

質量を浮上支持することによる
力学量の高精度測定

藤井 雄作

目次

第1章 緒論	.....	1
1.1 研究の目的と意義	.....	1
1.2 研究の概要	.....	3
第2章 背景	.....	5
2.1 力学量測定 of 現状と課題	.....	6
2.1.1 静圧空気軸受の摩擦特性	.....	7
2.1.2 変動する力の発生・測定法の動向	.....	9
2.1.3 変動するトルクの発生・測定法の動向	.....	12
2.1.4 マイクログラビティ環境下における質量測定	.....	14
2.1.5 まとめ	.....	17
2.2 質量の量子標準化を目指す研究の動向	.....	18
2.2.1 現在の質量標準を取り巻く情勢	.....	18
2.2.2 電気量の量子標準	.....	27
2.2.3 ワットバランス	.....	31
2.2.4 電圧天秤と液体電位計	.....	39
2.2.5 超伝導磁気浮上	.....	43
2.2.6 まとめ	.....	52
2.3 まとめ	.....	55
第3章 空気圧支持による力学量の高精度測定	.....	57
3.1 静圧空気直動軸受の摩擦特性評価法	.....	58

3.1.1	はじめに	.....	58
3.1.2	実験装置	.....	59
3.1.3	静摩擦特性	.....	61
3.1.4	動摩擦特性	.....	67
3.1.5	まとめ	.....	71
3.2	変動する力の発生・計測法	.....	73
3.2.1	はじめに	.....	73
3.2.2	衝撃力発生器	.....	74
3.2.3	カセンサの動特性評価法	.....	83
3.2.4	純アルミ丸棒の3点曲試験	.....	92
3.2.5	まとめ	.....	98
3.3	変動するトルクの発生・計測法	.....	103
3.3.1	はじめに	.....	104
3.3.2	変動トルク発生器の提案	.....	105
3.3.2	まとめ	.....	109
3.4	マイクログラビティ環境下で動作する質量測定器	.....	110
3.4.1	はじめに	.....	110
3.4.2	提案する方法	.....	111
3.4.3	地上での予備実験1	.....	115
3.4.4	地上での予備実験2	.....	121
3.4.5	まとめ	.....	126
3.5	まとめ	.....	128
第4章	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	.....	131

4.1	浮上体重心鉛直変位の高精度測定	.....	132
4.1.1	解決すべき課題	.....	133
4.1.2	姿勢位置測定システム	.....	134
4.1.3	姿勢位置計測	.....	142
4.1.4	浮上体の重心高さの推定	.....	145
4.1.5	まとめ	.....	151
4.2	浮上体質量の測定	.....	153
4.2.1	測定原理	.....	154
4.2.2	質量比較測定装置	.....	155
4.2.3	浮上体質量の測定	.....	157
4.2.4	浮上体質量測定における不確かさ評価	.....	159
4.2.5	まとめ	.....	160
4.3	数値計算アルゴリズムの開発	.....	162
4.3.1	解析アルゴリズム	.....	163
4.3.2	計算	.....	166
4.3.3	まとめ	.....	170
4.4	液体ヘリウムの自動移送システムの開発	.....	172
4.4.1	開発の必要性	.....	173
4.4.2	手法	.....	175
4.4.3	実験	.....	177
4.4.4	今後の展開	.....	180
4.4.5	まとめ	.....	182
4.5	次世代磁気浮上システムの開発	.....	183
4.5.1	開発のねらい	.....	184

4.5.2 基本設計	.....	185
4.5.3 磁気浮上実験	.....	191
4.5.4 まとめ	.....	194
4.6 まとめ	.....	196
第5章 結論	.....	198
謝辞	.....	203
参考文献	.....	205
発表論文	.....	213

第1章 緒論

1.1 研究の目的と意義

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。

$$F = M\alpha \quad (1.1)$$

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。

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ング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。

以上、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り、動的な力の発生・計測手法の高精度化、および、質量の量子標準化への貢献を目指して研究を行うことは、有意義である。

1.2 研究の概要

第2章では、浮上体させた質量により高精度化が期待できる分野として、力学量測定法に関するいくつかの問題点、および、質量の量子標準化を目指す研究の動向について述べる。まず、力学量測定分野から、変動する力の発生・計測分野、変動するトルクの発生・計測分野、および、マイクロ重力環境下における質量測定分野について、その現状と克服が切望される課題について述べる。次に、力学量と電気量との高精度な比較測定を行うことによる質量の量子標準化を目指した諸研究の現状について概観する。特に、計量研究所で独自に進められている超伝導磁気浮上法を取り巻く情勢について述べる。

第3章では、著者が研究開発を行ってきた慣性質量を利用した力学量計測法について述べる。まず、基本的なツールとなる直動空気軸受の摩擦特性評価法の開発について述べる。2番目に、変動する力・トルクの発生・計測法を提案し、これを動的3点曲試験における作用力の測定、力センサの動的応答性評価に適用した開発例を示す。3番目に、変動するトルクの発生・計測装置を提案し、これを用いたトルクセンサの動特性校正法を提案する。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提案し、その有効性を確認するために行った地上実験について述べる。

第4章では、質量の量子標準化を目指して研究を進めている超伝導磁気浮上法について述べる。まず、東京大学および計量研究所で20年以上の長きにわたって研究開発が継続されてきた磁気浮上実験システム用に開発した、姿勢位置測定システム、浮上体質量測定システムについて述べる。次に、次世代磁気浮上システムの設計における基本ツールとして開発した数値計算アルゴリズムについて述べる。また、磁気浮上実験の効率化・省力化を図る目的で開発した液体ヘリウム自動移送システムについて述べる。最後に、著者が中心となって進めている次世代磁気浮上システムの研究開発の現状について述べる。

第5章では、まとめと今後の展望について述べる。

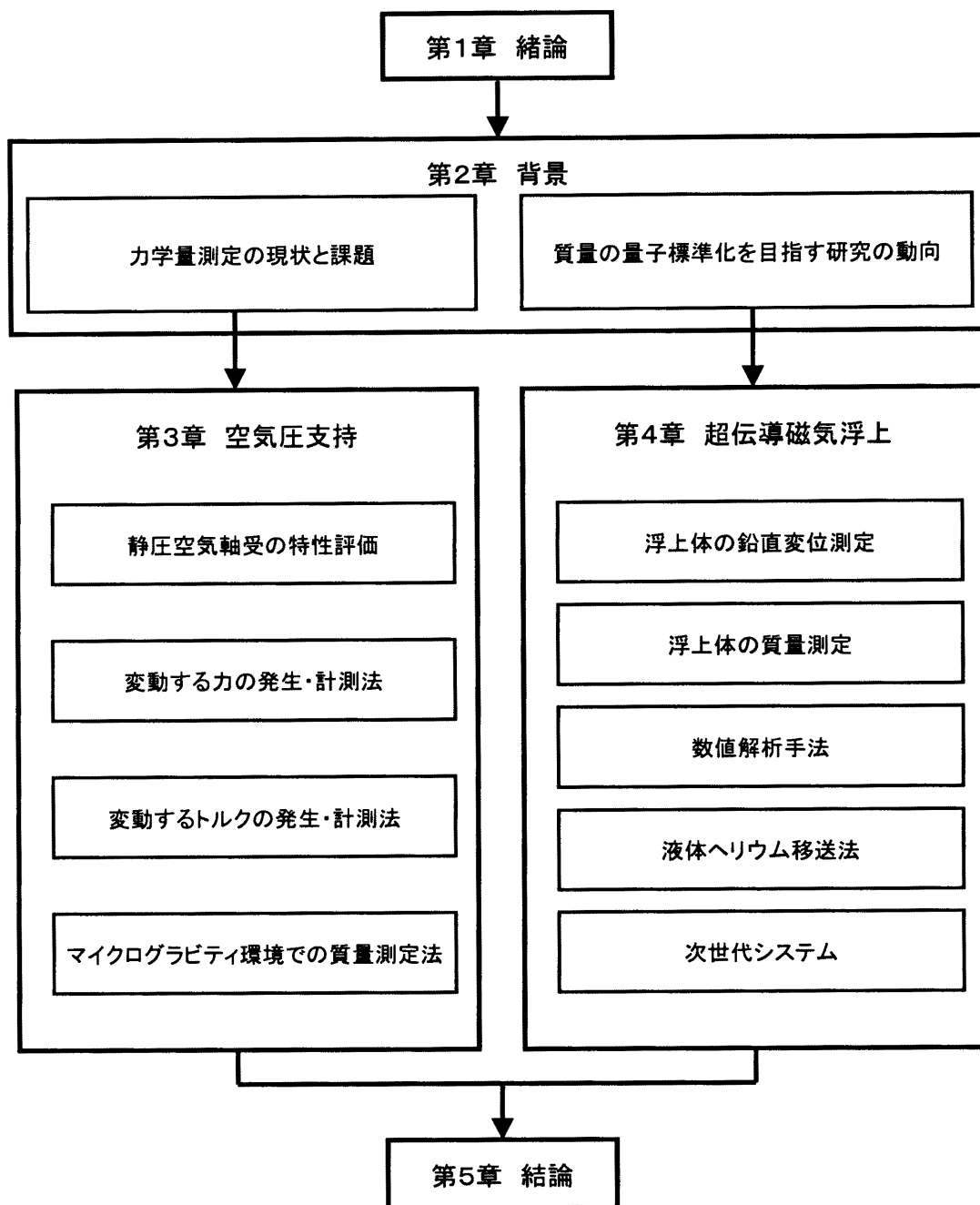


Fig. 1.1 本論文の構成と内容の相互関係

第2章 背景

本章では、本研究を取り巻く背景として、質量を浮上支持することにより高精度化が期待できる分野について概観する。力学量測定におけるいくつかの課題、問題点、および、質量の量子標準化を目指す研究の動向について述べる。

まず 2.1 において、力学量測定の分野から、変動する力の発生・計測の分野、変動するトルクの発生・計測の分野、および、マイクロ重力環境下における質量測定の分野について、その現状と克服が切望されている課題について述べる。

次に 2.2 において、質量の量子標準化を目指して、主要各国の標準研究所で行われている諸研究の現状について述べる。国際キログラム原器の質量に基づいて測定される力学量と、基礎物理定数に基づいて測定される電気量との高精度な結合（比較測定）を実現することにより、質量の量子標準化を目指す主要な試みについて外観する。現在までに提案されているこれらの方法の共通点は、物体（質量）に作用する重力と電磁気力の釣り合い状態を作り、そこで両者を比較測定することにある。その中で、計量研究所で独自に進められている超伝導磁気浮上法を取り巻く情勢について重点的に述べる。

2.1 力学量測定 of 現状と課題

ここでは、力学量（力、トルク、質量）の発生・測定 of 分野の中から、質量を空気圧により浮上支持することにより技術革新が期待できる部分について、その現状と課題について述べる。まず、空気圧による浮上支持を実現する手段として用いる静圧空気直動軸受について、その摩擦特性が殆ど解明されていない現状について述べる。次に、特に最も基本的な力学量である力の発生・測定に関する現状として、力センサ of 動的校正方法が確立されていない現状、それが故に、変動する力の測定結果に対する不確かさ評価が一般的に不可能である現状について述べる。次に、力と並んで産業界で重要な力学量であるトルクの発生・測定に関する現状として、トルク測定に広く用いられているトルクセンサ of 動的校正方法が存在しない現状を述べる。最後に、マイクロ重力環境下で動作する質量測定器開発の世界情勢について、特に、現在建設が進められる国際宇宙ステーションにおいて使用できる汎用的な質量測定器が存在しない現状について述べる。

2.1.1 静圧空気軸受の摩擦特性

静圧空気軸受（静圧空気回転軸受，静圧空気直動軸受）は，高い運動精度と小さな摩擦という2つの特徴をもち，主に前者により，精密測定器，精密加工機に広く用いられている．静圧空気軸受では，厚さ $10\mu\text{m}$ 程度の空気膜に「復元力」，「剛性」を持たせるために，圧縮空気噴出口に“絞り”を設ける．この“絞り”より，膜厚が小さくなると圧力が高くなり，膜厚が大きくなると圧力が低くなる．絞りの形態としては，細穴を穿っただけの「自成絞り」，オリフィスを設けた「オリフィス絞り」，表面に彫られた細い溝へ圧縮空気を導入する「表面絞り」などがある．

静圧空気軸受に関する研究論文としては，その運動特性の評価と改良に関するものは多数存在する¹⁾⁵⁾．しかしながら，摩擦特性に関するものは見当たらない．例えば，静圧空気直動軸受は，空気膜で非接触支持されているので，単純に考えれば静摩擦は存在しないはずである．しかしながら，実際には，ガイド面の角度に可動部が静止状態を保つ角度範囲が存在する現象が一般的に観測されるが，これに対する解答は見当たらない．また，動摩擦は流体粘性抵抗であるとする理論式は存在するが，その大きさは一般的に極めて小さく，その有効な測定方法も見当たらない．

静圧空気軸受に関して，高い運動精度と小さな摩擦という2つの大きな特長のうち，後者を主因として利用される例が，本研究の他にも，散見される．トルクの国家標準は一般に，アームに静荷重を負荷する静トルク校正機により設定されているが，その軸受に，静圧空気回転軸受を使用するケースが多く見られる．また，著者が訪問した国際度量衡局（BIPM,）で現在進められている万有引力定数測定では，地球の重力加速度から受ける力に比較して極めて小さな力を測定するに際して外力を極力小さく抑制する目的で，その支持方式として静圧空気回転軸受が導入されていた．また，2.1.2 で述べるドイツの物理工学研究所（PTB）で試みられている力センサの動的校正方法では，加振器で振動させられる

物体（慣性質量）の運動を、小さな摩擦力で、鉛直方向のみに規制する目的で静圧空気直動軸受が用いられている。しかし、いずれの例においても、静圧空気軸受の摩擦特性は未知な部分が多いものとして、研究課題の一つに挙げられている。上記の例では、各研究者が独自の工夫でその大きさの見積もりを試みているが、論文発表には至っていない。

産業、学術の世界でキーテクノロジー、極限技術の一つとして、便利に利用される静圧空気軸受についてその摩擦特性を解き明かすことは、その改良、適用範囲の深化において是非とも必要なことである。その観点から、静圧空気直動軸受の摩擦特性評価方法の開発は重要である。特に、摩擦が小さいという特徴をよりどころとして、物体に作用する慣性力、慣性モーメントを高精度に発生・測定しようとする本研究においては、摩擦特性評価は不確かさを見積もる上で不可欠である。

2.1.2 変動する力の発生・測定法の動向

力センサー(Force sensor, Force transducer)は産業界において広く用いられているが、これら力センサーの校正手段としては、分銅に作用する重力を利用した静的な方法のみが確立されている。変動する力の発生・測定は、現在発展途上の分野であり、変動する力に対する力センサーの校正方法としてはいくつかの研究プロジェクトが進行中という状況である。一方、製鉄所の圧延機などの生産機械における生産工程制御のための計測、自動車・航空機などの運動特性評価、各種材料試験など、力センサーが実際に使用される場面では、計測されるべき力が変動している状態であることが多い。力センサーの変動する力に対する応答を評価する方法を確立し、力センサーの出力に対して不確かさをつけることができるようにすることは急務である。

力センサーの実際の使用形態を考えると、力センサーの校正方法としては、現在において各国標準研究所で提供される静的な校正方法に加えて、動的な校正方法が必要である。さらに、動的な校正方法として、単一周波数の連続的な振動を用いる方法と、インパルス状の衝撃を用いる方法の、2つが共に必要である。それらを、統合した形で、力センサーの校正、成績証明が行われることが望ましい。特に、変動する力の測定結果に対する不確かさ評価基準を与えるためには、力センサー単体ではなく、計測システム全体の使用基準、評価基準を設定する必要がある。

これまでに提案された、力センサの動的応答評価方法としては次の2つがある。

- 1) 変動力が加わっている環境下での弾性体の歪みを正確に計測しようとする方法^{6),7)},
- 2) 加振器と分銅の間に力センサをセットし分銅の慣性力を既知の変動力として利用しようとする方法^{8),9)}.

前者では、弾性体の歪みを2つの全く異なる方法(歪ゲージと静電容量変位センサ)で比較測定することにより、系統誤差要因の排除に努めており、0.001~100Hzの範囲内で0.4%

の不確かさで測定できるとしている。ただし、動的な力と静的な力とで、弾性体の変形の様子がヒステリシスなどにより変わる可能性などに問題点がある。後者の方法は、現在ドイツの標準研究所である PTB（物理工学研究所）において、周波数レンジ 1kHz、相対不確かさ 0.1%を目標に掲げ¹⁰⁾、重点的に開発が進められている方法である。しかしながら、周波数で単一の連続波に限られること、力センサ自体が加振されるためセンサ受感部の慣性質量の影響を考慮する必要があること、縦に積み上げた構成なので重力の影響が付加されること、などの課題に対する解決の見通しは示されていない。

また、同じ PTB で、上記の加振器を用いた連続波に対する動的校正方法に加えて、3.2 で述べる著者が提案する静圧空気直動軸受で浮上させた質量に作用する慣性力を用いる方法の開発も始まったようである。

このように、自動車などの人工構造物の安全性・信頼性確保に不可欠な衝突破壊試験においても、そこで発生する力をいかに正確に測定するかが課題になっている。力センサを内蔵した計装化シャルピー試験機などの使用においても、用いられる力センサの動特性評価法が確立されていない現状においては、計測されたデータの不確かさ評価は極めて困難である。

以上のように、変動する力の発生・計測・校正方法は、実際の使用形態からは強く望まれるものであるが、未だ発展途上にあり、国際的に認知された標準的な方法は存在しない。基本的な力学量の一つである力の発生・方法を発展させることは、各種材料の降伏応力の歪速度依存性に関する知見の高精度化などに直結し、新しい現象の発見、新しい機能の発明に直接、間接に貢献することが期待される。また、変動する力の発生・計測の高精度化は、生産工程の最適化、構造設計の最適化に直接的に結びつき、省資源化・省エネルギー化を通して地球環境保全にも貢献できることが期待できる。

力センサーの動的な校正方法の目指すべき目標値として、応答周波数 1kHz、相対標準不確かさ 1%が挙げられる。この根拠として、自動車の衝突実験における、人体模型や自動車

構造部材に組み込まれた力センサーに作用する力の持続時間が数十ミリ秒のオーダーであること、この種の衝突破壊試験に対する数値計算の精度が最高でも1%程度であることがある。なお、この1kHzを超える高い周波数に対しては、力センサーの設置状態、信号処理装置を含めた計測システム全体のより厳密な評価が要求されるであろう。現在、世界で最も熱心にこの分野の研究開発を進めているドイツの物理工学研究所の示す当面の目標値は、担当研究者からの伝聞情報によると、単一周波数の連続波に対しては測定周波数レンジ1kHz、相対標準不確かさ0.1%、インパルスに対してはインパルスの半値幅10ms、相対標準不確かさ1%程度とのことである。

2.1.3 変動するトルクの発生・測定法の動向

トルクセンサは、生産機械、船舶、自動車、電気機器などに使われるモータやエンジンのトルクを測定する目的で広く用いられている。トルクセンサの校正は、軸を静止させた状態で、分銅とアームの組み合わせで発生される静トルクを標準トルクとして加え、その時のセンサ出力を測定することにより行われる。国立標準研究所におけるそのようなトルクセンサの静的校正における不確かさは 10^{-4} 程度である¹¹⁾¹³⁾。最近、静的トルクを軸が回転した状態で加えることのできる方法が、軸の回転が軸が静止した状態で校正されたトルクセンサに与える影響を調べる目的で開発された¹⁴⁾。

しかしながら、トルクセンサが実際に使用される条件では、トルクは変動することが多い。ねじりの共振周波数が 2kHz 程度、公称相対標準不確かさ 2%程度のトルクセンサは市販されてはいるが、これらのトルクセンサは静的トルクでしか校正できないのが現状である。静的校正結果を、振動トルクの計測や衝撃トルクの計測などの動的計測に適応する際の不確かさを評価する有効な方法は見当たらない。

近年、軸回転がない状態で校正されたトルクセンサについて、軸回転の影響を評価することを可能とする方法の開発が試みられている¹⁴⁾。しかしながら、変動するトルクに対するトルクセンサの校正方法は見当たらず、有効な方法の提案は、3.3 で述べる著者の行った提案を除いては、見当たらない。

トルクセンサの動的応答評価法を開発することは、トルク計測の分野において極めて重要なことである。トルク計測において普通に要求される不確かさが 0.1%-1%であることを考慮すると、動的校正における不確かさも 1%程度であれば十分に有用なものである。前節で述べたように、力計測の分野においては、ドイツの物理工学研究所 (PTB) において、0.1%の相対標準不確かさを目指して力の動的校正方法 (単一周波数の連続波) の開発が進められている。

以上のように、変動トルクの発生・計測手法の確立は、トルクセンサの動特性評価、動

特性校正において必要であり，その開発が強く望まれる．

2.1.4 マイクロ重力環境下における質量測定

建設が始まっている国際宇宙ステーション（International Space Station, ISS）などに代表されるマイクロ重力環境下においては、4つの基本単位（m, kg, s, A）で表される国際単位系中で質量だけが、地上で通常使われている測定器では測定できない。これは、質量の測定に使われる測定器である、天秤、ロードセルなどが一様かつ一定の重力加速度場に依存した測定を行っているからである。

質量は加速度が作用することで、力、運動量、エネルギーなどの形としての比較・測定が可能となる。無重力環境下での質量を測定するためには、何らかの形で人為的に加速度場を作ることが必要となるが、このとき、その加速度場の時間的、空間的な一様性について注意を払う必要がある。それらが一様でない場合には、測定対象の密度分布、速度分布について考慮する必要がある。

従来、無重力環境下での質量測定方法に関して、次のような方法・原理が提案されている。

1) 固有振動数を利用する方法¹⁵⁾⁻¹⁸⁾,

固有振動数を利用する方法では、板バネと、その先端に固定した物体（質量）とからなる系の固有振動数を測定する。この場合、加速度場は時間的にも空間的にも一様でないので、測定対象の密度分布、速度分布を考慮しなければならない。このため、動物、弾性体、液体など、剛体以外のものの質量を測定することは難しい。また、支点を固定する必要があるが、国際宇宙ステーション（ISS）など他の精密実験、精密計測を同時進行で行う必要のある宇宙ステーションでは振動の発生が極端に嫌われるので、その点でも問題が残る。

2) 遠心力を利用する方法が研究^{17), 19)}

遠心力を利用する方法では、回転台の上で回すことにより測定したい物体に遠心力を作用させ、その力の大きさを力センサーで測定する。時間的に一様な加速度場を実現できるという利点がある。しかしながら、一般の物体は密度分布が不均一であること、半径方向に

変化する加速度場であることから、測定対象の重心位置の推定に本方法の最も大きな困難があるように思われる。もしも物体の形状・密度分布の変化がなければ、2つのアーム長（半径）における測定を行うことにより重心位置の推定は可能である。地上実験において500gの剛体の質量を約 2×10^{-4} の不確かさで推定できたという報告がある¹⁹⁾。本方法は、荷重交換装置と参照分銅の導入により、剛体質量測定において高精度化が期待できる。宇宙ステーションに伝達される回転トルク、および、力を抑制する為には、それぞれ、フライホイール、および、カウンターウェイトの導入が有効と考えられる。

3) 被測定物体と参照分銅とで構成される系の運動量保存を用いる方法^{17), 20)}

被測定物体の運動量変化と作用する力積が等しいことを利用した方法、被測定物体と参照分銅とで構成される系の運動量保存を用いる方法、など、筆者の提案を含めいくつかの研究例がある。この方法も原理は単純であるが、問題点は、いかにして、次の2つの要請を満足させるかである。

A. 摩擦等の外力を十分に小さく抑制すること。

B. 物体の重心の速度（あるいは、加速度）を十分に小さな不確かさで測定すること。

一方、著者は3.4で詳しく述べるように、加速度場が極めて小さいマイクロ重力環境を活かした、簡易で小型の質量測定器（Space Balance）を提案し、学会(AIAA)、学会誌(RSI, AIAA Journal)、研究者（アメリカのNASA、ロシアの航空宇宙庁）などから一定の評価を受けている。

今後、国際宇宙ステーション（ISS）の本格的稼働をはじめとして、宇宙空間での実験室、工場の建設など、宇宙における人間活動の活発化・多様化が予想される。こうした中で、最も基本的な物理量の一つである質量の計測に対するニーズは非常に重大かつ切実なものとなることは確実である。そこで、無重力環境下における質量測定手段が、測定レンジ、精度、測定対象（剛体、弾性体、液体、粉体、混合物など）、装置サイズ、測定時間など、多様な観点から開発されていくことが望まれる。

現在建設が進められている国際宇宙ステーション（ISS）における汎用質量測定器の開発に関して、筆者は、日露宇宙協力協定下において、ロシア航空宇宙庁（Russian Aviation and Space Agency）の研究者らと討論を行い、3.4で詳述する著者が提案する「運動量保存を利用したマイクロ重力環境下における質量測定法」に関する第1回目の専門家会合が2000年10月6日にモスクワで開催された。その中で、実験小動物、液体、粉、などを測定するための各種固定容器の開発の必要性、振動が宇宙ステーション本体に伝達されるのを防ぐ緩衝機構の必要性などが指摘され、開発目標として、容量1kg、精度0.1%程度が挙げられている。

2.1.5 まとめ

2.1 では、力学量測定分野の中から、質量を空気圧により浮上支持することにより技術革新が期待できる部分について、その現状と課題について述べた。まとめると以下のようになる。

- (1) 静圧空気直動軸受は、高精度な運動と、小さな摩擦という2つの大きな特長を有し、質量を小さな摩擦で浮上支持する手段として有望である。しかしながら、その摩擦特性には不明な点が多く、その解明のための評価方法の考案・開発が望まれる。
- (2) もっとも基本的な力学量である力について、力センサの動的校正方法は確立されていない。変動する力の発生・測定法を開発することは急務である。
- (3) トルクセンサについても、その動的校正方法が確立されていない。変動するトルクの発生・測定法を開発することは急務である。
- (4) マイクロ重力環境下における質量測定方法として、種々の研究・提案が為されているが、この分野は未だ発展途上にある。今後飛躍的に多様化・活発化するであろう宇宙における研究・生産において、様々な性能・機能を持った質量測定装置群が望まれる。

2.2 質量標準の現状と課題

2.2.1 現在の質量標準を取り巻く情勢

質量の単位であるキログラムは、パリの国際度量衡局（BIPM）に保管されている国際キログラム原器と等しい質量と定義されている。キログラムは、アンペア（A）、モル（mol）、カンデラ（cd）など他のSI単位の定義にも使用されている。Table 2.1 に国際単位系（SI）の7つの基本単位を示す。表中に示した不確かさは各単位の実現（realization）における現在の不確かさの参考値²¹⁾である。

Table 2.1 国際単位系（S I）の基本単位

量	名称	記号	定義	定義に使用される他のSI単位	不確かさ ※	
長さ	メートル	m	1秒の(1/299 792 458)の時間に光が真空中を伝わる行程の長さ	s	$3 \cdot 10^{-11}$	1983年定義改訂（その前は、メートル原器）
質量	キログラム	kg	国際キログラム原器に等しい質量		$10^{-8} ?$	1889年定義
時間	秒	s	質量数133のセシウム原子の基底状態の2つの超微細準位の間の遷移に対応する放射の周期の9 192 631 770倍の継続時間		$3 \cdot 10^{-14}$	1967年に定義改訂（その前は、平均太陽日の(1/86 400)）
電流	アンペア	A	1m間隔の互いに等しい平行電流が長さ1m当り $2 \times 10^{-7}N$ の力を及ぼし合う電流	kg, m, s	$3 \cdot 10^{-7}$	1948年定義
熱力学温度	ケルビン	K	水の三重点の熱力学温度の(1/273.16)		$3 \cdot 10^{-7}$	1954年定義
物質質量	モル	mol	0.012キログラムの炭素12の中に存在する原子の数と等しい数の要素粒子を含む系の物質質量	kg	$6 \cdot 10^{-7}$	1971年定義（その前は、酸素元素を用い、かつ、同位元素の取り扱いに対し統一見解がなかった。）
光度	カンデラ	cd	540THzの単色放射を放出し、所定の方向におけるその放射強度が(1/683)W/srである光源の、その方向における光度	kg, m, s	10^{-4}	1979年定義改訂（その前は、プランクの放射体（黒体）の輝度に基礎を置いていた。）

国際キログラム原器はジョンソン・マッセー合金と呼ばれる白金イリジウム合金（白金

90%, イリジウム 10%) を用い, 直径と高さがともに 39mm の円柱形に加工されたものである。各国に配布された各国キログラム原器もジョンソン・マッセー合金から製作され, 今から約 100 年前の 1989 年に国際キログラム原器と天秤を用いた比較測定が行われ第一回目の校正値を与えられた。国際キログラム原器と各国キログラム原器の比較測定は, 摩耗, 破損, 異物の付着の危険性をできる限り避けたいという要請から, できる限り行わないという方針が取られており, 現在までの約 100 年の間に初回を含めわずか 3 回の校正が行われているのみである。

Fig. 2.1 に第 2 回目と第 3 回目の校正値の初回の校正値からの変化を示す²²⁾。国際キログラム原器と各国キログラム原器の相対的な質量変化は, 約 100 年の間に $50 \mu\text{g}$ (5×10^{-8}) 程度以下である。しかし, 国際キログラム原器と各国キログラム原器の平均値の変化は未知である。平均値の変化は相対的な変化量 (5×10^{-8}) の 10 倍程度以下 (5×10^{-7}) であろうと推測されている例もある²³⁾が, 確証はない。同一材料, 同一製法で製作され, ほぼ同一の方法で保存される原器群の質量の平均値の変化量は, その相対的な変化量よりも大きい可能性は否定できないが, その大きさを見積もる有効な手だては今のところ見当たらない。キログラム原器の質量変化の原因として, 原器表面への気体分子, 水分子, 水銀, 有機物などの脱吸着, 原器内部への気体分子などの吸蔵, 原器内部からの気体分子の放出, 原器表面の摩耗, 欠損などが挙げられる。日本の計量研究所で行われた先駆的研究²⁴⁾を始め, 最近, 原器や標準分銅の質量変化のメカニズムの解明を指向した研究が数多くなされている^{25) -29)}。こうした研究は, 分銅を使用する質量標準体系³⁰⁾のもとでは非常に有意義であるが, 普遍性に欠けるという現行質量標準の抱える問題の根本的な解決には結びつかない。

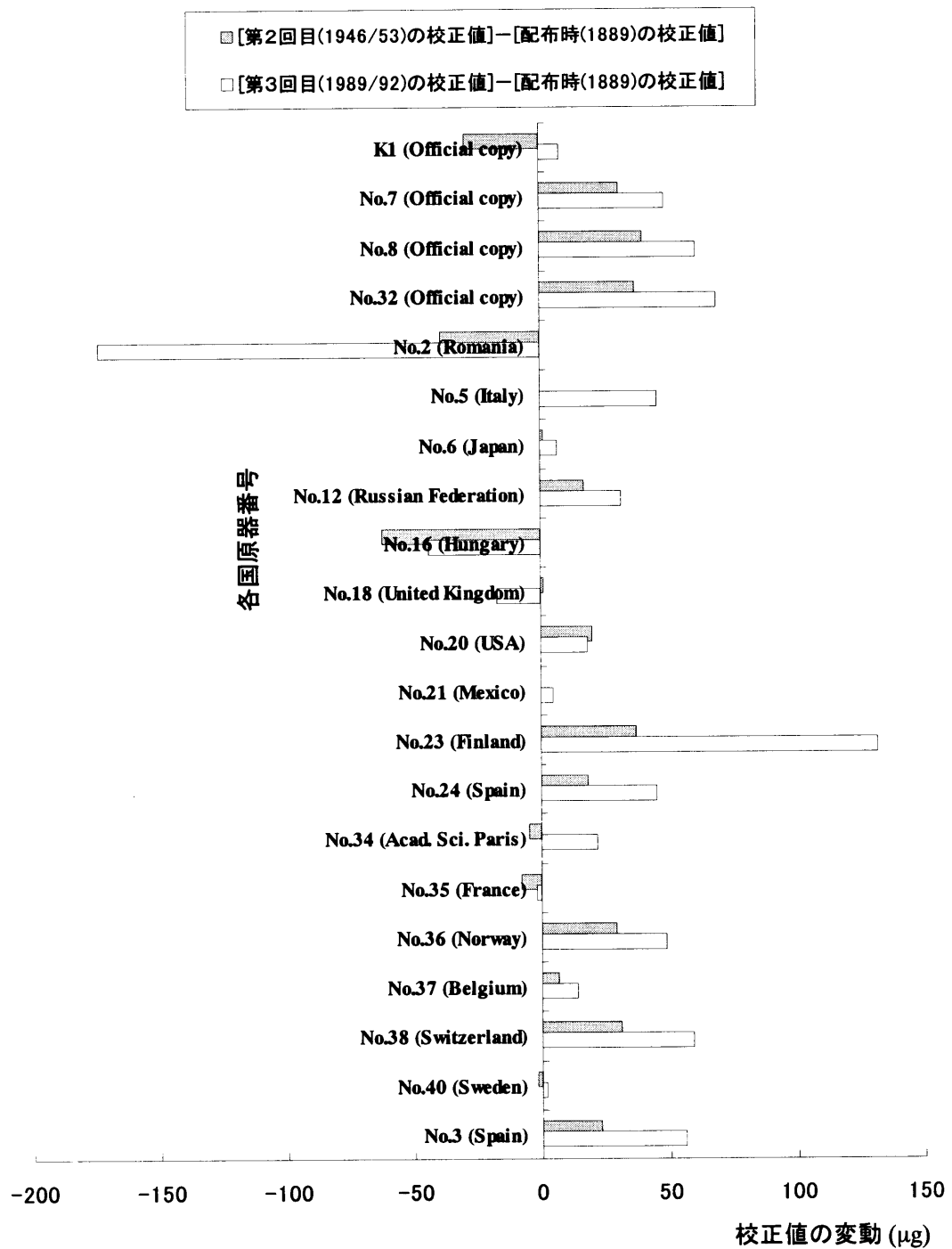


Fig.2.1 Results of the third periodic verification of national prototypes of the kilogram

“もの”で定義された現行の質量標準，国際キログラム原器の問題点として，以下が挙げられる。

- 1) 磨耗・破損の恐れがあるため日常的には使えない。
- 2) 他の物質が付着する可能性があり，かつ，それを完全に除去することは難しい。
- 3) 内部，表面での気体分子の出入を含め，経年変化がどのように生じるかわからない。
- 4) 保管場所である国際度量衡局でのみ得られる。

以上のように，国際キログラム原器を質量標準とすることの問題点は，ある特定の“もの”であることに由来する。不変性と普遍性を絶対視する観点において，現在の質量の単位であるキログラムは標準として理想的なものであるとは言えない。そうした認識から，基礎物理定数や物理現象に基づいた普遍的な質量の単位の実現方法に関する研究が世界中で精力的に行われている。しかしながら，今のところ，質量標準としてはキログラム原器と天秤を組み合わせた現行の質量標準体系における方法が最も不確かさが小さい方法であると認識されている。

一方，悪めに見積もっても100年間で 5×10^{-7} という不確かさは，1年間に換算すれば1/100の 5×10^9 程度であり，通常社会から要求される不確かさが最高でも 10^7 程度であることを考えると実用上は十分な不確かさを持っているという見方もできる。実際，現行の質量標準の不安定性により社会に混乱が生じている例は見当たらない。しかしながら，標準には不変性と普遍性が求められるべきであるので，現行の質量標準を基礎物理定数や物理現象に基づいた普遍的な標準で置き換えることが古くから求められている^{31),32)}。

将来，基礎物理定数などに立脚した普遍的な質量標準が確立したときでも，分銅と天秤の組み合わせによる現行の質量標準の体系は社会のニーズによく対応しているので，この体系の枠組みそのものは残ると考えられている。切望されていることは，現在の質量標準である国際キログラム原器を廃し，基礎物理定数や物理現象に基づいた新たな普遍的な質量標準により各国キログラム原器クラスの分銅に値付けをできるようにすることである。

現在のキログラム原器による質量の定義を，原子の質量やジョセフソン電圧周波数比などの物理定数，物理現象を用いた普遍的な定義で置き換える上で必要な不確かさは， 1×10^{-8} 程度であると言われている³³⁾．この理由としては，天秤によるほぼ同一の質量の分銅同士の質量比較における不確かさは 10^{-9} 程度と小さいものの，1) キログラム原器の経年変化，洗浄による質量変化の見積もりの不確かさ，2) 異なる密度の分銅同士を比較するときに必要な空気による浮力補正の不確かさ，および，3) 組み合わせることにより任意の大きさの質量を作るために用意される組分銅（分量分銅，倍量分銅）に値付けする操作における不確かさが，それぞれ，最高でも 10^{-8} 台であることが挙げられる．

基礎物理定数や物理現象を直接用いた普遍的な質量標準を確立する過程は以下のような過程となると考えられる．

- 1) まず現行の質量標準に基づいて関連する基礎物理定数を絶対測定する．
- 2) 基礎物理定数の測定値の変動が観測される．

ここで，測定方法に内在する不確かさが十分に小さいならば，測定に用いた単位（標準）の不確かさが測定結果の不確かさの主要な部分となる．すなわち，測定方法が有する不確かさが十分に小さいと確信できるならば，その基礎物理定数の測定結果の変動は測定に用いた質量標準の不安定性を反映したものであるとみなされる．

- 3) 基礎物理定数の値を定義として与えることにより，測定方法に内在する不確かさで，測定に用いた単位を再定義することができる．

以上の流れは，現在の長さの単位であるメートル (m) が光の速さ c の値を定義 ($c = 299\,792\,458$ m/s) として与えることにより再定義された過程にも現れている．

現在，次世代質量標準を目指した基礎物理定数の絶対測定が各国で進められている．現在の国際単位系 (SI) の枠組みの中で大きく分けると，物質量の単位であるモル (mol) とキログラム (kg) を関連付ける基礎物理定数であるアボガドロ定数 (N_A) の絶対測定，および，電気量の単位であるアンペア (A) とキログラムを関連付ける基礎物理定数であるジョセフ

ソン定数 $K_J (=2e/h)$, その逆数である磁束量子 $\Phi_0 (=h/2e)$ などの絶対測定 of 2つの流れがある。ここで, e は素電荷, h はプランク定数である。

アボガドロ定数の絶対測定的手法として, シリコン単結晶球の体積, 格子面間隔, および, 質量を測定する方法などがある。この方法では, シリコン単結晶球の体積, 格子面間隔を測定することにより, そこに存在するシリコン原子の個数が求められる。これと現行の質量標準に基づいて測定された質量から, アボガドロ定数(N_A)の絶対値が求められる。(アボガドロ定数(N_A)は, 1モルの系に含まれる要素粒子の数。) この場合にはアボガドロ定数(N_A)を定義として与えることにより, キログラム (kg) が再定義される。単一あるいは組成比のわかった原子のみで構成された物体内の原子の総数を数え, 原子の質量を基準としてその物体の質量を求めるというシンプルな発想である。しかしながら, 先の例では, シリコン球表面に生成する酸化膜の評価, 表面への気体分子などの吸着量の評価, 同位体存在比の決定, 球内の不純物や欠陥など, 10^{-8} の不確かさを達成するまでには種々の困難な障害があるようである³⁴⁾。この方法は, 質量を分子の個数が既知の現物で表わそうという試みであるが, 現状では十分に理想的なシリコン単結晶球を製作することが不可能と考えられている。一方, これとは別の試みとして, 金イオンをビームにして飛ばし集積することにより, 個数が計数された金分子の塊として質量を表わそうという試みがドイツで始められた³⁵⁾。

ジョセフソン電圧周波数定数 $K_J (=2e/h)$ や磁束量子 $\Phi_0 (=h/2e)$ などの絶対測定的手法としては, 次節以降で個別に紹介するように, 1) ワットバランス, 2) 電圧天秤, 3) 超伝導磁気浮上法 の3つがある。

電気量の国際単位系(SI)の基本単位であるアンペア(A)は, 質量の国際単位系(SI)の基本単位であるキログラム(kg)を含む力の単位ニュートン($N \equiv \text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$)を用いて定義されている。したがって, 国際単位系(SI)のアンペア (A) の不確かさには, それを構成するキログラム(kg)など他の SI 単位の不確かさ, および, それらとアンペア(A)を結びつける測定方法に含まれる不確かさが必然的に含まれる。一方, 電気量には国際単位系(SI)とは別に, ジョセフ

ソン電圧標準 ($\Delta V = f \cdot \Phi_0 = f \cdot (h/2e) = f/K_J$), 量子化ホール抵抗標準 ($R_H = h/e^2$) など量子標準が存在し, これら量子標準の再現性はそれぞれ 10^{-9} , 10^{-8} よりもよい. 現在は, こうした電気量の量子標準は, 国際単位系 (SI) の定義 (アンペアの定義) と矛盾が生じないように, 国際度量衡委員会により適当に値を調整されたジョセフソン定数 K_J , フォン・クリツィング定数 $R_K (= R_H)$ を用いて運用されている. 言い換えると, 現状では, 非常に不変性, 普遍性に優れた電気量の量子標準を, それよりも不変性, 普遍性において劣るキログラム (kg) の不確かさ, および, キログラム (kg) と SI 単位としてのアンペア (A) を結びつける測定方法の不確かさを合せた不確かさをもって校正していると言える.

今のところ, 国際単位系 (SI) のアンペア (A) の不確かさの主要な部分は, その定義に用いられている他の国際単位系 (SI) の不確かさよりも, それらとアンペア (A) を結びつける測定方法に含まれる不確かさであると考えられている. その測定方法の中に, 上記の, ワットバランス, 電圧天秤, 超伝導磁気浮上法などが含まれ, 特に, ワットバランス, 電圧天秤は現在の SI のアンペア (A) の不確かさを小さくするうえで重要な役割を担っている. これらの測定方法の不確かさが十分に小さくなれば (小さいと確信できるようになれば), キログラム (kg) の不確かさを反映した SI としてのアンペア (A) の不確かさが, 物理定数であるジョセフソン定数 $K_J (= 2e/h)$ やフォン・クリツィング定数 R_K の測定値 (あるいは, それらに基づいた国際的な協定値) の変動として観測されるようになる.

Table 2.2 質量（，電気量，物質質量）に関連した基礎物理定数の最近の調整結果

量	記号	1986年の調整結果		1973年の調整結果		$|A_{86} \cdot A_{73}| / A_{86}$ (ppm)	$U_{86} + U_{73}$ (ppm)	単位	関係式
		値 A_{86}	不確かさ U_{86} (ppm)	値 A_{73}	不確かさ U_{73} (ppm)				
磁束量子	Φ_0	2.06783461	0.30	2.0678506	2.6	7.2	2.9	10^{-15} Wb	$h/2e$
アボガドロ定数	N_A	6.0221367	0.59	6.022045	5.1	15.2	5.7	10^{23} mol ⁻¹	$N_A e$
ファラデー定数	F	9.6485309	0.30	9.648456	2.8	7.8	3.1	10^4 C mol ⁻¹	
素電荷	e	1.60217733	0.30	1.6021892	2.9	7.4	3.2	10^{-19} C	
プランク定数	h	6.6260755	0.60	6.626176	5.4	15.2	6.0	10^{-34} Js	
電子の静止質量	m_e	9.1093897	0.59	9.109534	5.1	15.8	5.7	10^{-31} kg	
万有引力定数	G	6.67259	128	6.6720	615	88	743	10^{-11} m ³ kg ⁻¹ s ⁻²	

Table 2.2 に質量あるいは電気量が関与した基礎物理定数の最近の調整 (adjustment) の結果^{36),37)}を示す。基礎物理定数の調整は、そのときまでに得られた各種測定方法による最高精度の測定値を入力データとして世界中から集め、それらデータ間の相互の矛盾ができるだけ小さくなるように最小二乗法などの統計的手法を用いて人為的に行われる。したがって、その不確かさの中には、調整操作における不確かさ〔Type-A（統計的手法で推定される成分）,Type-B（統計的でない方法で推定される成分）³⁸⁾〕、測定方法に含まれる不確かさ（Type-A,Type-B）、および、使用する単位（現在はSI）に含まれる不確かさ（Type-A,Type-B）が含まれる。ここで、調整操作における不確かさ、測定方法に含まれる不確かさ、および、使用する単位に含まれる不確かさの中で、統計的手法では知ることができない成分である Type-B を推定する過程においては、常に見過ごされている要因が存在すると思われるべきである。こう考えることの妥当性は、表 2 において、1986 年の調整結果と 1973 年の調整結果

の差が、1986年と1973年の調整結果における不確かさの和よりも大きなケースが多くあることにもよく現れている。未知の不確かさ要因をできる限り排除するためには、可能な限り多くの測定方法が可能な限り多くの研究機関で試みられることが必要であると考えられる。

2.2.2 電気量の量子標準

前述のように、電気量には国際単位系 (SI) のアンペア (A) とは別に基礎物理定数に直接関連付けられる量子標準が存在する。現在は国際単位系 (SI) の定義に矛盾を生じさせないように、基礎物理定数の値、および、その不確かさの値が調整されている。電気量の量子標準としては、ジョセフソン電圧標準 ($\Delta V = f \cdot \Phi_0 = f \cdot (h/2e) = f/K_J$)、量子化ホール抵抗標準 ($R_K = h/e^2$) がある。1988 年に国際度量衡委員会 (CIPM) により、ジョセフソン定数 $K_J (=2e/h)$ およびフォン・クリツィング定数 $R_K (=h/e^2)$ として以下の値 (協定値) が採択されている。(1990 年 1 月 1 日より採用。) ³⁹⁾

$$K_J = 483597.9 \text{ GHz/V} \quad \text{不確かさ (標準偏差)} 4 \times 10^{-7}$$

$$R_K = 25812.807 \Omega \quad \text{不確かさ (標準偏差)} 2 \times 10^{-7}$$

これら量子標準はいずれも、極低温下における超伝導および超伝導エレクトロニクスの技術により実現される ⁴⁰⁾。

以下、ジョセフソン電圧標準、量子化ホール抵抗標準、リカレフ電流標準について、個別に解説する。

(1) ジョセフソン電圧標準

ジョセフソン接合 (ジョセフソン素子) ⁴¹⁾ に電磁波を照射すると、接合両端の電流-電圧特性には Fig. 2.2 に示すようなシャピロ・ステップ ⁴²⁾ と呼ばれる階段状の構造が現れる。ジョセフソン接合の両端に現れる電圧 v_j と照射するマイクロ波の周波数 f (Hz) との間には、電流 i_j が n 段目のシャピロ・ステップにバイアスされているときは、

$$v_j = (h/2e) \cdot n \cdot f \tag{2.1}$$

という関係が厳密に成り立つと考えられている。このように、電流-電圧特性の階段のステップ間隔が基礎物理定数 ($h/2e$) とマイクロ波の周波数 f の積で表される一定値となることから、ジョセフソン電圧標準の根拠となっている。ジョセフソン素子を用いた電圧計の原理図を

Fig. 2.3 に示す. マイクロ波発生器の周波数を 10^{-10} の不確かさで設定することは容易であるので, ジョセフソン定数 $K_J (=2e/h)$ の現行の SI に基づいた協定値の不確かさ (4×10^{-7}) が, ジョセフソン電圧標準の不確かさの主要な要因となっている.

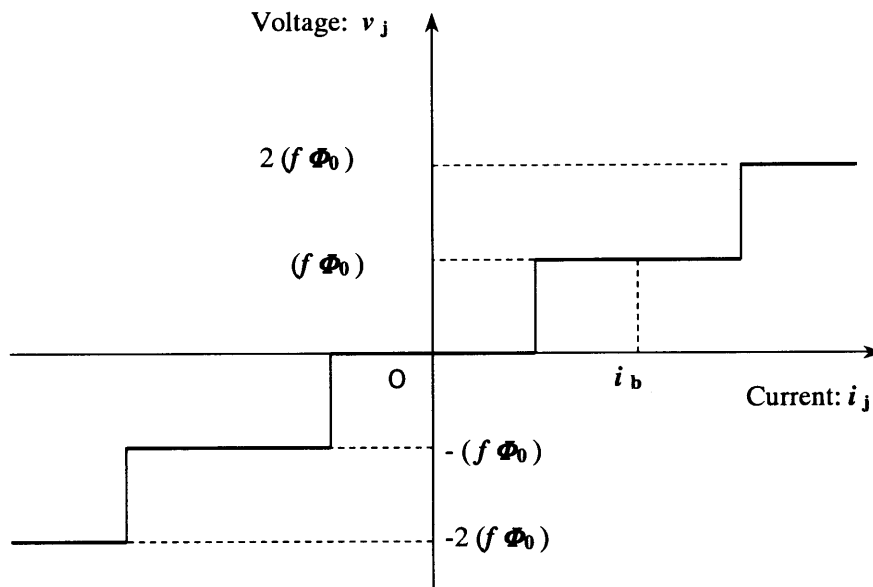


Fig.2.2 Shapiro step

1個のジョセフソン素子では1~10mVまでの定電圧ステップしか得られないため, 電圧標準として実用的な1V程度の定電圧を得るために多数個のジョセフソン素子の集積化がなされている. ジョセフソン定数の現行のSIに基づいた協定値の不確かさを除けば, ジョセフソン電圧標準の不確かさは 10^{-9} よりよいと言われている.

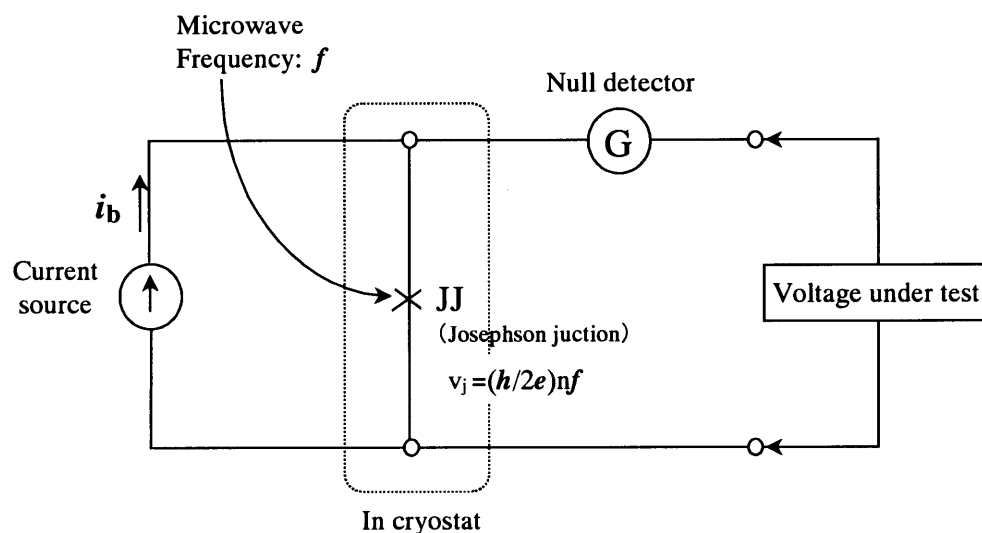


Fig.2.3 Josephson potentiometer

(2) 量子化ホール抵抗標準

量子ホール効果⁴³⁾は、SI-MOSFET などの2次元伝導を示す半導体素子を極低温 ($\leq 1\text{K}$)、強磁場 ($\geq 15\text{T}$) の環境下におくと、電流に対するホール電圧の商であるホール抵抗 R_H が $R_H = (h/e^2)/i$ (理論) で表されるように量子化される現象である。ここで量子化次数 i は2次元電子の i 番目のランダウ準位に対応し、ゲート電極電圧 V_G により調節できる。 $V_G - R_H$ 特性として、 $R_H = (h/e^2)/i$ に平らな部分を持つ曲線が得られる。これが、量子化ホール抵抗標準の拠り所となっている。

R_H の実験値として勧告されたフォン・クリツィング定数 R_K の現行の SI に基づいた協定値の不確かさを除けば、量子化ホール抵抗の不確かさは 10^{-8} よりよいと言われている。

(3) リカレフ電流標準

リカレフ効果⁴⁴⁾は、対向面積の極めて小さなジョセフソン接合 (JJ) に外部から周波数 f

のマイクロ波を照射したときの I - V 特性として, $\Delta I = 2 \cdot e \cdot f$ の電流間隔で電圧パルスが現れる現象である. 対向面積の極めて小さなジョセフソン接合 JJ においては, 接合エネルギーに対して電子対 1 個の静電エネルギーが支配的となり, この電子対の個数がよい量子数となる. しかしながら, これまでのところ, 上記条件を満足する単体の極微小 JJ の製作は困難であり, 超伝導微粒子薄膜による微小接合の 2 次元アレーを利用して現象を観測することが試みられている段階である.

極微小のジョセフソン素子を製作することの困難さから, 現在のところ, リカレフ電流標準は実用化されてはいない.

2.2.3 ワットバランス

ワットバランスは1975年にイギリスNPLのKibble博士により提案⁴⁵⁾された方法であり、現在、NPL (National Physical Laboratory, 英国) およびNIST (National Institute of Standards and Technology, 米国) において実験が進められている。ワットバランスの特徴は以下に述べるように、時間的に一定の磁場中で静止させたコイルに電流を流し力を測定するモードと、同一磁場中でコイルを動かしてコイル端子電圧を測定するモードの2つのモードを用いることにより、伝統的な電流天秤に不可欠、かつ、大きな誤差要因であったコイルの3次元形状の測定を省略することを最大の特徴とする方法である。NPLの実験装置では大型永久磁石を、NISTの実験装置では超伝導マグネットを用い、共に強力な磁場を使用することにより大きな力を発生させている。

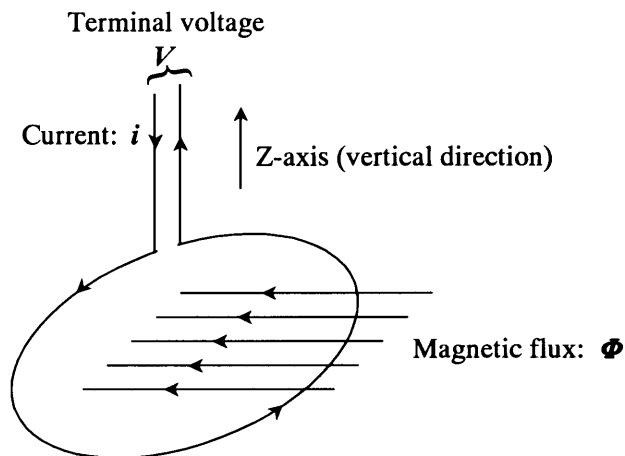


Fig. 2.4 Principle of watt balance experiment

Fig. 2.4 を用いて、ワットバランス法の測定原理を説明する。動コイル、あるいは、ピックアップコイルと称する天秤の竿に取り付けられたコイルに鎖交する磁束を Φ 、コイル電流を i とすると、この系の電磁気エネルギーは $W = -\Phi i$ である。このとき、コイルに作用する鉛直方向の電磁気力 F_z は、

$$F_z = -\left(\frac{\partial W}{\partial z}\right) = i\left(\frac{\partial \Phi}{\partial z}\right) \quad \dots\dots\dots \text{力の測定 (} F_z - i \text{)} \quad (2.2)$$

である。

一方、このコイルを鉛直方向に速度 $u = \partial z / \partial t$ で動かしたときに、コイル端子に誘導される起電力 V は、

$$V = -\left(\frac{\partial \Phi}{\partial t}\right) = -\left(\frac{\partial \Phi}{\partial z}\right)\left(\frac{\partial z}{\partial t}\right) = -\left(\frac{\partial \Phi}{\partial z}\right)u, \quad \dots\dots\dots V/u \text{ 比の測定 (} u - V \text{)} \quad (2.3)$$

である。

ここで、上記2つの測定が、 $(\partial \Phi / \partial z)$ が同一の条件のもとで行われれば、次式が導かれる。

$$V \cdot i = -F_z \cdot u \quad (2.4)$$

この式は、電気量の仕事率と、力学量の仕事率の釣合を表している。ワットバランスという名前の由来である。

ここで、左辺の電気量はジョセフソン電圧標準、量子化ホール抵抗標準に基づいて測定する。右辺の力学量は国際単位系 (SI) に基づいて測定する。 F_z は、国際単位系 (SI) で質量 M と値付けされた分銅に作用する重力 Mg に釣り合う力として、天秤を用いて設定する。すると、測定方法および使用する単位に含まれる不確かさを反映して、両者は異なる値をとることになる。

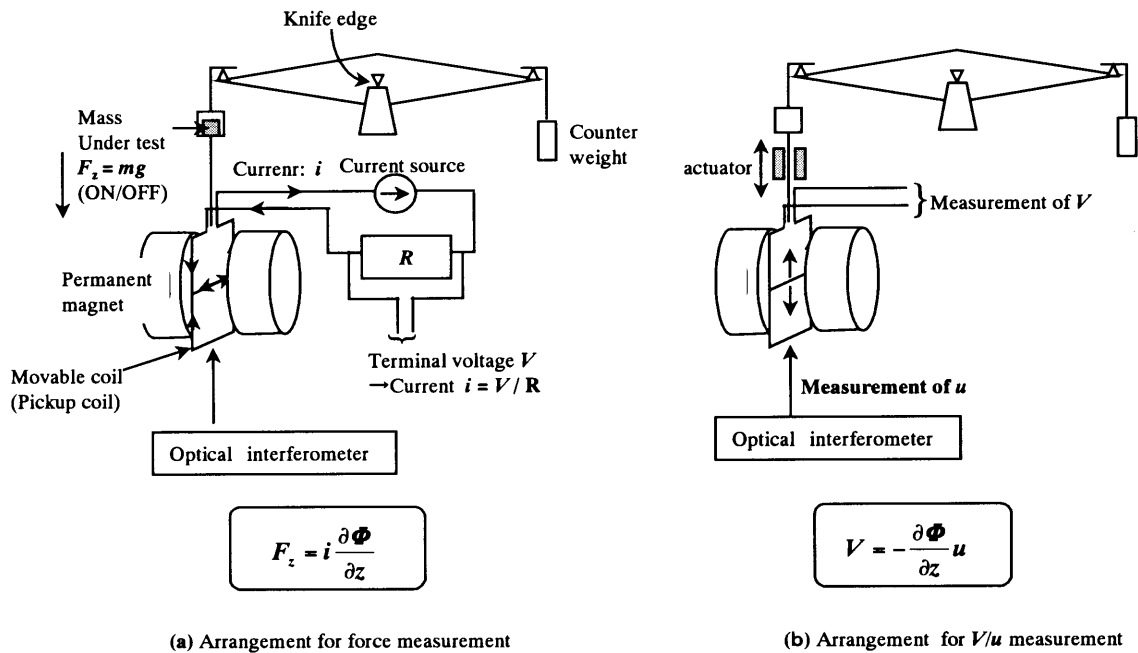


Fig. 2.5 Apparatus for watt balance experiment in NPL⁴⁶

Fig. 2.5 に NPL (英国) のワットバランスの実験装置の基本構成および2つのパートの測定方法を示す⁴⁶⁾。水平方向に対向する総重量約 6 ton の永久磁石のエアギャップ部 (寸法 56mm×0.3mm×0.3mm, 磁束密度 0.68T) に, 一辺 25cm の正方形コイル 2 個を電流が 8 の字形に流れるように直列接続した動コイル (ピックアップコイル) をぶら下げている。 Fig. 2.5 (a) に示した力の測定 (F_z - I の測定) では, キログラム原器から直接値付けされた分銅の質量 M に作用する重力 $F_z (=Mg)$ と釣り合う電磁気力を発生するコイル電流 i を, 天秤, 標準抵抗, 標準電圧を用いて求める。この測定は, 次に述べる V/u 比の測定 (u - V) における動コイル (ピックアップコイル) の軌道に沿って, コイルと永久磁石の上下方向の位置関係を変えて行われる。その変更は, 天秤を永久磁石の側面に取り付けている水力リフトを介して行われる。 Fig. 2.5 (b) に示した V/u 比の測定 (u - V) においては, 駆動部により天

秤のさお（長さ 1.2m）を振り，動コイル（ピックアップコイル）を±15mm の範囲内で約 2mm/s で動かす．このときの，各位置でのコイル移動速度 u を光波干渉計で，電圧 V を電圧標準でそれぞれ測定する．

この NPL のワットバランスによる電圧（ジョセフソン定数）測定結果として， 10^{-7} (0.1ppm) 程度の不確かさ評価が為されたものが報告されている⁴⁶⁾．その後，空気屈折率の補正などの目的で，装置全体が真空チャンバーに入れられた⁴⁷⁾．すると，今度は，動コイル発熱による変形，アウトガス発生による質量変化が無視できそうにないことが判明し，対策に苦慮しているようである．その後，研究報告は定期的に行われているが，不確かさの付いた測定結果は報告されていない．

米国 NIST（当時 NBS）の P. T. Olsen 博士らは，磁場発生源として永久磁石に代える超伝導マグネットを使用すること，天秤の竿を円盤に代えることを主な特長とする，新しいワットバランス実験装置を提案した⁴⁸⁾．

Fig. 2.6 に NIST（米国）のワットバランスの実験装置の基本構成を示す⁴⁹⁾．静磁場発生用に超伝導コイルを使用しており，動コイルはワイヤーでアルミニウム製ディスクから吊られている．天秤のさおの部分は V/u 比の測定 (u - V) において動コイルが鉛直に動くようにアルミディスクに換えられ，その中心にナイフエッジが固定されている．装置全体は木造非磁性棟の 1 階部分から 2 階部分にかけて設置されている．超伝導マグネットを冷却するための液体ヘリウムの蒸発ガスが漏れ，実験室内の雰囲気における空気屈折率が，通常の大気中とは大きくことなる可能性があり，従って，通常の大気中用に作られた温度，圧力，湿度などに基づく補正式の使用もできない．このため，空気屈折率を実験室内で直接測定する装置の導入を行っている．この装置による電圧（ジョセフソン定数）の測定結果として， 0.8×10^{-7} (0.08 ppm) の相対不確かさ評価を与えられた測定値が 1998 年に報告された⁵⁰⁾．

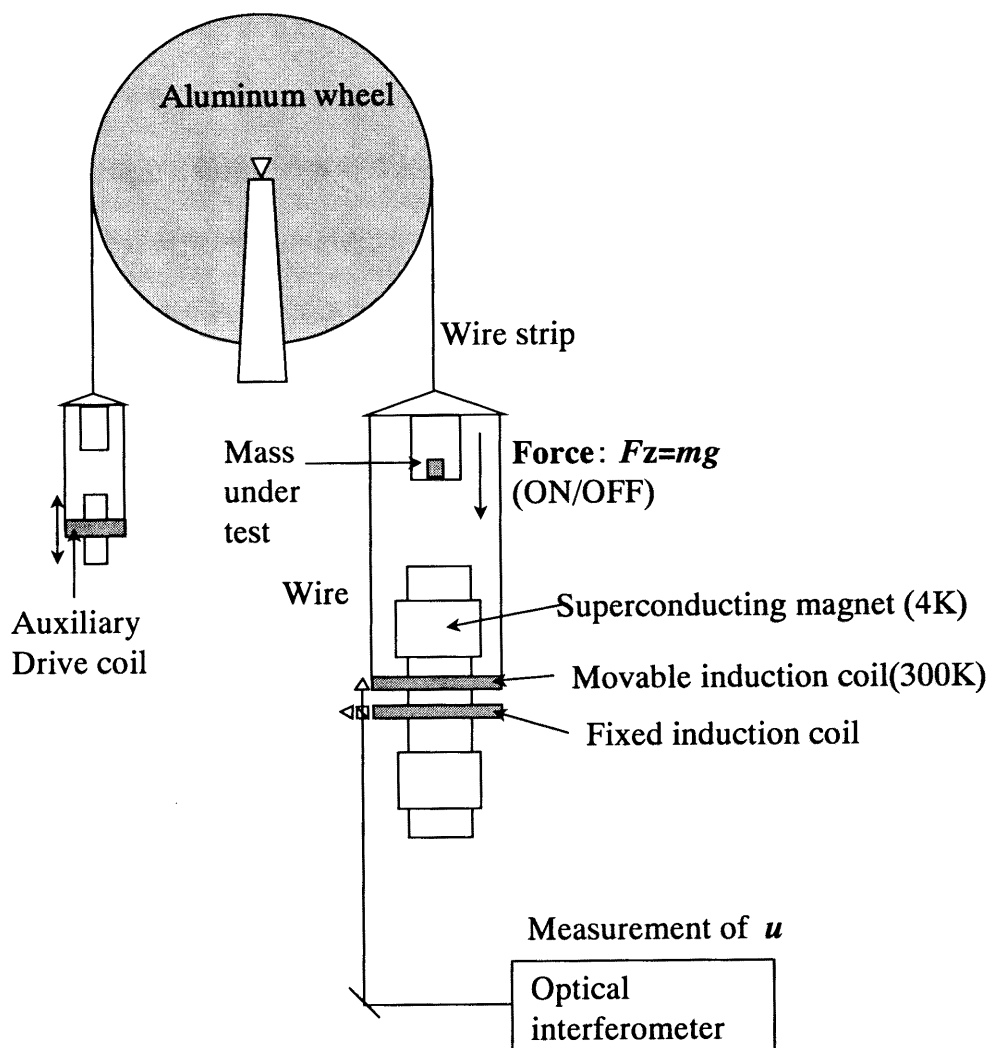


Fig. 2.6 Schematic of watt balance experiment in NIST⁵⁰

この値に付与された不確かさ評価だけを見ると、このワットバランス法は既に最終目標と認知されている 10^{-8} (0.01 ppm) までと僅かであるという印象を与えるようである。特に、計量研究所を含め、日本国内では、この値が発表された時は、そのような雰囲気包まれた。しかしながら、著者が、実験担当者に直接に会って聞いたところでは、「この結果に与えられた不確かさは、実験結果を論文に書いてある方法で評価した場合の話である。今後、さら

に、実験を重ね、慎重に見過ごしている可能性のある誤差要因を調べて不確かさ評価していかなければならない。」との趣旨の慎重なコメントであった。本装置においても、測定環境における光の屈折率補正の問題などから、全体をFRP製真空チャンバーの中に入れる作業が進められており、2002年から本測定が再開されるとのことである。著者が訪問した1998年の夏には、地上2階建ての専用の木造非磁性実験棟の中に納められたこの大きく複雑な装置を覆うために製作、搬入された、FRP製の巨大で複雑な形状の真空槽を構成する個々のパーツの梱包が解かれているところであった。超伝導マグネットはこの真空槽の外側に置かれ、アルミホイール、動コイルを含む主要なメカニカルパートのみ真空槽内に納められる予定とのことである。FRP製ということで真空チャンバーとしての性能は最低クラスになる見込みで、アウトガスの問題が最後までついて回りそうである。

次に、ワットバランス法の抱える課題・問題点について議論する。まずこの原理の基本的な仮定となっているところの、力の測定 (F_z-i)、 V/u 比の測定 ($u-V$) の2つの測定における $(\partial \Phi / \partial z)$ が十分に小さな不確かさで同一とみなせることが要求される。次に、当然のことながら F_z-i 、 $u-V$ の各測定がやはり十分に小さな確かさで行われる必要がある。

$(\partial \Phi / \partial z)$ は、永久磁石による磁場がピックアップコイル磁場などに影響されずに時間的に一定であるとしても、ピックアップコイルの位置 (3自由度)、姿勢 (3自由度)、形状変化 (弾性変形、塑性変形、熱膨張) などにより変化する。また、 $(\partial \Phi / \partial x)$ 、 $(\partial \Phi / \partial y)$ が無視できない場合には、 x 、 y 方向の力および移動速度への考慮が必要になる。ピックアップコイルは常温におかれるため、力を発生させるモードでは形状変化 (弾性変形、塑性変形、熱膨張) が生じることが予想される。また、力を発生させるモードにおけるピックアップコイルの姿勢 (3自由度)・位置 (3自由度) は、電圧を発生させるモードにおける軌道上になければならないが、この姿勢・位置のモニターはNPLにおいてもNISTにおいてもきちんと為されているかは疑問である。

また、力の測定 (F_z-i) においては天秤を使用するが、NPLの装置の場合でピックアッ

ブコイル質量が約 30kg となり、これを支持するさおを含め約 100kg の質量のものがナイフエッジの上に乗ることとなり、そのヒステリシスも大きな不安材料である。

大気中で空気屈折率の補正、浮力の補正を 10^{-8} よりよい不確かさで行うことは困難であるので、NPL では装置全体を循環水により温度コントロールされた真空チャンバーに入れ実験を行っている。すると今度は、コイル電流による発熱によりコイルフレーム内部からガスが放出され、その結果生じる質量変化が大きな問題となっているようである。NIST でも装置全体を真空チャンバー内に入れることを不可避のこととして計画しており現在FRP製真空チャンバーが完成したところのようである。NISTでは2002年から本測定を再開するとしているが、この時には、やはり、非常に大きな表面積を持ち、かつ、コイルという発熱源を持つ天秤の質量変化挙動および各構造部材の熱変形が、大きな問題として浮上することが予想される。

なお、分銅の質量を大気中において値付けする習慣のある現状においては、真空中で測定する場合には使用する分銅の質量変化を別途見積もる必要がある。この問題は、分銅の短期的な安定性を拠り所として、表面積の異なる分銅の相互比較などにより解決できるものと考えられる。

以上、ワットバランスの抱える悩みは、天秤というただでさえ大きな機械的構造物に、磁石、ピックアップコイル、駆動装置、さらには、真空チャンバーと構成部品の数を増やし非常に複雑な装置になってしまったことに起因するようと思われる。最近の10年くらいにおいて、ワットバランス法による不確かさが0.1ppm (10^{-7}) のレベルに達したとされ、キログラム原器のモニタリング（質量値変動の監視）、および、リプレース（定義の置き換え）に必要とされる0.01ppm (10^{-8}) の不確かさの測定まであと僅かと、世界中の標準関係者が浮き足立ったかに見えた時期があった。しかし、不確かさ付きの測定結果が出された後で、その不確かさに関する疑問がすぐに出てくるということが繰り返された今、着実に歩を進めようという雰囲気になってきたかに見える。

複雑で巨大な機構が、真空チャンバーという取り扱いにくい環境下に置かれることになり、ワットバランス法には次第に先行き不安が出てきたように見える。しかしながら、 10^{-7} の不確かさの測定結果を報告しているワットバランスは、電気量の絶対測定方法として現在もとも不確かさの小さな方法とみなされる。その意味で、まず、現在一続きの実験でしか得られていない 10^{-7} 程度以下という不確かさ評価付きの実験結果に対して、再現性評価を含む詳細な追試を行い、その真偽を厳密に確認することが強く望まれる。

2.2.4 電圧天秤と液体電位計

電圧天秤はコンデンサーの電極間に働く静電気力と、分銅に作用する重力を、天秤を用いて比較測定する。1972年にETL(日本)の山崎博士らにより、コンデンサーの電極間に作用する力 F_e が、電極間に蓄えられた電気エネルギーのその方向 s の空間微分に等しいということを利用して電極の寸法測定を省略した測定方法による方法が提案された⁵¹⁾。その後、PTB(ドイツ)、ザグレブ大学(クロアチア)⁵²⁾において研究が進められている。

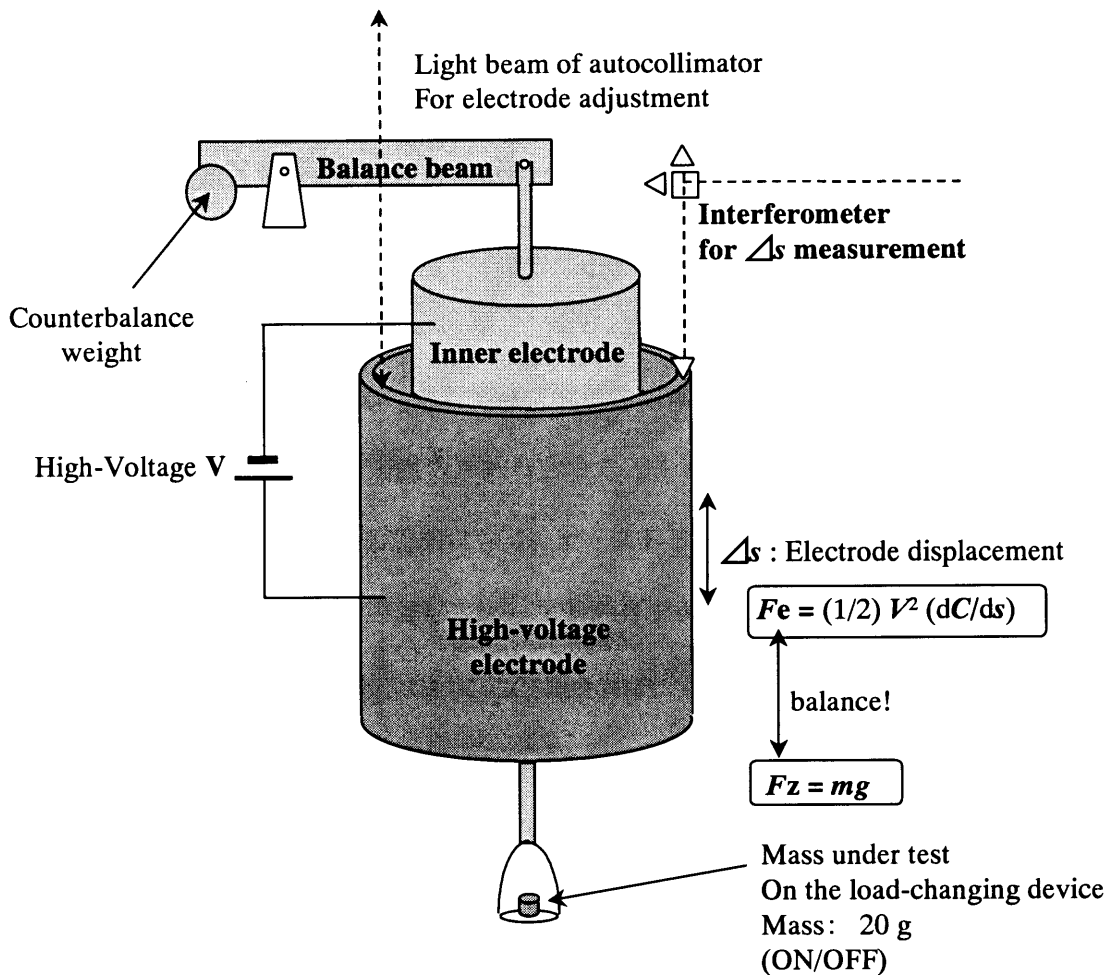


Fig. 2.7 Voltage balance in PTB⁵³

次に、この測定法の原理について述べる。容量 C のコンデンサーを電圧 V の定電圧源に接続したとき、

$$F_e = 1/2 V^2 dC/ds \quad \text{または} \quad V = [2 F_e ds/dC]^{1/2} \quad (2.5)$$

が成り立つ。長さ s は光波干渉計で、 V はジョセフソン電圧標準で、 C はブリッジ回路でそれぞれ測定される。静止状態で測定できるので、天秤の性能をフルにひきだすことができる。

Fig. 2.7 に、PTB の電圧天秤の基本構成を示す⁵³⁾。同軸円筒形状の電極を使用し、天秤のさおの支点にヒンジを使用していることが特徴である。この電圧天秤によるジョセフソン定数 K_J の絶対測定の不確かさとして 3×10^{-7} (0.3ppm) 程度に達したとの報告が為されている。新しい質量標準に要求される 10^{-8} の不確かさを目指すに当たっては、ワットバランスと比較し、発熱部分がないという長所を持ち、装置全体を真空チャンバーに入れることは比較的容易である。しかしながら、使用する定電圧が約 10kV と大きいこと、発生力が小さい（分銅質量 2g）こと、天秤を用いた複雑な機械的構造体であることなどが潜在的な欠点と思われる。

液体電位計では、コンデンサーの一方の電極に導電性液体を用い、電極間に働く電気力とそれにより上昇した水銀に作用する重力が釣り合うことを利用し、天秤による力の比較測定を不要にしている。この測定方法の起源は古く、オーストラリアの Clothier 博士により 1965 年に提案されている⁵⁴⁾。その後、一貫してオーストラリアの標準研究所である CSIRO/NML にて、研究開発が進められた。Fig. 2.8 に、CSIRO/NML（オーストラリア）が開発した液体電位計（水銀電極電位計）の基本構成を示す^{55), 56)}。電極系は、3つの円形の水銀プールと、これに対向するオプティカルフラット下面に付けられた半透明の金属フィルム電極から成る。装置全体は真空チャンバーに入れられている。水銀プールと外側のフィルム電極は接地され、中央のフィルム電極に電圧 V が印加される。すると、静電気力により中央の水銀液面は外側の水銀液面に対して上昇する。電極の形状を適当に選べば、電極中央部において液面は平らとなり、電場は一様に鉛直向きとなり、表面張力による鉛直方向の寄与がないと

見なせる. ここで, この液面の相対的上昇高さを h , 中央の水銀プールの電極間隔を d , 使用する条件での水銀の密度を ρ , 実験時の重力加速度を g , とすると, 電極間に作用する単位面積あたりの力と, 液面上昇量に相当する静水圧 ($\rho g h$) の釣り合いより,

$$V = k d h^{1/2} \quad (2.6)$$

$$k = (2 \rho g / \epsilon)^{1/2} \quad (2.7)$$

が成り立つ.

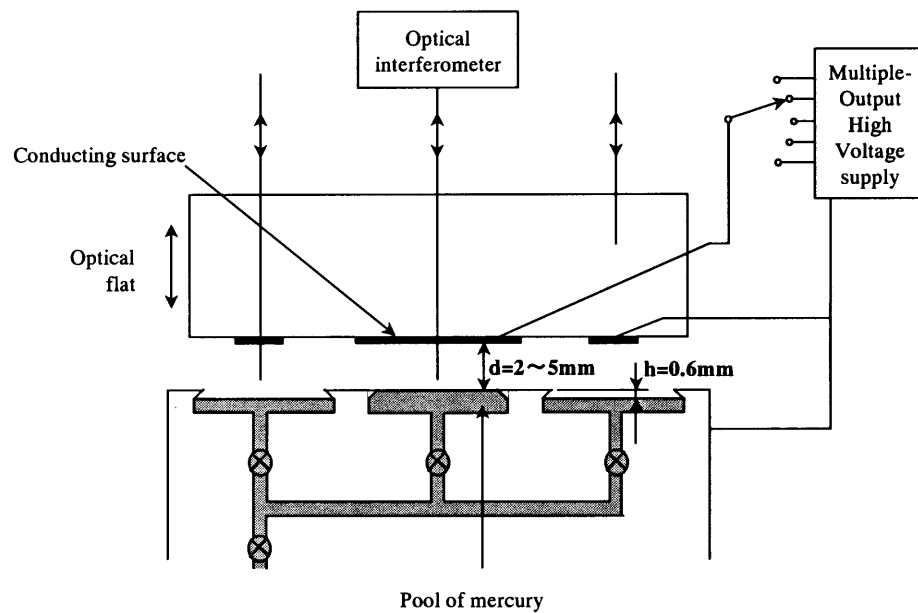


Fig. 2.8 Absolute liquid electrometer in CSIRO/NML⁵⁶

水銀の表面効果の影響をできるだけ小さくするために, 印加する電圧に応じて上部電極(オプティカルフラット)を上下動させ ($d=2\sim 5\text{mm}$), 中央の水銀プール表面における電場をできるだけ一定とし液面上昇量 h ($=0.6\text{mm}$) を一定としている. そして, 2つの電圧値 V_1 , V_2 に対する測定値の差 $\Delta V = k(d_2(h_2)^{1/2} - d_1(h_1)^{1/2}) = k(d_2 - d_1)(h)^{1/2}$ を用いる.

この液体電位計による電圧の絶対測定データは、1986年の基礎物理定数の調整において主要な役割を果たした。しかしながら、この方法は水銀の密度を（質量標準を用いて）測定するところに支配的な不確かさの要因が存在し、その改善の見込みがないため研究は終了している模様である。この液体電位計によるジョセフソン定数 K_J の絶対測定の不確かさは 3×10^{-7} (0.3ppm) に達したとの報告がある⁵⁷⁾。

2.2.5 超伝導磁気浮上

磁気浮上法は、1977年にNISTのSullivan博士とFrederick博士により提案された方法である⁵⁸⁾。基本的な考え方としては、超伝導を利用することにより、物体のエネルギー損失を伴わない非接触浮上を実現することにより、力学量と電気量を高精度に結びつけようとするものである。力学量は、国際キログラム原器によって現示される質量標準を含む国際単位系(SI)に基づいて測定される。一方、電気量は、前述の電気量の量子標準に基づいて測定される。

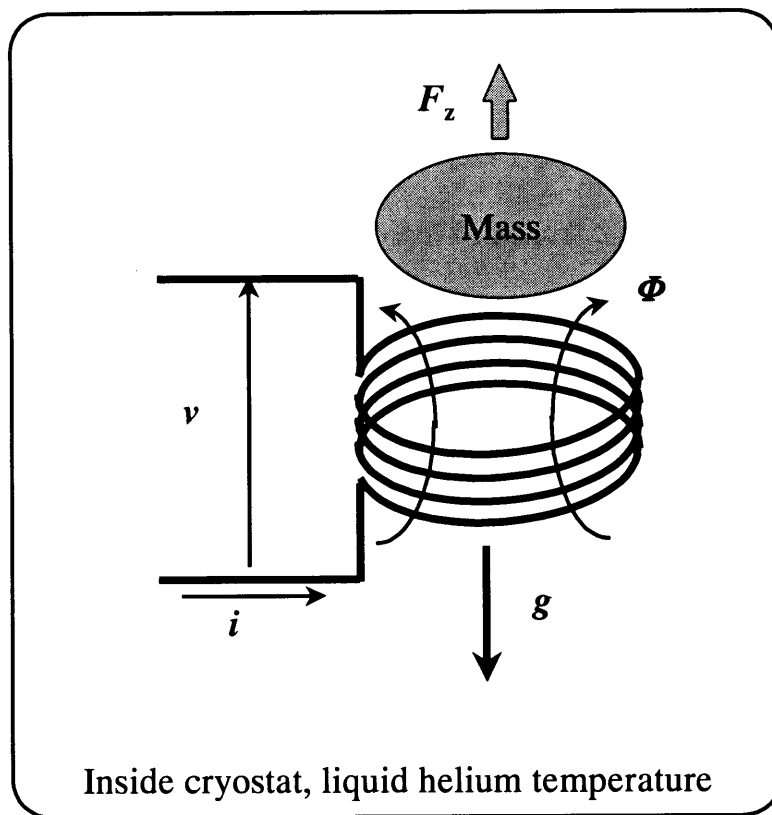


Fig. 2.9 Concept of levitated mass method

Fig.2.9 に示すように、定電流 i が流れる超伝導コイルの作る磁場勾配中で浮上する、質量 M の超伝導体を考える。コイルのインダクタンス L は浮上高さ z の関数となり、浮上体に作用する電磁気力は、浮上体に作用する重力 Mg と釣り合う。

$$Mg = \frac{d}{dz} \left[\frac{1}{2} L(z) i^2 \right] \quad (2.8)$$

上式より、電流は以下のように表せる。

$$i^2 = 2Mg \left(\frac{dL}{dz} \right)^{-1} \quad (2.9)$$

より現実的な装置構成例として、浮上姿勢を安定させ、かつ、コーナーキューブプリズムを設置し光波干渉計による浮上高さ測定を行う目的で、浮上体をコーン形状とすることが提案されている。提案者自身は実験を始めることはなかった。

その後、日本（東京大学⁵⁹⁾とロシア（メンデレーエフ研究所^{60), 61)}において実験システムの製作が行われたが、ロシアにおいては経済的事情によりここ10年以上実験できない状態が続いているとのことである。また、東京大学において始められた磁気浮上法の研究は、主担当研究者であった塩田ふゆひこ博士が実験装置を伴って移籍され、計量研究所において研究が継続されてきている。最近、一時期において期待が高まっていたワットバランス法の進捗が芳しくないということ、また、できる限り独自の研究をしたいということが動機となって、ドイツ、フランス、フィンランドなどで磁気浮上法に関する調査研究が行われているようである。ロシアの研究者は、日本の計量研究所を始め、磁気浮上法に関心を示す各国の研究機関との交流を通して研究活動は継続している。しかし、現在において、実際に実験システムを製作し、実験を行っているのは、日本の計量研究所のみである。

これまで計量研究所においては、東京大学より移管されたプロトタイプシステムを改良しつつ研究開発を行ってきた^{62), 63)}。また、最近筆者らにより、2基目の磁気浮上システムの開発が始められた。

次に、筆者が関与する以前において、計量研究所において研究開発が進められてきた磁気浮上実験システムの概要について述べる。Fig.2.10 に実験システムの模式図を示す。浮上体の形状は、上部直径 58mm、下部直径 20mm、高さ 50mm、厚さ 0.25mm の燐青銅製コーンの外側に超伝導膜として鉛がコーティングされている。

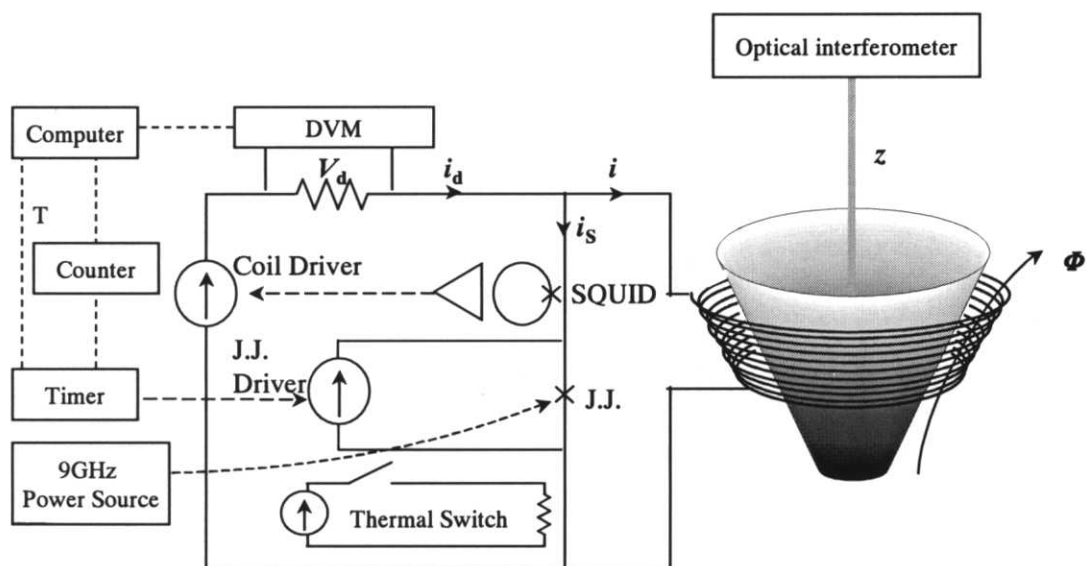


Fig. 2.10 Schematic diagram of the levitation system

Fig.2.10 を用いて計量研究所で行われてきた超伝導磁気浮上実験^{62), 63)}の測定原理を説明する。超伝導コイルCに、コーン形状の超伝導体(質量 $M = 25 \text{ g}$)を挿入し、可変電流源でコイルに電流を流す。コイル端子電圧 $v = 0$ であるとき、超伝導線で接続された超伝導コイルCに鎖交する磁束 Φ ($v = (\partial \Phi / \partial t)$) は一定となる。浮上体外表面でコイルCに鎖交する磁束が平行となるように、浮上体外表面には遮蔽電流が流れ、浮上体には表面に垂直な電磁気力が作用する。浮上体の形状は上広がり円錐形であるので、その合力は鉛直上向き

となる。コイル端子電圧 v が適当な値 ($\neq 0$) となるように電流源を制御し電流 $|i|$ を大きくしていけば、あるところで浮上体 M は重力 Mg に逆らって浮上する。コイル端子からコイル系に送られた全エネルギー（電気エネルギー）のすべてが、コイル系の磁場エネルギー、および、浮上体の位置エネルギーに変換する条件下では、時刻 $t = t_L$ から $t = t_H$ にかけて、次式が成り立つ。

$$\int_{t_L}^{t_H} v i dt = \left[\left. \frac{\Phi i}{2} \right|_H - \left. \frac{\Phi i}{2} \right|_L \right] + mg[z_H - z_L] \quad (2.10)$$

ここで、添え字 L は $t = t_L$ 、 H は $t = t_H$ における値を表す。さらに、 $v = \partial \Phi / \partial t$ より、

$$\int_{\Phi_L}^{\Phi_H} i d\Phi = \left[\left. \frac{\Phi i}{2} \right|_H - \left. \frac{\Phi i}{2} \right|_L \right] + mg[z_H - z_L] \quad (2.11)$$

この式を書き換えると、

$$\int_{\Phi_L}^{\Phi_H} i d\Phi - \left[\left. \frac{\Phi i}{2} \right|_H - \left. \frac{\Phi i}{2} \right|_L \right] = mg[z_H - z_L] \quad (2.12)$$

となる。この式は、電磁気的エネルギーと力学的エネルギーとの釣合を表している。ワットバランスが仕事率、電圧天秤（、液体電位計）が力（、圧力）の釣合式であったのに対して、計量研究所の超伝導磁気浮上法ではエネルギーの釣合式が求められる。

次に、電気計測系の詳細について述べる。超伝導コイル C の端子にはジョセフソン接合 (JJ) が接続されている。周波数 f のマイクロ波が照射された状態で、 JJ を接合駆動用電流源により 1 番目のシャピロステップにバイアスすると、コイル端子電圧は $v = (h/2e)f = \Phi_0 f$ となり、コイル C に鎖交する磁束 Φ は毎秒 $\Phi_0 f$ 増加する。（ $\because v = \partial \Phi / \partial t$ ）コイル端子から JJ に流れ込む電流を SQUID で検出し、これが零になるようにコイル駆動用電流源を制御する。

実験は Φ を適当な量（約 1 mWb）づつ増加（充磁）させ、各磁束 Φ の設定値において、浮上体の振動が銅ショートリングによる誘導損などで十分に減衰されたところで、コイル電流 i 、鉛直変位 z を測定する。このときの測定データは、長い時間をかけて準静的に充磁させ

たときに得られるであろう平衡軌道上 ($\Phi - i$, $\Phi - z$) に存在すると考えられる. Fig.2.11 にコイル鎖交磁束 Φ とコイル電流 i , 浮上高さ z の関係を示す. 式(2.12)の左辺第1項の積分は得られたデータを適当な多項式で補間して行う. この方法では, 測定時において浮上体の位置エネルギーを除く力学的エネルギー (振動エネルギー, 弾性ひずみエネルギーなど) が零の状態になっていれば, 充磁中の与えられたエネルギーの散逸は問題とならない.

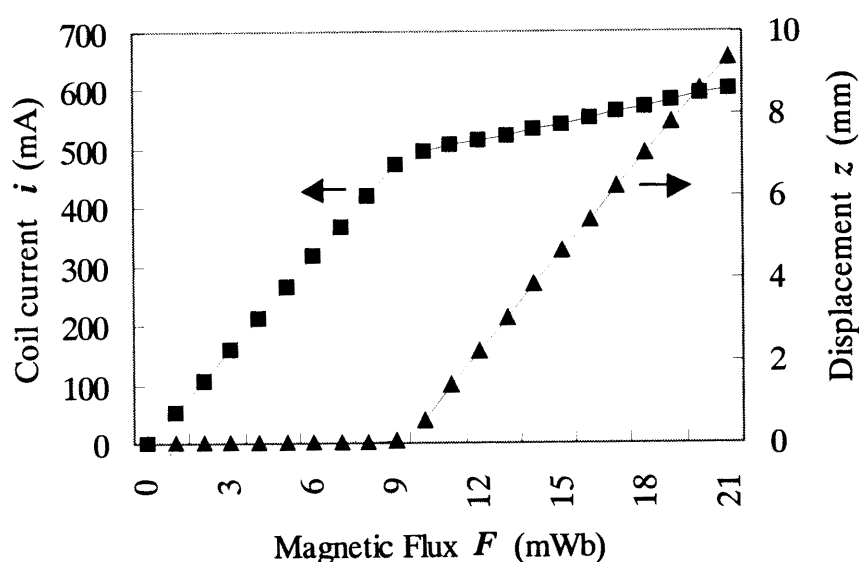


Fig.2.11 Equilibrium trajectory

コイル電流 i は, 量子化ホール抵抗標準とジョセフソン電圧標準を用いて校正されたパワー抵抗と電圧計を用いて測定する.

浮上体に取り付けられたコーナーキューブ (CC) の光心 (O) の鉛直変位は光波干渉計を用いて測定される. 浮上体が傾くと重心 (G) と光心 (O) の高さが相対的に変化する.

Fig.2.12 に, プロトタイプシステムにおける初期の光学測定系を示す. この変化量を求めるために, 浮上体に取り付けた平面鏡の傾きをオートコリメータで測定する. しかしながら, 浮上体の剛体としての姿勢の自由度は3自由であるのに対してオートコリメータで測定で

きる角度は2自由度であり不十分である。さらに、鉛直変位測定用のレーザービームが鉛直ではない場合、浮上体の水平移動はサインエラーとして測定誤差を生じさせる。

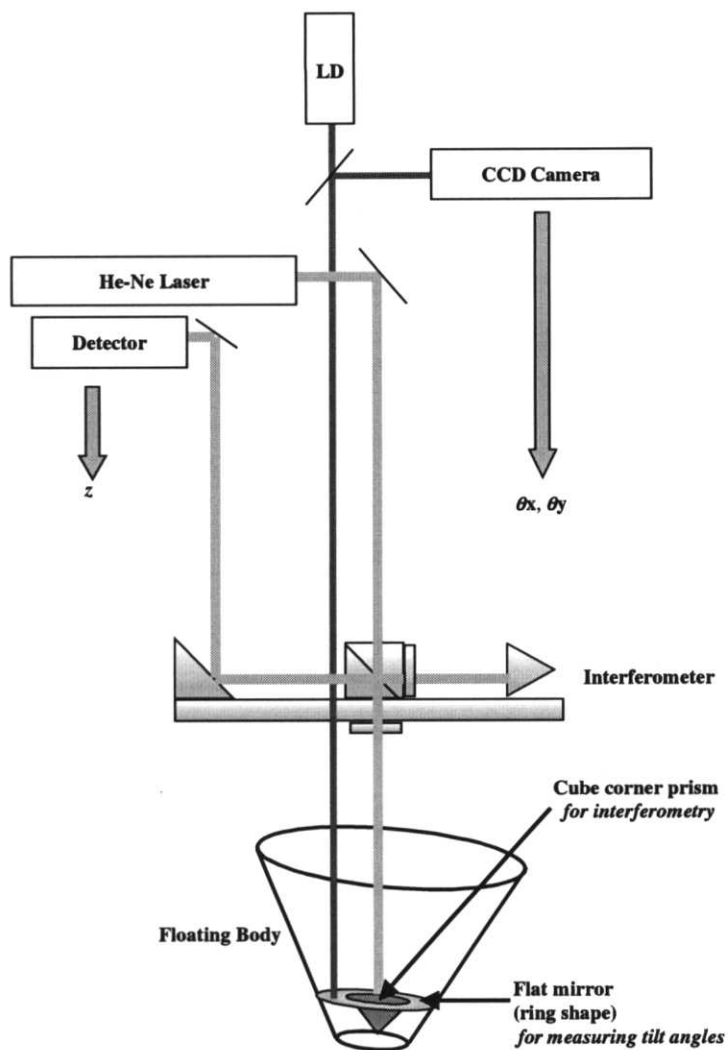


Fig. 2.12 Optical measurement system

超伝導磁気浮上法は、機械的接触部分が存在しないという決定的とも言える長所を有している。また、極低温、高真空という極めて安定な環境下で測定が行われるため、よく定義された実験条件を再現性よく実現できる優位性がある。式(2.12)で要求される個々の測定のうち質量測定を除いた、電気量測定、変位測定、重力加速度測定における不確かさは原理的には 10^{-8} より小さくすることは可能であるので、測定方法そのものの不確かさとして 10^{-8}

程度を達成することは十分に可能であると考えられる。

しかしながら、超伝導磁気浮上法では未だ絶対測定結果は出ておらず、現在、予備システムを用いて 10^{-6} 程度の不確かさを目指した測定が進められている段階である。ワットバランスや電圧天秤などに対する優位性を証明するためにも、予備システムにおいて 10^{-6} 程度の不確かさで磁束量子 (Φ_0) を絶対測定結果を出し、かつ、その経験を踏まえて 10^{-8} をターゲットにした本システム（質量 100 g - 1 kg の分銅を積載）の設計を行うことが望まれている。

これまで行ってきた実験および検討において、 10^{-8} の不確かさの測定を実現する上で問題として認識されている課題を以下に箇条書きにする。

<力学量 (z, m, g) の測定について>

(1) 重心鉛直変位 z の測定

必須の課題として、次の2つが挙げられる。

- ・ 浮上体の姿勢・位置（6自由度）を同時計測できる計測システムを開発すること。
- ・ 測定点（CCの光学的頂点）と重心の相対位置の推定方法を開発すること。

4. 1節でこの課題について検討する。

(2) 質量 m の測定

極低温、希薄ヘリウム雰囲気の実験環境における浮上体の質量を、常温、大気中に保管されるキログラム原器にトレーサブルに値付けする必要がある。浮上体の浮力補正、気体分子の吸着防止などを図る必要がある。4.2でこの課題について検討する。

(3) 重力加速度 g の測定

重力加速度は、潮汐、地下水の水位変動などにより変化する。最も大きな変動要因は潮汐であり、この大きさは約 0.2ppm (0.2×10^{-6}) である。市販の重力加速度計により、 10^{-8} 程度の不確かさによる測定は可能であると考えられる。

<電磁気量 (i, v, Φ) の測定について>

(4) 電流 i の測定

コイル電流の測定は、現在は、標準抵抗の端子電圧として測定しているが、この標準抵抗の消費電力依存性（パワー係数）を超伝導電流比較器を用いて測定することが計画されている。

(5) 電圧 v の測定

標準抵抗の端子電圧測定は、現在は、ジョセフソン電圧標準に基づいて校正された市販の電圧計（DVM）を用いて測定している。ジョセフソン電圧標準をより直接的に使用することが望まれる。

(6) 磁束 Φ の測定

現在のシステムでは、コイル端子をジョセフソン素子に超伝導線で接続し、そこに発生する電圧の時間積分として求めている。ジョセフソン素子、SQUID、超伝導コイル（線材）などの超伝導エレクトロニクス素子の使用方法、製作方法の確立による高信頼性化を図る必要がある。

<エネルギーの釣合について>

(7) 超伝導の完全性

浮上体、コイルを構成する超伝導材料が、完全な超伝導状態にあることが理想である。不完全な部分の発生が避けられない場合、次善の策として、これの補正方法を開発する必要がある。また、コイル＝浮上体系の周りから、強磁性体など非線形な磁化特性を示す磁性体を排除する必要がある。

(8) 単一の平衡軌道（ $\Phi - i$, $\Phi - z$ ）の実現

浮上軌道の安定化を図ることが第一である。複数の平衡軌道（ $\Phi - i$, $\Phi - z$ ）が防止できない場合は、その判別方法、補正方法の開発が必要となる。4.5でこの課題について検討する。

<測定原理について>

(9) 新しい測定原理の考案

超伝導の性質により発熱によるエネルギーの散逸なしに、非接触浮上支持されることの特長を最大限活かすことができる、測定原理の可能性については未だ十分に検討されてはいないと思う。したがって、よりよい測定原理が考案される余地は十分にあると考えられる。

以上、超伝導磁気浮上法における検討課題を列挙した。これら検討を要する課題は、大きな課題であるとしても解決不可能ではないと考えている。超伝導磁気浮上法は、コイル系と浮上体だけという原理性の非常に高いシンプルな構成となっているために、誤差要因の入り込む余地もそれだけ小さいと考えられる。特に、複雑で大きな機械的構造を有するワットバランスと比較したとき、超伝導磁気浮上法は非常に原理性の高い方法であると言える。磁気浮上法の研究開発が進められることは、基礎物理定数の絶対測定を含む標準の分野において強く望まれる。

2.2.6 まとめ

国際単位系 (S I) の7つの主要単位 (kg, m, s, A, K, mol, cd) の中で唯一“もの”で定義されている質量 (kg) を基礎物理定数に基づいた普遍的な定義に置き換えること (Replacement of the Kilogram) は、計量標準 (metrology) の分野における最大級の挑戦課題である。上記7つの基本単位の中で、実に3つもの単位 (A, mol, cd) が質量 (kg) に基づいた定義となっている。ここで、基礎物理定数に基づいて測定可能な電気量の単位 (A) と、力学量の単位 (kg) を結びつけることにより、質量の量子標準化を目指すところみが、主要各国の標準研究所で進められている。計量研究所の超伝導磁気浮上法、米国 NIST や英国 NPL のワットバランス法、独国 PTB の電圧天秤などが、それである。これらの方法では、電気量と力学量のそれぞれの物理量を既存の標準を駆使して高い精度で測定することが必要であり、その一つ一つに新規技術の研究開発が要求される。その困難さゆえ、質量は国際単位系の7つの基本単位のなかで、唯一“もの”で定義されたままとなっており、このことは標準 (Standard, Metrology) の分野に残された最も重大な課題の一つとなっている。計量研究所の超伝導磁気浮上法は、現在、試作システムにより 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り、最終目標である 10^{-8} には遠く及ばないが、他の方法と比べ装置構成が機械的に非常に簡素であり (コイルと浮上体のみ)、原理性の高い方法であるので、最終的な達成精度の観点からは有望な方法であると考えている。

2.2 ではまず、現在の質量標準が抱える問題点、および、新たな普遍的な質量標準の将来あるべき姿、などについて述べた。次に、普遍的な質量標準を目指した取り組みの中で、電磁気量の絶対測定の持つ意味、および、その現状について述べた。要点をまとめると以下の様になる。

- (1) 国際キログラム原器という“もの”で定義された現在の質量標準を、基礎物理定数に基づいた普遍的な定義に置き換えることは、計量標準の分野における最大級の問題である。
- (2) 現行の質量標準であるキログラム原器は普遍性の欠如という、標準として致命的とも言

える問題点を抱えている。

- (3) 新しい普遍的な質量標準の実現において要求される不確かさは 10^{-8} である。
- (4) 新しい質量標準は基礎物理定数で定義されるべきである。
- (5) 未知の系統誤差要因（見過ごされる Type-B の不確かさ要因）は常に存在すると考えるべきである。したがって、様々な方法が試みられるべきである。
- (6) 質量標準を目指した電磁気量の測定法として、ワットバランス、電圧天秤（、液体電位計）、超伝導磁気浮上法が提案されている。
- (7) 質量の量子標準化の過程は以下のものであることが、確認されている。すなわち、まず初めに、十分に不確かさの小さな測定法が確立した時点で、国際キログラム原器の質量値変動の監視（Monitoring the Kilogram）が基礎物理定数の測定値の監視という形で開始され、最低 10 年程度の観察期間を経て、国際キログラム原器の質量値変動量が国際的に確認される。しかる後に、国際的に、当該基礎物理定数の値を定義値として与えることにより、質量が再定義される。
- (8) 質量標準を目指した電磁気量の測定法の中では、1998年に 10^{-7} 程度の不確かさ評価が与えられた測定結果が報告されたワットバランス法が最も先行しており、かつまた、最も有望視されている。ただし、その測定結果を出した装置は、再現性評価実験を十分に行うことなく、一旦解体され、装置全体をFRP製真空槽で覆った後に実験を再開する予定のようである。当該研究グループを含め、この種に基礎物理定数の絶対測定に関わる多くの実例から、一旦装置を解体すると結果が大きくなることになり、これにより見過ごされていた誤差要因の存在が間接的に明らかになるということがしばしば起こっている。従って、最も先行し、かつ、有望視されるワットバランス法の実験再開と、測定結果の詳細な再評価が強く望まれる。
- (9) ワットバランス法の重大な潜在的な欠点として、ナイフエッジなど大きな負荷が加わる機械的接触部があること、かつ、起電力測定モードにおいてこの機械的接触部を運動さ

せる必要があること，が挙げられる。

(10)超伝導磁気浮上法は機械的接触部分が存在しないという決定的と言える長所を持っているが， 10^{-6} の不確かさレベルを目標にしている段階である。磁気浮上法は，潜在的な欠点として，浮上軌道の不安定性（これに伴う電気量，力学量の振動），入手可能な超伝導材料におけるマイスナー効果の不完全性，といった解決すべき難題を抱えている。しかしながら，構成要素が少ない原理性の高い方法と言える。最終的な到達精度の観点からは未だ決定的な方法の見出されていない現所において，本方法の研究を推進することの価値は極めて大きい。

2.3 まとめ

本章では、力、トルク、質量などの力学量の発生測定における問題点と課題について概観した。また、国際キログラム原器という唯一の人工物で定義される現行の質量標準の問題点、および、それを基礎物理定数に基づく定義に置き換える試みについて概観した。

2.1 ではまず、キーテクノロジーの一つとして先端分野において便利に利用される静圧空気軸受について、その摩擦特性に不明な点の多いこと、その摩擦特性の評価方法の考案・開発が望まれることについて述べた。次に、力、トルクに関して、産業界においては変動する力、トルクの測定に関する要請が高いこと、にも関わらず、力センサ、トルクセンサに対しては重錘を用いた静的な校正方法のみが存在する現状について述べた。変動する力、変動するトルクの測定結果に不確かさ評価を行うことは強く望まれ、従って、変動する力、トルクの発生・計測手法の考案・開発が強く望まれることを指摘した。さらに、マイクロ重力環境下で動作する質量測定について、近い将来の宇宙における研究・生産活動の活発化・多様化に伴い様々な機能・性能を有する質量測定器群が切望されるであろうこと、現状においてはごく限られた機能・性能を有する方法しか考案されていないことを述べ、この分野における研究開発の重要性、緊急性を指摘した。

2.2 ではまず、国際キログラム原器という唯一の人工物で定義された質量標準を取り巻く現状の問題点について述べ、質量標準の普遍化、量子標準化が計量標準(Metrology)の分野における最大の問題の一つとして認識されている現状を述べた。次に、国際キログラム原器の質量を含む力学量と、基礎物理定数に基づいて測定される電気量とを高精度に結び付ける(比較測定する)ことにより、質量の量子標準化を達成しようとする主要各国の研究プロジェクトについて概観した。その中で、現在最も先行し、かつ、有望視されているワットバランス法については、大規模な装置改造(FRP製真空チャンバーへ装置全体を入れる改造工事)の完了する2年後から実験再開、及び、それによる現在報告されている測定値の詳細な検証が強く望まれることを指摘した。また、筆者が取り組んでいる方法である超伝導磁気浮

上法について、東京大学で始められ、計量研究所に引き継がれた歴史について述べるとともに、超伝導磁気浮上法の主要な特長が、超伝導伝導面に作用する電磁気力により物体を浮上支持することで摩擦などの外力の影響を小さく抑制できることにあることを指摘した。浮上支持することは、外力を排除し易く、かつ、構造を単純化し易い、という他の方法に対する決定的優位をもたらすと同時に、これまでにない形態であるが故に、浮上姿勢安定化等の新規の技術開発が必要であることを指摘した。最終的な到達精度の観点からは未だ決定的な方法の見出されていない現所において、超伝導磁気浮上法の研究を推進することの価値は極めて大きく、世界的にも強い関心を持たれている。

本章では、特に、力、トルク、質量の測定における現状、および、質量の量子標準化を目指す試みの一つである磁気浮上法の現状について述べた。ここで指摘された現状における問題点は、次章以降で述べる、物体（質量）を浮上支持することによる力学量の高精度測定手法の研究開発により、解決が試みられる。

第3章 空気圧支持による力学量の高精度測定

本章では、物体を空気圧により非接触浮上支持することによる、力、トルクなどの力学量を高精度に測定する方法について述べる。慣性質量、あるいは、慣性モーメントとしての物体を非接触浮上支持し、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、基本原理に忠実な測定を実現することを試みる。

本研究においては、空気圧支持手段として、精密計測、精密加工などの分野で広く利用される静圧空気軸受を用いた。まず、3.1で、これまで、未知であった静圧空気軸受の摩擦特性、特に、静的摩擦、動的摩擦、気流による非対称力などの評価方法開発について述べる。また、開発過程で明らかとなった空気軸受の特性、新たに生じた疑問などについて述べる。続く3.2では、変動する力の高精度発生・測定方法として開発した、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について述べる。この方法を、純アルミ棒の動的3点曲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、に適用した事例について述べる。3.3では、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う。3.4では、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方法の提案・開発について述べる。空間中に非接触浮遊させた非測定物体と参照分銅より成る系の運動量保存則を積極的に用いる方法を提案した。また、地上実験用に静圧空気直動軸受を用いた装置を製作し、提案する方法の基本原理の妥当性を確認した。

3.1 静圧空気直動軸受の摩擦特性評価法

3.1.1. はじめに

静圧空気軸受は、高精度な運動特性、および、小さな摩擦という2つの大きな特長を有している。主に高精度な運動特性という特長から、静圧空気直動軸受、静圧空気回転軸受は光磁気ディスクの検査装置をはじめとする精密計測器、精密加工機に利用されている。

エアスライドは空気膜で支持されるため、理想的には静止摩擦はゼロであるが、実際には、ガイド部傾斜角に可動部が静止状態を保つ範囲が存在する。このことは、静的な摩擦の存在を示唆する。一方、動摩擦は空気の粘性摩擦抵抗となる。しかしながら、こうした静圧空気軸受の摩擦特性に関する文献は見当たらない。

空気圧支持による力学量の高精度測定手法の研究開発においては、既製品として流通する静圧空気軸受を利用することができれば開発期間の短縮につながる。3.2節で述べる変動する力の高精度発生・測定方法、3.4節で述べるマイクログラビティ環境下で動作する質量測定方法の開発においては、摩擦の小さな直線運動を実現させる目的で、静圧空気直動軸受を利用している。この空気軸受の摩擦特性を定量的に評価することは、空気軸受を利用した測定方法の不確かさを見積もる上で必須である。

そこで、エアスライドに代表される摩擦の小さな直動軸受の、静的、および、動的な摩擦特性の計測法として、時間的、空間的に定常な加速度場としての重力加速度 g を利用する方法を開発した⁶⁴⁾。

3.1.2. 実験装置

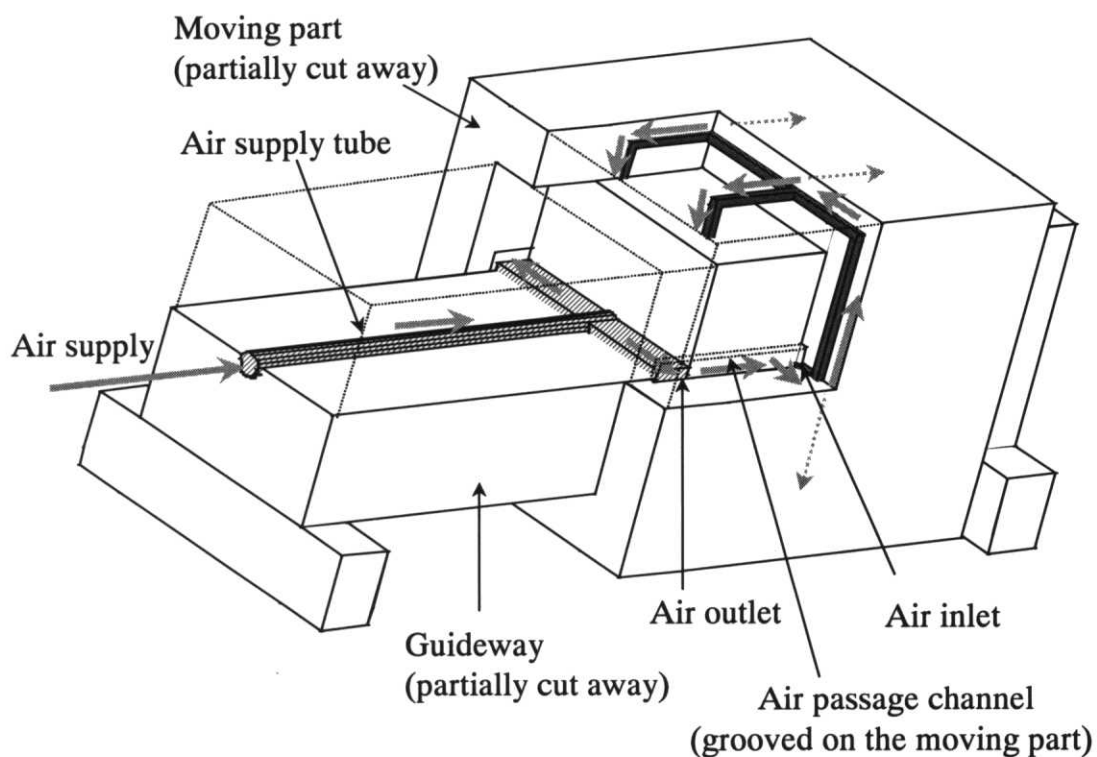


Fig.3.1 Schematic of the linear bearing

Fig.3.1 に、被試験機として用いた静圧空気軸受の立体断面図を示す。ガイド部給気方式の直動静圧軸受“エアスライド”（NTN株製：可動距離 90mm，可動部最大質量 27kg，無負荷時の設計空気膜圧 $8\mu\text{m}$ ，空気膜剛性 $70\text{N}\mu\text{m}^{-1}$ ，ガイド部の真直度 $0.3\mu\text{m}/100\text{mm}$ ）を評価対象とした。材質は全アルミニウム製である。外部からの圧縮空気は、可動部ではなく、ガイド部より導入される。構造としては、可動部への直接配管よりは複雑になるが、可動部へ作用する外力をなるべく小さくする目的でこうしてある。ガイド部中央部の出口(Air outlet)より出た圧縮空気は、可動部内側に掘られた溝(Air passage channel)を通して、可動部

中央に設けられた空気取り入れ口(Air inlet)に導かれる。可動部に導入された圧縮空気は、可動部内部の配管を通り稼動部上下内面に導かれる。剛性を出すための圧縮空気噴出し口の形式は、オリフィス絞りと表面絞りを合せた複合絞りとなっている。

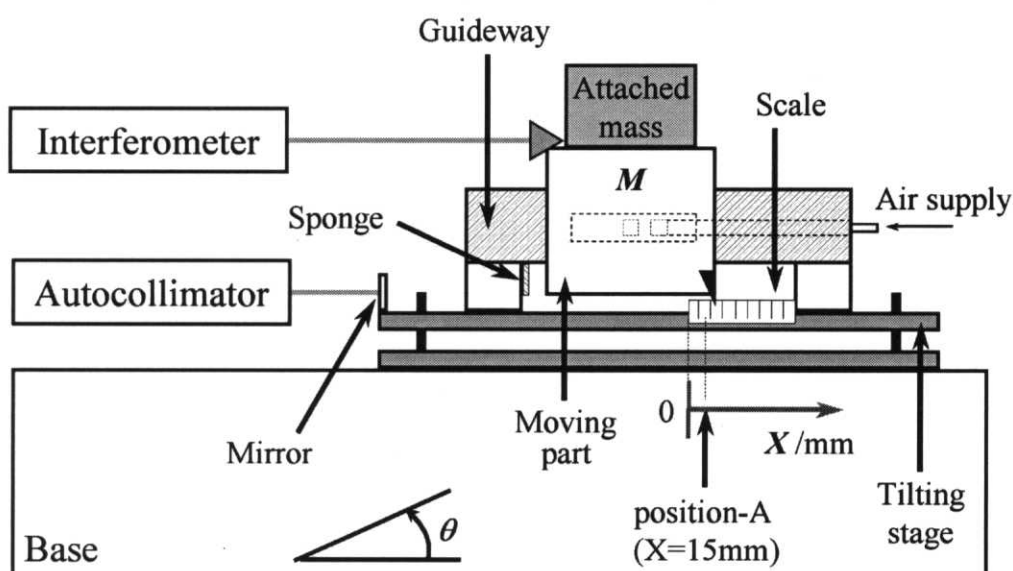


Fig. 3.2 Experimental setup

Fig.3.2 に示すように、エアスライドを3点支持の傾斜可変ステージに乗せる。可動部の可動方向位置は、後述の光波干渉計による測定の外、ステージに貼り付けられたスケールを用いて目視でも知ることができる。スケール上に $X=15\text{mm}$ から 75mm まで 10mm 間隔で5点の測定点を設け、 $X=15\text{mm}$ の点を基準点(Position-A)とする。可動部の速度は光波干渉計により、信号光のドップラーシフトとして測定される。この速度を時間積分、あるいは、時間微分することにより、可動部の相対位置、あるいは、加速度がそれぞれ計算される。また、可動部全質量として、質量 4.101kg の付加分銅の着脱により、 $M=2.108\text{kg}$, 6.209 の2水準から選択できるようにした。

3.1.3. 静摩擦特性

可動部が静止状態を保つステージの傾斜角度の範囲 (θ_{\min} , θ_{\max}) を可動部の可動方向各位置 x において測定した。ここで、可動部が静止状態を保つ角度の最小値を θ_{\min} 、最大値を θ_{\max} としている。合計6セットの計測を行った。各セット、各位置において可動部が静止状態を保つステージ傾斜角の最小値 θ_{\min} と最大値 θ_{\max} を5回の測定の平均値として求めた。Fig.3.3 に、その中心値 $\theta_c = (\theta_{\max} + \theta_{\min})/2$ を示す。図中のプロット点は6セットの計測の平均値を表し、プロット点に付加されたバーはその標準偏差を表す。各セットにおいて **Position-A** を基準位置とし、そこでの可動部が静止状態を保つステージ傾斜角の中心値をゼロとした。これは、ガイド部が水平面と成す角を測定する手段がなかったため、やむなく行ったことである。 **Position-A** においては、これを原点としたため、標準偏差はゼロとなっている。この角度において、可動部に作用する流体力、静電気力、磁気力、重力などのガイド部傾斜方向の成分の総和がゼロになると解釈できる。非磁性のアルミニウム製であるので磁気力は無視できると考えられるが、空気膜で非接触支持されるため静電気力は無視できない。このため、測定中、時折、銅細線を可動部に接触させることにより、可動部とガイド部との電位差を除去することを行った。

もしも、流体力などに代表される重力以外の外力が無視できるならば、このステージ傾斜の中心角 θ_c において、ガイド部の湾曲がキャンセルされると考えられる。しかしながら、ガイド部の真直度は仕様上 $0.3\mu\text{m}/100\text{mm}$ よりよいので、 $M=2.108\text{kg}$, $X=75\text{mm}$ での θ_c の値が $150\mu\text{rad}$ 以上となることは、ガイド部の幾何学的湾曲によるとは考えにくい。さらには、 $M=2.108\text{ kg}$ の場合と $M=6.209\text{kg}$ の場合とにおいて中心値の値が大きくなることも、幾何学的湾曲からは説明がつかない。

一方、もしも、仕様通りガイド部の湾曲が無視できガイド部は幾何学的には平坦であると仮定できるならば、ステージ中心角 θ_c が場所により変化するの、可動部に作用する流

体力などの外力が変化するためであると考えられる。基準位置（**Position-A**）におけるガイド部の水平面との成す角を θ_0 とおくと、可動部に作用する重力のガイド部に平行な成分 F_G は、

$$F_G = -Mg \sin(\theta_0 + \theta_C), \quad (3.1)$$

と表せる。

さらに、 θ_0, θ_C は微小であるので、

$$F_G = -Mg (\theta_0 + \theta_C), \quad (3.2)$$

と近似できる。このとき、これと釣り合う可動部に作用する流体力などの外力 F_{Ex} は、

$$F_{Ex} = -F_G = Mg (\theta_0 + \theta_C), \quad (3.3)$$

と表せる。

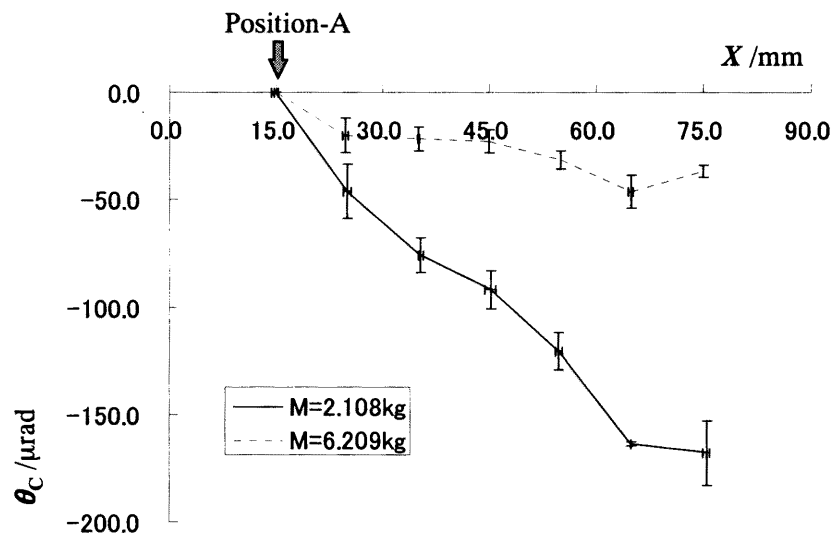


Fig. 3.3 Center of the angle range where the moving part is at a standstill

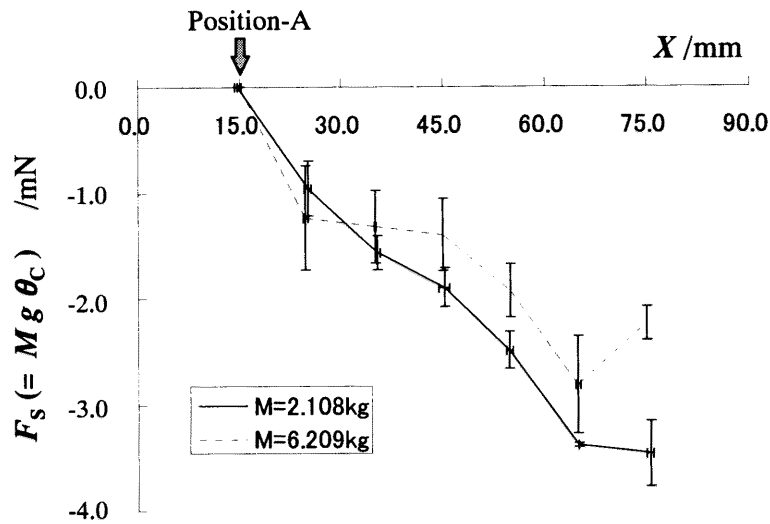


Fig. 3.4 Static force acting on the moving part

Fig.3.4 に、可動部が静止するステージ傾斜角の中心値 $\theta_c = (\theta_{\max} + \theta_{\min})/2$ に、可動部に作用する重力 Mg を乗じた値 $Mg\theta_c$ の可動部各位置での変化の様子を示す。図中のプロット点は 6 セットの計測の平均値を表し、プロット点に付加されたバーはその標準偏差を表す。この値は、可動部に作用する重力のガイド部に平行な成分 F と釣り合う可動部に作用する流体力などの外力 F_{Ex} の、基準位置 (**Position-A**) における値からの差分を表している。**Position-A** を基準とすると $X=75\text{mm}$ 点とでは、 -3mN 程度の力が作用している。また、可動部質量による依存性が小さいことから、この現象は“角度”ではなくて“力”が本質的なものであると考えられる。この力の発生原因としては、Fig.3.1 に示した設計上唯一の非対称気流が生じる Air passage channel の左右両壁面の圧力差が考えられる。すなわち、Air passage channel における圧力降下により、ガイド部からの圧縮空気噴出し口 (Air outlet) 側の圧力の方が、可動部の圧縮空気吸入口 (Air inlet) 側よりも圧力が高いと仮定すると、流体力は常に可動部を中心位置 $X=45\text{mm}$ に向かわせるよう作用し、Fig.3.4 の力の向きと一致

する。

Fig.3.5 に可動部が静止状態を保つ角度範囲の半幅 $\theta_H = (\theta_{\max} - \theta_{\min})/2$ を示す。図中のプロット点は6セットの計測の平均値を表し、プロット点に付加されたバーはその標準偏差を表す。可動部とガイド部との互いに向かい合う面が平坦で、両者の間には空気膜のみが存在する場合、可動部が静止した状態では摩擦は存在しない。しかしながら、実際には、可動部が静止状態を保つ角度範囲が存在し、その大きさを評価するパラメータとして半幅 $\theta_H = (\theta_{\max} - \theta_{\min})/2$ を用いる。図の縦軸の振るスケールが $35\mu\text{rad}$ と小さいので、平均値に対して測定のばらつきを表す標準偏差が相対的に大きくなっているが、可動部質量に対して顕著な依存性があるがわかる。

前述の中心値 θ_c に関する議論と同様に、この場合は $Mg \sin(\theta_H)$ が、可動部に作用する重力のガイド部傾斜方向成分を相殺しうる、“見かけ上の”最大静止摩擦力を表す。

Fig.3.6 に $Mg \sin(\theta_H)$ の可動部位置での変化の様子を示す。図中のプロット点は6セットの計測の平均値を表し、プロット点に付加されたバーはその標準偏差を表す。角度の次元で表示した Fig.3.5 に比べ、可動部質量に対する依存性が小さくなっていることがわかる。通常の静摩擦であるならば摩擦力は可動部質量に比例するが、この場合は、可動部質量に関わりないように見える。そこで、“見かけ上の”静摩擦という言葉を用いることとする。

この“見かけ上の”静摩擦力の発生原因としては、ガイド部と可動部の間に生じる微細なポテンシャルの凹凸が考えられる。すなわち、この微細なポテンシャルの谷一つ一つを乗り越えるのに、ある大きさの力を必要とするということが考えられる。ポテンシャルの凹凸の発生原因としては、ガイド部、可動部の対向面の機械加工で生じる微細な溝の存在が考えられる。現在開発を計画している PZT を利用した自動傾斜ステージができれば、この微細なポテンシャルの凹凸の、一つ一つの谷での可動部の運動の様子、これらを乗り越えるときの運動の様子を、光波干渉計により計測することができると考えている。

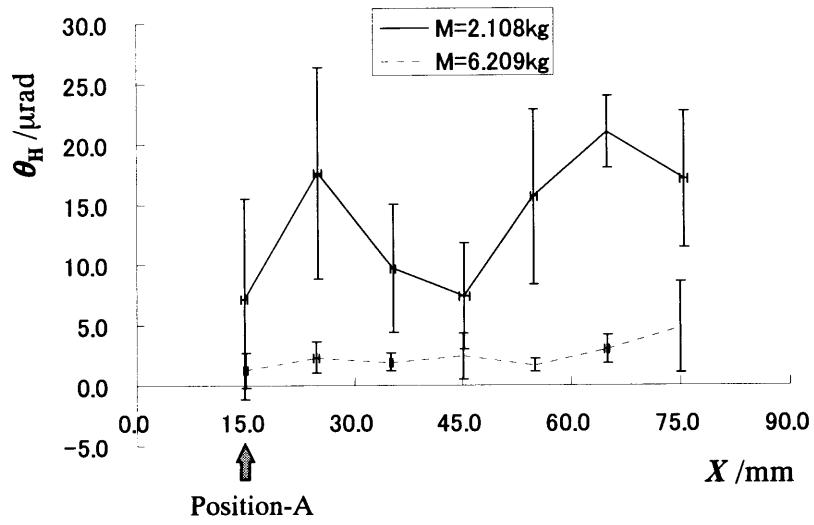


Fig. 3.5 Half-width of the angle range where the moving part is at a standstill

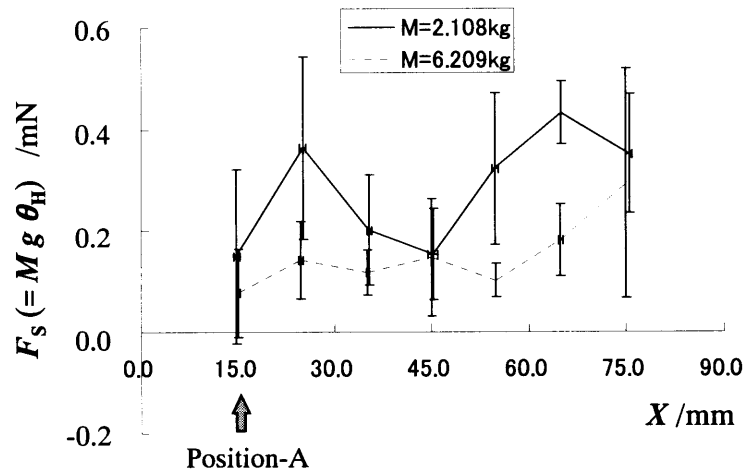


Fig. 3.6 Apparent static frictional force acting on the moving part

静止状態において巨視的にみると静摩擦のように見えるこの現象が、上記仮説のようにガイド部と可動部の間に存在する空気膜内の気流のポテンシャルが作る、可動部安定位置に関するポテンシャルの凹凸に起因するものであるとするならば、可動部の運動の向きがポテンシャルの斜面に対して、登る方向の時は減速方向の力を、下る方向のときには加速方向の力を得ることが考えられる。この仮説が正しいならば、可動部にある初速を与えて自由に運動させると、この微細なポテンシャルの凹凸の通過にともなう、微細な加速度の振動が観測できるだろう。気流の作るポテンシャルの凹凸の主因が、ガイド部と可動部の対向する面の研磨加工時に生じる縞状のうねりである場合、この縞の間隔と、可動部運動時に観測されるであろう加速度の振動の空間周期が一致することが予想される。

今回の測定では、可動部の姿勢（3自由度）の計測は行っていないが、可動部の姿勢にいくつかの安定点が存在し、可動部の姿勢の“乗り換え”が生じ空気膜形状、空気膜内流れの状態が変化すると、静摩擦特性することが考えられる。このことが、測定値の比較的大きなばらつきの原因とも考えられる。

3.1.4 動摩擦特性

動的な摩擦特性，すなわち，可動部が動いているときの摩擦特性は，空気膜内の層流粘性抵抗であると考えられているが，これを測定する有効な手法は見当たらない．そこで，その手法の開発を行った．ガイド部を適当な角度で傾斜させ，その下端付近に配置したスポンジに可動部を衝突させる．最初の衝突後，可動部はガイド部上を減速しつつ登っていき，あるところで静止し，そこから，降下しはじめ，2回目の衝突をする．この1回目の衝突から2回目の衝突までの間の登りと下りの運動において，可動部に対する運動方程式を解くことにより，可動部に作用する動摩擦力の大きさを推定することを試みた．この運動は，ガイド部に沿ったものなので，厳密な意味では自由落下とは言えないが，進行方向の拘束を積極的にはしないという意味で“自由落下”という言葉を用いる．この方法では，自由落下運動の上りと下りとで，動摩擦力の方向は逆，重力の方向は同一であることを利用している．ガイド部傾斜角設定値 θ_s の計測は，オートコリメータを用いて行った．ガイド部傾斜角設定値 θ_s の原点は，可動部がスポンジに当たる位置でちょうど静止状態を保つ角度範囲の中心値とした．傾斜角設定値 θ_s の設定範囲は約1分,2分,3分(320 μ rad, 611 μ rad, 878 μ rad)の3水準とした．以下，その詳細を述べる．

ガイドの幾何学的傾斜角度 θ が小さいとき，可動部の加速度 a を，動摩擦力 F_D をとして，

$$M a = -M g \theta + F_D, \quad (3.4)$$

動摩擦力 F_D が，クエット流れの粘性摩擦抵抗 F_{Df} に等しいとすると， μ_{air} を空気の粘性係数として

$$F_D = F_{Df} = -\mu_{air} S v/h, \quad (3.5)$$

すなわち，動摩擦力 F_D は，可動部内面表面積 S ，可動部速度 v に比例し，膜厚 h に反比例したものとして表せる．

登りと降りについて時間平均化(添字:m)を施すと，

$$M a_{up,m} = -M g \theta_{up,m} - |F_{D,up,m}| \quad (3.6)$$

$$M a_{\text{down}} = -M g \theta_{\text{down},m} + |F_{D,\text{down},m}| \quad (3.7)$$

(3.5)式を考慮して,

$$F_{D,\text{up},m} / F_{D,\text{down},m} = v_{\text{up},m} / v_{\text{down},m} \quad (3.8)$$

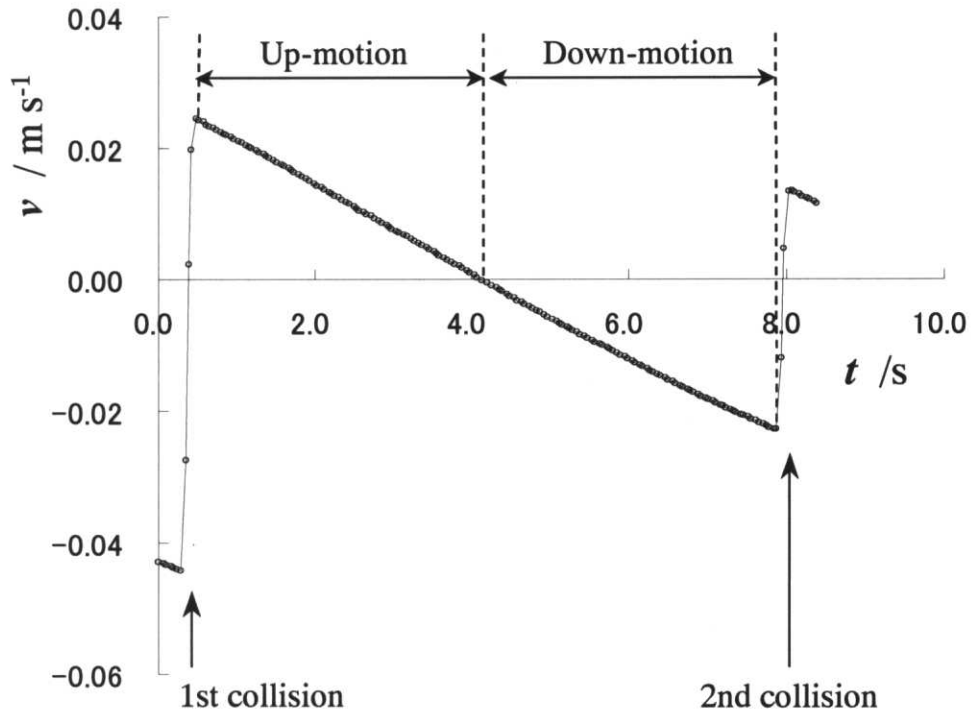


Fig. 3.7 Velocity change during free fall

Fig.3.7 に、ある実験における、可動部速度の計測結果を示す。この場合、登りと下りにおける時間平均速度は、それぞれ、 $v_{\text{up},m} = 0.0123 \text{ m/s}$, $v_{\text{down},m} = -0.0120 \text{ m/s}$ である。登りと降りにおける傾斜角の時間平均、 $\theta_{\text{up},m}$ と $\theta_{\text{down},m}$ がほとんど等しく、 θ_m と置ける場合、方程式 (3.6)-(3.8)は、 $F_{D,\text{up},m}$, $F_{D,\text{down},m}$, θ_m の3つを未知数として解ける。合計18回のこのような自由落下実験を行った

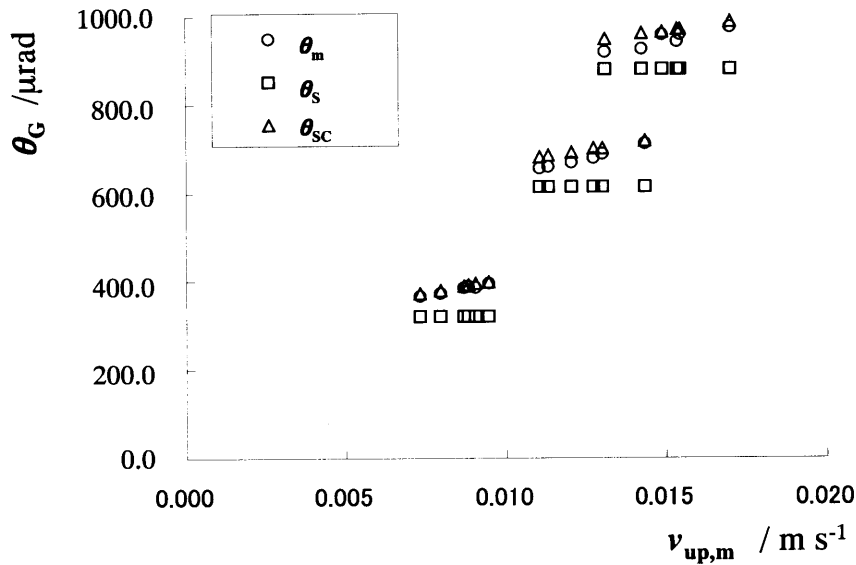


Fig. 3.8 The mean tilt angle of the guideway, θ_m , the tilt angle of the stage, θ_s , and the corrected stage angle considering the static force, $-\theta_{\text{SC}}$.

Fig.3.8 に、上記 18 回の自由落下実験結果より得られた結果を示す。図で○印は、方程式を解くことにより計算される平均傾斜角 θ_m を表す。□印は、オートコリメータ読みに基づいた計測・設定された傾斜角設定値 θ_s を表す。両者は、システムチックなズレを見せている。△印は、この傾斜角設定値 θ_s に対して、Fig.3.4 で示した“静的に作用する力”をガイド部傾斜角に換算して補正を加えた“見かけ上”の傾斜角 θ_{SC} を示す。角 θ_m と θ_{SC} が一致することから、“静的に作用する力”は可動部が動いているときにも同じように作用していると考えられる。なお“静的に作用する力”は、空気軸受内部で発生する流体力と考えられるが、今回の実験では可動部の速度が小さかったために、可動部が静止しているときと同程度の力であったことが考えられる。

この様に、運動方程式から求めた平均傾斜角 θ_m と、オートコリメータにより実測した傾斜角設定値 θ_s に対して空気軸受内部の流体力に関する補正を加えた“見かけ上”の傾斜角 θ_{sc} がよく一致したことは、これら計測手法全般の妥当性を示す根拠の一つとなる。

Fig. 3.9 に、登り運動における動摩擦の時間平均値 $F_{D,up,m}$ について、同じく上記18回の自由落下実験結果より計算された結果、および、空気軸受の幾何寸法の仕様に基づいて理論式を示す。両者はよく一致しており、使用した空気軸受の動摩擦特性として、空気膜内のクエット流れを仮定した理論が適当であることが示された。なお、下り運動における動摩擦の時間平均値 $F_{D,down,m}$ についても、同様な結果が得られている。

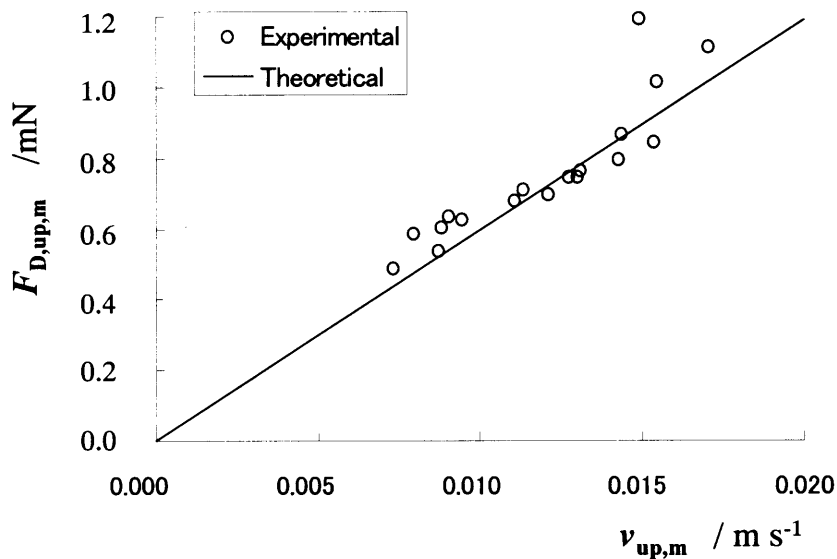


Fig. 3.9 Dynamic frictional force acting on the moving part

3.1.5 まとめ

静圧空気直動軸受に代表される摩擦の小さな直動軸受の、静的、および、動的な摩擦特性の計測法として、時間的、空間的に定常な加速度場としての重力加速度 g を利用する方法を開発した。

本方法により、静圧空気直動軸受として NTN 製「エアスライド」を例にとり、可動部が静止状態であるときに作用する力、可動部が運動状態にあるときに作用する力について実測し、以下の結果を得た。可動部質量は M は、2 kg, 6 kg の 2 水準とし、実験中、可動部に作用する重力は約 20 N (20000 mN), または、60 N (60000 mN) である。

- (1) 静止状態であるときに作用する力としては、2 種類のものがある。一つは、空気膜内の気流の非対称性により作られると思われる力、および、静摩擦のように見える力、である。
- (2) 空気膜内の気流の非対称性により作られると思われる力は、可動部の質量には依存せず、可動部の可動方向位置に依存する。その大きさ F_s (mN) の可動部位置 X (mm) に対する変化の割合は、約 0.05 mN/mm であった。
- (3) 静摩擦のように見える力は、可動部の質量 M , 可動部位置 X に対する顕著な依存性は見られない。その大きさ F_s (mN) は、可動部質量 2 水準、可動部位置 7 水準の各条件での測定値の、標準偏差が 0.05mN から 0.2mN 程度、平均値が 0.1 mN から 0.4mN 程度であった。
- (4) 可動部が運動している状態にあるときについては、動摩擦の測定を行い、これが空気膜内の流体粘性抵抗から予測される理論式とほぼ一致すること、および、可動部が静止している状態のときに作用する流体力も同程度作用していると解釈できること、を示した。その大きさは、可動部速度が 15mm/s において、約 0.8mN であった。

しかしながら、上記の測定はすべて衝撃が作用しない穏やかな環境下における測定であ

り、衝撃などによりエアスライド内部の非接触潤滑膜として作用している空気膜が破れ機械的接触が生じる現象が生じる場合も考えられる。特に、衝突破壊試験や、力センサーの動特性評価実験などにおいて、衝突時におけるエアスライド可動部の姿勢のモニターを含めたエア膜が破れたときの検出方法の開発が望まれる。また、エア膜が破れた場合の摩擦の大きさの推定方法として、3.4で述べる2つのエアスライドを対向衝突させる実験を応用することを計画している。また、原理的には静摩擦が存在しないにもかかわらず観測された見かけ上の静摩擦の原因として考えられた、スライド面上のポテンシャルの凹凸を、光波干渉計により計測することも計画している。

また、第4章で述べる質量の量子標準化を目指して研究が進められている、超伝導磁気浮上法においては、超伝導浮上体の姿勢変化が大きな問題となっており、その安定化のために超伝導直動ベアリングの導入が検討されている。超伝導磁気浮上実験は高真空、低温(4.2K)環境下で行われるので、ここで開発した摩擦特性評価法をクライオスタット内で遠隔操作で行えるようにするためには、適当なマニピュレータの開発が必要となる。

静圧空気軸受に関して、高い運動精度と小さな摩擦という2つの大きな特長のうち、後者を主因として利用される例が、本研究の他にも、散見される。産業、学術の世界でキーテクノロジーの一つとして、便利に利用される静圧空気軸受についてその摩擦特性を評価する方法を開発し、更なる疑問点を抽出できたことは、次節以降で詳述する本研究に関連する利用のみならず、軸受メカニズムの改良、適用範囲の深化において、非常に有意義なことである。

3.2 変動する力の発生・計測法

3.2.1 はじめに

本節では、空気圧により非接触浮上支持することにより、物体に作用する慣性力を高精度に取り出すことを特徴とする、変動する力の発生・計測法について述べる。力計測に一般的に用いられる力センサに対する動的校正方法が確立されていない現状では、ここで提案する変動する力の発生・計測を発展させることは、産業・科学技術に対する大きな貢献となることが期待できる。すなわち、力センサーの動特性評価の高精度化を通して、構造物の強度設計における最適化手法の高度化、生産工程のモデリング、制御の高度化、高精度化に繋がることが期待される。また、筆者が開発した力センサを用いないで衝突破壊試験における作用力を慣性力として直接測定する方法は、高精度な破壊試験データの提供を可能とするものであり、構造部材の最適化による省資源化、省エネルギー化が期待できる。

一般に、見逃される系統誤差要因、もしくは、Type-Bの不確かさ要因を排除する為には、可能な限り様々な方法が、様々な機関・人により試みられるべきである。与えられた力積、すなわち、作用した力の時間積分値、の真値を極めて高精度に知ることのできる方法は、力センサの衝撃応答評価において、他の開発が試みられている方法との相互検証を行う上でも要望される。

本章では、まず、空気圧浮上支持による慣性力の高精度な取り出しを利用した衝撃力発生・計測方法について述べる⁶⁵⁾。次に、この方法を、力センサーの衝撃応答評価^{66), 67)}、および、純アルミ丸棒の衝撃3点曲げ試験に適用した例について述べる。

3.2.2 衝撃力発生器

物体に作用する水平面方向の慣性力を，その物体を空気圧により浮上支持して余計な外力を極力排除して取り出すことを特徴とする，衝撃力の発生・計測方法を提案する．地上において重力の影響を受けずに，摩擦などの外力の影響を小さく抑制するため導入する空気圧浮上支持手段として，静圧空気直動軸受を用いる．慣性質量として軸受可動部全体を利用し，可動部に作用する慣性力として物体に作用する力を測定する．

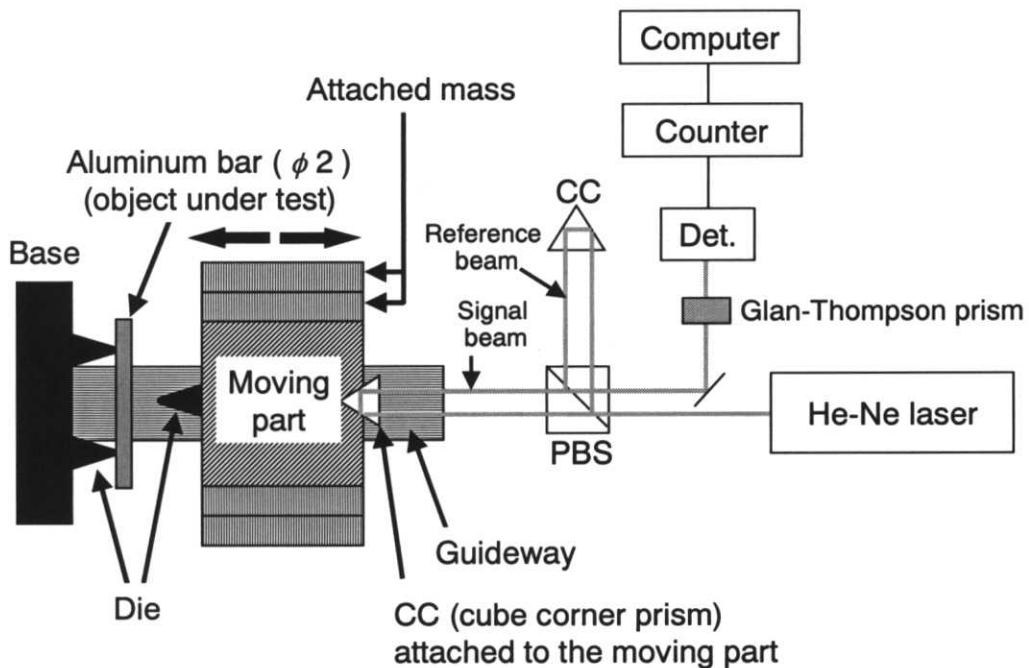


Fig.3.10 Schematic diagram of the experimental setup

衝突時に剛体としての可動部に作用する力， F (N)は，可動部質量 M と可動部加速度 α の積 $M\alpha$ (kgm/s²)として求められる．ここで，軸受内部の摩擦などに代表される外力が無視できる条件下では，この力は衝突点で作用した力と等しい．

$$F = M\alpha. \tag{3.9}$$

可動部を剛体と見なせない場合、すなわち、可動部の加速度分布が一様でない場合は、上式右辺を密度 ρ と加速度 α の積の空間積分 $\rho\alpha$ として表す必要がある。

また、作用する力の瞬時値ではなく、その時間積分である力積について次式が導かれる。

$$\int F dt = M(v_1 - v_2). \tag{3.10}$$

この積分形式では、加速度測定は不要で、衝突前後の速度差のみ測定すればよいので、高精度な測定を比較的容易に行うことができる。特に、力センサの衝撃応答評価では、出力波形の詳細の評価に先立ち応答全体の巨視的評価を高精度に行う上で、この積分形を利用することは有効であると考えられる。

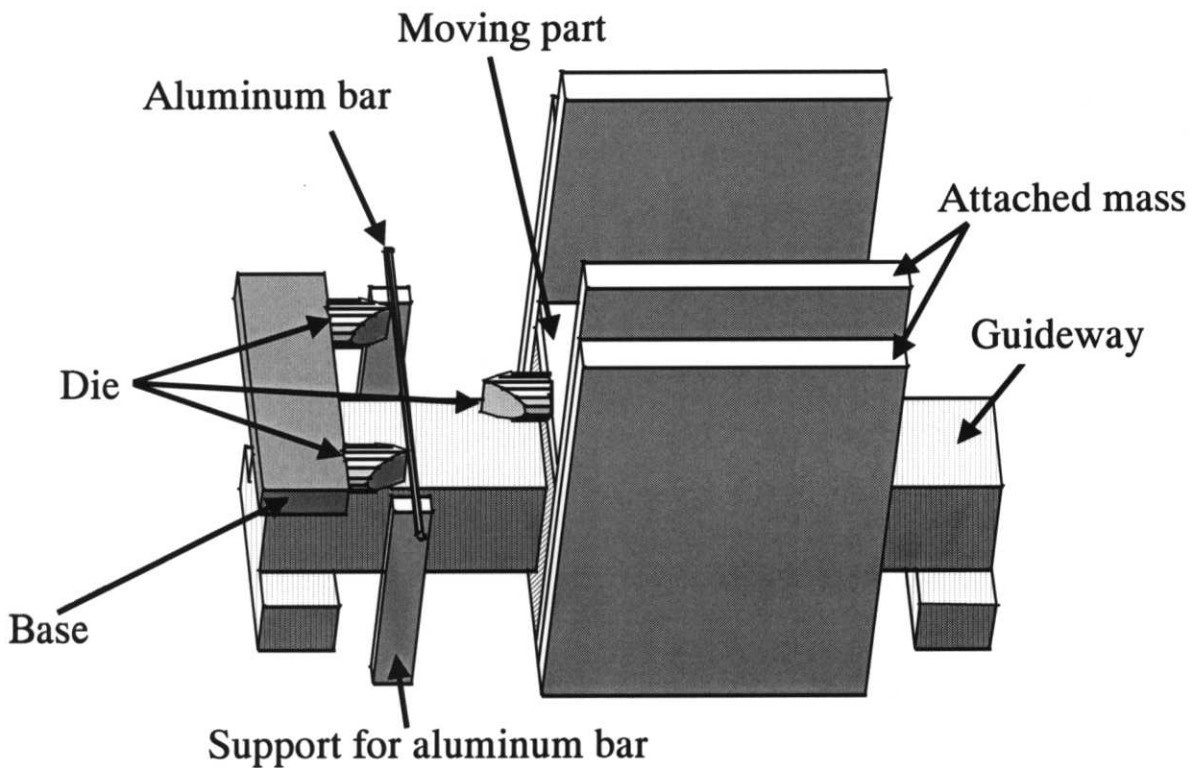


Fig.3.11 Solid figure around the crash point

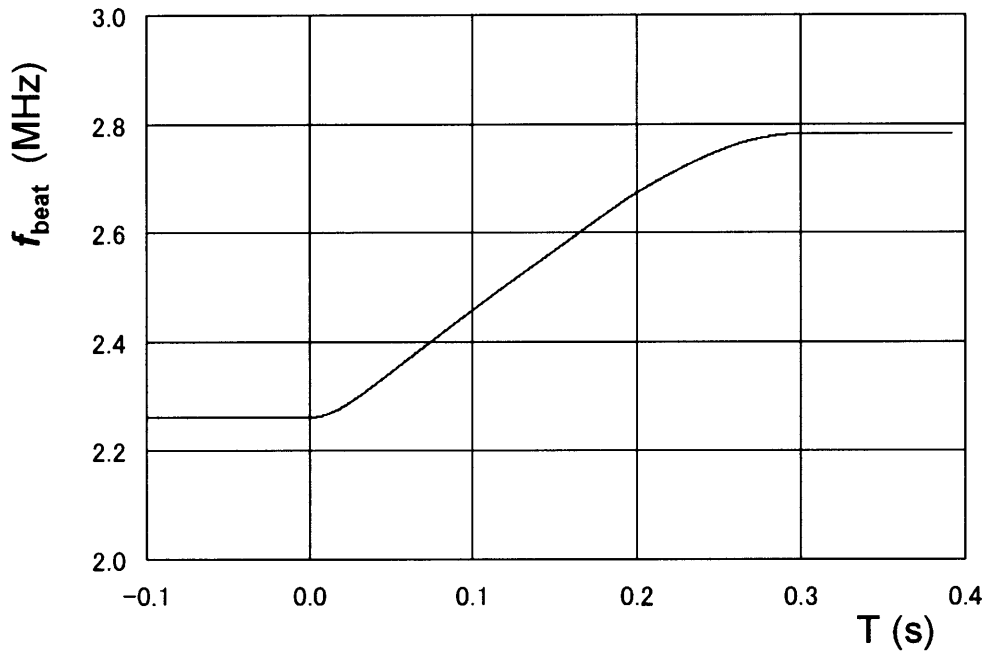


Fig.3.12 Change in the beat frequency f_{beat}

Fig.3.10 に提案する方法を検証するために行った純アルミ丸棒の3点曲げ試験のための実験装置の配置を示す。Fig.3.11 に3点曲げ試験部の立体的模式図を示す。一つの金型 (Die) は可動部の重心高さ付近に取り付けられ、残る2つの金型は約80mmの間隔でベースに固定される。使用した金型先端の曲率半径は0.5mm、刃先角は60度である。直径2mmの純度99.7%の純アルミ丸棒は、支持台の上に置くのみで、固定はしない。

空気軸受の可動部は速度 v_1 m/s で試験体に衝突し、3点曲げの過程の終了後、速度 v_2 m/s で試験体から離れていく。可動部の速度は光波干渉計の信号光のドップラーシフト周波数 f_{Dopper} として周波数カウンター (アドバンテスト社製, Model: R5363) により測定される。

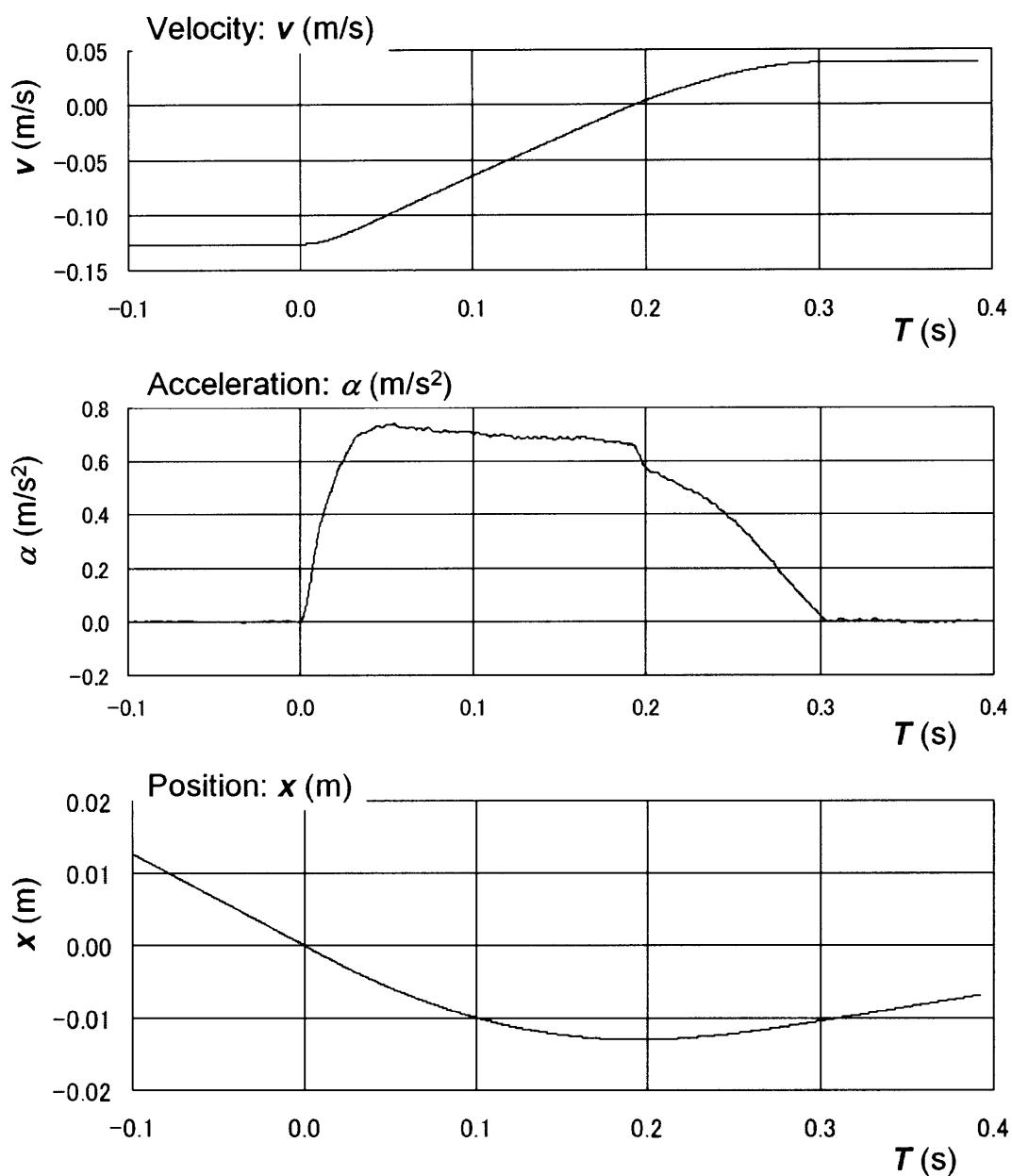


Fig.3.13 Change in velocity, acceleration and position

光源には、ゼーマンタイプの2周波ヘリウムネオンレーザを用いた。信号光と参照光の差周波数は、ビート周波数、 f_{beat} 、として検出器により電気信号として取り出される。この

差周波数は、可動部速度の変化に伴い、可動部が静止した状態における値、 f_{rest} 、である約 2.6GHz を中心に変化する。周波数カウンターは、サンプリング間隔約 $\Delta T=400/f_{\text{beat}}$ (s) で計測した 14000 個までのデータをメモリにストレージできる。周波数 2.6GHz において、このサンプリング周期は約 0.15ms である。加速度、 α (m/s²)、および、位置、 x (m)、は、それぞれ、速度 v を、時間微分、あるいは、時間積分することにより求められる。可動部速度は以下のように、空気屈折率、 λ_{air} 、を用いて、ビート周波数より計算される。

$$v = \lambda_{\text{air}} (f_{\text{Doppler}})/2, \quad (3.11)$$

$$f_{\text{Doppler}} = f_{\text{beat}} - f_{\text{rest}}, \quad (3.12)$$

Fig.3.12 に 3 点曲げ試験におけるビート周波数の変化の様子を示す。ここでは、20 データごとの移動平均が適用されている。平均区間は約 3ms である。ビート周波数は、約 0.3s の衝突時間に、速度変化に応じて変化している。

Fig.3.13 にビート周波数 f_{beat} から計算される、速度 v 、加速度 α 、位置 x をまとめて示す。速度 v はビート周波数 f_{beat} に比例する。加速度、 α (m/s²)、および、位置、 x (m)、は、それぞれ、速度 v を、時間微分、あるいは、時間積分することにより求められる。速度 v の変化は滑らかに見えるが、微分して計算された加速度は特徴をもった複雑な形状となっている。

Fig.3.14 に加速度 α と、可動部質量 M の積として計算される作用力 F の時系列を示す。また、Fig.3.15 に作用力 F と押し込み位置 x の関係を示す。この図から、以下のような 3 点曲げに進行していく様子が読み取れる。

- 1) 最初は弾性変形進行とともに作用力が約 13N まで大きくなる。
- 2) その後、作用力が徐々に低下する塑性変形が進行する。
- 3) 押し込み位置の最深部において、約 2N の作用力の落ち込みが観測される。
- 4) その後、弾性変形による戻しが観測される。
- 5) 弾性変形終了と共に、可動部がアルミ棒から離れる。(作用力がゼロになる。)

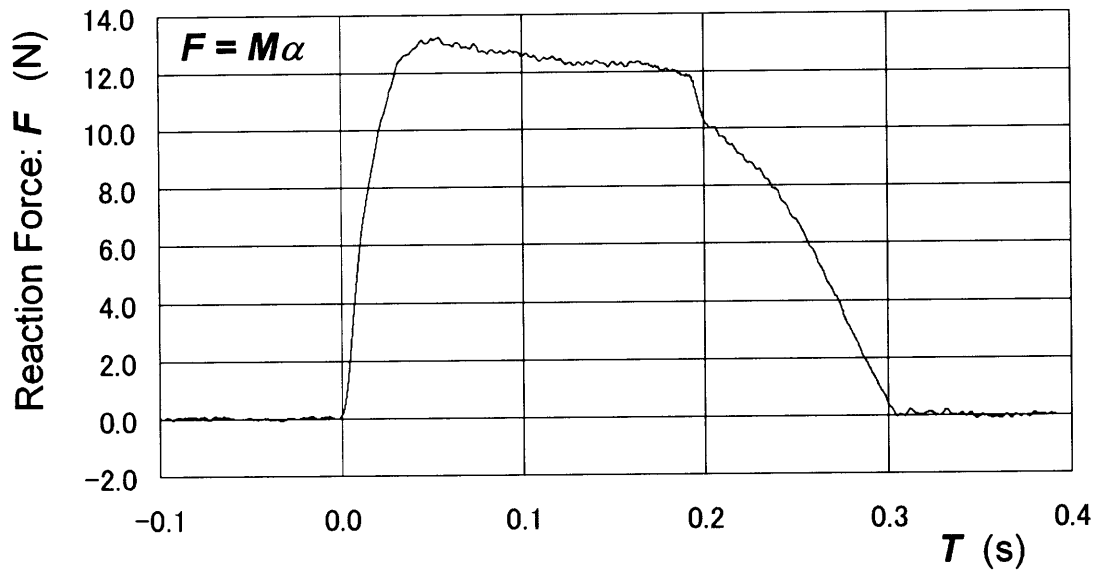


Fig.3.14 Change in reaction force with time

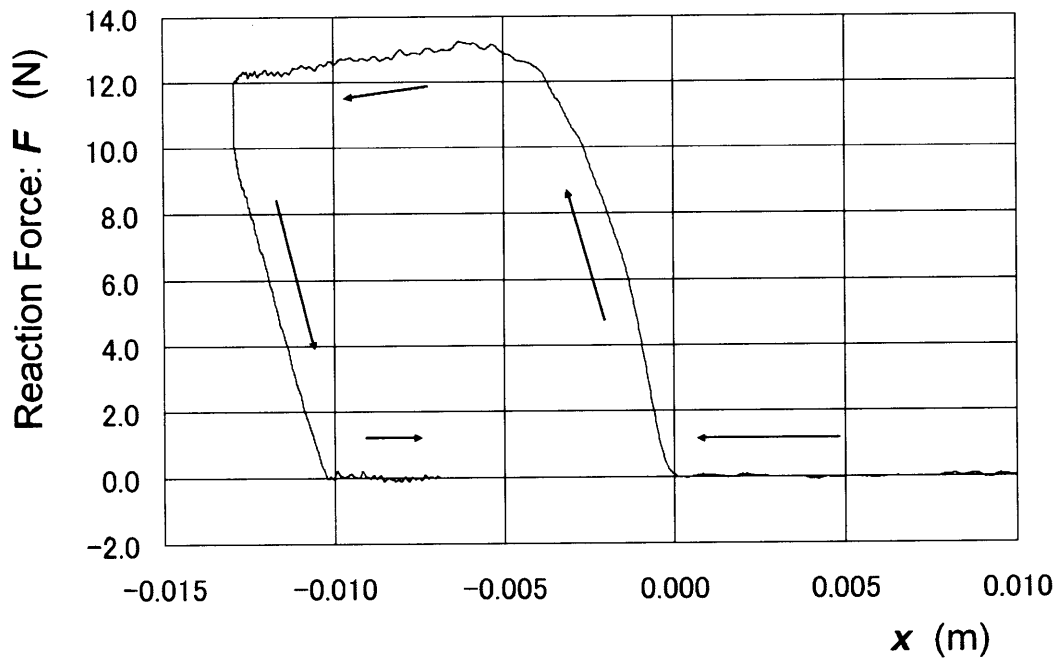


Fig.3.15 Change in reaction force with position

次に、ここで開発した衝撃力発生器を用いて実施した上記3点曲げ試験における不確かさ評価を行う。主な不確かさ要因として、以下の要因が挙げられる。

A. 周波数カウンター (R5363) :

A-1) 周波数測定: サンプル周期 0.15ms, 平均時間 3ms における周波数測定の標準不確かさは、約 22Hz と推定される。この周波数測定誤差は、可動部質量が 17.884kg の時の作用力に換算すると、約 0.058N (58mN)に相当する。

A-2) 時間測定: 測定時刻の標準不確かさは約 6 μ s と推定される。これは、測定時間約 3ms の0.2%に相当する。これは、Fig.3.2.5, Fig.3.2.6に示される最大値 13N に対して、約 0.026N (26mN)に相当する。

以上より、周波数カウンターに起因する衝撃力測定における標準不確かさは約 0.064N (64mN)と推定される。

B. 空気軸受内で作用する摩擦力: 空気軸受内で作用する摩擦力は、衝突による空気膜破れが発生しないと仮定すると、3.1 節で述べた方法による空気軸受の摩擦特性測定結果に基づき以下のように推定される。

B-1) 動摩擦: 可動部に作用する動摩擦 F_{fd} は、可動部速度 13cm/s において、約 8mN と推定される。

B-2) 静的力: 空気軸受内部の空気流れの非対称性に起因する静的力は、押し込み最深部 $x = 11$ mm において、約 2mN と推定される。

以上より、空気軸受内で作用する摩擦力を全く補正しない場合における不確かさは、約 8mN と推定される。これは、前項目の周波数カウンターに起因する不確かさ 64mN と比べ無視できる大きさである。

C. 光波干渉計:

C-1) レーザの周波数: レーザ差周波数の一回の測定中における安定性は 5 Hz よりよいと推定される。この周波数測定誤差は、可動部質量が 17.884kg の時の作用力に換算

すると、約 0.013N (13mN)に相当する。

C-2) アライメント（光軸合せ）：光軸合せにおける最大の誤差要因は、約 1mrad の不確かさを持つレーザビームの傾き角設定である。これは、力測定に対して 5×10^{-7} の相対不確かさをもたらす、Fig.3.2.5, Fig.3.2.6 に示される最大値 13N に対して約 0.000007N (7 μ N)に相当する。これは、無視できる。

以上より、光波干渉計に起因する不確かさは、可動部質量が 17.884kg の時の作用力に換算すると、約 0.013N (13mN)に相当する。

以上より、サンプリング周期 0.15ms, 平均時間 3ms, 可動部質量が 17.884kg の時の作用力の測定における結合標準不確かさは、約 0.066N (66mN)と推定される。これは、Fig.3.14, Fig.3.15 に示される最大値 13N の約 0.5×10^{-2} (0.5 %) に相当する。

以上のように、周波数カウンターに起因する不確かさが最大の要因となっていたが、このことは、次により解決可能である。ここでは、ドップラー周波数測定をビート周波数として光ディテクタより電気信号として取り出し、これをカウンターで直接計測した。光ディテクタからの約 2.6MHz の電気信号をデータロガーに記録し、事後、記録された波形から、速度、加速度、作用力などを計算することにより、カウンターに起因する誤差は低減できる。また、後述の 3.2.3 力センサの動特性評価法における衝撃力の瞬時値を測定する実験における不確かさ評価で述べるように、可動部の速度変化量を大きくし、周波数変化量を大きくすることにより、周波数カウンターに起因する不確かさは相対的に低減する。

上記の不確かさ評価には、衝突時における空気軸受内部での空気膜破れの可能性、衝突時の衝撃による実験系の振動の影響、などは考慮されていない。本装置の実用化に当たっては、これらの要因についても考慮する必要がある。衝突時における可動部の姿勢変化、可動部とガイド部の機械的接触、それにより生じるガイド部と可動部との間の力の作用に対しては十分な注意を払う必要がある。特に、衝突時における可動部の姿勢変動、ガイド部との接触、それに伴う摩擦の発生には十分に注意する必要がある。

衝突時における空気膜破れに関しては、可動部姿勢の監視、可動部内部の音響計測などのオンラインでの計測に加え、オフラインで空気膜破れが発生する条件を探索する実験が計画されている。校正装置デザインにおいて、衝突点と可動部の重心を結ぶ直線が、可動方向と平行となるように設定することにより、衝突時における可動部の姿勢変化を小さく抑えられる。

衝突時の衝撃による実験系の振動の影響については、ベースとして床に固定された重たい定盤（鋳鉄製定盤など）を用い装置全体をしっかりとした構造にすると共に、光波干渉計をベースから浮かせた状態にすることが有効であると考えられる。

急峻な衝撃における応答をより精密に評価するためには、周波数測定の時間分解能を向上させるとともに、干渉計を含めた装置全体の固定をよくする必要がある。また、その場合は衝撃荷重が作用したときにおける空気軸受の摩擦特性評価に対して、特に注意を払う必要がある。

3.2.3 カセンサの動特性評価法

3.1 節で述べた衝撃力発生器を用いた、力センサーの衝撃応答評価法について提案し、その有効性を実験的に検証する。まず、力センサーに与えられる力積、すなわち、力の瞬時値の時間積分値、を正確に知ることが特長とする、力センサーの衝撃応答評価方法を提案する。次に、力センサーに作用する力の瞬時値を計測し、力センサー出力の時系列との比較を行うことを特長とする、力センサーの衝撃応答評価方法を提案する。この方法を用いて、2つの形式の力センサーについて、半値幅で5 ms から 19 ms 程度の衝撃（インパルス）に対する応答を調べた実験結果について述べる。最後に、本方法が実用され、力センサーの動的校正方法の一つ、あるいは、他の動的校正方法に対する検証方法の一つとして利用される上で必要な検討事項について述べる。

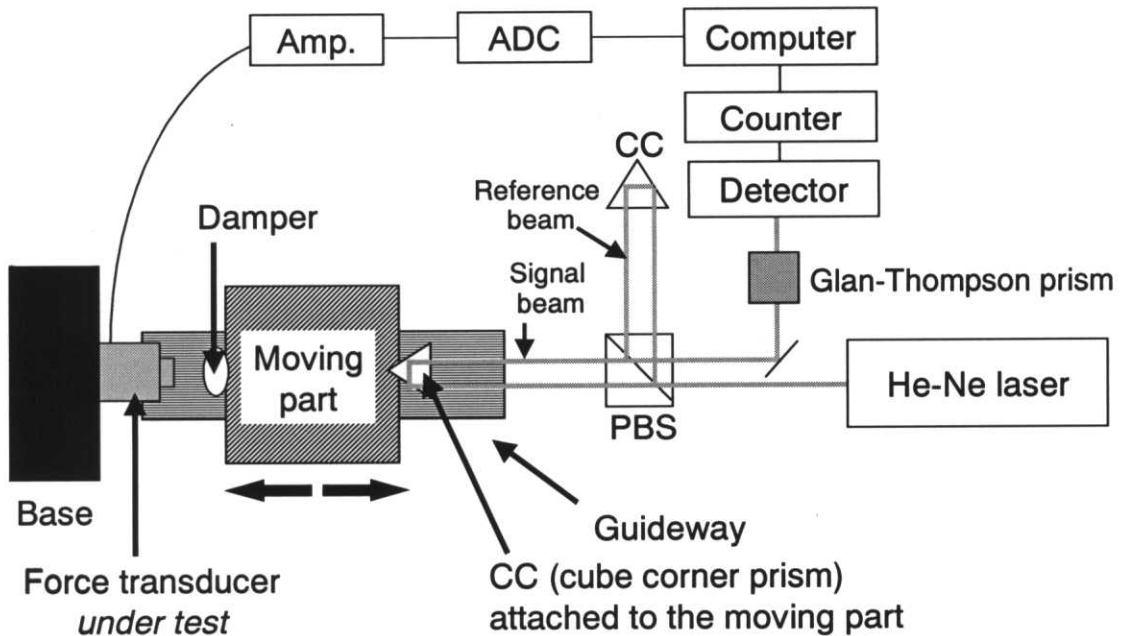


Fig. 3.16 Schematic of the experimental setup

Fig.3.16 に示すような、静圧空気直線軸受（NTN株のエアスライド）に支持された可動部（質量： M kg）を手で動かして、定盤に固定された力センサに衝突させそこに作用する力積 $\int F dt$ [kg m/s]と、衝突前後の速度 (v_1, v_2 [m/s]) を光波干渉計で測定する。摩擦力が無視できる条件下では、可動部の運動量変化 $M(v_1-v_2)$ は、可動部が力センサに与える力積 $\int F dt$ に等しい。

$$\int F dt = M(v_1 - v_2) \quad (3.13)$$

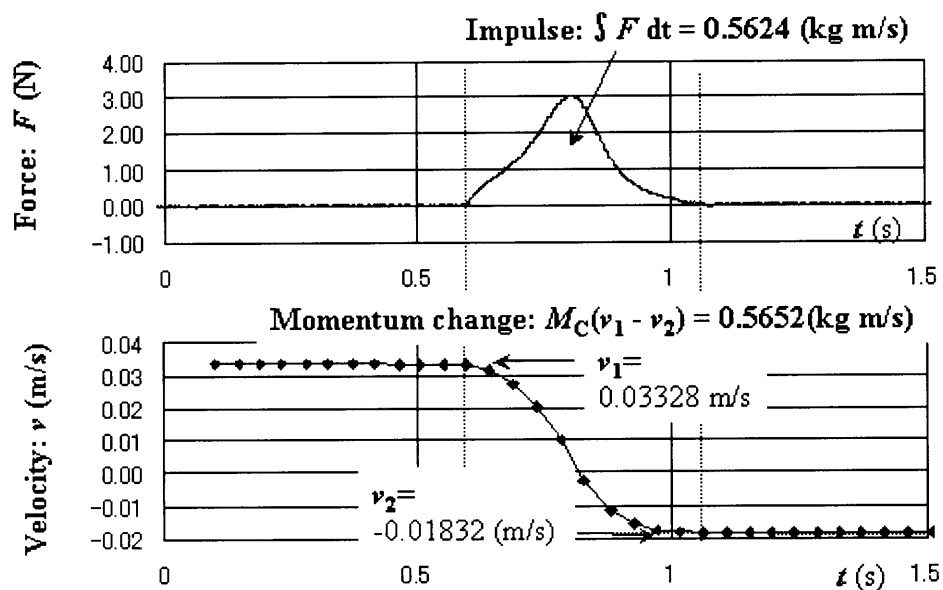


Fig.3.17 Change in impact force detected by the force transducer and change in velocity of the moving part detected by the optical interferometer (Mass of the moving part: $M=10.955$ kg)

力センサとしては、周波数応答のよいとされる半導体歪ゲージを弾性体ブロックに張付けた構造のもの（容量 9.8N, 昭和測器株製）を用いた。この力センサーは静的に荷重を付加する方法で校正されている。半導体歪ゲージにより弾性体ブロックの微小変形を検出するタイプの力センサーは、固有振動数が高く周波数応答性がよいとされるが、一方で、ゼロ

点ドリフト、スパンの変化などが大きいという欠点もある。特にゼロ点のドリフトは、急峻な衝撃荷重が作用した後では大きく、5%程度のドリフトが生じることも珍しくない。そこで、本節の実験においては、衝突の前後でのゼロ点のチェックを行い、1%程度以上のドリフトが観測されたデータは無効とした。一方、本衝撃力発生装置は、常時、安定して動作した。

Fig.3.17 に、可動部質量 $M=10.955\text{kg}$ でのある衝突実験における、力センサに作用した衝撃力の時系列、および、可動部の速度変化の様子を示す。ここでは、本方法の原理を説明する目的で、ダンパーとして厚み約 5mm 、断面積約 1cm^2 のスポンジを用い衝撃応答をかなり緩和させ、力センサの静的特性と動的特性の違いがなるべくでないような条件としている。

この場合、衝突により可動部の運動エネルギーは約 70%減少しているが、これは、スポンジバンパー内で熱エネルギーとして散逸したと考えられる。力センサで計測した力積と光波干渉計で計測した可動部の運動量は 0.5%程度の差で一致している。

使用した静圧空気直動軸受“エアスライド”の静的摩擦特性、および、動的摩擦特性は 3.1 節で述べた方法により評価された。可動部に作用する動摩擦力は可動部速度に比例し、可動部速度が 2cm/s の時に動摩擦抵抗は約 10^{-3}N であった。速度に比例することから、衝突の前後での速度測定点と同じであれば、動摩擦力の時間積分値は行きと帰りで相殺してゼロになる。静圧空気直動軸受のガイド部と可動部の間に作用する“静的な力”は、約 10^{-4}N/mm であった。この“静的な力”は、静圧空気直動軸受内部での気流の左右非対称に起因すると考えられた。さらに詳しく言えば、ガイド部の内側に掘られた通気溝の両サイドの圧力差に起因すると考えられた。傾斜ステージは、ガイド部がスポンジにちょうど接する位置において可動部が静止する、見掛け上の水平な傾斜に設定してある。この角度・位置において、重力の実際の傾斜方向成分と、軸受内部の流体力が釣り合うと解釈できる。可動部に作用するこの“静的な力”の接触している時間に渡る時間積分は、約 0.00016kgm/s となり、

これは全運動量変化量の約 0.03%に相当する。もしも、スポンジを薄くして衝撃応答をより急峻なものとするれば、この静的な力による部分は減少する。力センサに与えられる力積測定における相対標準不確かさは、補正を全くしない場合でも 10^{-3} よりよいと推定される。

ここで提案した方法は、動的な力の周波数及び振幅の任意設定性という観点では劣るものの、力センサに与えられる力積を可動部の速度変化として置換測定することにより極めて高精度に測定できるという、決定的長所を有している。さらに、測定対象となる力センサは定盤上に固定されるという長所を持つ。この方法は、力センサの衝撃応答特性の校正に、また、一般的な動特性評価法を、衝撃応答に適用する場合の誤差評価に有効である。

次に、力センサに作用する瞬時値を計測し、これと、力センサの出力を比較することを行った。Fig.3.18 に、評価を行った2つの力センサー、Transducer-A と Transducer-B の模式図を示す。Transducer-A は、容量 100 N の半導体歪ゲージを用いた高速応答型で、約 1%の不確かさで静的に校正されている。Transducer-B は、容量 200 N の「はかり」などに一般的に用いられる高精度型 (S 字形状) のもので、約 0.1%の不確かさで静的に校正されている。

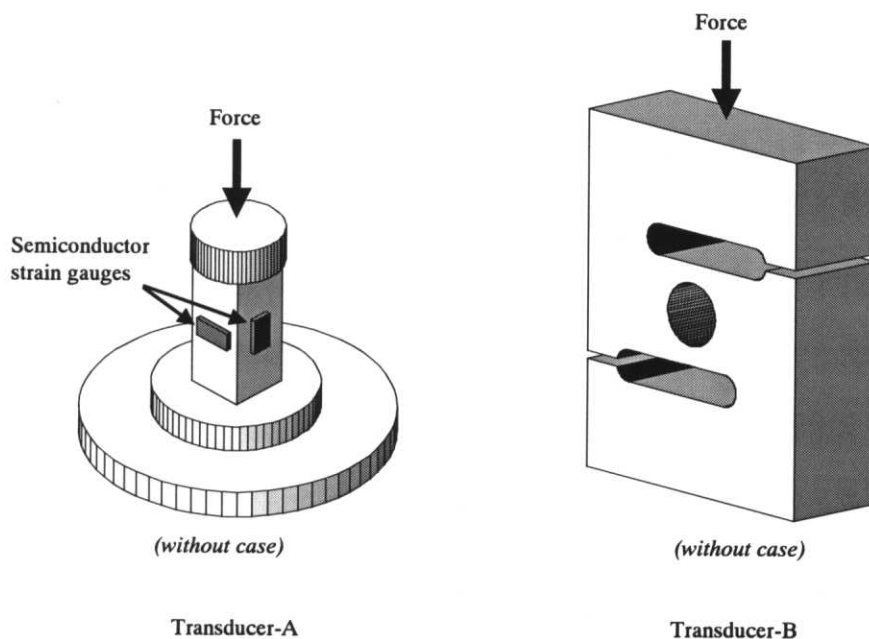


Fig.3.18 衝撃応答評価を行った2つの力センサー

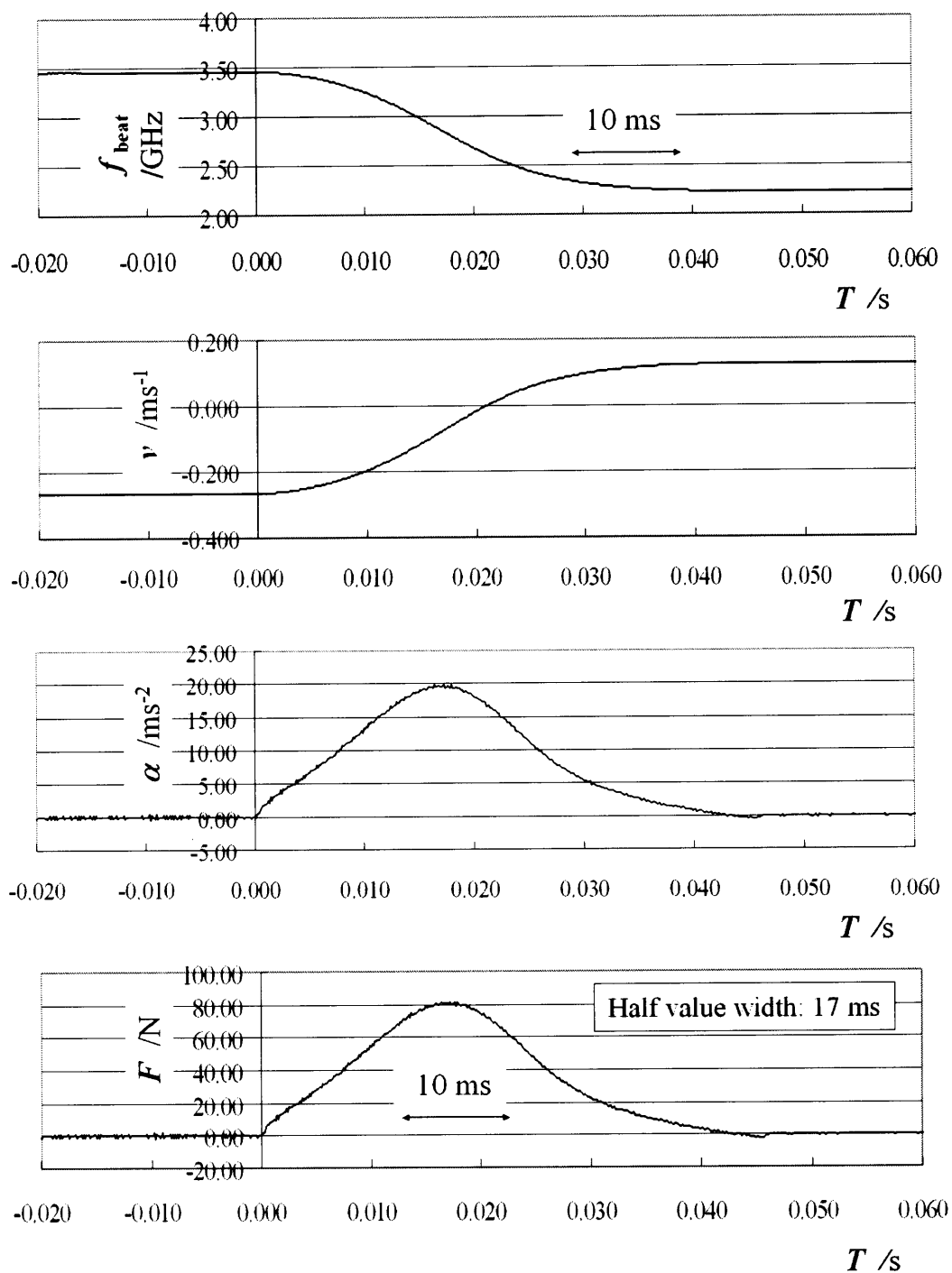


Fig. 3.19 Data processing procedure

Fig.3.19 に、ある衝撃荷重付加実験における、周波数変化、および、その周波数から計算される速度 v 、加速度 α 、作用力 F を示す。速度 v の変化量は光波干渉計から得られるビー

ト周波数変化量に比例し、加速度 α は速度 v を時間微分することにより得られる。可動部が力センサーに接触している約 0.045 s (45 ms) の間に、可動部の速度変化に伴い光波干渉計から出力される差周波数が滑らかに変化している。この衝撃（インパルス）の最大値は約 80 N、半値幅は約 17 ms である。ここで述べる力センサーの衝撃応答評価実験における可動部質量は 4.1182 kg である。カウンターは、サンプリング間隔 $\Delta t=400/f$ ($f=2.6$ MHz の時、 $\Delta t=0.15$ ms) で測定し、3.2.2 で述べた時間平均処理は行わない。この条件下における、本法で測定される力の不確かさを評価すると以下のようなになる。

A. 周波数カウンター (R5363) :

サンプリング周期 0.15ms における周波数測定の標準不確かさは、約 100Hz と推定される。これは、力に換算すると、0.85 N (850 mN)に相当する。

A. 空気軸受内で作用する摩擦力: 空気軸受内で作用する摩擦力は、衝突による空気膜破れが発生しないと仮定すると、3.1 節で述べた方法による空気軸受の摩擦特性測定結果に基づき以下のように推定される。

B-1) 動摩擦: 可動部に作用する動摩擦 F_{fd} は、可動部速度 0.30 m/s において、約 20mN と推定される。

B-2) 静的力: 空気軸受内部の空気流れの非対称性に起因する静的力は、最大で緩衝材厚み 3mm 押し込まれると仮定したときで、 $x = 3$ mm において、約 0.5mN と推定される。

以上より、空気軸受内で作用する摩擦力を全く補正しない場合における不確かさは、約 20mN と推定される。これは、前項目の周波数カウンターに起因する不確かさ 100 Hz、850mN と比べ無視できる大きさである。

B. 光波干渉計:

C-1) レーザの周波数: レーザ差周波数の一回の測定中における安定性は 5 Hz よりよいと推定される。これは、力に換算すると、0.04 N に相当する。これは、前項目の周

波数カウンターに起因する不確かさ 100 Hz, 850mN と比べ無視できる大きさである.

C-2) アライメント (光軸合せ) : 光軸合せにおける最大の誤差要因は, 約 1mrad の不確かさを持つレーザビームの傾き角設定である. これは, 力測定に対して 5×10^{-7} の相対不確かさをもたらす. これは, 前項目の周波数カウンターに起因する不確かさ 100 Hz, 850mN と比べ無視できる大きさである.

以上より, サンプリング周期 0.15ms, 可動部質量が 4.1182kg の時の作用力の測定における結合標準不確かさは, 約 0.85N (850mN)と推定される. これは, **Fig.3.19, Fig.3.20, Fig.3.21,** に示される最大値 80 N—90 N の約 1×10^{-2} (1%) に相当する.

本実験では, 可動部質量に対して, 作用力が 80-90 N 程度と比較的大きいため, 測定周波数の時間平均処理なしで, 十分な精度を得ることできている.

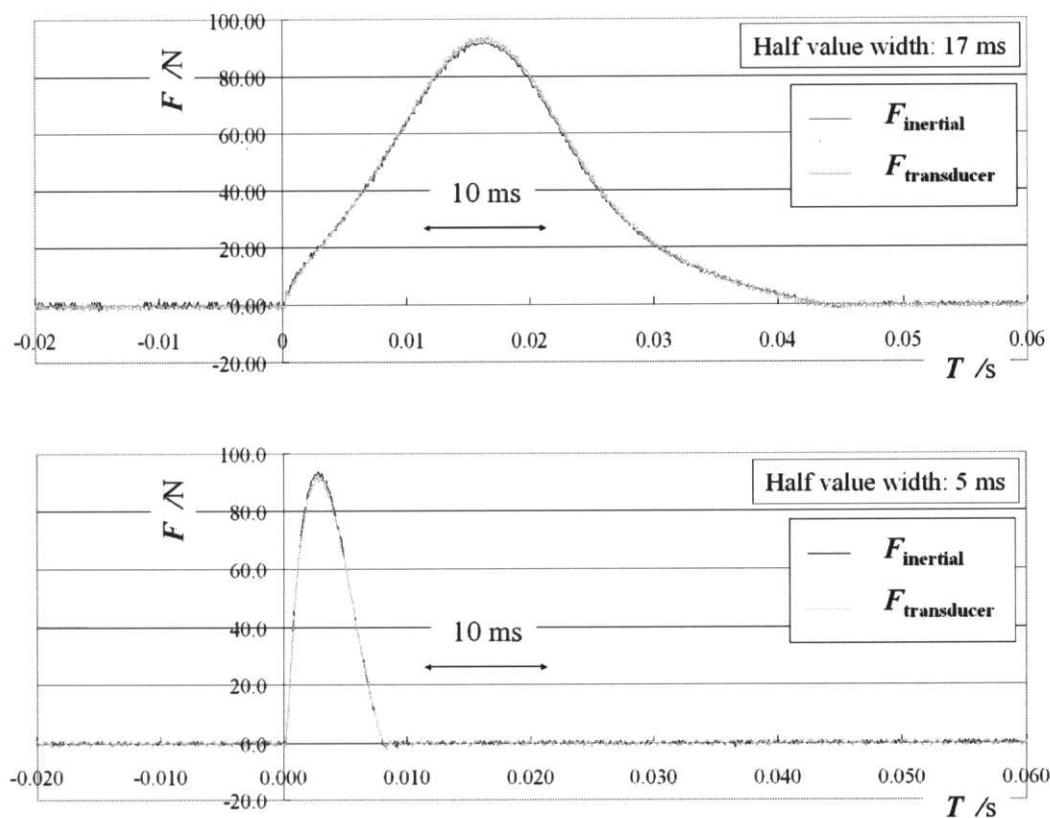


Fig. 3.20 Impulse response of force transducer A

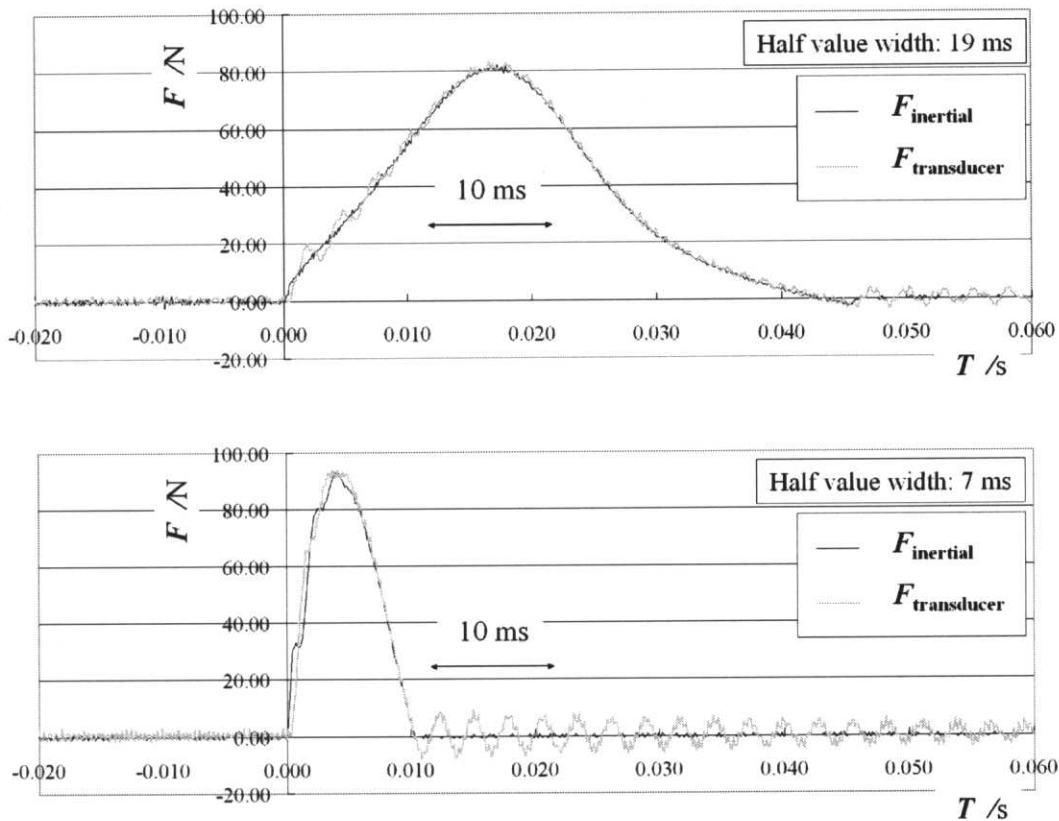


Fig. 3.21 Impulse response of force transducer B

Fig.3.20 に、半値幅 17 ms と、5 ms との 2 つのインパルスに対する Transducer-A の応答の測定結果を示す。図中、 $F_{inertial}$ は、提案する方法で求めた可動部に作用する慣性力、 $F_{transducer}$ は静的校正に基づく力センサーの出力する力の値を示す。両者には、インパルスのピーク付近で 2-3% の差異が見られるが、その他の部分では、提案する方法の不確かさ (1 %) の範囲内で一致している。

Fig.3.21 に、半値幅 19 ms と、7 ms との 2 つのインパルスに対する Transducer-B の応答の測定結果を示す。図中、 $F_{inertial}$ は、提案する方法で求めた可動部に作用する慣性力、 $F_{transducer}$ は静的校正に基づく力センサーの出力する力の値を示す。この場合、Transducer-B の出力 $F_{transducer}$ は、インパルスが負荷されると同時に振動し、インパルスの負荷が終了した後でもインパルスのピーク値に対して 1 割程度の振幅の振動が残っている。特に、半値幅 7 ms の

インパルスの場合に顕著であるが、インパルスの立ち上がり時において、本方法で測定した作用力 F_{inertial} は複雑な挙動を示している。これは、Transducer-B の内部構造に起因する、Transducer-B の応力と変形量の関係の非線形性によるものと考えられる。Transducer-B の出力に生じる振動の大きさから比較すると、Transducer-B が出力するインパルスの形状、ピーク値は、本方法で測定した作用力とよく一致しているとも言える。

ここで示した方法が実用化され、力センサーの動的校正方法の一つ、あるいは、他の動的校正方法に対する相互検証方法の一つとして利用されるようにするために、以下のような課題を克服することが計画されている。

- 1) 静圧空気直動軸受の摩擦特性についてより詳細に調べること。
- 2) 衝撃に対する装置全体の防振対策を行うこと。
- 3) 不確かさ評価をより詳細に行うこと。
- 4) 複数の研究機関で本方法が調査・研究されること。

ここで提案した力センサの動特性評価方法の研究開発を推進することは、力センサの動的校正方法が確立されていない現状においては、有意義であると考えられる。近い将来において本方法が力センサーの動的校正方法、動的応答評価方法の一つとして実用化され、力センサーの信頼性向上を通して、生産工程の高度化、構造設計の高度化に寄与することが期待される。

3.2.4 純アルミ丸棒の3点曲試験

Fig.3.2.1, Fig.3.2.2 で示した衝撃力発生器を用いて、純度 99.7%のアルミ丸棒に対する3点曲げ試験を系統的に行った。3点曲げに用いた金型を含め、3点曲試験に用いた道具立ては前述のものと同一のものを用いた。

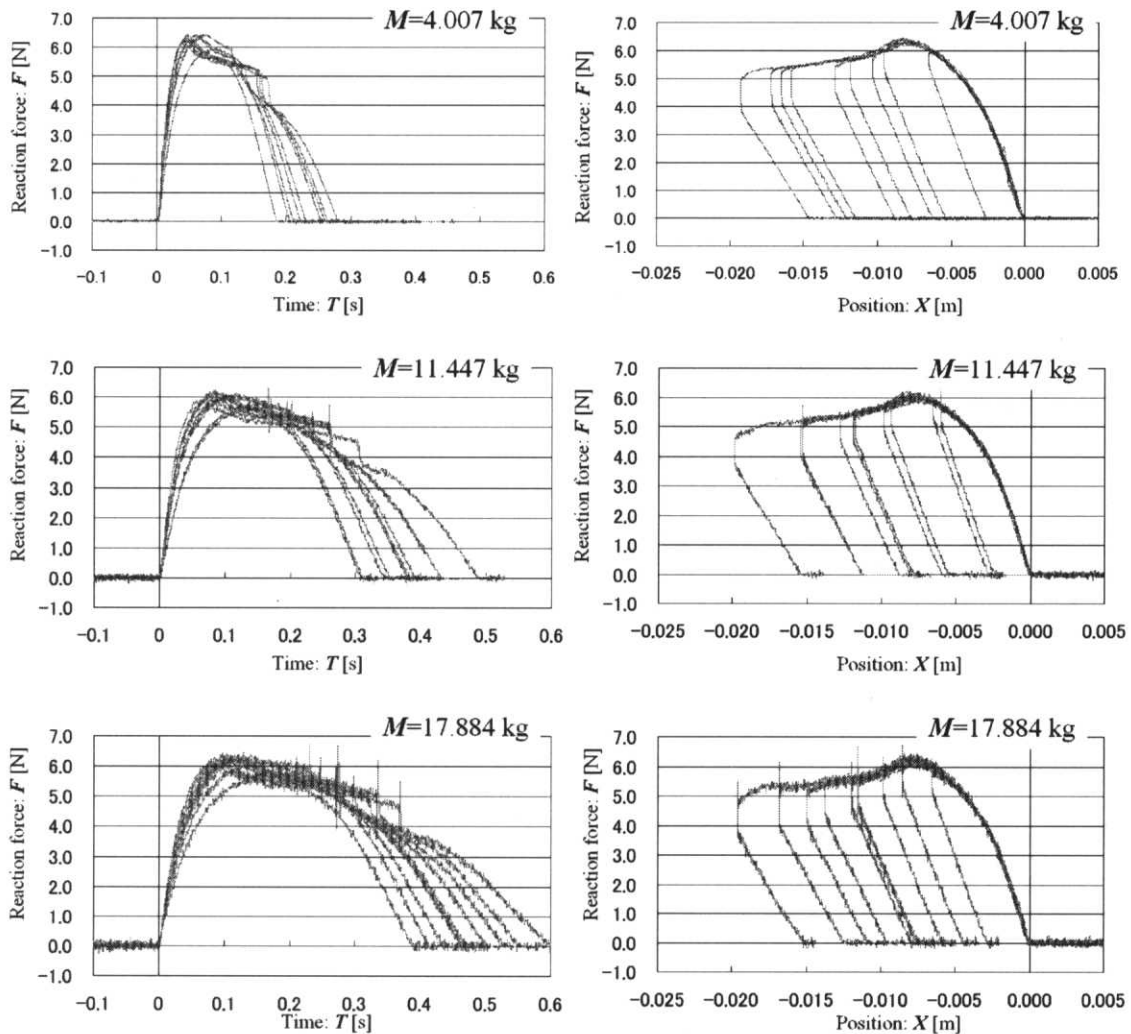


Fig.3.22 Change in reaction force with time and with position
($\phi=1.5$ mm, $M=4.007$ kg, 11.447 kg, and 17.884 kg)

直径を3水準($\phi=1.5$ mm, 2mm, 3mm), 可動部質量を3水準($M=4.007$ kg, 11.447 kg, 17.884 kg) 変化させ, 各条件において10回程度の衝突実験を実施した。可動部の初速は実験者の手

により与えられるが、各条件内の10回程度の衝突実験において、この初速がなるべく様様な値をとるように努めた。

Fig.3.22 に直径 $\phi = 1.5 \text{ mm}$ における実験の結果をまとめて示す。可動部質量は $M=4.007 \text{ kg}$, 11.447 kg , 17.884 kg と3水準用意し、各質量に対して約10回の衝突実験を行った。各条件について、可動部の慣性力として測定された作用力 $F \text{ [N]}$ を、時間 $T \text{ [s]}$ 、および、可動部位置（押し込み深さ） $X \text{ [m]}$ に対してプロットした図を示した。図より、以下のことが読み取れる。

- 1) 可動部質量が大きいほど、同じ押し込み深さを得るのに要する衝突時間が長くなる。
これは定性的には、可動部質量が大きいほど、小さな速度で大きな運動エネルギーが得られるということで説明できる。
- 2) 可動部質量が大きい場合ほど、ノイズが大きくなっている。これは、可動部質量が大きいほど同じ押し込み深さを得るのに必要な可動部の初速が小さくなり、ドップラーシフト周波数測定における誤差が相対的に大きくなることが原因と考えられる。
- 3) 実験の範囲内では、作用力 F は、押し込み位置 X のみの関数として表せる。このように全ての実験結果が一つの形式になることは、本計測法の再現性・妥当性を示唆するものでもある。
- 4) 3) より、試験体（純度 99.7%のアルミ丸棒）には歪速度依存性はない。
- 5) 最深部における「作用力の落込み」は、「塑性変形中の応力のうち、塑性変形に要する成分」によるものと考えられる。

項目5) について、当初は、金型と材料との間の「ガタ」「摩擦条件」が原因である可能性も考えられた。しかしながら、押し込み切ったところのこの「作用力の落込み」においても、作用力の変化は数割程度残り、ゼロではない。すなわち、試験体は可動部に対して作用力を与えており、試験体と可動部は接触状態を保っている。したがって、非接触となるような「ガタ」が生じるとは考えられない。「摩擦条件の変化」については、試験体と両サ

イドの2つの金型との相対的な滑り方向が、この最深部を境に逆転することになる。しかし、これによって、摩擦条件が劇的に変化するとは考えにくい。

そこで、この「最深部における作用力の落込み」の原因を調べるために、以下のことを計画している。

- ・ 弾塑性有限要素法解析により、実験結果から推定される摩擦条件、応力と歪、歪速度との間の関係式を求める。これがうまくいけば、本方法により、弾塑性変形における応力-歪-歪速度関係式を求める方法が開発されることにもなる。
- ・ 様々な試験体(材質、形状)、いくつかの金型(ダイの刃先角: 3水準(30°, 60°, 90°)、先端部曲率: 2水準)について、試験を行う。
- ・ 静的な条件で、力センサーで作用力を測定する実験を行う。これには、オートグラフに代表される力センサを組み込んだ標準的な材料の引張・圧縮試験機を利用する予定である。
- ・ 可動部の姿勢をモニターし、空気膜破れに代表される異常が、最深部において生じていないことを確認する。ここは、静圧空気直動軸受の摩擦特性評価法に関する今後の研究成果が期待されるところである。

Fig.3.23 に直径 $\phi = 2 \text{ mm}$ における実験の結果をまとめて示す。可動部質量は $M = 11.447 \text{ kg}$, 17.884 kg と2水準用意し、各質量に対して約10回の衝突実験を行った。各条件について、可動部の慣性力として測定された作用力 $F [\text{N}]$ を、時間 $T [\text{s}]$ 、および、可動部位置(押し込み深さ) $X [\text{m}]$ に対してプロットした図を示した。実験の範囲内では作用力 F は、押し込み位置 X のみの関数として表せ、直径 $\phi = 1.5 \text{ mm}$ における実験と比較し定性的には同様な結果となっている。直径が大きくなった関係で、作用力が大きくなると共に、押し込み深さにおける弾性限界が小さくなっている。同じ可動部質量で、同じ押し込み深さを得るために必要な可動部初速が大きくなるため、直径 $\phi = 1.5 \text{ mm}$ における実験と比較し試験時間が短くなっている。

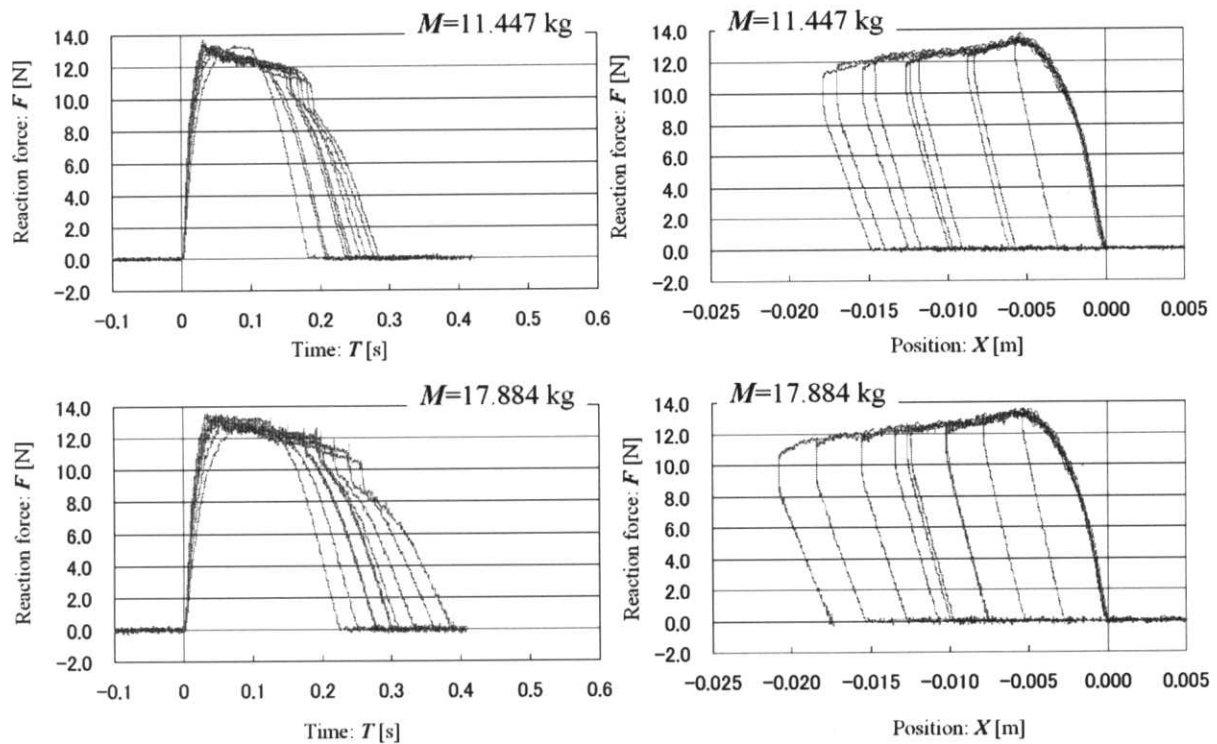


Fig.3.23 Change in reaction force with time and with position
 ($\phi=2.0$ mm, $M= 11.447$ kg, and 17.884 kg)

Fig.3.24 に直径 $\phi = 3$ mm における実験の結果をまとめて示す. 可動部質量は $M= 11.447$ kg, 17.884 kg と 2 水準用意し, 各質量に対して約 10 回の衝突実験を行った. 各条件について, 可動部の慣性力として測定された作用力 F [N] を, 時間 T [s], および, 可動部位置 (押し込み深さ) X [m] に対してプロットした図を示した. 実験の範囲内では作用力 F は, 押し込み位置 X のみの関数として表せ, 直径 $\phi = 1.5$ mm, 2 mm における実験と比較し定性的には同様な結果となっている. 直径が大きくなった関係で, 作用力が大きくなると共に, 押し込み深さにおける弾性限界が小さくなっている. この条件では, 塑性変形進行中において, 作用力に脈動が見られる. この原因として, 作用力が大きいために, 装置全体が設置された定盤, および, 光波干渉計構成部品が振動することが考えられる. この場合, この作用力の脈動は, 現実のものではなく, 速度測定の誤差ということになる. しかしながら, 可動

部が試験体から離れた後には、あまりこの脈動が残っていない。このことから、この脈動は現実に発生している可能性も捨てられない。作用力の脈動の原因として、試験体であるアルミ棒が塑性変形進行中に弾性振動をするということが考えられる。

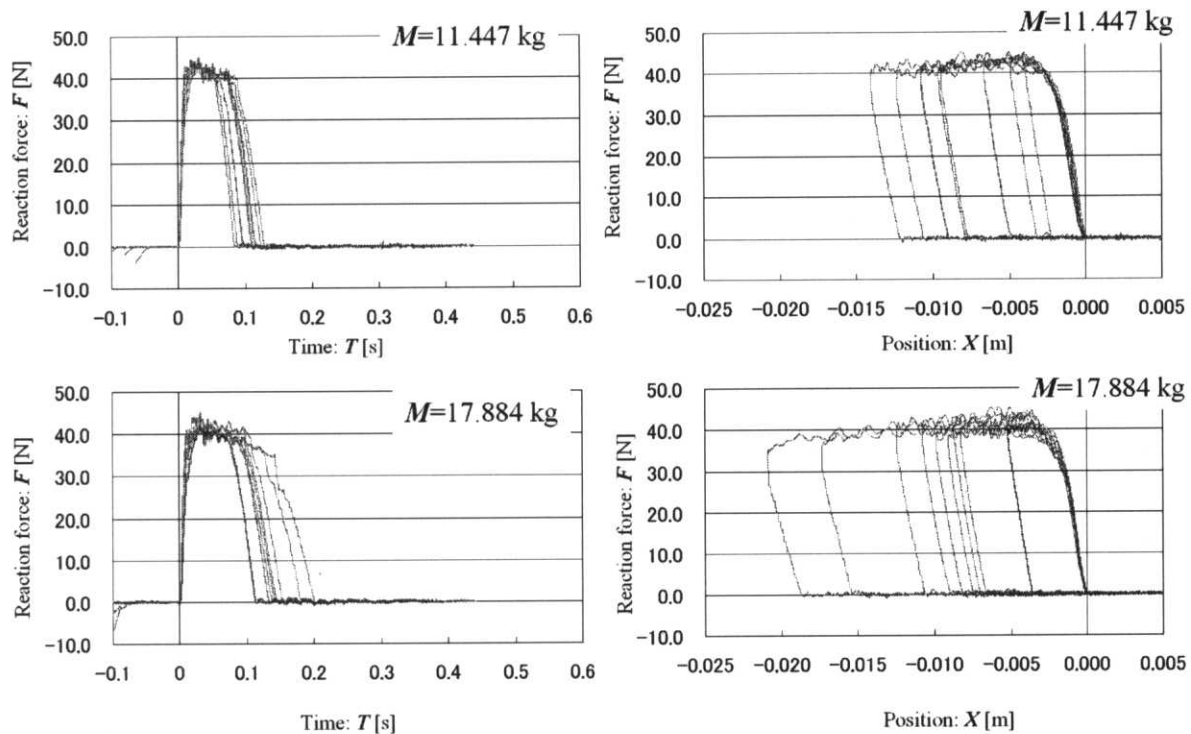


Fig.3.24 Change in reaction force with time and with position
($\phi=3.0$ mm, $M= 11.447$ kg, and 17.884 kg)

ここで提案した3点曲試験法が、実用化されるに当たっては、以下のような課題を解決する必要がある。

- ・ 静圧空気直動軸受の衝突時を含めた摩擦特性の評価をより詳細に行う。
- ・ 不確かさ評価をより詳細に行う。
- ・ 金型と試験体との摩擦の表面状態による依存性の評価を行う。

ここで提案した3点曲試験法は、動的校正方法が確立されていない力センサを用いるこ

となく、衝撃変形時における作用力を高精度に測定できるという決定的長所を有しており、材料が弾塑性変形する際の応力と歪速度の関係を調べるのに好適である。

この試験法を、自動車などの非対称構造物の破壊試験における作用力の測定方法として用いる場合に当たっては、衝突点に作用するであろう可動部運動方向以外の力の成分（2自由度）、および、モーメント（3自由度）に対して、注意を払う必要がある。これらによる、可動部の姿勢の変化、空気膜破れの発生に対して、これの検知と、発生しない条件の探索が重要である。

3.2.5 まとめ

物体に作用する水平面方向の慣性力を利用した、衝撃力の発生・計測方法を提案した。ここでは、地上において重力の影響を受けずに、摩擦などの外力の影響を小さく抑制するために、物体の支持に静圧空気直動軸受を用いた。本方法により、衝突力を発生させ、その瞬時値を、予め測定した可動部質量（慣性質量）と、光波干渉計により測定される可動部の加速度との積（慣性力）として直接計測することが可能になった。

力センサを内蔵した計装化シャルピー試験機などの使用において、用いられる力センサの動特性評価法が確立されていない現状では、計測されたデータの不確かさ評価は困難であった。自動車などの人工構造物の安全性・信頼性確保に不可欠な衝突破壊試験においても、そこで発生する力をいかに正確に測定するかが課題になっていた。以上のように、変動する力の発生・計測・校正方法は、実際の使用形態からは強く望まれるものであるが、未だ発展途上にある。基本的な力学量の一つである力の発生・測定の分野への貢献は、生産工程の最適化、構造設計の最適化などに直接的に結びつき、資源・環境問題にも大きな貢献ともなることが期待できる。また、ここで提案・開発した変動する力の発生・計測手法により、信頼性が高く高機能な力学量計測データを提供することは、新しい現象の発見、画期的な新機能の発明を促す起爆剤になることが期待できる。

物体を空気圧浮上させ外力を極力排除した状態を作ることにより、物体に作用する慣性力として変動する力を発生・計測する方法を提案・開発した。さらに、この方法を応用した、力センサーの衝撃荷重応答の評価方法、動的3点曲試験方法の提案を行い、その有効性・将来性を示した。

3.2 で得られた結果をまとめると、以下のようになる。

- (1) 物体を非接触浮上支持する手段として静圧空気直動軸受を用いた、変動する力の発生・計測方法を提案し、その有効性を実験的に確かめた。
- (2) 本方法を純アルミ棒の動的3点曲げ実験に適用した結果、サンプリング周期

0.15ms, 平均時間 3ms, 可動部質量が 17.884kg での力の測定における結合標準不確かさは, 約 0.066N (66mN)と推定された. これは, 実験における作用力の最大値 13 N の約 0.5×10^{-2} (0.5 %) に相当する.

- (3) ここで提案した変動する力の発生・計測方法が, カセンサーの衝撃応答測定, 動的校正方法として極めて有効であることを示した. まず, 運動量=力積の関係を用いて, 衝突の前後における可動部運動量の総量と, カセンサー出力の時間積分を高精度に比較することにより, 衝撃応答評価を行う方法の提案を行った. 次に, 時間積分値ではなく作用力の瞬時値を比較する方法を示した. 本方法によりカセンサーに作用する作用力の真値を, 半値幅が約 5 ms – 19 ms のインパルスに対して, サンプリング間隔約 0.15 ms, 不確かさ約 1 %で測定できることを示した.
- (4) 半値幅が約 5 ms – 19 ms のインパルスに対する衝撃応答評価実験においては, 測定的时间分解能が約 0.15 ms の時, 得られた作用力の標準不確かさは 1 %であった. 他にカセンサーの衝撃応答評価法が存在しない現状においては, 本方法は現時点において既に実用上極めて有用なレベルに達している.
- (5) ここで提案した変動する力の発生・計測方法により, 動的 3 点曲げ試験を行った. アルミ丸棒 (純度 99.7%) の直径を 3 水準, 可動部質量を 2 水準または 3 水準とった各条件で, 可動部の初速を変えた試験を各 10 回程度行った. 高い再現性が得られることを実験的に示し, 本方法が材料試験としても有望であることを示した.
- (6) 基本的な力学量の一つである力の発生・測定の分野への貢献は, 生産工程の最適化, 構造設計の最適化などに直接的に結びつき, 資源・環境問題にも大きな貢献ともなることが期待できる.
- (7) ここで考案・開発した変動する力の発生・計測手法により, 信頼性が高く高機能な力学量計測データを提供することは, 新しい現象の発見, 画期的な新機能の発明を促す起爆剤になることが期待できる.

- (8) 半値幅 5ms 程度のインパルスに対して、衝撃力作用後の振動も見られない。従って、可動部の剛体とする仮定はこの範囲において適当である。

ここで示した変動する力の発生・計測方法は、予備的な実験装置を用いて、インパルスの半値幅が 5 ms 程度の衝撃応答に対して相対標準不確かさ約 1 % を実現しており、既に十分に実用的なレベルに達している。ここで提案・開発した方法を、力センサーの動的校正、衝突破壊試験、動的材料試験における標準的な方法として広く実用化していくためには、以下に示す技術課題の克服が望まれる。

- (1) 静圧空気直動軸受の摩擦特性についてより詳細に調べること。

特に、衝突時における可動部の姿勢変動、ガイド部との接触、それに伴う摩擦の発生には十分に注意する必要がある。

- (2) 衝撃に対する装置全体の防振対策を行うこと。

光波干渉計の振動防止は特に重要である。このため、装置全体のベースをしっかりとしたものとする事と共に、光波干渉計の支持基盤に除振機構を付加することも検討されている。

- (3) 不確かさ評価をより詳細に行うこと。

個々の事例に則した詳細な不確かさ評価が望まれる。本方法は、力センサーの動的校正、衝突破壊試験、動的材料試験など、極めて広範な分野における重大な貢献が期待でき、そのいずれか一つをとっても、産業界、社会に対して大きな波及効果を持つものである。

- (4) 複数の研究機関で本方法が調査・研究されること。

本方法が広く実用化され、生産工程の高度化、構造設計の高度化に寄与できるようにするためには、多くの研究機関、企業により、設計手法、生産手法との調和が図られていく必要がある。

- (5) 衝突破壊試験の高度化。

自動車メーカー，重工メーカーなど産業界と連携して，設計手法と一体のものとしての高度化を図り，省資源化・省エネルギー化を支援する。

(6) カセンサの動特性評価法の高度化。

各国標準研究所の力標準部門，カセンサーメーカーなどと連携を図り，カセンサーの動的応答評価法の確立を支援する。

(7) 動的材料試験法（動的3点曲試験法）の開発。

ここで考案・開発した変動する力の発生・計測手法により，信頼性が高く高機能な力学量計測データを提供することは，新しい現象の発見，画期的な新機能の発明を促す起爆剤になることが期待できる。例えば，提案者らによりすでに観測されている純アルミ丸棒の動的3点曲試験データから，材料の応力-歪-歪速度の関係を表す方程式としてこれまで提案されているものでは十分に説明できない現象が観測されている。剛塑性 FEM 解析を援用して，高精度な構成方程式 (constitutive equation) の提出を行うことを計画している。

(8) 省エネルギー，省資源化の促進

本方法は，変動する力の測定の高精度化，高信頼性化を全般的に保証しようというものである。基本的な力学量の一つである力の発生・測定分野への貢献は，生産工程の最適化，構造設計の最適化などに直接的に結びつく。これは，資源・環境問題にも大きな貢献ともなることが期待できる。計測（試験）＝設計＝生産＝使用（利用）＝リサイクルを一体のものとして捉え最適化するアルゴリズムの考案・実施が重要になってくると考える。

これまでに不可能であった変動する力の測定に対する不確かさ評価を可能とすることにより，最も基本的な力学量である力の測定の高精度化，高精度化への道が開かれる。本方法は，実験室で予備的に製作した実験装置でさえ既に十分に実用的に役立つレベルに達している。これに関しては，この分野がこれまで未開拓であったことと，提案した方法の素性

がよいことの2つが原因として挙げられる。

本方法の適用例として、動的材料試験、力センサーの動的校正、衝突破壊試験などを挙げたが、この他にも、微小な音圧の測定、音圧の標準などへの応用の可能性も指摘されている。この場合は、静圧空気軸受、あるいは、磁気軸受などで支持された微小な慣性質量に作用する慣性力を利用することが有効と考えられる。このように本方法は、極めて広範な分野における重大な貢献が期待でき、そのいずれか一つをとっても、産業界、社会に対して大きな波及効果を持つものである。これまで正確な評価が出来なかった力の測定を高精度化、高信頼性かすることは、生産工程や構造設計における高度化、最適化などに直接的に結びつくと考えられる。これは、資源・環境問題にも大きな貢献ともなることが期待できる。この場合、計測（試験）＝設計＝生産＝使用（利用）＝リサイクルを一体のものとして捉え、出発点である「計測」が高信頼性化、高度化することのメリットを、系全体のメリットとして有効活用するアルゴリズムの考案・実施が重要になってくると考える。このように、本方法は、力の計測の高度化を通して、地球環境保全にまで大きな貢献を行うことができる可能性を秘めた、極めて将来性の高いものであると考えおり、今後の発展が楽しみである。

3.3 変動するトルクの発生・計測法

トルクは力と並ぶ基本的な力学量の一つであり産業界で広く利用されている。現状ではトルクセンサの校正方法としては静的な方法だけが存在する。そこでトルクセンサの動特性評価方法として、物体を浮上させることを利用した変動するトルクの発生・計測方法を提案する。この方法では、変動トルクが、摩擦クラッチを介して回転するフライホイールより与えられる。フライホイールの角運動量変化と、摩擦クラッチを介してトルクセンサに伝えられる角運動量の差を十分に小さくするために、フライホイールを摩擦の小さな静圧空気軸受で支持する。フライホイールの角速度はロータリーエンコーダで計測する。トルクセンサに与えられる角運動量計測における相対標準不確かさは 0.1% (10^{-3}) より小さいと推定される。

本節ではまず、変動するトルクの発生・計測法が確立していない現状と、その開発の必要性について述べる。次に、物体（フライホイール）を静圧空気回転軸受により浮上支持することにより、摩擦損失を十分に小さく抑えた状態を作り、その持つ角運動量を高精度に取り出すことを特長とする、変動するトルクの発生・計測方法を提案する⁶⁸⁾。

3.3.1 はじめに

トルクセンサは、生産機械、船舶、自動車、電気機器などに使われるモータやエンジンのトルクを測定する目的で広く用いられている。一般的に広く利用されるトルクセンサ (Torque sensor, Torque transducer) が測定対象とするトルクは、変動トルクであることが多い。場合によっては、衝撃を伴う変動トルクの測定に用いられることもある。しかしながら、校正方法が確立されているのは静的な場合で、かつ、軸回転のない場合に関してのみである。こうした現状を踏まえ、変動するトルクを高精度に発生・計測する方法は強く望まれる。

一般に、標準を実現するに当たっては、基本原理をできるだけ直接に実現することを通して、系統誤差要因の入り込む余地を少なくする努力が必要と考える。本章で取り上げている、変動する力の発生・計測方法における作用力の測定法において、力は参照質量の運動量変化として測定される。着目する系における運動量保存を成立させるために、摩擦の小さな直動静圧空気軸受が用いられている。この考え方を角運動量に対して適用することにより、変動するトルクの発生・計測法が実現することが期待できる。

3.3.2 変動トルク発生器の提案

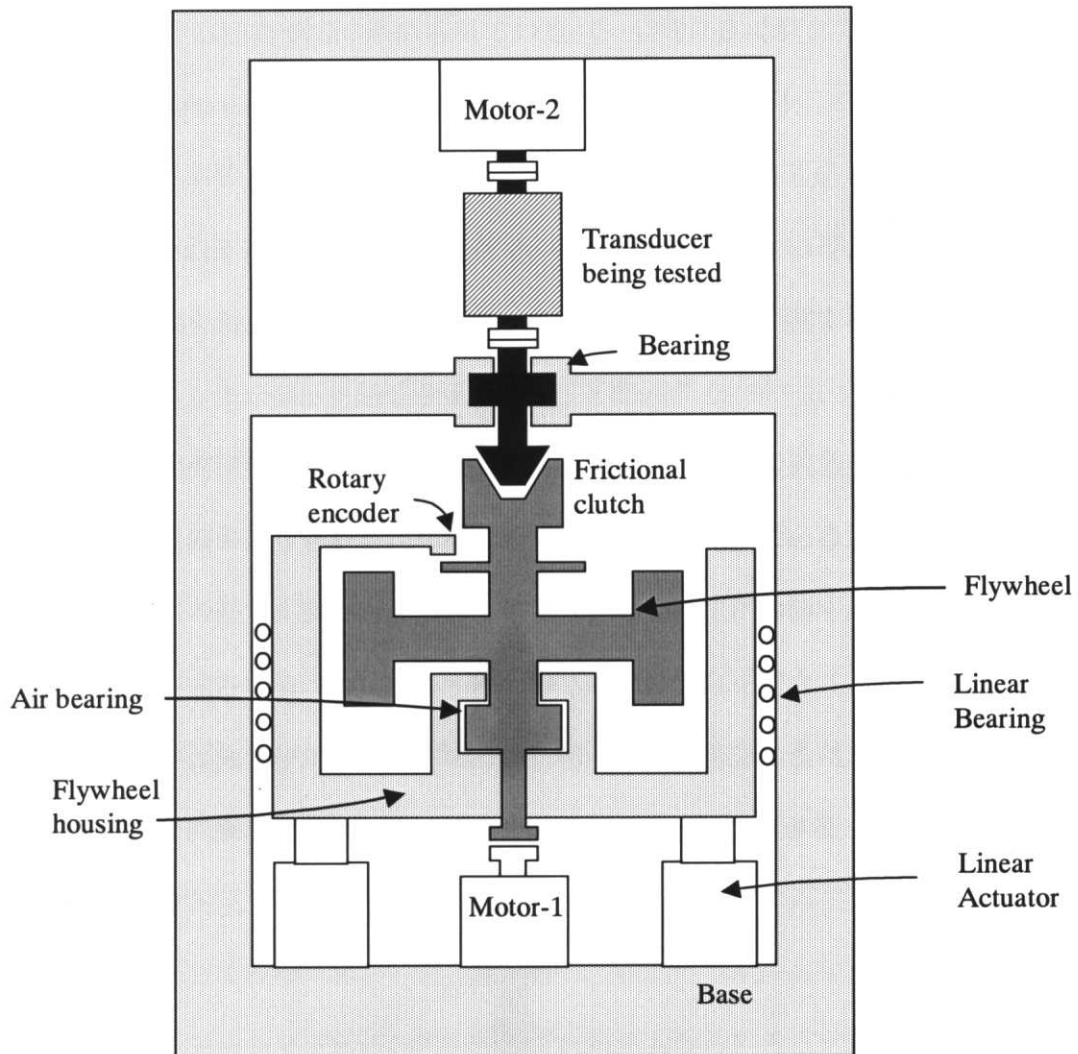


Fig3.25 Schematic of the dynamic torque generator

Fig. 3.25 に、提案する方法に基づく、変動するトルクの発生・計測を行うための変動トルク発生器の模式図を示す。この発生器は、角運動量源としてのフライホイール、静圧空気軸受、変動トルクをトルクセンサに送るために摩擦クラッチ、フライホイールの角速度を計測するためのロータリエンコーダより構成される。クラッチを介してフライホイールと

断続可能な motor-1 は、フライホイールに初期角運動量を与える目的で設置されている。校正されるべきトルクセンサの軸は、摩擦クラッチの上部クラッチ板に結合される。また、motor-2 はトルクセンサの軸に所望の回転（角速度）を与える目的で設置される。

フライホイールが十分に小さな摩擦で支持され、軸が適正にアライメントされている場合、次式が成り立つ。

$$T + I \alpha = 0, \quad (3.14)$$

ここで、 T は被校正トルクセンサに作用するトルク、 I は摩擦クラッチの下部や、静圧空気軸受の内側シリンダーなど直接接合された全ての部品を含むフライホイールの慣性モーメント、 α はフライホイールに作用する角加速度である。なお、この条件下で、力学的エネルギーのある部分は熱として摩擦クラッチ内で散逸する。

また、積分形で表すと次式のようになる。

$$\int T dt + (I \omega_2 - I \omega_1) = 0 \quad (3.15)$$

ここで、 ω_1 と ω_2 は、それぞれ、摩擦クラッチを動作させる前と後におけるフライホイールの角速度を表す。計測の精度の観点からは、微分形の(3.14)式を用いるよりも、積分形の(3.15)式を用いる方が、有利である。(3.15)式では、変動するトルクに対する、本方法で測定された波形と、センサ出力波形について波形形状の比較をすることはできないが、角運動量の総量比較を行うことによりセンサの応答性を全体として高精度に評価することが可能である。

実施例として、発生トルク 100 Nm 程度の変動トルク発生器の基本仕様を以下に示す。

半径方向、軸方向の負荷容量がともに 350N、空気膜厚が約 10 μ m、中心軸の回転ぶれが 0.1 μ m 以下、という仕様の静圧空気軸受(Model: Air Bearing UBS100, 三鷹精工(株)製)を用いる。フライホイールとして、半径 0.5m、質量 30kg、慣性モーメント 5 kgm²、のものを用いると、角速度 940 rad/s において、4700 Nms の角運動量を蓄積できる。これにより、100 Nm のトルクを 47 秒間発生させることができる。

本方法における誤差要因の一つとして、静圧空気軸受内の摩擦が考えられる。厚み $10\mu\text{m}$ の空気膜内の流れをクエット流れと仮定すると、角速度 940 rad/s において発生する摩擦トルクは 0.02 Nm と計算される。これは、公称出力トルク 100 Nm の 0.02% に相当する。

フライホイールを保持するハウジング全体を、直動軸受でガイドされたリニアアクチュエータで押し上げることにより、摩擦クラッチの接合状態を制御する。この直動軸受は、摩擦クラッチの上部軸、および、下部軸とともに、アライメントされる。

角速度はロータリエンコーダシステムにより計測される。ここでの主要誤差要因としては、目盛線検出信号のばらつき $10\ \mu\text{rad}$ である。たとえば、角速度 940 rad/s を測定時間 1 ms で測定した場合の、この目盛線信号のばらつきによる角速度測定値の相対標準不確かさは 8.0×10^{-5} となる。

精密機械加工されたフライホイールの慣性モーメントを、設計仕様に基づいて推定した場合の不確かさは、 10^{-4} よりも小さくできると考えられる。

以上より、ここで提案した方法により、トルクセンサに作用する変動トルクを推定する上での相対標準不確かさは $0.1\%(10^{-3})$ より小さいと推定される。

変動トルク発生器の発生トルクは(3.14)式により、直接計算できる。しかしながら、フライホイールとトルクセンサの間の部材で発生する慣性トルク（＝慣性モーメントと、角加速度のフライホイールのそれとの差、との積）に対して、注意を払う必要がある。

フライホイールの外周の周速をレーザドップラー速度計で測定することは、サンプリング周期の短い測定を実現する上で有効である。

摩擦クラッチの押し付け圧力を調節することにより、発生するトルクを一定の目標値に保持すること、あるいは、予め与えられた時系列に沿うように制御することが、可能である。また、トルクセンサの軸に所望の回転を与えるための motor-2 に第2のフライホイールを接続することにより、第1のフライホイールから与えられる変動トルクが軸回転に与える影響を低減することができる。もしも、軸回転が不要であれば、motor-2 は省略できる。

空転した状態におけるフライホイールの角加速度を測定することにより、静圧空気軸受の摩擦トルクを測定でき、また、これを補正することもできる。しかしながら、摩擦クラッチにおいて軸の回転方向以外のトルクや軸方向以外の力が発生した場合、静圧空気軸受内の空気膜が破れて、機械的接触が発生する可能性がある。特に、クラッチの上部軸と下部軸の芯合せを厳密に行うことは、摩擦クラッチを滑らかに動作させる上で重要である。

摩擦クラッチは発生トルクの大きさや急峻さの任意設定性において有利であるが、発熱という問題点もある。一方、摩擦クラッチの代わりに発電機／電動機を用いれば、クラッチで吸収する運動エネルギーを電気エネルギーとして離れた場所へ移送できる。また、発生トルクの緩やかな微調整や、単一周波数で振動させること、などにも有効と考えられる。

3.3.3 まとめ

これまで不可能であったトルクセンサの変動トルクに対する校正法を提供することを目的として、変動トルクの発生・計測法の提案を行った。この方法では、フライホイールに蓄えられた角運動量が、摩擦クラッチを介して被校正センサーに与えられる。フライホイールの角運動量の時間微分と、摩擦クラッチを介してトルクセンサに伝えられるトルクの絶対値の差が十分に小さくなるように、フライホイールを摩擦の小さな静圧空気軸受で非接触浮上支持することを特長とする。

変動トルク発生・計測器の理論検討を行い、100 Nm程度のトルクを50秒間程度連続発生することを可能とする基本仕様を示した。この変動トルク発生・計測器によりトルクセンサに与えられるトルク（フライホイールの角運動量の時間微分）は、0.1% (10^{-3})より小さい相対標準不確かさで知ることができる。

本提案の実用化を行うことにより、これまで静的な方法でのみ校正されてきたトルクセンサを、変動するトルクに対して校正することが可能となる。実際の装置作りにおいては、種々の困難の発生も予想されるが、本法の骨子はトルク計測、トルク標準の分野に大きな貢献をなすことが期待できる。

現在、世界中を見ても、トルクセンサの変動するトルクに対する動的な校正を行っている機関は存在しないが、著者が2000年11月に訪問した際に聞いたところでは、ドイツの物理工学研究所（PTB）では、著者が提案したものと類似の方法でトルクセンサの動的校正方法の開発を試みることを検討しているとのことであった。産業界において極めて重要な物理量であるトルクの測定が、3.2で述べた力の測定と合わせて、高信頼性化され、産業界、社会、地球環境に大きな貢献となることを期待する。

3.4 マイクロ重力環境下で動作する質量測定器の開発

3.4.1 はじめに

無重力環境下においては、物体を空間内に周りとは非接触に浮遊させることができる。重力加速度という時間的にも空間的にもほぼ一定とみなせる大きな加速度が作用する地上においては、物体を小さな摩擦で非接触浮上させるのに、静圧空気軸受を用いた。しかしながら、静圧空気軸受にも摩擦は存在し、その評価に最大の困難が予想された。一方、無重力環境下で外力を受けずに浮遊する物体は、運動量一定、角運動量一定の状態を保ち続ける。うまく工夫すれば静圧空気軸受など摩擦を発生する機構を一切用いずに、その運動量、角運動量を力、トルクとして高精度に変換、発生、計測できることが期待できる。

建設中の国際宇宙ステーション (ISS: International Space Station) は、重力と遠心力の釣合点に置かれるが、実際には $10^{-6}g$ 程度の加速度場が存在すると予想されることから、そこでの環境は一般に「マイクロ重力環境(Microgravity conditions)」と呼ばれている。

こうした非常に小さな加速度場という環境はうまく工夫すれば、物体を浮上させ、その物体の持つ運動量を十分に小さな摩擦で力に変換・計測する上で、理想的な環境とすることができると考えられる。

本研究では、まず、その開発が急務となるであろう質量測定方法について、マイクロ重力環境の利点を最大限引出すことを目指した方法を提案する。ここでは、マイクロ重力環境を、地上において物体を非接触浮上させることで得られたメリットを、より純粋な形で実現できる可能性のある環境として捉える。

本節では、まず、運動量保存則を用いたマイクロ重力環境下における質量測定方法の提案を行う。次に、提案した方法の有効性・妥当性の検証する目的で行った2種類の地上実験について述べる^{69), 70), 71)}。

3.4.2 提案する方法

質量を測定したい物と参照分銅とからなる系の運動量保存を、より純粋な形で利用する目的で、その系が外部に対して非接触浮遊した状態とすることを特徴とする、マイクロ重力環境下における質量測定方法を提案する。マイクロ重力環境においては、2つの物体から成る系を外部に対して非接触浮遊した状態とすること自体は容易であると考えられるが、2つの物体の重心速度を十分に小さな不確かさで測定するためには、特に、重心と測定点の相対位置の変化に対して注意を払う必要がある。物体に取り付けたコーナーキューブプリズム (CC: Cube Coener Prism) の光学的頂点の速度を光波干渉計により測定する場合、測定点としてはこの光学的頂点となる。物体の重心速度を光波干渉計で測定する場合における、注意すべきポイントを列挙する。

1. 物体の姿勢の変化によるもの：

一般に重心と測定点は一致していないので、物体の姿勢変化により重心と測定点の相対位置の変化が生じる。

2. 物体が剛体ではない場合：

弾性体、液体、粉体などの場合、それらが入った容器 (キャリア, carrier) 全体の質量を測定することになるが、ここでも容器全体の重心の速度が要求される。容器内で物体の密度分布が変動すると、重心と容器に固定された測定点の相対位置の変化が生じる。

原理的には、分離した状態にあるキャリアと参照分銅とを衝突させるなどして、互いに力を及ぼし合わせ、力の作用の前後における2つの物体の速度を測定することによって、キャリアの質量を求めることができる。しかしながら、衝突などにおいて2つの物体に作用する力としては、互いの相対速度方向に垂直な成分 (2自由度) もある。さらに、モーメント (3自由度) の発生も考えられる。これらは、2つの物体に大きな姿勢変化を生じさせる恐れがある。

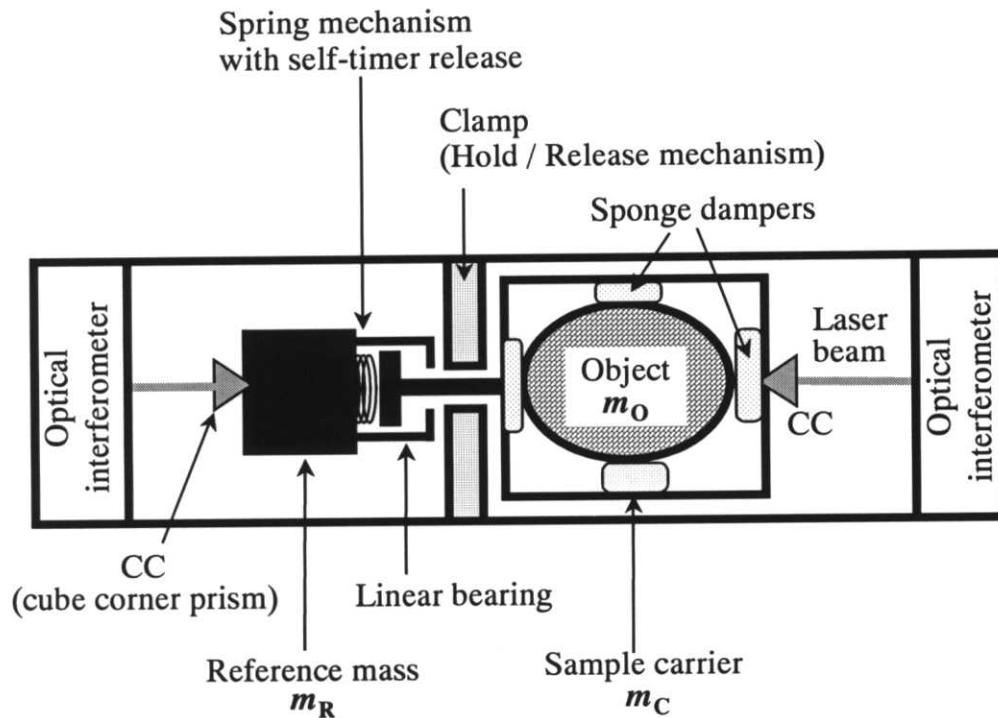


Fig.3.26 Proposed balance for measuring mass under microgravity conditions.

主に、測定期間中における物体の姿勢の変化を最小限に抑えることを目的として、被測定物を保持するキャリアと参照分銅を直動軸受で連結することを特徴とする、質量測定器を提案する。Fig. 3.26 に、提案する質量測定器の模式図を示す。測定したい物体を保持するキャリアと参照分銅は、通常の直動軸受で連結されている。直動軸受には、両者に対して反発する方向の力を生じさせるセルフタイマー付きのバネ機構が組み込まれている。キャリアと参照分銅の速度は、それぞれに取り付けられたコーナーキューブプリズムの光学的頂点の速度として、光波干渉計により測定される。クランプ機構は、測定器に固定したキャリアと参照分銅から成る系全体を、空間中に力を加えることなくゆっくりと放す目的で用いられる。

本測定器を用いた測定手順は、以下のようなになる。

1. クランプが外されると、キャリアと参照分銅は運動量および角運動量を保存し続け、静止する。
2. バネ機構がセルフタイマーで作動し始め、両者が離れ始める。このとき、両者に作用する力はバネの慣性質量を無視すれば、同じ大きさで逆向きとなる。この間も、参照分銅とキャリアを含めた浮遊系全体の運動量、角運動量は初期値を保ち続ける。
3. 直動軸受の摩擦力が一定か、十分に小さいならば、ダンパーで支持された被測定物とキャリアとの間の弾性振動は速やかに減衰し、一体となって動く。このとき、質量を m 、加速度を α 、速度変化を δv 、摩擦力を F_F として、

$$(m_C + m_O) \alpha_C = -m_R \alpha_R = F_F, \quad (3.16)$$

$$(m_C + m_O) \delta v_C = -m_R \delta v_R, \quad (3.17)$$

ここで、添字 **C**, **O**, **R** は、それぞれ、キャリア (Carrier)、被測定物 (Object)、参照分銅 (Reference mass) を表す。

被測定物の質量 m_O は、 m_R と m_C を予め校正しておくことにより、次式により求まる。

$$m_O = -(\alpha_R / \alpha_C) m_R - m_C, \quad (3.18)$$

$$m_O = -(\delta v_R / \delta v_C) m_R - m_C. \quad (3.19)$$

直動軸受を使わない場合には、参照分銅、キャリアの姿勢変化と、それらの重心と測定点 (コーナーキューブの光学的頂点) の位置関係に対して特に注意が必要となる。この場合でも、速度測定は一軸で十分である。

被測定物が弾性体、粉体、液体など、剛体でない場合には、キャリアの速度をその振動中心として測定すればよい。すなわち、外力の作用しない物体において、その密度分布が振動する場合、その物体の重心速度は、物体上の任意の点における速度の振動中心に一致する。この場合、振動周期に対して、測定時間が十分に長くとれる必要がある。

キャリアと参照分銅から成る系全体をゆっくりと空間中に放すクランプ機構としては、原器用天秤の荷重交換装置に利用されている、動物の毛を植え付けたアームとすることが

よい参考になる。

光波干渉計の光源としては、質量測定器に要求される不確かさが 10^{-4} 程度までであれば、安定化されていないヘリウムネオンレーザで十分である。また、本質量測定器で要求されるのは、キャリアと参照分銅の速度変化、あるいは、加速度の比であるので、光学系・データ処理系を工夫すれば通常のレーザダイオード（LD）でも十分かも知れない。

参照分銅の速度、および、被測定物体を保持するキャリアの速度を、光波干渉計により 10^{-4} より小さな不確かさで測定することは容易であると考ええる。また、参照分銅、キャリアの質量を予め 10^{-4} より小さな不確かさで校正することも容易であると考ええる。以上より、ここで提案した方法により、マイクロ重力環境下において被測定物体の質量を 10^{-4} 程度の不確かさで測定することは可能であると考ええる。

3.4.3 地上での予備実験 1

提案した質量測定器の原理の妥当性を確かめるための予備実験として、静圧空気直動軸受を用いた地上実験を行う。静圧空気直動軸受の可動部に分銅を取り付けた可動部全体を被測定物体とし、その運動量変化を力センサーを用いて計測することを試みる。この実験は前述の「力センサの動特性評価法」において、力センサの動特性を力の時間積分値である力積の次元で評価する方法を検証するために行った実験と同一の装置を用いている。

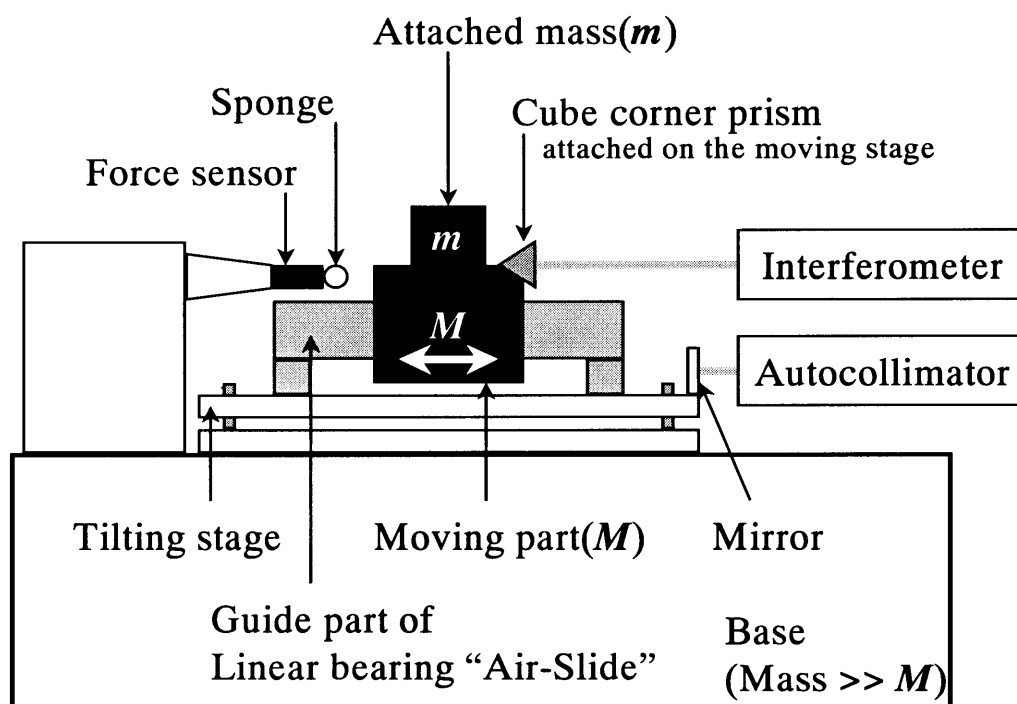


Fig.3.27 Experimental setup

Fig.3.27 に示すような、リニアガイドに支持された可動部（質量： M kg）を手で動かし、定盤に固定された力センサに衝突させそこに作用する力積 $\int F dt$ [kg m/s]と、その前後の速

度 (v_1, v_2 [m/s]) を測定する。重力加速度の存在する地上において、水平面内運動に関して模擬的に無重力状態を実現するために、摩擦抵抗の小さな空気層支持方式のリニアガイド (NTN(株)のエアスライド) を用いている。

力センサとしては、周波数応答のよいとされる半導体歪ゲージを弾性体ブロックに張付けた構造のもの (容量 9.8N, 昭和測器(株)製) を用いた。このように、剛性の高い弾性材料の微小な歪により力を測定しようとする方式では、固有振動数が高くなり周波数応答性に優れるという長所があるが、ゼロ点のドリフト、スパンの経時変化が大きいという短所を併せ持つ。ここでは、静的な方法で校正させる力センサーを衝突時の力測定に使用することから、固有振動数のなるべく大きく、周波数応答性に優れたタイプを選択した。この力センサーは、動的校正法が存在しないので静的に荷重を付加する方法のみで校正されている。静的校正における不確かさは約 0.2%と推定されるが、動的な測定における不確かさは未知である。そこで、衝撃応答を緩和させることにより、力センサの静的特性と動的特性の違いがなるべくでないような条件とする目的で、衝突点に厚めのダンパーを配置している。このダンパーは、スポンジ製で、厚み約 5mm, 断面積約 1cm^2 である。

実験においては、衝突の前後でのゼロ点のチェックを行い、0.2%程度以上のドリフトが観測されたデータは無効としてその場で測定データを破棄した。29回の衝突実験を行った。

可動部全質量は分銅着脱により、 $M=2\text{ kg}, 6\text{ kg}, 11\text{ kg}$ の3水準取れる。摩擦力が無視できる条件下では、可動部の運動量変化 $M(v_1-v_2)$ は、可動部が力センサに与える力積 $\int F dt$ に等しいので、可動部質量は次式により求まる。

$$M = \int F dt / (v_1 - v_2) \quad (3.20)$$

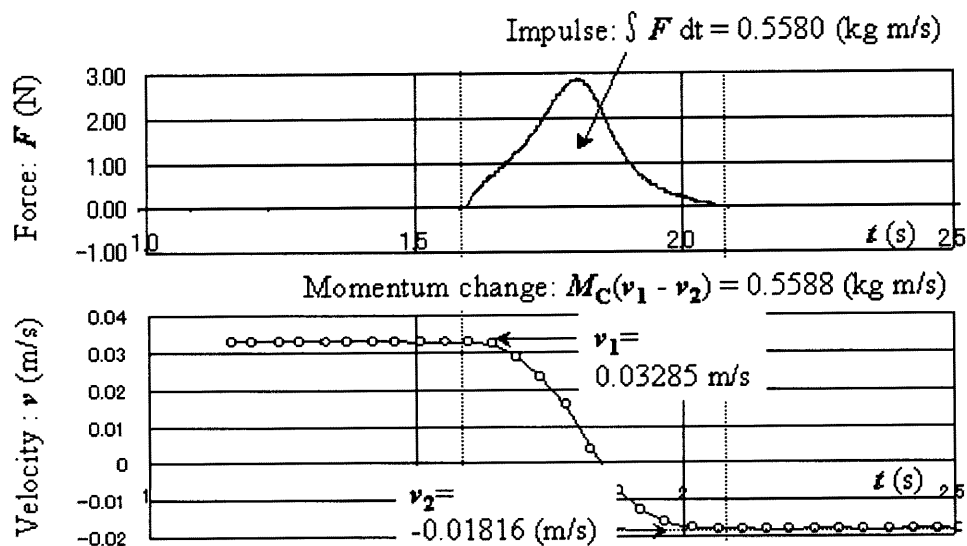


Fig.3.28 Impulse on the force sensor and velocity change of the moving part (calibrated mass of the moving part: $M_C=10.955 \text{ kg}$)

Fig.3.28にある衝突実験における、力センサ出力と、光波干渉計出力の時系列を示す。この場合、力センサ出力から計算される力積と、光波干渉計出力から計算される運動量変化は、0.2%程度の差で一致している。衝突により可動部の運動エネルギーは約70%減少しているが、これは、スポンジダンパー内で熱として散逸したものと考えられる。このとき、3.5式を用いて計算される質量 M_E は10.939kgとなり、予め電子天秤を用いて校正された質量値 M_C の10.955kgとの差は0.15%程度である。

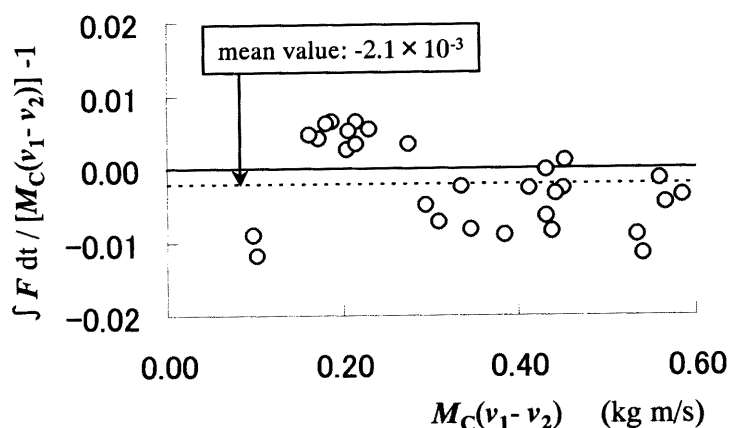


Fig.3.29 Relationship between momentum change and impulse

Fig.3.29 に 29 回の衝突実験における，光波干渉計で測定した可動部の速度に基づいて計算される運動量変化 $M_C(v_1 - v_2)$ と，力センサー出力を時間積分することにより計算される力積 $\int F dt$ の関係を示す．静圧空気直動軸受の可動部の初速は実験者の手により適当に与えられたが，図の横軸の運動量変化は，0.1 kgm/s から 0.6 kgm/s の間にほぼ均等に分布している．図の縦軸 $\int F dt / [M_C(v_1 - v_2)] - 1$ は，運動量変化に対する力積の比の 1 からの偏差を表しており，測定誤差がないならばこれはゼロとなる．今回行った 29 回の衝突実験の結果として，この平均値は -2.1×10^{-3} (-0.21 %)，標準偏差は 5.8×10^{-3} (0.58 %)となった．

Fig.3.30 に，標準分銅で校正された質量 M_C と，(3.20) 式より求める推定質量 M_E との関係を示す． $(M_E/M_C - 1)$ の r m s 値 (root mean square value) は 6.2×10^{-3} (0.62 %)となった．また， M_C の静的校正の不確かさは 0.1%よりよい．以上 2 つより，1 回の衝突による 2kg から 11kg までの物体の質量推定における相対標準不確かさ $u_{c,r}$ は，約 6×10^{-3} (0.6 %)と推定される．

この不確かさの主要な要因として、力センサーの静的校正時と動的力測定時における特性変化力、および、センサーのゼロ点の不安定性などが考えられる。

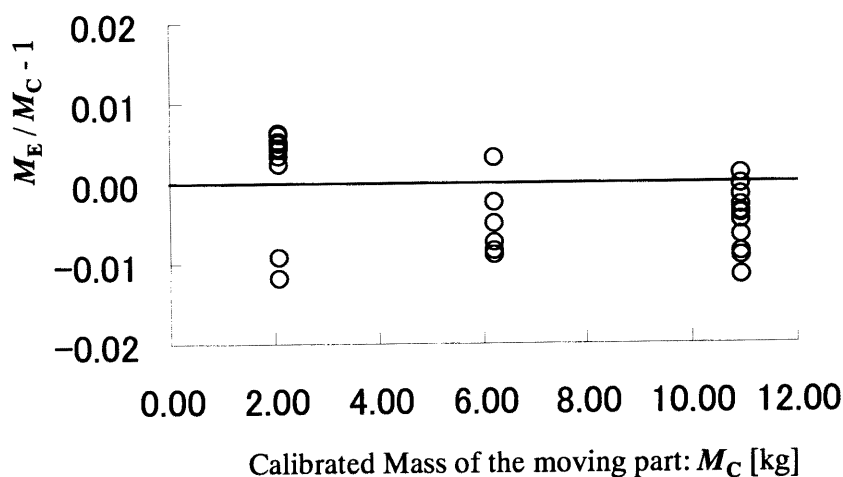


Fig.3.30 Estimated and calibrated mass of the moving part

ここで示した地上実験装置をマイクロ重力環境下において用いる場合、測定原理に重力の影響は小さいと考えられるので、質量測定における不確かさも地上と同様であると考えられる。地上実験では、軸受内部に作用する静的な力をガイド部の傾斜角度を調節することにより、衝突点において重力と相殺させる工夫を行ったが、マイクロ重力環境下ではこれができないということを考慮する必要があるかもしれない。この場合、静的な力が十分に小さな静圧軸受を用いること、および、静的な力が最小となる場所を衝突点に選ぶことなどが有効と考えられる。静的な力を小さくするためには、その発生原因と考えられた可動部内側の溝 (Air passage channel) の断面積を大きくとることが有効と考えられる。また、同様な仮説に立つならば、可動部がガイド部の中心位置にあるとき、静的な力はゼロに近くなると考えられる。もちろん、前節で提案しているように、静圧空

気軸受という大きな校正部品は省力できれば、それに越したことはないであろう

動的特性評価が適正に為され、衝突時の力測定における不確かさが十分に小さな力センサーが得られれば、本実験装置による測定不確かさは飛躍的に小さくなる可能性がある。

3.4.4 地上での予備実験 2

前節 (3.3.3 節) では、力積測定に用いた力センサが最大誤差要因と考えられた。すなわち、静的に校正された力センサを動的な応答測定に用いることに無理があった。そこで、より原理に忠実な方法として、被測定物体に作用する力積を、質量値が既知の参照質量に作用する力積として置換測定する地上実験方法を提案する。

Fig.3.31 にそれを地上実験で検証する為の実験装置を示す。2つの静圧空気直動軸受、Slide-A と Slide-B とを対向させ、両者の可動部を衝突させる実験を行う。使用した直動軸受 Air Slide TAAG10A-02 (NTN 製) は、可動距離 100mm、可動部最大質量 32kg 以上、無負荷時の設計空気膜厚約 8mm、空気膜剛性 70Nmm^{-1} 以上、ガイド部真直度 (上下・左右) $0.3\mu\text{m}/100\text{mm}$ 以下という仕様である。2つの直動軸受は可変傾斜ステージの上にセットされ、ステージの相対傾斜角はオートコリメータで測定される。2つの直動軸受の可動部の速度は光波干渉計で測定される。

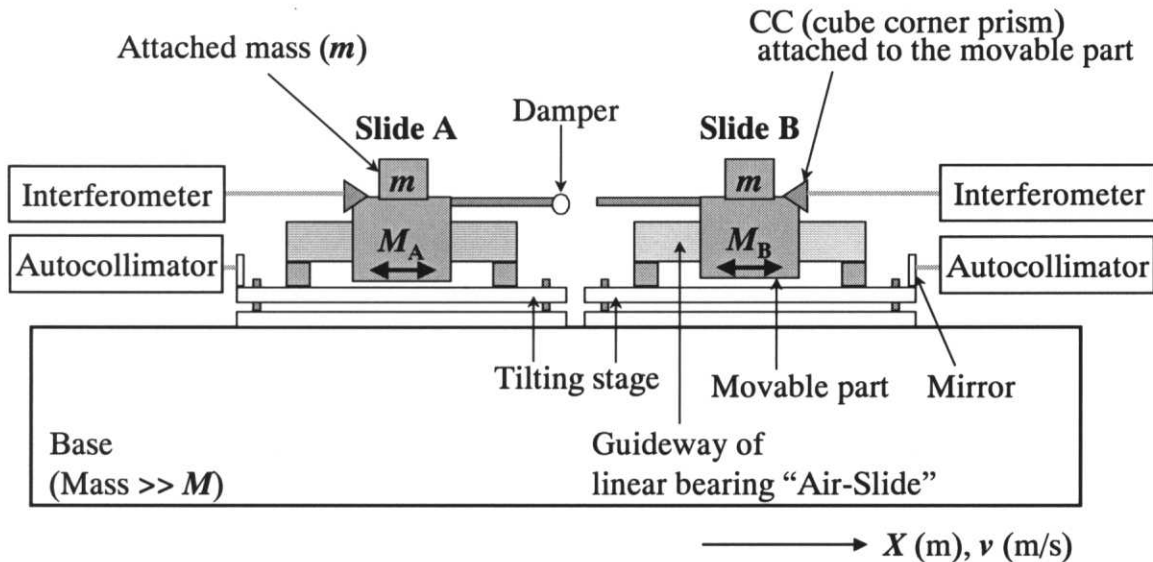


Fig.3.31 Experimental setup.

空気軸受の可動部の衝突時における運動量保存は、摩擦などの外力が無視できる場合、下記のように表される。

$$M_A v_{A,1} + M_B v_{B,1} = M_A v_{A,2} + M_B v_{B,2}, \quad (3.20)$$

ここで、 M_A, M_B はそれぞれ Slide A, Slide B の可動部の質量、 v_A, v_B はそれぞれ Slide A, Slide B の可動部の速度を表す。添え字 1,2 は、それぞれ、衝突の前後を表す。

Slide A の質量 M_A があらかじめ校正されている場合、2つの空気軸受の可動部の速度 v_A と v_B より、Slide B の可動部の質量 M_B は次式により求められる。

$$M_B = -(v_{A,1} - v_{A,2}) M_A / (v_{B,1} - v_{B,2}). \quad (3.22)$$

実験では、初速 $v_{A,1}$ を与えられた Slide A の可動部を、静止状態($v_{B,1} = 0$)の Slide B の可動部に衝突させる。衝突後、2つの可動部はそれぞれ速度 $v_{A,2}$ と $v_{B,2}$ で離れる。2つの直動軸受を支持する傾斜ステージの角度は、衝突点において可動部が静止状態を保つ角度範囲の中心値に設定された。厚さ 5 mm のウレタンが、衝突で発生する衝撃力、振動を和らげる目的で使用された。

Slide A 可動部の初速、および、Slide B 可動部の質量を変化させて実験が行われた。Slide A 可動部の初速は、実験者により手動で適当に与えられた。あらかじめ校正された Slide B の質量 $M_{B,C}$ は、約 4.3, 11.7, 11.8 or 18.1 kg の値を調整分銅の脱着で設定できる。Slide A の質量 $M_{A,C}$ は約 11.8 kg で固定とした。可動部の質量の校正は、電子天秤により標準不確かさ約 0.002 kg (最大質量 18 kg の 0.01%) で行われた。可動部の速度、 $v_{A,1}, v_{B,1}, v_{A,2}$ and $v_{B,2}$ は、衝突の直前、および、直後の値を、データ 10 個を用いた直線回帰により求めた。

Fig.3.32 に Slide A と Slide B の可動部の速度変化の様子を示す。この場合、初速 $v_{A,1} = 0.043$ m/s の Slide A 可動部が、静止状態の Slide B 可動部に衝突している。衝突前後における、両者の運動量変化は、約 -0.4026 (kg m/s) と 約 0.4024 (kg m/s) である。ここで、Slide A 可動部が失った運動量と、Slide B 可動部が得た運動量は、0.0003 (kg m/s) 程度の差で一致しており、これは運動量変化量の約 0.07% に相当する。この衝突では、約 0.006 kg m/s² の運動

エネルギー

ギアがウレタンダンパー内で発生する熱エネルギーとして散逸している。

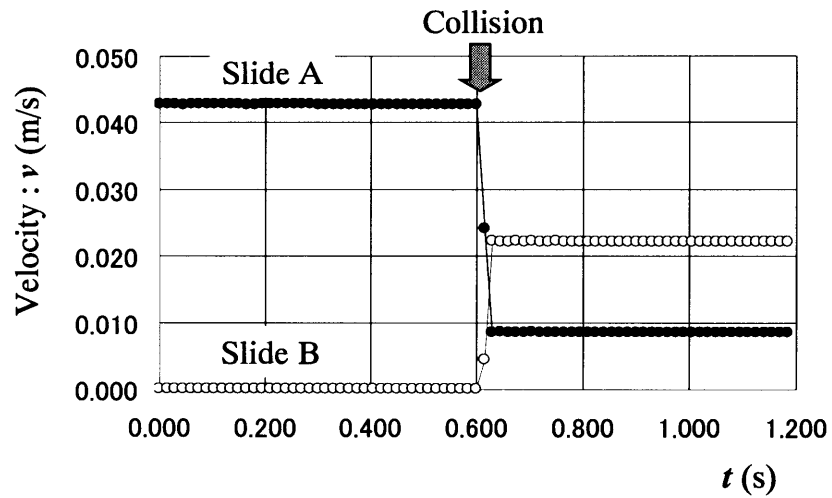


Fig.3.32 Velocity change of the moving parts
(calibrated masses of the moving parts: $M_{A,C}=11.782$ kg, $M_{B,C}=18.128$ kg).

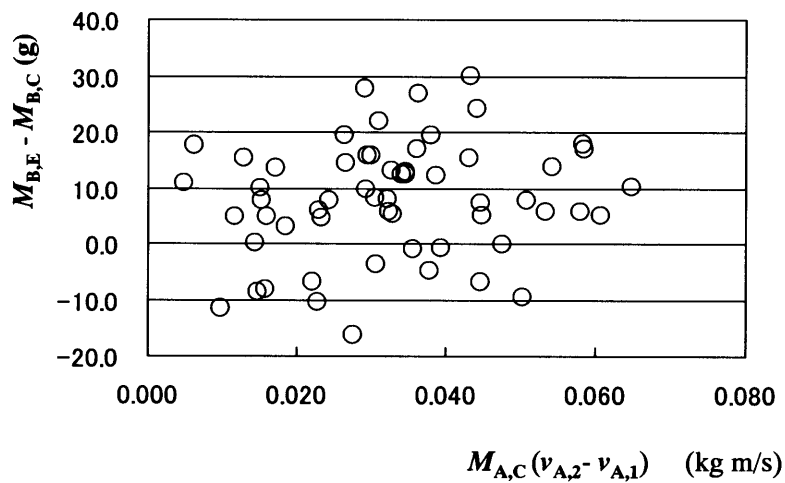


Fig.3.33 The difference between the estimated and calibrated masses of the movable part of Slide B plotted against the momentum change of the movable part of Slide A.

Fig.3.33 に, Slide A 可動部の運動量変化 $M_{A,C}(v_{A,2} - v_{A,1})$ に対する, Slide B 可動部の推定質量 $M_{B,E}$ と校正質量 $M_{B,C}$ との差 $M_{B,E} - M_{B,C}$ を示す. ここで, 添え字 E と C はそれぞれ, 本方法による推定値, および, 電子天秤による校正值を表す. この差の平均値は 7.8 g であり, 標準偏差は 10.2 g である.

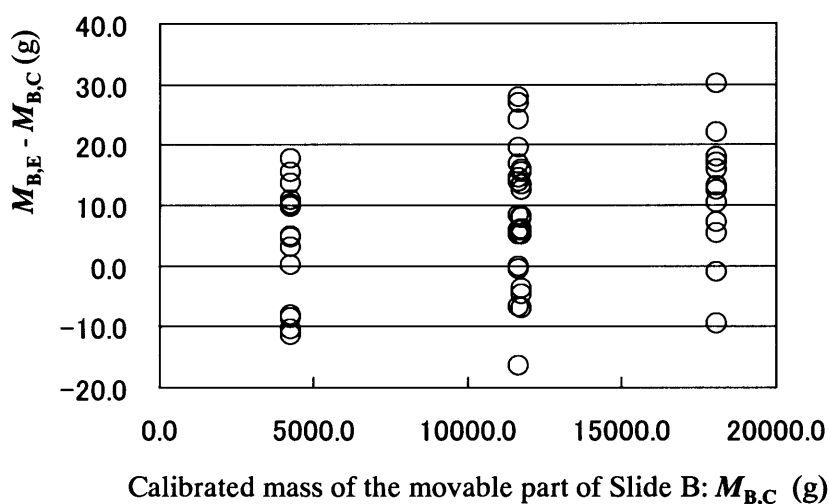


Fig.3.34 The difference between the estimated and calibrated masses of the movable part of Slide B plotted against its calibrated mass

Fig.3.34 に Slide B 可動部の校正質量 $M_{B,C}$ に対する, Slide B 可動部の推定質量 $M_{B,E}$ と校正質量 $M_{B,C}$ との差, $M_{B,E} - M_{B,C}$, を示す. この差 ($M_{B,E} - M_{B,C}$) の r m s 値は 12.7 g であり, 校正質量の不確かさは 2 g より小さい. このことから, 4 kg から 18 kg の剛体の質量を一回の衝突実験で推定する際の結合標準不確かさは 12.9 g と推定される. これは, Slide B 可動部質量 $M_{B,C}$ の最大値 18.128 kg の 0.07% に相当する.

この不確かさの原因として, 可動部の振動に起因する次の 2 つが考えられる. 1 つ目は, 衝突により可動部とガイド部との間に存在する厚さ約 $10 \mu\text{m}$ の空気膜が破れ両者間の摩擦

が一時的に大きな値をとることである。2つめは、可動部の重心と光波干渉計の測定点（コーナーキューブプリズムの光学的頂点）の相対位置が変動することである。

以上より、空気圧により浮上支持した2つの物体間の運動量保存を利用した実験装置を製作し、提案したマイクロ重力環境下で動作する質量測定方法の妥当性を検証した。ここで製作した実験装置は、マイクロ重力環境においても、地上と同程度の不確かさで質量測定を行えると考えられる。圧縮空気源を必要とする静圧空気軸受を用いた装置は大掛かりになるという欠点がある。

3.4.5 まとめ

運動量保存則を用いたマイクロ重力環境下における質量測定方法の提案を行い、その基本原理の有効性を地上実験で確認した。ここで提案した方法は、これまで数多く提案されてきた方法との比較の上で、非常に優位であると考えられる。ここで提案した質量測定器は各方面（学会誌、宇宙関連機関の研究者）からも高い評価を得ており、十分な開発予算を得て、これから飛躍的に活発になるであろう人類の宇宙空間での活動において欠かせないツールの一つとして実用化されることが強く期待される。

3.4 で述べたマイクロ重力環境下における質量測定方法の提案・開発をまとめると以下のようなものである。

- (1) 質量を測定したい物と参照分銅とからなる系の運動量保存を、より純粋な形で利用する目的で、その系が外部に対して非接触浮遊した状態とすることを特徴とする、マイクロ重力環境下における質量測定方法を提案した。本方法により、マイクロ重力環境下において被測定物体の質量を 10^{-4} 程度の不確かさで測定することが可能になると予想される。
- (2) 提案した質量測定方法の基本原理を検証するための地上実験方法として、物体を静圧空気直動軸受を用いて水平面内運動に対する、摩擦、および、重力の影響を十分に小さくする方法を2つ提案した。1つ目は、物体の運動量変化を力センサーに作用する力積として計測する方法である。2つ目は、物体の運動量変化を、予め質量値を校正した参照分銅の運動量変化として測定する方法である。
- (3) 物体の運動量変化を力センサーに作用する力積として計測する方法による地上実験を行い、1回の衝突による2kgから11kgまでの物体の質量推定における相対標準不確かさ $u_{c,r}$ は、約 6×10^{-3} (0.6%)と推定された。
- (4) 物体の運動量変化を、予め質量値を校正した参照分銅の運動量変化として測定する方法による地上実験方法を行い、4kgから18kgの剛体の質量を一回の衝突実

験で推定する際の結合標準不確かさは 12.9 g と推定された。これは、被測定質量の最大値である 18 kg の 0.07% に相当する。

国際宇宙ステーションで得られるマイクログラビティ環境における加速度場と、地上における重力加速度場を比較すると、加速度場の大きさは非常に小さいものの、変動はむしろ大きくなることが予想される^{72), 73)}。そのため、国際宇宙ステーションの加速度場の計測・制御は大きな研究開発課題の一つとなっている。

国際宇宙ステーションなどで得られるマイクログラビティ環境は、地上では逃れることが極めて難しい地球の重力から解放される極めて特異かつ貴重な環境であることに多くの研究者・研究機関が注目し、多種多様な研究計画が提案・実施されている。例えば、原子ガスを空間中に保持するレーザ冷却原子時計を国際宇宙ステーションで運用するための研究開発がジェット推進研究所 (JPL) を中心に進められている⁷⁴⁾。また、筆者はロシア航空宇宙庁 (Russian Aviation and Space Agency) の研究者らと万有引力定数 G の測定をマイクログラビティ環境で行うことの有効性について検討をはじめた。いずれの場合も、加速度場の絶対値が極めて小さいことの利点を、物体を空間中に浮遊させることに最大限に利用する方法である。今後、マイクログラビティ環境が、力学量の測定、基礎物理定数の測定に有効な環境として積極的に利用されていくことを期待する。

3.5 まとめ

本章では、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，静圧空気直動軸受の静的摩擦に見かけ上見える力，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，3.2, 3.4における実験の不確かさ評価において利用した。

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確認した。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)、スペースシャトルに代表されるマイクロ重力環境下で動作する質量測定方法の提案を行い、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。さらに、マイクロ重力環境という地球上の巨大な重力加速度場から逃れた環境の利点を最大限に活用する小型、軽量の質量測定器 (Space Balance) を考案した。ここで提案した測定器 (測定方法) は、これまで数多く提案されてきた方法との比較の上で、非常に優位であると考えられ、各方面 (学会誌、宇宙関連機関の研究者) から高い評価を得ている。十分な開発予算を得て、これから飛躍的に活発になるであろう人類の宇宙空間での活動において欠かせないツールの一つとして実用化されることが強く期待される。国際宇宙ステーションの建設開始により、マイクロ重力環境利用に対する関心が高まっており、様々な研究者、技術者の英知によりそこでの研究・生産活動は活発化、多様化することが予想される。そこで、最も基本的な物理量である質量の測定器として、高い機能、性能を有するものが望まれることは確実である。また、マイクロ重力環境における浮遊状態における精密測定と、浮上支持を用いた地上における精密測定との間には、本章で説明した光波干渉計による速度測定技術、次章で説明する物体の姿勢位置 (剛体なら全6自由度) の測定技術など、様々な共通要素技術があると考えられる。これら、相互に関連する要素技術開発を推進することにより、本研究「質量を浮上支持することによる力学量の高精度測定」における基本的な考え方を様々な分野に適用していくことが期待できる。

力、トルク、運動量、角運動量、運動エネルギーといった質量から導出される量である力学量は、物体に加速度、角加速度が作用することにより生じる。変動しない定常な力や

トルクを興味の対象とする場合は、時間的にも空間的にも安定であり、かつ、絶対値の大きな地球の重力加速度場を利用することが、地上においては便利であるし一般的である。しかしながら、変動する力やトルクを得ようとする場合、この重力加速度は障害となる。摩擦の小さな静圧空気直動軸受、静圧空気回転軸受を利用して、物体を空気圧により非接触浮上支持することは、地上において重力加速度場の影響から逃れる上で極めて有効であることを提唱し、実験的に確認した。

今後、質量を空気圧により浮上支持することを利用した力学量の高精度測定法の研究開発が発展し、科学技術・産業に不可欠な技術として重要な役割を果たしていくことを期待する。