

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2008

課題番号：18560236

研究課題名（和文） 高速走行連続鋼板のループ部に対する非接触案内路形成技術

研究課題名（英文） Noncontact Guide System in Loop Shaping Part for High Speed Traveling Continuous Steel Plate

研究代表者

粕谷 平和（KASUYA HIRAKAZU）

東海大学・工学部・教授

研究者番号：50056280

研究成果の概要：

自動車や飛行機などの製品に使用されている鋼板は、製鉄所の様々な工程においてローラにより接触支持搬送されている。しかしながら鋼板のめっき処理工程では、鋼板を乾燥するために鉛直方向などへ20～50m搬送されている。この乾燥工程などではローラなどの支持が難しく鋼板搬送ラインの解決すべき重要な課題となっている。このように、塗布むら、傷の発生などを極力抑えた鋼板の品質、生産性の向上が急務であり、この問題を解決するための新しい技術の提案を行った。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,500,000	0	1,500,000
2007年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,500,000	600,000	4,100,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，機械力学・制御

キーワード：（1）電磁力（2）鋼板（3）走行（4）案内（5）非接触（6）ループ（7）形状（8）非対称

1. 研究開始当初の背景

自動車や飛行機などの製品に使用されている冷延鋼板（連続鋼板）は、様々な工程において図1のようにローラにより接触支持搬送される。このような連続鋼板の製鉄所における搬送ラインの長さは数kmにも及び、種々の加工プロセスを経ながら搬送装置上を10m/s以上の高速で走行している。しかしながら連続鋼板の処理工程の一つであるめ

っき処理工程では、めっき処理後に鋼板を乾燥するために鉛直方向や水平方向へ20～50m搬送されている。この乾燥工程ではローラなどの支持が難しく、高い張力の付加ができないことも伴って鋼板に弾性振動が発生する。同様に、塗装などの化粧処理工程などにおいても、鋼板とローラの接触による表面品質劣化が認められ、連続鋼板搬送ラインの解決すべき重要な課題となっている。このように、塗布むら、傷の発生などを極力抑えた品質、

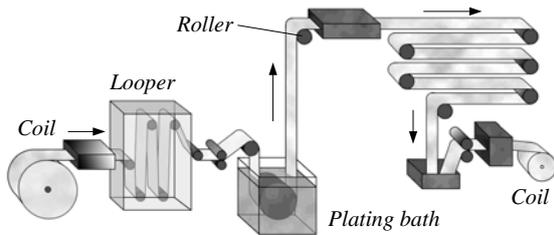
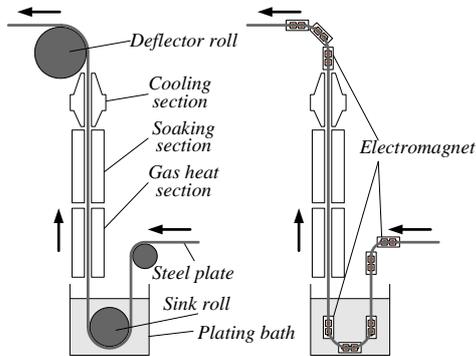


図1 鉄鋼プロセスの概念図



(a) (b)
図2 めっき処理工程

生産性の向上が急務である。

図2 (a)に、図1で示した搬送ラインのめっき処理工程部分を拡大した概念図を示す。上述のように、通常はローラにより接触支持・搬送されているが、めっき処理槽内及び頂上部において鋼板をローラにより接触支持・案内することはその表面品質劣化の原因となり、非接触による支持・案内(同図(b))に対する強い期待が存在している。

2. 研究の目的

そこで本課題では、特に高速走行する連続鋼板がその進行方向を変更する部分、すなわち「ループ部」に着目した。塗布むら、傷発生などを極力抑えた製品歩留まりの向上、生産性の向上など、鋼板表面品質の改善を目的として、電磁力技術の応用によるこれらの問題解決策を提案し、以下の手順で問題の解明を行うことを目的とした。

高速走行する連続鋼板が進行方向を変更する部分に関する理論モデルを構築し、振動発生メカニズムを理論的に解明する。

高速走行状態における連続鋼板の力学的挙動を把握するための実験装置を用い、構築した理論モデルの妥当性を確認する。本システムに最適な制御系を設計し、計算機シミュレーションによって設計手法の妥当性を明らかにする。

センサ、電磁石の最適配置を解明し、デジタル制御実験を実施し、理論と実験の比較によって構築した制御系の有効性と実用性を明らかにする。

以上のようなプロセスを経て、期間内には高速走行連続鋼板のループ部に関する力学的挙動の掌握と制御系の確立を行い、これまで学術的に十分整理されていないこの分野の工学的体系化を目指した。さらに、連続鋼板の超高速搬送システムにおける一層の高効率化、高精度化、高信頼性化などを確保するための体系的基礎資料の提示も目指した。

3. 研究の方法

(1) ループ形状部分を高速走行する薄鋼板の理論モデルの構築と動的挙動の解明

図3に示すように、実験装置の下部はプーリを設置せず支持の無い状態を想定している。走行状態では外力(張力、遠心力、コリオリ力など)の影響からその形状は左右非対称となり、走行速度に依存してそのループ形状は変化することが予想される。そのため理論モデルの構築と動的挙動の解明を行った。この部分のモデル化として曲り板構造等の理論などを組み合わせ、新しいモデリングを試み、さらに、連続鋼板が走行することによって発生する遠心力、コリオリ力などを考慮したモデル化も行った。

(2) 走行連続鋼板の非接触案内制御装置

連続鋼板の製造ラインにおけるめっき処理工程等では、デフレクターロールやシンクロールにより鋼板は接触支持されている。そこで、図3に示すように連続鋼板がめっき処理槽を通過する部分などを模擬した装置を使用した。実験に用いた鋼板は、長さ6894mm、幅150mm、厚さ0.3mmの焼入れした鋼材(SK3)をベルト状に溶接したものであり、この連続鋼板を図のようにプーリから吊り下げた。

なお、鋼板平面内の走行方向に垂直な方向の変形や弾性振動等を減少させ、エッジ制御

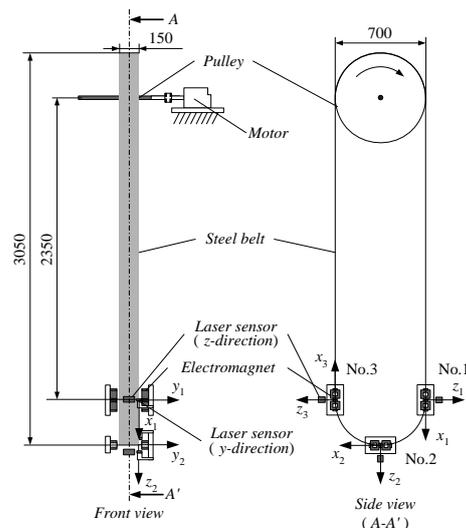


図3 実験装置

システムがループ形状部分に与える影響を明確に考察するため、本実験では鋼板の幅を150mmとした。プーリはDCサーボモータにより駆動し、連続鋼板のエンドレス走行を可能としている。また、電磁石は同図のようにそれぞれNo.1, 2, 3とし、三か所に設置した。図中の $x_1 \sim x_3$ は各電磁石位置における鋼板の走行方向の座標を示す。 $y_1 \sim y_3$ は電磁石位置における鋼板平面内の走行方向に垂直な座標(以下、この方向を y 方向と記す)、 $z_1 \sim z_3$ は電磁石位置における鋼板の平面に垂直な方向の座標(以下、この方向を z 方向と記す)を示す。このとき走行鋼板の y 方向は電磁石によってアクティブ最適制御され、 z 方向は電磁石中心位置へ案内されるパッシブ制御となる。

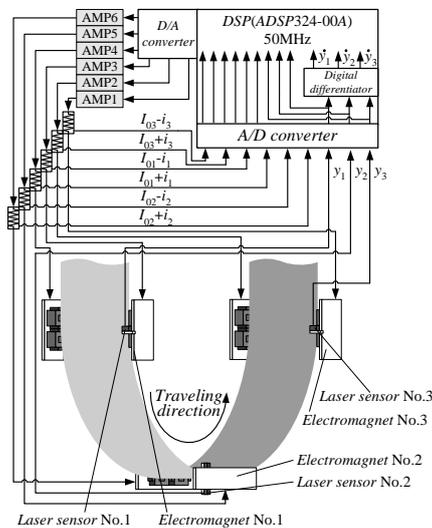


図4 制御システム

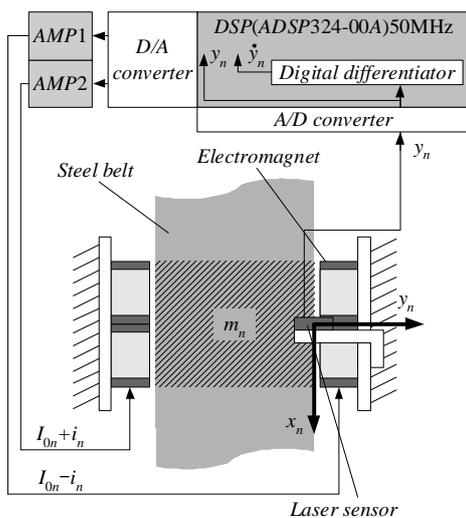


図5 モデル化

ループ部の走行鋼板の上流、下流とその中間の3カ所のエッジ方向変位を帯状レーザー式センサで検出した。電磁石に供給する電流はバイポーラ電源を利用する。変位信号のコンピュータへの取り込み、また電磁石への制御電圧出力のためには、A/D、D/A変換器、DSP、実装用パソコンを使用した(図4)。

(3) 走行鋼板の制御質量のモデル化に対する検討

本研究の制御対象である鋼板は連続体であり、非接触案内実験装置の制御部分を並進1自由度によりモデリングを行う場合(図5)、コントローラ設計質量を一意に定めることが難しい。さらに、実機工程において同一のラインで厚さや密度の違う鋼板を搬送することが考えられ、制御対象である連続鋼板の質量変動に対してロバストな制御理論が求められている。

近年、ロバストな制御理論である μ -シシスやスライディングモード制御理論が磁気軸受や磁気歯車などの制御システムに適用され、不確実性あるいは外乱のもとでのその有効性が確認されている。そこで、これらの制御理論を非接触案内の制御システムに適用し、連続鋼板の質量変動に対する制御システムのロバスト性に関して実験的に検証した。なお、本研究においては、スライディングモード制御理論のマッチング条件が質量変動に対して満たすように、電流フィードバックを用いて電磁石回路方程式の理想化を行った。

(4) 走行方向変更部の最適形状に対応した非接触案内路の設計

既に述べたように、実験装置の下部にはプーリを設置せず支持の無い状態となっており、走行速度に依存して、そのループ形状は変化する。これを考慮した非対称の非接触案内路の設計を実施した。このシステムが実現できると、単体の大型プーリでは円弧状の接触案内しか可能でないが(プーリは基本的に真円であることを前提)、電磁力による非接触案内によってその案内方向に自由度を持たせることが可能となる。

(5) 走行実験

ループ形状部分の案内路形状の違いによる制振性能への影響を検討するため、ループ形状部分の案内路形状を図6に示すように、(A)ロールを使用している場合と同様の半円形状、(B)1000m/min程度の高速走行時に現れる非対称な形状の二条件を準備した。なお鋼板の走行速度は未制御時に(B)の形状で走行している1000m/minとした。

4. 研究成果

(1) 結果

図7は図3の電磁石 No.3 における z 方向変位の時刻歴の一例であり、図8はその際の標準偏差を示す。外乱入力時と外乱未入力時の標準偏差を比較すると、形状(A)、(B)共に約30%増加した。また、外乱未入力時の(A)と(B)を比較すると、(B)では(A)に比べ、標準偏差が1.98mmから1.70mmと約14%減少し、同様に、外乱入力時の(A)と(B)を比較すると、(B)では(A)に比べ、標準偏差が2.80mmから2.38mmと約15%減少した。以上より、走行

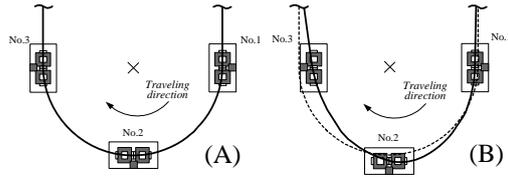


図6 電磁石配置

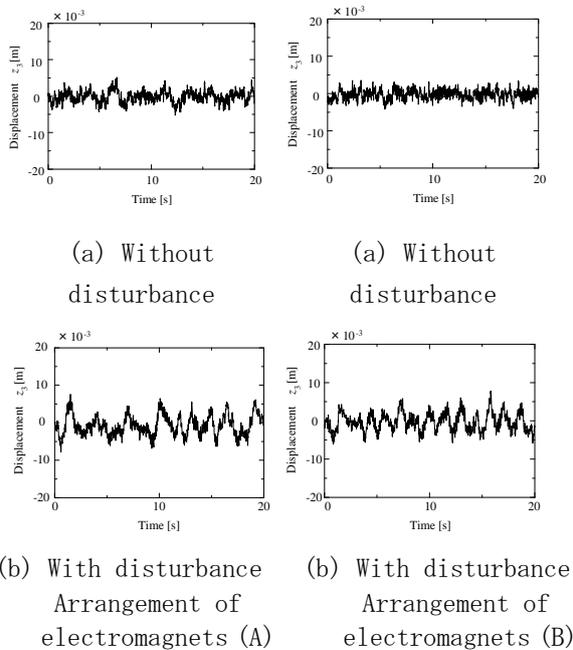


図7 変位の時刻歴

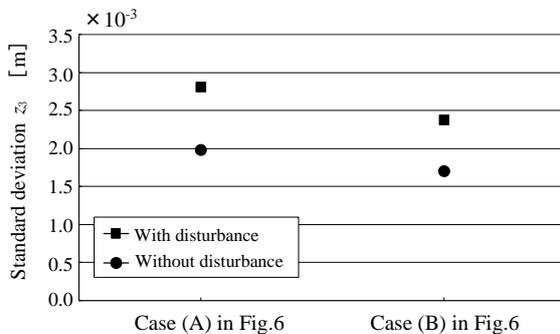


図8 変位の時刻歴の標準偏差

中に外乱が入力された場合においても、案内路を未制御時の走行鋼板形状に合わせて形成することで、アクティブに制御を行っていない z 方向に対する振動発生抑制効果が確認できた。

(2) まとめ

本研究を通じて走行連続鋼板におけるループ部の制御技術確立によって得られた成果は、基幹産業である鉄鋼業分野に対して生産性・品質向上等の視点から大いなる波及効果を期待できる。また本研究は、今後実用化されていく20両以上の連結状態の磁気浮上車両走行時における制御の基礎研究としても位置づけられる。さらに、近い将来の宇宙開発における大規模構造物建設時の無重力場における部材搬送にも応用できるなど、様々な先端分野への波及効果が考えられ、社会的貢献度も極めて大きいと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

- ①Sota Akiyoshi, Tomoshi Saito, Toshiya Iwata, Uprety Matrika, Yasuo Oshinoya, Kazuhisa Ishibashi, Hirakazu Kasuya, Fundamental Study on Horizontal Noncontact Positioning Control for a Magnetically Levitated Ultra-thin Steel Plate, Proceedings of The International Conference on Electrical Engineering 2008, 2008, CD-R AM1 1-4、査読有
- ②Uprety Matrika, Tomoshi Saito, Sota Akiyoshi, Yasuo Oshinoya, Kazuhisa Ishibashi, Hirakazu Kasuya, Fundamental Considerations on Optimal Placement of Permanent Magnets for Magnetically Levitated Thin Steel Plate, Proceedings of The International Conference on Electrical Engineering 2008, 2008, CD-R AM2 1-6、査読有
- ③Kazuya Urakawa, Tomoshi Saito, Sota Akiyoshi, Uprety Matrika, Yasuo Oshinoya, Kazuhisa Ishibashi, Hirakazu Kasuya, Fundamental Considerations on Bending Levitation Control for an Ultra-Thin Steel Plate, Proceedings of The International Conference on Electrical Engineering 2008, 2008, CD-R AM3 1-4、査読有
- ④Hiroaki Fujita, Hiroaki Kumagai, Yasuo Oshinoya, Kazuhisa Ishibashi, Hirakazu Kasuya, Noncontact Guide System for Traveling Elastic Steel Plate (Positioning Control Performance for Difference in Guideway Shape), Proceedings of The International Conference on Electrical

Engineering 2008、2008、CD-R AM4 1-6、
査読有

- ⑤Hiroaki Kumagai、Yasuo Oshinoya、
Kazuhiisa Ishibashi、Hirakazu Kasuya、
Noncontact guide system for traveling
elastic steel plates (Vibration control
performance for different of guideway
shapes)、Proceedings of SPIE、6794、2008、
67941T-1-67941T-6、査読有
- ⑥柏原賢、熊谷博昭、押野谷康雄、石橋一久、
粕谷平和、ループ形状部分を走行する連続
鋼板に対する電磁力を用いた非接触案内
路形成装置の開発(第1報 位置決め性能
に関する基礎実験)、日本機械学会論文集C
編、Vol.73、No.728、2007、1134-1140、査読
有
- ⑦熊谷博昭、押野谷康雄、石橋一久、粕谷平
和、永久磁石と電磁石を併用した走行磁性
体のロバスト非接触案内制御、東海大学紀
要工学部、46巻1号、2006、97-101、査読有

[学会発表] (計 19 件)

- ①藤田浩明、松永憲和、押野谷康雄、石橋一
久、粕谷平和、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 (外
乱入力時に対する基礎的検討)、第18回「電
磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、
2009年5月20日、メルパルク長野
- ②藤田浩明、押野谷康雄、石橋一久、粕谷平
和、走行連続鋼板におけるループ形状部分
の非接触案内制御 (電磁石配置に関する基
礎的検討)、日本機械学会関東支部第15期
総会講演会、2009年3月7日、茨城大学水
戸キャンパス
- ③浦川和也、押野谷康雄、石橋一久、粕谷平
和、柔軟鋼板の湾曲浮上制御に関する基礎
的検討、日本機械学会関東支部第15期総
会講演会、2009年3月7日、茨城大学水戸
キャンパス
- ④ウプレティマトリカ、押野谷康雄、石橋一
久、粕谷平和、薄鋼板磁気浮上システムに
おける永久磁石最適配置の実験的検討、日
本機械学会関東支部第15期総会講演会、
2009年3月7日、茨城大学水戸キャンパス
- ⑤政木朋崇、押野谷康雄、柔軟鋼板の湾曲浮
上制御に対する基礎的研究、日本機械学会
関東学生会第48回学生員卒業研究発表講
演会、2009年3月6日、茨城大学水戸キャン
パス
- ⑥松永憲和、押野谷康雄、走行連続鋼板の非
接触案内における電磁石配置の基礎的検
討、日本機械学会関東学生会第48回学生
員卒業研究発表講演会、2009年3月6日、
茨城大学水戸キャンパス
- ⑦明吉創太、押野谷康雄、石橋一久、粕谷平
和、水平方向からの磁場が磁気浮上鋼板に
与える影響 (極薄鋼板の搬送性能に関する

検討)、第17回MAGDAコンファレンス、2008
年11月21日、日立シビックセンター

- ⑧岩田敏哉、明吉創太、齋藤友志、押野谷康
雄、石橋一久、粕谷平和、磁気浮上極薄鋼
板の水平方向非接触位置決め制御 (水平方
向からの吸引力の変化に関する検討)、第
20回「電磁力関連のダイナミクス」シンポ
ジウム、2008年5月23日、別府ビーコン
プラザ
- ⑨藤田浩明、押野谷康雄、走行連続鋼板にお
ける進行方向変更部分の形状を考慮した
電磁石による非接触案内制御、日本機械学
会関東学生会第47回学生員卒業研究発表
会、2008年3月14日、東京海洋大学
- ⑩Hiroaki Kumagai、Yasuo Oshinoya、
Kazuhiisa Ishibashi、Hirakazu Kasuya、
Noncontact guide system for traveling
elastic steel plates (Vibration control
performance for different of guideway
shapes)、The 4th International
Conference on Mechatronics and
Information Technology、2007年12月6日、
長良川国際会議場
- ⑪熊谷博昭、押野谷康雄、石橋一久、粕谷平
和、電磁力による走行柔軟磁性体の非接触
案内 (進行方向変更部分の案内路形状に
関する検討)、第50回自動制御連合講演会、
2007年11月25日、慶應義塾大学日吉キャン
パス
- ⑫熊谷博昭、押野谷康雄、石橋一久、粕谷平
和、走行磁性体に対する非接触案内 (進行
方向変更部分の形状を考慮した制振性能
の検討)、第16回MAGDAコンファレンス、
2007年11月22日、コープイン京都
- ⑬熊谷博昭、押野谷康雄、石橋一久、粕谷平
和、電磁石による走行磁性体の非接触案内
(案内路形状による制振性能の検討)、第31
回日本応用磁気学会学術講演会、2007年
9月13日、学習院大学
- ⑭熊谷博昭、押野谷康雄、石橋一久、粕谷平
和、電磁力による走行連続鋼板の非接触案
内 (走行の影響を考慮したループ形状の
検討)、第19回電磁力関連のダイナミクス
シンポジウム、2007年5月16日、早稲田
大学井深大記念ホール
- ⑮熊谷博昭、柏原賢、押野谷康雄、石橋一久、
粕谷平和、ループ形状部分を走行する連続
鋼板に対する電磁力を用いた非接触案内
路形成装置の開発 (高速走行によるループ
形状への影響に関する検討)、日本機械学会
関東支部第13期総会講演会講演会、2007年
3月17日、宇都宮大学峰キャンパス
- ⑯熊谷博昭、柏原賢、押野谷康雄、石橋一久、
粕谷平和、走行磁性体に対する非接触案内
(外乱入力時における基礎的検討)、第15
回MAGDAコンファレンス、2007年11月2日、
桐生市市民文化会館

- ⑰熊谷博昭、柏原賢、押野谷康雄、石橋一久、粕谷平和、電磁石による走行磁性体の非接触案内(走行速度に対する制御性能の検討)、第30回日本応用磁気学会学術講演会、2007年9月13日、島根大学松江キャンパス
- ⑱柏原賢、熊谷博昭、押野谷康雄、石橋一久、粕谷平和、電磁石と永久磁石を併用した走行磁性体の非接触案内(スライディングモード制御適用時における考察)、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2006、2006年5月27日、早稲田大学理工学部大久保キャンパス
- ⑲熊谷博昭、小倉浩一郎、柏原賢、押野谷康雄、石橋一久、粕谷平和、走行連続鋼板に対する非接触案内(スライディングモード制御を適用したコイル抵抗値変動に対する検討)、第18回電磁力関連のダイナミックスシンポジウム講演論文集、2006年5月18日、神戸国際会館

6. 研究組織

(1) 研究代表者

粕谷 平和 (KASUYA HIRAKAZU)

東海大学・工学部・教授

研究者番号：50056280

(2) 研究分担者

押野谷 康雄 (OSHINOYA YASUO)

東海大学・工学部・教授

研究者番号：70233533

(3) 連携研究者

なし