

#### 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

この章では、質量の量子標準化を目指して進めている超伝導磁気浮上法の研究開発について述べる。

まず、筆者が磁気浮上法の研究グループに入る前に製作された実験システム（プロトタイプシステム）のために、筆者が行った2つの要素技術開発について述べる。この実験システムは、原宏東京大学名誉教授、塩田ふゆひこ計量研究所主任研究官らにより製作され、その後それを用いて、1ppm ( $10^{-6}$ ) レベルの不確かさでの力学量と電気量の比較測定を目指して研究が進められて来ている。1つ目は、超伝導浮上体の重心高さの測定方法である。2つめは、浮上体の実験環境下における質量の測定方法である。

次に、次世代システム設計支援用に開発した数値計算アルゴリズムについて述べる。この数値計算アルゴリズムに基づいた数値解析コードによる計算結果と磁気浮上実験結果とを比較した。また、低温実験の利便性を高め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。この液体ヘリウム自動移送システムにより、これまで、磁気浮上実験前の数時間に渡って、研究者が手動で行ってきたクライオスタットへの液体ヘリウム移動の自動化が達成された。

最後に、実験システム（プロトタイプシステム）の問題点を克服し、1ppm ( $10^{-6}$ ) レベルの測定の早期実現、および、キログラム原器のリプレース（replacement of the kilogram）に必要とされる 0.01ppm ( $10^{-8}$ ) レベルの測定実現の可能性を評価することを目指して開発中の次世代システムについて述べる。

#### 4.1 浮上体重心鉛直変位の高精度測定

ここでは、超伝導浮上体の重心高さ変化量の測定について述べる。まず、浮上体重心の鉛直変位測定における問題点を述べる。以降、新たに開発した剛体としての浮上体の姿勢・位置全6自由度を同時に測定できるシステム<sup>75</sup>、磁気浮上における浮上体の姿勢位置測定結果、姿勢位置データをエネルギー方程式に代入して実験環境下（＝液体ヘリウム温度）での浮上体の重心と測定点（コーナーキューブプリズムの光学的頂点）の相対位置を推定する方法<sup>76</sup>、について順次述べていく。

#### 4.1.1 解決すべき課題

一般に長さ測定においては、測定したい点と測定される点が異なっていることがしばしば問題となる。磁気浮上システムにおける浮上体の重心鉛直変位の測定においても、光波干渉計により鉛直変位を測定する目的で浮上体に設置したコーナーキューブプリズムの光学的頂点と、実際に測定したい点である浮上体の重心が一致していない。このため、浮上姿勢の変化が無視できない場合、浮上体の姿勢（3自由度）と、重心の測定点に対する相対位置（浮上体固定座標系で3変数）とを測定して、重心と測定点との相対高さ（重力加速度の方向）を推定する必要がある。

#### 4.1.2 姿勢位置測定システム

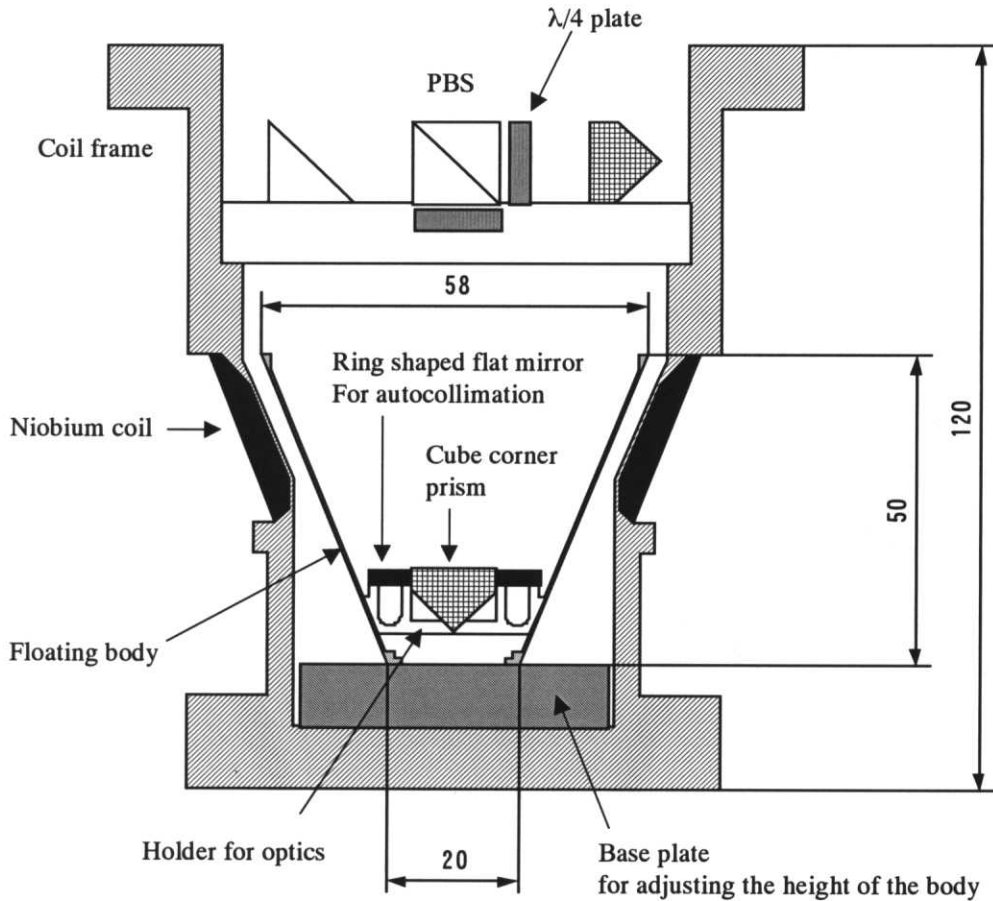


Fig.4.1 Schematic of the coil frame and the floating body

Fig.4.1 に 1ppm ( $10^{-6}$ ) レベルの不確かさでの力学量と電気量の比較測定を目指して試作された実験システム（プロトタイプシステム）における，コイルフレームの断面図を示す．本システムは，東京大学・計量研究所において磁気浮上法の研究開発を行ってきた塩田博士が中心となって製作したものである．コーナーキューブプリズム，リング形状の平面鏡を積載した状態での浮上体の全備質量は約 25 g である．純アルミ製コイルフレームは，全長約 1 m の真空インサートの下端に取り付けられ，全体が FRP 製クライオスタットに挿

入される。浮上体の上方約1mのところに直径約40mmの覗き窓があり、ここから、光波干渉計用レーザビームの出し入れを含む光学計測を行う。

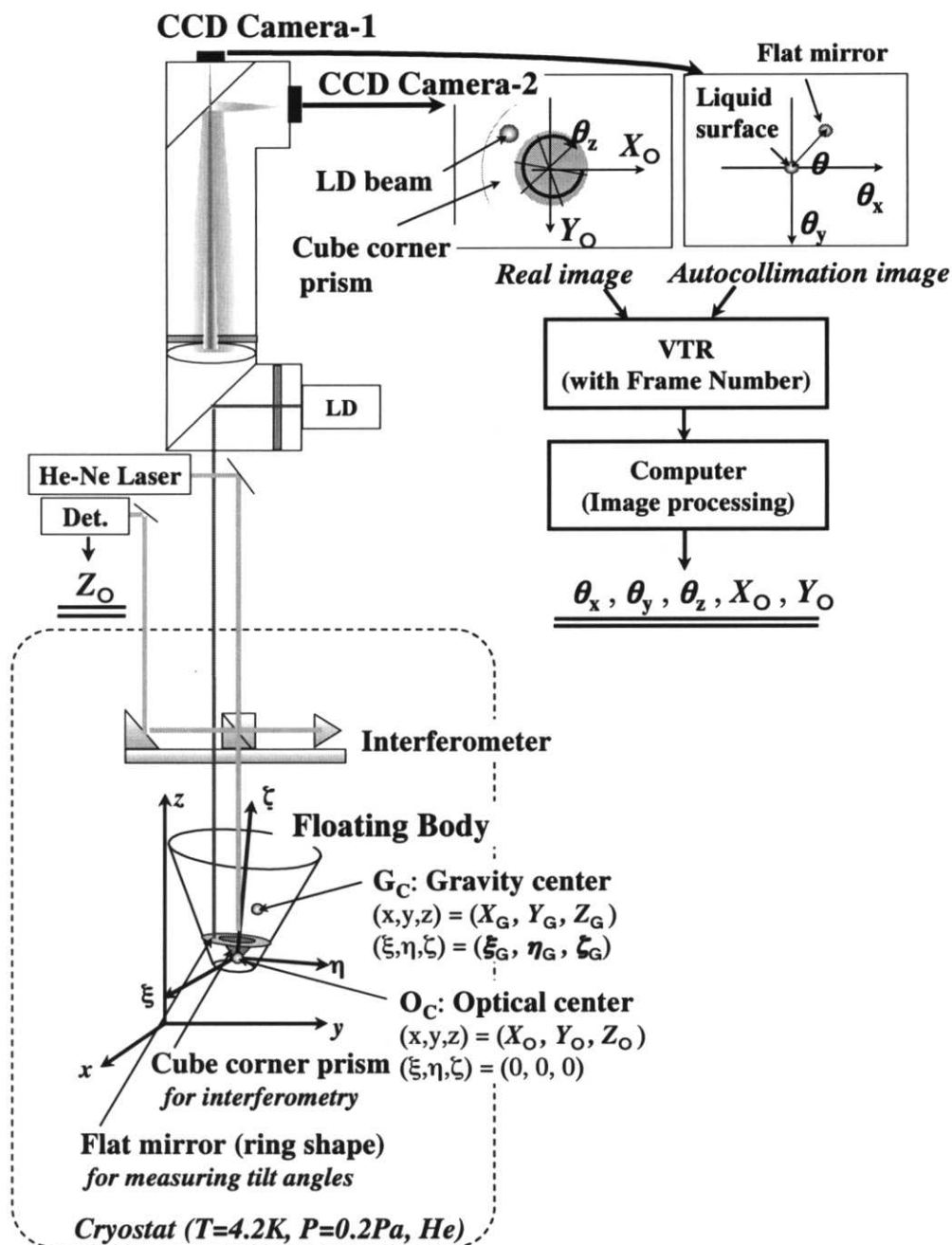


Fig. 4.2 Attitude and position measurement system

2章でも述べたように、浮上体重心の鉛直変位を推定するためには、浮上体の姿勢・位置の全6自由度すべてを測定する必要がある。ここで、浮上体は、そこへ積載されているコーナーキューブプリズム、リング形状の平面鏡、それら光学素子固定ホルダーなどと、浮上実験中に一体であると見なせば、浮上体の姿勢位置全6自由度を知るためには、たとえば、代表としてコーナーキューブプリズムの光学的頂点を原点とした姿勢位置6自由度を測定すればよい。

しかしながら、浮上体はクライオスタットの真空インサート底部の液体ヘリウム温度部に設置されており、これの姿勢位置6自由度を、約1m上方の小さな覗き窓から光学的に測定するのは従来技術では不可能である。そこで、この目的に適した姿勢位置測定器を含む光学測定システムを開発した。

Fig.4.2 に、新たに考案した剛体としての浮上体の姿勢・位置全6自由度を同時に測定できるシステムを示す<sup>75)</sup>。本姿勢測定器には、2つの CCD カメラがあり、一つは凸レンズの焦点位置に、もうひとつは、それより後方の浮上体の実像が得られる位置に設置されている。

まず、焦点位置に置かれた CCD カメラの役割について説明する。LD (レーザ・ダイオード) から出射された平行光線は、ハーフミラー (半透鏡) でクライオスタット内に導入される。その光は浮上体に設置されたリング形状の平面鏡で反射し、平面鏡の傾きに応じた角度だけ傾いて戻って来る。凸レンズの作用により、戻ってきたレーザ光線の傾きに応じて、焦点を結ぶ位置が変化する。すなわち、焦点位置に置かれた CCD カメラが捕らえる画像 (オートコリメーション画像) に写る LD のビーム・スポットの位置を測定することにより、浮上体の傾きを知ることができる。ここまでの機能は、市販されているレーザ・オートコリメータと全く同様である。これにより知ることのできる角度は、図中に示す x 軸、y 軸回りの微小回転角である。

ここで、LD のビームを確実にターゲットであるリング形状の平面鏡に当てる必要があ

るが、これは困難を伴う。その理由として、目標が、直径 5cm の光学窓の約 1 m 下方にある、幅 5mm 程度のものであることがまず挙げられる。次に、目標および LD ビーム光路の回りには、光学窓、干渉計のオプティクスなど多数の反射体があり、焦点位置の画像のみからは、どの反射スポットが目標物からのものであるのか判断が難しいということが挙げられる。この問題点は次に説明するように、第二の CCD カメラの設置により解決される。

残る知りたい角度は  $z$  軸回りの回転角である。その角度は、浮上体の実像を画像解析することにより得られる。Fig.4.3.2 に示すように、第二の CCD カメラの画像（実像）には、浮上体の位置を光波干渉計で測定する目的で設置されたコーナーキューブ (CC) の 3 本の稜線、その回りを取り囲むように設置されたリング形状の平面鏡に当たっている LD ビームの照射スポットが、観測される。CC の 3 本の稜線の回転角より  $z$  軸まわりの回転角を知ることができる。また、それらの交点の位置より CC の光心の水平面内の位置（2 自由度）を知ることができる。光波干渉計による CC の光心の鉛直位置の測定と合せると、浮上体の姿勢・位置の全 6 自由度がすべて測定されることになる。

重力加速度の方向はシリコン油の液面を参照面として用い、オートコリメーション画像における水平面位置の確認、および、光波干渉計の信号光の傾き設定を行う。電磁気ノイズを嫌う超伝導エレクトロニクス (SQUID, ジョセフソン素子) と同時にオペレーションする必要から、CCD カメラを含めた測定器はバッテリー駆動とし、CCD カメラモジュールからの画像信号は光ファイバーで伝送するようにした。

コイルフレームに固定した空間固定座標系を  $(x, y, z)$ 、浮上体固定座標系を  $(\xi, \eta, \zeta)$  とする。浮上体の重心の座標は、空間固定座標系で  $(x, y, z) = (X_G, Y_G, Z_G)$ 、浮上体固定座標系で  $(\xi, \eta, \zeta) = (\xi_G, \eta_G, \zeta_G)$  とおく。また、浮上体に設置したコーナーキューブプリズムの光学的頂点の座標を、空間固定座標系で  $(x, y, z) = (X_0, Y_0, Z_0)$ 、浮上体固定座標系で  $(\xi, \eta, \zeta) = (\xi_0, \eta_0, \zeta_0) = (0, 0, 0)$  とおく。ここで、浮上体固定座標系  $(\xi, \eta, \zeta)$  の原点は浮上体上のコーナーキューブプリズムの光学的頂点  $(X_0, Y_0, Z_0)$  とし、 $\zeta$  軸は浮上体に設置したリング形状

の平面鏡に平行であるとした。ζ軸は，実験開始時において，その x-y 面への投影が x 軸に平行とする。

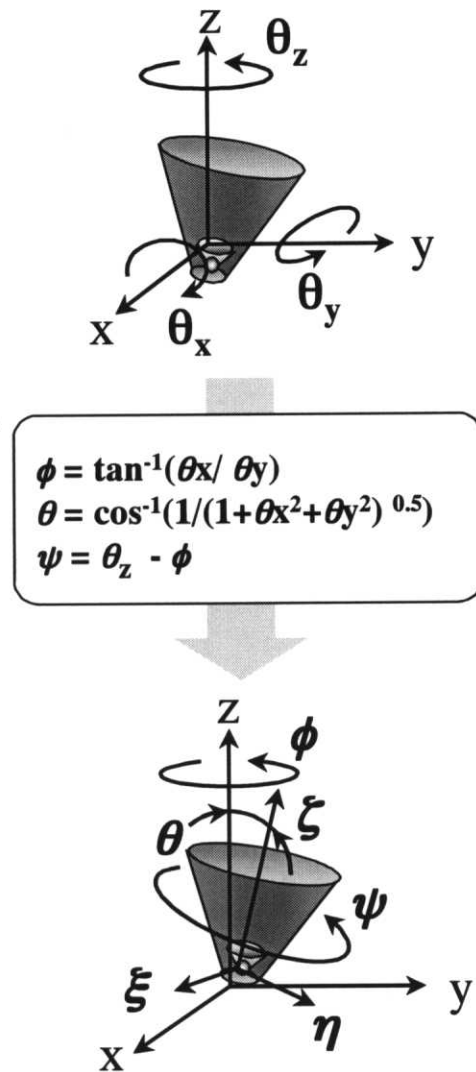


Fig. 4.3 The coordinate system

Fig. 4.3 に空間固定座標軸周りの回転角と，浮上体固定座標軸周りの回転角であるオイラー角の関係を示す．空間固定座標系(x, y, z)の各軸回りの回転角を( $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ )とし，浮上体固定座標系( $\xi, \eta, \zeta$ )の各軸回りの回転角であるオイラー角を( $\phi, \theta, \psi$ )とする．角度の初期条件として，ζ軸は z 軸に，ξ軸は x 軸に平行であるものとする．ζ軸の x-y 平面への投影が x



軸と成す角が $\phi$ ,  $\xi$ 軸と $z$ 軸と成す角が $\theta$ ,  $\xi$ 軸回りの回転角が $\psi$ である。 $(\theta_x, \theta_y)$ が微小であるとき,  $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ から $(\phi, \theta, \psi)$ への変換は, Fig. 4.3 に示したようになる。

浮上体の重心高さ  $Z_G$  は, 干渉計による測定点  $Z_O$ , オイラー角で表した浮上体の姿勢 $(\phi, \theta, \psi)$ , および, 浮上体固定座標系における重心の座標 $(\xi_G, \eta_G, \zeta_G)$ を用いて, 次式で計算できる。

$$Z_G = Z_O + (-\sin\theta \cos \psi) \xi_G + (\sin\theta \sin \psi)\eta_G + (\cos\theta) \zeta_G. \quad (4.1)$$

次節において, 浮上体固定座標系における重心の座標 $(\xi_G, \eta_G, \zeta_G)$ の推定法について述べる。

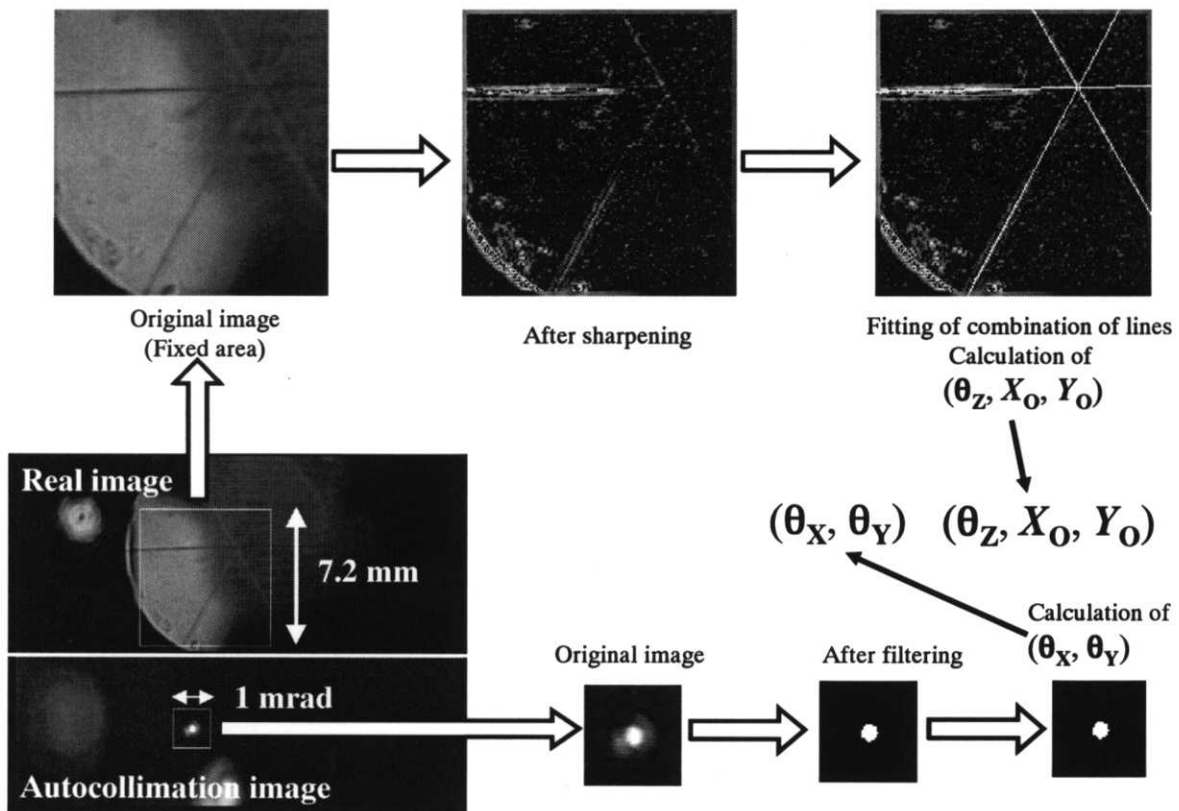


Fig.4.4 Image processing procedure

実像, オートコリメーション画像の2系統の画像は, 画像ミキサーで合成した上で, タイムコード付きでビデオテープレコーダに録画される。実験後, ビデオテープの再生画像は, コンピュータに  $640 \times 480$  pixels で取り込まれ, C 言語で書かれた画像処理プログラム

を用いて解析される。 Fig.4.4 に示すように、実像部分については、コーナーキューブプリズムの3本の稜線に対して、互いに  $120^\circ$  の角度で交わる3本の直線の組み合わせをフィッティングさせることにより解析した。オートコリメーション画像については、LDのビーム・スポットの重心位置計算により解析する。この例では、コーナーキューブプリズムは特に照明していないが、光波干渉計のHe-Neレーザの散乱光により、十分にクリアな画像が得られている。

$(\theta_x, \theta_y)$ の測定における不確かさの要因として以下があげられる。

- 1) 回転ステージを用いたオートコリメーションシステムの校正： $u_1=0.05$  mrad,
- 2) 平面鏡上でのLDビームスポット形状の変化： $u_2=0.02$  mrad,
- 3) 液面より得られる鉛直軸： $u_3=0.02$  mrad,

以上より、 $(\theta_x, \theta_y)$ の測定における結合標準不確かさは  $0.05$  mrad である。

$(\theta_z)$ の測定における不確かさの要因として以下があげられる。

- 1) 画像処理（直線のフィッティング）： $u_1=5$  mrad,
- 2) 画像の歪み（全画面の0.2%以内）： $u_2=2$  mrad,

以上より、 $(\theta_z)$ の測定における結合標準不確かさは  $5$  mrad である。

ここで、提案・開発した姿勢位置測定システムでは、光波干渉計による位置測定（1自由度）用に被測定物体に設置されたコーナーキューブプリズムの他に、その回りに、リング形状の平面鏡を配置した。しかしながら、この平面鏡はオートコリメーション用に配置されているが、コーナーキューブプリズムの表面の外周付近に金属膜を蒸着加工することを行えば、不要となる。すなわち、本姿勢位置測定システムにより姿勢・位置全6自由度を測定するには被測定物体に、表面の一部を面にしたコーナーキューブプリズムを一つだけ取り付ければ十分ということになる。

一般に光波干渉計を用いた精密測長においては、「測定したい点」と、「測定される点（通常はコーナーキューブプリズムの光学的頂点）」が一致していないため、その相対位置と、

姿勢変化に対して注意を払う必要がある。そこに、ここで考案・開発した姿勢・位置測定システムが有効利用される余地があると考えられる。

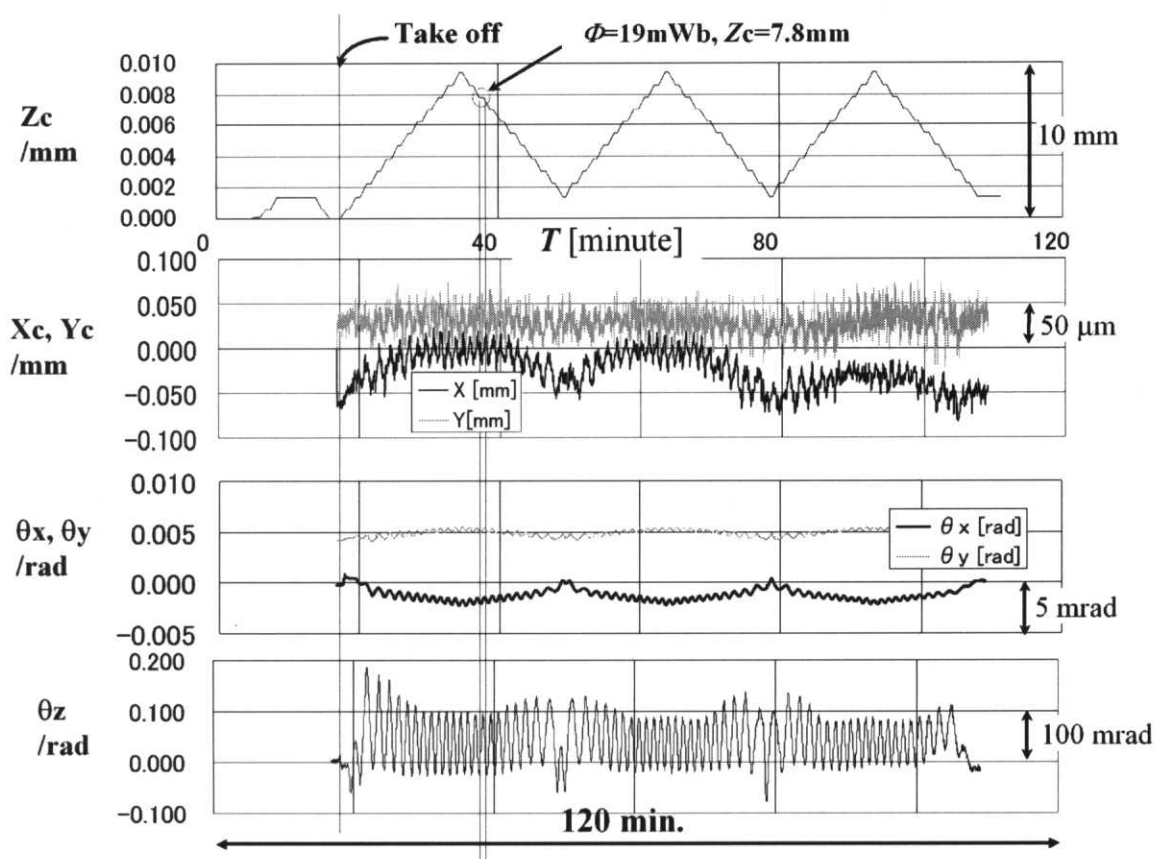


Fig.4.5 Change of the position ( $X_c$ ,  $Y_c$ ,  $Z_c$ ) and the attitude ( $\theta_x$ ,  $\theta_y$ ,  $\theta_z$ ) of the floating body during a magnetic levitation experiment

### 4.1.3 姿勢位置計測

開発した姿勢位置測定システムの評価のための磁気浮上実験を行った。約 1mWb ずつ合計 21 ステップ（最大値 21mWb）コイルへ充磁していき、各磁束において約 0.5 分間の磁束一定領域を設けた。片道約 30 分で、約 10mm の高さまで 3 往復させた。

Fig.4.5 に、浮上体に設置したコーナーキューブプリズムの光学的頂点の位置( $X_0, Y_0, Z_0$ )、及び、姿勢( $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ )の測定結果を示す。この例では、約 10mm の高さまで 3 往復させている。姿勢( $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ )、および、水平面内位置( $X_0, Y_0$ )は、浮上とともに周期約 1 分間で振動している。また、それらの中心値は、浮上高さに依存している。ただし、3 往復目における  $X_0$  において顕著に見られるように、軌道の乗り換えと思われる現象も観測されている。

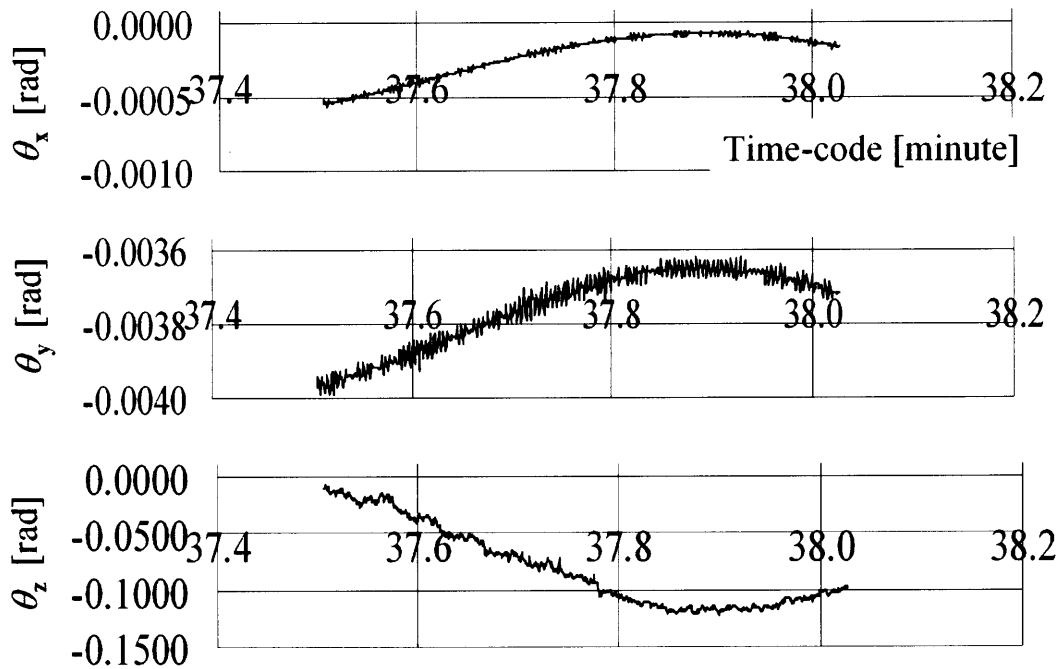


Fig.4.6 Change of the angles ( $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ ) of the floating body during  $\Phi=19\text{mWb}$

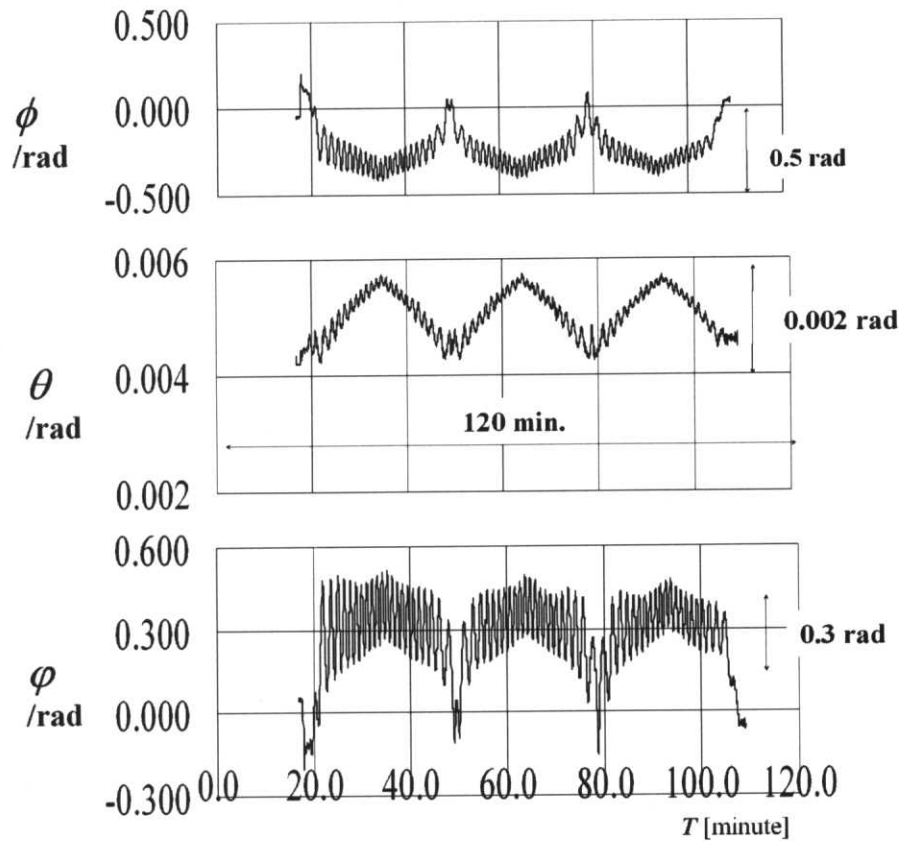


Fig.4.7 Change of the Eulerian angles ( $\phi$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$ ) of the floating body during a magnetic levitation experiment

Fig.4.6 に、Fig.4.5 の 1 往復目下りの  $\Phi=19\text{mWb}$  のステップにおける、姿勢変化の様子を抜き出して示す。周期約 1 分のゆっくりとした振動の上に、さらに、周期 1/4 秒程度の振動が重なっていることが観測される。

Fig.4.7 に、Fig.4.5 の姿勢( $\theta_x$ ,  $\theta_y$ ,  $\theta_z$ )を、前述の変換式を用いてオイラー角に変換した場合の様子を示す。

Table 4.1 に、浮上高さ 0-10mm における、姿勢位置( $\theta_x$ ,  $\theta_y$ ,  $\theta_z$ ,  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$ )の測定における不確かさをまとめて示す。姿勢 ( $\theta_x$ ,  $\theta_y$ ,  $\theta_z$ ) 測定における不確かさは、前述の通りである。水平面内移動の測定に関する不確かさ  $u_{XY}$  は、画像計測分解能が約  $5\mu\text{m}$  であり、かつ、浮上高さを 10mm に対する実像系の光軸設定の不確かさが  $20\mu\text{m}$  であることより、次式のようになる。

Table 4.1 The uncertainties in  $(\theta_x, \theta_y, \theta_z, X_0, Y_0, Z_0)$

	$u_c$ : Combined standard uncertainty
$\theta_x$ /rad	$5 \times 10^{-5}$
$\theta_y$ /rad	
$\theta_z$ /rad	$5 \times 10^{-3}$
$X_0$ /m	$[5^2 + (20 \times (Z_0/0.01))^2]^{0.5} \times 10^{-6}$
$Y_0$ /m	
$Z_0$ /m	$5 \times 10^{-9}$

$$u_{xy} = \sqrt{5^2 + \left(20 \times \frac{Z_0}{0.01}\right)^2} \times 10^{-6} \quad (4.2)$$

また、光波干渉計によるコーナーキューブプリズムの鉛直変位測定における不確かさは、約 5nm と推定される。

以上、本測定システムにより、磁気浮上中の超伝導浮上体の剛体としての位置と姿勢の全 6 自由度( $X_0, Y_0, Z_0, \theta_x, \theta_y, \theta_z$ ) を同時計測できることを示した。

#### 4.1.4 浮上体の重心高さの推定

浮上体の重心の鉛直変位  $Z_G$  を知るためには、以下のパラメータを知る必要がある。

- a) 浮上体に積載されたコーナーキューブプリズムの光学的頂点  $O_C$  の鉛直変位： $Z_0$ .
- b) 浮上体の姿勢： $(\phi, \theta, \psi)$
- c) 浮上体重心  $G_C$  の  $O_C$  に対する相対位置： $(\xi, \eta, \zeta) = (\xi_G, \eta_G, \zeta_G)$

浮上体重心の鉛直変位  $Z_G$  は前述の (4.1) 式で表される、

上記、a), b) は、Fig.4.1 に示した姿勢・位置測定システムにより測定される。上記 c) については、次の2つの方法が考えられる。

- a) 磁気浮上実験中のエネルギーのバランスを用いる方法<sup>76)</sup>.
- b) 室温中で機械式天秤を用いて測定する方法<sup>77)</sup>.

後者の方法では、機械式天秤の接点（ナイフエッジ、あるいは、ヒンジ）の精度の問題に加え、室温と液体ヘリウム温度での熱膨張による浮上体形状の変化の問題がある。さらには、浮上体を構成する複数の部品が、特にクライオスタットへの装着作業時における機械的振動により動いてしまう可能性が残る。

ここでは、磁気浮上実験中の相対位置を直接求めることができる後者を採用した。本方法が、エネルギーバランスを乱す大きな要因が存在しない場合に限り有効である。エネルギーバランスを乱す要因として以下があげられる。

- a) 電氣的仕事率(electrical joule)に対する機械的仕事率(mechanical joule)の比(scaling factor)： $K_{\text{joule}}$ .
- b) マイスナー効果の不完全性.
- c) 複数の浮上軌道間の軌道乗り換え.
- d) 各物量測定における測定誤差.

現時点においては、マイスナー効果の不完全性と平衡軌道乗り換えの問題は、無視できない。したがって、姿勢変化の影響を強調して取り出す手法が要求される。この観点から、

姿勢制御用補助コイルの導入は有効と考えられるが、これには磁気浮上システムの大掛かりな作り直しが伴う。ここでは現状の磁気浮上システム、磁束一定のステップ内という条件付きで取り出した自然に発生している振動を利用して、相対位置  $(\xi_G, \eta_G, \zeta_G)$  を推定することを試みる。

Fig.4.8 にある磁気浮上実験における浮上体の姿勢位置  $(\theta_x, \theta_y, \theta_z, X_0, Y_0, Z_0)$ 、コイルに鎖交する磁束  $\phi$ 、および、コイル電流  $i$  の変化の様子を示す。オイラー角は前述のように計算できる。それぞれの磁束一定ステップにおいて、 $(\phi, i, Z_0)$  を、平均時間約3秒で10組づつ測定した。

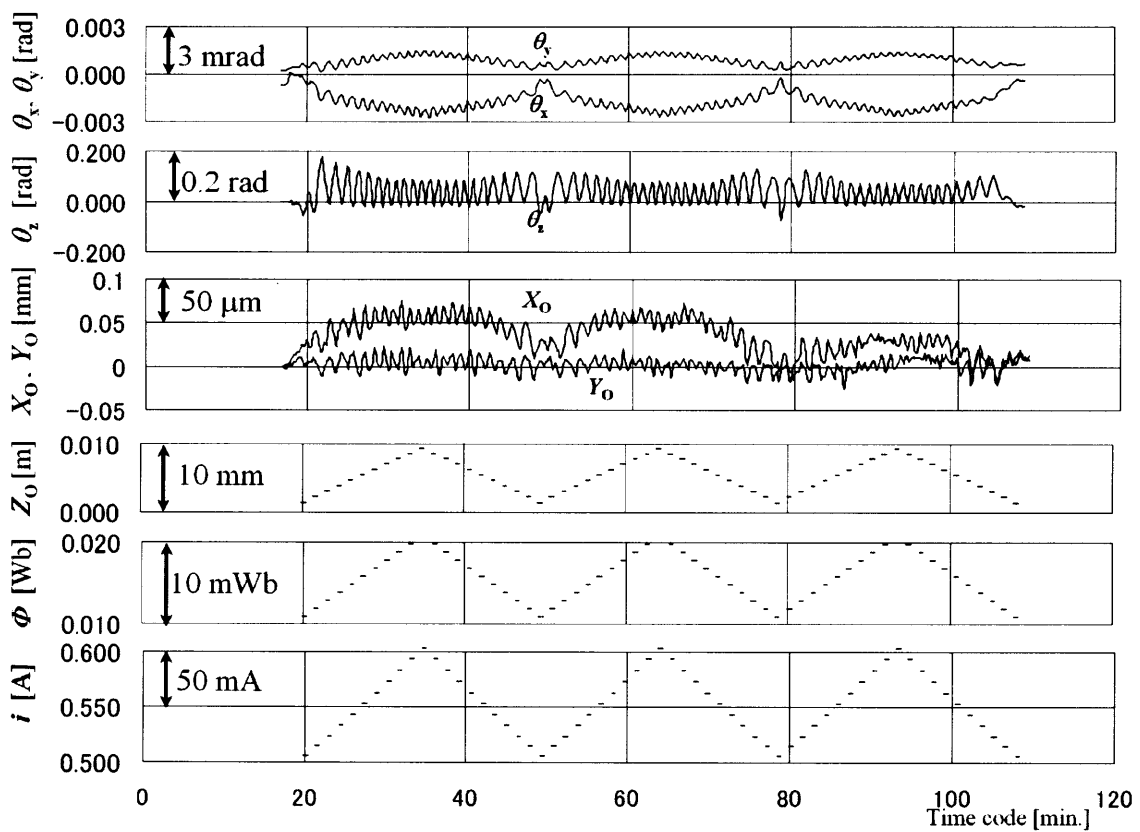


Fig. 4.8 Changes in  $(\theta_x, \theta_y, \theta_z, X_0, Y_0, Z_0, \phi, i)$  during a levitation experiment



Fig.4.9 に磁束一定の各ステップから抜き出したデータのオイラー角の分布を示す。磁束一定の条件下では、次式が成り立つ。

$$1/2\Phi \delta i + m g \delta Z_G + \delta E_k + \delta E_{\text{other}} = 0, \quad (4.3)$$

ここで、 $\delta E_k$  は浮上体の運動エネルギーの変化 ( $1/2 \delta (m v_x^2 + m v_y^2 + m v_z^2 + I_x \omega_x^2 + I_y \omega_y^2 + I_z \omega_z^2)$ ),  $\delta E_{\text{other}}$  は浮上体が動くことによりコイルフレーム他の金属面で発生する誘導電流による損失, 浮上体に対する熱交換用希薄ヘリウムガスの流体抵抗, 地面振動による影響, 弾塑性歪エネルギーの変化, などを含む。  $v, i$  および  $\omega$  は, それぞれ, 重心  $G_c$  の速度成分, 慣性モーメント, 角速度を表す。添え字  $\delta$  は差分を表し, 添え字  $x, y, z$  は座標軸を表す。

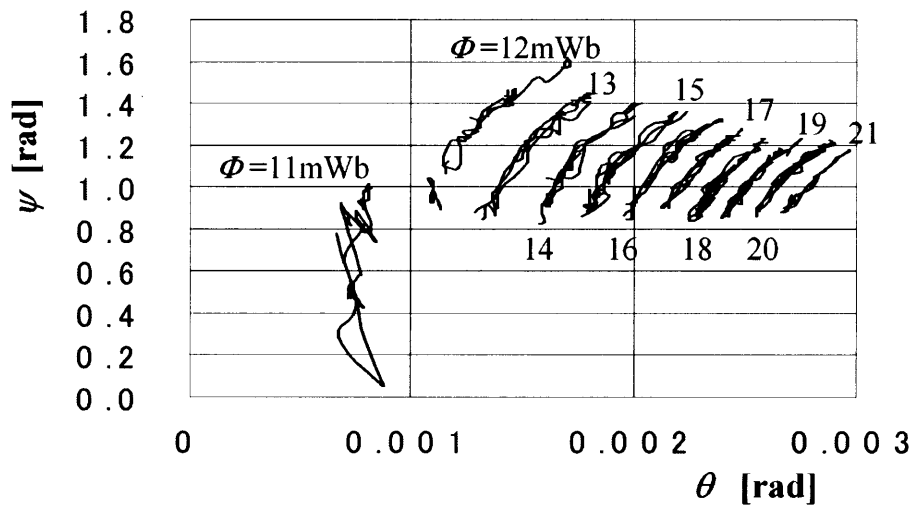


Fig. 4.9 Change in  $\theta$ - $\psi$  under the condition of constant  $\Phi$

振動の振幅が十分に小さく, かつ, 重力に対する電磁場のポテンシャル形状が対称性が

よく、かつ、各パラメータがその振動中心で測定される場合には、振動の運動エネルギーは無視できる。

$\delta E_k$  および、 $\delta E_{\text{other}}$  が無視できる場合、(4.3) 式は以下ようになる。

$$1/2 \Phi \delta i + m g \delta Z_G = 0. \quad (4.4)$$

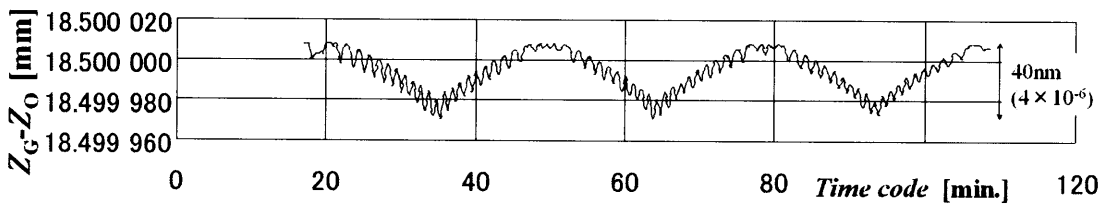
一方、 $\delta E_k$ 、において支配的である、周期約 1 分の Z 軸周りの回転運動エネルギー  $1/2 \delta (I_z \omega_z^2)$  を考慮した場合は、以下ようになる。

$$1/2 \Phi \delta i + m g \delta Z_G + 1/2 I_z \delta (\omega_z^2) = 0. \quad (4.5)$$

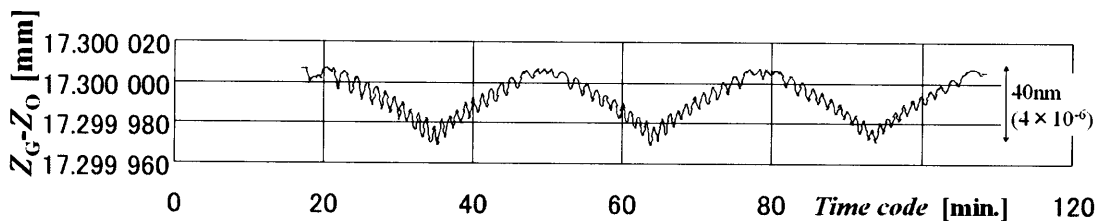
(4.1) 式を、(4.4) 式、または、(4.5) 式に代入することにより、相対位置( $\xi_G, \eta_G, \zeta_G$ )を3つの未知数としてもつ方程式が導かれる。

$$\begin{aligned} \delta(-\sin\theta \cos\psi) \xi_G + \delta(\sin\theta \sin\psi) \eta_G + \delta(\cos\theta) \zeta_G \\ = - \Phi \delta i / 2mg - \delta Z_0 \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} \delta(-\sin\theta \cos\psi) \xi_G + \delta(\sin\theta \sin\psi) \eta_G + \delta(\cos\theta) \zeta_G \\ = - \Phi \delta i / 2mg - \delta Z_0 - I_z \delta (\omega_z^2) / 2mg. \end{aligned} \quad (4.7)$$



(a) Excluding  $1/2 I_z \omega_z^2$  from the energy equation



(b) Including  $1/2 I_z \omega_z^2$  in the energy equation

Fig. 4.10 Change in ( $Z_G - Z_0$ ) in the levitation experiment

Fig.4.8 に示した磁気浮上実験における磁束が一定の 61 段のステップそれぞれについて、10 組の $(\phi, i, Z_0)$ のうち違いに隣接するものの差分をとることにより、9つの方程式が得られる。全部で549本の方程式が得られ、これを最小二乗法により解く。磁束一定のステップ内では、磁束が 0mWb から 21mWb まで変化する全領域を対象とするときと比べ、姿勢変化により引き起こされる見かけ上のエネルギー変化の、コイル電流変化、あるいは、浮上高さ変化に起因するエネルギー変化に対する割合がずっと小さいと考えられる。

これら2つのケースについて求めた重心の測定点に対する相対位置  $(\xi_G, \eta_G, \zeta_G)$  を、Table 4.2 に示す。Z 軸周りの回転エネルギー  $1/2 \delta(I_z \omega_z^2)$ ,  $(\xi_G, \eta_G, \zeta_G)$  を含めた場合には、推定された相対位置は、浮上体の形状、密度分布の設計から計算した  $(\xi_G, \eta_G, \zeta_G) = (0.0 \pm 0.1, 0.0 \pm 0.1, 16.9 \pm 1.0)$  [mm] と一致した。Fig. 4.10 に、Table 4.2 示した相対位置に基づいて、磁気浮上実験中の浮上体の重心の、コーナーキューブプリズムの光学的頂点に対する鉛直距離の変化の様子を示す。両方のケースにおいて、磁気浮上実験中に、姿勢変化に伴い、重心は測定点に対して約 40 nm (全浮上高さ 10mm に対して  $4 \times 10^{-6}$ ) 変化している。

Table 4.2  $(\xi_G, \eta_G, \zeta_G)$  determined by the least squares method

	<i>Exclude</i> $1/2 I_z \omega_z^2$	<i>Include</i> $1/2 I_z \omega_z^2$
$\xi_G / \mu\text{m}$	-8.6	-7.5
$\eta_G / \mu\text{m}$	15.7	13.5
$\zeta_G / \text{mm}$	18.5	17.3

Table 4.1 に示したように、浮上高さ 0-10mm における、姿勢位置  $(\theta_x, \theta_y, \theta_z, X_0, Y_0, Z_0)$  の測定における不確かさをまとめて示す。これらの不確かさは、Fig.4.8 に示した  $\theta - \psi$  の測

定値に対して，その全変化量の約5%の不確かさをもたらす。

重心高さの測定における不確かさ要因は，以下のようなものである。(4.1)式参照。

- 1) コーナーキューブプリズムの光学的頂点  $O_c$  の鉛直変位  $Z$  の測定における標準不確かさ  $u_1$  は，約  $5 \text{ nm}$  ( $5 \times 10^{-6}$ ) である。この不確かさは主として，干渉計の信号光の鉛直設定における不確かさが約  $0.05 \text{ mrad}$  であることと， $O_c$  の水平面内移動が約  $100 \mu\text{m}$  であることに起因する。
- 2) 重心に対する光学的頂点  $O_c$  の変化， $(Z_G - Z_0)$ ，の推定における標準不確かさは， $u_2$ ，以下により約  $11 \text{ nm}$  ( $1.1 \times 10^{-6}$ ) であると見積もられる。
  - A. 最小二乗法の残差：  $10 \text{ nm}$  ( $1 \times 10^{-6}$  of  $10 \text{ mm}$ )。
  - B. (4.6) 式，および，(4.7) 式の右辺の不確かさ：  $5 \text{ nm}$ 。
  - C. オイラー角 $(\theta - \psi)$ 測定の不確かさ：全変化量の約5%

したがって，浮上体の重心鉛直変位推定における結合標準不確かさ， $u_c$ ，は，約  $11 \text{ nm}$  と見積もられ，これは全浮上量  $10 \text{ mm}$  の約  $1.1 \times 10^{-6}$  である。

#### 4.1.5 まとめ

超伝導浮上体の重心高さ変化量の測定を 1ppm( $10^{-6}$ )程度の相対標準不確かさで行うことを可能とする一連の研究開発を行った。主な研究開発成果は以下の様である。

- (1) クライオスタット内の浮上体の姿勢・位置全 6 自由度を同時に測定できる光学計測システムを考案・開発した。また、本方法の一般の光波干渉測長システムへの適用が、有効であることを示した。
- (2) この光学計測システムを用いた( $\theta_x, \theta_y$ )の測定における結合標準不確かさは 0.05 mrad, ( $\theta_z$ )の測定における結合標準不確かさは 5 mrad である。
- (3) 姿勢位置データをエネルギー方程式に代入して実験環境下 (=液体ヘリウム温度)での浮上体の重心と測定点 (コーナーキューブプリズムの光学的頂点) の相対位置を推定する方法を考案・開発した。
- (4) この推定方法により、浮上体の重心鉛直変位を結合標準不確かさ約 11 nm (全浮上量 10mm の約  $1.1 \times 10^{-6}$ ) で推定できることを示した。

今後の課題としては、以下のようなものが挙げられる。まず、前節で述べた ( $Z_G - Z_O$ ) の推定においては、エネルギー方程式を最小二乗法で解く上での精度は、姿勢( $\phi, \theta, \psi$ )の自由振動のモードと振幅に依存する。方程式が解けない振動モード、精度が十分に出ない小さな振幅であることもありうる。何らかの姿勢制御手段が導入されれば、前節で開発したエネルギー方程式を用いる方法は、ずっと扱いやすいものになるだろう。

次に、姿勢 ( $\phi, \theta, \psi$ ) と重心の相対位置 ( $\xi_G, \eta_G, \zeta_G$ ) の絶対値とその不確かさは、重心  $G_c$  と光学的頂点  $O_c$  の高さの差( $G_c - O_c$ )を推定する上で重要である。これの向上に向けた将来展望は以下のようなものである。

- (1) 姿勢 ( $\phi, \theta, \psi$ ) の変化を小さくすること： 浮上高さに応じた姿勢の安定点 (=振動中心) の変化については、コイル=浮上体系の加工精度向上、コイルフレームの初期角設定の高度化、超伝導磁気シールドの形状と配置の工夫などが計画されている。

また、自由振動に対する除振手段の導入も検討されている。また、後節で述べる開発中の2基目の磁気浮上システムでは、超伝導直動軸受の研究開発がまず行われる。

- (2) 重心  $G_c$  を光学的頂点  $O_c$  に一致させること：浮上体へ重心位置調整用の微細分銅を取り付けることが、浮上体重心位置測定用の天秤機構の開発とともに検討されている。その調整は室温で行われるので、熱膨張の影響についての考慮はもちろん必要であり、浮上体のすべての部品を単一素材で製作し、かつ、互いに結合するところが一つの解決策である。
- (3) 相対位置  $(\xi_G, \eta_G, \zeta_G)$  の測定における不確かさを小さくすること：姿勢位置測定システムの改良が計画されている。
- (4) 相対位置  $(\xi_G, \eta_G, \zeta_G)$  の推定における不確かさを小さくすること：相対位置を推定するための実験は、姿勢変化を大きくとるために、本実験とは別に行うことが望ましい。その時、自由振動を大きくするために初期振動を静的に与える手段、あるいは、自由振動に対して動的な制御を加える手段の導入が検討されている。

## 4.2. 浮上体質量の測定

空気の浮力を補正なしで、1ppm ( $10^{-6}$ ) より小さな不確かさで、浮上体質量を測定するシステムを開発した。磁気浮上実験は、液体ヘリウム温度、希薄ヘリウムガス雰囲気下で行われる。一方、現在、質量標準は、常温、大気圧中におかれる国際キログラム原器の質量値で定義されている。したがって、大きな表面積を持ち、かつ、密度の異なる部品で構成された浮上体の浮上実験中の質量値を推定するに当たっては、標準分銅および浮上体双方の表面でのガスの吸着、放出、吸蔵、および、浮力について考慮する必要がある。本節では質量測定システムの概要、将来展望などについて述べる。

#### 4.2.1 測定原理

大気圧中において標準分銅と密度の異なる物体の質量を 1ppm ( $10^{-6}$ ) より小さな不確かさで測定するためには、被測定物体、および、測定雰囲気（希薄ヘリウム）の密度を知り、被測定物体および標準分銅に作用する浮力を補正する必要がある。しかしながら、異なる材質の部品で構成され、かつ、デリケートな構造である、超伝導浮上体の密度を測定することは難しい。浮上体は、コーン形状のりん青銅（約 18 g）の外表面に超伝導膜として鉛めっきが施され、その内側にアルミニウム製の光学素子ホルダーが置かれている。光学素子ホルダーには、コーナーキューブプリズムとリング形状の平面鏡が載せられる。

浮上体の質量は、約 25.032 g であり、本節ではこの質量値を  $m$  と表すことにする。浮上体の推定平均密度は約  $5\text{g/cm}^3$ 、ステンレス鋼製の標準分銅の密度は約  $7.8\text{g/cm}^3$  であり、大気中での比較測定では、浮力補正なしの場合には誤差の割合が 100ppm ( $10^{-4}$ ) 程度生じる。このため、1ppm ( $10^{-6}$ ) 程度以下の不確かさでの測定を行うためには、1% 程度の不確かさで浮力の大きさを見積もることが必要となるが、複数の浮上体の平均密度をこの不確かさで知ることは困難である。さらに、表面積が約  $150\text{cm}^2$  程度ある浮上体の、実験環境（希薄ヘリウム雰囲気、液体ヘリウム温度）と大気中とでのガス吸着による質量変化は  $10^{-6} m (= 25 \mu\text{g})$  より大きいと見積もられる。

一方、室温、200 Pa のヘリウム雰囲気下では、浮上体に作用する浮力の重力に対する割合は、0.1ppm ( $0.1 \times 10^{-6}$ ) 程度であり、この条件下では浮力による影響を無視できることが分かる。また、標準分銅を室温、空気中から、この条件（室温、200Pa のヘリウム雰囲気）下に移動させたときの気体分子吸着量の変化による質量変化は、 $10\mu\text{g}$  (0.4ppm) より小さいと見積もられる。さらに、表面積の大きな浮上体についても、磁気浮上実験環境から質量比較装置までの移送経路を含めてヘリウム雰囲気を保持することにより、浮上体表面に吸着するガスをヘリウムのみとすることができれば、ヘリウムの吸着は高々 2 層程度と推定されるので、質量変化量は  $1\mu\text{g}$  (0.04ppm) 程度以下となり無視できる<sup>24)-30)</sup>。



#### 4.2.2 質量比較測定装置

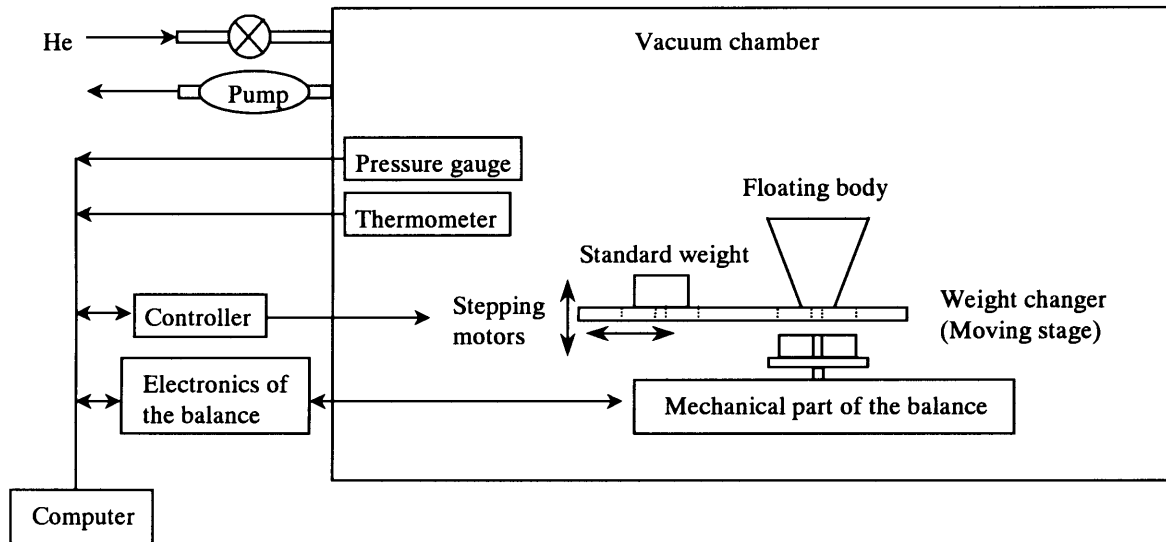


Fig.4.11 Schematic of the mass comparator

前項で述べた背景を考慮し、浮上体と標準分銅の質量を、室温、希薄ヘリウム雰囲気下で比較測定するマスコンパレータを開発することとした。Fig.4.11 に示すような市販の電子天秤（容量 32g, 分解能 10 $\mu$ g, Model:ER-182A, A & D(株)製）とステッピングモータ駆動の荷重交換ステージを簡易真空槽の中に入れて、希薄ヘリウム雰囲気下で標準分銅と浮上体の質量比較装置を構成した。電子天秤の電気系は、自己加熱によるアウトガスを避ける目的で真空チャンバーの外に出してある。天秤、荷重交換ステージ、温度計、真空計は、コンピュータにより制御される。真空チャンバーはスクロールポンプで真空引きされる。電子天秤は、接点に金属薄ヒンジを有し、コイルと永久磁石により荷重と釣り合う力を発生さ

せる。チャンパー内に残された電気系からの発熱を逃がす目的で、チャンパー内のヘリウム圧力を 1 hPa 以上と設定した。

本質量比較システム用に 3 個の公称質量値 25 g のステンレススチール製標準分銅が用意され、それらは、日本国の国家質量標準に対して標準不確かさ 7.8  $\mu\text{g}$  ( 相対標準不確かさ  $0.3 \times 10^{-6}$  ) で校正された。電子天秤のスケールの非直線性を見積りかつ低減する目的で、1 mg から 50 mg までの補助分銅が用意された。各補助分銅は、国家標準に対して標準不確かさ 2.5  $\mu\text{g}$  で校正された。これら 2 つの校正における不確かさは主として用いた日本国標準分銅の不確かさに起因する。

浮上体を、クライオスタットとマスコンパレータの収められた真空チャンパーの間を移送する際には、簡易ガスバッグを用いて、浮上体が大気に直接接触することのないようにした。

### 4.2.3 浮上体質量の測定

測定の手順は以下のものである。

- 1) ゼロ点校正：負荷の前後でゼロ点を読む。
- 2) スケールファクター校正：浮上体測定の前後に標準分銅を測定
- 3) 平均化：浮上体質量は2 – 3秒間隔で測定した数個 – 数十個のデータの平均値を用いる。

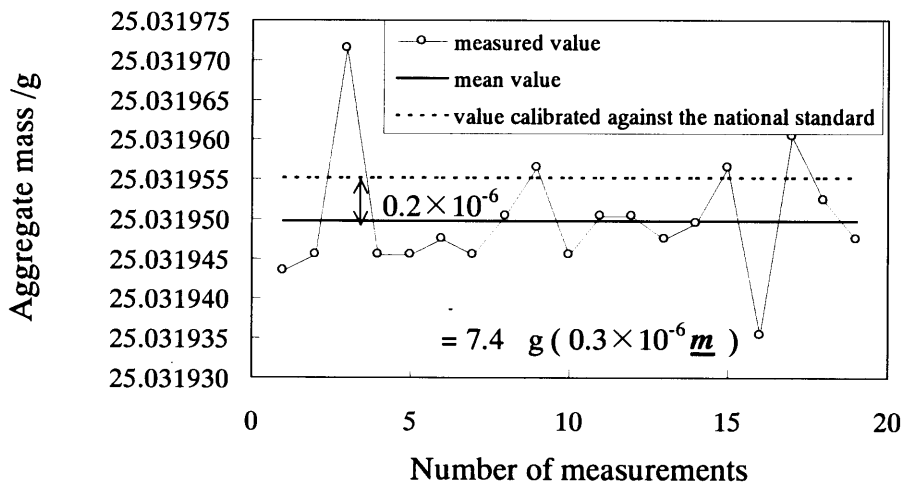


Fig.4.12 Mass measurement of a combination of the standard weights 25.032 g in mass using a 25 g standard weight.

浮上体質量の測定では、約 25.000 g の標準分銅を用いて、約 25.032 g の浮上体の質量測定を行う。この時に発生するスケールファクターに起因する誤差を評価するために、標準分銅を組み合わせて作った 25.032 g の質量を、25.000 g の標準分銅を用いて測定することを行った。Fig.4.12 に結果を示す。測定は、チャンバー内を 200Pa のヘリウムガスで満たした状態で行った。チャンバー内のアウトガスレートは 約 0.1Pa/min である。測定の標準偏差

は  $7.4 \mu\text{g}$  ( $0.3 \times 10^{-6} \text{ m}$ ) で、平均値は  $25.031950 \text{ g}$  である。校正値  $25.031955 \text{ g}$  との差は  $5 \mu\text{g}$  ( $0.2 \times 10^{-6} \text{ m}$ ) と小さい。標準分銅単体との差が  $0 \text{ mg}$  から  $32 \text{ mg}$  までの分銅の組み合わせについて、数回の測定を行った結果、測定値と校正値との差は  $20 \mu\text{g}$  ( $0.8 \times 10^{-6} \text{ m}$ ) より小さかった。たとえこの差が使用した電子天秤の不安定性あるいはスケールの非直線性が原因としても、 $25 \text{ g}$  の標準分銅を基準に  $32 \text{ mg}$  の差を有する物体（浮上体）を測定する際の不確かさは  $7 \mu\text{g}$  ( $0.3 \times 10^{-6} \text{ m}$ ) よりも小さいと推定できる。したがって、浮上体は、 $25 \text{ g}$  の標準分銅を基準としてスケールの直線性の補正なしに測定できる。

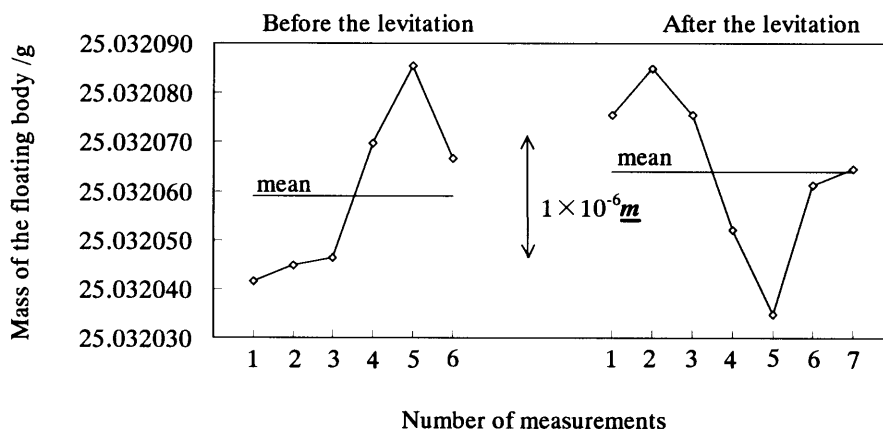


Fig.4.13 Mass measured before and after levitation

Fig. 4.13 に磁気浮上実験の前後での浮上体質量の測定結果を示す。各測定において、測定値の標準偏差は約  $0.6 \times 10^{-6} \text{ m}$  である。この時、磁気浮上実験の前後での測定値の平均値の差は、 $0.2 \times 10^{-6} \text{ m}$  であった。

#### 4.2.4 浮上体質量測定における不確かさ評価

開発した質量測定システムを用いて、2 hPa の希薄ヘリウム雰囲気、室温環境下で、公称質量値  $m = 25.032\text{g}$  の浮上体を、25g の標準分銅を用いて比較測定する際の不確かさ要因は以下が挙げられる。

- A. 公称値 25g の標準分銅の大気中における標準不確かさは  $8\ \mu\text{g}$  である。この不確かさは、校正に使用した日本国標準分銅の持つ不確かさと、校正操作における不確かさより、構成される。
- B. 標準分銅の、大気中と、2 hPa のヘリウム雰囲気中との質量変化は、 $3\ \mu\text{g}$  以下と推定される。この変化は、主として水蒸気などのガス吸着に起因する。
- C. 浮力補正を全く行わないことによる誤差は約  $2\ \mu\text{g}$  ( $0.07 \times 10^{-6} m$ ) である。
- D. 本測定システムにより、約 32 mg の質量差を持つ約 25g の物体間の質量差を比較測定する際の不確かさは約  $7\ \mu\text{g}$  ( $0.3 \times 10^{-6} m$ )、と推定される。

以上より、結合標準不確かさ  $u_c$  は、 $11\ \mu\text{g}$  ( $0.5 \times 10^{-6} m$ ) と推定される。

クライオスタットと質量測定システムの間での移送中の浮上体の質量値の変化に関しては、ガスバックを用いるなどして移送中も含め浮上体をずっとヘリウム雰囲気下におくことができれば、無視できると考えられる。しかしながら、どの程度の純度を保てばよいかなど、今後の研究の課題として残ることも多い。

#### 4.2.5 まとめ

1ppm ( $10^{-6}$ ) より小さな不確かさで、かつ、空気の浮力を補正なしで、浮上体質量の測定を可能とするシステムに関する検討・設計・開発を行った。計量研究所の磁気浮上プロトタイプシステムで用いられる浮上体（約 25g）の質量測定を行い、以下の結論を得た。

- (1) 標準分銅を室温、空気中から、この条件（室温、200Pa のヘリウム雰囲気）下に移動させたときの気体分子吸着量の変化による質量変化は、 $10\mu\text{g}$  (0.4ppm) より小さいと見積もられる。
- (2) 表面積の大きな浮上体についても、磁気浮上実験環境から質量比較装置までの移送経路を含めてヘリウム雰囲気を保持することにより、浮上体表面に吸着するガスをヘリウムのみとすることができれば、ヘリウムの吸着は高々 2 層程度と推定されるので、質量変化量は  $1\mu\text{g}$  (0.04ppm) 程度以下となり無視できる。
- (3) 浮上体と標準分銅の質量を、室温、希薄ヘリウム雰囲気下で比較測定するマスコンパレータにより、上記の要件は満たされる。ここでは、市販の電子天秤（容量 32g、分解能  $10\mu\text{g}$ 、Model:ER-182A、A & D(株)製）とステッピングモータ駆動の荷重交換ステージを簡易真空槽の中に入れて、希薄ヘリウム雰囲気下で標準分銅と浮上体の質量比較装置を構成した。
- (4) このシステムを用いて、浮上体の質量を、室温、200Pa のヘリウム雰囲気下において、1ppm より小さな不確かさで値付けできることを確認した。

本システムにより、浮上体の質量の定期校正を相対標準不確かさ  $10^{-6}$  で行っている。磁気浮上法の最終目標である 0.01ppm ( $10^{-8}$ ) レベルの測定に向けた今後の課題として以下が挙げられる。

- (1) 標準分銅のガス吸着量などにより変動する質量値の雰囲気依存性を評価すること。  
これは、各国研究所で表面積と質量の比の異なる複数の分銅を用いて研究が進められているが、表面状態、履歴に対する依存性が大きく、十分に小さな不確かさでの

評価は難しいようである。この研究は、次世代質量標準が真空中で定義される場合、定義変更前においては現行質量標準のモニタリングのために、定義変更後はワーキングスタンダードとして残るであろう分銅群の校正に際し、必要となってくる。

- (2) より高精度な電子天秤の導入、および、不確かさの小さな高次の国家標準分銅の使用。
- (3) 浮上体への分銅乗せ降し機構の導入。質量値の「キャリア」としては、表面積の大きく、かつ、荒い表面を持つ浮上体ではなく、表面積が小さく、かつ、表面研磨された標準分銅を用いることが重要である。
- (4) クライオスタット上方の室温部におかれた室温の標準分銅と、浮上体に乗せ降しされる液体ヘリウム温度の標準分銅との比較測定を可能とする、天秤メカニズムの導入を検討している。

### 4.3 数値計算アルゴリズムの開発

次世代の超伝導磁気浮上システムの設計支援を目的として、ビオサバールの法則(Biot and Savart's law)に基づく簡略なZ軸対称の数値計算アルゴリズムを開発した。無限に薄いリング電流の集合体で、浮上体のマイスナー面、および、コイルを代表する。計算で得られた浮上実験における磁束 $\Phi$ 、コイル電流 $i$ 、鉛直変位 $Z_0$ の関係は、実験とよく一致した。本数値計算アルゴリズムは、磁気浮上システムに限らず、マイスナー面とコイルを有する一般の軸対称のシステムに対して有効である。



### 4.3.1 解析アルゴリズム

マイスナー効果の完全性は、磁気浮上実験に重要であり、磁気浮上システムを構成する浮上体、コイルなどに用いられる超伝導材料に作用する磁場を評価することは、コイル＝浮上体系の設計の最適化において重要である。その意味で、数値計算アルゴリズムの開発は非常に有用である。軸対称のマイスナー面をリング電流とベクターポテンシャルで代表させる方法が提案されている<sup>79)-81)</sup>。ここでは、ビオサバールの法則を用いたより一般的で、かつ、簡略なアルゴリズムを提案する<sup>82)</sup>。

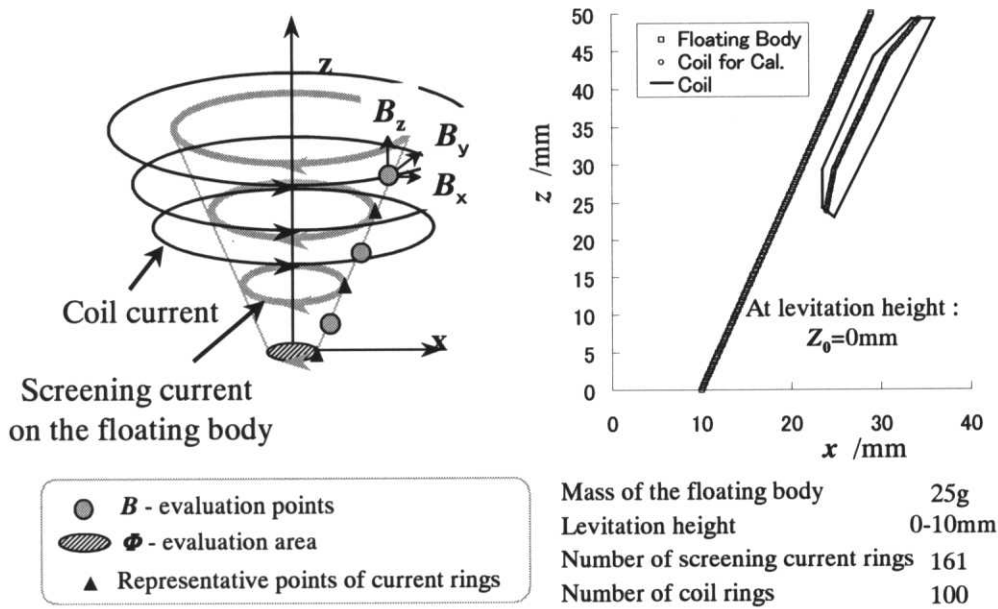


Fig. 4.14 Model of the floating body and the coil

Fig.4.14 に、無限に薄いリング電流の集合として近似された、浮上体のマイスナー面、および、コイルの模式図を示す。コイルの巻厚は無視し、各リング電流の電流値  $i$  は、コイル

電流  $I$ , コイル巻数  $N$ , リング電流  $n$  に対して,  $i = IN/n$  として設定した. マイスナー面上の遮蔽電流を代表するリング電流の電流値は, 一様ではなく, かつ, 未知であるが, これらは, 後述の境界条件に基づいて求めることができる. マイスナー面における遮蔽電流の侵入深さは考慮していない. この過程は, 幾何形状の寸法(dimension)が侵入深さよりもずっと大きな磁気浮上システムにおいては, 妥当である. **Fig.4.14** に示した浮上体は, 接地状態(初期状態)である浮上高さ  $Z_0=0$  mm のときを模式的に示している.

任意の半径  $r$  のリング形状の電流  $i$  が, 任意の位置につくる磁束密度  $B$  はビオサバール(Biot and Savart's law)の法則に従い, 以下のように表せる.

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{P_B}{P_B^3} i dl, \quad (4.8)$$

ここで,  $\mu_0$  は真空の透磁率,  $idl$  は電流要素,  $P_B$  は電流要素に対する磁場評価点に相対位置を表す. イタリック体の文字は物理量を表す. 本節では, 太字はベクトルを表すこととする.

すべてのリング電流の電流値が求められれば, 任意の場所における磁束密度  $B$  は, コイル電流により作られる成分  $B_{MC}$  と, 遮蔽電流により作られる成分  $B_S$ , の和として求められる.

$$\begin{aligned} B &= B_{MC} + B_S \\ &= \Sigma \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{P_{B,MC}}{P_{B,MC}^3} i_{MC} dl + \Sigma \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{P_{B,S}}{P_{B,S}^3} i_S dl ; \end{aligned} \quad (4.9)$$

ここで,  $\Sigma$  は当該する全て電流リングに対する合計を表し, 添え字 **MC** はコイル電流を, 添え字 **S** は遮蔽電流をそれぞれ表す.

浮上体のマイスナー面に対する境界条件は以下のものである.

- a. リング電流の中間位置におかれた磁束密度評価点, **B-evaluation points**, において, 磁束密度  $B (= B_{MC} + B_S)$  がマイスナー面に対して平行であること.
- b. リング電流を貫く磁束  $\Phi (= \int B dS)$  がゼロであること. この過程は中空の浮上体を貫く(トラップされる)磁束を規定する上で必要である. 今回の計算では, 浮上体のマイス

ナ一面を代表するリング電流のうちでもっとも下方に位置するものを、磁束評価リング、 $\Phi$ -evaluation ring, として選び、これを貫く磁束 $\Phi$ がゼロと設定した。

上記の境界条件の元で、遮蔽電流 $i_s$ の電流値の組み合わせが計算される。今回の計算では、未知数の数と方程式の数が等しくなるので、直接計算により解くことができる。

遮蔽電流要素に作用する電磁気力 $F$ は以下のように表される。

$$F = i_s dl \times B_s, \quad (4.10)$$

ここで、 $i_s dl$  はマイスナー面上の遮蔽電流要素、 $B_s$  はその点における磁束密度である。この磁束密度は、磁束密度評価点での値を線形内挿することにより求められる。

浮上体のそれぞれの浮上高さ $Z$ 、および、適当に定めたリング電流の電流値 $i_0$ に対して、上向きの方 $F_{z,i_0}$ 、および、コイルを貫く磁束、 $\Phi_{z,i_0}$ 、は以下のように計算される。

$$i = i_0 \left( \frac{M g}{F_{z,i_0}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.11)$$

$$\Phi = \Phi_{z,i_0} \left( \frac{M g}{F_{z,i_0}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (4.12)$$

ここで、 $M$  は浮上体の全質量、 $g$  は重力加速度である。これらの関係式は、磁束密度はコイル電流に比例し、力はコイル電流の二乗に比例するという事実に基づいている。

ベクトルポテンシャルの代わりにビオサバールの法則を用いることにより、計算アルゴリズムの簡略化、種々の問題への適応における簡便さがもたらされた。この利点は、コード修正を含めた計算時間の低減、一般的事例への適応における利便性につながる。

### 4.3.2 計算

質量 25g の浮上体について，最大浮上高さ 9mm，遮蔽電流リング数 161，コイル電流リング数 100 として，数値計算を行った．コイル断面の厚みは無視した．

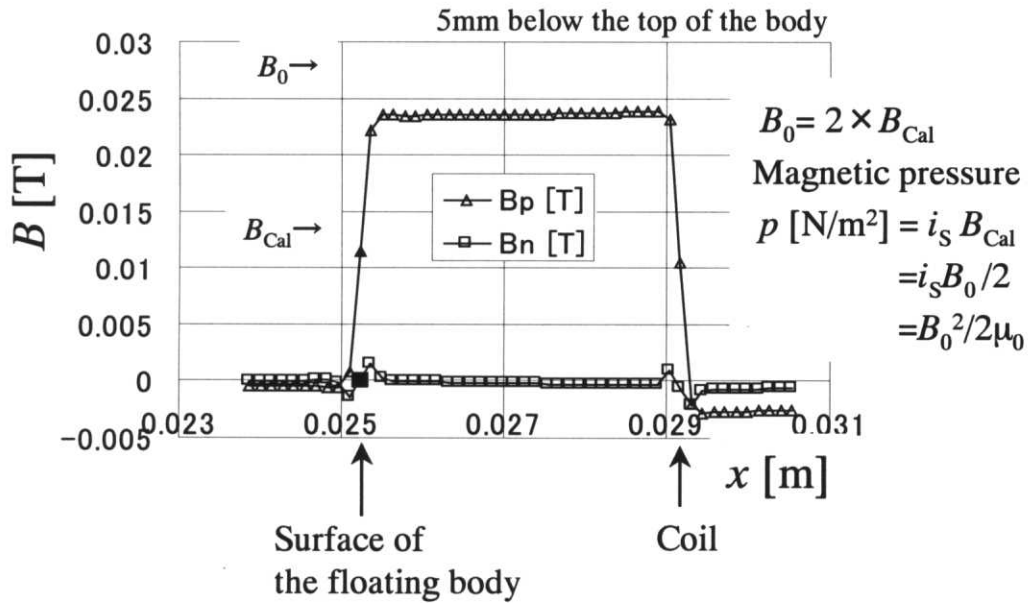


Fig.4.15 The distribution of  $B$  along the  $x$ -axis

Fig.4.15 に浮上高さ heights  $Z_0 = 0$  における，浮上体とコイル近傍における磁束密度分布を示す．進入深さを考慮していない今回の計算では浮上体表面の遮蔽電流点，および，コイル電流点の分布する線上において，磁束密度  $B$  の計算値はその前後の値の間中値となっている．

Fig. 4.16 に浮上高さ heights  $Z_0 = 0, 4$  and  $8$  mm における，浮上体表面における磁束密度分布を示す．浮上体表面での磁束密度  $B$  の最大値は 24 mT であり，この値は，4.2K における鉛バルク材料の臨界磁束密度の 53mT よりは小さい．しかしながら，浮上体表面を構成する

実際の材料の臨界値は、超伝導材料の純度および加工方法により大きく影響されるので、鉛のバルク材料における値 53mT は参考値である。したがって、磁気浮上システム設計においては、ここの事例に対して、注意深く検討を行う必要がある。

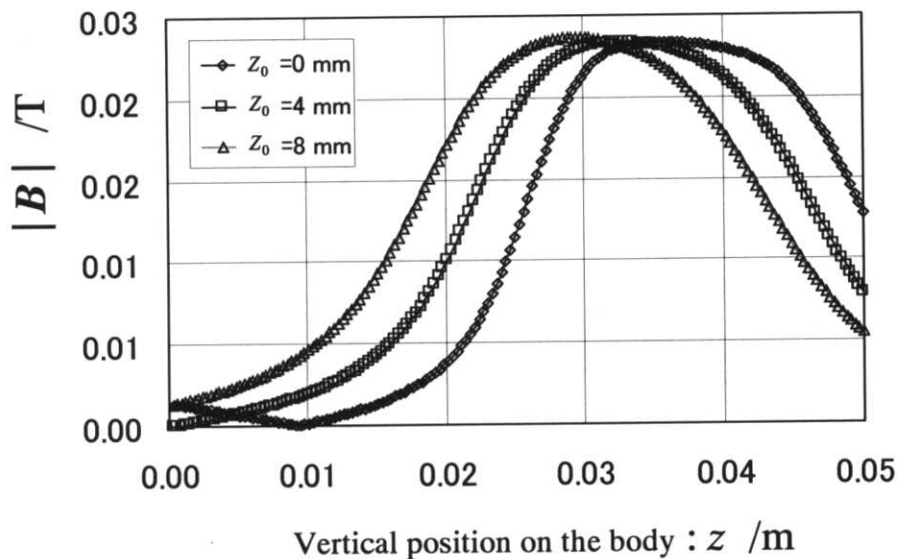


Fig.4.16 Distribution of  $|B|$  on the body at  $Z_0=0, 4, 8$  mm

Fig. 4.17 に実験と計算における、浮上実験における主要なパラメータである、磁束  $\Phi$ 、コイル電流  $i$ 、浮上高さ  $Z_0$  について示す。実験において、これらのパラメータは、コイルを貫く磁束を十分長い時間一定に保持した状態で測定されている。図から読み取れるように、両者はだいたい一致している。これは、計算アルゴリズムの妥当性を示す指針となる。若干見られる不一致の原因は、コイル断面形状の厚みを無視したことに起因すると考えられる。

コイル系の投入された電気エネルギーからコイル系に蓄えられる磁場エネルギーを引い

た成分としての電磁気エネルギー $U_{ELEC}$ とは、磁気浮上法における理想的な条件の下では、すべて、浮上体の重力位置エネルギー $U_{SI}$ に変換されるので、両者は等しくなる。本計算結果では、これら2つの値、電磁気エネルギー $U_{ELEC}$ と浮上体の重力位置エネルギー $U_{SI}$ とは、3%以内で一致した。これも、計算アルゴリズムが妥当であることを示す指標の一つとなる。また、この若干の不一致は、コイルを貫く磁束をエリア内で磁束密度を数値積分して求める際の、要素分割数によるところが大きいと考えられる。

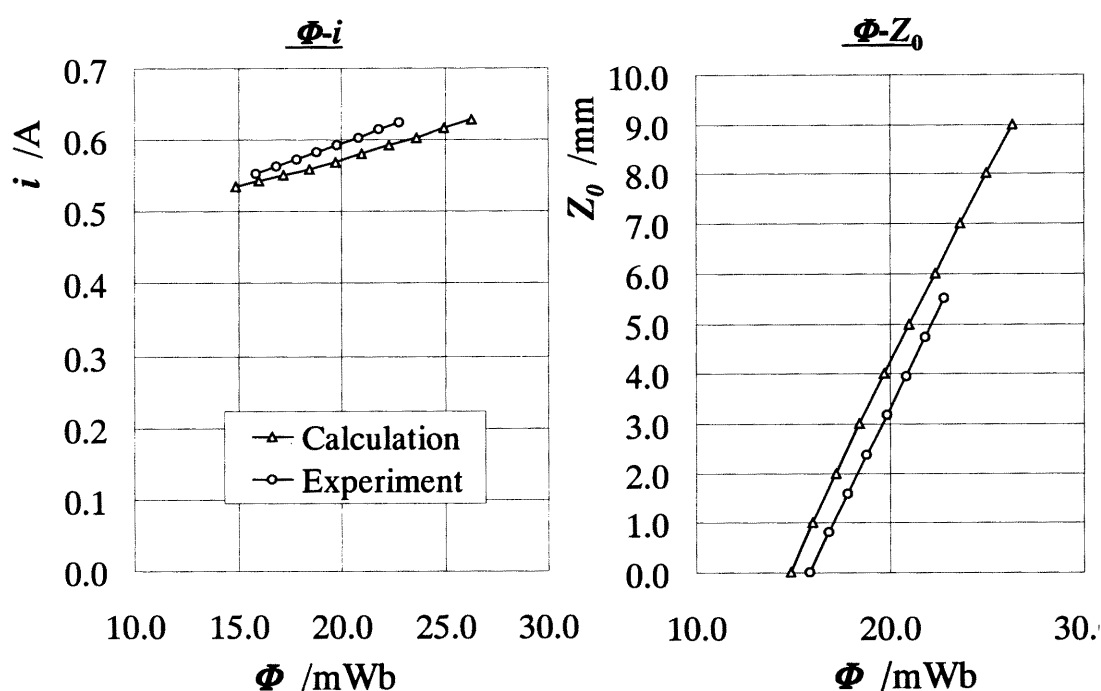


Fig. 4.17 The equilibrium trajectories of  $\Phi - i - Z_0$ .  
Results of calculation and experiment

小さな曲率を有する浮上体エッジ近傍における磁束密度、および、遮蔽電流密度を求め  
るためには、その曲率にたいして十分狭い間隔で遮蔽電流を代表するリング電流を配置す  
る必要がある。それにより、磁束密度の分布は広い平坦なマイスナー面上でのものとの近  
似が有効になる。

浮上体、および、コイルの要素分割数の最適値を知ることは難しいが、一つの方法とし

て、それらの変化が結果に与える影響をみることが挙げられる。

### 4.3.3 まとめ

軸対称の超伝導磁気浮上システムの数値シミュレーションを行う目的で、ビオパールの法則を直接用いた利便性の高い数値計算アルゴリズムを開発し、従来のプロトタイプシステムについて実験結果との比較を行い、以下の結論を得た。

- (1) 軸対称のマイスナー面をリング電流で近似し、その作る磁場をビオサパールの法則により求めることを特長とする簡略なアルゴリズムを提案し、それに基づく計算プログラムを作成した。
- (2) プロトタイプシステムにおける浮上体表面での磁束密度  $B$  の最大値は 24 mT であり、この値は、4.2K における鉛バルク材料の臨界磁束密度の 53mT より小さい。しかしながら、浮上体表面を構成する実際の材料の臨界値は、超伝導材料の純度および加工方法により大きく影響されるので、鉛のバルク材料における値 53mT は参考値である。したがって、磁気浮上システム設計においては、個々の事例に対して、注意深く検討を行う必要がある。
- (3) 磁束  $\Phi$ 、コイル電流  $i$ 、浮上高さ  $Z_0$  の関係は、実験結果と計算結果がほぼ一致した。これは、計算アルゴリズムの妥当性を示す指針の一つとなる。
- (4) コイル系の投入された電気エネルギーからコイル系に蓄えられる磁場エネルギーを引いた成分としての電磁気エネルギー  $U_{\text{ELEC}}$  と、浮上体の重力位置エネルギー  $U_{\text{SI}}$  は、3%以内で一致した。これは、計算アルゴリズムが妥当であることを示す指標の一つとなる。
- (5) 次世代磁気浮上システムのコイル=浮上体系の設計において、強力なツールとして威力を発揮することが期待される。すなわち、設計段階において、コイル=浮上体系における（コイル電流）—（浮上高さ）—（コイルを貫く磁束）の関係、さらには、浮上体表面（マイスナー面）における磁束密度分布を予測することにより、コイル=浮上体系の形状の最適化を図ることが可能になった。



- (6) 本計算アルゴリズムは、超伝導磁気シールドなどマイスナー面を含む軸対称システムに対する数値シミュレーションのツールとしても一般に利用できる。

#### 4.4 液体ヘリウムの自動移送システムの開発

磁気浮上実験システムは、超伝導遷移する際の磁束トラップを避け、かつ、浮上体＝コイルをはじめとする機構の変形を避ける為に、室温から液体ヘリウム温度への冷却に当たっては、熱ショックのないように数時間以上の時間をかけてゆっくりと冷却する。この作業を自動化することは、磁気浮上実験における困難さを低減する上できわめて有効なことである。そこで、室温のクライオスタットを、液体ヘリウム温度まで冷却し、さらに、液体ヘリウムで満たすまでの過程を、マスフローコントローラを用いて自動的に行うシステムを開発した。液体ヘリウムが溜り始めるまでは、マスフロー一定でガス冷却を行う。液体ヘリウムが溜り始めてからは、クライオスタットとストレージ・デュワの間の差圧が、トランスファーチューブによる高度差を乗り越えるの十分な値になるようにマスフローコントローラを制御する。マスフローコントローラ、圧力センサ、液面センサ、および、適当な制御ソフトウェアをロードしたコンピュータより構成されるシステムにより、通常の人手によるトランスファーチューブを用いての液体ヘリウムのトランスファー作業を自動化することができる。

#### 4.4.1 開発の必要性

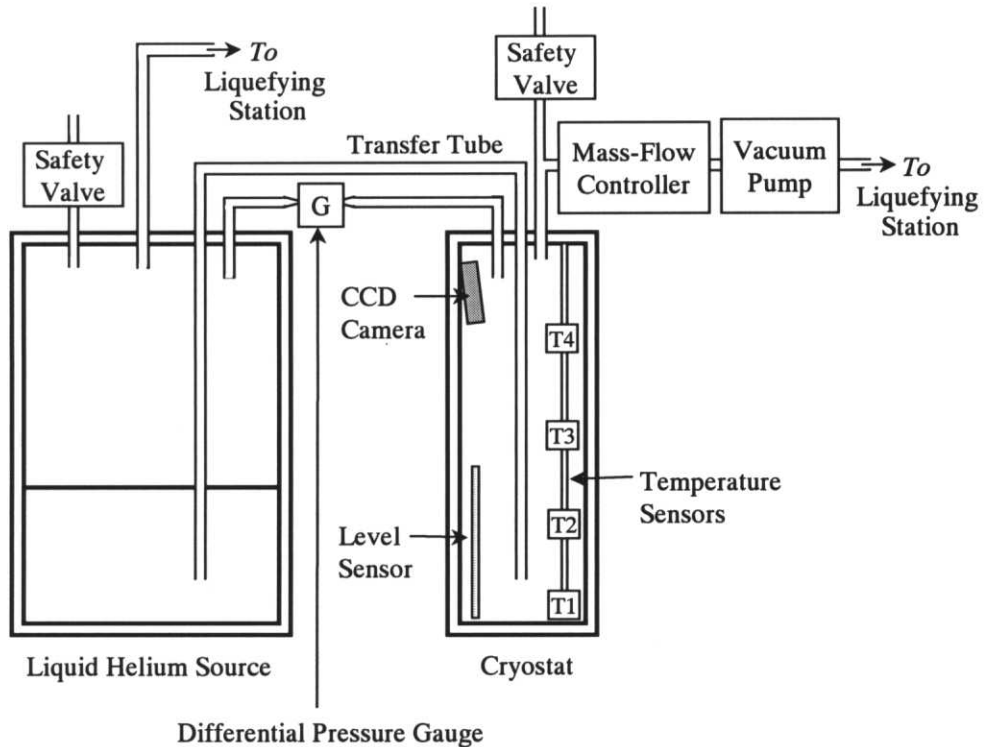


Fig.4.18 Experimental Setup

液体ヘリウムは、安定で一様な低温環境を実現するための冷媒として広く用いられている。液体ヘリウムを輸送、および、保存する目的で使用されるストレージ・デュワから、トランスファーチューブを介して液体ヘリウムを移送する方法として、ストレージ・デュワを加圧することがよく行われる。ポンプにより加圧されたヘリウムガスをストレージ・デュワをラフに加圧する目的で使用する液体ヘリウムの自動移送方法が開発されている<sup>83)</sup>。しかしながら、これらの方法は、熱ショックなしにゆっくりと冷却する目的には適していない。磁気浮上実験では、冷却プロセスはゆっくりと滑らかに行われる必要がある。磁気浮上実験システムには、繊細な機械的構造物である浮上体、コイルフレームや、磁束のトラ

ップを嫌う超伝導エレクトロニクスであるSQUIDやジョセフソン素子などが用いられる。冷却プロセスにおける大きな熱ショックは、機械的構造物の再調整、磁束のトラップによる超伝導エレクトロニクスの計測誤差などをもたらす。労力低減とともに、ヒューマンエラーを予防する上で、熱ショックのない自動移送方法の開発は是非とも必要である。

#### 4.4.2 手法

**Fig.4.18** に提案する方法に基づく実験装置の模式図を示す<sup>84)</sup>。クライオスタット（有沢製作所(株)製）は FRP 製で真空断熱層が一層あるのみで、従来のガラス製クライオスタットによく見られた液体窒素用の層を設けることなく直接液体ヘリウムを溜めることが可能なものである。クライオスタットの内径は 200mm、フランジ部を含めた深さは約 1200mm であり、メーカー仕様では深さ約 500mm の液体ヘリウムを溜めることができる。FRP 製であるので真空断熱層内でのアウトガス発生量は大きく、クライオスタット内部が一度常温に戻ってしまった場合は、真空引きをその都度行う必要がある。

蒸発ヘリウムガスのマスフローは、マスフローコントローラ“SEC-F450”(STEC 製)により制御される。このマスフローコントローラは、マスフローセンサと P Z T 駆動のバルブより構成されている。その制御レンジは、ヘリウムガスで 0 SLM から 40 SLM である。1 SLM は、圧力 1 atm、温度 0 °C における 1 l/min の流量と等しいマスフローである。マスフローコントローラの入側と出側との間に必要な圧力差を発生するように、マスフローコントローラの下流側に真空ポンプ（一般的なロータリポンプ）を接続している。ストレージ・デュワに対するクライオスタットの差圧は、容量 7 kPa の半導体歪ゲージを利用した差圧計により測定する。この差圧もまた、マスフローコントローラのマスフローの司令値を変更することにより制御する。液体ヘリウム用液面センサは、クライオスタット底面から 10 mm から 510 mm の位置に配置されている。ストレージ・デュワは再液化を行う回収センターに繋がった配管に直接接続される。この配管は外気の侵入を防ぐ目的で、大気圧よりも若干高い圧力が保持されている。クライオスタットには無人運転中の万一の事故に備え、安全弁が取り付けられている。

現象の理解を深める目的で、いくつかの付加的なセンサが実験システムに設置された。温度センサは、クライオスタット底面から 5mm、300mm、600mm、900mm の合計 4 箇所に設置されている。クライオスタット底部の様子は、クライオスタット上方に取り付け

られたCCDカメラで撮影されVTRに録画される。CCDカメラと並んで、照明用の投光器も設置されている。すべての測定器は LABVIEW をロードしたコンピュータにより制御される。

制御手順は、以下のようである。

1. トランスファーチューブがセットされた後、制御プログラムが起動され、全システムがコンピュータ制御される。
2. クライオスタット内に液体ヘリウムが溜まり始めるまでは、マスフローが一定になるように制御される。
3. 液体ヘリウムが溜り始めると、クライオスタット内とストレージ・デュワ内の差圧が一定となるように制御される。液の溜まり始めの検出は、後述のように、差圧の振動を観測することにより行われる。
4. 液体ヘリウムの液面が所定の値に達したら、差圧の設定がゼロにされる。これにより、液体ヘリウムの移送は停止する。

#### 4.4.3 実験

Fig.4.19 に液体ヘリウム移送実験の結果を例示する. また, Fig.4.20 に, 移送実験の初期と後期の様子を拡大して示す. クライオスタットに液体ヘリウムが溜まり始めるまでは, マスフローは 10SLM の一定に設定された. ストレージ・デュワの内部に対するクライオスタットの内部の差圧は, 自然発生的に振動する. 冷却期間中, この振動のモードと周期は変化するが, 最小値はほど一定となる. 他の実験結果から, マスフローの設定値が 5 SLM から 40 SLM までの広い範囲にわたり, このような振動が観測された.

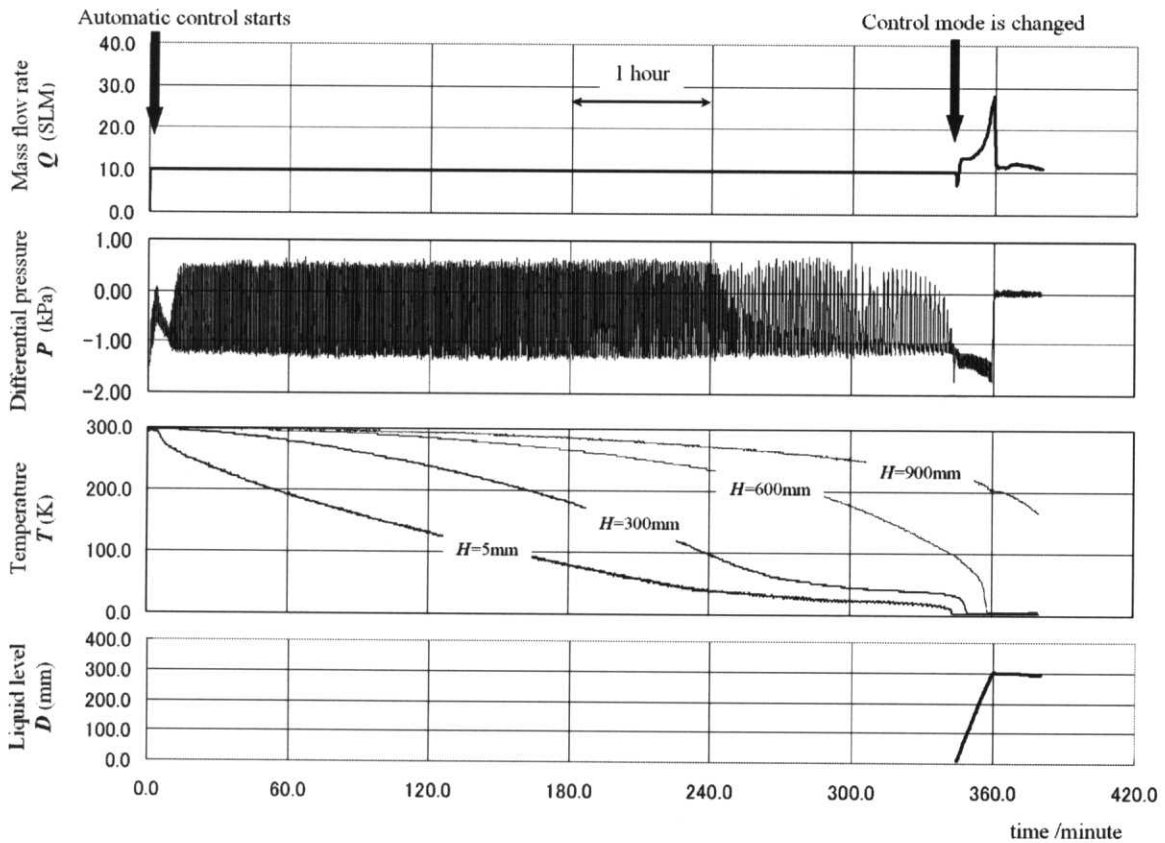


Fig. 4.19 Change in mass flow, differential pressure, temperature and liquid level in a liquid helium transfer experiment

この差圧の最小値-1.2 kPa は, ストレージ・デュワ液面からトランスファーチューブ上端

までの高低差約 1000mm の液柱圧力である-1.2 kPa と一致している。CCDカメラ画像の観測から、差圧計の指示圧力が最小値に近づいたところでトランスファーチューブ先端から液体ヘリウムが霧状に吹き出す。それとともに圧力は上昇に転じ、圧力がわずかに上昇したところで液体ヘリウムの吹き出しは停止する。これらの観測結果は、液体ヘリウムが移送が移送されるのに必要なクライオスタット内部とストレージ・デュワ内部の差圧は、ストレージ・デュワの液面からトランスファーチューブの上端までの液柱の作る圧力に等しく、沸点にある液体ヘリウムにはサイフォン効果は見られない、ということを示している。

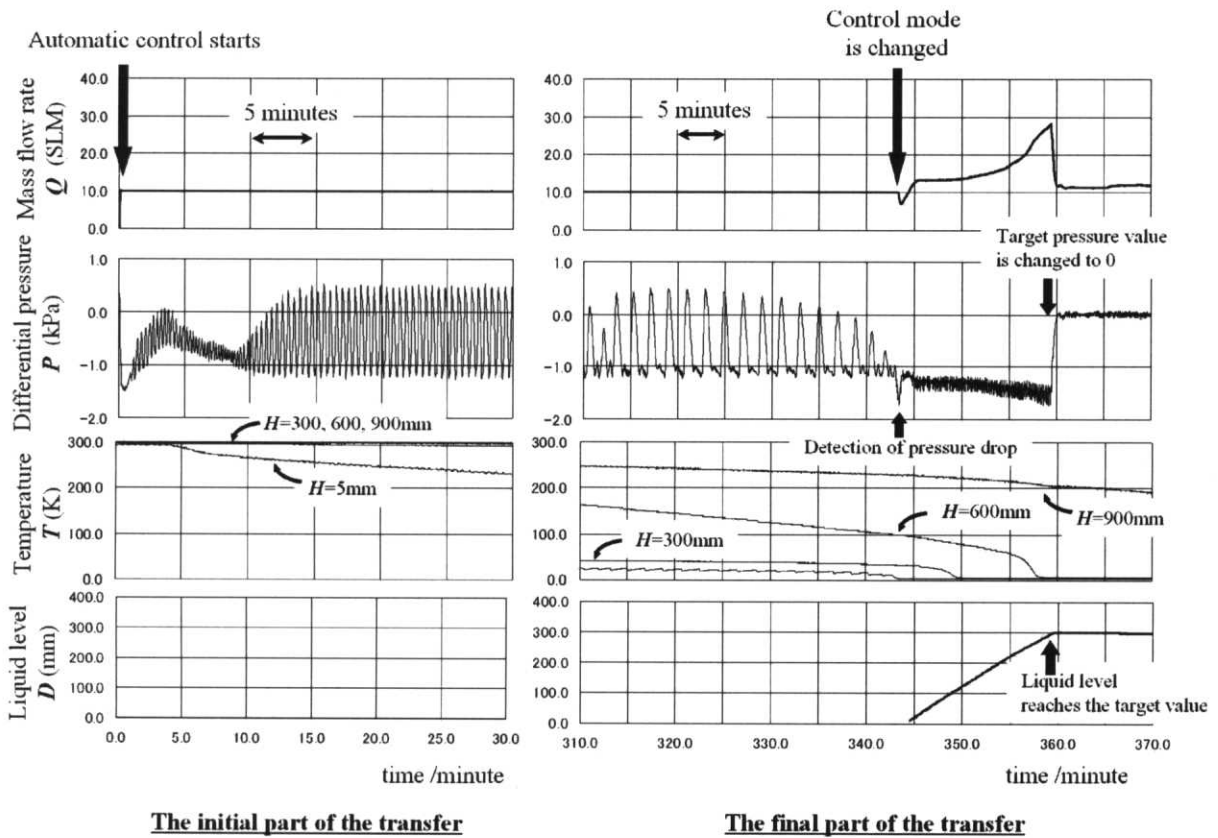


Fig. 4.20 The initial part and the final part of the transfer experiment in detail.

クライオスタット内部（底部）に液体ヘリウムが溜り始めると、マスフロー一定制御が



かけられた状態では、クライオスタット内部とストレージ・デュワ内部の差圧は一時的に急降下する。冷却実験中、振動の最小値-1.2 kPa より 0.4 kPa 以上の差圧の落ち込みが観測されたら、制御モードがマスフロー一定制御から、差圧が-1.3 kPa になるような制御に切り替えられる。この差圧の設定値は、トランスファーを確実に行う目的で、振動の最小値-1.2 kPa より僅かに小さく設定されている。なお、この 0.1kPa は液体ヘリウムの液柱 80mm に相当する。この圧力の設定値は、ストレージ・デュワの液面降下、および、クライオスタット内でのトランスファーチューブの液没深度を考慮して、更新され続ける。マスフローレートは、その時のクライオスタットからの液体ヘリウム蒸発量にほぼ等しいが、これは、トランスファー期間中のクライオスタットの熱的状态の変化に伴い変化している。

クライオスタットに目標液面高さまで液体ヘリウムがトランスファーされたら、差圧の設定値はゼロにされる。これにより、トランスファーは停止し、システムは手介入が入るまでその状態を維持する。なお、磁気浮上実験後にクライオスタット内に余った液体ヘリウムが発生した場合など、この差圧設定値の符号を逆にすることで、逆移送がスタートする。ここで例示した液体ヘリウム移送実験では、約5時間にわたる滑らかなガス冷却の後、液面上昇レート 2 mm/minute で液体ヘリウムがクライオスタットに溜っている。この実験では、目標値は 300mm に設定され、約 9.4 リットルの液体ヘリウムがクライオスタット内に溜められた。

#### 4.4.4 今後の展開

自然発生する差圧振動のモードが冷却プロセスの進行に伴いどうして変化していくのかはさて置き、この現象はクライオスタットに液体ヘリウムが溜り始める前において、広く典型的に観測される。この圧力振動の存在により、マスフロー一定制御という簡易な制御で、安定で滑らかなガス冷却が実現できる。マスフローレート 1 SLM は、単位時間当たりの蒸発熱で約 4 Watts に相当する。

クライオスタット内部に液体ヘリウムが溜り始めると、蒸発が常時発生することになり、マスフロー一定制御では、移送の安定的継続、および、移送の終了を適当に行うことはできない。移送の安定的継続、および、移送の終了は、クライオスタット内部とストレージ・デュワ内部の差圧を制御することにより、適当に実現することができる。何らかの事情により液体ヘリウム移送プロセスが中断してしまい、トランスファーチューブ内部が暖まってしまった場合、トランスファーチューブ内部を再度冷却（冷却するとヘリウムガス以外のガスが壁面に吸着して真空がよくなり、断熱性が飛躍的に向上する。）するのに要する時間、および、その過程でトランスファーチューブ出口から出る暖かいヘリウムガスについては、十分に考慮する必要がある。特に、ある点の温度降下カーブをある任意のカーブに合せたいときなどには、注意を要する。

トランスファーチューブの冷却時に発生する暖かいガスに対する対策として、バイパスバルブにより外部放出する方法が提案されている<sup>85), 86)</sup>。この場合、バイパスバルブは可能な限り液体ヘリウム温度の部分の近くにおくことが望ましい。

今回、実験はほとんどカラのクライオスタットを用いて行われた。もしも、大きな熱容量を有する物体がクライオスタット内にあれば、冷却にはより長い時間がかかり、冷却はより滑らかに行われると考えられる。冷却の最適条件は個々の事例に対して個別に求めねばならないが、いくつかの一般的な指摘を行うことはできる。一つ目は、クライオスタット底面が液体ヘリウム温度に達し、液体ヘリウムが溜り始める前に、クライオスタット全体

をできる限り一様に冷却することが好ましい。これにより、液体ヘリウムが溜まり始めたあとのクライオスタットの熱的条件の変化を小さくでき、蒸発ガス量の変動を小さく抑制することができる。一方、蒸発ガス量が大きく、非定常で、かつ、予測し難いものであると、圧力による移送レート制御が難しいものとなる。クライオスタット内部に収める実験システム全体の熱容量が大きく、かつ、当該実験システムが熱抵抗の小さな材料でクライオスタット底部と接続されていれば、この問題は解決される。次世代磁気浮上システムではこの考え方を取り入れた設計を行う。

#### 4.4.5 まとめ

常温状態にあるクライオスタットを、熱ショックを与えることなく徐々に冷却し、所定の高さまで液体ヘリウムを溜めるまでの一連の操作を自動的に行えるシステムを開発した。このシステムの開発は、限られた数のスタッフで行われる磁気浮上実験における困難さを低減する上できわめて有効である。本システムの考案・開発を通して、以下の結論を得た。

- (1) マスフローコントローラ、圧力センサ、液面センサ、および、適当な制御ソフトウェアをロードしたコンピュータより構成されるシステムにより、通常の人手によるトランスファーチューブを用いての液体ヘリウムのトランスファー作業を自動化することができる。
- (2) 液体ヘリウムが溜り始めるまでは、マスフロー一定でガス冷却を行うことが有効である。自然発生する差圧振動は、クライオスタットに液体ヘリウムが溜っていない状況において広く現れる。この圧力振動の存在により、マスフロー一定制御という簡易な制御で、安定で滑らかなガス冷却が実現できる。
- (3) 液体ヘリウムが溜り始めてからは、クライオスタットとストレージ・デュワの間の差圧が、トランスファーチューブによる高度差を乗り越えるのに十分な値になるようにマスフローコントローラを制御することが有効である。
- (4) 例示した液体ヘリウム移送実験では、約5時間にわたる滑らかなガス冷却の後、液面上昇レート 2 mm/minute で液体ヘリウムがクライオスタットに溜っている。この実験では、目標値は 300mm に設定され、約 9.4 リットルの液体ヘリウムがクライオスタット内に溜められた。

#### 4.5 次世代磁気浮上システムの開発

超伝導直動軸受の導入による浮上軌道の安定化を第一目的として、新しい磁気浮上メカニズムの開発を行う。開発の戦略、実験結果、将来展望について述べる。

#### 4.5.1 開発のねらい

力学量と電気量を結びつけることによって質量の量子標準化を目指す研究の中で、磁気浮上法はいくつかの他にない特長を有している。

A-1. 超伝導体を浮上させること

A-2. 低温環境

超伝導コイルにより作られる磁場中で超伝導体を機械的に非接触に浮上させることにより、コイル＝浮上体系の力学量と電気量の比較において、熱としてのエネルギーの散逸が無視できることが期待できる。また、液体ヘリウム温度で実験を行うことにより、実験中の熱膨張によるコイル＝浮上体系の変形が無視できることが期待できる。

一般に、機械的接触、熱の発生、熱膨張は、機械システムにおいて見過ごされた誤差要因を生む原因となりやすい。この点で、超伝導磁気浮上法は、機械システムを含む手法として決定的長所を有する。

しかしながら、磁気浮上法には、いくつかの検討すべき課題がある。

B-1. 浮上軌道の安定化

B-2. マイスナー効果の完全性

B-3. 測定アルゴリズム

B-4. 低温実験の利便性の向上

特に、B-1, B-2 が重大な問題であると考えられる。超伝導磁気浮上法が最初に提案されてから20年以上経過しているが、その間に、いくつかの研究プロジェクトが推進されてきた。計量研究所では実験システム（プロトタイプシステム）を用いた研究開発を進めてきたが、この中で、たとえ1ppmレベルの測定においても浮上軌道の安定化には何らかの対策が必要であることを再確認した。もしも、B-1の浮上軌道の安定化が達成されれば、超伝導磁気浮上実験システムは、機械システムとして理想的なものとなる。

## 4.5.2 基本設計

提案する新しい磁気浮上実験用のコイル=浮上体系は、浮上軌道の安定化を図りよく定義された機械システムとすること、および、主マイスナー面の平面化を図りよりよい超伝導材料の使用を可能とすること、の2点に主眼を置いて設計された。

計量研究所ではプロトタイプシステムを用いた研究開発を進めてきたが、この中で、たとえば 1ppm レベルの測定においてでも浮上軌道の安定化には何らかの対策が必要であることを再確認した。そこで、平衡軌道の安定化を第一目的として、以下のような特長を持つ次世代のコイル=浮上体系の研究開発を行うことにした。

C-1. 超伝導リニア軸受の導入

C-2. 主マイスナー面の平面化

C-1 により、平衡軌道の安定化を図る。これにより、重心高さの測定が簡略化されること、かつまた、分銅積載装置の導入が可能となることなどが期待できる。

C-2 により、浮上力を担う主マイスナー面を、純ニオブ板、ニオブ単結晶板などの、最良の超伝導材料で構成することがやりやすくなる。先述の B-2、マイスナー効果の完全性については、先の課題とするものの、本システムでは現在の技術で得られる最良の超伝導材料を使える形状としておく。

**Fig. 4.21** に提案するコイル=浮上体系の模式図を示す。浮上体の超伝導面としては、円盤形状のディスク下面の主マイスナー面、および、シャフト形状の超伝導直動軸受可動部の外面よりなる。コイルフレームには、1個の大きなメインコイルと、8個の小さなサブコイルが組み込まれる。コイル線材は純ニオブなどのなるべく良質な第1種超伝導材料で、フレームの材料は純アルミ、あるいは、セラミックスなどの非磁性材料で製作される。測定を動的に行うときには、渦電流損失を抑制する目的でセラミックスなどの絶縁体を用いることが好ましい。メインコイルの作る磁場を、浮上体の主マイスナー面が受け、浮上体に作用する重力に打ち勝つ上向きの力を発生する。もしも、系全体の対称性が完全であれ

ば、浮上体は真っ直ぐ上方に浮上する。しかしながら、実際には存在する非対称性のため、真っ直ぐに浮上させるには若干の拘束が必要になる。この拘束力は、8個のサブコイルと、浮上体のシャフト部により与えられる。

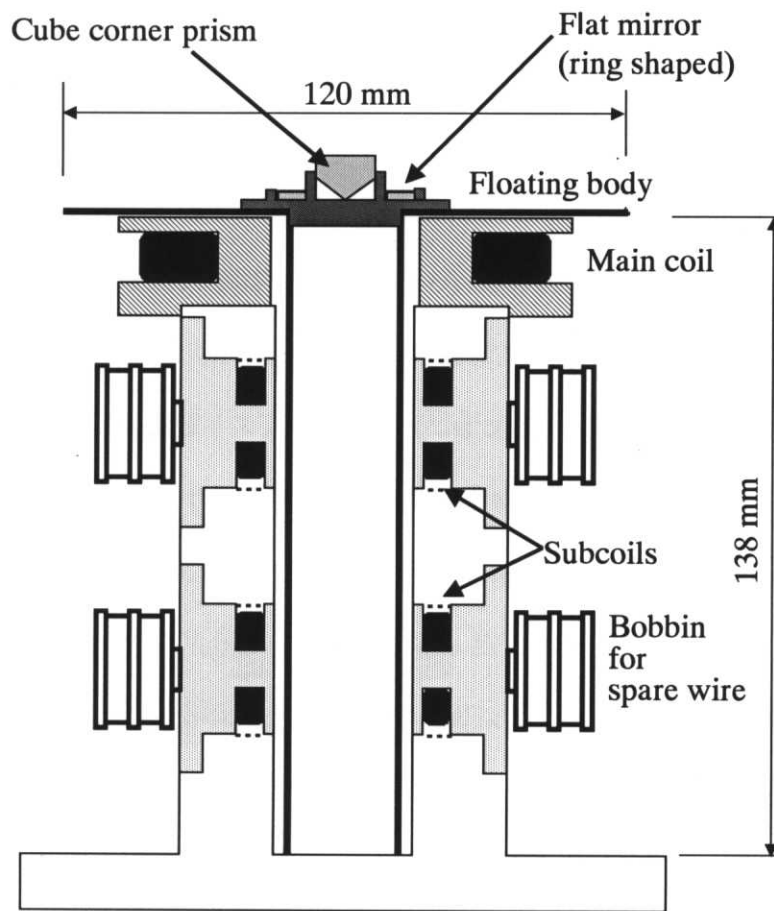


Fig.4.21 Schematic of the coil frame and the floating body



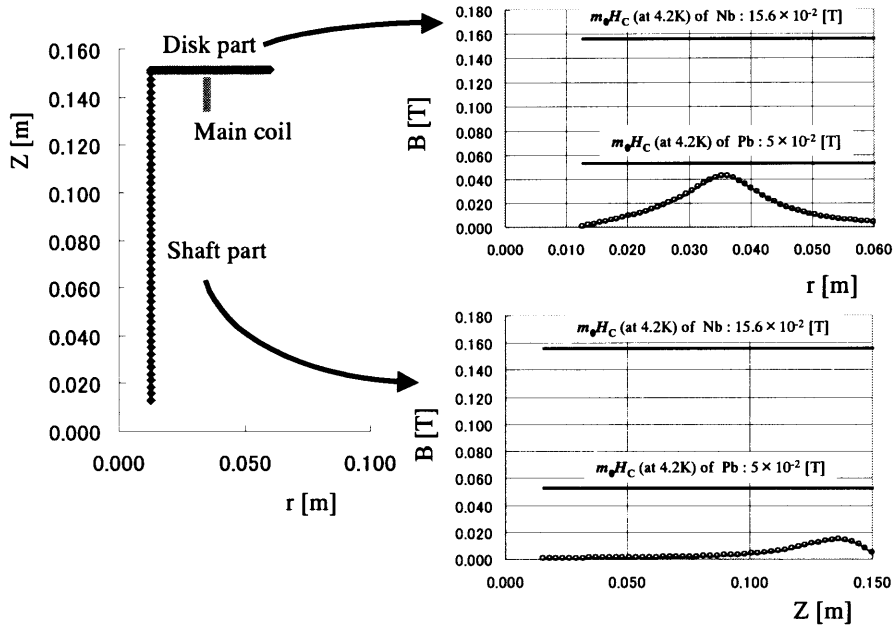


Fig. 4. 22 Magnetic flux density distribution around the body surface at  $Z=0$  mm

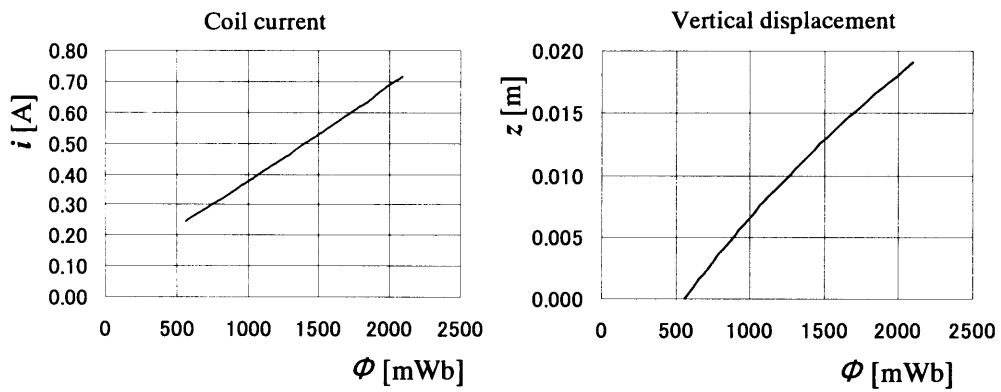


Fig.4. 23 Equilibrium trajectory of  $\Phi - i$

このコイル=浮上体系のデザインにおいては、4.3 節で述べた数値解析コードを活用した。系全体の軸対称性が完全であれば、サブコイルによる拘束力は無限小とできることから、計算ではメインコイルの作る磁場のみについて検討した。Fig. 4.22 に、浮上体の全質量を 250g、メインコイルの巻数を 5000 としたときの、ディスク面下部、および、シャフト部外面の磁束密度分布を示す。鉛、ニオブのバルク材の臨界磁場よりは小さくなっている。また、Fig.4.23 に、平衡軌道の計算結果を示す。コイル電流はプロトタイプシステムと同程度としながら、コイル=浮上体系のインダクタンス 2 桁程度大きくし、コイル端子電圧の測定が容易になるようにしてある。

また、研究を加速する目的で、従来のプロトタイプシステムと並列運転が可能な、2 基目の磁気浮上システムの建設を開始した。この 2 基目の磁気浮上実験システムを用いて、提案したコイル=浮上体系の研究開発を行う。

Fig.4.24 に、この新しいシステム用に製作されたクライオスタット、真空インサート、コイル=浮上体系、および、光学計測システムの模式図を示す。Fig.4.25 に建設中の新しい磁気浮上実験システムを示す。全システムはベースとしての定盤上に構築されている。円筒形状の純アルミ製計測部を下部に持つステンレス円筒のインサート（真空チャンバー）と GFRP 製の液体ヘリウム槽は、ともに、四角い SUS 製トップフランジに直接ボルト接合される。トップフランジの傾斜角度は、6 本の細目ボルトにより、ベースに対して微調整できる。レーザ光源はベースに固定される。姿勢位置測定器、および、干渉計用レーザービームの導入取り出しミラーは、スライドする台座に積載され、インサート出し入れ時などに、スムーズに待避できる構造とした。また、図で、定盤左方のやぐらは、取り出したインサートを分解調整する時に用いる。定盤上方の実験室天井にはホイストクレーンが設置されている。前項で述べたように低温環境の取り扱いにくさを低減する目的で、液体ヘリウムの自動移送システムの開発も行ったが、これも同じ定盤に組み込まれている。インサート下部につりつけられる計測部は、純度 99.99%の純アルミ製の円筒形状部と、インジ

ウムシール用の SUS 製フランジが、爆着接合されている。超伝導浮上体、コイルフレーム、干渉計は、すべて、この計測部に組み込まれる。干渉計は熱膨張による破損を避ける目的で、基板も含めすべてガラス（BK7）製で、ビームスプリッタ、参照用コーナーキューブプリズムは基板に対して、微量の低温用エポキシ系接着剤で固定されている。

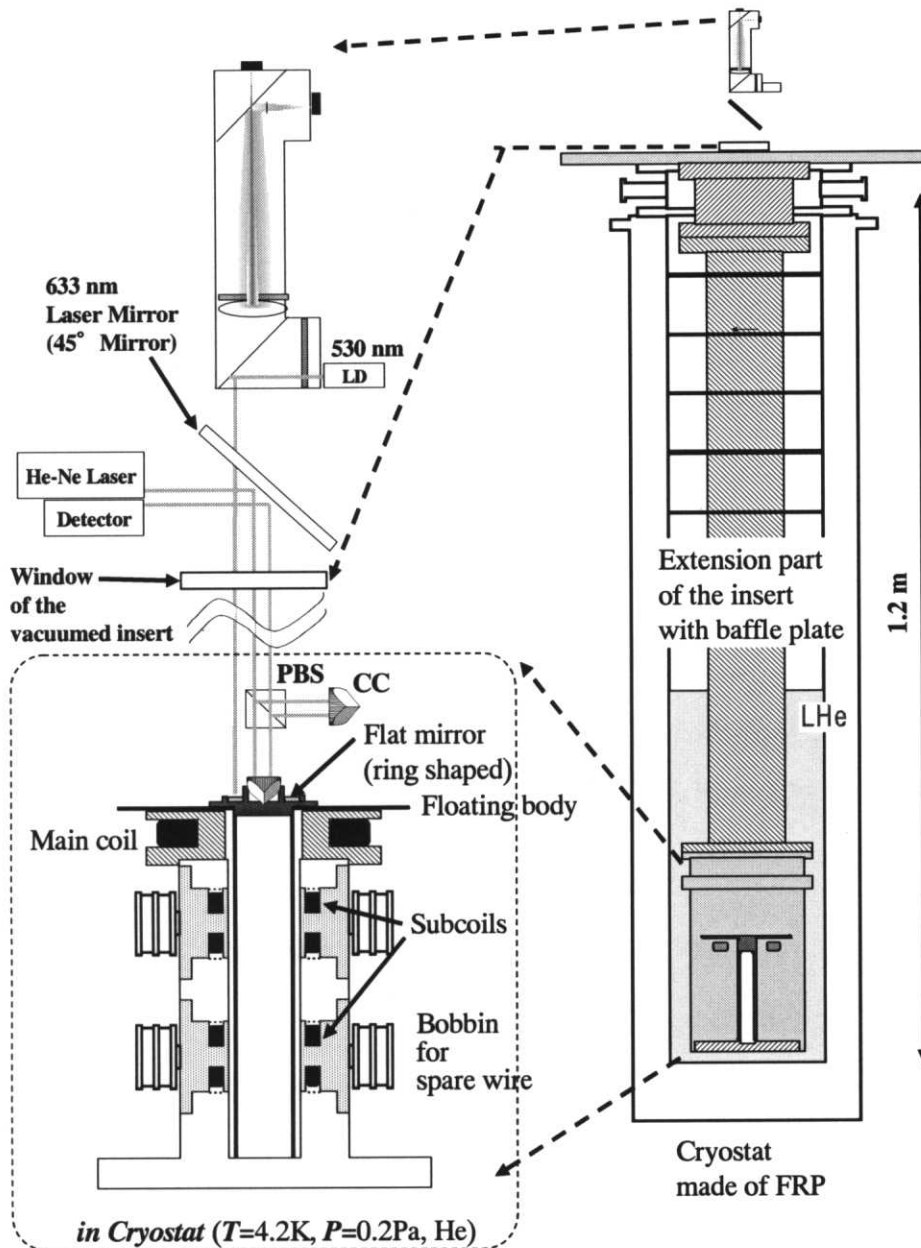


Fig. 4.24 Schematic of a new experimental setup developed for Levitated Superconductor Experiment

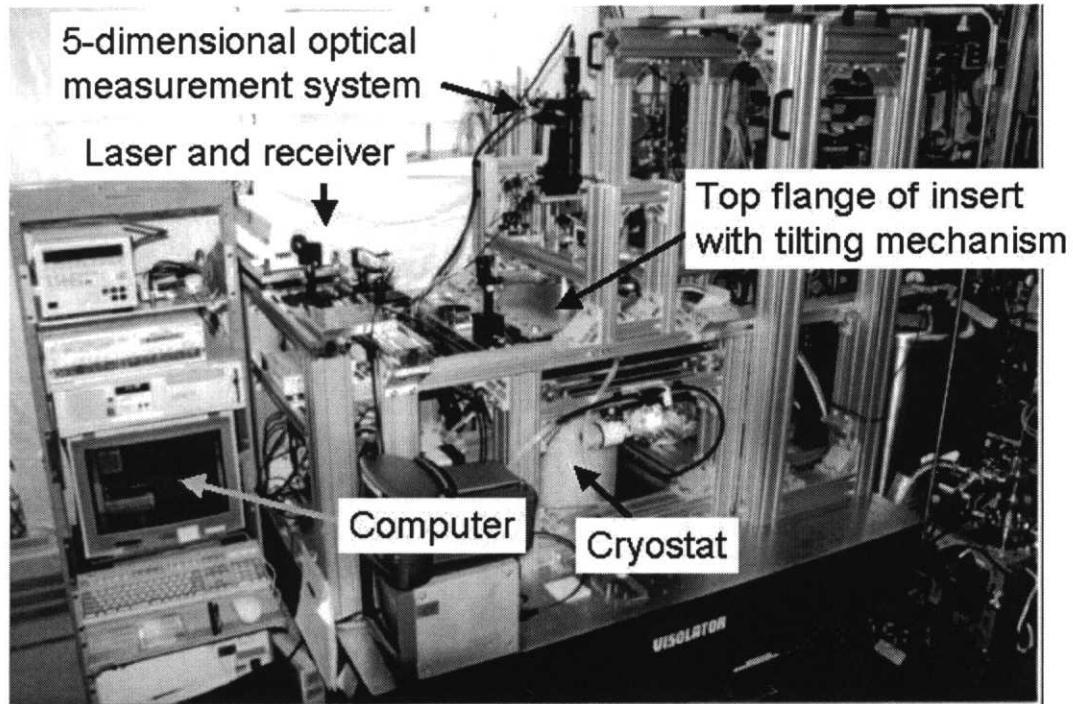


Fig.4.25 View of the new magnetic levitation system

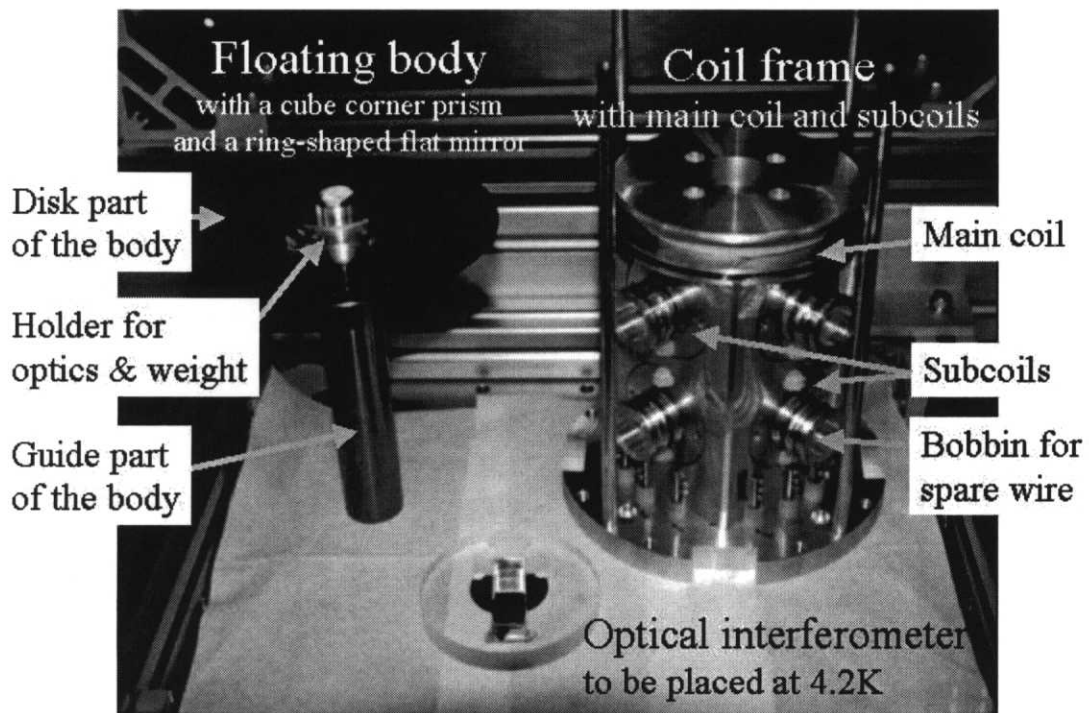


Fig.4.26 Photograph of the floating body, the coil frame and the optical interferometer

### 4.5.3 磁気浮上実験

Fig.4.26 に新しいコイルー浮上体系の基本デザインの妥当性を評価するために試作した浮上体，コイルフレーム，および，光波干渉計の写真を示す．浮上体は，サブコイルの作る磁場でガイドされつつ，メインコイルの作る磁場により浮上する．もしも，対称性が完全であれば，サブコイルの拘束力は無限小でよいことになる．そのため，機械加工精度を含む，システム全体の対称性が重要となる．浮上体は，純度 99.9%の純ニオブ製で，絞り加工で製作された円盤部に，円筒部を電子ビーム溶接で接合している．分銅を載せない状態での質量は約 170g である．姿勢位置測定用の光学素子（コーナーキューブプリズムとドーナツ形状の平面鏡）は，浮上体円盤部上部のアルミニウム製ホルダーにセットされる．メインコイルは 5000 ターン，サブコイルは 1000 ターンの直径 0.1mm の純ニオブ線材で製作されている．なお，浮上体＝コイルの設計に当たっては，前項で述べた数値計算コードを用いて検討を繰り返し，決定した．

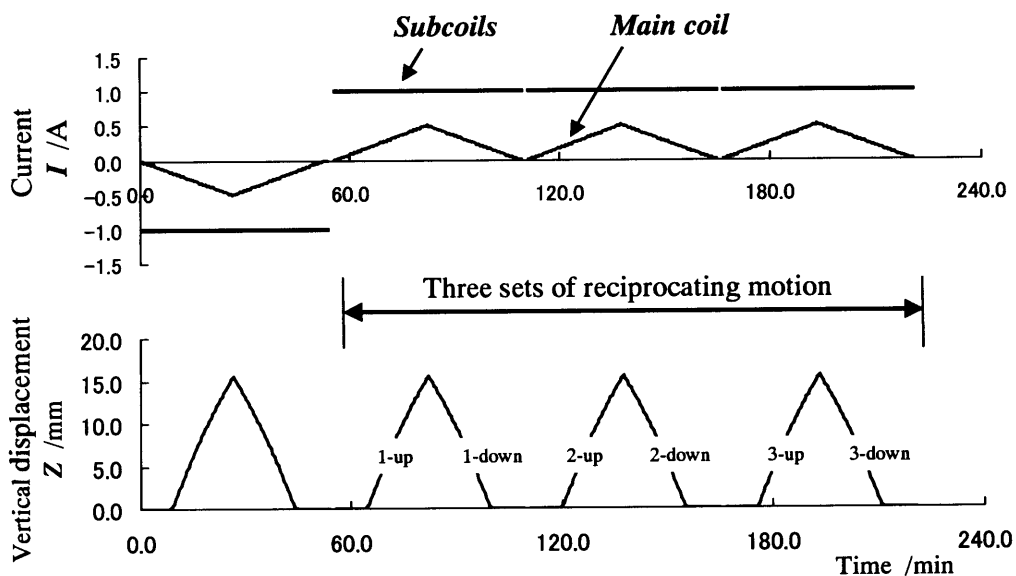


Fig. 4.27 Pattern of the currents

Fig.4.27 に、磁気浮上実験における、メインコイル電流、サブコイル電流、浮上高さを示す。メインコイルとサブコイルの極性を反転させた後、3往復させている。メインコイル電流は10mAステップで0mAから500mAまで変化させている。各電流ステップにおいて、約30秒間電流値一定の状態が保持され、その間に、電流値、浮上高さ、VTRのタイムコードの記録を300回行う。今回は、充磁における電圧の測定は行わなかったため、磁束の大きさは未知である。サブコイル電流は、1Aと大きな値としているが、これは、今回、実験に用いた浮上体は、絞り加工で製作した円盤部の加工精度が悪かったため、大きな拘束力を必要としたためである。

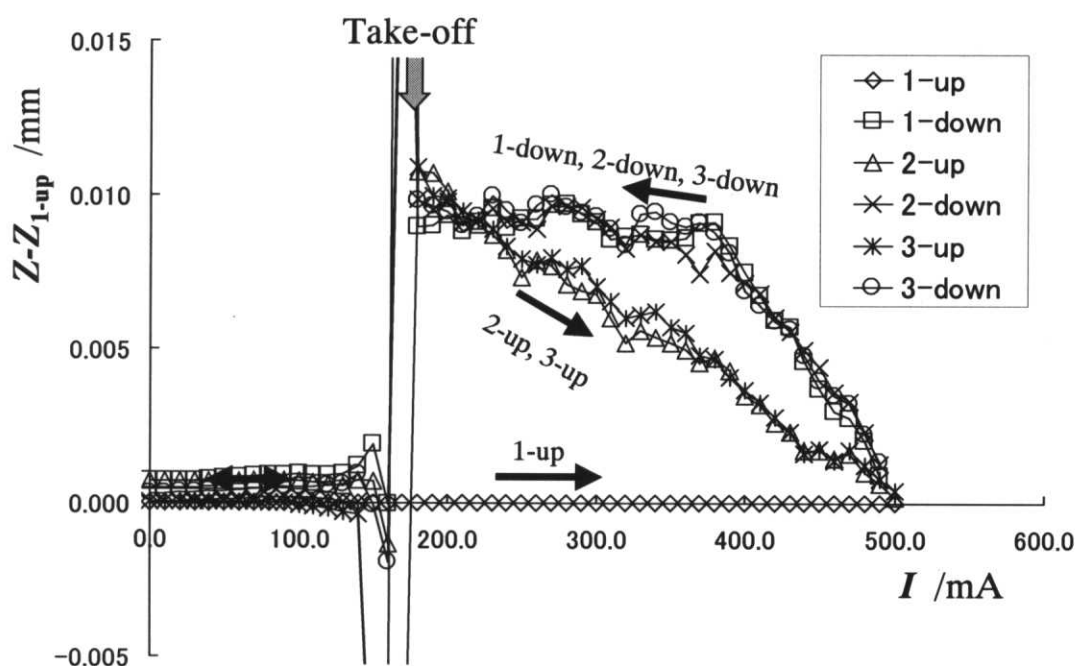


Fig. 4.28 The difference from the vertical displacement at the first up-motion

Fig.4.28 に最初の上りを基準とした、メインコイル電流に対する、浮上高さを示す。最初の上りを除き、鉛直変位は幅  $4\mu\text{m}$  のヒステリシスループを描いている。このループの幅  $4\mu\text{m}$  は、全浮上高さ  $15.5\text{mm}$  の  $260\text{ppm}$  に相当する。このヒステリシス発生の原因として、2つの可能性が考えられる。一つ目は、計測部において純アルミの円筒部と、上部のイン

ジウムシール用非磁性ステンレス鋼製フランジ部の爆着接合の中間材が強磁性体であることが判明したことである。設計上は、やはり非磁性のチタンを用いることになっていたが、何かの手違いで異なる材料が使われていた。この中間材は浮上体の円盤部の上方数 cm のところにある。もう一つの原因は、コイル線材のマイスナー効果の不完全性が考えられる。今回用いた直径約 0.1mm のニオブ線材の純度は公称 99% である。

以上、不完全ではあるがクライオスタットを含め、磁気浮上実験に必要な構成要素を一通り新規に製作し、それを用いた予備実験を行った。その結果、新しく提案したコイル＝浮上体系の基本設計はよく機能することが分かった。

#### 4.5.4 まとめ

浮上軌道の安定化を図りよく定義された機械システムとすること、および、主マイスナ一面の平面化を図りよりよい超伝導材料の使用を可能とすること、の2点を達成するための磁気浮上実験用のコイル=浮上体系について検討・提案を行った。さらに、提案に基づいて試作した実験機を用いて実験を行い、新しく提案したコイル=浮上体系の基本設計はよく機能することを確認した。

今後の方針として、はじめに、浮上体の幾何形状の加工精度を次の2つの手段、どちらかにより達成する。

- (1) 純度 99.9%の純ニオブ圧延材で円盤部を製作、これに、やはり純度 99.9%の純ニオブ薄肉円筒を、内側に埋め込んだ純ニオブ製中間材を介して電子ビーム溶接する。すでに、2つの試作機を製作した。しかし、電子ビーム溶接における熱の逃がし方、接合精度において、改善の余地がある。
- (2) 純アルミで高精度に加工された浮上体の表面に、純ニオブを蒸着加工する。すでに、断面が円形と四角形（角は丸めてある）のシャフト部を持つ純度 99.99%の純アルミ製浮上体2つが製作されている。これら浮上体の円盤部下面はダイヤモンドバイトを用いて鏡面仕上げが施されている。課題は、如何にして良質なニオブの膜を形成するかにある。

コイルの幾何形状も、ポピン形状、および、巻き線工程を工夫することにより、改善される見込みである。コイル線材としては、純度 99.9%、直径 0.25mm のニオブ線材 2350m がすでに準備されている。

Z軸周りの対称性がよいほど、サブコイルによる姿勢拘束力は小さくて済む。浮上体の浮上姿勢の振動を低減するためには、定盤をアクティブ除振台の上に載せることと、サブコイル電流を用いて制御することが検討されている。

同時に、姿勢位置測定システムの高度化、浮上体のへ分銅乗せ降し機構の導入などが、平



行して進められる予定である。

最初の2年間で次の2項目を達成することを計画している。

- (1) 高性能の「力学量—電気量変換機構(Mechanism)」の開発。
- (2) 1 ppmレベル絶対測定の達成。

開発した新しい磁気浮上システムでは、主マイスナー面の平面化により、現在の技術で製作される最高品質の超伝導材料を、浮上力を担う主マイスナー面として導入することを容易にしている。これにより、超伝導磁気浮上法における2つの大きな課題、すなわち、浮上姿勢の安定化（＝力学量と電気量の比較システムを機構・メカニズムとして優れたものとする）と、マイスナー効果の完全性の確保のうち、後者に対して最善と思われる材料を順次を試みていく。その上で不満足な部分が残った場合については、より完全な超伝導材料の開発、または、マイスナー効果の不完全性を補正する測定アルゴリズムの考案を行うことが考えられる。

現在、試みられている測定アルゴリズムでは、超伝導の完全性を前提としている。しかしながら、非接触浮上支持という特長だけを活かすのであれば、必ずしも超伝導の完全性は必要ではなくなる可能性も考えられる。その場合には、臨界磁場が大きく扱い易く、かつまた、商業的にも精力的に研究開発が進んでいる第二種超伝導材料、あるいは、高温超伝導材料を使用する可能性も見えてくる。

以上、浮上軌道の安定化を図りよく定義された機械システムとすること、および、主マイスナー面の平面化を図りよりよい超伝導材料の使用を可能とすること、の2点を特長とする新しい磁気浮上実験用のコイル＝浮上体系を提案した。提案に基づいて試作した実験機による磁気浮上実験に成功した。

## 4.6 まとめ

本章では、計量研究所で進めている超伝導磁気浮上法の研究開発の中で、筆者が中心となって行った研究成果について述べた。

まず、実験システム（プロトタイプシステム）を用いた実験において、力学量の測定パートである浮上体の重力位置エネルギーの絶対測定について論じた。まず、浮上体の鉛直変位  $Z$  を  $10^{-6}$  (1 ppm) 程度の相対標準不確かさで計測できるシステムを開発した。次に、浮上体の質量  $m$  を  $10^{-6}$  (1 ppm) 程度の相対標準不確かさで計測できるシステムを開発した。これらにより、コーン形状の超伝導浮上体を用いた実験システム（プロトタイプシステム）において、浮上体の重力位置エネルギーを目標であった 1 ppm 程度の不確かさで測定することが可能となった。

次に、磁気浮上実験を支援する要素技術として、軸対称マイスナー面を対象とする数値計算アルゴリズムの提案・開発を行い、その有効性を実験結果との比較から明らかにした。これにより、設計段階において、コイル＝浮上体系における（コイル電流）－（浮上高さ）－（コイルを貫く磁束）の関係が予測可能となり、さらに、浮上体表面（マイスナー面）における磁束密度分布を知ることのできるようになった。これにより、コイル＝浮上体系の形状の最適化を図ることが可能になった。

さらに、液体ヘリウム自動移送システムの考案・開発を行った。これにより、熱ショックを避ける目的で数時間にかけて手動で行ってきた液体ヘリウムのクライオスタットへの移送が自動化された。これによる磁気浮上実験の前における労力の低減は、実験者の体力温存に対して大きな効果があった。

最後に、次世代の磁気浮上システムとして超伝導直動軸受を導入した新しいコイル－浮上体系の開発について、その狙いと現状について述べた。磁気浮上法の解決すべき2つの大きな課題、すなわち、浮上姿勢の安定化、および、マイスナー効果の完全性のうち、新システムの開発において、まず、前者を克服することを狙った。新システムにおいては、

超伝導直動軸受の導入，主マイスナー面の平面化を主要な特長として掲げた．前者により，浮上姿勢の安定化を達成し，かつ，後者により最良の超伝導材料を適用することを容易にすることを狙った．クライオスタットを含めシステムとして一通り完成させ，浮上実験を行い，基本設計の妥当性に機能することを確認した．

計量研究所の超伝導磁気浮上法は，現在，実験システム，および，筆者が中心となって開発した新磁気浮上システムにより， $10^{-6}$ レベルの測定を目指して実験が進められている段階である．超伝導磁気浮上法は，天秤などの複雑な機構を流用したワットバランスなど先行する他の方法と比べ，非接触浮上支持という力学量の測定装置として決定的とも言える長所を有する．マイスナー効果により非接触浮上支持されるが故に，摩擦などの外力の影響を極めて小さく抑制することが可能であり，かつ，コイルと浮上体のみと装置構成が極めて簡素である．このように単純であるということから，磁気浮上法は不確かさ要因の入り込む余地の少ない，原理性の高い方法であるといえる．したがって，最終的な達成精度の観点からは有力候補の一つに数えられ，今後の更なる研究開発の進展が期待される．

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

## 第5章 結論

物体を機械的に非接触で浮上させ、外力を極力小さく抑制した状態を作ることによる、力学量の高精度測定の可能性について研究を行った。本研究は、物体を非接触浮上支持させる手段で分けると、空気圧を利用した方法、および、超伝導体に作用する電磁気力を利用した方法の2つに分類される。静圧空気軸受による空気圧支持を利用した方法として、各種力学量測定手法の提案・実験を行い、その可能性・将来性を追求した。超伝導体のマイスナー効果による磁気浮上を利用した方法として、質量の量子標準化への貢献を目指して計量研究所で行われてきた超伝導磁気浮上法を、さらに推し進めるための研究開発を行った。

以上の研究成果を各章ごとに要約すると次の通りである。

### 本研究の背景に関して（第2章）

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

### 空気圧支持による力学量の高精度測定方法に関して（第3章）

- (3) 基本的なツールとなる静圧空気直動軸受の摩擦特性評価法の考案・開発を行った。  
その手法を用いて、静圧空気直動軸受の静摩擦特性、動摩擦特性を定量的に評価した。動摩擦特性に関しては厚さ約  $10\mu\text{m}$  の気膜内の流体粘性抵抗から算出される理論式でほぼ説明できることを示した。静摩擦特性に関しては、特異な現象が見つかり、その発生原因の考察を行った。
- (4) 浮上した質量に作用する慣性力として、変動する力を発生・計測する手法を考案し、静圧空気直動軸受を浮上支持手段に用いた試験装置を開発した。この装置により動的3点曲げ試験における作用力をサンプリング周期  $0.15\text{ms}$ 、平均時間  $3\text{ms}$ 、相対標準不確かさ  $0.5\%$  で測定し、その有効性を検証した。また、考案した方法を力センサの動的応答性評価に適用し、半値幅  $5\text{ms}$  程度の衝撃応答評価を、時間分解能  $0.15\text{ms}$  程度で、 $1\%$  程度の不確かさで行えることを示した。本方法は、現段階でも既に、実用的に極めて有用なものである。更なる研究開発により、力計測における標準的な評価方法として飛躍的な発展・展開が期待される。
- (5) 浮上支持したフライホイールに作用する慣性モーメントとして、変動するトルクを発生・計測する手法を考案した。また、静圧空気回転軸受を浮上支持手段として用いたトルクセンサの動特性校正装置の設計例を示した。力の場合と同じく、更なる研究開発により、トルク計測における標準的な評価方法として飛躍的な発展・展開が期待される。
- (6) マイクロ重力環境下で動作する質量測定器について、運動量保存則を直接に用いた測定原理を考案した。また、静圧空気直動軸受を用いた2種類の地上実験装置を開発し  $0.07\%$  程度の相対標準不確かさでの質量測定に成功し、提案する方法の有効性を実験的に検証した。

### 超伝導磁気浮上による力学量と電気量の高精度比較測定方法に関して（第4章）

- (7) 低温環境に置かれた浮上体の姿勢・位置（6自由度）を，室温部から同時測定する姿勢位置測定システムを考案・開発した。さらに，これから得られるデータと，浮上中のエネルギー釣合式とにより，浮上体の重心鉛直変位を推定する方法を考案し，1ppm程度の不確かさで推定できることを示した。
- (8) 磁気浮上実験環境下（液体ヘリウム温度，希薄ヘリウム雰囲気下）における浮上体の質量を，国際キログラム原器にトレーサブルに値付けする方法を示した。その方法に基づいた質量測定装置を製作し，希薄ヘリウム雰囲気環境下における超伝導浮上体の質量を，約1ppmの相対標準不確かさで値付けした。また，最終的に0.01ppmレベルの測定を実現する基本的な考え方を示した。
- (9) 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，軸対称マイスナー面（超伝導面）を含む系の数値計算アルゴリズムを考案，開発した。磁気浮上実験データとの比較により，その有用性を示した。
- (10) 磁気浮上実験の効率化・省力化を図る目的で，液体ヘリウム自動移送システムを考案・開発を行った。本システムの開発により，磁気浮上実験前の数時間に渡って手動で行われていたクライオスタットの冷却作業が自動化され，研究者の労力が大きく低減できた。
- (11) 浮上軌道の安定化を図りよく定義された機械システムとすること（＝力学量－電気量を高精度に変換する機構（メカニズム）として優れたものとする），および，主マイスナー面の平面化を図りよりよい超伝導材料の使用を可能とすること，の2点を特長とする新しい磁気浮上実験用のコイル＝浮上体系を提案した。提案に基づいて試作した実験機による磁気浮上実験に成功した。

以上のように本研究では，物体を非接触浮上支持させ，地上において摩擦などの外力を極力小さく抑制した状態を作ることにより，物体に作用する力学量（力，トルク）を高精度に発生・計測しようとするアイデアを追求してきた。このアイデアは極めて単純なもの

であるが、これまで十分な研究が行われてこなかった。単純であるということは、同時に、原理性の高い測定の実現可能性があるということであり、将来における核心技術となる可能性を秘めていると考える。

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

超伝導磁気浮上法を用いた基礎物理定数の絶対測定、その先における、質量の量子標準化を目指した試みは、人類共通の知的基盤である標準の普遍化、不変化を目指しているという意味で、極めて重大なチャレンジである。現在は、電流天秤の測定アルゴリズム、メカニズムを改良したワットバランス法が測定精度としては先行しているが、最終目的（＝質量標準の量子化）の達成可能性という意味では、どの方法が優位かを客観的に見定めるのは極めて難しい。磁気浮上は、物体を非接触浮上支持するという、力学量を発生・測定する上での決定的と思われる長所を有しており、この特長を最大限に生かすことを目的に本研究で着手した磁気浮上メカニズムの研究開発により、今後の飛躍的進展が期待できる。

本研究では、質量を浮上支持させ、外力を極力排除した状態を作り出すということは、力、トルクに代表される力学量を高精度に発生・測定する上で極めて有効であることを示した。浮上支持手段として、静圧空気軸受、超伝導コイルなどを用いたが、その他にも、用途に応じて様々な可能性が考えられる。今後、多機能、高精度な力学量測定技術を得るために、余分な外力が十分に小さく、かつ、運動精度の高い状態を実現する非接触浮上支持手段に関して、様々なアイデアが出てくることが期待できる。

本研究の最終目的は、他の計測手法開発と同様であろうが、力学量の計測技術の高度化と応用範囲拡大を通して、次の2点に貢献することにある。

1. 人類共通の知的基盤としての計量標準，計測技術の高度化を通して，科学・技術の進歩に貢献すること。
2. 設計製造プロセスの高度化，省資源省エネルギーと繋げて最終的に地球環境保全に貢献すること

本研究で生み出し、育てた数々の新しいアイデア，成果は、同時に、将来における極めて有望な研究開発の芽にもなっている。これらの研究の芽には、上記2つの大きな目標に対して多大な貢献を為す可能性が秘められており、「質量を浮上支持することによる力学量の高精度測定」に関してさらに研究開発を進めていきたい。



## 謝辞

本論文をまとめるに当たり、暖かい励まし、的確なご指導、ご鞭撻を賜りました東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻の大園成夫教授に深く感謝いたします。また、東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻の中澤正治教授、東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻の高増潔助教授、佐々木健助教授、東京大学大学院新領域創成科学研究科物質系専攻の三尾典克助教授には、本論文のご審査を頂き、また、数々の有益なご指導、ご助言を頂きましことに対しまして深く感謝いたします。

著者の研究者としてのスタートに当たり、学部、修士過程においてご指導、ご鞭撻を頂き、かつまた、本論文をまとめるきっかけを与えて下さいました東洋大学工学部機械工学科の加藤洋治教授（東京大学名誉教授）に、深く感謝いたします。同じく、東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻の山口一教授には、学部、修士過程においてご指導、ご鞭撻を頂いて以来、折りに触れて励ましを頂きました。ここに、深く感謝いたします。

計量研究所の三木幸信博士、塩田ふゆひこ博士には、超伝導磁気浮上法に関して、多大なるご指導、ご鞭撻を頂きました。また、計量研究所の松本弘一博士、藤本弘之博士、藤間一郎主任研究官、根津嘉明主任研究官、植木正明主任研究官、大苗敦博士、大串浩司博士、東城琢郎主任研究官、小畠時彦博士、権太聡博士、渡邊律氏、筑波大学大学院機能工学系の磯部大吾郎講師、斎藤聡氏、オリンパス光学工業株式会社の諸隈肇博士、南波昭宏博士、東京大学名誉教授の原宏博士には、本研究を遂行するにあたり、数々の有益なご協力、ご助言を賜りました。ここに、深く感謝の意を表します。

本研究は、計量研究所の皆様の公私に渡る、ご指導、ご鞭撻、ご支援により、完成させることが出来ました。励ましのお言葉を掛けていただきました今井秀孝博士、小野晃博士、中山貫博士、桜井慧雄博士、作間英一博士、飯塚幸三博士に感謝いたします。

I would like to thank Dr. E. Frantsuz and Dr. V. Khavinson at D. I. Mendeleyev Institute of Metrology (VNIIM) in Russia, Prof. H. Bachmair at Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)

in Germany, Dr. T. Quinn and Dr. R. Davis at Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) in France, and Dr. R. Stainer at National Institute of Standards and Technology (NIST) in USA for fruitful suggestions and discussions on the Levitated Superconductor Experiment. I would like to thank to Dr. R. Kümme, Dr. T. Bruns and Dr. A. Sawla at Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Germany for fruitful suggestions and discussions on the dynamic force measurement. I would like to thank Prof. G. Uspensky, Prof. N. Sanko, Prof. K. Elkin and Prof. N. Kolosnitsyn at Russian Aviation and Space Agency (Rosaviakosmos) in Russia for fruitful discussions on measuring mass under microgravity conditions.

最後にこの研究を遂行することを全面的に支援していただいた，妻順子，および，両親に深く感謝します。

## 参考文献

- 1) M. Negishi, A. Deguchi, M. Ando, M. Takimoto, N. Nakamura, "A high-precision coordinate measuring system for super-smooth polishing", *Nanotechnology*, Vol.6, pp.139-147 (1995).
- 2) S. Hosoe, T. Yoshida, "Applied measurements of multipurpose precise interferometer (AMOS-1)", *Nanotechnology*, Vol.4, pp.206-212 (1993).
- 3) H. Onda, A. Asahara, S. Fujii, "Development of laser beam writer", *JSPE* Vol.58, pp.1837-1842 (in Japanese) (1992)
- 4) T. Egami, T. Nishiyama, "Optimal preview repetitive control for air slide linear motor", *Trans. Soc. Instrum. Control Eng. (Japan)*, vol.30, pp.118-120 (in Japanese) (1994).
- 5) I. Watanabe, H. Aoyama, A. Shimokohbe, "An active air bearing, ultra-precision control of the floating position and vibration", *JSPE*, Vol.54, pp.329-334 (in Japanese) (1988).
- 6) M. Dixon, "A traceable dynamic force transducer", *Experimental Mechanics*, Vol.30, pp.152-157 (1990).
- 7) M. Dixon, "Development of a load-cell compensation system", *Experimental Mechanics*, Vol.31, pp.21-24 (1991).
- 8) R. Kumme, "Investigation of the comparison method for the dynamic calibration of force transducers", *Measurement*, Vol.23, pp.239-245 (1998).
- 9) R. Kumme, M. Dixon, "The results of comparisons between two different dynamic force measurement systems", *Measurement*, Vol.10, pp.140-144 (1992).
- 10) R. Kumme, M. Peters, A Sawla, "Principles, facilities and uncertainties of dynamic force calibrations at PTB", *Proc. 15<sup>th</sup> IMEKO World Congress*, Vol.3, pp.129-136 (Osaka, Japan 1999).
- 11) D. Peschel, "The state of art and future development of metrology in the field of torque measurement in Germany", *Proc. 14<sup>th</sup> IMEKO World Congress*, Vol.3, pp.65-71 (Tampere, Finland 1997).
- 12) S> Merlo, C. Ferrero, C. Marinari, E. Martino, "Metrology of Torque: New Developments at the CNR-IMGC", *Proc. 15<sup>th</sup> IMEKO World Congress*, Vol.3, pp.1-6 (Osaka, Japan 1999).

- 13) F. Davis, "Development of UK national standard static torque calibration facility", *Proc. 15<sup>th</sup> IMEKO World Congress*, Vol.3, pp.25-32 (Osaka, Japan 1999).
- 14) A. Bruge, "Influence of rotation on rotary torque transducers calibrated without rotation", *Proc. 14<sup>th</sup> IMEKO World Congress*, Vol.3, pp.79-84 (Tampere, Finland 1997).
- 15) W. Thornton and J. Ord, "Specimen mass measurement", *NASA Tech. Report*, N74-11867 (1974).
- 16) W. E. Oakey, R. Lorenz, "Survey and experimental testing of nongravimetric mass measurement devices", *NASA Tech. Report*, N77-26456 (1977).
- 17) N. Beyer, J. Lomme, H. McCollough, B. Price, H. Weber, "Proposal for an astronaut mass measurement device for the space shuttle", *NASA Tech. Report*, N95-14854 (1995).
- 18) T. Ono, H. Uozumi, O. Honda, K. Nagata, "Mass-measurement under weightless conditions by the frequency-controlled method", *Measurement*, Vol. 22, pp.87-95 (1997).
- 19) A. Rivetti, G. Martini, F. Alasia, G. Birello, L. Gatti and F. Solitro, "An inertial, low-capacity balance to be accommodated on board the International Space Station", *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> European Symposium on the Utilization of the International Space Station*, ESTEC, pp.93-98 (Noordwijk, The Netherlands, 1998)
- 20) T. Mizuno, J. Minowa, K. Araki, "Mass measurement based on the law of conservation of momentum", *Proceedings of the 38<sup>th</sup> SICE Annual Conference*, pp. 865-868 (Morioka, Japan, 1999).
- 21) T. J. Quinn, "Base units of Système International D'Unités, their accuracy, dissemination and international traceability", *Metrologia*, Vol.31, pp.515-527 (1994/95).
- 22) G. Girard, The third periodic verification of national prototypes of the kilogram (1988-1992), *Metrologia*, Vol. 31, pp.317-336 (1994).
- 23) T. J. Quinn, "The kilogram: the present state of our knowledge", *IEEE Trans Instrum. Meas.*, vol.40, No.2, pp.81-85 (1991).
- 24) S. Ikeda, K. Uchikawa, Y. Hashiguchi, M. Nagoshi, H. Kasamura, K. Shiozawa, D. Fujita and K. Yoshihara, "Surface analytical study of cleaning effects and the progress of contamination on

- prototypes of the kilogram”, *Metrologia*, Vol.30, pp.133-144 (1993).
- 25) Y. Kobayashi, “On a more precise correction for buoyancy and gas adsorption in mass measurement”, *Precision Measurement and Fundamental Constants II*, eds. B. N. Taylor and W. D. Phillips (Government Printing Office, Washington, D. C., 1984) pp.471-443.
  - 26) M. P. Seah, J. H. Qiu, P. J. Cumpson and J. E. Castle, “Stability of reference masses II: The effect of environment and cleaning methods on the surfaces of stainless steel and allied materials”, *Metrologia*, Vol. 31, pp.93-108 (1994).
  - 27) R. Schwartz, “Precision determination of adsorption layers on stainless steel mass standards by mass comparison and ellipsometry, Part I: Adsorption isotherms in air”, *Metrologia*, Vol. 31, pp. 117-128 (1994).
  - 28) R. Schwartz, “Precision determination of adsorption layers on stainless steel mass standards by mass comparison and ellipsometry, Part II: Sorption phenomena in vacuum”, *Metrologia*, Vol. 31, pp. 129-136 (1994).
  - 29) P. Pinot, “Stability of mass standards made of XSH alacrite: Gravimetric study of the influence of cleaning”, *Metrologia*, Vol. 31, pp. 357-365 (1994/95).
  - 30) P. J. Cumpson and M. P. Seah, “Stability of reference masses III: Mechanism and long-term effects of mercury contamination on platinum-iridium mass standards”, *Metrologia*, Vol.31, pp.375-388 (1994/95).
  - 31) R. D. Huntoon and U. Fano, “Atomic definition of primary standards”, *Nature*, Vol.166, No.4213, pp.167-168 (1950)
  - 32) B. N. Taylor, “Basic standards and fundamental constants”, *IEEE Trans Instrum. Meas.*, Vol.38, pp.164-166 (1989).
  - 33) B. N. Taylor, “The possible role of the fundamental constants in replacing the kilogram”, *IEEE Trans Instrum. Meas.*, Vol.40, pp.86-91 (1991).
  - 34) P. Seyfried and P. Becker, “ The role of  $N_A$  in the SI: An Atomic path to the kilogram”, *Metrologia*, Vol. 31, pp.167-172 (1994).
  - 35) M. Gläser, “Proposal for a novel method of precisely determining the atomic mass unit by the

- accumulation of ions”, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol.62, pp.2493-2494 (1991).
- 36) E. R. Cohen and B. N. Taylor, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, Vol.2 (1973)
- 37) E. R. Cohen and B. N. Taylor, *CODATA Bulletin*, Vol.63 (1986)
- 38) BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML : *GUIDE TO THE EXPRESSION OF UNCERTAINTY IN MEASUREMENT*, 1993, International Organization for Standardization (Geneva, Switzerland).
- 39) 工業技術院計量研究所訳・監修：国際単位系（S I）日本語版，（日本規格協会，1999）.
- 40) 電子情報通信学会編：量子電磁気計測，（コロナ社，1991）.
- 41) B. D. Josephson, “Possible new effects in superconductive tunnelling”, *Phys. Lett.*, 1, pp. 251-253 (1962).
- 42) S. Shapiro, “Josephson currents in superconducting tunneling: The effect of microwaves and other observations”, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 11, pp. 80-82 (1963).
- 43) K. von Klitzing and G. Dorda, M. Pepper, “New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized Hall resistance”, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 45, pp.494-497 (1980).
- 44) K. K. Likharev and A. B. Zorin, “Theory of the Bloch-wave Oscillations in small Josephson junctions”, *J. Low Temp. Phys.*, Vol. 59, pp.347-382 (1985).
- 45) B. P. Kibble, “A modification to a precise balance incorporating substitution weighing and feedback control which gives improved accuracy and convenience”, *Metrologia*, Vol. 11, pp.1-5 (1975).
- 46) B. P. Kibble, I. A. Robinson and J. H. Belliss, “A realization of the SI Watt by the NPL Moving-coil balance”, *Metrologia*, Vol. 27, pp.173-192 (1990).
- 47) B. P. Kibble, I. A. Robinson and J. H. Belliss, “The new NPL moving-coil balance – A progress report” *Digest of CPEM-92*, 99.8-9 (1992).
- 48) P. T. Olsen, R. E. Elmquist, W. D. Phillips, E. R. Williams, G. R. Jones, V. E. Bower, “A measurement of the NBS electrical watt in SI units”, *IEEE Trans Instrum. Meas*, Vol.38, NO.2, pp.238-244 (1989)

- 49) P. T. Olsen, W. L. Tew, E. R. Williams, R. E. Elmquist and H. Sasaki, "Monitoring the mass standard via the comparison of mechanical to electrical power", *IEEE Trans Instrum. Meas* , Vol.40, N0.2, pp.115-120 (1991)
- 50) E. R. Williams, R. L. Steiner, D. B. Newell, P. T. Olsen, "Accurate measurement of the Planck constant", *Phys. Rev. Lett.*, Vol.81, No.12, pp.2404-2407 (1998)
- 51) T. Yamazaki, K. Shida, M. Kanno, "Absolute measurement of voltage by an electrostatic energy-changing method", *IEEE Trans Instrum. Meas* , Vol.21, N0.4, pp.372-375 (1972).
- 52) V. Bego, K. Poljancic, J. Butorac and G. Gasljevic, "Progress in measurements with the ETF voltage balance", *IEEE Trans Instrum. Meas* , Vol.42, N0.2, pp.335-337 (1993).
- 53) T. Funck , V. Sienknecht, "Determination of the volt with improved PTB voltage balance", *IEEE Trans Instrum. Meas* , Vol.40, N0.2, pp.158-161 (1991).
- 54) W.K. Clothier, "A proposal for an absolute liquid electrometer", *Metrologia*, Vol.1, No.4, pp.181-184 (1965).
- 55) G. J. Sloggett, W. K. Clothier, B. W. Ricketts, "Determination of  $2e/h$  and  $h / e^2$  in SI units", *Phys. Rev. Lett.*, Vol.57, No.26, pp.3237-3240 (1986).
- 56) G. J. Sloggett, W. K. Clothier, M. F. Currey, D. J. Benjamin, H. Bairnsfather, "Absolute determination of the volt using a liquid electrometer", *IEEE Trans Instrum. Meas* , Vol.34, N0.2, pp.187-191 (1991).
- 57) W. K. Clothier, G. J. Sloggett, H. Bairnsfather, M. F. Currey, D. J. Benjamin, "A determination of the volt", *Metrologia*, Vol.26, pp.9-46 (1989).
- 58) D. B. Sullivan , N. V. Frederick, "Can superconductivity contribute to the determination of the absolute ampere?", *IEEE Trans. Magn.*, Vol.13, No.1, pp.396-399 (1977).
- 59) K. Hara, F. Shiota, T. Kubota, "A feasibility study of an absolute determination of the magnetic flux quantum", *Precision Measurement and Fundamental Constants II*, eds. B. N. Taylor and W. D. Phillips (Government Printing Office, Washington, D. C., 1984) pp.479-482.
- 60) Yu. T. Tarbeyev, "The work done at the Mendeleev Research Institute of Metrology (VNIIM) to improve the value of the fundamental constants", *Precision Measurement and Fundamental*

- Constants II*, eds. B. N. Taylor and W. D. Phillips (Government Printing Office, Washington, D. C., 1984) pp.483-488.
- 61) E. T. Frantsuz, Yu. D. Gorchakov, V. M. Khavinson, "Measurements of the magnetic flux quantum, Planck constant, and elementary charge at VNIIM", *IEEE Trans Instrum. Meas.*, Vol.41, N0.4, pp.482-485 (1989).
- 62) F. Shiota, K. Nakayama, Y. Nezu, T. Endo, Y. Sakamoto, M. Kikuzawa and K. Hara, "Improvement of the superconducting magnetic levitation system for determination of the magnetic flux quantum", *IEEE Trans Instrum. Meas.*, Vol.38, N0.2, pp.225-228 (1989).
- 63) F. Shiota, Y. Miki, A. Namba, Y. Nezu, Y. Sakamoto, T. Morokuma and K. Hara, "Absolute determination of the magnetic flux quantum using superconducting magnetic levitation", *IEEE Trans Instrum. Meas.*, Vol.44, N0.2, pp.583-586 (1995).
- 64) Y. Fujii, H. Fujimoto, "Measurements of frictional characteristics of a pneumatic linear bearing", *Meas. Sci. Technol.*, Vol.10, No.5, pp.362-366 (1999).
- 65) Y. Fujii, D. Isobe, S. Saito, H. Fujimoto, Y. Miki, "A method for determining the impact force in crash testing", *Mechanical Systems and Signal Processing*, (scheduled for July issue)(in print).
- 66) Y. Fujii, H. Fujimoto, "Proposal for an impulse response evaluation method for force transducers", *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 10, pp. N31-N33 (1999).
- 67) Y. Fujii, "Impact force measurement of a force transducer", *Proc. XVI IMEKO World Congress* (Wien, Austria, 2000) (in print).
- 68) Y. Fujii, K. Ogushi, T. Tojo, "A proposal for a dynamic-response-evaluation method for torque transducers", *Meas. Sci. Technol.*, Vol.10, pp.N142-N144 (1999).
- 69) Y. Fujii, H. Fujimoto, S. Namioka, "Mass measurement under weightless conditions", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 70, pp.111-113 (1999).
- 70) Y. Fujii, H. Fujimoto, R. Watanabe, Y. Miki, "A balance for measuring mass under microgravity conditions", *Proc. 38<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, AIAA 2000-0567 (Reno, USA, 2000).
- 71) Y. Fujii, H. Fujimoto, R. Watanabe, Y. Miki, "A balance for measuring mass under microgravity



- conditions”, *AIAA Journal*, (in print).
- 72) V. Sazonov, G. Putin, I. Babushkin, G. Bogatyrev, A. Glukhov, A. Avdeev, N. Budarin, A. Ivanov, M. Maksimova, V. Polezhaev, O. Bessonov, S. Nikitin, “On measurement of low-frequency microaccelerations onboard orbital station MIR with the use of thermal convection sensor “Dacon””, *Proc. 38<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, AIAA 2000-0569 (Reno, USA, 2000).
- 73) K. McPherson, “Principal investigator microgravity services role in ISS acceleration data distribution”, *Proc. 38<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, AIAA 2000-0572 (Reno, USA, 2000).
- 74) W. Klipstein, R. Thompson, J. Kohel, D. Seidel, L. Maleki, “Laser cooled atomic clocks in space”, *Proc. 38<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, AIAA 2000-0571 (Reno, USA, 2000).
- 75) Y. Fujii, F. Shiota, Y. Miki, T. Morokuma, S. Kai, and K. Hara, “Attitude and position measurement system for use in a superconducting magnetic levitation system”, *Proceedings of the XIV IMEKO World Congress*, Vol. IXA, pp. 31-36, Tampere, Finland, June 1997.
- 76) Y. Fujii, F. Shiota, Y. Miki, K. Nakayama and T. Morokuma, “Vertical displacement determination of a levitated superconducting mass”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 48, No. 2, pp.200-204, 1999.
- 77) V. M. Khavinson and E. T. Frantsuz, “Measuring the vertical displacements of the center of gravity of a levitated superconducting body”, *Metrologia*, Vol. 31, pp. 1-7, 1994.
- 78) Y. Fujii, F. Shiota, Y. Miki, Y. Nezu, T. Makishita, and K. Hara, “A buoyancy-free mass comparator with precision better than  $10^{-6}$  for use in a superconducting magnetic levitation system”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 46, No. 2, pp. 609-612, 1997.
- 79) T. Smith, “Magnetic fields produced by a hollow superconducting cylinder and a coaxial solenoid”, *J. Appl. Phys.*, Vol.44, pp.852-857 (1973).
- 80) E. Frantsuz, V. Khavinson, F. Shiota, Y. Miki and R. Mossavati, “Designing axially symmetric electromechanical systems of superconducting magnetic levitation Matlab environment”, Vol.45,

254-257, eds. Ciarlini, Cox, Pavese and Richter (World Scientific, Singapore 1997).

- 81) E. Frantsuz, V. Khavinson, Y. Miki, Y. Fujii and F. Shiota, "Requirements for an electromechanical system of superconducting magnetic levitation and means for its designing properly", *Dig. CPEM'98*, pp.231-232 (Washington D.C., 1998).
- 82) Y. Fujii, E. Frantsuz, Y. Miki, F. Shiota and V. Khavinson, "Simulation algorithm for superconducting magnetic levitation system", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 39, No.6A, 2000 (in print).
- 83) A. Fukushima, Y. Okuda, "Automation of liquid  $^4\text{He}$  transfer", *Rev. Sci. Instrum.* Vol.58, pp.2341-2342 (1987).
- 84) Y. Fujii, Y. Miki, F. Shiota and R. Watanabe, "Liquid helium transfer using a mass-flow controller", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 70, pp.4110-4113 (1999).
- 85) R. Anderson, D. Ginsberg, "Bypass Valve for liquid helium transfer", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 43, pp.948-949 (1972).
- 86) G. M. Cushman, R. Gummer, E. Buchanan, O. Jenkins, T. Powers, "Automated liquid helium transfer system", *Rev. Sci. Instrum.* , Vol. 70, pp.1576 (1999).

## 発表論文

本研究に直接関連する原著論文

- ① Y. Fujii, F. Shiota, Y. Miki, Y. Nezu, T. Makishita, and K. Hara, "A buoyancy-free mass comparator with precision better than  $10^{-6}$  for use in a superconducting magnetic levitation system", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 46, No. 2, pp. 609-612, 1997.
- ② Y. Fujii, F. Shiota, Y. Miki, K. Nakayama and T. Morokuma, "Vertical displacement determination of a levitated superconducting mass", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 48, No. 2, pp.200-204, 1999.
- ③ Y. Fujii, K. Ogushi, T. Tojo, "A proposal for a dynamic-response-evaluation method for torque transducers", *Meas. Sci. Technol.*, Vol.10, pp.N142-N144, 1999.
- ④ Y. Fujii, H. Fujimoto, "Measurements of frictional characteristics of a pneumatic linear bearing", *Meas. Sci. Technol.*, Vol.10, No.5, pp.362-366, 1999.
- ⑤ Y. Fujii, H. Fujimoto, "Proposal for an impulse response evaluation method for force transducers", *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 10, pp. N31-N33, 1999.
- ⑥ Y. Fujii, H. Fujimoto, S. Namioka, "Mass measurement under weightless conditions", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 70, pp.111-113, 1999.
- ⑦ Y. Fujii, Y. Miki, F. Shiota and R. Watanabe, "Liquid helium transfer using a mass-flow controller", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 70, pp.4110-4113, 1999.
- ⑧ Y. Fujii, E. Frantsuz, Y. Miki, F. Shiota and V. Khavinson, "Simulation algorithm for superconducting magnetic levitation system", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 39, No.6A, pp.3694-3695, 2000.
- ⑨ Y. Fujii, D. Isobe, S. Saito, H. Fujimoto, Y. Miki, "A method for determining the impact force in crash testing", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.14, No.6, 2000. (印刷中).
- ⑩ Y. Fujii, H. Fujimoto, R. Watanabe, Y. Miki, "A balance for measuring mass under microgravity conditions", *AIAA Journal*, Vol. 39, No.3, 2001. (印刷中).
- ⑪ Y. Fujii, "Possible contribution of levitating a mass to force measurement", *Metrologia* "Letter

*to the Editor*”, Vol. 38, No.2, 2001. (印刷中)

- ⑫ Y. Fujii, Y. Miki, F. Shiota, T. Morokuma, “Mechanism for levitated superconductor experiment”,  
”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 50, No. 2, 2001. (印刷中)

その他の報告

- ⑬ Y. Fujii, H. Matsumoto, I. Fujima, “Measurements of long gauge blocks using a fringe-counting  
interferometer and subgauge blocks with lines”, *Metrologia*, Vol.33, pp.41-48, 1996.