

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月31日現在

機関番号：13201

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2009～2011

課題番号：21686070

研究課題名（和文） 薄板生産工程に導入可能な交流磁界・パルス磁界型アンペール力
磁気浮上システムの開発研究課題名（英文） Development of alternating/pulsed magnetic field type ampere force
magnetic levitation system applicable in plate production process

研究代表者

大路 貴久 (OHJI TAKAHISA)

富山大学・大学院理工学研究部・准教授

研究者番号：30334709

研究成果の概要（和文）：

非磁性金属薄板の高品質化・高生産性のための新技術として、交流アンペール力を用いた非接触磁気浮上搬送装置を製作し性能を評価した。非接触で支持された薄板での熱上昇を抑えながら、浮上力を増補することを実証した。さらに、薄板に対し浮上力・案内力・アンペール力・搬送力の全てが付与できることを証明した。これに並行して、瞬間的なアンペール力を利用したスタック薄板の電磁分離試験を実施した。急減する磁界によって薄板内部に生じる渦電流に対してもアンペール力が効果的に付与できることを示した。

研究成果の概要（英文）：

As innovative technology for improving quality and productivity of nonmagnetic thin plates, an alternating ampere force type magnetic levitation and conveyance system was fabricated and evaluated. It was experimentally proven that the system increased levitation force while suppressing eddy currents inside a magnetically levitated thin plate and reducing heat loss. Furthermore, it was verified that propulsion force was given simultaneously with levitation, guidance, and ampere force to the plate. In parallel with that, electromagnetic separation tests of stacked plates utilizing the transient ampere force were carried out. As a result, it was found that the ampere force was effectively added to the transient eddy current induced in a thin plate by movement of permanent magnets.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	9,400,000	2,820,000	12,220,000
2010年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2011年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
年度			
年度			
総計	20,500,000	6,150,000	26,650,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・金属生産工学

キーワード：磁気浮上、アンペール力、非磁性金属薄板、交流磁界、パルス磁界、渦電流、誘導反発、浮上搬送、磁気分離、有限要素解析

1. 研究開始当初の背景

磁気浮上技術の一つとして、交流誘導反発式がある。これはアルミニウム等の非磁性金

属薄板を受動的に安定浮上させる方式として1960年代から現在まで研究されてきた。交流誘導反発式は、金属薄板に面方向から鎖

交させる主磁束と金属薄板に誘起される渦電流による副磁束によって反発力が生成される。この際に生じる渦電流は、薄板内でのジュール損を生み出し、薄板の熱上昇とともに浮上力を著しく悪化させるという問題点があった。

この問題点を解消し薄板の熱上昇を抑えながら浮上力を高める方式として研究代表者は交流アンペール式を2007年に提案した。交流アンペール式は交流誘導反発式によって生じる薄板内の渦電流分布に着目し、薄板の側部から同一周波数かつ90度位相遅れとなる磁束を印加することで、交流的に変化するアンペール力を発生させる方式である。この交流アンペール式を利用すれば、浮上対象となる金属薄板に熱的影響を緩和しながら長時間、長距離の非接触搬送が可能となり、今後も需要増大が見込まれるアルミニウム合金やマグネシウム合金等の軽金属薄板に対し、その生産ラインに導入可能なシステムを提供できる。

一方、交流アンペール式の原理に立ち返ると、金属薄板に発生する渦電流に同調するように外部磁束を印加すればアンペール力が得られることから、瞬間的に発生する渦電流に対しても、外部磁界を適切に与えれば瞬間的なアンペール力が生成できる。この原理を利用すれば、薄板生産工程の初段部分に積み上げられた非磁性金属薄板の1枚ごとの分離に適用可能性がある。

以上のように、金属薄板製品のさらなる高品質化や高生産性のための新技術が必要であり、研究代表者の提案するアンペール力発生原理に基づく新装置の開発と生産工程への適用可能性を調査すべき状況にあった。

2. 研究の目的

本研究は、非磁性金属薄板の生産工程において薄板製品の品質化や高生産性を実現するための2つのシステム（非接触浮上搬送システム、スタック薄板分離システム）を開発し、装置設計、実験評価を行うことで、生産工程への導入可能性を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

非磁性金属薄板の生産工程に適用する2つのシステム（薄板の非接触浮上搬送、スタック薄板分離）について、研究代表者が提案する原理に基づいた装置設計、製作を行うとともに、実機運転により原理の検証と性能評価を行う。具体的には、非接触浮上搬送では、非磁性金属薄板の形状と磁極配置、極性パ

ーンと渦電流経路、力率改善による省電力運転、熱上昇度評価、浮上搬送について、従来方式（交流誘導反発式）と比較しながら研究を行う。また、スタック薄板分離については、正方薄板に対する最適な磁石配置の導出、一定加速時の浮上高測定、薄板加振による分離試験を実施した。

4. 研究成果

(1) 薄板の非接触浮上搬送システム

① 非磁性金属薄板の形状と磁極配置

従来方式（交流誘導反発式）では、浮上・案内の同時安定を得るために、浮上体を十字薄板とする方法が取られた。しかし薄板製品の場合、形状の制限があり方形薄板が主である。このとき浮上力・案内力・アンペール力が付与できる固定子構造について図1を考案した。楕状4極のレール4本を格子状に組み合わせた下部固定子（浮上力用電磁石 EM1、案内力用電磁石 EM2）と、その外側に配置された固定子（アンペール力用電磁石 EM3）で1ユニットを構成する。なおユニットは計6個製作しており搬送方向に連結可能である。

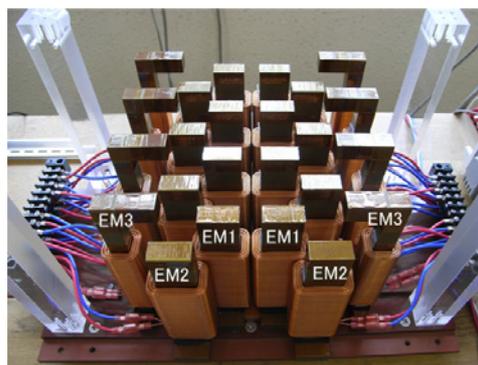


図1 磁気浮上搬送装置（1ユニット）

② 極性パターンと渦電流経路

多数の励磁パターンの中から十分な浮上力が得られる3種類の極性パターンを用意し、浮上高および浮上・案内安定性について実験的に評価した。EM3を開放した場合を従来方式、EM3を励磁した場合を提案方式とすると、EM3を1.5Aで励磁することで約1mmの浮上高増加を確認した。使用薄板はアルミニウムA1050（180mm×120mm×2mm）である。一方、浮上支持剛性は両方式に大差なく最大約300N/mであった。また選定した極性パターンに対し、装置全体をモデル化したFEM解析により薄板内の渦電流経路を可視化した。薄板側面での渦電流分布に沿ってEM3を適切に励磁することでアンペール力を効果的に付与できることを確認した。

③ 力率改善による省電力運転

電源側からみた本システム全体のインピーダンスは強い誘導性であるため、可変容量バンクを作製し力率改善を図った(図2)。さらに入力電圧と入力電流の関係を詳細に調べた結果、極性パターンの違いやコンデンサ設定値の違いによって鉄共振現象を生じる条件が存在し、これが省電力運転に貢献することを見出した(図3)。一方、鉄共振突入時の急峻な電流増加・減少は、薄板の挙動に影響を及ぼすことから改善の必要があった。そこで二値容量切替による薄板の浮上運転を実施し、スムーズな浮上始動・停止特性と省電力運転(95VA)の両方を実現した(図4)。

④ 熱上昇度評価

従来方式と提案方式の両方で、薄板の初期浮上高を一致(6mm)させた際の浮上高の経時変化を測定した。その結果、提案方式のほうが浮上高の低下が抑制されることを確認した。さらに同条件で薄板の発熱分布をサーモグラフィで測定し(初期温度:20度)、提案

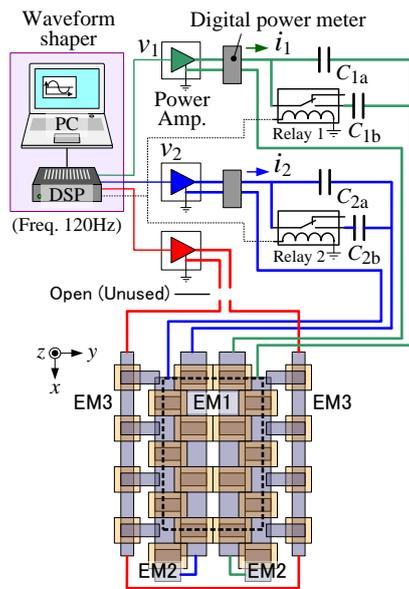


図2 回路図(容量切替と力率改善回路)

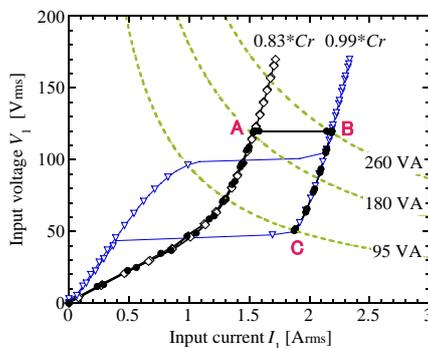


図3 鉄共振現象と省電力運転

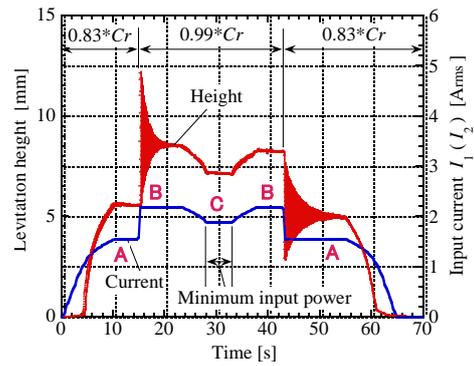


図4 容量切替と浮上実験

方式で熱上昇が抑制される(従来方式:0.33度/sec, 提案方式:0.27度/sec)ことを確認した。以上より、提案方式のほうが連続搬送により適した方式であることが示された。

⑤ 浮上搬送

薄板の連続搬送を確認するために、図1のユニットを2台連結することで軌道を延長し、さらに搬送磁界用コイルをEM1の鉄心に設置し80Hzでインバータ駆動して浮上搬送実験を行った。搬送方向には薄板を安定浮上させる復元力が存在し、搬送を妨げる力となる。EM1~EM3のみを励磁した際の復元力と、搬送磁界用コイルのみを励磁した際の搬送力から搬送可能条件を導出し、その条件を満たす省電力設定時において、約0.6m/secでの浮上搬送を実現した。以上より本システムにおいて浮上力・案内力・アンペール力・搬送力の全てが付与できることを証明した。

交流アンペール式における理論上の優位性を実験的に確認したことで、提案したユニット構成が生産ラインに導入してもその効果を発揮することが明示された。

(2) スタック薄板分離技術

① 磁石配置と浮上高測定

急減する磁界を利用し薄板を瞬間的に浮上させる試験装置を製作した(図5)。アルミニウム正方薄板(100×100×1mm)の上方に永久磁石を配置し、最大浮上高が得られる最適な磁石配置を実験的に導出した。その結果、上方には30mm×10mm×10mmの永久磁石をx方向に15mm間隔で3本配置し、前方には10mm×10mm×10mmの永久磁石を15mm間隔で3個配置するときが最良となった。本実験から渦電流の極大値が得られる最適距離が存在することが分かった。さらに薄板前方の永久磁石の有無による比較を行い、瞬間的に誘起される渦電流に対してアンペール力が付与できるか調査した。その結果、一定加

速度のもとで約 1.32 倍の浮上高が確認され、薄板を瞬間的に持ち上げる力を増大できることを示した (図 6)。

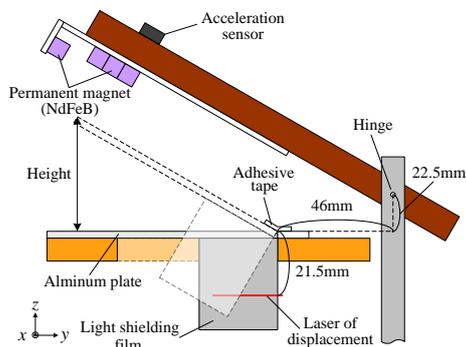


図 5 アルミ薄板浮上試験装置

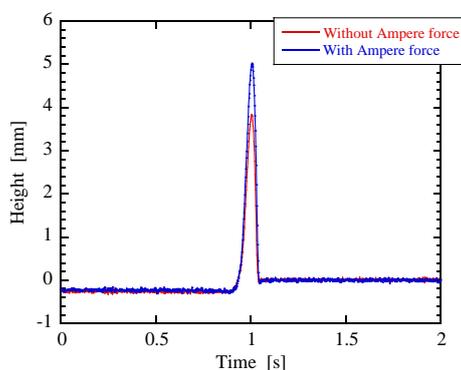


図 6 薄板前方永久磁石の効果

② 薄板加振による分離試験

最適磁石配置での空きスペースを利用して複数枚の薄板から 1 枚のみを引き剥がすための振動分離実験を実施した。具体的には、FEM 解析で得られた薄板の固有振動数と薄板 1 枚分の表皮深さを考慮した周波数 (1.5kHz) で、永久磁石の周囲に配置した交流電磁石コイルを励磁して分離可能性を調査した。永久磁石とコイル励磁による薄板の振動は確認できた。しかしながら、図 5 の機構に設置し前述同様の浮上高測定を実施した結果、薄板 1 枚のみの引き剥がしは実現出来なかった。薄板の振動と直流磁場急減による吸引力を組み合わせた瞬間的な剥離力の生成について今後も追究する予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① T. Ohji, Z. Miao, K. Matsushima, K. Amei, M. Sakui, Improvement of operating state by switching phase-advanced capacitors to an ac ampere type linear

magnetic levitation system, Int. J. Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有、in press

- ② 松島功児、苗真、大路貴久、飴井賢治、作井正昭、非磁性金属薄板用交流誘導式リニア磁気浮上装置の浮上始動特性、日本 AEM 学会誌、査読有、Vol. 20, No. 1, pp. 220-225, 2012
- ③ 大路貴久、苗真、高見典幸、飴井賢治、作井正昭、交流アンペール式リニア誘導浮上搬送装置の磁極配置と Al 薄板の浮上特性、日本 AEM 学会誌、査読有、Vol. 19, No. 3, pp. 550-556, 2011
- ④ 高見典幸、大路貴久、飴井賢治、作井正昭、交流アンペール式磁気浮上回転装置による Al 円板の浮上回転実験、日本磁気学会誌、査読有、Vol. 35, No. 3, pp. 303-307, 2011

[学会発表] (計 15 件)

- ① 松島功児、苗真、大路貴久、飴井賢治、作井正昭、非磁性金属薄板用交流アンペール式リニア磁気浮上搬送装置の推力特性、第 24 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、2012 年 5 月 16 日、富山国際会議場
- ② T. Ohji, Z. Miao, K. Matsushima, K. Amei, M. Sakui, Improvement of Starting Levitation by Switching Phase Advance Capacitors Connected to an AC Induction Type Magnetic Levitation System, 15th Int. Sym. Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM2011), 2011 年 9 月 7 日、Royal Continental Hotel in Naples, Italy
- ③ 苗真、松島功児、大路貴久、飴井賢治、作井正昭、交流アンペール式リニア磁気浮上装置に対する支持剛性評価、平成 23 年産業応用部門大会 (JIASC11)、2011 年 9 月 6 日、琉球大学
- ④ 松島功児、苗真、大路貴久、飴井賢治、作井正昭、非磁性金属薄板用交流誘導式リニア磁気浮上装置の浮上始動特性、第 23 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、2011 年 5 月 18 日、ウインクあいち
- ⑤ 大路貴久、苗真、高見典幸、飴井賢治、作井正昭、交流アンペール式リニア誘導浮上搬送装置の磁極配置と Al 薄板の浮上特性、第 19 回 MAGDA コンファレンス、2010 年 11 月 23 日、北海道大学
- ⑥ 大路貴久、飴井賢治、作井正昭、非磁性金属薄板に対する交流アンペール式リニ

ア誘導浮上搬送システム ～磁極構造と浮上実験～，平成 22 年度電気関係学会北陸支部連合大会、2010 年 9 月 12 日、福井工業高等専門学校

- ⑦ 苗真、高見典幸、大路貴久、飴井賢治、作井正昭、交流アンペール式リニア磁気浮上装置の磁極配置と浮上特性、平成 22 年電気学会産業応用部門大会、2010 年 8 月 24 日、芝浦工業大学
- ⑧ 塩原学、岩瀬友昭、大路貴久、飴井賢治、作井正昭、永久磁石の過渡的運動に伴うアルミニウム薄板の浮上高測定、平成 22 年電気学会産業応用部門大会、2010 年 8 月 24 日、芝浦工業大学
- ⑨ 大路貴久、高見典幸、飴井賢治、作井正昭、交流アンペール式リニア磁気浮上装置の磁極配置、第 33 回日本磁気学会学術講演会、2009 年 9 月 13 日、長崎大学
- ⑩ 岩瀬友昭、大路貴久、飴井賢治、作井正昭、永久磁石の過渡的運動に伴う非磁性金属薄板の浮上高測定、平成 21 年度電気関係学会北陸支部連合大会、2009 年 9 月 13 日、北陸先端科学技術大学院大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大路 貴久 (OHJI TAKAHISA)

富山大学・大学院理工学研究部 (工学)・准教授

研究者番号：30334709

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし