

# 磁気浮上・磁気支持に関する ICT 応用技術

磁気浮上・磁気支持に関する ICT 応用技術調査専門委員会編

| 目                                    |    | 次                                  |    |
|--------------------------------------|----|------------------------------------|----|
| 1. 緒言                                | 03 | 5.1 まえがき                           | 27 |
| 1.1 調査活動の背景                          | 03 | 5.2 全超電導磁気軸受を適用した<br>フライホイール       | 27 |
| 1.2 調査活動の記録                          | 03 | 5.3 超電導コイルの永久電流による磁気浮上             | 27 |
| 1.3 技術資料の分類                          | 03 | 5.4 超電導磁気支持系の非線形共振と<br>その振幅低減      | 29 |
| 2. ICT を用いた磁気浮上システムの制御               | 05 | 5.5 磁場スライドによるバルク HTS の<br>非接触駆動    | 30 |
| 2.1 リセット要素による磁気浮上系の安定化               | 05 | 5.6 あとがき                           | 32 |
| 2.2 逐次二次計画法による制御電流の最適化               | 06 | 6. 磁気浮上・磁気支持と磁性流体                  | 34 |
| 2.3 零相電流を用いた磁気浮上制御                   | 07 | 6.1 はじめに                           | 34 |
| 2.4 浮上体の傾きを考慮した<br>零パワー磁気浮上機構        | 08 | 6.2 磁性流体による慣性変化を利用した<br>制振技術       | 34 |
| 2.5 薄鋼板の磁気浮上制御                       | 09 | 6.3 磁性流体による超伝導浮上の制振技術              | 36 |
| 2.6 視覚的測定に基づく磁気浮上システム<br>の制御         | 11 | 6.4 磁性流体液滴への磁気浮上技術                 | 38 |
| 3. 磁気浮上リニアモータ・平面モータ                  | 13 | 6.5 まとめ                            | 40 |
| 3.1 はじめに                             | 13 | 7. 磁気浮上・磁気支持の医療応用                  | 41 |
| 3.2 リニアステッピングモータを用いた<br>磁気搬送システム     | 13 | 7.1 緒言                             | 41 |
| 3.3 永久磁石併用型磁気浮上搬送装置                  | 14 | 7.2 ラジアル型セルフベアリングモータの<br>血液ポンプへの応用 | 41 |
| 3.4 吸引面形状・性状への対応                     | 15 | 7.3 磁気浮上モータの人工心臓への応用               | 42 |
| 3.5 懸垂型磁気浮上搬送装置の<br>非可動式分岐機構         | 16 | 7.4 体外循環遠心血液ポンプ用磁気浮上技術             | 44 |
| 3.6 非接触給電                            | 17 | 7.5 人工心臓内血栓検出・予防への応用               | 46 |
| 3.7 まとめ                              | 19 | 7.6 結言                             | 47 |
| 4. ベアリングレスモータとその応用                   | 20 | 8. 磁気浮上・磁気支持の産業応用                  | 48 |
| 4.1 世界最大出力のベアリングレスモータ                | 20 | 8.1 序論                             | 48 |
| 4.2 モータ巻線並列形コンシクエントポール<br>ベアリングレスモータ | 21 | 8.2 大型空調用ターボ圧縮機への応用                | 48 |
| 4.3 スロットレスベアリングレスモータ                 | 22 | 8.3 ターボ分子ポンプへの応用                   | 49 |
| 4.4 dq 軸電流制御ベアリングレスモータ               | 23 | 8.4 磁気軸受を用いた高速モータの動特性評価            | 51 |
| 4.5 液体窒素ポンプのためのアキシアル型<br>ベアリングレスモータ  | 23 | 8.5 タッチダウン軸受                       | 53 |
| 4.6 非接触給電を用いたスライス型<br>ベアリングレスモータ     | 24 | 8.6 まとめ                            | 54 |
| 4.7 おわりに                             | 25 | 9. 結言                              | 55 |
| 5. 超電導を用いた磁気浮上・磁気支持                  | 27 | 9.1 磁気浮上・磁気支持に関する ICT 応用技術<br>の動向  | 55 |
|                                      |    | 9.2 今後の調査活動                        | 55 |

## 磁気浮上・磁気支持に関する ICT 応用技術 調査専門委員会委員

委員長 上野 哲(立命館大学)  
幹事 栗田 伸幸(群馬大学)  
幹事 坂本 泰明(鉄道総研)  
幹事補佐 杉元 紘也(東京電機大学)  
幹事補佐 丸山 裕(東芝インフラシステムズ)  
委員 朝間 淳一(静岡大学)  
小豆澤 照男(ティー・エイ・ラボ)  
大路 貴久(富山大学)  
大島 政英(公立諏訪東京理科大学)  
大橋 俊介(関西大学)  
岡 宏一(高知工科大学)  
小沼 弘幸(茨城高専)  
小野 浩一郎(日本精工)  
小野 貴晃(エドワーズ)  
柿木 稔男(崇城大学)

委員 小森 望充(九州工業大学)  
坂本 茂(日立製作所)  
阪脇 篤(ダイキン工業)  
軸丸 武弘(IHI)  
進士 忠彦(東京工業大学)  
杉浦 壽彦(慶應義塾大学)  
鈴木 晴彦(福島高専)  
千葉 明(東京工業大学)  
成田 正敬(東海大学)  
土方 規実雄(東京都市大学)  
土方 亘(東京工業大学)  
二村 宗男(秋田県立大学)  
増澤 徹(茨城大学)  
水野 毅(埼玉大学)  
森下 明平(工学院大学)

途中退任 竹本 真紹(岡山大学)  
田中 慶一(日立ハイテクノロジーズ)  
福添 英夫(日本精工)  
山本 雅之(エドワーズ)

## 1. 緒言

### 1.1 調査活動の背景

磁気浮上・磁気支持技術は磁気浮上列車、搬送機、軸受などに応用が拡大されてきており、特に近年では、人工心臓などの小型の軸受やモータなどへの適用が注目されている。磁気浮上・磁気支持は電磁力を利用した非接触支持方法の総称であるが、その原理は多岐にわたり、パッシブな方法、アクティブな方法、電磁石を使用する方法、永久磁石を使用する方法など様々である。

社会的にみると特に本邦においては、少子高齢化、人口減少、地球環境対策の必要性など、これまでの単一の技術分野における開発では対処できない問題が顕在化している。すなわち電気機器の分野においても、地球環境を考慮した設計、医学への応用、バリアフリーやハンディキャップを負った方への対応など分野を超えた研究開発が必要となってきた。さらに非接触給電技術や超電導技術の発展など、磁気浮上・磁気支持と直接関連のある技術分野との連携も考慮していかなければならない。

一方で通信、無線技術の発達、携帯端末の小型化など、ICT (Information Communication Technology) が日進月歩で発展しており、これまで高価、大型であった電子装置が廉価で小型になり、画像処理など高度なセンシング技術が実用化されている。このような技術を活用することは磁気浮上・磁気支持を社会に浸透させる上で不可欠になると考えられる。また電子計算機も膨大なデータを瞬時に処理する能力を得てきており、量的な性能が質的な性能を凌駕しつつある。磁気浮上・磁気支持技術、特にアクティブな方法によるものは、センシングと制御の融合である。画像情報を用いた磁気浮上制御、情報通信技術を用いた磁気浮上列車の制御や無線通信による浮上体からのセンシングは現状でも可能であり、MEMS センサや新たな半導体デバイスの活用も期待される。パッシブな方法での磁気支持においてもセンシングと制御など ICT の連携は重要であり、広い意味での制御技術と磁気浮上・磁気支持技術について検討していく必要があると考えられる。

このような内外の趨勢の中で、磁気浮上・磁気支持に関する ICT 応用技術調査専門委員会 (委員長 上野哲) では、前委員会 (委員長 大橋俊介) での調査活動(1)を踏まえて 2017 年 11 月に設置された。本委員会の目的は、磁気浮上・磁気支持機器、特に ICT 応用に関連した機器の最新動向を取りまとめるとともに、磁気浮上・磁気支持へ適用可能な ICT 分野やパワーエレクトロニクスなどの他分野の最新技術の動向も調査し、今後の磁気浮上・磁気支持関連技術の発展に大いに役立てることである。本報告書は、本委員会の 2021 年 4 月までの 3 年 5 ヶ月の調査活動を報告するもので、全 9 章で構成されている。第 1 章では本委員会の調査活動の概要を示す。第 2 章では ICT に関連した制御技術、

第 3 章では磁気浮上リニアモータ・平面モータ、第 4 章ではベアリングレスモータ、第 5 章では超電導を用いた磁気浮上、第 6 章では磁性流体、第 7 章では医療応用、第 8 章では産業応用についての調査報告をまとめた。そして第 9 章でまとめを行い、今後の調査活動の方向性について述べる。

### 1.2 調査活動の記録

#### 1.2.1 委員会の調査検討事項

磁気浮上・磁気支持に関する ICT 応用技術調査専門委員会では、以下の項目について調査検討を行なった。

- (1) 最新の磁気浮上・磁気支持技術応用機器における、ICT 応用、研究開発、製品化例の調査
- (2) 磁気浮上・磁気支持に適用できる他分野での制御技術の調査
- (3) 磁気浮上・磁気支持に適用できる他分野でのセンシング技術の調査

調査検討は各委員から提出された技術資料および見学会資料に基づき、議論・討論により行われた。

#### 1.2.2 委員会の構成メンバー

本委員会は当初 23 名で構成されていたが、2 名の交代、2 名の退任、9 名の増員を経て 30 名の構成メンバーで活動を進めた。

#### 1.2.3 委員会の開催記録

本委員会は計 18 回の委員会を開催し調査活動を行なった。そのうち 5 回は見学会を行い、関連する技術についてより深い議論を行なった。また 3 回の委員会を日本機械学会「磁気軸受のダイナミクスと制御研究会」と合同で開催し、機械系技術者との議論を行うことで幅広い観点から議論を行なった。COVID-19 の影響により 2020 年 3 月以降はオンライン開催となり、また活動期間が 5 ヶ月延長された。表 1.1 に活動の記録を示す。

これらの調査活動に加え、3 回の研究会 (2018 年 12 月 [立命館大]、2019 年 12 月 [福島]、2020 年 12 月 [鹿児島]) を協賛、平成 30 年電気学会産業応用部門大会<sup>(2)</sup>および令和 3 年電気学会全国大会<sup>(3)</sup>にてシンポジウムを行い、磁気浮上・磁気支持の技術動向を紹介した。

### 1.3 技術資料の分類

磁気浮上・磁気支持に関する ICT 応用技術調査専門委員会では、最新の磁気浮上・磁気支持技術について調査を行い、関連する技術分野や応用分野から以下のように分類を行なった。

- (1) ICT を用いた制御技術
- (2) 磁気浮上リニアモータ・平面モータ
- (3) ベアリングレスモータ