

特 集

私の「超電導磁気浮上メカトロニクス」の研究概観

～超電導磁気浮上と超電導磁気軸受を中心として～

Overview of My Study on Superconducting Levitation Mechatronics

小森 望充^{*1}(正員)

Mochimitsu KOMORI (Mem.)

This commentary article discusses the overview of my study on “Superconducting levitation mechatronics” which consists of “Superconducting magnetic levitation” and “Superconducting magnetic bearing”. In the study, many superconducting applications and systems are proposed and improved. In the study on hybrid magnetic bearing, the stiffness, rotation speed, etc. are discussed and improved. In the study on flywheel energy storage system, the rotation speed, energy storage system, etc. are discussed and improved. In the study on superconducting actuators, the stiffness, magnetization, etc. are discussed and improved. In the study on superconducting magnetic bearing with superconducting coil, the stiffness, damping coefficient, etc. are discussed and improved. In the study on levitation system with superconducting coil, the superconducting persistent current, application to levitation system, etc. are discussed and improved.

Keywords: superconducting mechatronics, superconducting magnetic levitation, superconducting magnetic bearing.

(2023 年 6 月 27 日受付)

1 はじめに

超電導の応用研究に携わって早や 35 年ほどが経過し、今までの研究は概観的に、超電導磁気浮上メカトロニクス (Superconducting Levitation Mechatronics) とでも言えるもので、主には超電導磁気浮上 (Superconducting Magnetic Levitation (SML)) と超電導磁気軸受 (Superconducting Magnetic Bearing (SMB)) についての研究内容となる。本稿では、この 35 年近くに亘って携わってきた研究の分類を行い、それぞれの内容について大まかに言及する。詳しくは参考文献などをご参照願いたい。

2 超電導応用のための特性評価

2.1 静特性

1986 年ごろ、酸化物高温超電導材料の発見で世間は大いにフィーバーしていた[1]。酸化物高温超電導体と永久磁石とを用いれば非接触浮上が出来ることが皆分かっていたが、この浮上力の定量的な評価など、あまりなされていない状況であった。そこで、私はこの浮上力の特性評価に取り掛かった[2, 3]。Fig. 1 はサマリウム(Sm)系永久磁石の交互磁極板とイットリウム(Y)系超電導体(Φ45 mm×15 mm)を対向させた SMB において、ある初期ギャップで磁場中冷却した時の変位に対する浮上力(Pressure)の特性を示している。浮上力は

連絡先：小森 望充 〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1 九州工業大学大学院工学研究院電気電子工学研究系 e-mail: komori_mk@yahoo.co.jp ^{*1}九州工業大学

変位に対してヒステリシス特性を示しており、研究初期の SML と SMB の研究として印象深い。

2.1 動特性

SML や SMB において、非接触浮上した状態での動特性評価が重要と考えて、測定評価法を模索していた。そこで、非接触測定ができるレーザ変位計を用いて、インパルス応答を評価した[4]。Fig. 2 はそのインパルス応答の一つで、加振された永久磁石板の振動が自然減衰している様子が分かる。この手法はその後の研究において度々利用することとなった。

3 ハイブリッド型超電導磁気軸受システム

SMB の利用法として制御型磁気軸受(Active Magnetic Bearing (AMB))との併用を模索していた。そこで、Fig. 3 に示すような SMB と AMB とを併用したハイブリッド(Hybrid)型 SMB を試作した[5]。ロータ(Φ24 mm

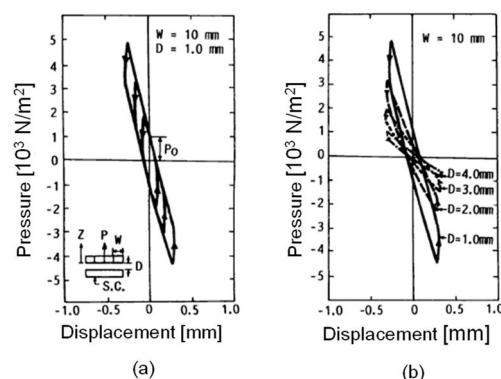


Fig.1 Relationship between levitation pressure and displacement

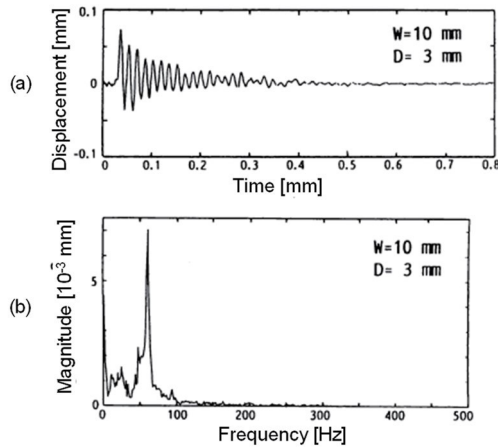


Fig.2 Impulse response of (a) damped vibration and (b) power spectrum.

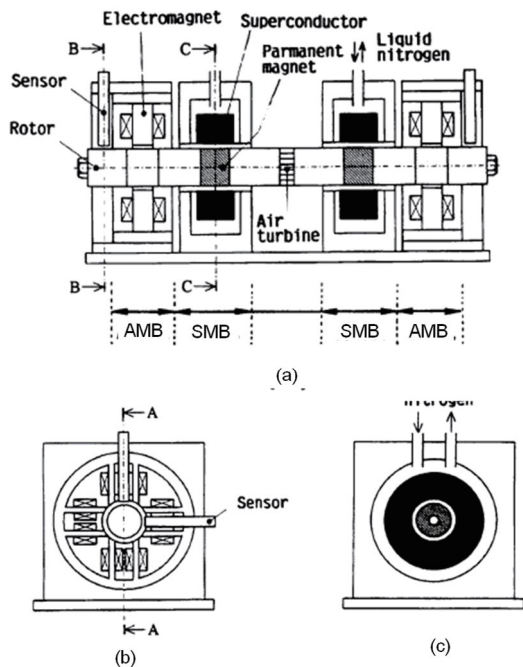


Fig.3 Schematic illustration of (a) hybrid SMB system, (b) cross section of AMB and (c) cross section of SMB.

×158 mm, 0.37 kg)の自重は左右の SMB により支持し、振動制御を左右の AMB で行う構造となっている。SMB にはドーナツ形状(外Φ45 mm × 内Φ25.6 mm × 16 mm)の Y 系超電導体を用い、対向するロータにはネオジウム(Nd)系永久磁石(外Φ24 mm × 内Φ8 mm × 4.3 mm)を4個交互磁極に配列している。AMB は4極の電磁石(Φ0.3 mm, 300 巻)でギャップは1.0 mm である。全て手作りの Hybrid 型 AMB システムを利用して、いくつかの重要な知見を得ることができた[6]。例えば、Fig. 4 はロータの振動振幅と回転速度との関係を示しており、Hybrid 型 SMB のときの振動振幅は SMB だけの振動振幅より小さい傾向を示している。特に回転速

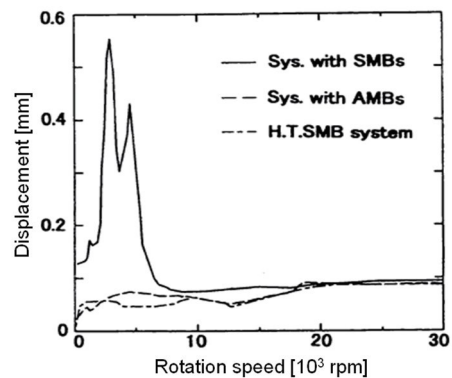


Fig.4 Relationship between displacement and rotation speed .

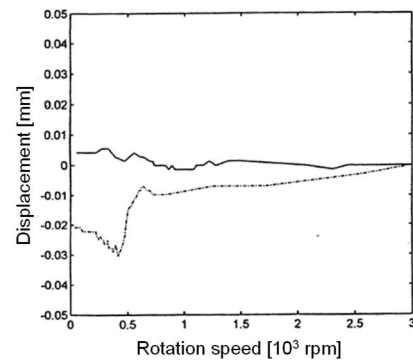


Fig.5 Relationship between displacement and rotation speed for the hybrid-type SMB.

度 3,000~4,000 rpm での共振点近傍では、Hybrid 型 SMB の効果が顕著である。また、この実験でロータの回転速度を 50,000 rpm まで上昇させた時の緊張感を今でも覚えている。Fig. 5 はロータ回転時の定常変位を示しており、SMB だけの場合共振点(5,000 rpm)付近で変位するのに対して、Hybrid 型 SMB の場合その変位が小さい。この結果はロータのピン止め位置が移動していることを示しており、以後の研究の方向性を示す結果となった。

液体窒素温度(−196 °C)で動作する Hybrid 型 SMB を試作した。液体窒素温度では渦電流式変位センサが利用できない。そこで Fig. 6 に示すようなセルフセンシング型の Hybrid 型 AMB を考案した[7]。液体窒素中での磁気浮上を確認できたが、変位センサについての精度が意外に得られなかった。その後、液体窒素温度でもセンサ感度を維持できるインダクタンス型変位センサに出会い、AMB による液体窒素ポンプなど新たなシステムの提案が出来た[8, 9]。

4 フライホイール電力貯蔵装置

4.1 SMB の液体窒素冷却から冷凍機冷却

高温超電導材料の発見の後、それを利用した SMB

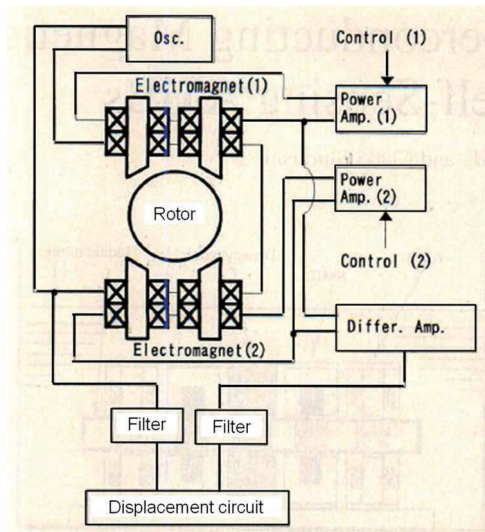


Fig.6 Block diagram for self-sensing AMB in liquid nitrogen

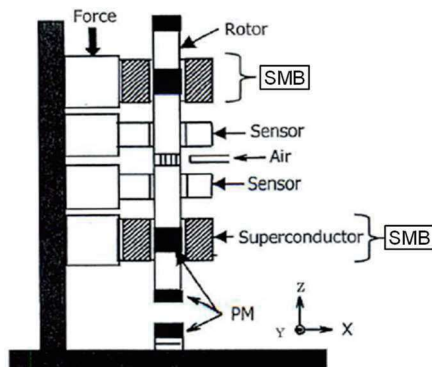


Fig.7 Flywheel energy storage system using upper SMB and lower SMB.

のフライホイール(Flywheel : FW)電力貯蔵装置への応用が世界的なブームとなった。我々も Fig. 7 に示すような FW 電力貯蔵装置を試作・評価した[10]。装置は FW ロータ, 上下2個の SMB, 中心部のエアタービンなどから構成された。SMB の構造は先の Hybrid 型 SMB と同様で, FW ロータの質量(0.46 kg)を支えるため下部に永久磁石磁気軸受(Permanent Magnet Bearing: PMB)を設けた。ここでは SMB の剛性向上を主な研究課題としている。

そのような中, 入手できた冷凍機を用いて, 上下の SMB を冷凍機(60 W)によって冷却する FW 電力貯蔵装置を構成した[10]。液体窒素を必要とせず冷凍機によって超電導体を冷却できるので, 大変便利であった。ただ, 冷凍機の熱伝導による冷却のため, 超電導体を臨界温度以下に冷却するために約2時間を要した。結果的に, 液体窒素による冷却の場合と同様の実験結果が得られるようになった。

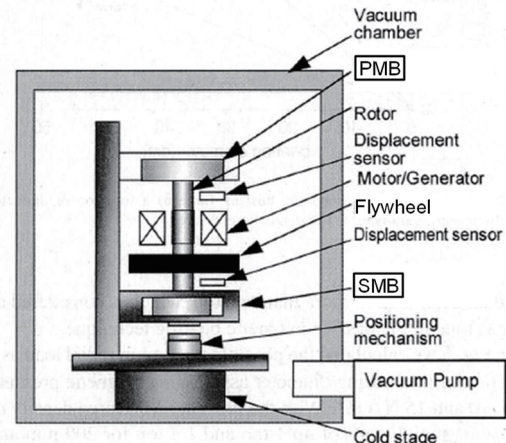


Fig.8 Flywheel energy storage system using upper PMB and lower SMB.

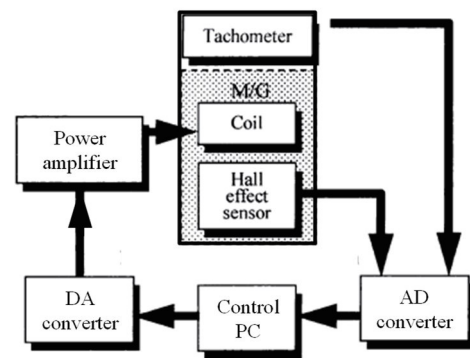


Fig.9 Flywheel energy storage system with Motor/ Generator.

4.2 SMB と PMB の非接触支持から SMB のみへ

冷凍機による冷却では熱伝導を考慮する必要から, 1つの SMB だけなら冷却に余裕があった。そこで, SMB 1つの FW 電力貯蔵装置を Fig. 8 のように構成した[11]。装置の FW ロータ下部は SMB, 上部は PMB で非接触支持され, 自重(0.32 kg)はロータ下端の PMB によって非接触支持される。また, FW の回転速度を真空槽(チャンバ)の外から非接触で測定することで Fig. 9 に示すようなシステムを実現した。このシステムによって一定速度範囲での電力貯蔵を可能とした。

Fig. 9 と同様のシステムにおいて, Fig. 10 に示すようにロータ中央部に発電/電動機を組み込み, 瞬低時の FW 電力貯蔵装置の評価を行った[12]。ここでは 100 ms 程度の瞬低に対する模擬実験を実施し, FW 電力貯蔵装置が上手く機能していることを確認した。

Fig. 11 は SMB を利用したヤジロベエ型 FW 電力貯蔵装置を示している[13]。ここでは FW ロータの重心を SMB の支持点より下方に配置すること, すなわちヤジロベエの様に重心を支持点より下げることに

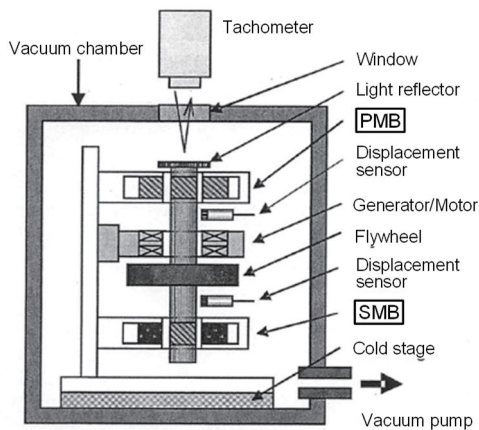


Fig.10 Flywheel energy storage system using upper PMB and lower SMB.

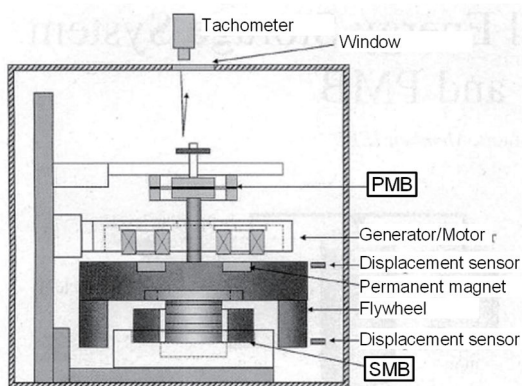


Fig.11 New concept of flywheel energy storage system using method of balancing toy.

てFWの安定化を試みた。したがって、この装置のFWロータはSMBのみで浮上支持され、PMBは安全のため緩く利用している(剛性が小さい)。実験ではFWロータが6,000 rpmでの安定した回転が可能であり、瞬低時の電力貯蔵装置の動作を確認できた。

5 着磁を利用した超電導磁気浮上アクチュエータ

5.1 超電導磁気浮上ステッピングモータ

Fig. 12は超電導体をロータに用いた浮上型ステッピングモータを示している[14]。ロータ($\Phi 10\text{ mm} \times 46\text{ mm}$, 18 g)は円筒形状をしており、その中にY系高温超電導体($\Phi 9\text{ mm} \times 33\text{ mm}$)が挿入されている。ステータは8極の電磁石($\Phi 0.3\text{ mm}$, 500巻)より構成されている。超電導体のロータは零磁場中冷却または磁場中冷却を行い、その後回転駆動される。駆動装置などを含めたシステム全体はFig. 13に示すようになっている。ステッピングモータの励磁は8相のオープンループで行われる。磁場中冷却時の励磁電流と駆動時の励磁電流を変更することによって浮上ロータの支持剛性を増

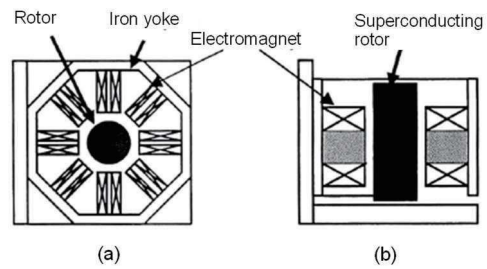


Fig.12 Magnetically levitated stepping motor representing (a) the top view and (b) the side view.

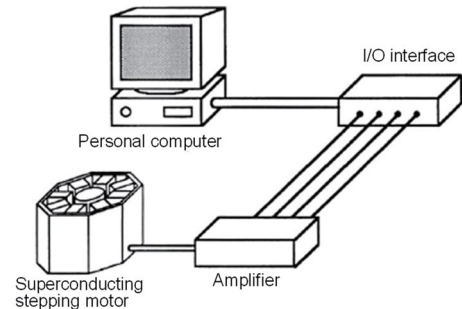


Fig.13 Total system including superconducting stepping motor, personal computer, amplifiers and I/O interface.

加させ、結果的に1,000 rpm以上の回転速度が実現された。

5.2 超電導磁気浮上リニア移動システム

Fig. 14はリニア移動システムの磁石レールを示している[15]。リニア移動システムは移動体($120\text{ mm} \times 120\text{ mm} \times 20\text{ mm}$, 0.40 kg)と磁石レールとから構成される。移動体には4つのY系高温超電導体($\Phi 20\text{ mm} \times 3.2\text{ mm}$, 7.0 g)が配置されている。磁石レールは6.0 mm厚の鉄ヨークの両側にNd系永久磁石($35\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 5\text{ mm}$, 5 mm方向着磁)を並べた構造であり、レール

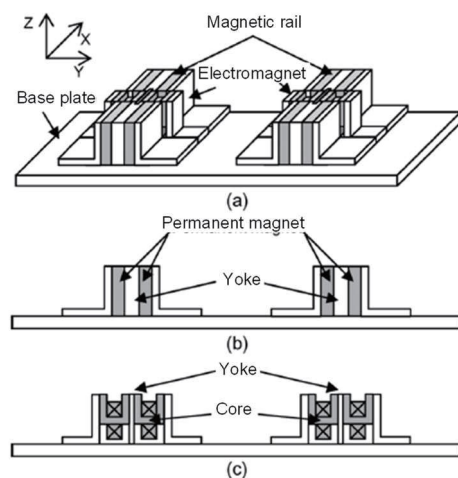


Fig.14 Structure of magnetic rail representing (a) general view, (b) cross section of magnetic rail and (c) cross section of electromagnets.

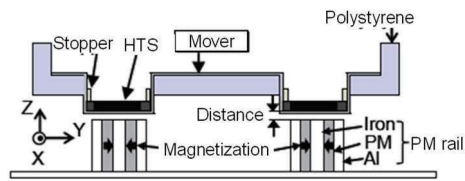


Fig.15 Structure of levitated mover with superconductors and magnetic rail.

の一部にパルス着磁用の電磁石が組み込んである。移動体の超電導体の磁束密度分布をパルス着磁によって変更する試みであり、先駆的な研究になった。同様の移動体を用いて、超電導体上部からのパルス着磁を検討評価している[16]。比較的大きな電磁石($\Phi 0.8$, 225 巻)を用いることによって、超電導体表裏の磁束密度分布を変更することに成功している。ただ、パルス着磁には大きな電流源が必要となることと、着磁分布の制御が難しいと言う課題が残った。

そこで、Fig. 15 に示す様な移動体の超電導体に対して、磁石レールからの静磁場によって着磁を行うことを試みた[17]。移動体の超電導体は初期ギャップに応じた磁束密度分布を示すが、外乱や経時的な要因で分布が変化する。ここでは、移動体を上下に強制変位することによって超電導体の磁束密度分布を初期の分布に戻すことに成功している。

6 AMB を利用した超電導磁気浮上搬送システム

Fig. 16 は真空槽内の試料搬送を想定した浮上搬送機構を示し、浮上ステージと搬送ステージとから構成される[18]。浮上ステージには Nd 系永久磁石($\Phi 24$ mm $\times$ 4 mm) 4 個と搬送ステージには高温超電導体(外 $\Phi 45$ mm $\times$ 内 $\Phi 25$ mm $\times$ 20 mm) 4 個の配置を想定している。つまり、永久磁石と高温超電導体による SMB 4 つで構成される。各 SMB の下部には、永久磁石(浮上体)を制振するためのコイル($\Phi 0.3$ mm $\times$ 150 巻)が付加されている。ここでは、コイル付 SMB を 1 つ用いて真空槽内の永久磁石の制振が可能であることを示している。

前述のコイル付 SMB を 2 個設置した浮上ステージと搬送ステージの構成を Fig. 17 に示す[19]。ここでは、Fig. 18 に示すような浮上ステージのモデルを想定して、浮上ステージの制振が可能であることを示し、更に幾つかの興味ある結果を得ている。

7 超電導コイルを用いた超電導磁気浮上システム

7.1 超電導コイルを付加した SMB

Fig.19 に示すように永久磁石と超電導体を用いた

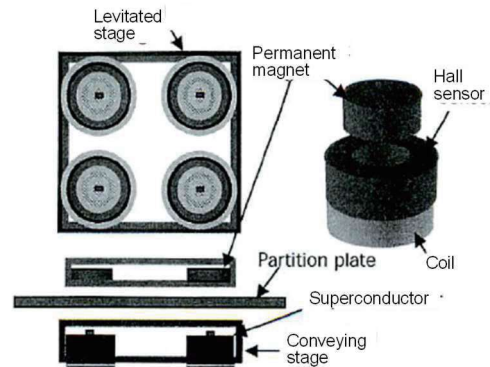


Fig.16 Magnetically levitated conveyor with four SMBs using position control.

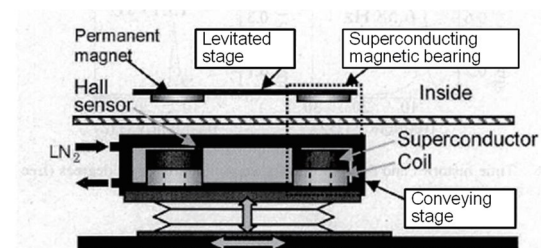


Fig.17 Magnetically levitated conveyor system with levitated stage and conveying stage.

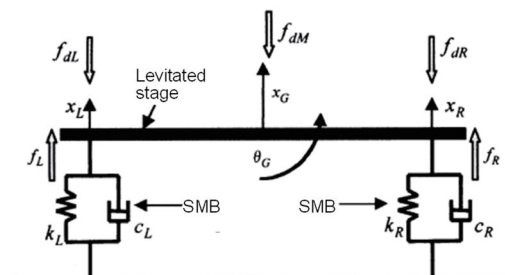


Fig.18 Dynamic model for the levitated conveying system.

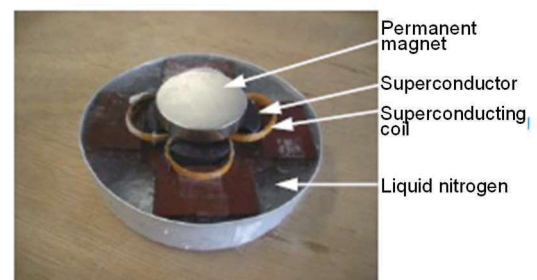


Fig.19 SMB using superconducting coils representing a levitating PM.

SMB に超電導コイルを付加した SMB を提案している[20-22]。図の SMB ではドーナツ状の Y 系高温超電導体(外 $\Phi 50$ mm $\times$ 内 $\Phi 26$ mm $\times$ 12 mm), Nd 系永久磁石($\Phi 50$ mm $\times$ 10 mm, 表面磁束密度 0.24 T), Y 系超電導コイル(外 $\Phi 52$ mm $\times$ 内 $\Phi 45$ mm $\times$ 5 mm, 20 巻)から構成される。コイル両端はハンダ接続している。

超電導体と永久磁石による SMB において、剛性 k は大きくできるが、減衰定数 c は大きくできなかった。ここでは、超電導コイル付 SMB によって、減衰定数 c を大きくできることを示しており、新たな成果と言える。

7.2 超電導永久電流を利用した磁気浮上システム

Fig. 20 は超電導コイルの永久電流を利用した磁気浮上システムを示している[23]。磁気浮上システムは超電導コイル、銅コイル、浮上体、アンプ、制御装置などから構成される。超電導コイル(外 $\Phi 103$ mm $\times$ 内 $\Phi 60$ mm $\times 10$ mm, 100 巻)にはビスマス(Bi)系超電導線(臨界電流 $I_c > 150$ A)を用いており、浮上体($\Phi 28$ mm $\times 100$ mm, 68g)の上下に Nd 系永久磁石(外 $\Phi 24$ mm $\times$ 内 $\Phi 8$ mm $\times 4.5$ mm, 13.1 g)が2個組み込まれている。浮上体の自重と釣り合うように超電導コイルに永久電流 11 A を流している。浮上体の振動制御のために銅コイル($\Phi 0.3$ mm, 500 巻)を用いている。ここでは、超電導永久電流を5分以上の間減衰せずに流すことに成功し、これを用いた新しい超電導磁気浮上システムの提案となっている。

Fig. 21 の超電導磁気浮上システムは Fig. 20 の浮上システムを改良したものである [24, 25]。銅コイル($\Phi 0.3$ mm, 500 巻)は超電導コイルの上に2個設置してある。浮上体($\Phi 30$ mm $\times 40$ mm, 96.3 g)には Nd 系永久磁石($\Phi 20$ mm $\times 30$ mm, 70.5 g)が組み込まれている。ここでは、超電導コイルに 50 A もの永久電流を流し、上体と超電導コイルとのギャップ 82 mm を実現している。これら永久電流を用いた磁気浮上は新しい分野として発展が望まれる。

8 まとめ

高温超電導材料との出会いから始まった浮上現象をテーマにした研究が現在に至るまで成り立ってきたことは幸いである。永久磁石と高温超電導体を用いた SML や SMB を補足するために、当初より AMB の手法を導入できた。更に、高温超電導コイルの出現によって、新たな超電導磁気浮上システムを提案することができた。

また、長年にわたる研究が Fig. 22 に示す「超常現象」という特異な現象として一般視聴者に受け入れられ[26]、6 回もの放送があったことは、面白い経験であった。

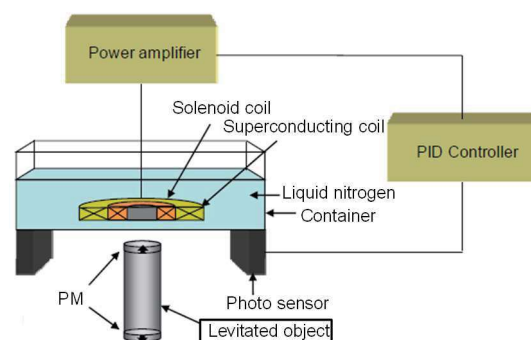


Fig.20 The first model of suspension system using superconducting persistent current.

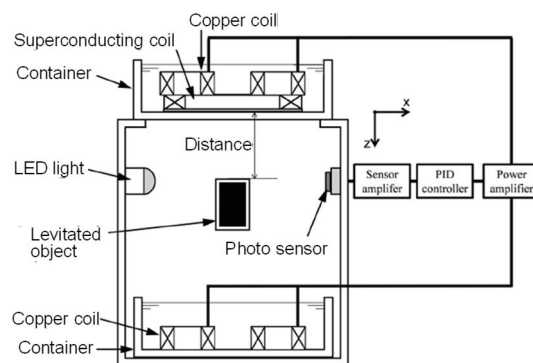


Fig.21 Suspension system using superconducting persistent current of 50A with a gap 82mm.



Fig.22 TV program by NHK BS Premium (2022年6月3日放送).

謝辞

ここに述べた多くの研究成果は、学生諸君や関係者の協力無くしては成し得なかったものであり、ここに謝意を表す。

参考文献

- [1] J. G. Bednorz, K. A. Müller, Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system, *Z. Phys. B*, 64, pp. 189-193, 1986.
- [2] M. Komori and T. Kitamura: Static levitation in a high- T_c superconductor tile on magnet arrangements, *J. Appl. Phys*, Vol.69, No.10, pp.7306-7309, 1991.
- [3] M. Komori and T. Kitamura: Drag pressure of a set of alter-

- ating-polarity magnets over a superconductor tile, *J. Appl. Phys.*, Vol.70, No.4, pp.2226-2229, 1991.
- [4] M. Komori, T. Matsuoka, S. Fukata, A. Tsuruta, and T. Ide: Dynamic characteristics of a high-Tc superconducting bearing with a set of alternating-polarity magnets, *J. Appl. Phys.* Vol.77, No.2, pp.899-904, 1995.
- [5] M. Komori, S. Matsuoka, and S. Fukata : Evaluation of a hybrid-type superconducting magnetic bearing system, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol.6, No.4, pp.178-182, 1996.
- [6] M. Komori, M. Kumamoto and H. Kobayashi: A hybrid-type superconducting magnetic bearing system with nonlinear control, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol.8, No.2, pp.79-83, 1998.
- [7] M. Komori and C. Shiraishi: A levitated motor with superconducting magnetic bearings assisted by self-sensing AMBs, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 13, No. 2, pp.2243-2246, 2003.
- [8] M. Komori, K. Watanabe, H. Kato, K. Asami, N. Sakai, Basic study on active magnetic bearing working in liquid nitrogen and its application to cryogenic pump, *Mechanical Engineering Journal (JSME)*, Vol. 4, No. 5, pp. 1-9, 2017
- [9] H. Kato, M. Komori, K. Asami, N. Sakai, Development of one-axis controlled bearingless motor and its application to a centrifugal pump for extremely low temperature, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* Vol. 64, pp. 1287-1299, 2020.
- [10] M. Komori and Y. Uchimura, Improving the dynamics of two types of flywheel energy storage systems with SMBs, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 15, no. 2, pp.2261-2264, 2005.
- [11] K. Murakami, M. Komori and H. Mitsuda, Flywheel Energy Storage System Using SMB and PMB, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 17, no. 2, pp. 2146-2149, 2007
- [12] H. Mitsuda, A. Inoue, B. Nakaya and M. Komori, Improvement of Energy Storage Flywheel System with SMB and PMB and Its Performances, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 19, no. 3, pp. 2091-2094, 2009.
- [13] M. Subkhan and M. Komori, New concept of flywheel energy storage system using SMB and PMB, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 21, no. 3, pp. 1485-1488, 2011.
- [14] M. Komori and S. Nomura, A new driving method for superconducting levitated stepping motor, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 13, no. 2, pp.2243-2246, 2003
- [15] R. Maruo, A. Inoue, M. Okano, and M. Komori, Study on magnetically levitated conveying system using hybrid-magnetized high Tc superconductors, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol.18, no. 2, pp. 820-823, 2008
- [16] Y. Miyatake and M. Komori, Basic study on magnetically levitated conveyor system using field-cooling magnetization and pulse-field magnetization, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 21, no. 3, pp. 1507-1510, 2011.
- [17] M. Komori, Y. Higashi, K. Asami, N. Sakai, New Application Method of Static-Field Magnetization to Magnetically Levitated Mover System with High Tc superconductors, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 31, No. 5, pp. 1-5, 2021.
- [18] M. Komori and G. Kamogawa: Basic study of a magnetically levitated conveyor using superconducting magnetic levitation, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 15, no. 2, pp.2238-2241, 2005.
- [19] T. Mori and M. Komori, A Prototype Magnetically Levitated Superconducting Conveyor, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 17, no. 2, pp. 2170-2173, 2007
- [20] M. Komori, K. Yamanaka, K. Asami, N. Sakai, Proposal of New Superconducting Magnetic Bearing Using High Tc Superconducting Bulk and Coil, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 54, No. 11, pp. 1-4, 2018
- [21] M. Komori, A. Wada, K. Asami, N. Sakai, Dynamic Characteristics in The Horizontal Direction for New Type SMB Using SC Bulk and SC Coil, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 30, No. 4, pp. 1-5, 2020
- [22] M. Komori, R. Nakatsuka, K. Asami, "Basic Study on Four Types of Superconducting Magnetic Bearings (SMBs) Using High Tc Superconductor Bulks and Superconducting Coils", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 32, No. 6, pp. 1-7, 2022
- [23] S. Takase, M. Komori, K. Nemoto, K. Asami, N. Sakai, Basic study on magnetic levitation system using superconducting coil, *JSME Mechanical Engineering Journal*, Vol.2, No.3, pp. 1-8, 2015
- [24] M. Komori, A. Minoda, K. Nemoto, K. Asami and N. Sakai, One-axis Controlled Superconducting Magnetic Levitation System Using Persistent Current, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 29, No. 5, pp. 1-5, 2019
- [25] M. Komori, S. Imada, K. Nemoto and K. Asami, Magnetic Suspension System with Large Distance of 82 mm Using Persistent Current in Superconducting Coil, *Actuators*, Vol.11, No. 2, pp. 1-11, 2022.
- [26] 超常現象はじめました, 2022 年 6 月 3 日, NHK BS Premium 放送