

平成21年 5月14日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19360185
 研究課題名（和文） 浮上質量法を応用した高精度材料試験法の開発
 研究課題名（英文） Development of high precision material testing method using the Levitation Mass Method
 研究代表者
 藤井 雄作（FUJII YUSAKU）
 群馬大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：80357904

研究成果の概要：

浮上質量法は、浮上支持した質量（慣性質量）に作用する慣性力を光波干渉計を用いて高精度に取り出すことを特徴とする、変動する力の発生・計測法である。本研究では、浮上質量法を応用した超高精度な粘弾性試験法の実現に必要な技術開発を行った。その結果、実用的かつ超高精度な振動粘弾性試験機、衝撃粘弾性試験機の実現見通しを得た。また、低コスト粘弾性試験機実現のための技術開発を実施し、コスト低減できる見通しを得た。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	10,400,000	3,120,000	13,520,000
2008年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
年度			
年度			
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：超精密計測，先端機能デバイス，機械材料・材料力学，機械材料・制御，トライボロジー

1. 研究開始当初の背景

「浮上質量法」(The LMM: The Levitation Mass Method) は、研究代表者が考案・開発してきた、世界的にも類例のないユニークな手法である。「浮上質量法」は、浮上支持した質量（慣性質量）に作用する慣性力を光波干渉計を利用して高精度に取り出すことを特徴とする、「変動する力」の発生・計測法である。浮上質量法では、浮上支持した物体（慣性質量）に作用する慣性力を、光波干渉計により、超高精度に測定する。実験中に光

波干渉計で測定するのは、物体にあてた信号光のドップラーシフト周波数 f のみである。このドップラーシフト周波数 f から、物体の速度 v 、位置 x 、加速度 a 、慣性力 F を数値微分、数値積分などにより求める。これにより、物体の速度 v 、位置 x 、加速度 a 、慣性力 F を超高精度に、かつ、完全に同期したデータとして測定することができる。

研究代表者は浮上質量法に関して、研究開始当初までに、以下に関する研究を実施してきており、英文学術誌(インパクトファクタ

付)に23件の論文を発表してきた。

(1) 浮上質量法を応用した力センサの動的校正法

(2) 浮上質量法を応用した材料試験法、生体計測法

(3) 浮上質量法を応用したマイクロフォース発生・計測法

(4) 浮上質量法を応用したマイクログラフィ環境下で動作する質量測定器

(5) 浮上質量法の精度向上・機能向上に関する研究

研究代表者は、(1)の「力センサの動的特性評価法」として、浮上質量法を応用した数多くのバリエーションを提案し、当該分野では第一人者である。しかしながら、力センサの動的校正法を確立するためには、各種形態の変動力（インパクト、ステップ、オシレーションなど）に対する特性を統合化する必要がある、ここに大きな困難がある。そのため、近い将来において力センサの動的校正法が確立される目処は、全く立っていない。

一方、研究代表者は、浮上質量法を応用し、力センサを用いない、従来にない超高精度・超高分解能な材料試験（粘弾性試験、摩擦試験、強度試験など）を実現してきた。

2. 研究の目的

本研究では、これまでに蓄積してきた技術基盤の上にたち、研究代表者が提案（発明）・開発を進めている「浮上質量法（The Levitation Mass Method）」を応用した超高精度な粘弾性試験法を開発することを目的とする。期間内に、以下を開発する。

(1) Oscillation Response 粘弾性試験機（最高精度型）：任意の温度（温度範囲 $0^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ 、温度設定不確かさ 1°C ）において、任意の単振動力に対する被試験材料の粘弾性特性を高精度に評価することが可能な単振動粘弾性試験機。試験力の周波数：1 Hz ~ 1 kHz、ピーク値の範囲：1 N ~ 1 kN、力測定の不確かさ：0.1% 程度、力測定の時間分解能：0.01 ミリ秒。

(2) Impact Response 粘弾性試験機（最高精度型）：任意の温度（温度範囲 $0^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ 、温度設定不確かさ 1°C ）において、任意のパルス状の力に対する被試験材料の粘弾性特性を高精度に評価することが可能なインパクト粘弾性試験機。試験力の半値全幅：0.5 ms ~ 1 s、ピーク値の範囲：1 N ~ 1 kN、力測定の不確かさ：0.1% 程度、力測定の時間分解能：0.01 ミリ秒。

(3) 低コスト型粘弾性試験機：最高精度型で用いられる高価な①「静圧空気直動軸受」を「振子機構」で置き換え、②「ゼーマンレー

ザ」を「LD」で置き換えることにより、低価格な構成を実現する。

上記(1)(2)を満たす浮上質量法に基づく（力センサを用いない）材料試験機は、既存のいかなる材料試験機よりも、はるかに高精度、高分解能な測定が可能である。また、(3)を満たす材料試験機は、当該研究の実用化、標準化、普及促進において、重要な存在になる。

3. 研究の方法

平成19年度は、浮上質量法を利用した高精度粘弾性試験装置の研究開発の中で、まず、(1) Oscillation Response 型（最高精度型）の開発を行う。個別の開発課題として、下記が挙げられる。

① 加振法（システム同定&制御を含む）の開発：一般に材料試験においては、変位と作用力の非線形性のために、変位を正弦波としても、作用力は正弦波にはならない。また、逆も言える。本研究においては、試験材料を含めた試験系全体をシステム同定し、それに基づいて、任意の変位、あるいは、任意の作用力での試験を可能とする加振器制御手法を開発する。具体的には、アクチュエータから作用力が加わるまでの機械的機構を非線形ばね特性を有する多慣性系としてモデル化する。モデル化にあたっては、非線形モデルを用いた実験的システム同定法を適用する。導出したモデルを用いて、入力指令から位置、速度、加速度までの伝達特性を近似的に理想伝達ゲイン1とする連続軌跡追従制御系を構築する。連続軌跡追従制御系の構築にあたっては、これまでに提案している分解加速度制御に基づく軌跡追従制御系にゲインスケジューリング手法を導入することにより達成する。さらにこれを発展させ、試験器において必要不可欠な条件である各状態量の制約を考慮したモデル予測形の新しい制御法を開発する。これには、図中に示した高速リアルタイム制御器が不可欠である。以上により、加速度成分を有する任意の変位・作用力での加振が可能な制御手法を開発する。

② FEMによる材料特性の定式化手法の開発：高精度な材料試験結果に基づく、材料の力学特性を表す校正方程式の導出法を開発を行う。材料非線形性、ヒステリシス減衰などを考慮した動的な非線形有限要素法と各種材料パラメータについての感度解析を行い、実験で得られた変位・速度・加速度の時間波形と周波数応答から供試体の構成方程式を同定する。

③ 防振型光波干渉計の開発：浮上質量法に基づく材料試験機では、光波干渉計の振動を抑止することが非常に重要である。安定化

開発した。

また、浮上質量法に基づく材料試験機に組み込まれる光波干渉計の振動抑制対策を行った。さらに、最近、開発を進めている周波数測定にデジタルを用いる方法の改良・導入も行った。この方法により、既に、市販の周波数カウンタの最上位機種よりも、遥かに、高精度、高分解能な周波数測定を、低価格デジタルにより実現できた。

更に、恒温槽を含めた全体のシステム開発を行い、任意の温度（温度範囲 0℃～80℃、温度設定標準不確かさ 1℃）における実験が可能となった。

(2) Impact Response 粘弾性試験機の開発

Impact Response 材料試験機（高精度型）の開発としては、まず、実用的な衝撃型材料試験機開発の上で必須の機能である、衝突運動量設定機能（直動駆動機構を含む）の開発を行った。図 2 に、開発した材料試験機を示す。

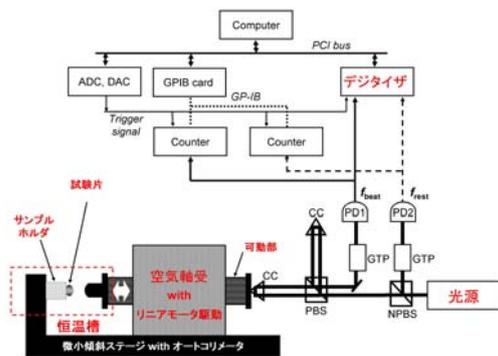


図 2 Impact Response 型材料試験機

本装置では、初速を任意設定するためのリニアモータを空気軸受に組込んだ構成を検討した。その結果、可動部衝突速度を初速範囲 0.00 ～ 1.00 m/s、初速設定分解能 0.01 m/s にて任意設定するための機能を実現した。また、周波数の超高精度測定法の開発を行った結果、デジタルを用いた周波数測定法の改良により、高精度な周波数測定を実現した。

(3) 低コスト型粘弾性試験機の開発

低コスト型粘弾性試験機の開発として、装置全体の低コスト化を図るため、静圧空気直動軸受を高精度な振り機構で置き換えた構造を検討した。その結果、振り機構を用いても静圧空気直動軸受を用いた場合と同等の材料試験が可能であることを実証した。

また、装置全体の低コスト化・小型化を図るため、従来のゼーマンレーザを LD に置き換え、LD を光源とする光波干渉計を検討し、LD 光源を用いた低コストな光波干渉計を実現した。また、特殊環境（高温、低温、真

空）で動作する高精度材料試験機の可能性の検討を行った結果、静圧空気直動軸受を振り機構に置き換えた装置構成により、高温環境、低温環境にて用いることが可能な材料試験機を実現できる見通しを得た。

更に、本試験装置の応用として、材料試験機を用いた直動軸受の摩擦試験を実施し、再現性のある摩擦特性評価が実施できることを実証した。

得られたこれらの成果は、第 5 節で示すとおり、Rev. Sci. Instrum. をはじめとした 12 本の学術誌論文、及び、5 本の国際学会発表において公表した。このように、本研究により得られた成果は、精密計測・材料力学の分野において大きなインパクトを与えうるものとする。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 15 件）

- ① 伊藤 瞳, 藤井 雄作, 山口 誉夫, 杉田 陽市, 横田 正幸, 振り機構を用いた材料試験, 電気学会論文誌 E, 第 129 巻, 22-28, 2009, 査読有
- ② Y. Fujii, J. P. Hessling, “Frequency estimation method from digitized waveform”, Exp. Techniques, 2009, 印刷中, 査読有
- ③ Y. Fujii, “Toward establishing dynamic calibration method for force transducers”, IEEE Trans. Instrum. Meas., 2009, 印刷中, 査読有
- ④ T. Yamaguchi, Y. Fujii, “Dynamic analysis by FEM for a measurement system to observe viscoelasticity using Levitation Mass Method”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 印刷中, 査読有
- ⑤ Y. Fujii, “Toward dynamic force calibration”, Measurement, 2009, 印刷中, 査読有
- ⑥ Y. Fujii, K. Maru, D.-W. Shu, B. Gu, T. Yamaguchi, R. Lu, T. Jutangoon, P. Yupapin, “Material tester with static and dynamic micro forces”, Physics Procedia, 2009, 印刷中, 査読有
- ⑦ K. Maru, Y. Fujii, K. Shimada, “Small mass measurement system for use under microgravity conditions”, Physics Procedia, 2009, 印刷中, 査読有
- ⑧ Y. Fujii, K. Shimada, K. Maru, M. Yokota, S. Hashimoto, N. Nagai, Y. Sugita, “Instrument for Measuring the Body

- Mass of Astronaut”, Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci., 2009, 印刷中, 査読有
- ⑨ Y. Fujii, “Method for measuring transient friction coefficients for rubber wiper blades on glass surface”, Tribol. Int., Vol. 41, pp. 17-23, 2008, 査読有
- ⑩ Y. Fujii, K. Shimada, “The space scale: An instrument for astronaut mass measurement”, Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci., Vol. 50, pp. 251-257, 2008, 査読有
- ⑪ S. Hashimoto, Y. Fujii, “Material tester using a controlled oscillator and an inertial mass,” Key Engineering Materials, Vol. 381-382, pp. 457-460, 2008, 査読有
- ⑫ Y. Fujii, K. Shimada, M. Yokota, S. Hashimoto, Y. Sugita, H. Ito, “Mass measuring instrument for use under microgravity conditions”, Rev. Sci. Instrum., Vol. 79, pp. 056105-1-3, 2008, 査読有
- ⑬ Y. Fujii, “The Levitation Mass Method: A precision mass and force measurement technique”, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 9, pp. 46-50, 2008, 査読有
- ⑭ Y. Fujii, “Microforce materials tester based on the levitation mass method”, Meas. Sci. Technol. Vol. 18, pp. 1678-1682, 2007, 査読有
- ⑮ Y. Fujii, “Method of generating and measuring static small force using down-slope component of gravity”, Rev. Sci. Instrum., Vol. 78, pp. 066104-1-3, 2007, 査読有

[学会発表] (計5件)

- ① Y. Fujii, K. Maru, “Precision force measurement using the Levitation Mass Method (LMM)”, International Symposium on Quantum Metrology and Precision Measurement (ISQMPM), 2009年3月11日, Kiryu, Japan
- ② Y. Fujii, K. Maru, “Toward dynamic force calibration based on the Levitation Mass Method (LMM)”, International Symposium on Interferometry and Dynamic Measurement (ISIDM), 2009年2月

- 25日, Kiryu, Japan
- ③ Y. Fujii, “Precision force measurement using the Levitation Mass Method (LMM)”, International Symposium on Precision Mechanical Measurements (ISPMM), 2008年8月27日, Hefei, China
- ④ Y. Fujii, “Evaluation of frictional characteristics of aerostatic liner bearing”, International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering (AMME 2008), 2008年5月28日, Cairo, Egypt
- ⑤ Y. Fujii, “Precision dynamic force measurement using mass levitation and optical interferometer”, ICOLA 2007, 2007年9月6日, Yogyakarta, Indonesia

[その他]
ホームページ等
<http://www.el.gunma-u.ac.jp/~fujii/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤井 雄作 (FUJII YUSAKU)
群馬大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：80357904

(2) 研究分担者

山口 誉夫 (YAMAGUCHI TAKAO)
群馬大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：90323328

橋本 誠司 (HASHIMOTO SEIJI)
群馬大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：30331987

横田 正幸 (YOKOTA MASAYUKI)

(※2009年3月まで)

群馬大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：80323335

(3) 連携研究者

無し