

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 7 日現在

機関番号：32644

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18010

研究課題名(和文) マグレブを用いた走行する極薄な柔軟鋼板の形状安定化と搬送技術に関する研究

研究課題名(英文) Study on shape stabilization and conveyance technology for traveling extremely thin flexible steel plate with maglev

研究代表者

成田 正敬 (NARITA, Takayoshi)

東海大学・工学部・助教

研究者番号：90733717

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：磁気浮上技術の特長は物体を非接触に3次元空間上に固定・移動できる点である。鋼板の製造ラインで問題となっているローラとの接触による表面品質の劣化は磁気浮上による非接触支持・搬送により解決できる。しかし需要が急増している薄く強い鋼材は浮上中に複雑なモード形状の振動が発生し、鋼板の浮上制御は困難となる。そこで「布の両端を引っ張るように」水平方向から鋼板のエッジ部を把持することで極薄の柔軟鋼板の非接触支持・搬送を行う手法を提案した。有限要素法による解析と検証実験から、提案する手法を用いることで柔軟な鋼板に対してより効果的に支持・搬送が行えることを示すことができた。

研究成果の概要(英文)：A feature of the magnetic levitation technology (maglev) is that the object can be fixed and moved in three-dimensional space without contact. Degradation of surface quality due to contact with rollers, which is a problem in steel plate production lines, can be solved by noncontact support and transportation by magnetic levitation. However, thin and strong steel materials, which are rapidly increasing in demand, undergo vibration in a complicated mode shape while levitating, and it is difficult to control levitation of the steel plate. Therefore, we propose a method to support and transport ultrathin flexible steel plate by grasping the edge part of the steel plate from the horizontal direction so as to "pull both ends of the cloth." From finite element method analysis and verification experiments it was shown that we can support and transport more flexible steel plate by using the proposed method.

研究分野：磁気浮上、メカトロニクス、振動工学

キーワード：磁気浮上 鋼板 電磁力 非接触 形状 電磁界解析

1. 研究開始当初の背景

各種工業製品に広く用いられている薄鋼板は製造ラインにおいて、多数のローラにより搬送されている。薄鋼板は自動車、電機製品、製缶、その他の材料として幅広く用いられている。近年では極めて薄い鋼板の製造も可能となり、その多岐にわたる需要から要求される表面品質は高級化の一途を辿っている。このとき鋼板とローラの接触によりメッキの不良や表面品質の劣化が生じ問題となっている。この問題の解決方法として、磁気浮上技術を応用した電磁力による鋼板の非接触搬送が考えられている。

これまでに支持方向だけでなく水平方向に電磁石を設置し、磁気浮上鋼板に水平方向から磁場を印加することにより鋼板水平方向の非接触位置決めを行い、鋼板鉛直方向の弾性振動や静的なたわみの抑制が可能であることを確認している。しかしこれらの手法では浮上支持用の電磁石と水平方向位置決め制御用の電磁石を別個に設置する必要があり、制御システムの複雑化や、コストの面で問題があった。

2. 研究の目的

水平方向の電磁石ユニットから発生した磁場により、鋼板には水平方向の張力だけでなく鉛直方向の支持力も同時に発生する。本研究は水平方向の磁場により鉛直方向の支持力も同時に発生することに着目し、水平方向の磁場のみを用いて薄く柔軟な鋼板の非接触支持と水平方向位置決め制御を同時に行う磁気浮上装置を提案し、浮上特性や浮上時の安定性について検討を行った。

3. 研究の方法

図1に提案する磁気浮上装置の概略を示す。浮上対象は幅100 mm、長さ400 mmの薄鋼板 (SS400) とする。薄鋼板長手方向のエッジ付近に2つずつ電磁石を対向して設置する。電磁石から発生する磁場により、鋼板のエッジ部には電磁石コアの中心方向に吸引力が発生する。この吸引力の水平方向成分は鋼板に張力として加わり、鋼板を平坦にして浮上安定性を高める。鉛直方向成分は鋼板の支持力として加わり、自重とつりあう力を発生させることで鋼板が浮上可能となる。

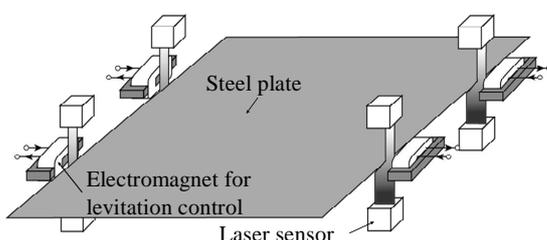


図1 提案する水平方向の電磁石のみを使用した磁気浮上システム

(1) 電磁界解析による吸引力特性の把握

本研究計画で提案するシステムを実現する上で、まず図1のように鋼板のエッジ部付近に電磁石が設置された際に鋼板に加わる基本的な吸引力特性を把握する必要がある。このため有限要素法による電磁界解析を用いて1個の電磁石に定常電流を流したときに鋼板に発生する吸引力について検討を行う。また鋼板の鉛直方向の変位が変化した際に水平方向成分と鉛直方向成分の傾向の変化についても検討を行う。

設置する電磁石は図2に示すようなE型フェライトコアを使用し、コイルの線径は0.5 mm、巻数は1005回とした。浮上対象となる鋼板のサイズはコアに対して十分な幅と長さを取るため、幅100 mm、長さ200 mm、板厚は0.06 mm~0.30 mmとし、材質はSS400とした。図3に作成した解析モデルを示す。水平方向の変位に関して鋼板は位置決め制御により、電磁石のコア表面から5 mmの位置で制御され静止していると仮定し、電磁石には定常電流のみが流れているとする。電磁石に流れる定常電流 I_c を0.1 A から2.0 A まで変化させた際の鋼板に発生する水平方向の吸引力 F_x と鉛直方向の吸引力 F_z について解析を行った。コア中心から鋼板中心までの鉛直方向の変位 z は2 mm からコア中央凸部の形状を考慮して14 mm とした。

(2) 形状解析による浮上安定性の評価

これまでの検討から、浮上鋼板のたわみ量を抑制することで、鋼板の浮上安定性が向上することが実験的に得られている。そこで、提案したシステムを用いて浮上した際の鋼板の安定性を評価するために、吸引力特性の

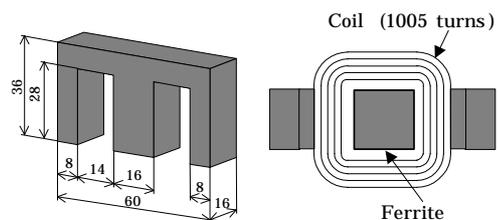


図2 提案するシステムに使用する電磁石の仕様

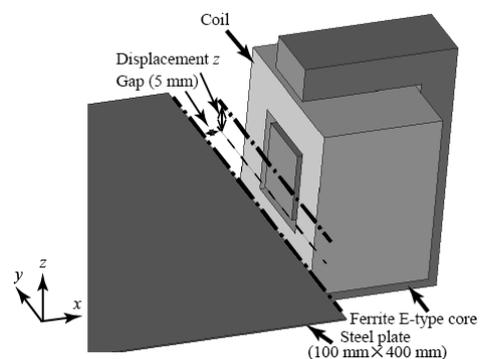


図3 吸引力特性を把握するための電磁界解析に使用した解析モデル

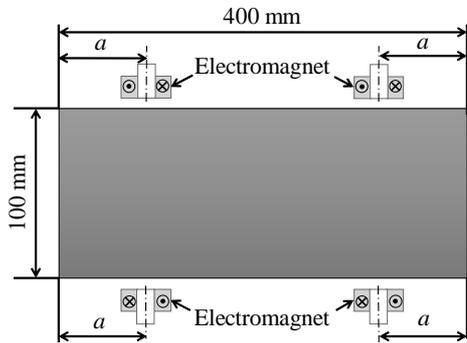


図4 形状解析の解析モデル

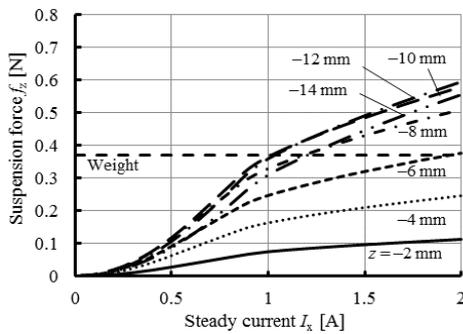


図5 電磁石の定常電流と浮上支持力の関係 (板厚 0.24 mm)

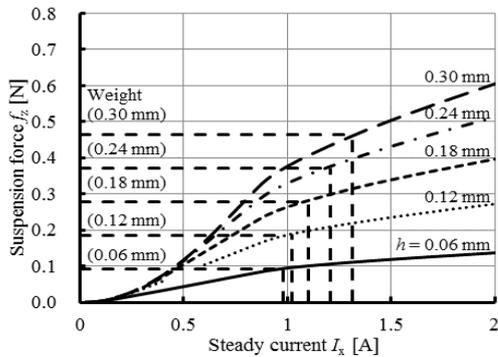


図6 電磁石の定常電流と浮上支持力の関係 (変位 $z = -8$ mm)

得られた電磁石を使用して図4のように鋼板のエッジ付近4カ所で支持された際の鋼板の形状を算出する。算出には有限差分法を使用し、差分解析格子は10 mm×10 mmとした。各解析点における鋼板のたわみ量の平均値を j_c と定義し、最適な電磁石位置について検討を行った。電磁石の位置は図4のように鋼板の端部から $a = 0 \sim 190$ mmまで10 mm毎に変化させた。各電磁石の位置における鋼板の平均たわみ量を解析結果から算出し、評価を行った。

4. 研究成果

(1) 電磁界解析による吸引力特性の把握

水平方向から磁場を加えた際に鋼板に発生する吸引力について電磁界解析を用いて検討を行った。図5は板厚0.24 mmの鋼板の結果であり、図中の破線は鋼板の自重を示

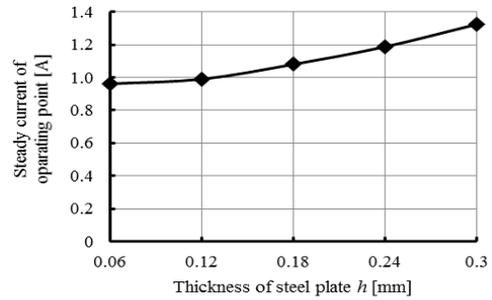


図7 鋼板の板厚と浮上可能な電磁石の定常電流の関係 (電磁石の定常電流 $I_x = 2.0$ A)

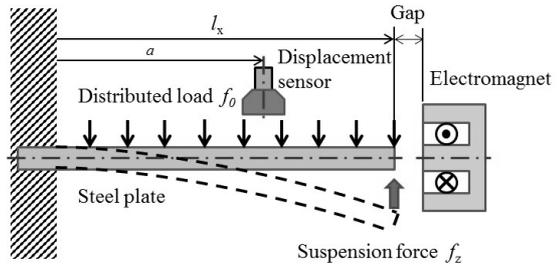


図8 浮上支持力の測定装置

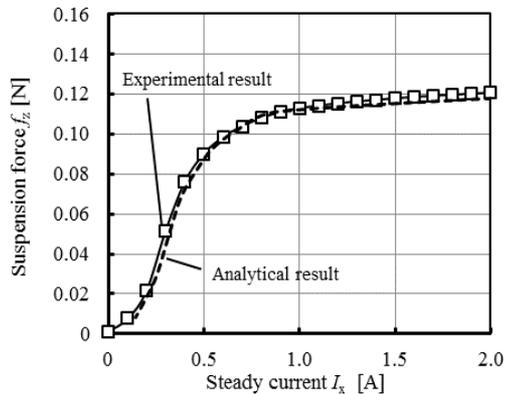


図9 電磁石の定常電流と解析・実験による浮上支持力の関係

している。鉛直方向に変位させることで鋼板重量を支持できる吸引力を発生できることを示した。さらに0.06 mm～0.30 mmの鋼板を対象として解析を行った結果を図6に示す。鋼板の板厚が薄くなると浮上支持力は全体的に低下するが、各板厚の自重と釣り合う定常電流値は低下する傾向が確認できた。図7は鋼板の板厚と浮上可能な電磁石の定常電流の関係であり、板厚が薄くなるほど浮上可能な定常電流値は低減できることを示した。このことから提案する磁気浮上システムは薄い鋼板に対してより有効であることを示した。

また解析により得られた結果を実験的に確認するため図8に示す実験装置を用いて浮上支持力の測定を行った。図9は測定した板厚0.24 mmの場合における電磁石の支持力特性であり、図中の破線は解析値、プロットは実験値である。解析値と実験値が一致し解析の妥当性を示すことができた。

(2) 形状解析による浮上安定性の評価

有限差分法により算出した、鋼板の角から 90 mm の位置に電磁石を設置した場合の浮上中の鋼板形状を図 10 に示す。電磁石位置の付近で支持され、吸引力の及ばない箇所でのたわみが発生している様子が確認できる。

さらに電磁石位置を変化させて解析を行った。電磁石位置と平均たわみ量 j_z の関係を図 11 に示す。電磁石位置が 0 mm の時は平均たわみ量 j_z が 6.9 mm と最もたわみ量が多い鋼板形状となった。電磁石位置が中央に近づくに従い j_z は減少し、電磁石位置が 90 mm のときに平均たわみ量が 0.25 mm となり最も鋼板のたわみが抑制できた。上記の手法を用いることで浮上中に高い安定性を示す支持位置を得ることができた。

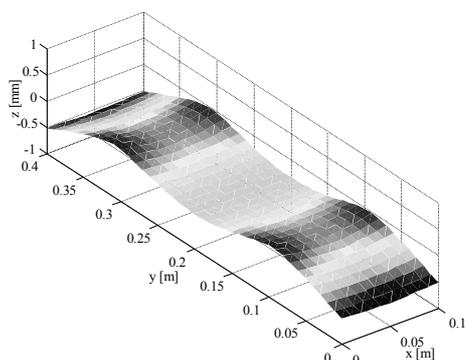


図 10 浮上中の鋼板形状
(電磁石位置 $a = 90$ mm)

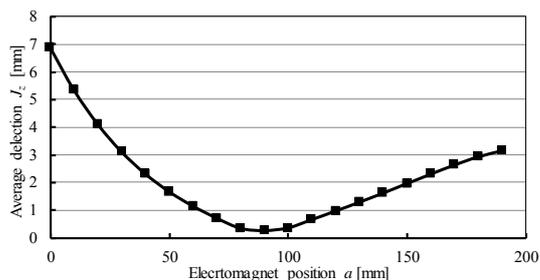


図 11 電磁石位置と鋼板のたわみ量の関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者は下線)

[雑誌論文](計 8 件)

1. T. Narita, M. Kida, T. Suzuki, H. Kato「Study on Electromagnetic Levitation System for Ultrathin Flexible Steel Plate Using Magnetic Field from Horizontal Direction」, 査読あり, International Journal of the Magnetics Society of Japan, Vol. 41, No.1, pp14-19, (2017), 10.3379/msjmag.1612R001
2. 石井宏尚, 成田正敬, 加藤英晃「電磁石と永久磁石による薄鋼板のハイブリッド磁気浮上システム —磁場の相互作用を考慮した最適配置探索に関する基礎的検討—」, 査読あり, 日本 AEM 学会誌, Vol. 24, No. 3, pp149-154, (2016), 10.14243/jsaem.

24.149

3. 米澤暉, 丸森宏樹, 成田正敬, 加藤英晃「柔軟鋼板の湾曲浮上制御 —浮上安定性向上に関する実験的検討—」, 査読あり, 日本 AEM 学会誌, Vol. 24, No. 3, pp137-142, (2016), 10.14243/jsaem.24.137
4. T. Kurihara, T. Narita, H. Kato, Y. Yamamoto「Effect of a magnetic field from the horizontal direction on a magnetically levitated steel plate (Fundamental consideration on the levitation performance)」, 査読あり, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 51, No. 34, pp. 1495-1502, (2016), 10.3233/JAE-162144
5. T. Narita, T. Kurihara, H. Kato, Y. Yamamoto「Study on stability improvement by applying electromagnetic force to edge of non-contact-gripped thin steel plate」, 査読あり, Mechanical Engineering Journal, Vol. 3, No. 6, p. 15-0037, (2016), 10.1299/mej.15-00376
6. H. Kato, H. Marumori, H. Yonezawa, T. Narita, 査読あり, 「Vibration Suppression Effect in a Bending-Levitated Flexible Steel Plate by the Electromagnetic Force」, 査読あり, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 138, Issue 5, (2016), 10.1115/1.4033981
7. 丸森宏樹, 米澤暉, 成田正敬, 加藤英晃, 長谷川真也, 押野谷康雄「柔軟鋼板の湾曲浮上制御 —最適な浮上角度に関する基礎的検討—」, 査読あり, 日本 AEM 学会誌, Vol. 23, No. 2, pp.386-392, (2015), 10.14243/jsaem.23.386
8. H. Yonezawa, H. Marumori, T. Narita, H. Kato「Bending Magnetic Levitation Control Applying the Continuous Model of Flexible Steel Plate」, 査読あり, Proc. Schl. Eng. Tokai Univ., Ser. E 40, pp.77-82, (2015), http://www.u-tokai.ac.jp/academics/undergraduate/engineering/kiyou/pdf/vol_40_001e/12.pdf

[学会発表](計 36 件)

1. 多田誠, 曲率を有する柔軟鋼板のマグレブシステムに関する基礎実験, 関東学生会第 56 回学生員卒業研究発表講演会, 2017 年 3 月 16 日, 東京理科大学葛飾キャンパス(東京都・葛飾区)
2. 小田吉帆, 水平方向からの磁場を利用したマグレブシステムの基礎研究, 関東学生会第 56 回学生員卒業研究発表講演会, 2017 年 3 月 16 日, 東京理科大学葛飾キャンパス(東京都・葛飾区)
3. 別所飛彦, 柔軟な走行鋼板の磁気ガイドウェイに関する基礎研究, 関東学生会第 56 回学生員卒業研究発表講演会, 2017 年 3 月 16 日, 東京理科大学葛飾キャンパス(東京都・葛飾区)
4. 多田誠, スライディングモード制御を用

- いた柔軟鋼板の湾曲浮上統合制御、第 25 回 MAGDA コンファレンス in Kiryu、2016 年 11 月 24 日～25 日、桐生市市民文化会館（群馬県・桐生市）
5. 鈴木稔樹、薄鋼板のハイブリッド磁気浮上システムに関する研究 — 鋼板の振動モードを考慮した制御モデルに関する基礎的検討一、第 25 回 MAGDA コンファレンス in Kiryu、2016 年 11 月 24 日～25 日、桐生市市民文化会館（群馬県・桐生市）
 6. 木田将寛、水平方向からの磁場が磁気浮上搬送鋼板の浮上性能に与える影響、第 25 回 MAGDA コンファレンス in Kiryu、2016 年 11 月 24 日～25 日、桐生市市民文化会館（群馬県・桐生市）
 7. 小田吉帆、柔軟鋼板のエッジ支持型磁気浮上システム — 浮上中の鋼板形状に関する基礎的検討一、第 25 回 MAGDA コンファレンス in Kiryu、2016 年 11 月 24 日～25 日、桐生市市民文化会館（群馬県・桐生市）
 8. 鈴木稔樹、永久磁石を用いた薄鋼板のハイブリッド磁気浮上システムにおける最適配置（水平方向の磁場に関する基礎的検討）第 40 回 日本磁気学会学術講演会、2016 年 9 月 5 日、金沢大学自然科学研究科棟（角間キャンパス）（石川県・金沢市）
 9. 川崎謙太、電磁石による走行磁性体の非接触案内（FEM を用いた電磁石配置に関する基礎的検討）第 40 回 日本磁気学会学術講演会、2016 年 9 月 5 日、金沢大学自然科学研究科棟（角間キャンパス）（石川県・金沢市）
 10. 木田将寛、水平方向からの磁場が磁気浮上搬送鋼板に与える影響（浮上特性に関する基礎的研究）第 40 回 日本磁気学会学術講演会、2016 年 9 月 5 日、金沢大学自然科学研究科棟（角間キャンパス）（石川県・金沢市）
 11. 多田誠、柔軟鋼板の湾曲浮上制御（湾曲鋼板の弾性振動に関する基礎的検討）第 40 回 日本磁気学会学術講演会、2016 年 9 月 5 日、金沢大学自然科学研究科棟（角間キャンパス）（石川県・金沢市）
 12. 小田吉帆、水平方向からの磁場を用いた柔軟鋼板の磁気浮上装置（浮上支持力に関する実験的検討）第 40 回 日本磁気学会学術講演会、2016 年 9 月 5 日、金沢大学自然科学研究科棟（角間キャンパス）（石川県・金沢市）
 13. **成田正敬**、柔軟鋼板の湾曲浮上制御（鋼板内で発生する弾性振動に関する基礎的検討）日本機械学会 2016 年度年次大会、2016 年 9 月 12 日、九州大学 伊都キャンパス（福岡県・福岡市）
 14. 木田将寛、水平方向位置決め制御を用いた磁気浮上搬送極薄鋼板（浮上性能に関する基礎的考察）日本機械学会 2016 年度年次大会、2016 年 9 月 12 日、九州大学 伊都キャンパス（福岡県・福岡市）
 15. 鈴木稔樹、薄鋼板のハイブリッド磁気浮上システムに関する研究（永久磁石と鋼板のギャップに関する解析的検討）日本機械学会 2016 年度年次大会、2016 年 9 月 12 日、九州大学 伊都キャンパス（福岡県・福岡市）
 16. **T. Narita**, Bending Levitation Control for Thin Steel Plate (Fundamental Consideration on Elastic Vibration), 2016 ICEE/The International Conference on Electrical Engineering, 2016 年 7 月 3 日～6 日、沖縄自治会館（沖縄県・那覇市）
 17. T. Suzuki, Optimal Arrangement on Hybrid Magnetic Levitation System for Thin Steel Plate Permanent Magnets (Experimental Consideration on Interacted Magnetic Field of Permanent Magnets), 2016 ICEE/The International Conference on Electrical Engineering, 2016 年 7 月 3 日～6 日、沖縄自治会館（沖縄県・那覇市）
 18. K. Kawasaki, Noncontact Guide System for Traveling Elastic Steel Plate (Optimal Placement of Electromagnets by Analysis of Steel Plate Shape), 2016 ICEE/The International Conference on Electrical Engineering, 2016 年 7 月 3 日～6 日、沖縄自治会館（沖縄県・那覇市）
 19. M. Kida, Magnetically Levitated Transport Steel Plate Using Horizontal Positioning Control (Fundamental Study on the Levitation Characteristics), 2016 ICEE/The International Conference on Electrical Engineering, 2016 年 7 月 3 日～6 日、沖縄自治会館（沖縄県・那覇市）
 20. 多田誠、柔軟鋼板の湾曲浮上制御（弾性振動に関する実験的検討）第 28 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、2016 年 5 月 18 日～20 日、慶應義塾大学 日吉キャンパス（神奈川県・横浜市）
 21. 木田将寛、水平方向からの磁場が磁気浮上搬送鋼板に与える影響（搬送条件による基礎的考察）第 28 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、2016 年 5 月 18 日～20 日、慶應義塾大学 日吉キャンパス（神奈川県・横浜市）
 22. 鈴木稔樹、電磁石と永久磁石による薄鋼板のハイブリッド磁気浮上システム（浮上特性に関する基礎的検討）第 28 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、2016 年 5 月 18 日～20 日、慶應義塾大学 日吉キャンパス（神奈川県・横浜市）
 23. 川崎謙太、電磁力による走行連続鋼板のループ形状部分における非接触案内（電磁石位置による振動抑制に関する基礎的考察）第 28 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、2016 年 5 月 18 日～20 日、慶應義塾大学 日吉キャンパス（神奈川県・横浜市）

24. 川崎謙太、走行磁性体のループ形状部分における非接触案内制御(FEMを用いた電磁石配置に関する基礎的考察)、2016年3月10日~11日、東京工業大学大岡山キャンパス(東京都・目黒区)
25. 栗原岳、水平方向からの磁場が磁気浮上搬送鋼板に与える影響—浮上性能に関する基礎的検討—、第24回MAGDAコンファレンス、2015年11月12日~14日、東北大学片平キャンパス(宮城県・仙台市)
26. 坂場康一、鋼板搬送ラインにおける非接触案内—ループ形状部分における振動抑制に関する基礎的検討—、第24回MAGDAコンファレンス、2015年11月12日~14日、東北大学片平キャンパス(宮城県・仙台市)
27. 石井宏尚、電磁石と永久磁石による薄鋼板のハイブリッド磁気浮上システム—磁場の相互作用を考慮した最適配置探索に関する基礎的検討—、第24回MAGDAコンファレンス、2015年11月12日~14日、東北大学片平キャンパス(宮城県・仙台市)
28. 川崎謙太、走行磁性体に対する非接触案内—走行時の形状を考慮した電磁石配置に関する実験的考察—、第24回MAGDAコンファレンス、2015年11月12日~14日、東北大学片平キャンパス(宮城県・仙台市)
29. 米澤暉、柔軟鋼板の湾曲浮上制御—浮上安定性向上に関する実験的検討—、第24回MAGDAコンファレンス、2015年11月12日~14日、東北大学片平キャンパス(宮城県・仙台市)
30. H. Yonezawa, Bending Levitation Control for Thin Steel Plate (Experimental Study on Vibration Control Performance When Inputting the Disturbance), The 17th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM2015)、2015年9月15日~18日、淡路夢舞台国際会議場(兵庫県・淡路市)
31. **T. Narita**, Fundamental Consideration on Thickness of Steel Plate of Electromagnetic Levitation System for Flexible Steel Plate Using Magnetic Field from Horizontal Direction, The 17th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM2015)、2015年9月15日~18日、淡路夢舞台国際会議場(兵庫県・淡路市)
32. T. Kurihara, Effect of a Magnetic Field from the Horizontal Direction on a Magnetically Levitated Steel Plate (Fundamental Consideration on the Levitation Performance), The 17th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM2015)、2015年9月15日~18日、淡路夢舞台国際会議場(兵庫県・淡路市)
33. 栗原岳、水平方向からの磁場が磁気浮上搬送鋼板に与える影響(電磁石吸引力に関する基礎的検討)、第27回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、2015年5月14日~15日、ハウステンボス(長崎県・佐世保市)
34. **成田正敬**、水平方向からの電磁力を用いた柔軟鋼板の磁気浮上装置に関する基礎的検討、第27回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、2015年5月14日~15日、ハウステンボス(長崎県・佐世保市)
35. 川崎謙太、電磁力による走行連続鋼板のループ形状部分における非接触案内(走行形状解析と最適電磁石配置に関する基礎的検討)、第27回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、2015年5月14日~15日、ハウステンボス(長崎県・佐世保市)
36. 米澤暉、柔軟鋼板の湾曲浮上制御(外乱入力時の浮上安定性に関する実験的考察)、第27回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、2015年5月14日~15日、ハウステンボス(長崎県・佐世保市)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0件)

○取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ

<http://www.ed.u-tokai.ac.jp/laboratory/narita/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

成田 正敬 (NARITA, Takayoshi)

東海大学・工学部・助教

研究者番号：90733717