

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：51101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18163

研究課題名（和文）超電導バルク体の磁気浮上を用いた新たな免震構造システムの研究開発

研究課題名（英文）Development of a new seismic isolation structure system with magnetic levitation of HTS bulk

研究代表者

佐々木 修平（SASAKI, SHUHEI）

八戸工業高等専門学校・その他部局等・助教

研究者番号：30707261

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：超電導バルク体を用いた磁気浮上型免震装置の実用化に向けて、免震対象物の許容重量となる磁気浮上力、鉛直振動伝達の抑制が重要な課題となる。本課題研究期間において、永久磁石の配列方法や、磁性体を用いた磁束密度操作によって磁気浮上力の向上を図り、一般家屋を磁気支持できるレベルに到達することができた。さらに、モデル装置を用いて鉛直振動伝達特性について検討を行い、超電導バルク体に超電導線材コイルを取り付けることで鉛直振動伝達を抑えることに成功した。

研究成果の概要（英文）：In these days, large scale earthquake is frequency occurred in the world, and damages are caused by the earthquake. Therefore, it is necessary to take effective measures for prevent the earthquake damage. To reduce the earthquake damage, we have devised a magnetic levitation type superconducting seismic isolation device which composed by the HTS bulks and permanent magnets. In order to realize this device, we must improve the magnetic levitation force that contributes to the magnetic coupling between the HTS bulk and PM rail. However, the vertical vibration transmission to the seismic isolation object is increased with magnetic coupling between the HTS bulk and PM rail. Therefore, it is closely related to the magnetic levitation force improvement and vertical vibration transmission. We made an attempt at append a coil with superconducting wire to the HTS bulk. As a result, the magnetic levitation force slightly decreased, but it is succeed to reduce the vertical vibration transmission.

研究分野：超電導応用工学

キーワード：超電導 免震 磁気浮上

1. 研究開始当初の背景

地震大国である日本は、大規模地震の発生によって多大なる被害をもたらされ、復旧においても非常に長い年月と費用（エネルギー）を費やしている。2011年3月11日に発生した観測史上最大の東北地方太平洋沖地震（M9.0）では、地震そのものの死者数も多数存在するとともに、建造物の倒壊破損は、数千件にも上った。また、ライフライン施設や公共施設内における業務機能や機能維持が困難となった。今後も東海地震をはじめ、主都直下型地震など大規模地震の発生確率が高く、経済的被害は数百兆円以上にも成り得ると予想され、今まで以上に地震対策を施すことが重要となる。

現在、地震被害の抑制方法として、免震技術に注目が集まっている。免震技術は対象物への振動を長周期化することで、対象物自体への振動を抑制し、二次災害を防ぐことが可能となる。最近では、一般住宅から高層ビルに至る幅広い建築物において、免震装置が採用されている。しかし、現用の免震装置は、「支承」と「減衰」という相互干渉のある2つの要素をうまくバランスさせる必要があることから、長周期振動に対して振動が増幅してしまう恐れがあることや、中小規模（震度4程度以下）の地震に対して免震効果が小さいことが懸念されている^{[1]、[2]}。また、病院等の公共施設においては、人命保護はもちろん、建物本体が守られているということだけでなく、医療機器等の機能維持が求められるため、地震対策と微振動対策の両用が必要となる。しかし、現用の地震対策用の免震装置と微振動用の除振装置は、想定する振動レベルの領域が異なるため、併用することが困難とされている。振動後における恐怖や不安等の精神的ストレスを排除するためにも、免震機能と除振機能を兼ね備えた高性能で、より確実に振動除去が得られる新たな装置の実現が求められている。

2. 研究の目的

超電導体特有の磁気特性（磁束のピン留め効果）に着目し、図1のような超電導バルク体と永久磁石（レール）で構成される新たな振動除去装置を提案してきた。本提案装置は、超電導バルク体特有の磁気力を応用し、建物や設備機器を磁気浮上させ、永久磁石を水平方向に磁束密度が一様になることで、超電導バルク体が水平方向の磁気力を受けずに移動可能となる。これにより、地盤との物理的接触を無くすことができ、第一層に印加される水平方向の振動を二方向に分解することで、第三層（対象物）への水平振動を完全に除去する（免震効果を得る）ことができる。

本研究では、本提案装置の実用化を目的として、浮上特性や振動除去特性の検討を行い、本提案装置の設計指針を確立する。目標として、積載重量は機器装置を支持できる 100 kgf/m^2 の磁気浮上力を得ること、免震効果は地震波振動周波数領域内における（水平・鉛直）振動伝達率が1以下になることを目指す。

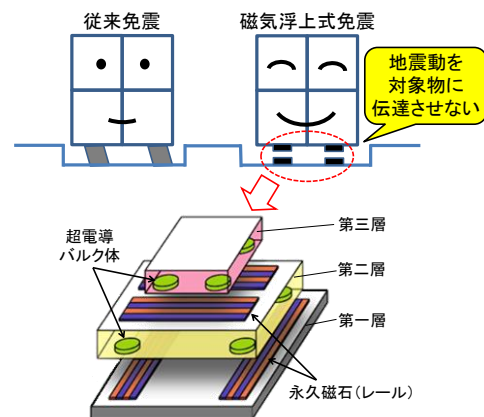


図1 超電導バルク体を用いた磁気浮上型の免震装置の構想図

3. 研究の方法

(1) 磁気浮上力の向上

磁気浮上型免震装置を実現するためには、免震対象物を支承する超電導バルク体単位面積あたりの磁気浮上力を高め、できる限り超電導バルク体の使用個数を抑えることが求められる。超電導バルク体に働く磁気浮上力は、超電導バルク体に鎖交する磁束密度勾

配と磁束密度の大きさの積に依存することがわかっている^[3]。そこで、超電導バルク体に鎖交する磁束密度分布が異なる磁極配列の永久磁石レールを作製した（図 2 参照）。磁極を交互に配置する **Alternate** 配列磁石と磁極が向かい合うように配置する **Halbach** 配列磁石を使用した。実験方法は、図 3 に示すように永久磁石と超電導バルク体を配置し、超電導バルクと永久磁石レールの間に 5 mm のギャップを設け、液体窒素によって冷却（着磁）する。冷却後、着磁位置から超電導バルク体を z 方向に 1.5 mm ずつ変位させ、その際に発生する磁気浮上力をデジタルフォースゲージによって測定した。また、磁束操作を行うために、超電導バルク体の裏面に固定側永久磁石と吸引する方向に薄い永久磁石板を付加し、同様の測定を行った。

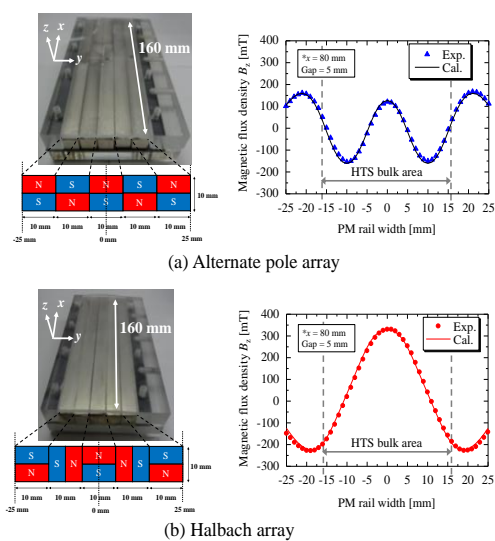


図 2 実験に使用した永久磁石レールの磁極配列と磁束密度分布

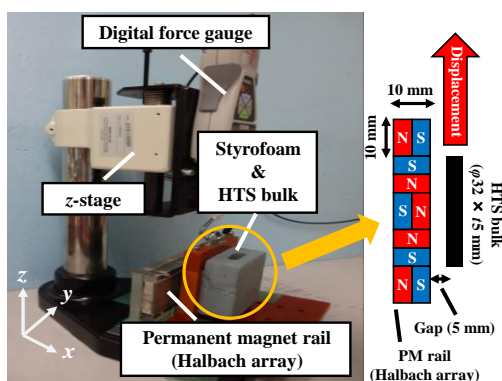


図 3 磁気浮上力測定装置

(2)鉛直振動伝達率の改善

磁気浮上力が増加するにつれ、免震対象物への振動伝達が伝わりやすくなることを意味する。水平振動に関しては、提案する本装置では大幅に除去することができる（理論上は水平振動が対象物に伝達しない）。一方で鉛直方向は、重力と均衡する磁気力によって必ず鉛直振動が伝達されることになり、入力振動よりも大きな応答となってしまふ。そこで、本研究では鉛直振動伝達の増幅を抑えるために、図 4 上部に示すように超電導バルク体の側面に超電導線材で作製したコイルを取り付け、鉛直振動を与えたときの浮上層の応答をレーザー変位計によって測定した。実験条件は、特性を明確にするために 2 層構造とし、(1)磁気浮上力実験で用いた Halbach 配列永久磁石レールを固定層に配置した。超電導バルクと永久磁石レール間のギャップを 5 mm 設け、浮上層の重量を 0.65 kg に統一した。印加振動は、振幅 10 mm、長周期振動周波数の 1-3 Hz の正弦波とした。

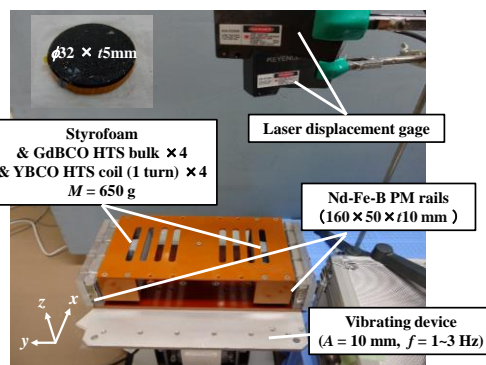


図 4 鉛直振動試験装置

4. 研究成果

(1)磁気浮上力特性

図 2 に示すように、Halbach 配列は、上部面において Alternate 配列よりも大きな磁束密度を得ることができる。この磁界中において磁気浮上力を測定した結果を図 5 に示す。図 5 に示すように、Halbach 配列において、変位に対して大きな磁気浮上力が得られ、ピーク値では、Alternate 配列の 3.5 倍以上にな

ることが分かった。また、薄い永久磁石板を永久磁石レールと吸引方向に設置することで、超電導バルク体に鎖交する磁束密度が増加し、磁気浮上力の改善を図ることができた。超電導バルク体の復元力が永久磁石の吸引力よりも大きい場合に効果的に磁気浮上力が得られるハイブリッド型を見出した。これらの結果より、超電導バルク体の単位面積あたり約 3000 kgf/m² の磁気浮上力を得ることができ、一般家屋を支持できるレベルに到達した。

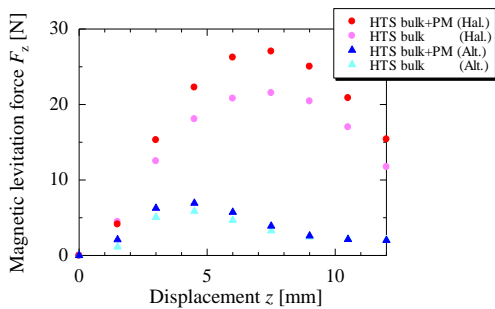


図5 磁気浮上力特性

(2) 鉛直振動伝達特性

鉛直振動伝達特性は、変位波形を加速度に変換し、固定層に対する浮上層のフーリエ振幅比（振動伝達率）として評価した。鉛直振動伝達特性結果を図6に示す。図6に示すように、周波数が増加するにつれて振動伝達率が増加していることが分かる。これは印加振動が浮上層の共振周波数に近づいたため、振動伝達率が増加したといえる。また、Halbach配列の方が Alternate 配列よりも鉛直振動伝達率を抑えることができしており、磁束密度の大きさと勾配を大きくすることが有効であることがわかった。さらに、超電導バルク体の側面に超電導線材コイルを設けることにより鉛直振動伝達率が改善された。これは、コイルに鎖交する磁束が変化することによってコイルに誘導電流が流れ（レンツの法則）、超電導バルク体内の磁束変化を抑制し、浮上層の振動増幅を抑えたと考えられる。以上より、鉛直振動伝達特性の抑制には、超電

導バルク体と永久磁石レールの磁気結合を強めること（固定層に浮上層を追従させること）、超電導線材コイルを用いて振動に対する磁束の変化を遮蔽することが効果的であることが分かった。

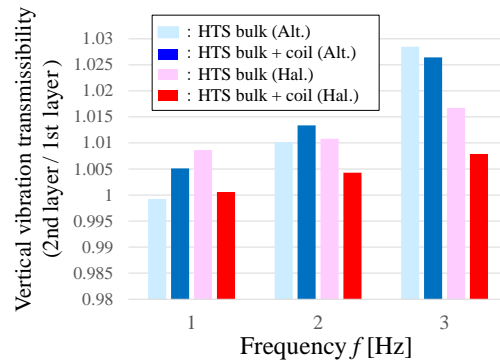


図6 鉛直振動伝達率

<参考・引用文献>

- [1] 武田 寿一：「構造物の免震・防振・制振」，技法堂出版株式会社，pp. 1-50，1988
- [2] 免震技術研究会：「わかりやすい免震構造」，鹿島出版会，pp. 13-15，1997
- [3] M. Tsuda, T. Hamajima, et al : "Vibration Characteristics in Magnetic Levitation Type Seismic Isolation Device Composed of Multiple HTS Bulks and Permanent Magnets", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17, No. 2, pp.2059-2062, 2007

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計1件）

- ① 佐々木修平，超電導バルク体を用いた磁気浮上型免震装置に関する基礎特性，八戸工業高等専門学校紀要第50号，査読有，2016

〔学会発表〕（計5件）

- ① S. Sasaki，"Basic Research for Improving the Magnetic Levitation Force and Vertical Vibration", The 10th International Workshop on Processing and Applications of Superconducting (RE)BCO Large Grain

Materials, 2017

- ② 川岸稔, 佐々木修平, 「磁気浮上型超電導免震装置における耐荷重及び鉛直振動伝達の特性向上に関する検討」, 平成 29 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2017
- ③ 野里情司, 佐々木修平, 「Halbach 配列永久磁石における超電導バルク体の磁気浮上力特性に関する検討」, 平成 28 年電気学会産業応用部門大会, 2016
- ④ 長内大輔, 佐々木修平, 「磁気浮上型免震装置の特性向上に対する浮上層と固定層の関係」, 第 24 回 MAGDA コンファレンス in Tohoku, 2015
- ⑤ 野里情司, 佐々木修平, 「磁気浮上型超電導免震装置における水平振動特性改善に関する研究」, 平成 27 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2015

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 修平 (SASAKI, Shuhei)

八戸工業高等専門学校・その他部局等・助教

研究者番号 : 30707261