磁場と電流による力に限定し「アンペール力」と表記する。)

2 浮上力発生原理と実験装置

まず、交流誘導浮上方式における従来方式と提案方式の浮上原理について述べる。Fig.1は本方式の浮上力発生原理を示す概念図である。従来の交流誘導浮上式は、図中点線部内の交流電磁石(EM1)を非磁性金属薄板の下部に配置した構成である。交流電磁石による

連絡先: 大路 貴久, 〒930-8555 富山市五福 3190,
富山大学大学院理工学研究所,
ohji@eng.u-toyama.ac.jp

^{*1}富山大学

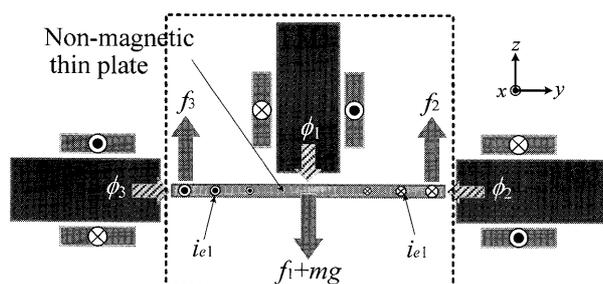


Fig. 1 Principle of generation of ac ampere force.

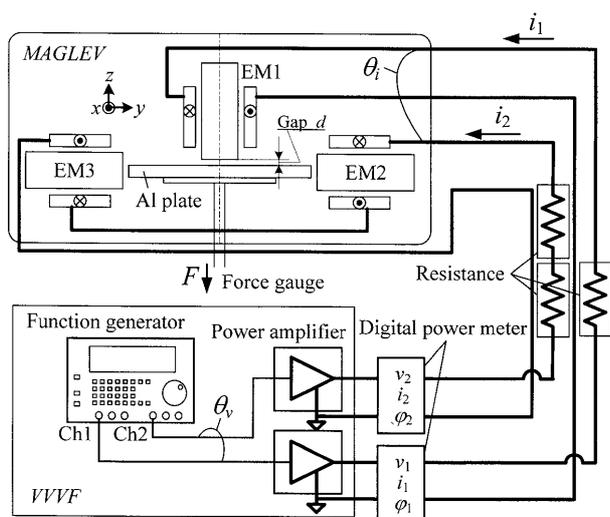


Fig. 2 Experimental setup to measure levitation force.

交番磁界によって薄板内に渦電流 (i_{e1}) が誘起され、電磁石と薄板との間に誘導反発力が発生する。提案する方法は、EM1 を交流励磁することで生じた渦電流に対し、その流路を考慮して薄板の側部に交流電磁石 (EM2, EM3) を配置するものである。EM2 と EM3 を直列接続し、EM1 と同一周波数で励磁することで、渦電流 i_{e1} と磁束 ϕ (ϕ_3) の外積によって交流的にふるまうアンペール力が発生する。このとき、従来方式の誘導反発力とアンペール力との和に相当する浮上力 (全浮上力) が発生することになる。

Fig. 2 は浮上力測定時の実験装置部、電源部と結線図である。装置部は正面図を示しており、奥行き方向に U 字形を成す 3 個の交流電磁石 EM1, EM2, EM3 が配置されている。各電磁石の寸法、仕様はほぼ同一である。EM1 と EM2, 3 は別電源で励磁し、EM2 と EM3 は直列接続し、さらに電磁石 1 個あたりのインピーダンスが同一となるように電力用抵抗を直列に挿入している。電源部は 2ch 出力が可能な信号発生器 (WF 1946A) からの正弦波信号を電力増幅することで全体

Table 1 Specifications.

Al plate dimensions	240 mm × 70 mm × 1 mm
Coil	0.9 ϕ mm, 180 turns
Resistance	1.44 Ω
Inductance	11.7 mH
Cross section of U-shape core	20 mm × 20 mm
All air-gaps between Al plate and each EM	2 mm
RMS value of exciting current	$i_1=2.0$ A, $i_2=i_3=4.0$ A(default)
Excitation frequency	60 Hz(default)

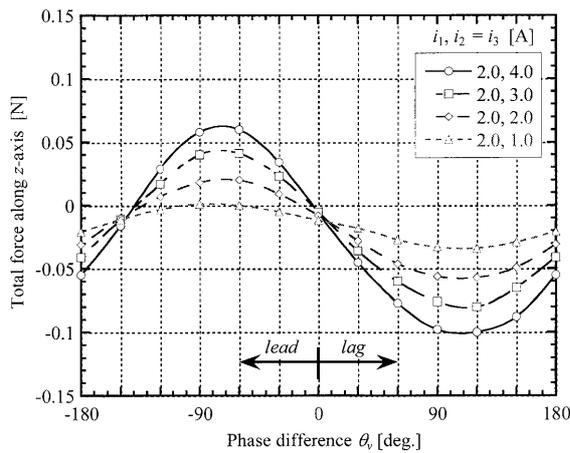
として VVVF 電源を構成しており、励磁周波数、電圧振幅、電圧位相を調整する。各回路中にはデジタルパワーメータ (WT200) を挿入し、電圧、電流 (ともに実効値)、電流位相等を測定する。Al 薄板は、 y - z 面内では Fig. 2 のように 3 個の電磁石の中央で、奥行き方向は薄板の重心が EM1 の 2 箇所磁極の中央となるように配置し、デジタルフォースゲージ (DPS-05) で自重を除いた力を測定する。実験装置の寸法や素子値等は Table 1 に示した。

3 浮上力特性

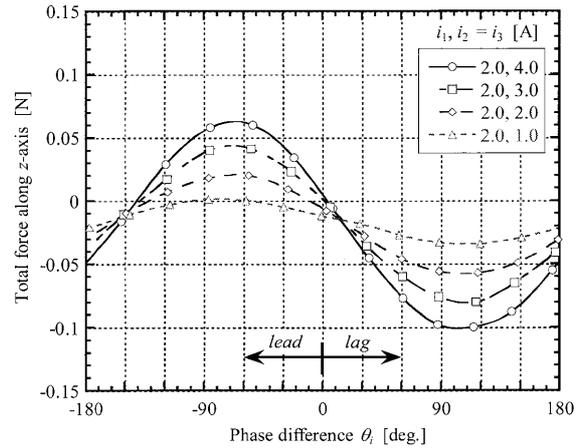
3.1 浮上力と位相変化

EM1 の両端の電圧 v_1 に対する EM2, 3 の両端の電圧 v_2 の位相差を θ_v [deg.] とし、この電圧位相差に対する浮上力特性を Fig. 3 に示した。Fig. 3(a) は側部電磁石の電流振幅を変化させた場合、Fig. 3(b) は励磁周波数を変化させた場合のそれぞれ全浮上力の変化を示している。Fig. 3(a) より EM2 の電流増加に対し全浮上力が線形増加しており、アンペール力の傾向を示している。Fig. 3(b) より周波数の上昇に対し、同様に全浮上力が増加するが、金属薄板での渦電流も同時に増加するため、この場合は誘導反発力とアンペール力の双方の増加となる [6]。Fig. 3 の浮上力特性において、 $+z$ 方向 (上向き) の力が発生する励磁位相条件が存在している。従来の交流誘導浮上方式では、反発力を利用するため交流電磁石を薄板の下方に配置する必要があるが、本方式は Fig. 2 のような電磁石配置でも浮上力が生じるという特徴がある。また、位相調整により $-z$ 方向にも強い力を発生させることができ、従来の交流誘導浮上方式での誘導反発力を補う力として利用できる。

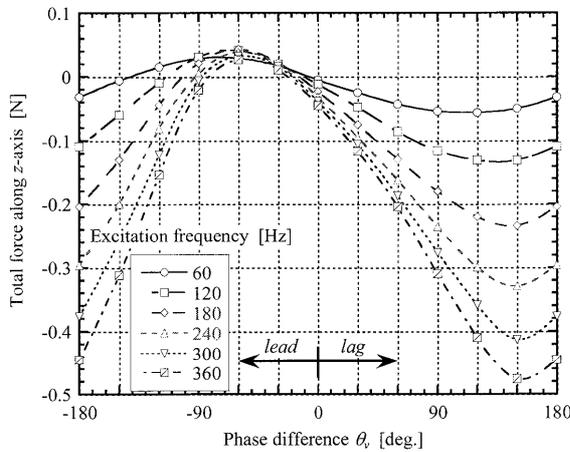
しかし Fig. 3 は横軸の電圧位相差に対し、全浮上力が正弦波分布しておらず、特に周波数変化時 (Fig. 3(b)) で顕著なずれが生じるのがわかる。そこで電圧位相差



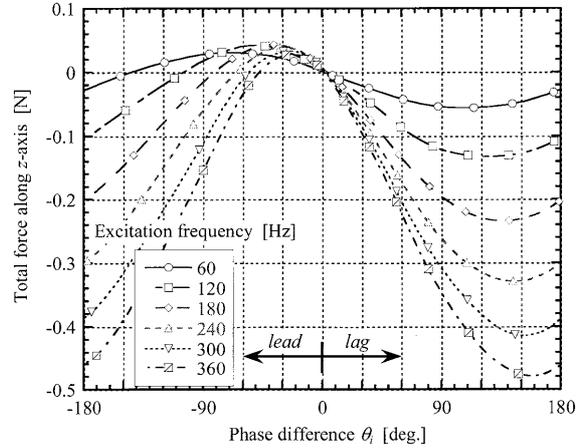
(a) Amplitude change



(a) Amplitude change



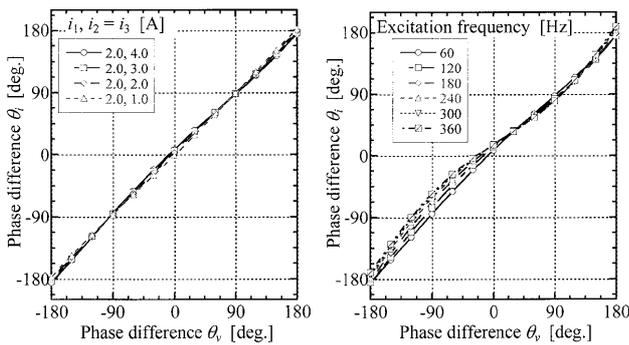
(b) Frequency change



(b) Frequency change

Fig. 3 Characteristics of total levitation force vs. voltage phase difference.

Fig. 5 Characteristics of total levitation force vs. current phase difference.



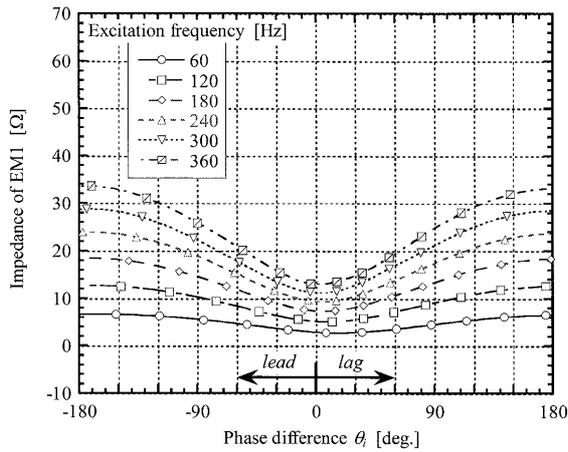
(a) Amp. change (b) Freq. change

Fig. 4 Relationship between voltage phase difference and current phase difference.

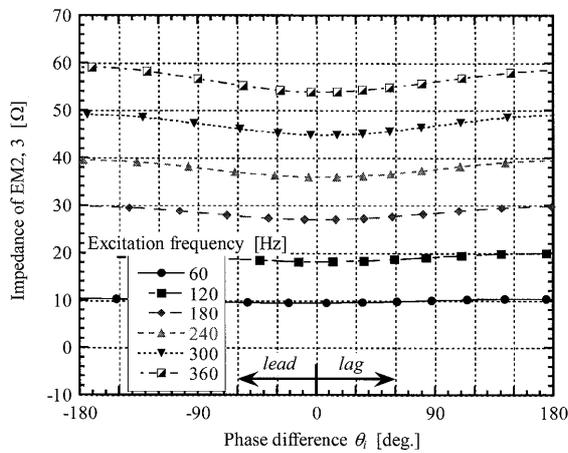
θ_v と電流位相差 (EM1 の電流 i_1 に対するEM2,3 の電流 i_2 の位相差) θ_i [deg.]の関係を調べ (Fig. 4), この結果をもとにFig. 3の横軸を電流位相差 θ_i に換算して浮上力特性を導出した。結果をFig. 5に示す。Fig. 3(b)で周

波数上昇時に発生していた電圧位相差に対する歪みが Fig. 5(b)において解消され, 例えば 360Hz時で+z方向に全浮上力が最大となる電圧位相差が-60deg.付近であったのに対し, 電流位相差で-20deg.付近に変更される。なお周波数変化時で全浮上力の最大値, 最小値が右側にシフトするのは金属薄板のリアクタンスが上昇するためである[7]。

電流位相差に換算し正弦波分布を得た浮上力特性であるが, その際に使用した Fig. 4での位相差のずれの原因を明確にするために, 各回路の電磁石両端のインピーダンスを調べた。Fig. 6(a)は周波数変化時の電流位相差に対する EM1 両端のインピーダンス変化, Fig. 6(b)は EM2 から EM3 までのインピーダンス変化である。周波数の上昇に伴い, 電流位相差が ± 180 deg.のとき最もインピーダンスが増加する。これは, EM1 と EM2,3 の両磁束が同期し, 電磁石間で互いに磁路を共



(a) EM1



(b) EM2 and EM3

Fig. 6 Inter-terminal impedance.

有するためである。各インピーダンスの抵抗成分、自己インダクタンス成分が一定であることをふまえると、相互インダクタンス成分が電流位相差によって変化したと考えられ、相互リアクタンスとして Fig. 4(b)のように周波数上昇時に顕著に現れたものと考えられる。

3.2 浮上力の受動支持性

従来の交流誘導浮上方式は、浮上方向に誘導反発力が生じ受動的な力（ギャップの変化に対して元の位置に戻ろうとする力）となる。提案方式に対しても浮上力と浮上ギャップの関係について調べた。電流 $i_1=2.0A$, $i_2=4.0A$, 励磁周波数 60Hz, 板厚 1mm, 側部電磁石とAl薄板の距離を 2mm一定とし、浮上方向のギャップ $d[mm]$ を変化させたときの浮上力特性をFig. 7に示す。Fig. 7の横軸は電圧位相差、縦軸は全浮上力を表す。図より、ギャップの増加に伴い全浮上力が+z方向に増

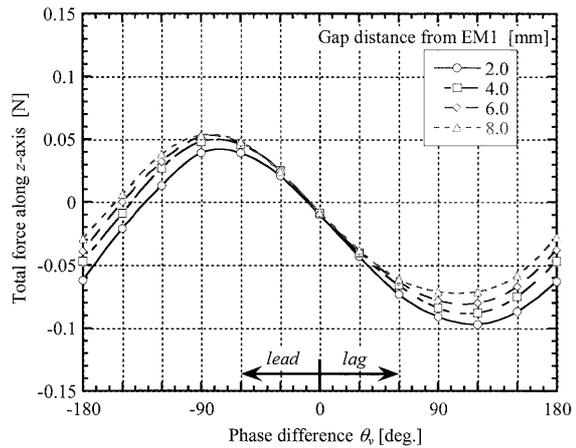


Fig. 7 Characteristics of total levitation force vs. phase difference with the change of gap distance.

加するのが確認でき、従来方式のように受動支持力となることがわかる。これは誘導反発力がギャップの2乗に反比例するのに対し、アンペール力は誘導電流に比例し、全体として誘導反発力の受動性が優位となるためである。Fig. 2の電磁石配置で+z方向に全浮上力が発生する位相差 ($\theta = -75deg$.付近)でも受動的な力となる特徴がある。

4 薄板の温度上昇

交流誘導浮上方式の問題として、連続運転時の金属薄板の熱上昇が挙げられる。提案方式は薄板内部の渦電流を利用しアンペール力を発生させるため、同一の全浮上力を得る場合、理論上、熱上昇は軽減される。ここでは実際に従来の誘導反発方式と提案方式でのAl薄板の温度上昇を測定し評価する。Fig. 8に温度測

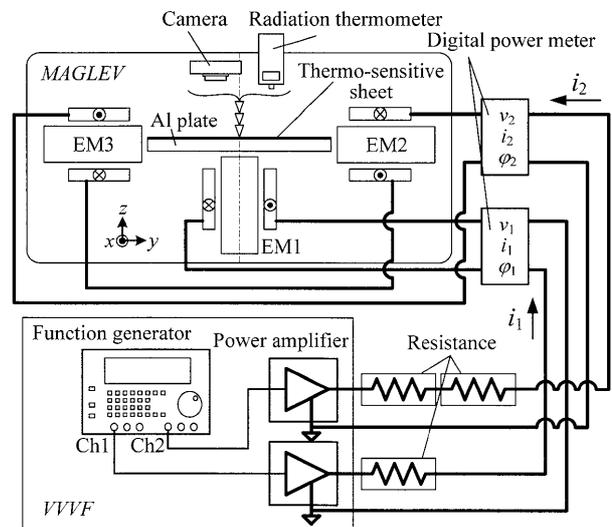


Fig. 8 Experimental setup to verify thermal state.

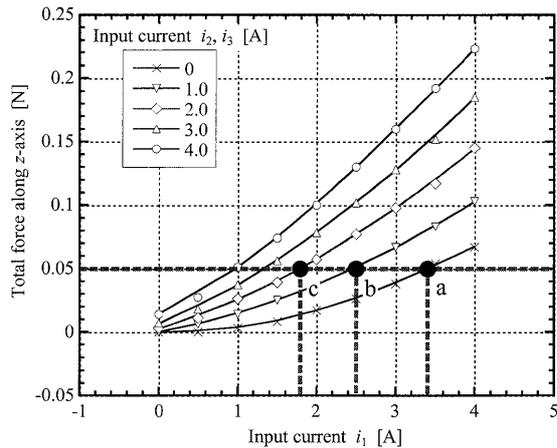


Fig. 9 Characteristics of total levitation force.

定時の実験装置部, 電源部, 結線図を示す。実験装置部においてEM1をAl薄板下部に配置し, Al薄板と各電磁石とのギャップを2mmに設定する。薄板上面には液晶感温シートを貼付し, 熱の発生と伝導の様子を動画撮影するとともに, 薄板の重心付近の表面温度を放射温度計(IT2-85)で測定した。なお, 電源部と結線は浮上力測定時と同一であり, 実験毎に室温, Al薄板温度を初期状態に調整し実験を行った。

従来方式と提案方式の比較を行うために, Fig. 9の浮上力特性を利用する。Fig. 9はFig. 5(a)の-z方向の力が最大となる105deg.での浮上力特性であり, Fig. 8の電磁石配置および座標軸では, +z方向の浮上力が最大となる条件である。図中a-c点は浮上力が0.05Nで一致するときのEM1-3の電流振幅を選定した点であり, それぞれ, a) $i_1=3.4A, i_2=i_3=0A$, b) $i_1=2.5A, i_2=i_3=1.0A$, c) $i_1=1.8A, i_2=i_3=2.0A$ となっている。従って, 側部電

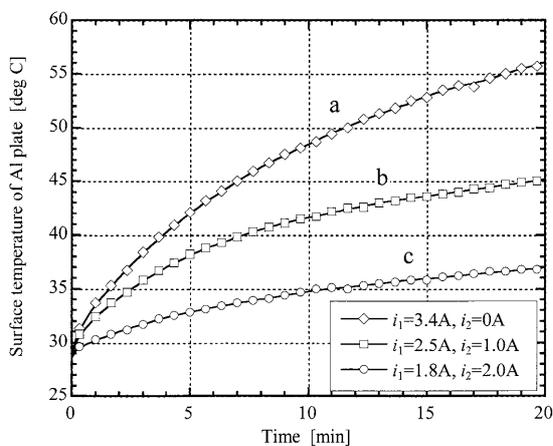


Fig.10 Comparison of the surface temperature of Al plate.

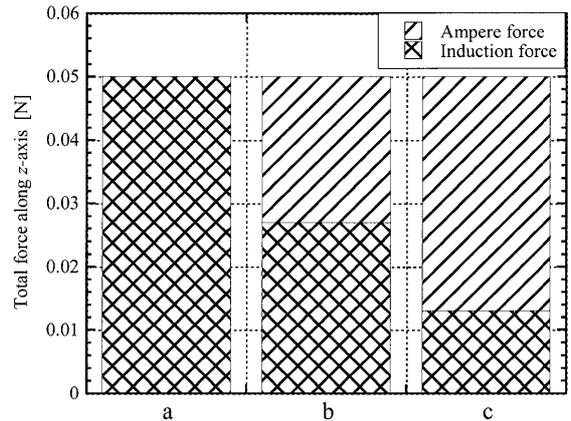


Fig. 11 Detailed levitation force.

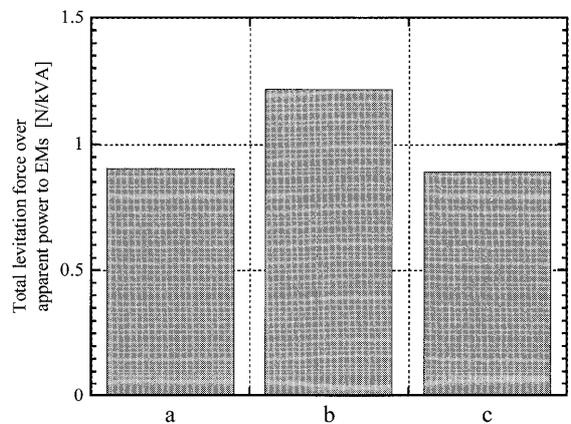


Fig. 12 Levitation force over apparent power to EMs.

磁石を励磁しない条件aを従来方式, 条件b, cを提案方式として比較する。なお励磁周波数は60Hzである。

Fig. 10はAl薄板の温度上昇の比較である。同一の浮上力を発生させる3通りの電流条件で励磁し20分間の連続運転での結果である。これより従来方式が最も加熱されており(条件a: +28.1°C), また提案方式でもEM1の電流値が小さいほど温度上昇が小さく(条件b: +17.2°C, 条件c: +9.0°C), 提案方式がAl薄板の温度上昇を抑えながら浮上力のみを増加させることを示している。

Fig. 11として, 条件a-cに発生する浮上力0.05Nの内訳を示す。また, Fig. 12は回路の電磁石に供給される皮相電力(実効入力電力と呼ぶことにする)と浮上力の比を示した。Fig. 11より, 条件b, cはともに誘導反発力とアンペール力が発生するが, アンペール力の割合は条件bで46%, 条件cで74%となりアンペール力を利用することで温度上昇は抑えられる。しかしながら, 実効入力電力対浮上力比は, 条件bが1.22N/kVAで最大となる。つまりEM1およびEM2, 3の電流値を

調整することで実効入力電力が最小となる状態が存在し、金属薄板の熱上昇の問題を優先する場合と、実効入力電力を優先する場合の励磁条件が異なることを意味する。

5 まとめ

交流的にふるまうアンペール力を利用した新しい交流誘導浮上方式に対し、浮上力と位相の関係、浮上力と熱、電力の関係について議論した。

全浮上力と電圧位相差の関係が正弦波状から僅かに歪むことに着目し、電圧位相差と電流位相差の関係を調べ、電流位相差に対する全浮上力として補正することで、この補正分が励磁電流の位相差によって変動する相互インダクタンスの影響であることを示唆した。また本方式で発生する浮上力が受動的な力となることを実証した。薄板の温度上昇については、同一浮上力を得る条件で提案方式のほうが温度上昇が小さく、実験的にも本方式が有効であることを示した。また、同一浮上力を得るための励磁電流について、薄板の熱上昇の抑制を優先する場合と実効入力電力の低減を優先する場合では設定条件が異なることを示した。

(2007年11月23日受付, 2008年3月19日再受付)

参考文献

- [1] 永井, 森, 中代, 誘導反発形磁気浮上システムのアクティブ振動制御, 日本機械学会論文集 C, Vol. 58, No. 556, pp. 33-38, 1992.
- [2] 高橋, 超電導磁気浮上式鉄道(JR-Maglev), 日本 AEM 学会誌, Vol. 13, No. 1, pp. 3-6, 2005.
- [3] 川田, 森井, 中島, 金子, 山田, 誘導反発原理による磁気浮上搬送の試み, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD-91-105, pp. 69-77, 1991.
- [4] E. Westphal, A. Muimieks, A. Miihlbauer, Electromagnetic field distribution in an induction furnace with cold crucible, IEEE Trans. Magn., Vol. 32, No. 3, 1996.
- [5] 大路, 新海, 飴井, 作井, 非磁性金属薄板に対する浮上力発生試験, 平成 17 年電気学会産業応用部門大会, pp. III-279-III-280, 2005.
- [6] 大路, 佐藤, 飴井, 作井, 交流ローレンツ力を用いた導体内部渦電流の力変換法とその効果, 電気学会リニアドライブ半導体電力変換合同研究会, LD-05-86, SPC-05-129, pp. 37-42, 2005.
- [7] 大路, 佐藤, 飴井, 作井, 非磁性金属薄板の内部渦電流に対する交流アンペール力発生法と誘導反発式磁気浮上への効果, 電気学会論文誌 D, Vol.128, No.3, pp.236-243, 2008.