

# Market Research on Electrical Motor and Power Electronics Technology and Magnetic Material Multi-Scale Analysis

Keisuke Fujisaki\*, Tatsuya Hosotani\*\*, Takahiro Urakabe\*\*\*, Yota Takamura\*\*\*, Yasushi Matsumoto\*\*\*\*

(Toyota Technological Institute\*, Murata Manufacturing Co., Ltd.\*\*, Tokyo Institute of Technology\*\*\*, Fuji Electric Co., Ltd.\*\*\*\*)

電気モータで駆動する自動車や飛行機のEV社会，パワーエレクトロニクス技術を介してエネルギーが利用されるパワエレ社会が進展している。図1は，2030年のEVやその関連装置およびパワーエレクトロニクス装置の世界的市場規模を調査した結果を示したものである。エアコンおよびEVに大きな市場が見込めるが，特にワイヤレス充電システムの市場規模が著しい。

そこには多くの磁性材料が使用されており，これまでにない新たな動作領域での磁性材料が必要とされる。特にGaN, SiCデバイスによる高周波大電力動作に対する新たな磁性体へのニーズは高い。そこでは，MHz, 100 kWを超えるものも予想され，変位電流と磁気飽和による非線形現象との同時発生が起こりえる。そうした材料開発およびパワーエレクトロニクス回路での利用技術では，磁気の根源・物理現象に根差した解析技術つまり図2のごとき磁性体マルチスケール解析技術を踏まえての開発，研究が必要と思われる<sup>2,3)</sup>。

これまでのエネルギー系の商用周波数での磁気論は，100年以上の時間をかけて磁気関係者が量子論や磁区構造論，多結晶論などを陽に表すことなく電気関係者に提示してきた。しかし高周波大電力動作が急速に実用化しようとしている現在，ある意味不完全な材料，開発途上の材料が，電気関係者が利用しなければいけない状況になっている。パワエレ磁気では使用する部位によって動作している磁気特性が異なるため，磁気関係者にはその状況であることを踏まえていただくと同時に，早急な材料開発及び利用技術の深展のための支援技術となる各磁気現象における解析技術について熟知すべきと思いで，本シンポジウムを開催する。

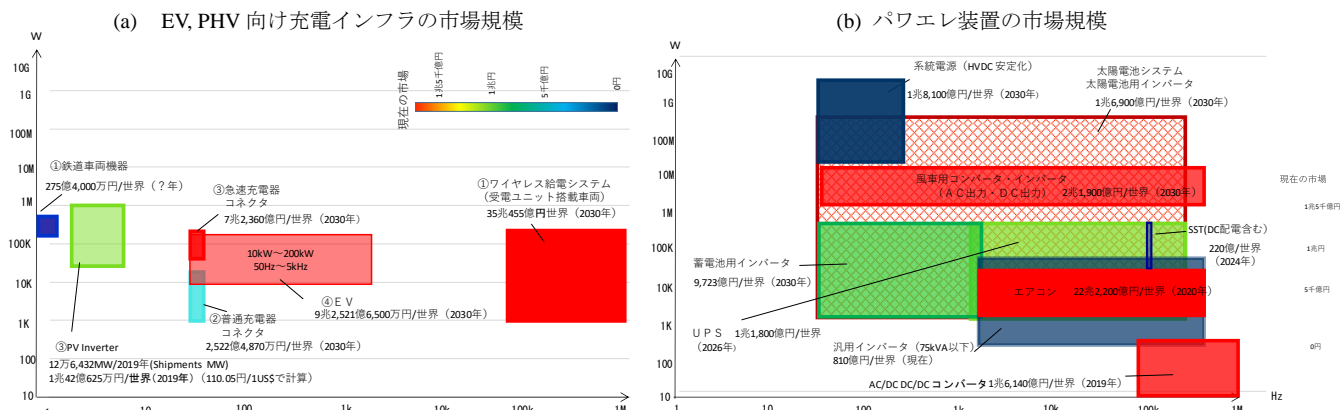


図1. 世界市場調査結果 (2030年の予測)<sup>1)</sup>

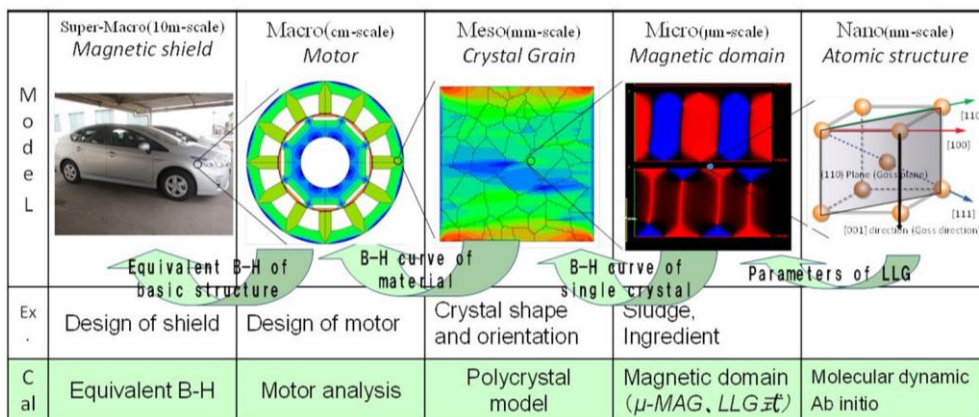


図2. 磁性体マルチスケール解析技術<sup>2,3)</sup>

## Reference

- 1) 藤崎敬介, 細谷達也, 浦壁隆浩, 高村陽太, 松本康, 令和4年電気学会全国大会, 2022.3.21-23, オンライン開催.
- 2) Editor: Keisuke Fujisaki, "Magnetic Material for Motor Drive System" (2019), Springer-Nature, 2019.12.
- 3) 藤崎敬介編著「モータ駆動システムのための磁性材料活用技術」コロナ社, 2018.9

# 講演取消

## Investigation of iron-rich FeSi alloys by first-principles phase field and special quasirandom structure methods

Kaoru Ohno<sup>1,2</sup>, Riichi Kuwahara<sup>3</sup>, Ryoji Sahara<sup>2</sup>, Yoshiyuki Kawazoe<sup>4</sup>, and Keisuke Fujisaki<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Engineering, Yokohama National University, Yokohama 240-8501, Japan

<sup>2</sup>Research Center for Structural Materials, National Institute for Materials Science, Tsukuba 305-0047, Japan

<sup>3</sup>Dassault Systèmes K. K., ThinkPark Tower, Osaki, Shinagawa-ku, Tokyo 141-6020, Japan

<sup>4</sup>New Industry Creation Hatchery Center, Tohoku University, Sendai 980-8579, Japan

<sup>5</sup>Department of Advanced Science and Technology, Toyota Technological Institute, Nagoya 468-8511, Japan

Fe-6.5 wt% Si has special magnetic characteristics as zero magnetostriction, low magnetic anisotropy, low iron-loss, and high magnetic permeability.<sup>1,2)</sup> It is possible to infer that the low iron-loss is due to the increase of electric resistance with silicon, and that the high magnetic permeability is due to the reduction of magnetic anisotropy. However, it has not been discussed enough in the literature why zero magnetostriction and low magnetic anisotropy appear at the special composition of the FeSi alloy. When magnetic materials are processed into devices such as motors, transformers, and inductors, mechanical stress applied results in residual stress, which deteriorates the magnetic properties. Therefore, the magnetic material which shows zero magnetostriction is very attractive. If a material with zero magnetostriction can be developed, devices with low iron-loss and high magnetic permeability can be realized, leading to miniaturization and high efficiency, which can contribute to realizing power electronics society.

In this study<sup>3)</sup>, coarse grained phase morphologies of iron-rich region of FeSi alloys at 1050 K are investigated by using first-principles phase field (FPPF) (Fig. 1) and special quasirandom structure (SQS) (Fig. 2) methods without relying on any experimental or empirical information. From the free energy comparison, we find that, for the Si concentration less than 25 at%, a solid-solution-like homogeneous phase is most stable, although a random pattern in nm scale consisting of B2 Fe<sub>4-x</sub>Si<sub>x</sub> and D0<sub>3</sub> Fe<sub>3</sub>Si phases may appear at 12.5 at% Si at somewhat lower temperatures. We make a conjecture that, around 12.5 at% Si, such a random pattern in nm scale is the origin of the zero magnetostriction and low magnetic anisotropy. This solves a long-standing problem of the experimentally observed zero magnetostriction at 6.5 wt% Si. On the other hand, for the Si concentration slightly larger than 25 at%, FeSi alloys prefer two-phase coexistence of the D0<sub>3</sub> Fe<sub>3</sub>Si phase and the B2 FeSi phase. All these findings are in good accordance with the available experimental evidence.

### References

- 1) M. Enokizono and K. Narita, *Jpn. J. Appl. Phys.* **23** (1984) 1020.
- 2) Y. Takada, M. Abe, S. Masuda, and J. Inagaki, *J. Appl. Phys.* **64** (1988) 5367.
- 3) K. Ohno, R. Kuwahara, R. Sahara, T. N. Pham, S. Bhattacharyya, Y. Kawazoe, and, K. Fujisaki, *ISIJ Int.* **63** (2023) 553.

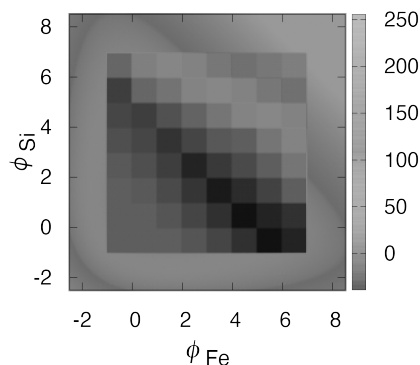


Fig. 1 2D Free Energy Map of the FPPF Method

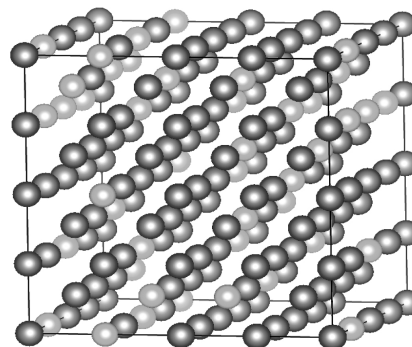


Fig. 2 Random Atomic Configuration in the SQS Method

## A trial to evaluate the magnetic parameters in the LLG equation from the first principles

A. Sakuma  
(Tohoku Univ.)

Ultimate purpose of the first principles calculations is to predict physical and/or chemical properties, in a quantitative level, of materials and then to design newly developed materials. To achieve this mission, the first stage we should attain is to reproduce the measured properties of solids and molecules. However, as is widely recognized in materials science, even this level is currently hard to be reached. One reason lies in a fact that the material characteristics are governed not only by their microscopic (physical) features but also by macroscopic properties which in many cases dominate the performance of industrial materials. In the current stage, the first principles approach can contribute only to the former (microscopic) properties which can be treated based on the quantum physics. Especially, in the fields of magnetism and superconductivity, the first principles studies are limited to the subjects related to the formation of the order parameters, magnetization and macroscopic wavefunction, respectively. Once an order parameters is built up through the phase transition, the macroscopic properties can be handled using the order parameter as a phenomenological parameter as in the Ginzburg-Landau theory for superconductivity and the Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) equation for micromagnetics. In a ferromagnetic system, for example, spin operators can be treated as classical vectors,  $\mathbf{M}$  in the magnetic Hamiltonian,  $H(\mathbf{M})$ , and the LLG equation is given by

$$\dot{\mathbf{M}} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff} + \left(\frac{\alpha}{M}\right) \dot{\mathbf{M}} \times \mathbf{M}, \quad \mathbf{H}_{eff} = -\frac{\partial H(\mathbf{M})}{\partial \mathbf{M}}$$

In this stage, the first principles calculation can contribute to provide the magnetic parameters, such as magnetization  $\mathbf{M}$ , exchange constant  $J_{ij}$ , anisotropy constant  $K_i$ , and the Gilbert damping constant  $\alpha$ . One should note here that first principles study can, in principle, determine these parameters only at  $T = 0$ , whereas the desired properties are mainly at finite temperatures.

To overcome this situation, we have recently made a trial to calculate the temperature dependence of the magnetic parameters,  $M(T)$ ,  $A(T)$ ,  $K(T)$  and  $\alpha(T)$ , within the frame of the first principles technique.<sup>1-4)</sup> A method for  $M(T)$  and the anisotropy constant  $K(T)$  at finite temperature have been developed by Staunton *et al.*<sup>5)</sup> based on the functional integral method combined with the disordered-local-moment approach. We extend this method to analyze exchange stiffness constant  $A(T)$  and  $\alpha(T)$ , and further developed a perturbation theory and linear response theory at  $T \neq 0$ . Here, we evaluate  $A(T)$  by estimating the excitation energy of the spirally twisted spin structures.

In this symposium, we will present the theoretical framework and show some calculated results of the magnetic parameters of transition metals and alloys

### References

- 1) A. Sakuma and D. Miura, J. Phys. Soc. Jpn., **91** (2022) 084701.
- 2) S. Yamashita and A. Sakuma, J. Phys. Soc. Jpn., **91** (2022) 093703.
- 3) R. Hiramatsu, D. Miura and A. Sakuma, Appl. Phys. Express, **15** (2021) 013003.
- 4) R. Hiramatsu, D. Miura and A. Sakuma, J. Phys. Soc. Jpn., **92** (2023) 044704.
- 5) J. B. Staunton, L. Szunyogh, A. Buruz, B. L. Gyorffy, S. Ostanin, and L. Udvardi, Phys. Rev. B **74** (2006) 144411.

# Magnetic moment and magnetocrystalline anisotropy energy of Fe, Ni, and Co using first-principles calculations

F. Akagi<sup>1,2</sup>, R. Namki<sup>1</sup>, and T. Yayama<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Electrical Engineering and Electronic, Kogakuin University, Tokyo, 163-8677, Japan

<sup>2</sup>Department of Applied Physics, School of Advanced Engineering, Kogakuin University, Tokyo, 163-8677, Japan

In recent years, with the development of computer technology, research and development of magnetic materials and devices has increasingly relied on various computer simulation methods. Representative methods include first-principles calculations at the atomic level, micromagnetic calculations using the Landau–Lifshitz–Gilbert (LLG) equation at the micro level, and electromagnetic field calculations using Maxwell equations that can handle sizes larger than the millimeter level. First-principles calculations analyze electronic states and energies. For example, in the field of magnetism, saturation magnetization (magnetic moment), magnetocrystalline anisotropy energy (MAE), and exchange stiffness can be obtained without using experimental values. Additionally, M-H loops and magnetization behavior can be obtained using the LLG equation. Electromagnetic field analysis using Maxwell equations can analyze the magnetic flux flow due to the interaction of electromagnetic fields. Thus, multiscale analysis, where atomic-level analysis information (magnetic characteristics) is input to LLG equation, and the analysis information (M-H loops) of LLG equation is input to Maxwell equations, will become increasingly important in the future.

Therefore, in this study, to obtain the input parameters of the LLG equation from first-principles calculations, the magnetic moments of Fe, Ni, and Co [ $\mu_B/\text{atom}$ ] ( $\mu_B = 1.165 \times 10^{-29}$  [Wbm]) and the anisotropy (MAE [eV], easy axis, and hard axis) are presented.

Density functional theory–based first-principles calculations were performed using the Vienna Ab initio Simulation Package (VASP).<sup>1)</sup> The optimized structures of the bcc-Fe, fcc-Ni, and hcp-Co are shown in Figs. 1(a), 1(b), and 1(c), respectively. Here, a generalized gradient approximation with a PBE type exchange correlation functional was utilized. The wave function was represented by a plane wave basis set with a cutoff energy of 550 eV, and the k-points mesh was set to  $16 \times 16 \times 16$  for Fe and Ni, and  $16 \times 16 \times 10$  for Co. While calculating the MAE, the convergence conditions for the self-consistent field method were  $10^{-9}$  eV for Fe and Co and  $10^{-10}$  eV for Ni. The spin–orbit interaction was also considered.

The MAE [eV] is generally defined as the difference between the energy in the hard-axis direction and that in the easy-axis direction. In this study, the MAE was calculated as  $E_{111} - E_{001}$  for Fe,  $E_{001} - E_{111}$  for Ni, and  $E_{0001} - E_{2\bar{1}\bar{1}0}$  for Co. Table 1 shows the calculation results of the magnetic moment and the MAE of Fe, Ni, and Co. From this, we find that the magnetic moments agree with the experimental results. The MAE of Fe is greater than the experimental result, and that of Co is less than the experimental result, which are the same in terms of the order of magnitude. Furthermore, the easy axes of Fe and Co agree with the experimental results. In contrast, the MAE of Ni differs from the experimental results in terms of the sign. In other words, the [100] direction is the easy axis and the [111] direction is the hard axis.

## Reference

- 1) G. Kresse and J. Furthmüller, *Phys. Rev. B*, **48**, (1996) 11169.
- 2) [https://www.toei-si.jp/yshimada/shimada\\_note\\_04.html](https://www.toei-si.jp/yshimada/shimada_note_04.html).

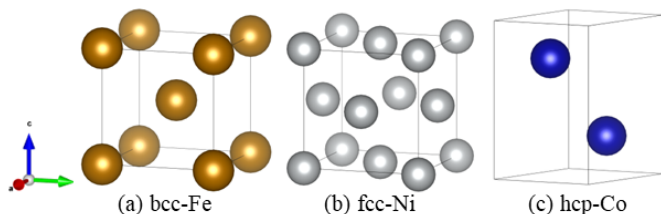


Fig. 1 The optimized structures of the bcc-Fe, fcc-Ni, and hcp-Co

Table 1 Magnetic moment and MAE of Fe, Ni, Co.

	$\mu$ [ $\mu_B/\text{atom}$ ]		MAE [eV]	
	Calc.	Exp.	Calc.	Exp. <sup>2)</sup>
Fe	2.20	2.20	$5.15 \times 10^{-6}$	$1.99 \times 10^{-6}$
Ni	1.60	1.60	$8.91 \times 10^{-6}$	$-4.84 \times 10^{-7}$
Co	0.63	0.60	$1.41 \times 10^{-5}$	$8.21 \times 10^{-5}$

$\mu_B = 1.165 \times 10^{-29}$  [Wbm]

# Magnetoelastic Interaction Modeling of Polycrystalline Magnetic Materials

Tetsuji Matsuo  
(Kyoto University)

The development of highly efficient electric machines e.g. motors has been required in these days. Because the energy loss of iron-core material can increase under the mechanical stress, several magnetization models have been proposed to represent the stress dependence of magnetization properties of iron-core materials. Most of those are phenomenological models, which require measured data to determine their model parameters. However, it is often difficult to measure magnetic properties under a wide range of operational conditions. A physical magnetization model is accordingly required to predict the stress-dependent properties only from basic material constants without using measured data.

One of the difficulties in constructing a physical model is the polycrystalline nature of iron core materials. Taking account of the polycrystalline nature, we have developed a multiscale physical model, called multi-domain particle model (MDPM) to represent the macroscopic magnetization property based on the energy minimization. The MDPM successfully predicted the stress-dependent magnetization properties from material constants without using measured data under the mechanical stress.

The MDPM consists of an assembly of multi-domain particles [Fig. 1(a)]. The magnetization state in a particle is represented by the volume ratios and the magnetization directions of magnetic domains, which are determined by locally minimizing the total magnetic energy consisting of the Zeeman, anisotropy, magnetostatic, and magnetoelastic energies. The variation in the volume ratio is resisted by a pinning field, which causes the hysteresis loss.

The hysteresis loss of non-oriented silicon steel sheet 50A470 was measured and simulated with and without compressive stress of 40 MPa [Fig. 1(b)]. The hysteresis loss increases with the compressive stress significantly. The difference in the loss property between the rolling direction (RD) and transverse direction (TD) decreases under compressive stress. Using an anisotropic pinning field, the MDPM accurately predicts the stress-dependence of hysteresis loss.

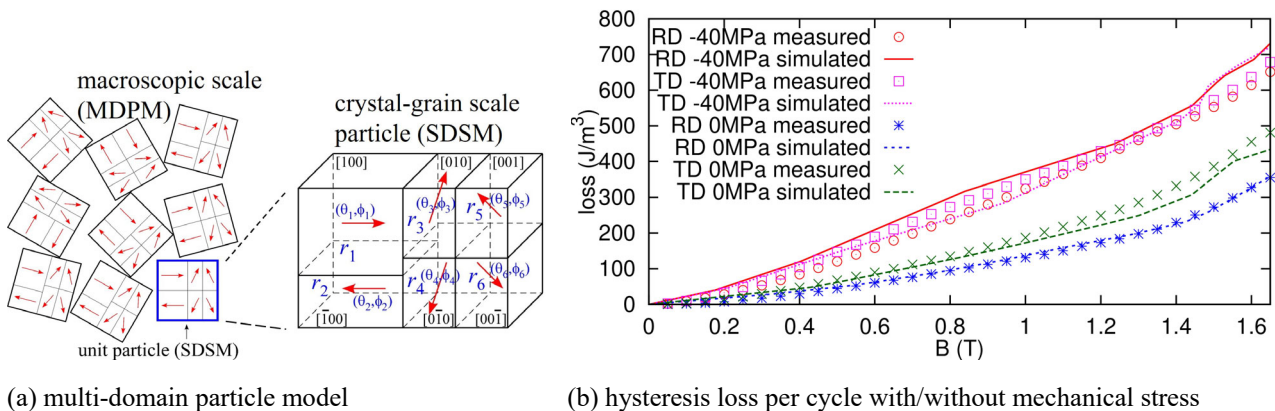


Fig. 1. Stress-dependent magnetization property simulation using MDPM

## Reference

- 1) T. Matsuo, Y. Takahashi, and K. Fujiwara, Pinning field representation using play hysterons for stress-dependent domain-structure model, *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 499, 166303, 2020.
- 2) T. Matsuo, Y. Takahashi, K. Fujiwara, Anisotropic vector play model and its application in magnetization analysis, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 59, 7300204, 2023.

# Analytical modeling of Litz wire copper loss for high-frequency high-efficiency power magnetic device design

K. Umetani<sup>1</sup>, S. Kawahara<sup>1</sup>, M. Ishihara<sup>1</sup>, E. Hiraki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Graduate school of Environmental, Life, Natural Science and Technology, Okayama University<sup>1</sup>

Recently, the miniaturization of power supply circuits has been achieved by the high-frequency operation of switching power converters owing to the high-speed switching performance of recent switching devices. However, the high-frequency operation increases the power loss in the power magnetic devices, such as power transformers and inductors, which are emerging as obstacles to further miniaturization.

The power loss of the power magnetic devices can be classified into iron and copper losses. As both losses increase due to the high-frequency operation, intensive research is performed targeting these two losses. However, unlike the reduction of the iron loss, the reduction of the copper loss is difficult to be achieved through material development, because little possibility can be expected to find a material that replaces the copper. Therefore, a reduction of the copper loss should be done by optimizing the wire structure.

Particularly, the Litz wire has been widely utilized for high-frequency applications. The Litz wire is made of many thin copper strands twisted in multiple levels, as illustrated in Fig. 1. The strands are twisted so that each strand equally experiences every position in the Litz wire cross-section, which mitigates the eddy current generation inside the Litz wire and reduce the copper loss in the high-frequency operation. Because of this simple mechanism, only the strand diameter has been long regarded to mainly affect the copper loss characteristics. However, a recent study [1] revealed that the eddy current suppression characteristics can significantly deteriorate in large-diameter Litz wires when compared among the Litz wires with the same strand diameter, as shown in Fig. 2. This indicates that the detailed optimal design should be sought depending on the specifications of the Litz wire.

The copper loss prediction of the Litz wire has long been performed on the FEM analysis [2]. However, in recent high-frequency and high-power applications, the Litz wire needs to twist more than 1000 strands with a diameter of less than 40 $\mu$ m. Due to its complicated structure, the optimal design of Litz wire has been practically difficult to be analyzed and sought by FEM analysis.

To overcome this difficulty, the authors investigated the analytical copper loss modeling of the Litz wire and succeeded to propose a fully analytical copper loss model made only of physical constants and physically measurable parameters of the Litz wire [3]. With the help of this model, the deterioration mechanism of the eddy current suppression characteristics in large-diameter Litz wire was elucidated. This presentation aims to give a full perspective of our current state of study on the analytical copper loss modeling of the Litz wire as well as the usefulness of the Litz wire design through analyzing the deterioration mechanism of the copper loss suppression effect in large-diameter Litz wire.

## Reference

- 1) S. Kawahara *et al.*, Proc. IEEE Energy Conversion Congr. Expo., (2020), 1-7.
- 2) E. Plumed *et al.*, Proc. Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc., (2018), 3479-3484.
- 3) K. Umetani *et al.*, IEEE Trans. Ind. Appl., 57, 3 (2021), 2407-2420.

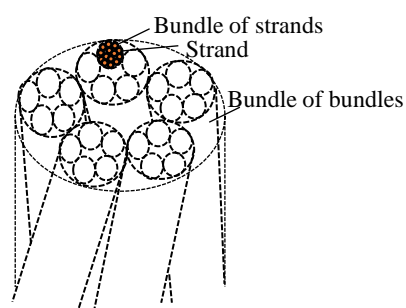


Fig. 1 Multi-level twisting structure of Litz wire.

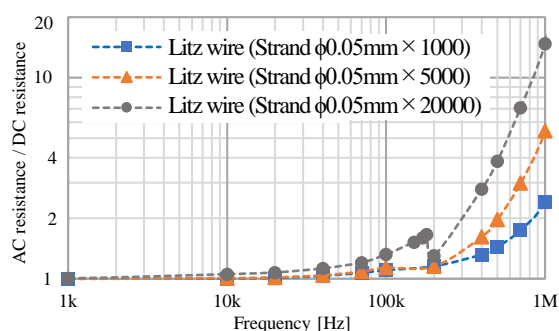


Fig. 2 Measured ratio of ac/dc resistance of Litz wires of same strand diameter.

# Quasi-static electromagnetic eddy current analysis based on Darwin model considering both inductance and capacitance effects

H. Kaimori

Science Solutions International Laboratory, Inc.

In recent years, advances in SiC and GaN have led to an increasing trend toward higher frequencies in power electronics devices. High frequency inductors, transformers, and capacitors are becoming problematic due to the effects of parasitic capacitance and parasitic inductance as the inverter carrier frequency and drive frequency become higher. Specifically, the increase in equivalent resistance due to the skin effect inside conductors caused by high frequencies, coupling due to magnetic fields and stray capacitance between neighboring conductors, and so on. Although these effects can be determined by measurement, As a countermeasure, it is desirable to utilize electromagnetic field analysis that does not require prototyping. Conventional quasi-magnetostatic field analysis is capable of frequency-domain and time-domain electromagnetic field analysis that takes into account eddy currents and nonlinear magnetic properties of magnetic materials, but it cannot handle dielectrics because its formulation neglects displacement currents. On the other hand, the Darwin model, which has been attracting attention in recent years, can also take quasi-electrostatic fields into account, so it can be applied from low frequencies to the frequency range where electromagnetic waves do not occur.

We have been developed new types of the  $A-\phi$  formulations of the finite element method in the frequency-domain and time-domain 1),2). The methods achieve the low-frequency stability at low frequencies by taking into account the Coulomb-type gauge condition. The two types of the methods have been developed: one without additional variables and one that defines redundant variables to improve convergence characteristics in high-frequency range. The matrix equations can be symmetric. In addition, the method can also handle nonlinear magnetic material properties and coupling electric circuit as well as conventional quasi-magnetostatic analysis.

Fig. 1 shows the analysis model of the gapped core inductor model in which a coil of solid strands doubly wound in a solenoidal shape is wound around a gapped core is used to analyze the effect of parasitic capacitance between the strands. A 1 mm diameter strand of wire elongated from the mesh boundary was helically wound 20 turns from the bottom right to the top on a 10 mm diameter core, and then 20.5 turns were wound from the outside to the bottom, shifting half a pitch of the radius, to the bottom left, extending to the mesh boundary. The conductivity of the conductor was set to  $5.7 \times 10^7$  S/m. The relative permittivity of all components was set to 1. The core was given a relative permeability of 1500 as ferrite, and a 1 mm gap is provided in the center of the coil interior. Fig. 2 shows the electric density distribution at 85kHz solved by frequency-domain analysis. Apparently, it can be seen that a large electric field is generated between the inner and outer strands, especially at the bottom of the coil where the winding starts and ends.

## Reference

- 1) H. Kaimori, *et al.*, Progress in Industrial Mathematics at ECMI 2021, 463-469, 2022.
- 2) H. Kaimori, *et al.*, COMPUMAG 2023, PC-A1:13, May 22-26, 2023, Kyoto.

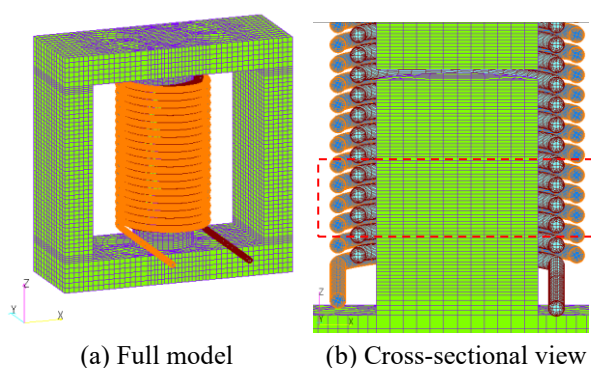


Fig. 1. Gapped core inductor model.

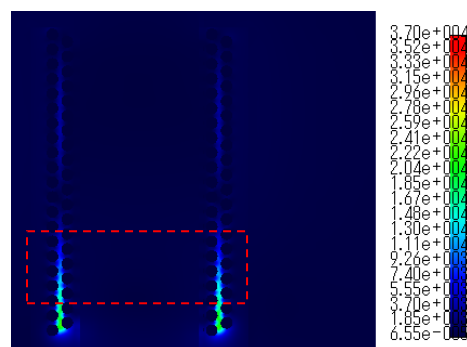


Fig. 2. Electric density distribution at 85kHz.



# 高速往復運動用リニアアクチュエータ (磁石比率が推力に及ぼす影響に関する基礎的検討)

黒田純平, 木村海斗, 田中雅人, 内野大悟, 小川和輝\*<sup>1</sup>,  
加藤太朗\*<sup>2</sup>, 池田圭吾\*<sup>3</sup>, 遠藤文人\*<sup>4</sup>, 成田正敬, 加藤英晃  
(東海大学, \*<sup>1</sup>愛知工科大学, \*<sup>2</sup>東京工科大学, \*<sup>3</sup>北海道科学大学, \*<sup>4</sup>福岡工業大学)

## Linear Actuator for High-Speed Reciprocating Motion

(Fundamental Consideration of Thrust on Ratio of Permanent Magnet Size)

J. Kuroda, K. Kimura, M. Tanaka, D. Uchino, K. Ogawa, T. Kato,  
K. Ikeda, A. Endo\*, T. Narita, H. Kato

(Tokai Univ., \*<sup>1</sup>AUT., \*<sup>2</sup>. Tokyo Univ. Tech, \*<sup>3</sup>Hokkaido Univ. Sci., \*<sup>4</sup> FIT)

### はじめに

機械における直線運動は機構などによって回転運動から変換されている。機構による直線運動は、運動性能が機構の形状に左右される。これらの機構をリニアアクチュエータに置き換えることでダイレクトドライブが可能となり、高効率な直線運動が実現できる。交流で動作するリニアアクチュエータは構造が複雑になりやすく、高速運転時に交流の周波数を上げると、コイルのインダクタンスにより推力特性が劣化するという問題がある<sup>(1)</sup>。そこで当研究グループでは、高速往復運動に適した、ローレンツ力を利用したボイスコイルモータ型のリニアアクチュエータを提案します。本報告では電磁界解析を利用したアクチュエータ内の永久磁石比率が推力特性に与える影響について基礎的検討を行った。

### アクチュエータ内の磁石比率の変更

Fig. 1 に新たに作成したリニアアクチュエータの概略を示す。同図のアクチュエータは永久磁石とソレノイドコイルで構成されている。ソレノイドコイルに電圧を印加することでローレンツ力が発生し軸方向にコイルが駆動する。コイルの変位量を 0 mm から 10 mm に設定し、コイルを 1 mm 毎に変位させた際の推力と磁束の様子を電磁界解析によって求めた。解析によって得られた変位 0 mm における磁束密度のベクトルプロットを Fig. 2 に示す。同図より磁束がコイルに直交しており、各永久磁石によって磁束のループが形成されていることが分かる。今回の解析によって、各変位点の推力を平均すると、約 68.6 N の推力を得ることができた。

### 参考文献

- 1) Shi Kejian et al. "Design and simulation analysis of permanent magnet linear motor actuator used in circuit breaker." 2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE) (2020).

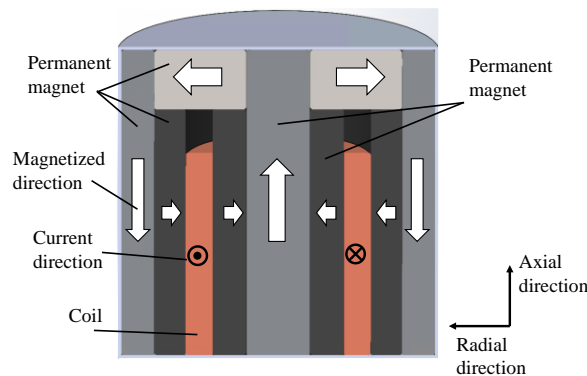


Fig. 1 Analysis model of linear actuator.

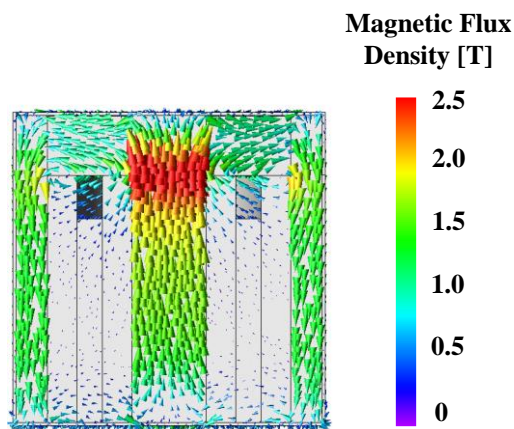


Fig. 2 Vector plot of magnetic flux density

# デュアルハルバツハ配列を用いた高速往復運動用 リニアアクチュエータ (固定子の永久磁石形状に関する基礎的検討)

田中雅人、木村海斗、黒田純平、内野大悟、小川和輝、  
加藤太朗、池田圭吾、遠藤文人、加藤英晃、成田正敬  
(東海大学、\*<sup>1</sup>愛知工科大学、\*<sup>2</sup>東京工科大学、\*<sup>3</sup>北海道科学大学、\*<sup>4</sup>福岡工業大学)

Linear Actuator for High-Speed Reciprocating Motion Using Dual-Halbach Array  
(Fundamental Consideration on Shape Permanent Magnet Array in Stator)

M. Tanaka, K. Kimura, J. Kuroda, D. Uchino, K. Ogawa, T. Kato, K. Ikeda, A. Endo, H. Kato, T. Narita  
(Tokai Univ., \*<sup>1</sup>Aichi Univ. Tech., \*<sup>2</sup>Tokyo Univ. Tech., \*<sup>3</sup>Hokkaido Univ. Sci., \*<sup>4</sup>FIT)

## はじめに

現在、機械製品において直線運動を利用するシチュエーションは非常に多い。具体例としては工作機械やレシプロエンジンにおける吸排気バルブの開閉、コンプレッサなどが挙げられる。しかし、このような機械製品はカムシャフトやギア、チェーンなどの機械部品による回転運動から直線運動を生み出すが、製品の大型化や性能依存、機械損失を招いてしまう。そこで、著者らは直線往復運動を可能とした円筒型リニアアクチュエータ<sup>1)</sup>の実現を目的として、固定子の永久磁石配列にデュアルハルバツハ配列を用いたリニアアクチュエータを提案し検討を行っている。<sup>2)</sup>本報告は、永久磁石形状を変化させた際に推力特性に与える影響について検討を行った。

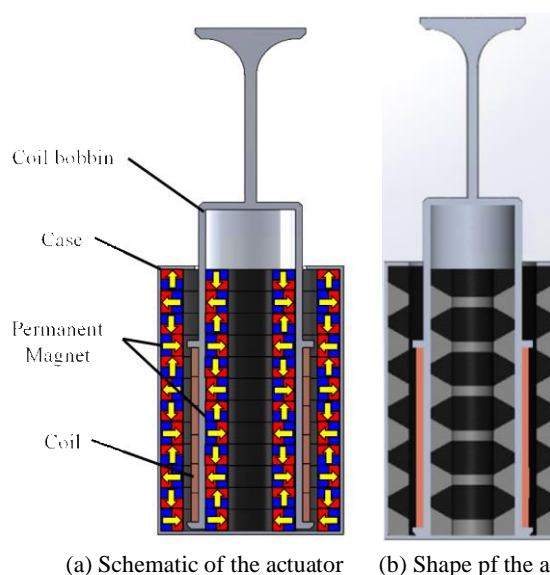


Fig. 1 Analysis model of linear actuators with dual Halbach arrays

## 電磁界解析を用いた永久磁石形状と推力に関する検討

Fig. 1(a)にハルバツハ配列を用いたリニアアクチュエータの概略図を示す。このリニアアクチュエータは永久磁石を配列した固定子と可動子となるコイルで構成され、ローレンツ力により可動子を駆動する。可動子の変位量は最大2.4mmとし、1ステップ0.1mmごとに上下方向へ変位させた際の推力を電磁界解析によって求めた。アクチュエータ内に配置する永久磁石の断面形状を台形としたモデルをFig. 1(b)に示す。解析によって得られた変位0mmにおける磁束密度のベクトルプロットをFig. 2に示す。永久磁石の断面形状を台形としたモデルでも推力を発生させることができた。

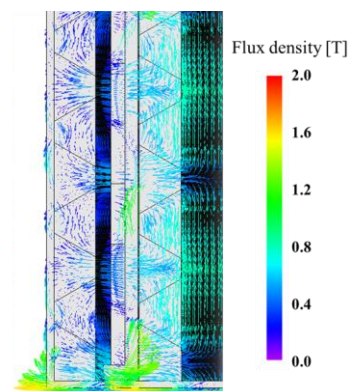


Fig. 3 Vector plot of magnetic flux density

## 参考文献

- 1) 李友行, 牧直樹. 円筒型リニア同期モータの特性解析と推力脈動改善. 電気学会論文誌, Vol. 126, No. 4, pp.519-524, No. 9, (2001).
- 2) Kuroda, Jumpei et al. 'Basic Study on High Precision Positioning in Electromagnetic Valve Drive System for Improving Internal Combustion Engine Using Linear Actuator'. 1 Jan. 2023 : S333 - S341.

## 吸排気バルブ駆動用リニアアクチュエータの研究 (アクチュエータ内の磁石配置に関する基礎的検討)

木村海斗、黒田純平、田中雅人、内野大悟、小川和輝<sup>\*1</sup>、  
加藤太朗<sup>\*2</sup>、池田圭吾<sup>\*3</sup>、遠藤文人<sup>\*4</sup>、成田正敬、加藤英晃  
(東海大学、<sup>\*1</sup>愛知工科大学、<sup>\*2</sup>東京工科大学、<sup>\*3</sup>北海道科学大学、<sup>\*4</sup>福岡工業大学)

A Study on Linear Actuator for Intake and Exhaust Valve Drive  
(Fundamental Consideration of Permanent Magnet Arrangement in Actuator)

K. Kimura, J. Kuroda, M. Tanaka, D. Uchino, K. Ogawa<sup>\*1</sup>, T. Kato<sup>\*2</sup>,  
K. Ikeda<sup>\*3</sup>, A. Endo<sup>\*4</sup>, T. Narita, H. Kato

(Tokai Univ., <sup>\*1</sup>Aichi Univ. of Tech., <sup>\*2</sup>Tokyo Univ. of Tech., <sup>\*3</sup>Hokkaido Univ. of Sci., <sup>\*4</sup>FIT)

### はじめに

近年、先進国において自動車の電動化が進む中、今後もハイブリッド車の普及が想定される。それに伴い、内燃機関の性能向上が求められていくと予想される。現在用いられているエンジンの吸排気バルブはカム機構によって駆動しているが、バルブの運動はカムの形状に依存するため動作タイミングに制限があり、全てのエンジン回転数に対して適切な空気流入が出来ない。これらの問題を解決する手法として、リニアアクチュエータを用いてエンジンバルブを駆動させる方法が検討されている<sup>1,2)</sup>。このリニアアクチュエータは無段階でのバルブリフト及びバルブタイミングを実現させることが出来る。しかしながら、高回転域での駆動においては高い推力が求められる。そこで当研究グループでは、より高推力なリニアアクチュエータの開発を行い、より高性能な内燃機関の実現を目指す。本報告では電磁界解析ソフトを利用し、アクチュエータ内における磁石配置が推力に与える影響について基礎的検討を行った。

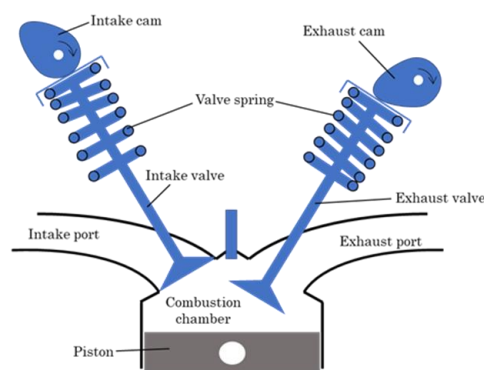


Fig. 1 Schematic of conventional cylinder head mechanism.

### 磁石配置の変更によるリニアアクチュエータの推力に関する検討

Fig. 1 に自動車用エンジンの吸排気バルブに用いられる、カム機構の概略を示す。吸排気バルブ駆動用リニアアクチュエータは Fig. 2 のように配置し、バルブを電磁駆動させる。リニアアクチュエータは永久磁石とコイルを用いて構成され、ローレンツ力を発生させて駆動する。今回検討するリニアアクチュエータのモデルは外形寸法を直径 100mm、高さ 100mm、電圧を 5V、コイルの巻き数を 461turn、永久磁石の材料をネオジウム磁石の NMX-S52、バルブの変位量を最大 10mm で統一し、磁石配置のみを変更して電磁界解析を行い、推力を比較した。解析結果より、最も高推力となったモデルの平均推力は 57.2N であった。

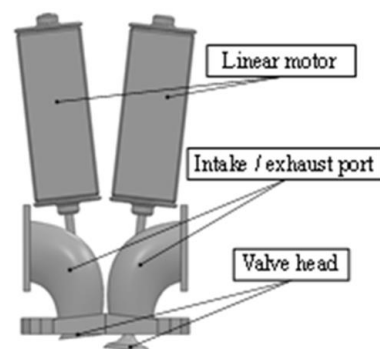


Fig. 2 Schematic of proposed electromagnetic valve drive system

### 参考文献

- 1) 宇野, 村口, 金野, 岡田, 「運動と振動の制御」 シンポジウム講演論文集, Vol. 10, (2007), 177-180.
- 2) 柴崎, 岡崎, 小倉, 日本機械学会関東学生支部総会講演会論文集, Vol. 19, (2013), 451-452

# 円筒型リニア誘導モータを用いた非接触アクチュエータの開発 (テザー直径が及ぼす影響に関する基礎的検討)

野阪肇、黒田純平、内野大悟、小川和輝<sup>\*1</sup>、池田圭吾<sup>\*2</sup>、  
加藤太郎<sup>\*3</sup>、遠藤文人<sup>\*4</sup>、成田正敬、加藤英晃  
(東海大学、<sup>\*1</sup>愛知工科大学、<sup>\*2</sup>北海道科学大学、<sup>\*3</sup>東京工科大学、<sup>\*4</sup>福岡工業大学)

Development of Non-Contact Actuator Using Cylindrical Linear Induction Motor  
(Fundamental Consideration on Effect of Tether Diameter)

H. Nosaka, J. Kuroda, D. Uchino, K. Ogawa, K. Ikeda, T. Kato, A. Endo, T. Narita, H. Kato  
(Tokai Univ., <sup>\*1</sup>AUT, <sup>\*2</sup>Hokkaido Univ. Sci., <sup>\*3</sup>Tokyo Univ. Tech., <sup>\*4</sup>FIT)

## はじめに

超高層ビルなどの大型建造物において人や荷物などを運搬する際にエレベータなどの昇降用デバイスが利用される。従来のエレベータの概略図を Fig.1 に示す。この従来のエレベータでは一本のテザーに1つのカーゴを取り付けるため、高層建造物においてある階層においてエレベータの占有する面積が大きくなるため、カウンターウェイトを使用せず、両端を固定した1本のテザー上をアクチュエータによって昇降するエレベータを検討している。このようなデバイスを昇降させるには滑車やタイヤなどを用いてテザーと接触させることにより発生する摩擦力を利用して昇降する駆動方式が一般的である<sup>1)</sup>。しかしながらこの手法は効率の低下や、異物の巻き込みによるケーブルの破損の原因となる。そこで著者らは導電体で様なテザー（リアクションプレート）を鉛直方向に昇降する円筒型リニア誘導モータを用いたアクチュエータについて検討を行っている<sup>2)</sup>。提案したリニア誘導モータが円筒型であることの利点は、アクチュエータからテザーに対して磁力を均一に印加できる点である。本報告は、有限要素法による電磁界解析を行い、テザー直径の変化が推力特性に与える影響について検討を行った。

## 解析モデル

作成した有限要素解析モデルを Fig. 2 に示す。可動子となる1次側には、6個のコイルとコア、ボビンが設置され、導体であるテザーが固定子となる。コイルは3相交流源に接続されており、上からU<sup>+</sup>、W<sup>-</sup>、V<sup>+</sup>、U<sup>-</sup>、W<sup>+</sup>、V<sup>-</sup>相となる。各コイルの巻数は182回、電流値は7.85 A、周波数は0-100 Hzとした。またテザー直径を100 mm、110 mm、120 mm、130 mm、140 mm、150 mmと変化させ、可動子とのエアギャップは1 mmとした。以上の解析条件をもとに過渡応答解析を行い、発生する鉛直方向の推力について検討を行った。解析の結果から、平均推力や標準偏差、推力重量比といった推力特性だけでなく磁束密度なども得ることが出来た。

## 参考文献

- 1) 松野, 最近のエレベータ制御技術, 計測と制御, Vol. 21, No. 7, pp. 686-689, 1982
- 2) 森尋, 古関, 正田, 円筒型リニア誘導モータの鉛直移動への応用可能性の検討, 電気学会論文誌 D, Vol. 122, No. 12, pp. 1149-1156, 1991.

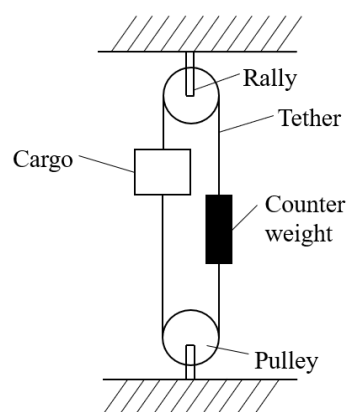


Fig.1 Conventional elevator

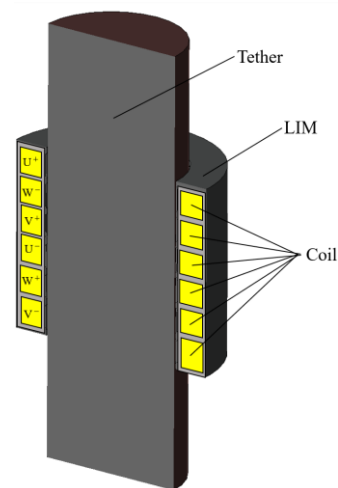


Fig.2 Finite element analysis model

# 湾曲させた極薄鋼板の磁気浮上搬送システム (張力の印加位置の変更による浮上鋼板形状に関する基礎的検討)

長吉竜也、市川優介、川村慎太郎、黒田純平、内野大悟  
小川和輝\*<sup>1</sup>、遠藤文人\*<sup>2</sup>、池田圭吾\*<sup>3</sup>、加藤太郎\*<sup>4</sup>、成田正敬、加藤英晃  
(東海大学、\*<sup>1</sup>愛知工科大学、\*<sup>2</sup>福岡工業大学、\*<sup>3</sup>北海道科学大学、\*<sup>4</sup>東京工科大学)

Electromagnetic Levitation and Transportation System for Bent Ultra-Thin Steel Plate  
(Fundamental Consideration on Shape of Levitated Steel Plate with Change of Place Applying Tension)

T. Nagayoshi, Y. Ichikawa, S. Kawamura, J. Kuroda, D. Uchino,  
K. Ogawa\*<sup>1</sup>, A. Endo\*<sup>2</sup>, K. Ikeda\*<sup>3</sup>, T. Kato\*<sup>4</sup>, T. Narita, H. Kato  
(Tokai Univ., \*<sup>1</sup>AUT., \*<sup>2</sup>FIT., \*<sup>3</sup>Hokkaido Univ. Sci., \*<sup>4</sup>Tokyo Univ. Tech)

## はじめに

工業製品に広く使用される薄鋼板の製造において、ローラによる接触搬送が行われている。しかし、薄鋼板と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)</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薄鋼板の磁気浮上システムの浮上性能について検討してきた<sup>2)</sup>。しかし、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極薄鋼板の磁気浮上システムの浮上性能について、エッジ部に設置した電磁石と鋼板の把持位置を変更した際の浮上安定性の評価について十分な検討が行えていない。そこで本報告では、張力の印加位置が浮上鋼板形状に与える影響について基礎的検討を行った。

## 実験装置

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。浮上対象は長さ 800 mm、幅 600 mm、厚さ 0.18 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) の位置決めは同図に示した通り、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。

## 鋼板形状の算出

水平方向電磁石をエッジ部に設置して張力を加えた際に鋼板形状に与える影響を検討するため有限差分法を用いて浮上中の鋼板形状を算出した。このとき湾曲角度を 5 度、水平方向電磁石の定常電流を  $I_x = 0.5$  A、水平方向電磁石の中心間距離を 400 mm、480 mm、560 mm、640 mm とした。Fig. 2 に水平方向電磁石の中心間距離を 400 mm とした際の解析により求めた浮上時の鋼板形状を示す。

## 参考文献

- 1) 松島他, 日本 AEM 学会誌, Vol. 20 (2012), No. 1, pp. 220-225.
- 2) 椎名他, 日本 AEM 学会誌, Vol. 29, No. 1, (2021), pp. 111-117.

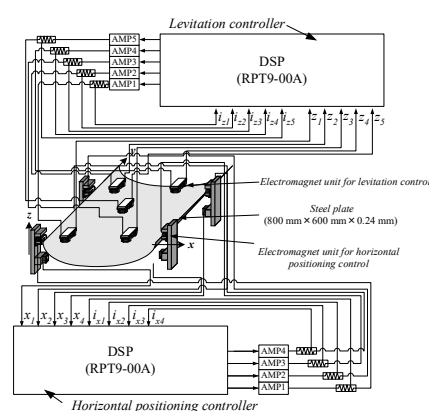


Fig. 1 Electromagnetic levitation control system.

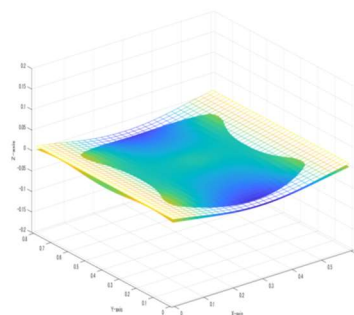


Fig. 2 Difference between obtained shape of levitated steel plate and reference shape.

# 振動が励起された湾曲柔軟鋼板の磁気浮上システム (浮上中鋼板の振動特性に関する基礎的検討)

内田大日、小川和輝\*<sup>1</sup>、小林一景、黒田純平、内野大悟、池田圭吾\*<sup>2</sup>、加藤太朗\*<sup>3</sup>、遠藤文人\*<sup>4</sup>、  
成田正敬、加藤英晃

(東海大、\*<sup>1</sup>愛知工科大学、\*<sup>2</sup>北海道科学大、\*<sup>3</sup>東京工科大、\*<sup>4</sup>福工大)

Electromagnetic Levitation System for Excited Bending Flexible Steel Plate  
(Fundamental Consideration on Vibration Characteristics of Levitated Steel Plate)

Y.Uchida, K.Ogawa, I.Kobayashi, J.Kuroda, D.Uchino, K.Ikeda, T.Kato, A.Endo, T.Narita, H.Kato  
(Tokai Univ.,\*<sup>1</sup>Aichi Univ. Tech.,\*<sup>2</sup>Hokkaido Univ. Sci.,\*<sup>3</sup>Tokyo Univ. Tech.,\*<sup>4</sup>FIT)

## はじめに

電磁石の吸引力を利用した非接触支持を行うため、磁気浮上技術の検討が盛んにおこなわれている<sup>1)</sup>。当研究グループでは、過去に磁気浮上による非接触搬送の実現性を確認している<sup>2)</sup>。また薄鋼板を対象とする場合には、鋼板を塑性変形しない範囲で曲げた状態で浮上させる湾曲磁気浮上を考案した<sup>3)</sup>。しかし、磁気浮上中の鋼板振動については、詳しく検討されていない。そこで本報告では、浮上中の鋼板に外乱を入力し、変位センサーをx軸方向に複数設置することによって、鋼板の振動特性に関する検討を行った。

## 湾曲磁気浮上実験

Fig. 1に湾曲磁気浮上装置の概略図を示す。湾曲磁気浮上装置は、5か所の電磁石ユニットによって薄鋼板を磁気浮上させることができる。本報告ではFig. 2のように、変位センサーをA~Fに設置した。浮上対象は長方形鋼板(長さ $x = 800$  mm、幅 $y = 600$  mm)とし、厚さの違う二種類の鋼板(0.19 mm、0.3 mm)を用いた。本報告では磁気浮上中の鋼板にFig. 3のようなパルス波をFig. 1における実験装置のFrame 3に入力し、鋼板の振動特性について検討した。また、過去の検討よりそれぞれの鋼板は浮上を安定させる最適の角度に湾曲させた。Fig. 4にA点での実験結果を示す。この結果より0.19 mmの方が振幅が大きいことがわかる。

## 参考文献

- 1) 油野他, 日本磁気学会誌, Vol. 35, No. 2, (2011), pp. 123-127.
- 2) 丸森他, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 823, (2015), 14-00471.
- 3) 小川他, 日本磁気学会論文特集号, Vol. 3, No. 1, (2019), pp. 101-106.

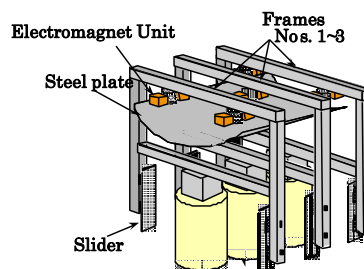


Fig. 1 Schematic illustration of experimental apparatus

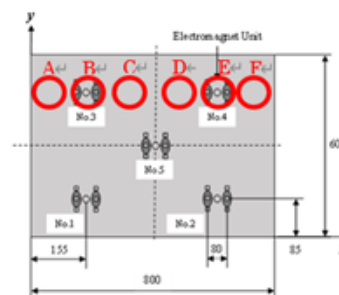


Fig. 2 Displacement sensors placement

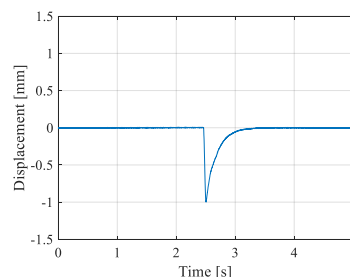
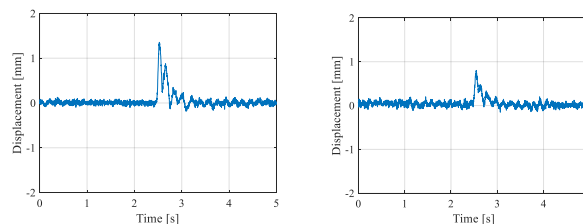


Fig. 3 Time history of input pulse wave



(a) 0.19 mm, 13°

(b) 0.3 mm, 5°

Fig. 4 Measured displacement of levitated steel plate

# 永久磁石と電磁石を併用した薄鋼板の磁気浮上システム (張力の印加位置が永久磁石の最適配置に与える影響に関する基礎的検討)

市川優介、長吉竜也、川村慎太郎、小川和輝<sup>\*1</sup>、黒田純平、内野大悟、  
池田圭吾<sup>\*2</sup>、加藤太朗<sup>\*3</sup>、遠藤文人<sup>\*4</sup>、成田正敬、加藤英晃  
(東海大学、<sup>\*1</sup>愛知工科大学、<sup>\*2</sup>北海道科学大学、<sup>\*3</sup>東京工科大学、<sup>\*4</sup>福岡工業大学)

Electromagnetic Levitation System for Thin Steel Plate Using Electromagnets and Permanent Magnets  
(Fundamental Consideration of Optimized Arrangement of Permanent Magnets on Applying Position of Tension)

Y. Ichikawa, T. Nagayoshi, S. Kawamura, K. Ogawa<sup>\*1</sup>, J. KURODA, D. Uchino,  
K. Ikeda<sup>\*2</sup>, T. Kato<sup>\*3</sup>, A. Endo<sup>\*4</sup>, T. Narita, H. Kato  
(Tokai Univ., <sup>\*1</sup>AUT, <sup>\*2</sup>Hokkaido Univ. Sci., <sup>\*3</sup>Tokyo Univ. Tech., <sup>\*4</sup>FIT)

## 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おり、薄鋼板のめっきの傷や剥がれなど表面品質の劣化が問題視されている。そこで長方形薄鋼板の磁気浮上装置を用いた非接触磁気浮上搬送制御の検討が行われている<sup>1)</sup>。しかし、鋼板の板厚が非常に薄い場合、鋼板のたわみや弾性振動が大きくなるため、限られた数の電磁石では生じるたわみを抑制することができず、薄鋼板の落下の原因となる。そこで、浮上する鋼板の上方に永久磁石を多数設置し、永久磁石の静的吸引力を浮上補助利用する電磁石と永久磁石を併用した磁気浮上システムを提案している。これまでに、安定した浮上のために最適な永久磁石の配置の検討を、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて静的な鋼板のたわみを抑制する配置を探索し、浮上安定性を向上することを確認している<sup>2)</sup>。本報告では、浮上方向に加えて水平方向電磁石を設置した磁気浮上システムについて、永久磁石と鋼板の距離と得られる永久磁石の配置の関係について詳細な検討を行った。

## 磁気浮上装置

Fig.1に浮上装置の概略図を示す。浮上対象は長さ 800 mm、幅 600 mm の長方形亜鉛めっき鋼板 (SS400) を使用する。浮上した鋼板のエッジに対して水平方向電磁石ユニットによる吸引力を加え、鋼板の相対する 2 辺に沿って電磁石を 2 個ずつ設置している。水平方向位置決め制御は各電磁石表面から鋼板エッジまでの距離を 5 mm になるように制御を行う。Fig.2 に GA による探索を行った永久磁石の配置を示す。GA による探索を行った結果、GAP が大きいほど磁石の数が増えた傾向を示した。

## 参考文献

- 1) 石井他, 日本 AEM 学会誌, vol. 24, no. 3, pp.149-154, 2016.
- 2) 嘉山他, 日本磁気学会論文特集号, vol. 6, no. 1 pp.93-99, 2022.

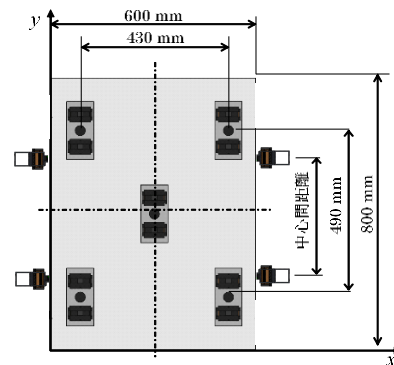


Fig.1 Electromagnetic levitation system

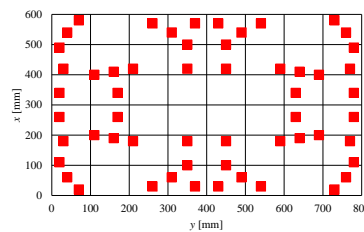


Fig.2 Optimized arrangement of permanent magnets at each distance between horizontal electromagnets.