

論文の内容の要旨

論文題目： 質量を浮上支持することによる力学量の高精度測定

氏名： 藤井 雄作

力学量の発生・計測手法として、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の有効性について議論する。

力学量の中で最も基本的な量である力 F は、次式のように慣性質量 M と加速度 α の積として定義される。

$$F = M\alpha \quad (1)$$

時間的に一定の力の発生には、加速度 α として重力加速度 g を用いることが便利であり一般的である。この場合、天秤を用いて国際キログラム原器からトレーサブルに値付けされた質量 M と、そこで計測された重力加速度 g により、その物体に作用する重力として力が求められる。重力同士の大きさの静的な比較については、接点にナイフエッジ、あるいは、ヒンジを有する天秤メカニズムにより、高精度に比較測定する技術が確立している。

しかしながら、変動する力（＝定義に従えば変動する加速度場に置かれた質量に作用する慣性力と同義）の発生および計測に関しては、未だ確立された方法はない。重

力加速度場の存在する地上で重力の影響を受けずに変動する加速度を発生・計測する方法として、質量を水平面内運動のみ自由に許す直動軸受で浮上支持することを、一つの解決策として提案した。しかしながら、直動軸受の摩擦特性を評価する方法は確立されておらず、その開発が望まれた。同様に、変動するトルクの発生および計測に関しても、それを可能とする方法は存在しなかった。産業界で広く用いられる力センサやトルクセンサについて、それらが実際に使用される動的な状態での校正方法が存在しない現状では、それへの貢献が強く望まれる。また、国際宇宙ステーションに代表されるマイクロ重力環境下で動作する質量測定器に関しても、その有効な原理は提案されていなかった。これらの課題に対して貢献することは、非常に有意義である。

本研究ではまず、慣性質量、あるいは、慣性モーメントとしての物体を空気圧により非接触浮上支持し、誤差要因としての外力を小さく抑制した状態を作ることにより、力、あるいは、トルクといった力学量を高精度に発生・測定する方法を提案した。

本研究においては、空気圧支持手段として、広く市場に流通する静圧空気軸受を用いるが、その摩擦特性に関して不明な点が多く、かつまた、その評価評価も見当たらなかった。そこでまず準備として、静圧空気軸受の摩擦特性評価方法の考案・開発を行い、静圧空気直動軸受の摩擦特性の評価を行った。これにより、供給空気の流れの非対称性に起因すると考えられる力、見かけの上で静的摩擦に見える力、動的な摩擦力、の3種類の力について、その大きさを評価した。

次に、変動する力の高精度発生・測定方法として、空気軸受で非接触浮上支持された慣性質量に作用する慣性力を利用する方法を考案・開発した。この方法を、純アルミ丸棒に対する動的3点曲げ試験における作用力測定、および、力センサーの衝撃応答特性評価に適用し、その有効性を実験的に示した。予備的に組み上げた実験装置により、持続時間が40ms程度の衝撃力の瞬時値測定において、相対不確かさ0.4%程度の測定結果が得られた。これは、実用上、十分に役に立つレベルである。力を測定する手段である力センサの校正方法として重錘を用いた静的な方法のみ存在し、動的な校正方法が存在しない現状において、ここで開発した方法は、変動する力の発生・計測法として極めて有望であり、近い将来における実用化、標準化が期待される。

次に、現在、未だに有効な方法が存在しない変動するトルクの高精度発生・測定の分野において、空気軸受で支持されたフライホイールに貯えた角運動量を用いる方法の提案を行った。トルクを測定する手段であるトルクセンサの校正方法として重錘を

用いた静的な方法のみ存在する現状において、ここで提案した方法は、変動するトルクの発生・計測法として標準的な方法として実用化されることが期待できる。この方法は、変動するトルクの計測の高信頼性化を通して、産業化、社会に大きな貢献をすることが期待できる。

最後に、建設中の国際宇宙ステーション（International Space Station: ISS）に代表されるマイクロ重力環境下で動作する質量測定器の測定原理の提案を行い、その有効性を地上実験により確認した。2台の対向させた静圧空気直動軸受を用いた地上での予備実験で得られた相対不確かさ 0.07%は、既に十分に実用的なレベルである。

一方、国際単位系の5つの基本単位の中で唯一“もの”で定義されている質量を、普遍的な定義で置き換えることは、標準研究の分野においてもっともチャレンジなテーマとして認識されている。それを受けて、国際キログラム原器の質量にトレーサブルに測定される力学量と、ジョセフソン効果と量子ホール効果を介して基礎物理定数に基づいて計測可能な電気量を結びつけることにより、質量の量子標準化を目指す研究が主要各国の標準研究所で進められている。現在、ナイフエッジあるいはヒンジなど機械的接点を有する天秤のメカニズムを利用した電子天秤を改良した方法（ワットバランス法）が最も高い測定結果を出している。この方法では天秤のアームを動かした状態での測定が行われるため、機械的接触を有するということが特に問題となってくる。一方、超伝導体を浮上させることにより、その質量に作用する重力をうまく取り出そうとする超伝導磁気浮上法の研究開発が計量研究所で進められてきた。この磁気浮上法の研究開発をさらに押し進めること、質量の量子標準化へ貢献すべく努力することは、あらゆる科学・技術の基盤である標準の分野に対して極めて大きな貢献となる。

計量研究所の超伝導磁気浮上法は、現在、実験システム、および、筆者が中心となって開発した新磁気浮上システムにより、 10^{-6} レベルの測定を目指して実験が進められている段階である。超伝導磁気浮上法は、天秤などの複雑な機構を流用したワットバランスなど先行する他の方法と比べ、非接触浮上支持という力学量の測定装置として決定的とも言える長所を有している。現在、いずれの方法も、最終目標精度とされる 10^{-8} からはほど遠い状況にある。この力学量と電気量を結びつける方法の精度が思うように向上しない理由として、力に代表される力学量の測定においては誤差要因の排除が極めて難しいということが挙げられる。磁気浮上法は、マイスナー効果により

非接触浮上支持されるが故に、摩擦などの外力の影響を極めて小さく抑制することが可能であり、かつ、コイルと浮上体のみと装置構成が極めて簡素である。すなわち、磁気浮上法は不確かさ要因の少ない、原理性の高い方法であるといえる。したがって、最終的な達成精度の観点からは有力候補の一つに数えられ、今後の更なる研究開発の進展が期待されている。

本研究により、コーン形状の浮上体について、姿勢制御なしの状態において、浮上体の質量、重心の鉛直変位、そこでの地球の重力加速度の積として表される浮上体の重力位置エネルギーを、1ppm 程度の不確かさで測定することが初めて可能になった。また、重要な要素技術として、液体ヘリウムの自動移送方法、マイスナー面を含む軸対称数値解析アルゴリズムなどの新規開発を行った。さらに、超伝導直動軸受の導入による浮上姿勢の安定化、および、主マイスナー面の平面化による最良の超伝導材料を使用できるようにすること、の2点を特長とする新しい磁気浮上システムを開発し、浮上実験を成功させた。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おり、この特長を最大限に生かすことを目的に本研究で着手した磁気浮上メカニズムの研究開発により、今後の飛躍的進展が期待できる。

以上のように本研究では、物体を非接触浮上支持させ、地上において摩擦などの外力を極力小さく抑制した状態を作ることにより、物体に作用する力学量（力、トルク）を高精度に発生・計測しようとするアイデアを追求してきた。このアイデアは極めて単純なものであるが、これまでまじめに取り組みられてこなかった。単純であるということは、同時に、原理性の高い測定の実現可能性があるということであり、将来における核心技術となる可能性を秘めていると考える。

本研究で生み出し、育てた数々の新しいアイデア、成果は、同時に、将来における極めて有望な研究開発の芽にもなっている。これらの新しい科学技術の芽には、人類共通の知的基盤としての計量標準、計測技術の高度化に貢献すること、設計製造プロセスの高度化、省資源省エネルギーと繋げて最終的に地球環境保全に貢献すること、という2つの大きな目標に対して多大な貢献を行いうる可能性が秘められていると考えている。今後、「質量を浮上支持することに力学量の高精度測定」に関してさらに研究開発を進めていきたい。