

# 弾性板の羽ばたきを利用した磁気駆動マイクロポンプの接続方法

福田匠磨、本田崇  
(九工大)

Connecting method for magnetically driven micropump using flapping wings

T. Fukuda, T. Honda  
(Kyushu Inst. Tech.)

## はじめに

著者らは、放熱効率の高い小型液冷システムのノート PC 等への応用を目指し、弾性板の羽ばたきを利用した磁気駆動マイクロポンプの開発を進めている。本研究では、複数ポンプを直列接続した場合の接続方法に着目し、従来のストレート型から U 字型に変更した。その結果、U 字型が従来と同等の性能であり、全長の短縮化も容易であることがわかった。

## 素子構成

Fig. 1 にポンプ単体(a)、ストレート型 2 連結(b)、U 字型 2 連結(c)の構造を示す。可動子は、厚さ方向に着磁された 2 個の NdFeB 磁石 ( $\phi 4\text{mm} \times 1\text{mm}$ ) の間に、NdFeB 磁石 ( $\phi 1\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ ) を 2 個重ねたものを両端の 2 ヶ所に配置し、その一方の磁石間に厚さ  $50\mu\text{m}$  の PI フィルムを挟んで構成する。PI フィルムは、幅が  $4\text{mm}$ 、長さが  $6\text{mm}$  の長方形である。この可動子を固定子内に、回転軸を介し取り付けてポンプを構成している。同図(a)には動作原理も示している。長手方向に交流磁界を印加すると、磁石は磁気トルクを受け回転振動し弾性板を揺動させることで液体を送り出す。今回提案する U 字型では、流路を U 字に屈曲させ 2 つの可動子を回転軸を共通として一体化した構造になっており、ストレート型と比較して全長を 47%短縮している。

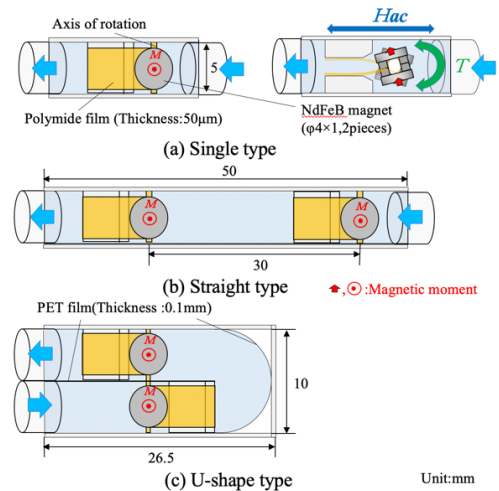


Fig.1 Structure of micropump.

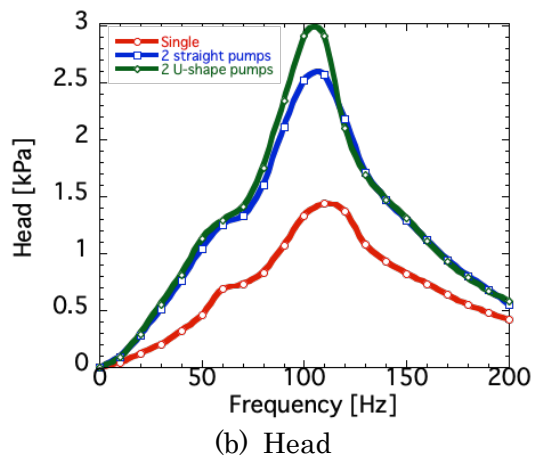
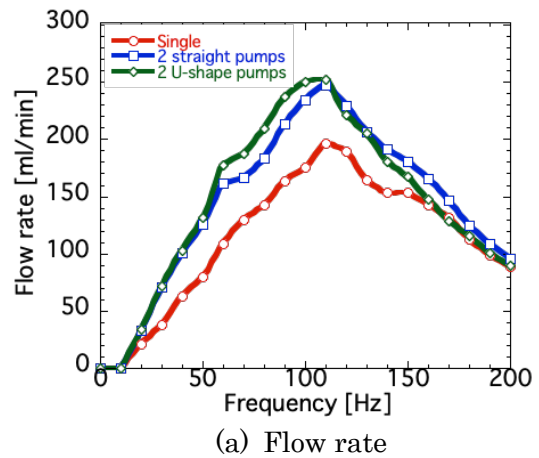


Fig. 2 Frequency characteristics.

## 実験結果

ポンプの駆動はソレノイドコイルによって行い、流量と吐出圧力を評価した。作動流体には、水で 20%に希釈した不凍液を使用した。

Fig. 2 に 50 Oe 印加時における無負荷時の流量(a)と吐出圧力(b)の周波数特性を示す。流量・吐出圧力ともストレート型と U 字型の差はほとんどなく、流路を屈曲させた影響は無視できることがわかった。これより、提案する U 字型の連結方法が有用であることを実証した。この結果を受け、本 U 字型ポンプを 50W クラスのノート PC を模した液冷システムに組み込み、十分な冷却性能を得ることを確認した。

# 磁気駆動羽ばたき PAV における推力と翅構造の関係

平野 滉大、本田 崇  
(九工大)

Relationship between thrust and wing structure for magnetically driven wing Pico Air Vehicle

K. Hirano, T. Honda  
(Kyushu Inst. Tech.)

## はじめに

ドローンに代表される小型飛翔体より格段に小さな昆虫サイズの超小型飛翔体(PAV, Pico Air Vehicle)が注目されている。PAV に関する先行研究<sup>1)</sup>では、圧電素子による羽ばたき機構があり、ケーブルによる給電ではあるが飛翔に成功している。これに対し著者らは、永久磁石を内蔵した羽ばたき機構を外部磁界で駆動する方式について検討し、ワイヤレスかつバッテリーレス化を図るとともに飛翔にも成功した<sup>2)</sup>。本報告では、更なる小型化を図るための翅の設計指針の確立を目指し、推力と翅構造の関係を実験的に考察した。

## 素子構成と動作原理

Fig. 1 に素子の上面図を示す。胴体部は、厚さの異なる2種類のPIフィルム(25 $\mu$ m厚, 125 $\mu$ m厚)を貼り合わせた構造で、左右に25 $\mu$ m厚のPIフィルム(4.5mm長)による捻りバネを有する。捻りバネにはNdFeB磁石( $\phi$ 1mm $\times$ 2mm)を極性が逆になるよう配置した。翅は、V字形に配した棒(PI, PS)の裏側に、長方形のPIフィルム(5 $\mu$ m厚、10mm幅)を根本部分のみ接着し構成した。Fig. 2 に動作原理を示す。交流磁界により、磁石は磁気トルクを受け捻りバネを中心に回転振動し羽ばたき運動が起こる。このときの打ち上げと打ち下ろしの翅形状に起因する抗力差が上向きの推力となる。

## 実験結果と考察

本実験では、捻りバネの幅を0.75mm、0.625mm、0.50mm、翼長を4mmから9mmと変えて推力の測定を行った。その際、V字に配した棒の材質と長さを変え、羽ばたきの周波数特性の調整を行った。磁界強度は4.8kA/mとした。Fig. 3は、横軸に翼長、縦軸に各素子の最大推力を発生した周波数をプロットしたもので、各点の最大推力をカラーで示している。傾向を調べるためにすべての条件のデータを載せている。最大推力を発生した周波数は、羽ばたき運動の共振周波数とほぼ一致し、翼長が短くなると慣性モーメントが低下するため上昇した。ここで、推力が0.5mN以上の赤色の点に着目すると、同じ翼長でも、翼長が長い場合は周波数の分布の低いところにあるが、翼長が短くなると周波数の分布の高い方にシフトする傾向が見られる。これは推力の増大する条件が羽ばたき運動の共振だけでなく、翅のPIフィルムの曲げ振動の共振も関係しているためと考えられる。

## 参考文献

- 1) R.J. Wood, et al., Int. J. Robot. Res., Vol.31, pp.1292-1302, 2012.
- 2) 大村修平, 東優樹, 本田崇, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2016(0), 1A1-12b2, 2016.

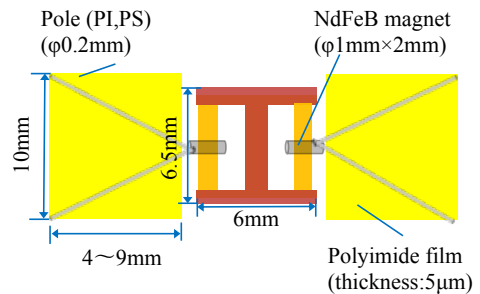


Fig. 1 Structure of flapping mechanism

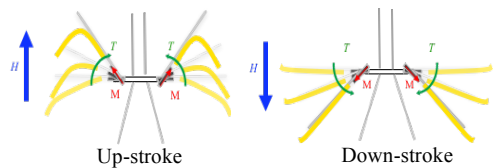


Fig. 2 Actuation principle

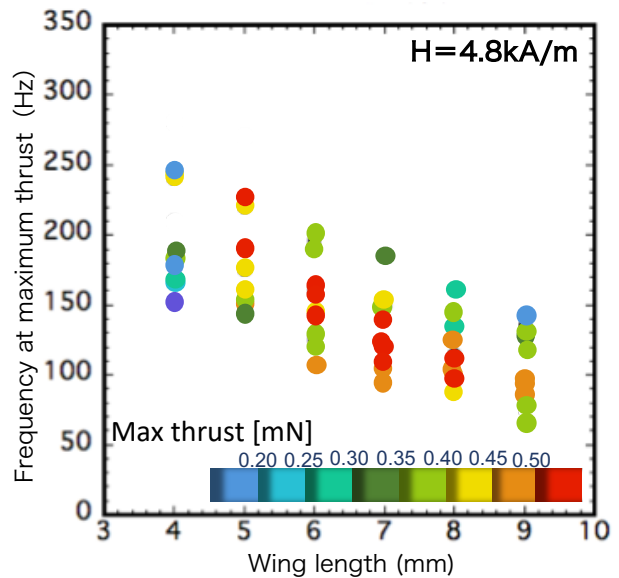


Fig. 3 Relation between frequency at maximum thrust and wing length.

# 永久磁石と電磁石を併用した薄鋼板の磁気浮上装置の開発 (電磁力の印加箇所に対する永久磁石配置の最適化)

ムハマドヌルハキミビンモハマドカマ、嘉山周汰、椎名敦紀、小川和輝、  
遠藤文人、成田正敬、加藤英晃  
(東海大学)

Development of electromagnetic levitation system for thin steel plate with electromagnets and permanent magnets (optimization of permanent magnet arrangement for applied position of electromagnetic force)

M. N. Hakimi, S. Kayama, A. Shiina, K. Ogawa, A. Endo, T. Narita, H. Kato  
(Tokai Univ.)

## はじめに

薄鋼板は搬送工程において通常ローラによる接触搬送が行われ、ローラとの接触による傷やめっき不良など表面品質の劣化が問題となっている。当研究グループでは、電磁石を設置していない部分に永久磁石を設置し、これらの磁力を浮上安定化のために有効利用した電磁石・永久磁石併用型薄鋼板磁気浮上搬送システムを提案している。一方、鋼板の浮上安定性が最良となる永久磁石の配置を実験的に求めることは、設置パターンが膨大にあるため不可能である。そこで、遺伝的アルゴリズムを適用し、鋼板の浮上安定性が向上する永久磁石配置の探索を行った<sup>1)</sup>。さらに著者らは鋼板のエッジ部に電磁石を設置した磁気浮上の搬送システムに対して永久磁石の設置による浮上補助を行い、配置の最適化を行っている<sup>2)</sup>。しかしながらエッジ部に設置した電磁石からの吸引力の印加位置に関する検討は行われていない。そこで本報告はエッジ部の電磁石位置を変更した際の永久磁石の最適化について検討を行った。

## 水平方向の位置決め制御システム

浮上した鋼板のエッジに対して水平方向から電磁石による吸引力を加え、非接触位置決め制御を行う。鋼板エッジ部の水平方向の変位計測にはレーザ式センサ(帯状のレーザ光の遮断量で変位を計測)を用いる。また、電磁石は浮上制御システムで使用したものと同一のものを使用する。鋼板の相対する2辺に沿って2個ずつ設置されており、各電磁石表面から鋼板エッジまでの距離を5mmに非接触位置決め制御する、水平方向位置決め制御用電磁石はFig. 2のように水平方向位置決め制御ユニットを可動することができる。そこで、水平方向電磁石の設置位置を変化させて最適化を行い、最適な永久磁石配置を遺伝的アルゴリズムによって探索した。

## 参考文献

- 1) 成田, 長谷川, 押野谷, 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, *J. Magn. Soc. Jpn.*, Vol. 37 (2013), No. 2, pp. 29-34
- 2) 鈴木, 木田, 小田, 成田, 加藤, 森山, 浮上方向と水平方向に設置した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における永久磁石の最適配置に関する研究, *日本 AEM 学会誌*, Vol. 26 (2018), No. 1, pp. 191-197

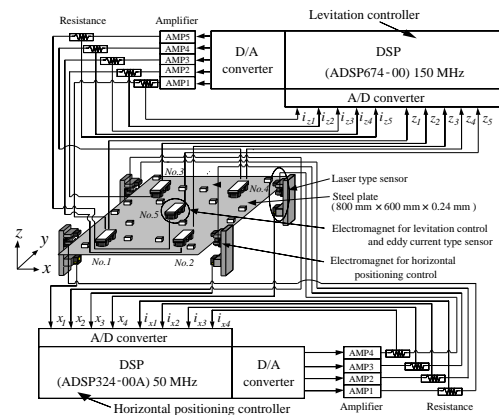


Fig. 1 Electromagnetic levitation control system for steel plate with permanent magnet.

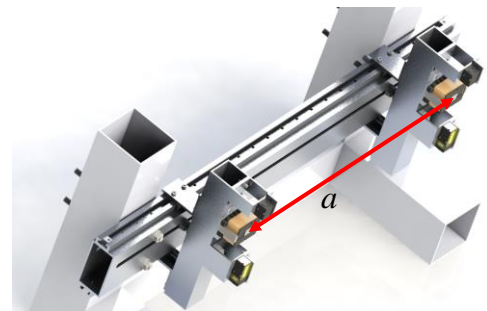


Fig. 2 Slide mechanism of electromagnet for horizontal positioning control.

# 湾曲させた柔軟鋼板の磁気浮上搬送システムの開発 (湾曲方向が搬送中の浮上性能に与える影響)

椎名敦紀、嘉山周汰、ムハマドヌルハキミビンモハマドカマ、小川和輝、成田正敬、加藤英晃  
(東海大学)

Electromagnetic levitation and transportation system for bent thin steel plate  
(effect of bending direction on levitation performance during transportation)

A. Shiina, S. Kayama, M. N. Hakimi, K. Ogawa, T. Narita, H. Kato  
(Tokai Univ.)

## はじめに

薄鋼板の製造ラインではローラによる接触搬送が行われている。しかし、ローラとの接触により傷や凹凸が生じ表面品質の劣化が問題となっている。そこで、電磁石の吸引力を利用した薄鋼板の非接触磁気浮上搬送が提案されている<sup>1,2)</sup>。当研究グループでは、これまでに、水平方向位置決め制御システムと湾曲磁気浮上システムを併用した磁気浮上システムの浮上性能について検討を行ってきた<sup>3)</sup>。本報告では板厚 0.24 mm の薄鋼板を浮上対象とし、薄鋼板の湾曲方向を変えて湾曲浮上させ、水平方向からの磁場による張力が薄鋼板に与える影響について実験的に検討を行った。

## 実験装置

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。薄鋼板は、Fig. 2 に示す通りフレーム内に設置された磁気浮上システムを装置ごとリニアモータで搬送させる。浮上対象は長さ 800 mm、幅 600 mm、厚さ 0.24 mm の長方形亜鉛めっき鋼板 (材質 SS400) とする。鋼板をアルミフレーム製装置内に設置した 5 か所のペアの電磁石を用いて非接触支持するために、鋼板の変位を 5 個の渦電流式非接触変位センサにより検出し、非接触位置決め制御を行う。鋼板水平方向 ( $x$  方向) の位置決めは Fig. 1 に示した通り、電磁石を鋼板端部の相対する 2 辺に対向するように 4 か所配置し、レーザ式センサを利用することによって水平方向の変位を非接触に測定する。

## 搬送実験

水平方向位置決め制御システムと湾曲磁気浮上システムを併用した磁気浮上システムが、薄鋼板の湾曲方向を変えて湾曲浮上させた際、浮上性能にどのような影響を与えるかの検証をするため、各電磁石がそれぞれ独立して制御をするような 1 自由度モデルを構築し、搬送実験を行った。このとき、水平方向電磁石に印加する定常電流値を 0.5 A、水平方向電磁石中心間距離を 550 mm とした。実験結果より、湾曲方向を変えて湾曲浮上させることで、薄鋼板の浮上特性が変化することを示した。

## 参考文献

- 1) 高林他, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 79 (2013), No. 801, pp. 1483-1494
- 2) 松島他, 日本 AEM 学会誌, Vol. 20 (2012), No. 1, pp. 220-225
- 3) 伊藤他, 日本磁気学会論文特集号, Vol. 1 (2018), No. 1, pp. 95-100

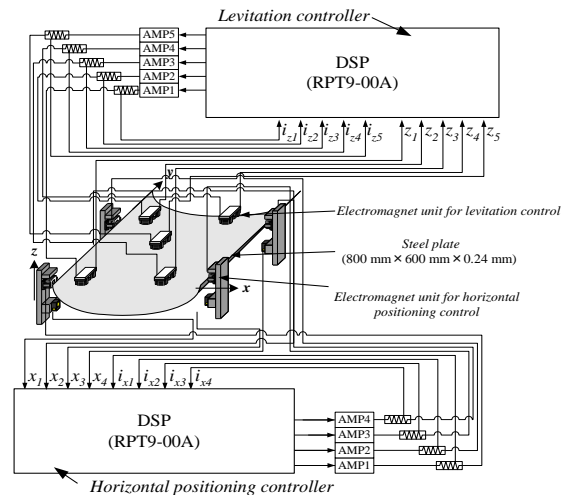


Fig. 1 Electromagnetic levitation control system.

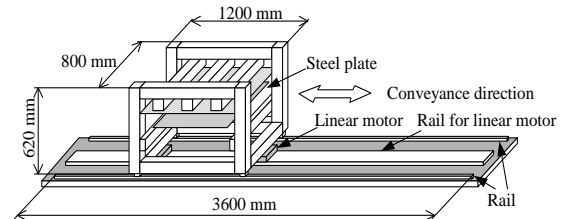


Fig. 2 Conveyance system of the steel plate.



# シームレスな極薄鋼板の磁気ガイドウェイシステムの開発 (外乱振動の入力に対する振動抑制効果)

中須賀峻、奈良輪祥泰、石原宙、山口遼、小川和輝、成田正敬、加藤英晃  
(東海大学)

Development of electromagnetic guideway for seamless ultra-thin steel plate  
(effect of vibration suppression against input vibration disturbance)

R. Nakasuga, Y. Narawa, S. Ishihara, R. Yamaguchi, K. Ogawa, T. Narita, H. Kato  
(Tokai Univ.)

## はじめに

製鉄所における連続鋼板製造ラインは長さ数 km にもおよび、その間連続鋼板はロールによる接触支持搬送されている。このようなロールによる連続鋼板の搬送ラインにおいて、鋼板とロールの接触による表面品質の劣化などの問題点が挙げられる。この問題を解決するため、当研究グループでは走行する連続鋼板のエッジ近傍に電磁力を印加することで鋼板の振動を抑制する非接触案内を検討した<sup>1)</sup>。また、有限要素法を用いてモード形状を算出し、モード形状の腹となる箇所にも永久磁石を配置してその有効性を検討した<sup>2)</sup>。しかし、電磁石に与える定常電流値を変更したときに連続鋼板がどのような振動特性を示すのか十分な検討は行われていない。そこで本報告では、電磁石に流す定常電流を変更した際の連続鋼板の振動特性について、マルチボディダイナミクスを用いて鋼板に外乱が入力された際の応答から検討を行った。

## 非接触案内形成装置

Fig. 1 に示すように電磁石を用いた非接触ガイドウェイの振動抑制効果を評価するため、連続鋼板の進行方向を模擬した装置を用いて検討を行った。長さ 6894 mm、幅 150 mm、厚さ 0.3 mm のステンレス鋼材製ベルトを溶接した連続鋼板を直径 700 mm、幅 154 mm のプーリから吊り下げた。このプーリをブラシレス DC モータで駆動することで、鋼板が走行する状況を再現することができる。また Fig. 2 に示すように、2 個の電磁石ユニットを連続鋼板に対抗するよう設置した磁気ガイドウェイを構築した。

## 鋼板形状解析

定常電流を変更した際の振動特性を評価するため、Fig. 1 の進行方向変更部に配置した制御を行う電磁石の定常電流を変更させて解析を行った。このとき電磁石が設置される位置のボディに電磁石ユニットからの復元力と減衰力が加わるとし、プーリの中心から 500 mm の位置にあるボディを 50 mm 変位させた状態から制御を行った際の応答から検討を行った。解析結果より電磁石のばね定数を増加させた場合に入力した外乱が短時間で収束したが、連続鋼板に高周波の振動が定期的発生した。これは電磁石の復元力の増加によって鋼板と電磁石の固有振動数が変化したためと考えられる。

## 参考文献

- 1) 柏原, 押野谷, 石橋, 日本 AEM 学会誌, Vol. 11, No. 4, (2003), 235-241.
- 2) Bessho, T., Ishihara, S., Narawa, Y., Yamaguchi, R., Narita, T., Kato, H., Actuators, Vol. 7, Issue3 (2018), 47.

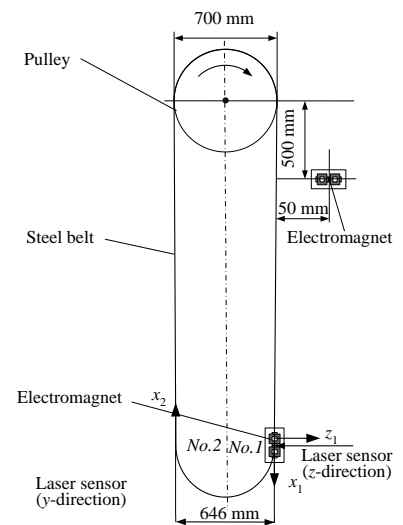


Fig.1 Schematic diagram of electromagnetic guideway for seamless ultra-thin steel plate

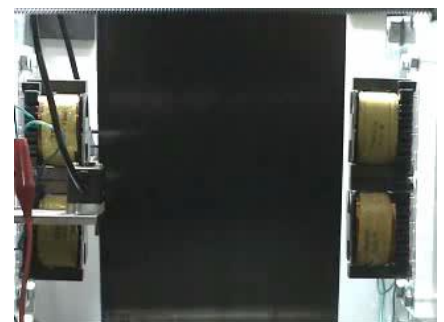


Fig. 2 Photograph of electromagnet for electromagnetic guideway

# 有限差分法を用いた湾曲薄鋼板の磁気浮上システムの動的解析に関する検討

船田孔明、宮崎陸、小川和輝、成田正敬、加藤英晃  
(東海大学)

Consideration on dynamic analysis of electromagnetic levitation system for bent thin steel plate with finite difference method

K. Funada, R. Miyazaki, K. Ogawa, T. Narita, H. Kato  
(Tokai Univ.)

## はじめに

薄鋼板は自動車、電化製品、缶などの製品として広く使用されており、近年、様々な産業の要請により表面品質向上が強く求められている。この要求に応じるために、鋼板生産ラインの搬送システムに磁気浮上を利用した非接触搬送技術の研究が活発に行われている<sup>1,2)</sup>。柔軟鋼板を磁気浮上させる場合、鋼板の自重によるたわみや、鋼板の復元力などによって弾性振動が発生し、これが安定した浮上を妨げる要因となる。著者らはこれまで磁気浮上システムにおける薄鋼板のたわみを求め浮上性能との関係性を明らかにしてきた。本報告では、浮上性能との関係性を明らかにするために、有限差分法を用いた湾曲浮上中の薄鋼板の静的解析手法について整理した上で、これを応用した湾曲磁気浮上鋼板の動的挙動に関する解析手法の構築を試みた。

## 有限差分法を用いた動的解析

Fig. 1 に鋼板と電磁石位置の関係を示す。浮上対象は、長さ  $a = 800$  mm、幅  $b = 600$  mm、厚さ  $h = 0.18$  mm の長方形の鋼板である。

湾曲磁気浮上システムの動的解析を行う前に、浮上中の鋼板の静的形状を解析した。解析によって得られた磁気浮上中の鋼板形状を Fig. 2 (電磁石角度  $0^\circ$ ) と Fig. 3 (電磁石角度  $13^\circ$ ) に示す。この解析では、5 点の電磁石部分を単純支持としてモデル化した。Fig. 3 より磁気浮上時の鋼板の形状を確認することができた。この鋼板形状解析のシミュレーションモデルに慣性項と減衰項の時間変化を加え、シミュレーションモデルを作成し、動的解析を行った。

## 参考文献

- (1) Matsumoto, S., Arai, Y., Nakagawa, T., IEEE Trans. Magn., Vol. 50, No. 11 (2014)
- (2) 米澤, 丸森, 成田, 加藤, 日本 AEM 学会誌, Vol. 24, No. 3 (2016), 137-142

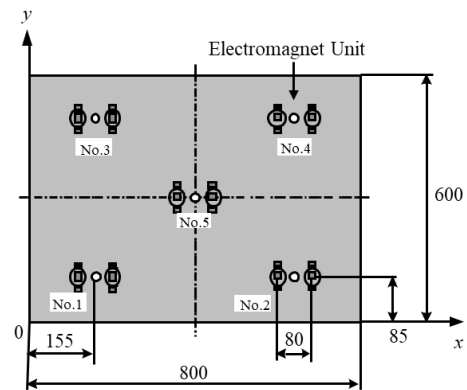


Fig. 1 Analysis model of electromagnet and steel plate

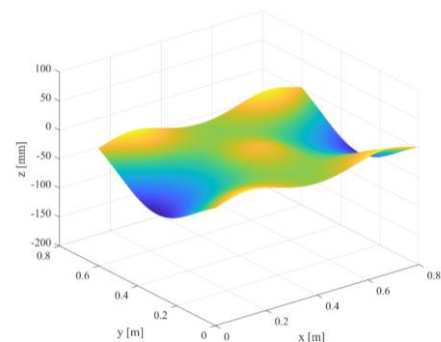


Fig. 2 Analysis result without bending levitation (Electromagnet angle  $0^\circ$ )

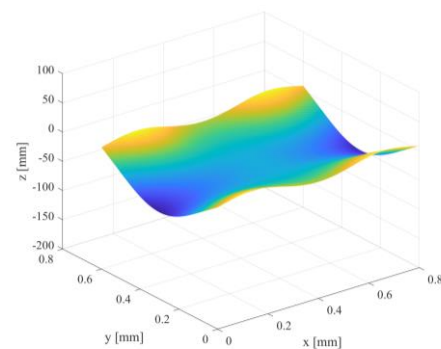


Fig. 3 Analysis result with bending levitation (Electromagnet angle  $13^\circ$ )