

Short Report

高効率なエネルギー貯蔵のための超伝導磁気浮上の振動特性

二村宗男¹, 進藤諒¹, 須藤誠一¹,¹ 秋田県立大学システム科学技術学部機械知能システム学科

本研究は、高効率なエネルギー関連システムとして様々な応用が研究されている超伝導磁気浮上の性能向上を目的として、超伝導体上に磁気浮上した永久磁石に磁性流体を吸着して強制振動を与え、高速度ビデオカメラによって振幅や磁性流体形状を調べた。浮上磁石の振幅の周波数依存性を測定したところ、振幅のピーク周波数は静的な磁気力の測定値から計算した値とほぼ一致した。浮上磁石に磁性流体を吸着した場合は、磁性流体表面と内部の永久磁石との変位に差があり、磁性流体の形状が変形していることから粘性損失の発生が考えられた。そこで磁性流体の影響を、質量、粘性、バネの成分で表し、超伝導浮上磁石に付加されたと考えて連成振動モデルを用いて計算した。計算結果は振動振幅の周波数依存性は実験値とほぼ一致し、超伝導磁気浮上における磁性流体の影響の概要として連成振動モデルを使用可能なことを示した。

キーワード：超伝導磁気浮上, 磁性流体, 連成振動モデル, 周波数依存性

近年、化石燃料の枯渇の恐れや温暖化対策など様々な要因からエネルギー使用の高効率化が求められている。環境負荷の小さな自然エネルギーの利用や、ヒトの日常動作等によって発電するエネルギーハーベストもその一環である。エネルギーハーベストの発電形式には多くの種類があるが、電磁誘導を用いた振動発電機は比較的大きな電力と動作の簡便さから様々な研究がなされている(脇若ら, 2007)。また、磁気バネを用いたものや磁場配置に検討を加えたものなど、様々な検討がなされている(西村ら, 2007; 野田, 2014)。エネルギーの効率的な貯蔵に関しては、超伝導磁気浮上を用いたフライホイール電力貯蔵が、高効率で繰り返し寿命の長さから有力な電力貯蔵システムとして実用化に向けた研究が進められている(Poltavets et al., 2014; Werfel et al., 2012)。これらの発電や電力貯蔵のシステムにおいては、いずれも永久磁石を非接触で浮上させており、その動

きの特性がシステムの効率に直結する。永久磁石の浮上においては、超伝導体の磁束ピン止め効果を用いた磁気浮上が、能動的な制御を必要とせずに安定な磁気浮上を得られることから有効である。

本研究はバルク超伝導体上に浮上した永久磁石の振動特性と、磁性流体を吸着した場合の振動の抑制について調査をおこなった。

実験

実験装置の概略を図1に示す。断熱容器内に高温バルク超伝導体(新日本製鐵製 DyBaCuO, $\phi 32 \times$ 高さ 5 mm)を固定し、この上に厚さ 6 mm のアクリル樹脂製スペーサを介して永久磁石(NdFeB, 直方体 $8 \times 8 \times 5$ mm, 質量 2.27 g)を設置した。この状態で液体窒素を断熱容器に注ぎ、超伝導体を冷却した。十分に冷却した後にはスペーサを取り除き、磁束ピン

止め効果により磁石を浮上させ、ケロシンベースの磁性流体（タイホー工業製フェリコロイド HC-50）を吸着する．今回の実験では磁性流体を吸着した浮上磁石の重さは 4.65 g であった．この状態で、浮上している磁石の上方に設置したソレノイドコイルに $6 \text{ A}_{\text{p-p}}$ の定電流を流して交流磁場を印加したときの磁石の振動を高速度ビデオカメラで撮影した．磁性流体に包まれた内部の磁石の変位を測定するために、磁石の側面に長さ 15 mm のポリエステル樹脂棒 2 本 ($2.2 \text{ mg} \times 2$) を接着している．

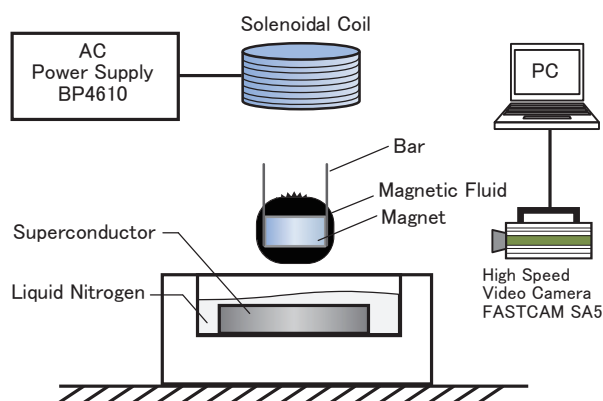


図1 強制振動の実験装置概略

実験結果および考察

実験結果

高速度カメラの画像から磁性流体の形状およびその内部の浮上磁石の変位 x_m を求めた．印加磁場の周波数を 16～26 Hz まで 2 Hz 毎に変えて測定した．振幅 A_m の周波数依存性は図2の□のように表される．22 Hz 付近で変位が大きいことが確認できたため 26 Hz の測定後に 23 Hz, 22 Hz, 21 Hz の順に周波数を下げて測定した．その結果を図2の■に示す．21 Hz で最も振幅が大きいことが確認できるためこの浮上磁石は 21 Hz 付近で固有振動数をもつと考えられる．

図3に磁性流体を吸着した浮上磁石の変位 x_m と、磁性流体の一つのスパイク頂点の変位 x_{mf} の振動波形の一部を示す．図から磁性流体の振幅が磁石の振幅より大きく、磁性流体が変形していることが分かる．この変形によって磁性流体が浮上磁石の振動エネルギーを吸収し、振動が抑制されると考えられる．また、今回測定した周波数の範囲において磁石と磁性流体との位相差はほぼゼロであった．

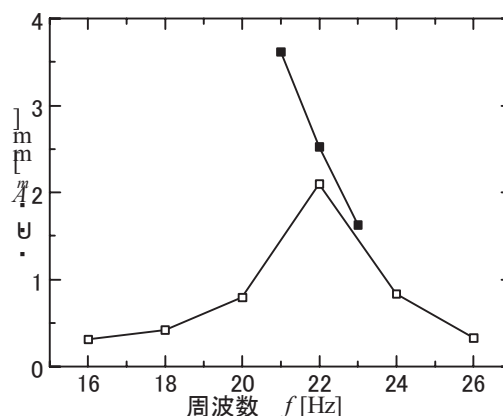


図2 振動振幅の周波数依存性

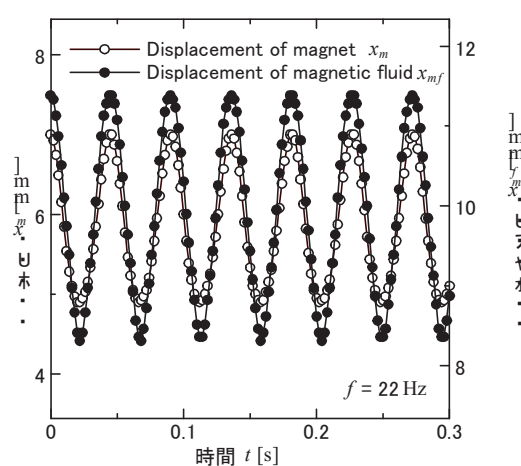


図3 磁石と磁性流体の振動波形

磁気力から計算する固有振動数

浮上磁石にはたらく磁気力を調べるために、同形状の磁石にデジタルフォースゲージ（日本電産シンボ社製 FGP-0.2）を取り付けて、振動実験と同様に間隔 6 mm の位置で超伝導体を冷却し、振動実験で磁石が振動したと考えられる 3～8 mm の範囲における磁気力を測定した．測定は、最初に磁石を 6 mm から 3 mm まで下方に移動し、次に 8 mm まで上方に移動し、6 mm に戻る変位を 4 サイクル行った．この間、0.2 mm 毎に測定した結果を図4に示す．各位置の測定結果のばらつきは最大で 0.041 N であり、この範囲の往復運動による磁気力のヒステリシスは小さいことがわかる．この各位置の磁気力の平均値から求めた傾き dF/dx [N/m] を磁気力のばね定数として、このばね定数と磁性流体を吸着した浮上磁石の質量から固有振動数 f_n は式(1)で求められる．

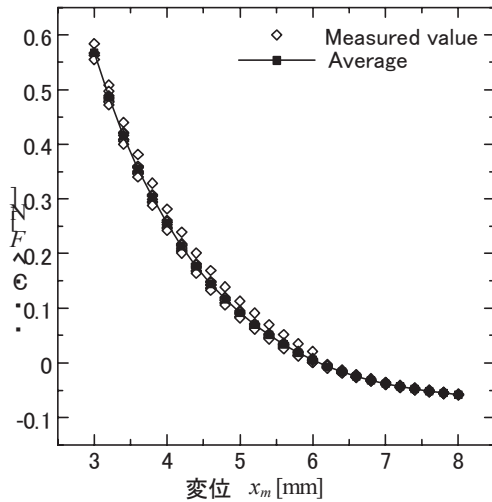


図4 超伝導浮上磁石の磁気力

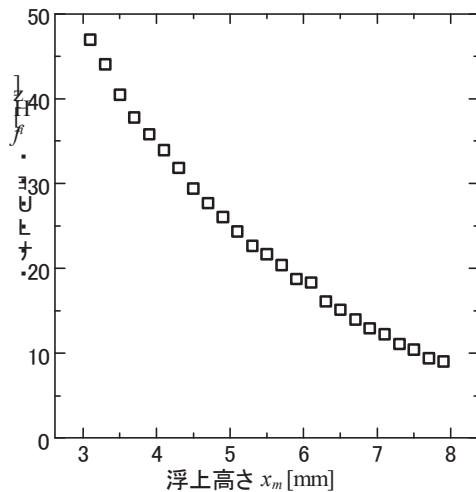


図5 浮上高さの違いによる固有振動数

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

図5に固有振動数を計算した結果を示す．5.5 mmにおける固有振動数が21.7 Hzであり，実際の磁石の振動位置は磁性流体の重さにより6 mmより下方にあるため，これを考慮すると実験により求めた固有振動数とはほぼ一致した．

連成振動モデルによる解析

本研究の振動系を図6に示す連成振動モデルで考える．磁性流体の影響を磁石に追加された質量 m_{mf} ，ダンパ c_{mf} ，ばね k_{mf} とした．

従来の研究によって超伝導浮上磁石の振動は，磁石の質量 m_m ，ダンパ c_m ，磁気力のばね k_m ，および超伝導ピン止め磁束のばね k_{pi} によって表される（二村ら，1998）．磁石の変位がばねの最大伸長 h_{pi} より

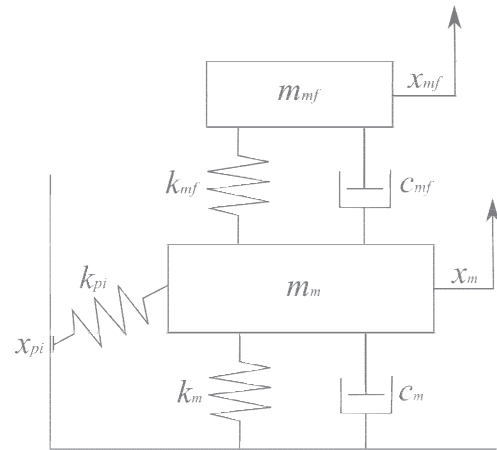


図6 超伝導浮上に追加した連成振動モデル

も小さい場合は，ばねの端部 x_{pi} がピン止め力によって固定されるのでピン止め磁束のばね k_{pi} は復元力として作用する．しかし磁石の変位が最大伸長を超える場合には，ばねの端部が引きずられて新しいピン止め位置に固定される． x_{pi} は常に h_{pi} の範囲内であるため，以下のように表される．

$$|x_m - x_{pi}| \leq h_{pi} \quad (2)$$

磁石の変位が大きいとき，引きずられているばねは摩擦力として作用する．超伝導体中にはピン止め強さの弱いものから強いものまで様々なピンがあるため，最大伸長の異なる多数のばねを取り入れた．また，ばね定数 k_{pi} は最大伸長 h_{pi} の関数であり，磁性流体なしの場合の振動波形から以下のように求められた．

$$k_p = 35h_p^{-0.01} \quad (3)$$

したがって，超伝導浮上に磁性流体の影響を考慮したこのモデルの強制振動の運動方程式は

$$m_m \frac{d^2 x_m}{dt^2} = -c_m \frac{dx_m}{dt} - k_m x_m - \sum_i k_{pi} (x_m - x_{pi}) - c_{mf} \left(\frac{dx_m}{dt} - \frac{dx_{mf}}{dt} \right) - k_{mf} (x_m - x_{mf}) + P \sin \omega t \quad (4)$$

$$m_{mf} \frac{d^2 x_{mf}}{dt^2} = -c_{mf} \left(\frac{dx_{mf}}{dt} - \frac{dx_m}{dt} \right) - k_{mf} (x_{mf} - x_m) \quad (5)$$

となる．この運動方程式の各パラメータの値を変えて16～26 Hzまでの各周波数における磁石と磁性流

体の周波数依存性を求めた。最も実験値に一致した振幅の周波数依存性とそのときのパラメータの値を図 7 に示す。範囲の各周波数において磁石の振幅よりも磁性流体の振幅のほうが大きい。また、磁石と磁性流体いずれも 22 Hz でピークを持っている。周波数依存性の形状が全体ではほぼ一致するため、磁性流体による振動抑制をこの連成振動モデルで説明することができる。

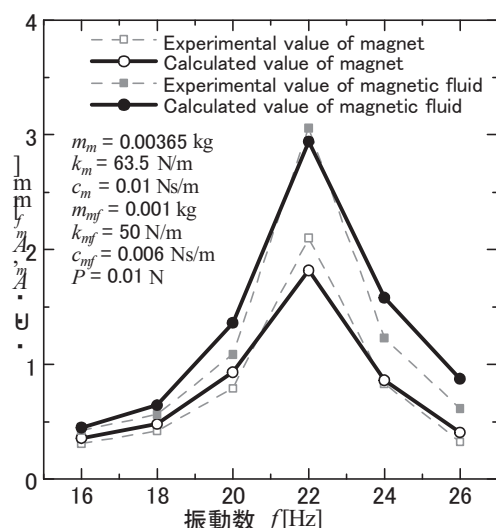


図 7 振幅の周波数依存性の計算値と実験値

結言

超伝導体上の磁性流体を吸着した浮上磁石に交流磁場を印加して強制振動をさせ、印加磁場の周波数を変えて特性を調べた。振幅がピークとなる周波数が磁気力の測定値から求めた値とほぼ一致した。振動抑制について、磁性流体が磁石の振動エネルギーを吸収することで振動の抑制が可能であることを明らかにした。

磁石に吸着した磁性流体の影響を連成振動モデルとして考え、振動振幅の周波数依存性を計算した結果が実験値とほぼ一致した。このことから超伝導浮上における磁性流体の振動抑制を連成振動モデルによって説明できることを示した。

文献

Futamura M., Maeda T. and Konishi H. (1998). Damping

Characteristics of a Magnet Oscillating above a YBCO Superconductor. *Japanese Journal of Applied Physics*, 37(7), 3961-3964.

西村一寛，内藤範紀，平野豪大，井上光輝 (2007).

「磁気反発型振動スイッチの原理とその特性」

『電気学会研究会資料. MAG, マグネティックス研究会』64, 31-34.

野田慎一郎 (2014). 「電磁誘導による人力発電の研究」『電気学会論文誌 B (電力・エネルギー部門誌)』134 (3), 6-8.

V Poltavets, K Kovalev, R Ilyasov, A Glazunov, V Maevsky, L Verbitsky, V Akhmadyshev and A Shikov (2014). 5 MJ flywheel based on bulk HTS magnetic suspension. *Journal of Physics*, 507(3), 032022(4pp).

F. N. Werfel, U. Floegel-Delor, R. Rothfeld, T. Riedel, B. Goebel, D. Wippich and P. Schirrmeister (2012). Superconductor bearings, flywheels and transportation. *Superconductor Science and Technology*, 25(1), 014007 (16pp).

〔平成 27 年 6 月 30 日受付〕
〔平成 27 年 7 月 31 日受理〕

Oscillation characteristics of a superconducting levitated magnet for an efficient energy storage system

Muneo Futamura¹, Ryo Shindo¹, Seiichi Sudo¹

¹ *Department of Machine Intelligence and Systems Engineering, Faculty of Systems Science and Technology,
Akita Prefectural University*

We analyzed the reciprocating motion during forced oscillation of a magnet that was surrounded with magnetic fluid and levitated above a superconductor. We obtained the form of the magnetic fluid and the displacement of the internal magnet from images recorded using a high-speed video camera. The difference between the displacement of the magnetic fluid and that of the magnet was determined. The measurement frequency dependence of the amplitude exhibited a maximum at a frequency that was consistent with the value calculated on the basis of the measured magnetic stiffness. The calculation model for superconducting levitation is a mechanical model comprising a mass, a spring, a dashpot, and dragged springs for the superconducting pinning effect. By adding the coupled oscillation system for the effect of the magnetic fluid, we obtained good agreement between the analytical and experimental frequency dependencies.

Keywords: Superconducting Magnetic Levitation, Magnetic Fluid, Coupled Oscillation Model, Frequency Dependence