

動吸振器を利用した質量測定*

水野 毅^{*1}, 根岸 武司^{*2}

Mass Measurement Using a Dynamic Vibration Absorber

Takeshi MIZUNO^{*3} and Takeshi NEGISHI^{*3} Saitama University, Dept. of Mechanical Engineering, Shimo-Okubo 255, Urawa, Saitama, 338-8570 Japan

New mass measurement systems using a dynamic vibration absorber are proposed, in which a mass to be measured is attached to the absorber mass. Such mass-measurement systems are named as vibration type, and their measurement principles and characteristics are studied with their basic models. It is also pointed out that mass measurement systems using a dynamic vibration absorber can be classified in several ways, for example, according to the motion of a mass to be measured, the type of the absorber, the method of exciting vibration, *etc.* An apparatus with an active dynamic absorber and an inertial-mass type vibrator was developed for experimental study on vibration-type mass measurement. Experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed mass measurement method.

Key Words: Dynamic Absorber, Measurement and Control, Vibration Control, Mass Measurement

1. まえがき

微小重力は、宇宙環境の代表的な特徴の一つである。微小重力環境では、浮力や自重の影響がないので、その特徴を生かした新物質・医薬品の創製が期待されている。現在、スペースシャトルにおいて先駆的な実験が試みられているが、将来、本格的な実験・製造を行うためには、物質の分量を決定し、管理するための質量の測定が不可欠となると予測される。

著者らは、無重力・微小重力環境下で質量を測定する方法として、本来振動を抑制する制振装置として考案された動吸振器を測定装置として利用することを提案し⁽¹⁾、測定装置の試作を行っている⁽²⁾。この装置では、回転テーブルに測定対象物を付加して不釣り合いを生じさせ、回転に伴って生じる不釣り合い振動を動吸振器によって吸振し、このときの吸振質量の運動から質量を推定している。以下では、このような測定方法を質量回転式と呼ぶが、この方式の有効性は、実験によって確認されている^{(1),(2)}。

質量回転式測定の問題点の一つは、精度の良い結果

を得るためには、測定対象物の回転軸からの距離を正確に知る必要があることである。測定対象物の形状や材質によっては、重心の位置を特定することが難しいので、回転半径を変化させて測定を実施する⁽³⁾などの工夫が必要となる。

本論文では、このような問題を解決する方法として、測定対象物を動吸振器の吸振質量に付加する方式(振動式測定)を提案し、その測定原理や特徴を明らかにする。さらに、動吸振器を利用した質量測定方法全般について、幾つかの観点から分類し、整理する。また、振動式の質量測定については、バイモルフ型圧電アクチュエータを吸振質量および加振用慣性質量の駆動に利用した装置を試作し、測定方法の有効性を検証する。

2. 質量回転式測定の原理

ここでは、測定対象物を回転させる方式の原理・特徴・問題点について簡単に説明しておく。

2.1 非減衰形動吸振器を利用した測定 測定対象物を回転させる方式の質量測定の原理を図1を用いて説明する。回転テーブルは、測定対象物が取付けられていないときにつり合い状態にあり、質量 m_u の測定対象物を回転軸から距離 r の位置に取付けると、 $m_u r$

* 原稿受付 1998年12月18日。

*1 正員、埼玉大学工学部(☎338-8570 浦和市下大久保255)。

*2 日本精工(株)(☎371-8528 前橋市総社町1-8-1)。

E-mail: mizar@mech.saitama-u.ac.jp

のつり合いを持つようになる。この状態で回転テーブルを回転させると、動吸振器がない場合には、テーブルを保持しているフレームは、図の水平方向に振動する。フレームには、吸振質量 m_a とばね k_a とからなる非減衰形動吸振器が取り付けられている。

フレームと吸振質量の水平方向の変位をそれぞれ x_p , x_a と表す。回転テーブルの回転角速度を ω とすると、この系の運動方程式は、つぎのように求められる。

$$(m_p + m_u)\ddot{x}_p = -k_p x_p - k_a(x_p - x_a) + m_u r \omega^2 \cos \omega t \quad (1)$$

$$m_a \ddot{x}_a = -k_a(x_a - x_p) \quad (2)$$

ここで、 m_p は、ばね k_p で支持されるフレーム、モータなどの質量の総和（測定対象物は除く）である。

方程式(1), (2)の定常解を求めるために、 x_p , x_a をそれぞれ、

$$x_p(t) = X_p \cos \omega t \quad (3)$$

$$x_a(t) = X_a \cos \omega t \quad (4)$$

とおく。式(3), (4)を式(1), (2)に代入し整理すると、

$$\frac{X_p}{X_0} = \frac{1 - \frac{\omega^2}{\omega_a^2}}{\left(1 + \frac{k_a}{k_p} - \frac{\omega^2}{\omega_p^2}\right)\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_a^2}\right) - \frac{k_a}{k_p}} \quad (5)$$

$$\frac{X_a}{X_0} = \frac{1}{\left(1 + \frac{k_a}{k_p} - \frac{\omega^2}{\omega_p^2}\right)\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_a^2}\right) - \frac{k_a}{k_p}} \quad (6)$$

を得る。ただし、

$$X_0 = \frac{m_u r \omega^2}{k_p}, \quad \omega_p = \sqrt{\frac{k_p}{m_p + m_u}}, \quad \omega_a = \sqrt{\frac{k_a}{m_a}}$$

式(5)から、回転角速度 ω と動吸振器部の固有振動数 ω_a とが一致するとき、

$$X_p = 0 \quad (7)$$

が成立し、フレームの定常振動は零になる。このとき、

式(6)から、動吸振器の吸振質量は、

$$X_a = -\frac{m_u r}{m_a} \quad (8)$$

を満たすように振動している。式(8)から、測定対象物の質量は次式から求められることがわかる。

$$m_u = \left| \frac{m_a X_a}{r} \right| \quad (9)$$

以上のように、測定対象物を取り付けた回転テーブルの回転速度と動吸振器の固有振動数とを一致させて、このときの動吸振器の吸振質量の振動振幅から測定対象物の質量を測定するのが、非減衰形動吸振器を用いた場合の質量測定の原理である。

2.2 能動形動吸振器を利用した測定 能動形動吸振器を利用した場合の質量装置の構成を図2に示す。

非減衰形動吸振器のばね要素の代わりに、アクチュエータによって吸振質量を支持・駆動している。ここでは、一般的な枠組みで議論するために、アクチュエータは、指令された駆動力 $F_a(t)$ を発生する要素としてモデル化している。このとき、運動方程式は、つぎのように求められる。

$$(m_p + m_u)\ddot{x}_p = -k_p x_p - F_a(t) + m_u r \omega^2 \cos \omega t \quad (10)$$

$$m_a \ddot{x}_a = F_a(t) \quad (11)$$

ここで、何らかの制御を施すことによってフレームの振動を零にすることができたとすると、その制御方法に依らず、次式が成立する。

$$m_a \ddot{x}_a = m_u r \omega^2 \cos \omega t \quad (12)$$

定常成分を求めるために、 x_a を式(4)のようにおくと、

式(12)から、再びつぎのような関係を得る。

$$m_u = \left| \frac{m_a X_a}{r} \right| \quad (13)$$

2.3 特徴と問題点 以上のような方式の質量測定は、遠心力を利用しているのにもかかわらず、少なくとも定常状態では振動が外部に伝わらないので、柔軟構造中での使用が可能であると考えられる。

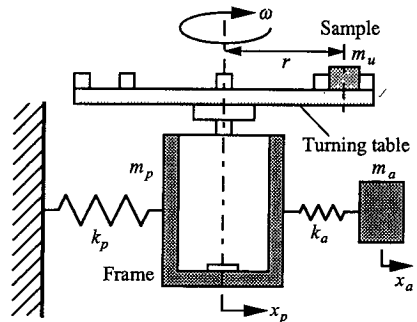


Fig.1 Centrifugal-type mass measurement system using an undamped dynamic vibration absorber

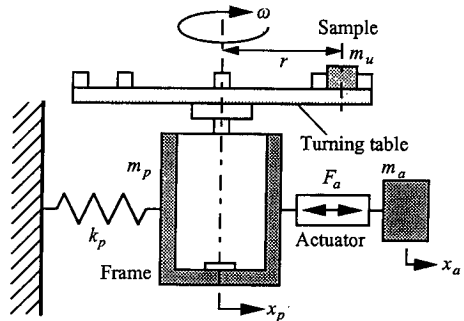


Fig.2 Centrifugal-type mass measurement system using an active dynamic vibration absorber

この方式が持つ問題点の一つは、式(9), (13)からもわかるように、精度の良い結果を得るためには、測定対象物の回転軸からの距離 r を正確に知る必要があることである。測定対象物の形状や材質によっては、重心の位置を特定することが難しいので、回転半径を変化させて測定をする⁽³⁾などの工夫が必要となる。

3. 質量振動式測定の原理

測定対象物を回転させる方式では、測定対象物の回転軸からの距離を正確に知る必要がある。これに対し、測定対象物を動吸振器の吸振質量に付加して測定を行うようにするとこのような問題が生じない。以下では、この方式について述べる。

3.1 非減衰形動吸振器を利用した測定 測定の原理を図3を用いて説明する。ばね要素 k_p を介して、ベースに結合されているフレームには、吸振質量 m_a とばね k_a とからなる非減衰形動吸振器が取り付けられている。測定対象物 m_u は吸振質量 m_a に付加される。フレームには、振幅 P_0 、角振動数 ω の調和外力が作用しているようにすると、この系の運動方程式は、次式のように求められる。

$$m_p \ddot{x}_p = -k_p x_p - k_a(x_p - x_a) + P_0 \cos \omega t \quad (14)$$

$$(m_a + m_u) \ddot{x}_a = -k_a(x_a - x_p) \quad (15)$$

式(3), (4)を式(14), (15)に代入し整理すると、

$$\frac{X_p}{P_0/k_p} = \frac{1 - \frac{\omega^2}{\omega_a'^2}}{(1 + \frac{k_a}{k_p} - \frac{\omega^2}{\omega_p^2})(1 - \frac{\omega^2}{\omega_a'^2}) - \frac{k_a}{k_p}} \quad (16)$$

$$\frac{X_a}{P_0/k_p} = \frac{1}{(1 + \frac{k_a}{k_p} - \frac{\omega^2}{\omega_p^2})(1 - \frac{\omega^2}{\omega_a'^2}) - \frac{k_a}{k_p}} \quad (17)$$

を得る。ただし、

$$\omega_p = \sqrt{\frac{k_p}{m_p}}, \quad \omega_a' = \sqrt{\frac{k_a}{m_a + m_u}}.$$

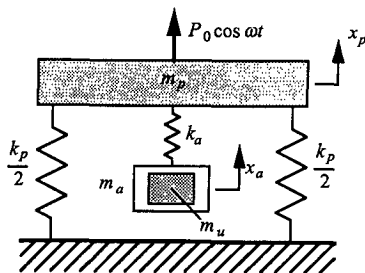


Fig.3 Vibration-type mass measurement system using an undamped dynamic vibration absorber

非減衰形動吸振器を利用する場合には、反共振現象を利用して測定を行う。具体的に質量を求める方法として、二つのやり方がある。一つは、フレームに作用する調和外力の周波数を変化させて、フレームの振動が止まる周波数

$$\omega = \omega_a' \quad (18)$$

を求め、次式にしたがって算出する方法である。

$$m_u = \frac{k_a}{\omega_a'^2} - m_a \quad (19)$$

もう一つの方法は、フレームが振動していないときの吸振質量の振動振幅から求める方法である。式(18)を式(17)に代入して整理すると、次式が得られる。

$$-(m_a + m_u)\omega^2 X_a = P_0 \quad (20)$$

したがって、測定対象物の質量は、次式から求められることがわかる。

$$m_u = \left| \frac{P_0}{\omega^2 X_a} \right| - m_a \quad (21)$$

つぎに、所定の振幅 P_0 を持つ調和外力をフレームに作用させる方法について述べる。ここでは、図4に示すような三つの方法について検討する。

- (a)ベースに固定したアクチュエータを用いる。
- (b)不つり合い力を利用する。
- (c)慣性形加振器を用いる。

方法(a)は、簡単な機構で実現することができるが、アクチュエータの反作用が外部へ伝わるので、柔軟構造物中で使用すると振動問題を引き起こす可能性がある。

方法(b)を用いるときには、装置の構成は、前章で述べた質量回転式の装置とほとんど同じになる。回転体は $m_e r$ の大きさの不つり合いを持つように設定されているとすると、質量を求める式(21)は、

$$m_u = \left| \frac{m_e r}{X_a} \right| - m_a \quad (22)$$

となり、回転速度 ω を含まない式が得られる。

方法(c)では、能動形動吸振器と同じように、フレームに付加したアクチュエータによって加振質量を駆動することによって、調和外力を発生させる。加振質量の大きさを m_b 、アクチュエータの駆動力を $F_b(t)$ とすると、この系の運動方程式は次式のように求められる。

$$m_p \ddot{x}_p = -k_p x_p - k_a(x_p - x_a) + F_b(t) \quad (23)$$

$$(m_a + m_u) \ddot{x}_a = -k_a(x_a - x_p) \quad (24)$$

$$m_b \ddot{x}_b = -F_b(t) \quad (25)$$

ここで、 m_b の変位 x_b 、駆動力 $F_b(t)$ をそれぞれ

$$x_b(t) = X_b \cos \omega t \quad (26)$$

$$F_b(t) = P_0 \cos \omega t \quad (27)$$

とおき、フレームの振動が止まっているときの定常解を求めると、式(21)に対応する式は次のようになる。

$$m_u = \left| \frac{m_b X_b}{X_a} \right| - m_a \quad (28)$$

この方法を用いると、回転機構を用いずに質量測定装置を実現できるので、装置の小型化が容易である。

3.2 能動形動吸振器を利用した測定 図3の受動形動吸振器の代わりに能動形動吸振器を用いた場合の

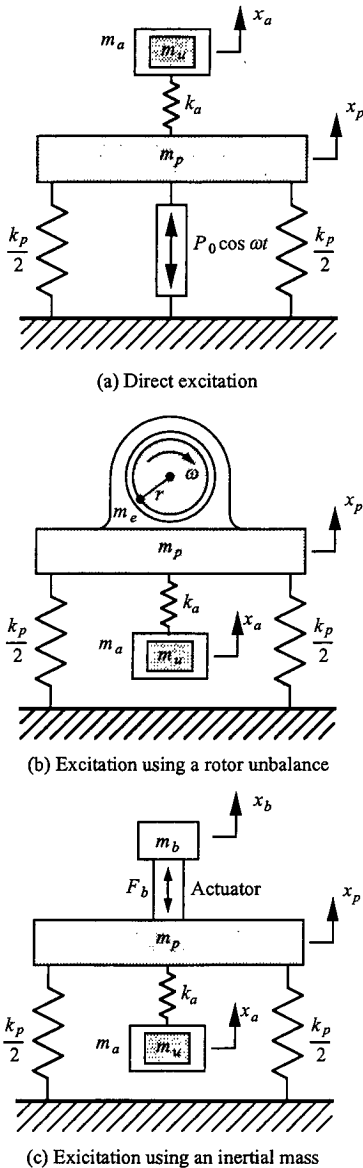


Fig.4 Vibration-type mass measurement systems using an undamped dynamic vibration absorber

構成を図5に示す。アクチュエータの発生する駆動力を $F_a(t)$ で表すことにすると、この系の運動方程式は、次式のように求められる。

$$m_p \ddot{x}_p = -k_p x_p - F_a(t) + P_0 \cos \omega t \quad (29)$$

$$(m_a + m_u) \ddot{x}_a = F_a(t) \quad (30)$$

何らかの制御を施すことによってフレームの振動を零にすることができたとすると、その制御方法に依らず、次式が成立する。

$$(m_a + m_u) \ddot{x}_a = P_0 \cos \omega t \quad (31)$$

したがって、測定対象物の質量は、再び次式から求められることになる。

$$m_u = \left| \frac{P_0}{\omega^2 X_a} \right| - m_a \quad (32)$$

図4に示した調和外力をフレームに作用させる3つの方法は、この場合にも適用することができる。図6(a)に、調和外力発生機構に慣性形加振器を利用した場合の構成を示す。この系の運動方程式は、次式のようになる。

$$m_p \ddot{x}_p = -k_p x_p - F_a(t) + F_b(t) \quad (33)$$

$$(m_a + m_u) \ddot{x}_a = F_a(t) \quad (34)$$

$$m_b \ddot{x}_b = -F_b(t) \quad (35)$$

質量を求める式は、非減衰形動吸振器を利用した場合と同様に、次式のようになる。

$$m_u = \left| \frac{m_b X_b}{X_a} \right| - m_a \quad (36)$$

ここで、 X_a 、 X_b は、何らかの制御を施すことによってフレームの振動が止まっている状態での吸振質量、加振質量の振動変位である。

また、図6(a)からわかるように、能動形動吸振器と慣性形加振器の構造は類似しており、お互いの役割を交換することも可能である。すなわち、図6(b)に示すように、測定対象物を m_b の側に取付けて、測定を行うことも可能である。

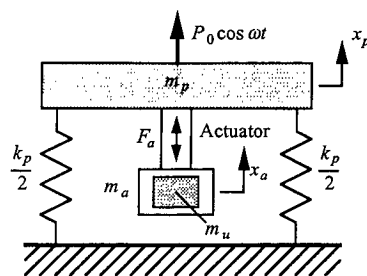


Fig.5 Vibration-type mass measurement system using an active dynamic vibration absorber

4. 測定方法のまとめ

前章までの議論をまとめると、動吸振器を利用した質量測定は、以下のような観点から分類することができる。

- (1) 測定対象物を回転させるか、振動させるか（測定対象物の運動形態）。
- (2) 動吸振器として非減衰形のものを用いるか、能動形のものを用いるか（動吸振器の種類）。
- (3) 振動式の場合には、調和外力を発生するのに、アクチュエータで直接加振するか、ロータのつり合いを利用するか、慣性質量を利用するか（加振機構）。
- (4) 振動式で非減衰形動吸振器を用いる場合は、吸振質量の振動振幅から質量を推定するか、反共振周波数から推定するか（測定量）。
- (5) 慣性質量を利用して加振する場合には、測定対象物を吸振質量側に取り付けるか、慣性質量側に取り付けるか（測定対象物を付加した質量の役割）。

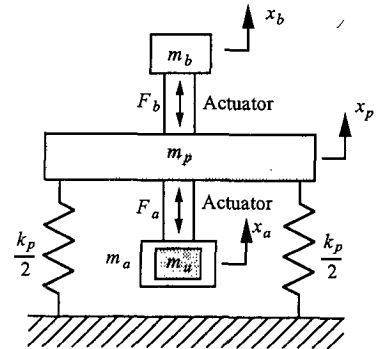
以上の分類をまとめて図7に示す。

能動形動吸振器を用いる場合には、フレームの振動を止めるためにどのような制御方法を適用するか、という観点から分類することもできる。このような制御目的に対しては、以下のような制御方法の有効性が実証されている。

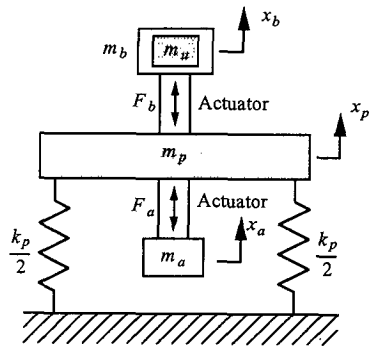
- (1) 非減衰形動吸振器と等価な系を実現し、その固有振動数とテーブルの回転速度とを一致させる⁽¹⁾、
- (2) 繰返し・学習制御を適用する⁽⁴⁾、
- (3) 出力レギュレーション理論を適用する⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾、
 - (3.a) 調和外力を推定する外乱オブザーバを構成しフィードフォワード制御を漸的に実現する⁽⁵⁾、
 - (3.b) 調和外力のモデルをフィードバックループ内に挿入する⁽⁶⁾、
 - (3.c) 外乱同期信号を利用して周波数追従機能を備えた制御系を構成する^{(2),(7),(8)}。

5. 実験

5.1 実験装置 振動式質量測定装置として試作した装置の概観を図8に示す。これは、図6で原理を示したように、動吸振器としては能動形のもの、加振機構としては慣性質量を利用したものを備えている。これらは、加振・吸振の対象となるフレーム・ばね系に取り付けられている。ばねとしては、1対の板ばねが用いられている。加振質量と吸振質量の駆動用アクチュエータとしては、バイモルフ型圧電素子を用いている。各質量の運動およびフレームの振動は渦電流形変位センサで検出している。装置の諸元を表1に示す。



(a) sample fixed on the absorber mass



(b) sample fixed on the inertial mass

Fig.6 Vibration-type mass measurement system with an active dynamic vibration absorber and an inertial-mass vibrator

Movement of a mass to be measured

- Centrifugal type
- Vibration type



Excitation mechanism

- Direct
- Unbalanced rotor
- Inertial mass



Location of a mass to be measured

- Absorber mass
- Inertial mass

Dynamic vibration absorber

- Active
- Undamped



Detected quantity (in case of vibration type)

- Antiresonant frequency
- Vibration amplitude of the absorber mass

Fig.7 Classification of mass measurement systems using a dynamic vibration absorber

この表で、 c_p は、図6には示されていないが、フレームに作用する減衰力の粘性抵抗係数である。

フレームの振動を止める制御方法としては、外乱同期信号を利用したサーボ補償器を用いることにした⁽⁷⁾。能動形動吸振器の制御信号および慣性型加振器の駆動信号は、D S P (TMS320C30)を核とするデジタル制御システムによって生成した。

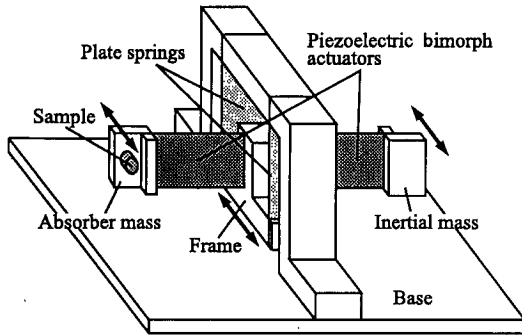


Fig.8 Schematic drawing of the experimental apparatus

Table 1 Parameters of the experimental apparatus

Parameter	Value
m_p	194.94 g
k_p	9.13×10^2 N/m
c_p	8.29×10^{-2} Ns/m
m_a	28.370 g
m_b	28.489 g

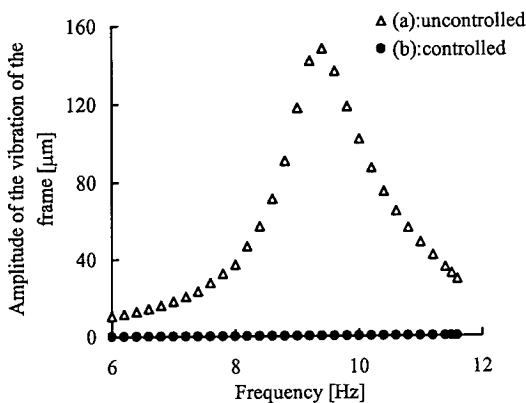


Fig.9 Results of control with the servocompensator using exogenous signals synchronized with excitation

5.2 実験結果 加振用アクチュエータの駆動信号の振幅を一定として周波数を変化させたときのフレームの振動の様子を図9に示す。図には、つぎの場合が示されている。

(a)動吸振器が動作していないとき。

(b)外乱同期信号を利用した制御を実施しているとき。図から、外乱同期信号を利用した制御によって、どの周波数においても、フレームの振動がほとんどみられない状態が実現されていることが確認できる。

つぎに、外乱同期信号を利用した制御を実施しているときの吸振質量の運動から、測定対象物の質量を求めた結果を図10に示す。測定するときの加振信号の周波数は10Hzとし、吸振質量に11種類のサンプル(1.800~4.946 g)を取り付けて質量測定を行った。実際の質量 m_t と、提案する測定方法に基づいて式(11)から求めた質量の実測値 m_v との関係を、最小二乗法を適用して直線近似してみると、次のようになる。

$$m_v = 0.013 + 0.991m_t \quad (37)$$

また、直線からのずれは0.5%以内である。

これらの結果から、質量振動式測定では、質量回転式測定^{(1),(2)}と同程度ないしはそれ以上の精度で質量測定を実施できることが確認できる。

6. あとがき

動吸振器を利用した質量測定法を分類し、各方式の原理と特徴について述べた。質量振動式測定装置を試作し、実際に質量測定を行った。実験の結果、質量振動式測定装置は、高精度の質量測定を実現する可能性を持っていることが確認できた。

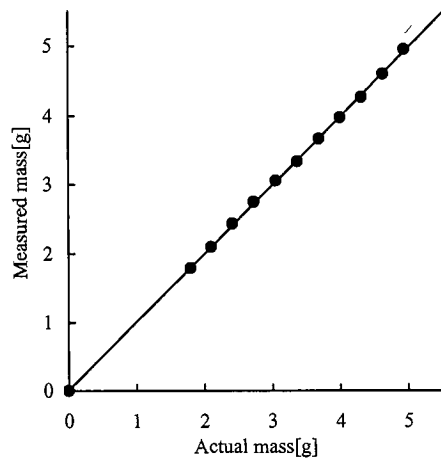


Fig.10 Measurement results

現在、それぞれの方式について、装置の試作および測定実験を行い、どの方式が精密な質量測定に最適であるか、検討している。

なお、本研究の一部は、文部省科学研究費補助金基盤研究(B)の補助を得て行った。

参考文献

- (1) 水野, 荒木: 動吸振器を利用した無重力環境下での質量測定, 計測自動制御学会論文集, 32 巻, 8 号, (1996), 1145.
- (2) 水野, 根岸: 能動形動吸振器を備えた質量測定装置の試作, 日本機械学会論文集 (投稿中) .
- (3) 前田, 増尾, 馬場: 無重力環境下における遠心力を利用した質量測定, 第 32 回計測自動制御学会学術講演会予稿集, (1993), 899.
- (4) Mizuno, T. and Araki, K., Mass Measurement System Using a Dynamic Vibration Absorber, Proc. XIV IMEKO World Congress, Vol.III, (1997), 139.
- (5) 水野, 森谷, 荒木: 電磁サーボ式能動形動吸振器系の出力レギュレーション制御, 日本機械学会論文集 (C編), 58 巻, 556 号, (1992), 3523.
- (6) Mizuno, T., Moriya, M. and Araki, K., Robust Disturbance Cancellation in an Active Dynamic Vibration Absorber System, Control Engineering Practice, Vol.3, No.6, (1995), 773.
- (7) Mizuno, T. and Araki, K., Frequency-Tracking Servocompensator to Systems with Sinusoidal Disturbance/Reference Signals: Realization of the Internal Model Using Exogenous Synchronous Signals, Proc. 35th IEEE Conference on Decision and Control, Vol.3, (1996), 2519.
- (8) 水野, 荒木: 周波数追従機能を備えた能動形動吸振器, 日本機械学会論文集 (C編), 63 巻, 612 号, (1997), 2616.