

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 藤井雄作

本論文は、物体を機械的に非接触で浮上させ、外力を極力小さく抑制した状態を作ることによる、力学量測定の高精度化、高機能化を追求した研究成果について論じたものである。物体を非接触浮上支持させる手段として、空気圧を利用した方法、および、超伝導体に作用する電磁気力を利用した方法の2つが利用されている。静圧空気軸受による空気圧支持を利用した方法として、各種力学量測定手法の提案・実験を行い、その可能性・将来性を追求している。超伝導体のマイスナー効果による磁気浮上を利用した方法として、質量の量子標準化への貢献を目指して計量研究所で行われてきた超伝導磁気浮上法を、さらに推し進めるための研究開発を行っている。本論文により為された、空気圧支持を用いた力学量計測の高精度化、高機能化への貢献、および、超伝導磁気浮上支持を用いた超伝導磁気浮上法による質量の量子標準化への貢献は、工学的に重要である。

本論文の各章ごとの要旨は以下のようである。

第1章においては、本研究の目的、意義、概要を簡潔に述べている。

第2章においては、本研究の背景を述べている。力学量（質量、力、トルク）測定法に関し、変動する力の発生・計測、変動するトルクの発生・計測、および、マイクロ重力環境下における質量測定のいずれについても未だ有効な方法が確立されていないことと、それらの克服が切望されることを示している。質量の量子標準化を目指す研究の動向に関しては、現在“もの”で定義されている質量標準を基礎物理定数に基づく普遍的な定義に置き換えることが、計量標準の分野における最大級の挑戦課題の一つと認識されていることを示している。力学量と電気量を高精度に結びつけることが質量の量子標準化を達成する上で有効であるとして、これに関する様々な試みが主要各国の標準研究所で進められていること、および、そのどれをとっても未だ最終目標には遠く及ばない現状を示している。その中で特に、計量研究所で進められている超伝導磁気浮上法の原理・優位性・課題を示し、本方法の研究開発を進めることの意義を明確に示している。

第3章においては、本論文の第1の柱である、空気圧支持による力学量の高精度測定方法に関して論じている。まず、基本的なツールとなる静圧空気直動軸受の摩擦特性評価法の考案・開発を行っている。その手法を用いて、静圧空気直動軸受の静摩擦特性、動摩擦特性を定量的に評価している。次に、浮上した質量に作用する慣性力として、変動する力

を発生・計測する手法を考案し、静圧空気直動軸受を浮上支持手段に用いた試験装置を開発している。本方法は、現段階でも既に、実用的に極めて有用なものとなっており、更なる研究開発により、力計測における標準的な評価方法として発展・展開が期待される。さらに、トルクについても、浮上支持したフライホイールに作用する慣性モーメントとして、変動するトルクを発生・計測する手法を考案している。力の場合と同じく、更なる研究開発により、トルク計測における標準的な評価方法として発展・展開が期待される。最後に、マイクロ重力環境下で動作する質量測定器について、運動量保存則を直接に用いた測定原理を考案している。また、静圧空気直動軸受を用いた2種類の地上実験装置を開発し0.07%程度の相対標準不確かさでの質量測定に成功し、提案する方法の有効性を実験的に検証している。

第4章では、本論文の第2の柱である、超伝導磁気浮上による力学量と電気量の高精度比較測定方法に関して論じている。まず、低温環境に置かれた浮上体の姿勢・位置（6自由度）を、室温部から同時測定する姿勢位置測定システムを考案・開発している。さらに、これから得られるデータと、浮上中のエネルギー釣合式とにより、浮上体の重心鉛直変位を推定する方法を考案し、1ppm程度の不確かさで推定できることを示している。次に、磁気浮上実験環境下（液体ヘリウム温度、希薄ヘリウム雰囲気下）における浮上体の質量を、国際キログラム原器にトレーサブルに値付けする方法を示している。その方法に基づいた質量測定装置を製作し、希薄ヘリウム雰囲気環境下における超伝導浮上体の質量を、約1ppmの相対標準不確かさで値付けしている。次に、次世代磁気浮上システム的设计における基本ツールとして、軸対称マイスナー面（超伝導面）を含む系の数値計算アルゴリズムを考案、開発している。磁気浮上実験データとの比較により、その有用性を示している。次に、液体ヘリウム自動移送システムの考案・開発を行っている。本システムの開発により、従来、磁気浮上実験前の数時間に渡って手動で行われていたクライオスタットの冷却作業が自動化され、研究者の労力が大きく低減されている。最後に、浮上軌道の安定化を図り、力学量－電気量高精度変換する機構として優れたものとする、および、主マイスナー面の平面化を図りよりよい超伝導材料の使用を可能とすること、の2点を特長とする新しい磁気浮上実験用のコイル＝浮上体系を提案・開発している。

本論文における成果をまとめると以下のようなものである。

静圧空気軸受を用いた変動する力・トルクの発生・計測手法により、これまで不可能であった力センサ、トルクセンサの動的校正が可能となった。これにより、変動する力・トルクの測定における不確かさ評価ができるようになり、生産工程モニタリングの高精度化、各種材料試験、破壊試験の高精度化を通して、省資源、省エネルギーに直接的に貢献することが期待できる。また、マイクロ重力環境下で動作する質量測定器の開発・提供

は、建設が進む国際宇宙ステーションにおける、各種実験現場、生産現場において、不可欠な基本的な貢献となる。

超伝導磁気浮上法を用いた基礎物理定数の絶対測定、その先における、質量の量子標準化を目指した試みは、人類共通の知的基盤である標準の普遍化、不変化を目指しているという意味で、極めて重大なチャレンジである。現状においては、電流天秤の測定アルゴリズム、メカニズムを改良したワットバランス法が測定精度としては先行しているが、最終目的である質量標準の量子化の達成可能性という意味では、どの方法が優位かを客観的に見定めるのは極めて難しい。磁気浮上は、物体を非接触浮上支持するという、力学量を発生・測定する上での決定的と思われる長所を有している。磁気浮上法が最終目標に到達するには、まだ、長い道のりが予想されるが、本研究により為された数々の研究成果は、磁気浮上法に対する大きな貢献となる。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。