Material Tester Using Pendulum

Hitomi Ito Non-member (Gunma University, m06e607@gs.eng.gunma-u.ac.jp)

Yusaku Fujii Member (Gunma University, fujii@el.gunma-u.ac.jp)

Takao Yamaguchi Non-member (Gunma University, yamagme4@me.gunma-u.ac.jp)

Yoichi Sugita Non-member (Gunma University, m07e627@gs.eng.gunma-u.ac.jp)

Masayuki Yokota Non-member (Gunma University, yokota@el.gunma-u.ac.jp)

Keywords : levitation mass method, optical interferometer, mechanical characteristics, pendulum

A practical and low cost instrument for accurately measuring small impact force is proposed. In the various industrial and research applications such as materials testing, the requirements for evaluating the mechanical characteristics of materials and structure have increased. The second author has proposed the levitation mass method (LMM) that can generate and measure a varying force. In the past, the material tests have conducted by means of the LMM. In this method, a mass is levitated using a pneumatic linear bearing. However, the pneumatic linear bearing needs an expensive air compressor and mechanism is exact and complicated. In addition, the pneumatic linear bearing can not be applied in an extremely high or low temperature, or vacuum environments. In this paper, the mechanical characteristics of material against small impact force are investigated by means of the newly developed pendulum mechanism. In this method, a pendulum mechanism with 6 wires is used to realize the static motion of mass which is the swing part of pendulum. Mass is suspended by 3 triangles formed using 6 wires. During the measurement, only the Doppler shift frequency of the laser light reflecting on the mass is highly accurately measured using an optical interferometer. The velocity, position, acceleration and inertial force of the mass are calculated from the measured time-varying Doppler frequency shift.

Figure 1 shows the schematic diagram of the experimental setup developed for measuring the mechanical characteristics of material against small impact forces.

In the experiment, free-swing measurement and collision measurement are conducted. To evaluate the restoring force of pendulum, the free-swing measurement is conducted. In the

collision measurement, the total force acting on the mass is measured.

Figure 2 shows the change in the restoring force, $F_{\text{restoring}}$, against position. The linear regression equation is $F_{\text{regression}} = -33.456x$. The coefficient of determination (R^2) is approximately 0.9991.

Figure 3 shows the change in the corrected force, $F_{\text{corrected}} = F_{\text{mass}} - F_{\text{regression}}$, against position. To obtain the corrected force, $F_{\text{corrected}}$, the linear regression equation obtained from the free-swing measurement, $F_{\text{regression}} = -33.456x$, is used. Elastic hysteresis, which is caused by the viscosity of material, is clearly observed.

Fig. 2. Change in the restoring force, $F_{\text{restoring}}$, against position

Fig. 3. Change in the corrected force, $F_{\text{corrected}} = F_{\text{mass}} - F_{\text{regression}}$, against position

Fig. 1. Experiment setup

振り機構を用いた材料試験

非会員 伊藤 瞳* 正 員 藤井 雄作*
 非会員 山口 誉夫* 非会員 杉田 陽市*
 非会員 横田 正幸*

Material Tester Using Pendulum

Hitomi Ito*, Non-member, Yusaku Fujii*, Member, Takao Yamaguchi*, Non-member,
 Yoichi Sugita*, Non-member, Masayuki Yokota*, Non-member

A practical and low cost instrument for accurately measuring small impact force is proposed. In the various industrial and research applications such as materials testing, the requirements for evaluating the mechanical characteristics of materials and structure have increased. In this paper, the mechanical characteristics of material against small impact force are determined by means of the newly developed pendulum mechanism that based on the levitation mass method (LMM). In this method, a pendulum mechanism is used as a substitute for expensive pneumatic linear bearing. A mass that is suspended using a newly developed pendulum mechanism with negligible friction and a stable restoring force, is made to collide with the object under test. A pendulum mechanism with 6 wires is used to realize the static motion of mass that is the swing part of pendulum. Mass is suspended by 3 triangles formed using 6 wires. The Doppler frequency shift of a laser beam reflecting on the mass is highly accurately measured using an optical interferometer. The velocity, position, acceleration and inertial force of the mass are calculated from the measured time-varying Doppler frequency shift. The performance of the proposed method is demonstrated by evaluating the viscoelasticity (i.e. hysteresis curve between force and displacement, curve between force and velocity) of a small silicon-gel block under an impact load.

キーワード：浮上質量法，光波干渉計，力学特性，振り

Keywords : levitation mass method, optical interferometer, mechanical characteristics, pendulum

1. 背 景

近年，材料試験，金属工業，運動制御など様々な工業や応用研究の分野において，材料や構造体の機械特性評価の必要性が高まっている。評価方法として，材料に作用する力は力センサを用いて測定され，材料の位置は変位センサによって測定される。しかしながら，力センサは一般的に静的環境下において分銅を使った方法で校正される。現在，力センサの動的特性を評価するための基準方法はない。力センサの動的校正方法は未だ確立されていないが，力センサに対する動的校正法としていくつかの試みがある。その一つは，ドイツの国立標準研究所である物理工学研究所 (PTB) において，「連続振動力に対する動的校正法」に関する研究開発が進められている^{(1)~(3)}。

一方，著者らは既存の力センサを用いない浮上質量法^{(4)~(13)}を提案している。浮上質量法では，空気圧で浮上支持した質量の慣性力は，質量と加速度の積として求められ，質量の加速度は光波干渉計を用いて高精度に測定される。著者らはこれまで，浮上質量法に基づいた，衝撃応答⁽⁴⁾，ステップ応答⁽⁵⁾，振動応答⁽⁶⁾に対する力センサの動的校正法を提案・開発している^{(4)~(6)}。

また，浮上質量法を応用して材料試験^{(7)~(10)}を行ってきた。さらには，空気軸受内部に働く摩擦力評価法⁽¹¹⁾，マイクロニュートンレベルの力の発生・計測法⁽¹²⁾も開発している。

浮上質量法を用いた測定において，空気軸受は十分に小さな動摩擦力での直線運動を実現するために用いられる。しかしながら，空気軸受は高価な空気圧縮機を必要とし，機構が精密で複雑である。また非常に高温・低温な環境，真空環境では使用が困難である。そこで，空気軸受の代わりとして，実用的で安価，かつ小型の装置開発が必要である。

* 群馬大学工学部電気電子工学科
 〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1
 Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering,
 Gunma University.
 1-5-1 Tenjinchou, Kiryuusi, Gunma 376-8515

本論文では、微小な衝撃力を正確に測定するための実用的で低コストな装置を提案する。著者らは以前に 4 本ワイヤー支持の振子機構を開発している⁽¹³⁾。しかしながら、以前に提案した振子は、4 本のワイヤーで形成される 2 つの台形によって吊るされており、スイング部の動きを一方向に制御できず、スイング部の動きが安定していなかった。そこで、振子のスイング部の安定した動きを実現するため、6 本ワイヤー支持の振子機構を開発した。スイング部は、6 本のワイヤーで形成される 3 つの三角形によって吊るされている。

また、この振子機構は、慣性質量の支持機構として空気軸受を用いた場合と同程度の精度である不確かさ 0.2%から 0.3%程度^{(8)~(10)}を目標とする。

本論文では、6本ワイヤー支持の振子機構を用い、シリコンゲルを試料として、粘弾性材料の材料試験を行った。粘弾性材料の力学モデルには、多くのモデルが提案されており、さらに現在も研究が続けられている。しかし、いずれのモデルも基本的には力変位間の履歴曲線、力速度間の履歴曲線などを関数近似することでパラメータを得る。したがって関数近似によって誤差が導入される可能性がある。本論文では、そのような関数近似の誤差を出来る限り含まれない条件、すなわち力変位間の履歴曲線、力速度間の履歴曲線の原波形で、提案計測法の精度を議論していく。

により形成される3つの三角形によって吊るされている。2本のワイヤーとアッパーベースでそれぞれ三角形を形成している。ワイヤーは、ワイヤー保持ブロックで振子本体とアッパーベースにそれぞれ固定される。各ワイヤーは直径約0.1 mm、長さ約235 mmである。各ワイヤーの長さ調節機構として、ギターに用いられるペグを使用した。

Fig. 3には振子の模式図を示す。以前は(a)に示す4本ワイヤーの振子を用いていたが、スイング部の動きを一方方向に安定させることが出来なかった。今回用いた(b)に示す6本ワイヤーの振子では、ペアのワイヤー3組で三角形を形成することで、安定した一方方向運動を実現した。

2. 実験装置

Fig. 1には、実験装置の概略図を示す。実験装置は主に振子とマイケルソン型ヘテロダイン干渉計で構成されている。干渉計の光源から射出された二つの直交偏光を持つレーザ光はまず、無偏光ビームスプリッタ (NPBS) により二分される。二分されたレーザ光の一方は、そのまま偏光板 (GTP) を通しフォトダイオード (PD2) により電気信号として取り出される。また、NPBSにより二分されたもう一方のレーザ光は、再び偏光ビームスプリッタ (PBS) により信号光と参照光に分離される。参照光は固定されたコーナーキューブプリズム (CC) により反射され、信号光は振子に

Fig. 3. Schematic of the pendulum.

取り付けられた CC により反射される。CC により反射された信号光と参照光は GTP を通して干渉し、PD1 により取り出される。本実験では、質量の慣性力は試料に作用する参照力として使用される。衝撃力は、質量と試料の間で衝突を引き起こすことによって発生させる。

Fig. 2 には、実験装置の写真を示す。(a)には、今回実験に使用した 6 本ワイヤー支持の振子機構、(b)には、ワイヤーの長さ調節用巻き機構の拡大写真を示す。実験に用いた振子の可動部は、試料に衝突する金属ブロック、干渉計のためのコーナーキューブプリズム (CC)、ワイヤー保持ブロックで構成されている。金属ブロックの先端は平らな形状である。振子の可動部の総質量は約 0.78222 kg である。振子は、定盤に固定されたアッパーベースから 6 本のワイヤーにより形成される 3 つの三角形によって吊るされている。2 本のワイヤーとアッパーベースでそれぞれ三角形を形成している。ワイヤーは、ワイヤー保持ブロックで振子本体とアッパーベースにそれぞれ固定される。各ワイヤーは直径約 0.1 mm、長さ約 235 mm である。各ワイヤーの長さ調節機構として、ギターに用いられるペグを使用した。

Fig. 3 には振子の模式図を示す。以前は(a)に示す 4 本ワイヤーの振子を用いていたが、スイング部の動きを一方方向に安定させることが出来なかった。今回用いた(b)に示す 6 本ワイヤーの振子では、ペアのワイヤー 3 組で三角形を形成することで、安定した一方方向運動を実現した。

Fig. 2. Photograph around test section.

Fig. 3. Schematic of the pendulum.

実験は、次の手順で行う。まず、細い合成繊維を使い、スイング部を Fig. 1 での右方向に引っ張る。次に、極力振動を与えないようカッターを使い、静かに糸を切断することにより、可動部はスイングし始める。質量に作用する慣性力は、質量の加速度から計算される。質量の加速度は光波干渉計を使って高精度に測定される。

本実験では、試料としてシリコンゲル片を用いた。このシリコンゲル片は定盤に取り付けられたベースに固定される。このベースは可動式で、衝突実験とフリースイング実験の2種類の実験に併用できる。Fig. 1 では、可動ベースは衝突実験用に“position-1”にセットされている。“position-2”での可動ベースを破線で示している。振子の復元力評価用のフリースイング実験では、可動ベースを“position-2”にセットし、スイング部は復元力によって前後に動く。スイング部に作用する力 F_{mass} は質量 M と加速度 a の積として計算される。スイング部に作用する力 F_{mass} は、次式で表すように、試料から作用する力 F_{material} と振子の復元力 $F_{\text{restoring}}$ に分けられる。

$$F_{\text{mass}} = F_{\text{material}} + F_{\text{restoring}} \quad (1)$$

実験では、力 F_{mass} は質量と加速度の積として求められる。加速度は、スイング部の速度から計算される。速度 v は、測定したドップラーシフト周波数 f_{Doppler} から、実験環境下における空気中のレーザの波長 λ_{air} を用いて、次式のように求められる。

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

$$f_{\text{Doppler}} = - (f_{\text{beat}} - f_{\text{rest}}) \quad (3)$$

f_{beat} は信号光と参照光の差周波数、 f_{rest} は、可動部が静止した状態での f_{beat} の値である。速度、位置、加速度、力の座標方向は、Fig. 1 の右側を正方向としている。

干渉計の光源には、ゼーマンタイプの2周波数 He-Ne レーザを使用する。本実験では、周波数 f_{beat} 及び f_{rest} のみを測定する。信号光と参照光の差周波数 f_{beat} は、光波干渉計の出力に現れる干渉縞から測定され、運動の速度に依存して、参照光の周波数 f_{rest} 、2.75 MHz を中心として変化する。周波数カウンタ (model R5363, manufactured by Advantest Corp., Japan) は連続的に測定し、休止時間なしに $T = 4000 / f_{\text{beat}}$ のサンプリング間隔で6000個のビート周波数 f_{beat} を記録し、メモリに値を保存する。2.75 MHz で周波数カウンタのサンプリング間隔は約 1.5 ms である。同様に、 f_{rest} を同じモデルの別の周波数カウンタで測定する。

2 台の周波数カウンタを使った測定は、AD 変換機を使って発生させたトリガー信号によって開始される。

3. 測 定

実験では、衝突実験とフリースイング実験の2種類の実験を行う。フリースイング実験は、振子の復元力 $F_{\text{restoring}}$ を評価するための実験である。

Fig. 4 には、フリースイング実験の結果の一部を示している。(3)式により計算される周波数 f_{Doppler} (Hz) から可動部の速度 v (ms^{-1}) が求められ、求めた速度を時間積分、時間微分

Fig. 4. Measurement result of free-swing.

することにより可動部の位置 x (m)、加速度 a (ms^{-2}) がそれぞれ求められる。振子の可動部に作用する力 F (N) は、加速度 a (ms^{-2}) と可動部質量 M (kg) から慣性の法則より次式で求める。

$$F = Ma \quad (4)$$

4. 実験結果

〈4.1〉 Free-swing Measurement 振子の復元力 $F_{\text{restoring}}$ を評価するため、フリースイング試験を行った。実験では、可動ベースを“position-2”にセットし可動部を前後にスイングさせる。測定時間はおよそ9秒である。Fig. 5 は、スイング運動における可動部の位置 x の振幅の減衰を示している。スイング運動の n 番目のピークの振幅を X_n 、 $n+1$ 番目のピークの振幅 X_{n+1} とすると、減衰率 ζ は次式で表される。

$$\zeta = \log_e(X_n / X_{n+1}) / 2\pi \quad (5)$$

振幅の最大値付近では、値の変動がみられた。これは、振子が振幅の最大値付近でほぼ静止状態となる際に、装置からの振動が糸を通して振子に伝わるためであると考えられる。この装置からの振動の影響を除去するため、11 個の移動平均化処理を行い、最大値を求めた。シリコンゲル片のような粘弾性材料の減衰率は、0.05～1.0 程度であることから、今回の実験における減衰は十分に小さいと言える。

Fig. 6 は、位置 x に対する復元力 $F_{\text{restoring}}$ の変化を示している。Fig. 6 より、位置 x と復元力 $F_{\text{restoring}}$ との間に明確な線形関係が確認できる。グラフから、復元力 $F_{\text{restoring}}$ を表す直線回帰式は次式のように求められた。

$$F_{\text{regression}} = -33.456 x \quad (6)$$

Fig. 6 には、(6)式で表される直線回帰式 $F_{\text{regression}}$ も示している。求めた直線回帰式の決定係数 R^2 は、およそ 0.9991 で

Fig. 5. Damping ratio of force.

Fig. 6. Restoring force of the pendulum.

Fig. 7. Residual force against position.

ある。振子の復元力の補正は、直線回帰式 $F_{\text{regression}}$ を測定結果から引くことにより行われる。振子の復元力を $F_{\text{restoring}}$ 、残りの力を F_{residual} として次式で表す。

$$F_{\text{residual}} = F_{\text{restoring}} - F_{\text{regression}} \quad \text{.....(7)}$$

Fig. 7 には、同一のフリースイング実験における、(7)式で表される残りの力を示している。残りの力 F_{residual} の RMS 値は、約 0.0032 N である。位置 $x = -0.012$ m 付近でやや大きな値を示しているが、全体的には位置への力の依存性が観察されないことから、回帰式の係数は適切であると言える。

〈4・2〉 Collision Measurement 衝突実験では、可動ベースを“position-1”にセットし、質量を試料と衝突させる。質量に作用する全ての力は、フリースイング実験と同

(a) F_{mass} (b) $F_{\text{corrected}}$

Fig. 8. Impact force against position.

様の方法から加速度と質量の積によって計算される。

Fig. 8 は、11 回の連続した衝突について、位置に対する力の変化を示している。(a)は、復元力を含んだ力 F_{mass} 、(b)は復元力を補正した力 $F_{\text{corrected}}$ を示している。 $F_{\text{corrected}}$ は次式で求められる。

$$F_{\text{corrected}} = F_{\text{mass}} - F_{\text{regression}} \quad \text{.....(8)}$$

グラフでは、可動部と試料との衝突開始位置を $x = 0$ 、時刻を $t = 0$ としている。(a)に示したグラフより、可動部とシリコンゲル片が衝突していない部分 ($x > 0$) において $F = 0$ にならない。これにより、測定された力には復元力 $F_{\text{restoring}}$ の影響が現れていることがはっきりと確認できる。

補正には、フリースイング実験から求めた直線回帰式(6)を使用する。補正した力 $F_{\text{corrected}}$ は、衝突実験の間中、シリコンゲル片から質量に作用する力 F_{material} として見積もられる値である。質量からシリコンゲル片に作用する力は作用反作用の原理に従い、 $-F_{\text{material}}$ と表せる。補正した力は、 $x > 0$ の部分において力がほぼゼロを示していることから、適切な補正が行われ、シリコンゲル片から質量に作用する力として見積もることが出来たと言える。

Fig. 9 は、Fig. 8(b)における衝突部分の拡大図を示している。Fig. 9 より、シリコンゲル片の粘性によって生じる弾性ヒステリシスははっきりと観察される。1 回目の衝突におい

Fig. 9. Impact force against position.

Fig. 10. Change force against velocity.

Fig. 11. The full width at half maximum of the impulse, W_{hv} , against the maximum value of the impact force, F_{max} .

て、力が最大値約 2.99 N に達した時の押し込み深さは約 -0.742 mm である。最大の押し込み深さ、すなわち x が負の方向に最大となる位置は約 -0.749 mm で、この時の力は約 2.97 N である。振子がシリコンゲル片から完全に離れた位置は、衝突開始位置よりも約 95 μ m ずれた位置となり、力は負の値を示している。これは、シリコンゲル片の固着によるものと考えられる。曲線 (F - x) で囲まれた面積は、シリコンゲル片が受け取ったエネルギーに相当する。このエネルギーは、シリコンゲル片と可動部の衝突時に試料内

Fig. 12. Relationship between the energy dissipation ratio, W/E_1 , and the initial kinetic energy of the moving part, $(1/2)mv_1^2$.

Fig. 13. Change in the velocity where the force has its maximum, V_{Fmax} , against the maximum value of the impact force, F_{max} .

部に熱エネルギーとして散逸したと考えられる。1 回目の衝突において、振子がした仕事 W は、運動曲線に沿った力 F の積分として次式で表され、約 0.51 mJ と計算される。

$$W = \int (-F)dx \dots \dots \dots (9)$$

Fig. 10 は、速度 v と補正した力 $F_{corrected}$ の関係を示している。1 回目の衝突において、力が約 2.99 N の最大値に達した時の速度 v_{Fmax} は、およそ -0.0077 ms $^{-1}$ である。衝突前後の速度はそれぞれ、 $v_1 = -0.053$ ms $^{-1}$ 、 $v_2 = 0.039$ ms $^{-1}$ 。運動エネルギーの変化 $E_2 - E_1$ は、約 0.49 mJ である。 E_1 、 E_2 はそれぞれ衝突前の運動エネルギー、衝突後の運動エネルギーであり、次式で表される。

$$E_1 = Mv_1^2 / 2 \dots \dots \dots (10)$$

$$E_2 = Mv_2^2 / 2 \dots \dots \dots (11)$$

(9)式によって得られた仕事量 W と運動エネルギーの変化量 $E_2 - E_1$ にわずかなずれが生じた。これは、今回の実験における時間分解能では、力の微小な変化を十分に捉えきれなかったためと考える。そのため、 F - x のグラフから積分によって求めた値と運動エネルギーの変化量の値が完全には

一致しなかったのだと考えられる。

Fig. 11～Fig. 13 には 74 回分の衝突データを示している。Fig. 11 は、衝撃の半値幅 W_{hv} と衝撃力の最大値 F_{max} の関係を示している。力の最大値が小さくなるに伴い、半値幅は増加している。これは、バネ定数が小さくなっていくことを示している。しかし、力の最大値が 0.1 N より小さい条件では、逆に力の最大値が小さくなるにつれて半値幅が小さくなる。すなわち、バネ定数が大きくなる。以降では、半値幅が小さい。これは、シリコンゲル片が漸軟性から漸硬性へと変化するバネ特性が原因と考えられる。

Fig. 12 は、エネルギー損失の割合 $W/E_1 = W/(1/2mv_1^2)$ と初期運動エネルギー $E_1 = 1/2mv_1^2$ の関係を示している。 W/E_1 は、試料の減衰比に関係する。シリコンゲル片の粘弾性挙動は、歪み速度が高速になるとゲル状の領域からガラス状の領域に変化する。ガラス領域からゲル領域へと変化する際、減衰比は急激に変化する。その変化がグラフに現れている。グラフより、シリコンゲル片の減衰比は速度依存性があることがわかる。

Fig. 13 は、衝撃力の最大値 F_{max} と、力が最大値に達したときの速度 v_{Fmax} との関係を示している。力の最大値が大きくなるのに伴い、 v_{Fmax} の値が減少している。これは、もし、シリコンゲル片が弾性の特性のみを持つ場合、力が最大値に達した時、速度 $v=0$ となるはずであることから、シリコンゲルが弾性の特性だけではなく粘性の特性も持ち合わせていることを表している。

5. 不確かさ評価

本実験における不確かさ要素は、2 つの要素の合成と考える。

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \dots\dots\dots (12)$$

(U_A) ゼロ点に関する不確かさ

(U_B) 可動部に作用する慣性力測定のスケールの不確かさ

〈5・1〉 ゼロ点に関する不確かさ Fig. 8(b) に示されたグラフで、0.0 mm < x < 1.0 mm の範囲において、衝突前後の補正した力の平均値、標準偏差、RMS 値はそれぞれ -3.31 mN, 3.45 mN, 4.78 mN である。4.78 mN の RMS 値は、質量の機械的振動による不確かさ、振子の復元力補正式の不確かさ、レーザの周波数安定性、光波干渉計を用いた周波数測定の不確かさを含むゼロ点の不確かさの合計に相当する。従って、ゼロ点に関する標準不確かさは、4.78 mN と推定される。

〈5・2〉 可動部に作用する慣性力測定のスケールの不確かさ

〈5・2・1〉 光軸のアライメント 光軸合せにおける最大の誤差要因は、約 1 mrad 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、約 5×10^{-7} の速度の相対不確かさとなり、無視できる。

〈5・2・2〉 周波数安定性 実験で使用した周波数の安定性の不確かさは、およそ 1×10^{-6} で、これは無視できる。

〈5・2・3〉 質量 可動部質量の標準不確かさは 0.01 g で、これは 1.27×10^{-5} の力測定における相対的な標準不確かさに相当し、無視できる。

〈5・3〉 総合相対標準不確かさ 上記に述べた 〈5・1〉、〈5・2〉 節の不確かさ要素から、不確かさは U_A が支配的で、本実験における総合標準不確かさは約 4.78 mN である。これは、本実験で可動部に作用した力の最大値 ($F_{max} = 3.64$ N) の約 0.13% に相当する。

6. 考 察

本実験では、これまでの浮上質量法で用いてきた空気軸受の代わりに振子を用いて可動部を支持し、衝突実験を行った。以前に提案していた振子は、4 本のワイヤーで支持されていて、振子に初速を与える際の糸を切ったことによる振動や、衝突した際の衝撃によって横方向へ振子がぶれてしまい、可動部の動きを一方向に制御することが困難であった。4 本のワイヤーで支持する振子機構を用いた場合のゼロ点に関する不確かさは、0.4% であった⁽¹³⁾。一方、今回使用した 6 本のワイヤーで作る三角形の形状により、可動部の移動方向を一方向に制限したため、従来の欠点が解消され、機械的な安定性が改善したものと考ええる。また、ギターの弦調整に使用するペグを用いてワイヤーの長さ調節をした。これにより長さ調節が容易になり、実験装置のセットアップの簡便化につながっていると考ええる。

今回の振子を用いた衝突実験では、不確かさが約 0.13% である。各実験で使用した材料は異なるが、振子機構を用いた場合にも、空気軸受を用いた場合^{(7)~(10)}と同程度の精度で材料の力学特性を測定できることが確認された。振子機構の糸の鉛直方向となす角度が小さく単振動とみなせる場合では、安価で小型の材料試験機としての実用化に向けた期待が高まる。

7. ま と め

今回、以前提案した 4 本ワイヤー支持の振子を改良した、6 本のワイヤー支持の振子機構を用いてシリコンゲル片の材料試験を行った。6 本のワイヤーを用いることにより、振子の可動方向の制限ができ、高精度にシリコンゲル片の材料試験を行うことが出来た。今後、干渉計の光源に LD を使用するなど更なる低コスト化を図ることで、材料試験への応用が期待できる。また、今後、振子機構を用いた場合の、温度による影響について調べる。

謝 辞

本研究は、科学研究補助金(B) 19360185 (KAKENHI 1960185)の助成によるものである。

(平成 20 年 6 月 6 日受付, 平成 20 年 8 月 1 日再受付)

文 献

- (1) R. Kumme : "Investigation of the comparison method for the Dynamic calibration of force transducers", Measurement, Vol.23, pp.239-245 (1988)

- (2) Y.-K. Park, R. Kumme, and D.-I. kang : “Dynamic investigation of a binocular six-component force-moment sensor”, *Sci. Technol*, Vol.13, pp.1311-1318 (2002)
- (3) Y.-K. Park, R. Kumme, and D.-I. kang : “Dynamic investigation of a three-component force-moment sensor”, *Meas. Sci. Technol*, Vol.13, pp.654-659 (2002)
- (4) Y. Fujii : “Measurement of impulse response of force transducers”, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol.72, No.7, pp.3108-3111 (2001)
- (5) Y. Fujii : “Proposal for a step response evaluation method for force transducers”, *Meas. Sci. Technol.*, Vol.14, pp.1741-1746 (2003)
- (6) Y. Fujii : “A method for calibrating force transducers against oscillation force”, *Meas. Sci. Technol.*, Vol.14, pp.1259-1264 (2003)
- (7) Y. Fujii, D. Isobe, S. Saito, H. Fujimoto, and Y. Miki : “A method for determining the impact force in crash testing”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.14, No.6, pp.959-965 (2000)
- (8) Y. Fujii and T. Yamaguchi : “Method for evaluating material viscoelasticity”, *Rev. Sci. Instrum*, Vol.75, No.1, pp.119-123 (2004)
- (9) T. Suzuki, Y. Fujii, and J. Valera : “Optical method for strength test for general industrial products”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.20, No.3, pp.735-744 (2006)
- (10) H. Ito and Y. Fujii : “Evaluation of mechanical response of human palm to small impact force”, *T IEE Japan*, Vol.126-A, No.6, pp.297-302 (2007-6) (in Japanese)
伊藤 瞳・藤井雄作 : 「手のひらの力学特性評価」, 電学論 A, **126**, 6, pp.297-302 (2007-6)
- (11) Y. Fujii : “Measurement of force acting on a moving part of a pneumatic linear bearing”, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol.74, No.6, pp. 3137-3141 (2003)
- (12) Y. Fujii and T. Yamaguchi : “Method for evaluating material viscoelasticity”, *Rev. Sci. Instrum*, Vol.75, No.1, pp.119-123 (2004)
- (13) Y. Fujii : “Pendulum for precision force measurement”, *Rev. Sci. Instrum*, Vol.77, No.3, pp.035111-1-5 (2006)

伊 藤 瞳

(非会員) 1983 年 10 月 18 日生。2006 年 3 月群馬大学 工学部 電気電子工学科卒業。同年 4 月群馬大学 大学院 工学研究科 電気電子工学専攻入学。現在、浮上質量法を用いた生体の力学特性の高精度評価法に関する研究に従事。

藤 井 雄 作

(正員) 1965 年 9 月 15 日生。1989 年 3 月東京大学 工学部船舶工学科卒業。1992 年 3 月東京大学 大学院 工学系研究科修士課程 (船舶海洋工学専攻) 修了。同年 4 月川崎製鉄 (株) 入社。1996 年 4 月工業技術院計量研究所入所。2004 年 4 月群馬大学教授。現在、計測工学の研究に従事。IEEE 会員。

山 口 誉 夫

(非会員) 1963 年 3 月 14 日生。1986 年 3 月名古屋大学 工学部卒業。同年、富士重工業 (株) スバル研究所・音振動グループ, CAE グループに所属。2000 年群馬大学 機会システム工学科准教授。現在、自動車や構造物の振動・防音特性、柔軟構造の非線形、カオス振動の研究に従事。

杉 田 陽 市

(非会員) 1983 年 5 月 4 日生。2007 年 3 月群馬大学 工学部 電気電子工学科卒業。同年 4 月群馬大学 大学院 工学研究科 電気電子工学専攻入学。現在、無重力環境における質量測定器に関する研究に従事。

横 田 正 幸

(非会員) 1967 年 1 月 31 日生。1998 年群馬大学大学院工学研究科博士後期課程修了。2000 年から同大学電気電子工学科に助手として勤務。主として、光ファイバセンサ応用、干渉計計測などの光応用計測に従事。現在、同科の助教。工学博士。