

# 磁気浮上機構を用いた多機能機械試験機の開発

## Development of Multi-functional Mechanical Testing Device Using a Magnetic Suspension Mechanism

知能機械工学コース

機械システム制御研究室 鈴木 健範

### 1. 緒言

磁気浮上技術は非接触という利点から、機械試験機にも利用されている<sup>(1)(2)(3)</sup>。従来の機械試験機は、試験片を保持する治具と試験機の間で働く機械的接触力を用いて応力を伝達しており、試験片と装置全体は機械的に接続されている。このため、ガス中や真空中などの特殊環境下で試験する場合、機械試験機全体を特殊な雰囲気を満たされたコンテナで囲う必要がある。

磁気浮上技術を利用し、非接触力を用いて試験片と治具のみを浮上させて特殊環境を満たされたコンテナで囲うことにより試験が可能となる。これは、装置全体を特殊環境に置くことに比較して簡便な装置となる可能性がある。

本研究では、磁気浮上機構の特長を生かし、一つの装置で引張圧縮、曲げ、ねじりの機械試験が行える、多機能非接触機械試験機についての検討を行ったのでこれを報告する。

### 2. 提案する機械試験機

#### 2.1 試験機の簡略図

今回提案する磁気浮上技術を利用した機械試験機の簡略図を図1に示す。提案する試験機は、図1のように試験片を鉛直方向に固定する試験機を想定している。試験片の上部を治具によって保持し、その治具を非接触力により支持する。試験片の下部も同様に治具によって保持し、その治具に対して機械試験に必要な応力を非接触で加える機構としている。本装置は、試験片に引張圧縮荷重 50N、曲げモーメント 0.5N・m、ねじりトルク 0.5N・m を加えられるように設計した。この仕様は、強度と延性に優れた SUS304 を参考に決定した。また、試験片は有効長さ 4mm、幅 0.4mm、厚さ 0.2mm と非常に小さいものとする。

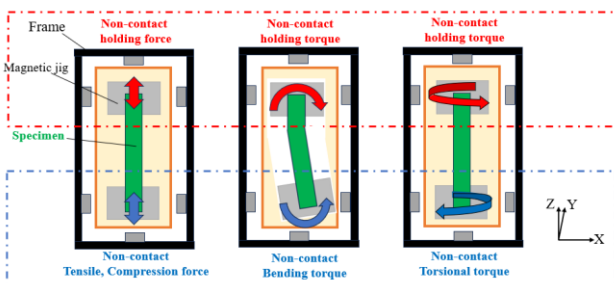


Fig. 1 Simplified diagram of Magnetic Levitation Testing Device

#### 2.2 試験機の構造と動作原理

図2に提案する機械試験機の全体図と動作原理を示す。表1に設計した空心コイルと電磁石の仕様を示す。図2に示すように、中央に位置する緑色の部分が試験片であり、鉛直方向に固定する。試験片の上部には、治具を非接触で支持する機構があり、空心コイル A、8 極の円形電磁石、4 極の円形

電磁石 C から構成される。また、試験片の下部には、治具に対して引張圧縮、曲げ、ねじりの機械試験に必要な応力を非接触で加える機構があり、4 極の円形電磁石 D、永久磁石同期モータ、空心コイル B から構成される。

図2に示す動作原理のように、鉛直方向の引張圧縮試験を可能にするため、鉛直方向の非接触支持機構には空心コイルと永久磁石によるローレンツ力を利用した機構とする。また、永久磁石をハルバツハ配列にすることで磁束を片側に収束させ、鉛直方向により大きな力が発生する機構とした。この機構により、本装置の仕様である試験片に最大 50N の引張圧縮荷重が加えられることを電磁界解析ソフト JMAG での計算により確認した。

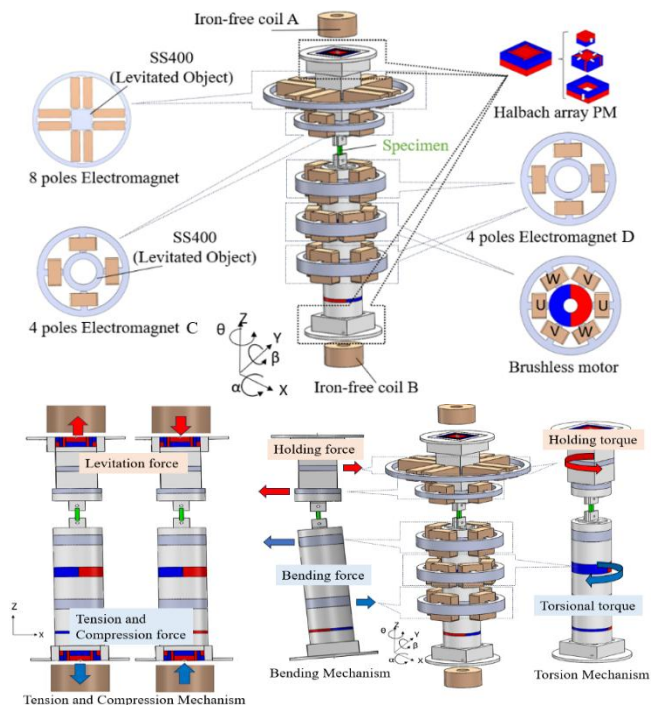


Fig. 2 Overview of Magnetic Levitation Testing Device

Table 1 Specification of Coil Windings

Part name	Turns per coil	Coil diameter
Iron-free coil A	560	0.8mm
8 poles Electromagnet	340	0.8mm
4 poles Electromagnet C	225	0.8mm
4 poles Electromagnet D	280	0.8mm
Brushless motor	225	0.8mm
Iron-free coil B	560	0.8mm

曲げ試験は、試験片上部の治具を8極の円形電磁石、4極の円形電磁石Cによって非接触支持し、試験片下部の治具に2層の4極の円形電磁石Dの非接触力を用いて曲げモーメントを発生させることで試験が可能となる。JMAGの計算により、この機構は試験片に最大 $2.9\text{N}\cdot\text{m}$ の曲げモーメントが加えられるため本装置の仕様を満たす。

ねじり試験は、試験片上部の治具を8極の円形電磁石で非接触支持し、試験片下部の治具に3相交流電磁石と永久磁石を用いた永久磁石同期モータによってねじりトルクを発生させることで鉛直軸周りのねじり試験が可能となる。JMAGの計算により、この機構は試験片に最大 $0.6\text{N}\cdot\text{m}$ のねじりトルクが加えられるため、本装置の仕様を満たす。

### 3. 機械試験機の製作

図3に製作した機械試験機の全体図と磁性治具に対するセンサの配置図を示す。試験片上部の治具を6つのレーザー変位センサを用いて6自由度を非接触支持し、同様に試験片下部の治具を5つのレーザー変位センサと2つのホールセンサを用いて6自由度を非接触制御する機構となる。

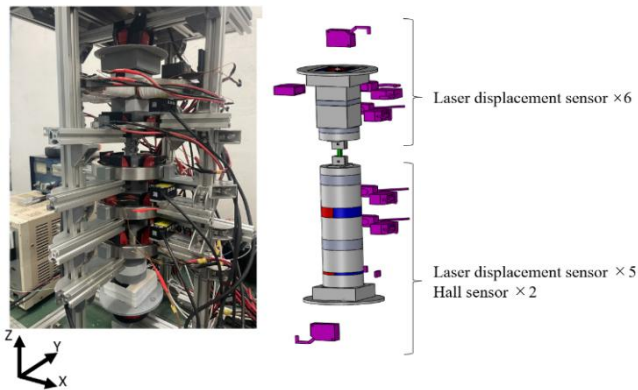


Fig. 3 Overview of the fabricated Device and Sensor Layout

### 4. 浮上実験

図4に浮上実験の様子を示す。本実験では、空心コイルAにのみ電流を流し、ハルバツハ永久磁石との間に働くローレンツ力によって試験片上部の治具を鉛直方向に浮上させた。図5に制御システムを示す。

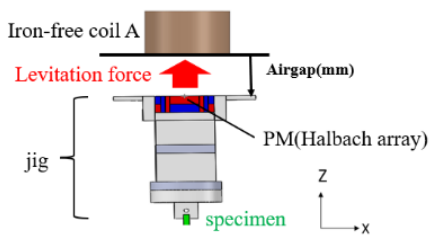


Fig. 4 Levitation experiment of upper jig

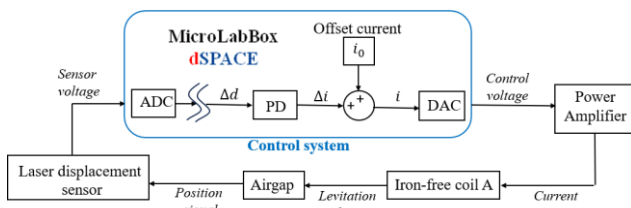


Fig. 5 Control system

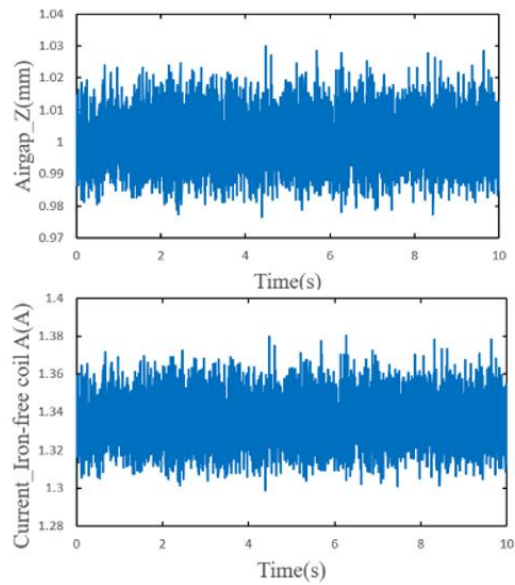


Fig. 6 Experimental result

目標とするエアギャップを1mmと設定し、PD制御器のPゲインを $1[\text{A}/\text{mm}]$ 、Dゲインを $0.005[\text{As}/\text{mm}]$ とした時、図6に示す実験結果を得た。図6より、鉛直方向のエアギャップは目標の1mmに対して、 $\pm 0.03\text{mm}$ 以内に収束しており、この振幅は試験片の有効長さ4mmの1%未満であった。このため、試験片上部の磁性治具のZ方向の磁気浮上の安定性を維持するには、十分な結果である。

### 5. 結言

提案した多機能機械試験機を設計し製作した。磁気浮上技術によって発生する振動は機械試験機に大きな影響を及ぼすため、振動を抑制することは必須である。製作した装置を用いて、機械試験を行うために制御方法やパラメータの調整を検討する。

#### 文献

- (1) Ren, Mengyi, and Koichi Oka. "Design and analysis of a non-contact tension testing device based on magnetic levitation." IEEE Access 10 (2022): 19312-19332
- (2) Ren, Mengyi, and Koichi Oka. "Design of a Non-contact Bending Testing Device using Magnetic Levitation Mechanism." IEEE Transactions on Industrial Electronics (2023).
- (3) Ren, Mengyi, and Koichi Oka. "Design of a Noncontact Torsion Testing Device Using Magnetic Levitation Mechanism." Actuators. Vol. 12. No. 4. MDPI, (2023)
- (4) Naoya Tada, Ryo Nishihara, and Hiroyasu Masago, "Tensile test of small lead-free solder joint using permanent magnet." 2012 7th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT), 145-148, 2012
- (5) 万能材料試験機 Instron, <https://www.instron.jp/ja-jp/products/testing-systems/universal-testing-systems>