デービス棒による加速度計の特性評価方法に関する研究*

(第2報, 動的変位測定用レーザ干渉計の開発)

上 田 和 永^{*1}, 梅 田 章^{*1}

Study on the Characterization of Accelerometers Using Davies' Bar Technique (2nd Report, Development of a Laser Interferometer System for Dynamic Displacement Measurement)

Kazunaga UEDA and Akira UMEDA

This report describes the design and the performance of a newly developed interferometer system. The interferometer enables us to measure the motion of a diffuse surface. Velocity ranging from 10^{-3} m/s to 10^0 m/s can be detected by mixing Doppler-shifted light reflected from the specimen with original (reference) light. The direction of motion is determined using two 90° out-of-phase reference beams. Uncertainty of the measurement is estimated to be ± 5 nm in displacement and $\pm 5 \times 10^{-4}$ m/s in velocity at most. Consequently, this interferometer can be used for absolute measurement of the transient motion induced by low-velocity impact, and is applicable to determination of the input of displacement-related sensors such as accelerometers.

Key Words: Measurement, Shock, Stress Wave, Calibration, Sensor, Interferometry, Velocimetry

1. 緒 言

衝撃により生じる高い加速度の計測技術は、自動車の衝突実験に代表されるように、先端産業諸分野で幅広く求められている⁽¹⁾。ところが、加速度計を校正する技術に関しては、振動台と光学干渉計を用いて加速度 10^2 m/s² 以下、周波数 10 kHz 以下の範囲で国際的に整合性のとれた校正法が実現しているのみであり⁽²⁾、高加速度・高周波の領域での加速度計測の信頼性・測定精度などに多くの問題点が残されていた。国際規格 ISO 5347, Part 10 では高加速度領域での加速度計の校正方法に関する提案がなされているが⁽³⁾、衝撃現象を剛体運動で近似している点などに疑問がある⁽⁴⁾。

先に著者らは、加速度 $10^3 \sim 10^6$ m/s²、周波数 ~ 100 kHz 程度の高加速度領域で加速度計の周波数特性を評価する方法を提案した^{(5)~(8)}。この方法では、金属製の丸棒(Davies 棒)中を伝ばする弾性波パルスの反射を利用して、棒端に取付けた加速度計に高加速度を与える。加速度計への入力加速度は、弾性波によるひず

みをひずみゲージを用いて測定することにより求められる。ところが、ひずみゲージ自体の動的応答特性に関するデータが少なく、「静的に校正したゲージファクタが動的な測定にも適用できるか」、「ひずみゲージの応答周波数帯域はどの程度か」といった疑問に対して明確な答が与えられていない。ISO 5347, Part 10 ではひずみゲージを用いた方法を高加速度領域での加速度計の1次校正法として提案しているが、著者らは、1次校正法にひずみゲージを用いることは不適当だと考えた。このような背景から Davies 棒端面の過渡的な運動を絶対測定するために開発されたレーザ干渉計について、本報で報告する。

従来から、物体の準静的な変位を精密に測定するためにさまざまな干渉計が考案されている。その代表はマイケルソン干渉計であろう。また、マイケルソン干渉計を改良して、超音波による微小変位の動的な測定に適用した例も報告されている⁽⁹⁾。しかし、これらの干渉計を大きな変位を伴う衝撃現象の測定に応用する場合には、次のような問題点がある。

- ① 試料の反射面は鏡面でなければならないが、試料に張り付けた鏡は、応力波の反射の際にはく離する場合がある。
- ② 鏡はく離しなくても、試料の反射面が傾くと

* 平成3年10月17日 第69期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成5年3月12日。

^{*1} 正員、計量研究所 (〒305 つくば市梅園 1-1-4)。

一方、粗面を有する試料の高速運動を測定する目的で、VISAR (Velocity Interferometer System for Any Reflector)⁽¹⁰⁾ やファブリペロペアを利用した干渉計⁽¹¹⁾ が開発されている。ところがこれらの干渉計は速度 $10^2 \sim 10^3$ m/s 程度の範囲を対象としており、低速衝撃で生じる速度 $\sim 10^0$ m/s 程度の運動を測定するには分解能が不足する。例えば VISAR の場合、試料が速度約 200 m/s で運動するときにようやく 1 フリンジの干渉縞が得られるのであり、これ以下の速度領域では測定誤差は 2% を越えると評価されている⁽¹²⁾。またファブリペロペアを利用した干渉計では、干渉縞をストリークカメラで撮影し画像処理の手法を利用してフィルム上の干渉縞の位置を決定するが、試料が低速で運動する場合は干渉縞の移動量が少ないため、カメラ/フィルムの分解能により制約を受ける。いずれにせよ、これらは高速度衝撃により生じる運動を対象として設計された干渉計であり、 10^2 m/s 以下の速度範囲に適用することが困難である。このような現状を考慮し、粗面の物体の運動を速度 10^0 m/s 程度までの範囲で測定するために、新たに干渉計を開発した。

本干渉計は、運動する試料の表面で反射したレーザー光を参照光と干渉させることにより、反射光の周波数のドップラーシフトを検出し、試料の視線方向の速度あるいは変位を測定する。試料の運動の方向は、90度

おのこのの偏光成分は、フォトダイオードを利用した光検出器PD1とPD2(Analog Modules, Model

712A)により検出され、2チャンネルの波形記録器(ソニー・テクトロニクス, RTD710A)で記録される。光検出器の応答周波数帯域は200Hz~70MHzである。波形記録器のサンプリングレートは最高100MHz、レコード長は最大128kワード、分解能は10ビットであるが、本実験では主にサンプリングレート100MHz、レコード長32kワードで使用した。

試料面の速度および変位の絶対値は、ドップラースhiftした物体光と参照光との干渉により生じるビート信号の周波数およびフリンジ(干渉縞)の数から、それぞれ次式により求められる。

$$v(t) = \frac{\lambda}{2} f(t) \dots\dots\dots (1)$$

$$u(t) = \frac{\lambda}{2} n(t) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $v(t)$ は試料面の速度、 t は時間、 λ はドップラースhiftしていないレーザ光の波長、 $f(t)$ はビート信号の周波数、 $u(t)$ は試料面の変位、 $n(t)$ は干渉縞の数の累計である。

試料面の運動の方向は、干渉した光のP偏光成分とS偏光成分との位相の関係から識別される。図2にビート信号の例を、図3に図2の信号から求めた試料の速度履歴を示す。時刻 $t_A \sim t_B$ ではP偏光成分の位相が

S偏光成分の位相より進んでいるが、時刻 t_B で両者が同時に極値をとった後、時刻 $t_B \sim t_C$ ではP偏光の位相がS偏光の位相より遅れる。これは、時刻 $t_A \sim t_B$ で一方向に運動していた試料が、時刻 t_B で静止し、時刻 $t_B \sim t_C$ では逆方向に運動していることを示す。

記録された二つのビート信号のうち先に立ち上がる方を主信号とし、他方を参照信号とする。図2の例では、P偏光成分が主信号、S偏光成分が参照信号である。主信号の各時点で平滑化微分⁽¹⁴⁾によって微係数を計算し、主信号が極値をとる時刻を順次求める。同時にその時点での参照信号の微係数も計算し、主信号の極大・極小と参照信号の微係数の符号との組合せから運動の方向を判別する。時間 $t_A \sim t_B$ のように完全なフリンジが得られる区間では、隣合う極値の間で半フリンジに相当する変位($\lambda/4$)を順次加減してゆく。時刻 t_B のようにフリンジが ± 90 度に達しないうちに折り返す点では、主信号の極値の位相を読み取り、それに対応する変位増分を計算し加減する。

以上で i 番目の極値の時刻 t_i とそれに対応する変位 u_i が得られるが、フーリエ解析などを行うためには、このデータから等時間間隔の変位-時間データを求める必要がある。任意の時刻 $t(t_{i-1} < t \leq t_i)$ における変位 $u(t)$ は、Lagrangeの補間公式によって次の三次

図2 本干渉計の出力信号(ビート信号)の例

図3 図2の信号から得られた試料の速度履歴

多項式で補間して求める(図4参照)。

$$u(t) = \frac{(t-t_{i-1})(t-t_i)(t-t_{i+1})}{(t_{i-2}-t_{i-1})(t_{i-2}-t_i)(t_{i-2}-t_{i+1})}u_{i-2} \\ + \frac{(t-t_{i-2})(t-t_i)(t-t_{i+1})}{(t_{i-1}-t_{i-2})(t_{i-1}-t_i)(t_{i-1}-t_{i+1})}u_{i-1} \\ + \frac{(t-t_{i-2})(t-t_{i-1})(t-t_{i+1})}{(t_i-t_{i-2})(t_i-t_{i-1})(t_i-t_{i+1})}u_i \\ + \frac{(t-t_{i-2})(t-t_{i-1})(t-t_i)}{(t_{i+1}-t_{i-2})(t_{i+1}-t_{i-1})(t_{i+1}-t_i)}u_{i+1} \\ \dots\dots\dots(3)$$

式(3)から等時間間隔の変位-時間関係が求められ、さらに中心差分をとることによって、速度-時間の関係を得る。

3. 結果および考察

本干渉計を用いて、Davies 棒の端で弾性波パルスが反射する際の端面の速度を測定した。同時にひずみゲージ(ゲージ長 1 mm)を用いて弾性波による棒のひずみを測定し、次式により棒端の速度を求めた⁽¹⁵⁾。

$$v_{sc}(t) = 2C\varepsilon(t) \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 $V_{sc}(t)$ は Davies 棒の端面の速度、 C は棒中の縦弾性波の伝ば速度、 $\varepsilon(t)$ は入射する弾性波による棒の軸ひずみである。図5に両者による測定結果の比較を示す。先に述べたようにひずみゲージの動的な感度や応答周波数については明確なデータが供給されていないが、図5から、ひずみゲージでも周期 10 μ s

図4 変位データの補間法の説明図

程度の動的なひずみを検出できることがわかる。ただし、ひずみゲージによる測定では弾性波パルスのピークが若干低く評価される点や、干渉計で検出されるパルスの後の微小な振動がひずみゲージでは十分にとらえられていない点に注目したい。

本干渉計の変位測定範囲の上限は対物レンズ L1(図1参照)の焦点深度により決定される。レンズ L1 の焦点深度は約 90 μ m だと計算されるが、実際には、レンズ L1 を搭載した微動台の移動量から判断すると、少なくとも 200 μ m 程度の範囲で有効な干渉光を得ることが可能である。速度測定範囲の上限は、光検出器および波形記録器の周波数帯域により制限される。100 MHz のサンプリングレートでは理論上 50 MHz までの信号が記録できるので、式(1)から速度の上限は 12.9 m/s だと見積られるが、波形記録器内の A/D 変換器の性能も考慮すると上限は数 m/s 程度であろう。なお図5に示したように約 2.3 m/s の速度を測定した実績がある。

本干渉計においては、ビート信号の位相は極値(± 90 度)近傍では十数度程度でしか判別できないが、中間点から ± 45 度の範囲では約4度まで読み取れる。すなわち、変位測定時の分解能は、極値近傍ではおよそ 12 nm であるが、中間点から ± 45 度の範囲では 3 nm 程度である。本干渉計では 90 度位相差のある二つの信号が得られるので、一方の信号の位相が極値近傍にあるとき他方の信号の位相は必ず中間値近傍にある。したがって本干渉計は、つねに約 3 nm の分解能で変位の測定が可能である。

なお、測定可能な面の粗さの上限については具体的な値を得ていないが、少なくとも $R_a=0.2 \mu$ m 程度の面に適用した実績がある。

次に測定値の不確かさについて考察する。測定全体の不確かさを評価する際には測定対象をも含めた系で考える必要があるが、対象を特定すると一般性が失われる。したがって以下では、干渉計のハードウェアおよび信号処理系に由来する誤差因子に範囲を限定して

図5 本干渉計による Davies 棒端の速度測定結果とひずみゲージによる結果との比較

表 1 本干渉計による速度測定時の不確かさ

Factor	Section between complete fringes	Other section
Wave length of the laser light	$5.9 \times 10^{-8} \text{ m/s}$	
Clock in the transient recorder	$1.2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$	
Phase resolution and interpolation	$2.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$	$4.4 \times 10^{-4} \text{ m/s}$
Total uncertainty	$\pm 2.3 \times 10^{-4} \text{ m/s}$	$\pm 4.5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$

表 2 本干渉計による変位測定時の不確かさ

Factor	Section between complete fringes	Other section
Wave length of the laser light	$7.6 \times 10^{-7} \text{ nm}$	
Clock in the transient recorder	$1.5 \times 10^{-3} \text{ nm}$	
Phase resolution and interpolation	0.9 nm	4.6 nm
Total uncertainty	$\pm 0.9 \text{ nm}$	$\pm 4.6 \text{ nm}$

不確かさを評価する。

本干渉計による速度測定結果の不確かさは、表 1 に示したように完全なフリンジが得られる区間では $2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 程度、不完全なフリンジを含む区間で $5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 程度と評価される。変位測定時の不確かさは、表 2 に示したように完全なフリンジの区間では約 1 nm、不完全なフリンジの区間では約 5 nm だと見積られる。

光スペクトラムアナライザを用いた測定によるレーザの発振周波数の幅は 3 MHz であるので、レーザ光の波長 λ の相対誤差は 5×10^{-9} 程度である。波形記録器の時間軸の相対誤差は 1×10^{-5} 程度以下であることを確認している。この因子は、ビート周波数 $f(t)$ や干渉縞の数 $n(t)$ に同程度の誤差を及ぼすと考えられる。これらの要因による速度測定時の系統的な不確かさは、最高 10 m/s の速度を測定する場合を考えると、それぞれ $5.9 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ および $1.2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ と評価される。また、たかだか半フリンジに相当する変位増分 (129 nm) を順次加減して変位を計算しているのだから、変位測定結果の不確かさへの寄与はそれぞれ $7.6 \times 10^{-7} \text{ nm}$ 、 $1.5 \times 10^{-3} \text{ nm}$ 程度と考えられる。

フリンジの位相の読み取りとその後の補間による誤差の影響については、P 偏光成分から得た結果と S 偏光成分からの結果とを比較することにより見積った。すなわち、例えば P 偏光信号が極大・極小をとる各時刻において、S 偏光信号を主信号として前述の補間法により変位を計算した。そして、P 偏光信号の極値における変位の値を規準として、S 偏光信号の補間値の偏異を求めた。差異は、例えば完全なフリンジの区間では平均して 0.8 nm 程度であった。P 偏光信号と S 偏光信号の役割を逆にした場合も差異は同程度であった。補間による誤差はこの差異の平均値程度であると推定し、この誤差因子が系統的な不確かさに及ぼす影響を公式に従って計算した。

表 1 および表 2 に示したように、干渉計のハードウェアおよび信号処理系に由来する誤差因子のなかでは、位相の読み取りと補間の影響が大きい。測定精度をさらに向上させるためには、振幅のばらつきの少ないビート信号を得て位相の分解能を向上させ、さらに滑らかな補間を可能にする工夫が必要であると考えられる。

4. 結 言

低速度衝撃によって生じる動的な変位を精密に測定するためにレーザ干渉計を新たに開発した。本干渉計は、速度 $10^{-3} \sim 10^0 \text{ m/s}$ 、変位 $10^{-8} \sim 10^{-4} \text{ m}$ 、周波数 $\sim 10^7 \text{ Hz}$ の範囲で測定が可能で、測定対象の表面が粗面であっても適用できる。

弾性波媒体 (Davies 棒) を利用した動的変位発生機構⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾と本干渉計を組合せることによって、加速度計などの変位関連量センサや力センサ、微小機械要素などの動特性を、精度よく求めることが可能になると考えられ、この方向で研究が進められている⁽¹⁶⁾⁻⁽²⁰⁾。

実験装置の一部について (株) 共和電業のご協力をいただいた。謝意を表す。

文 献

- (1) 梅田, 動力学計測の現状と問題点, 計測と制御, 27-6 (1988), 537.
- (2) Robinson, D. C., Serbyn, M. R. and Payne, B. F., A description of NBS calibration services in mechanical vibration and shock, *NBS technical note*, 1232 (1987).
- (3) ISO/DIS 5347, Method for the calibration of vibration and shock pick-ups, Part 10, *Primary calibration by high impact shocks*, (1987).
- (4) Umeda, A. and Ueda, K., Comparison between the two methods for the shock accelerometers' characterization, *Proc. 9th Int. Conf. on Exp. Mech.*, (1990), 271.
- (5) 梅田・上田, 衝撃加速度計の動的応答特性測定法, 特許, 平 1-203501/平 3-67175 (1989).
- (6) Umeda, A. and Ueda, K., Method and apparatus for measuring dynamic response characteristics of shock

- accelerometer, *U. S. Patent*, No. 494396 (1990).
- (7) Umeda, A. and Ueda, K., Study on the dynamic force/acceleration measurements, *Sensors and Actuators*, A-21 (1990), 285.
- (8) 上田・梅田, デービス棒による加速度計の特性評価方法に関する研究(第1報, ひずみゲージによる加速度計の周波数特性評価法), 機論, 57-533, C (1991), 143.
- (9) Reibold, R. and Molkenstruck, W., Laser interferometric measurement and computerized evaluation of ultrasonic displacements, *Acustica*, 49 (1981), 205.
- (10) Barker, L. M., Velocity interferometry for time-resolved high-velocity measurements, *Proc. on High-Speed Photography, Video-graphy and Photonics, Soc. Photo Opt. Instrum. Eng.*, 427 (1983), 116.
- (11) McMillan, C. F., ほか7名, Velocimetry of fast surfaces using Fabry-Perot interferometry, *Rev. Sci. Instrum.*, 51 (1988), 1.
- (12) Barker, L. M. and Hollenbach, R. E., Laser interferometer for measuring high velocity of any reflecting surface, *J. Appl. Phys.*, 43-11 (1972), 4669.
- (13) 例えば, 谷田貝, 応用光学—光計測入門—, (1988), 7, 丸善.
- (14) Savitzky, A. and Golay, M. J. E., Smoothing and differentiation of data by simplified leastsquares procedures, *Anal. Chem.*, 36-8 (1964), 1627.
- (15) Kolsky, H., *Stress waves in solids*, (1953), 41, Oxford University Press.
- (16) 上田・梅田, デービス棒による加速度計の特性評価方法に関する研究(第5報, レーザ干渉計による加速度計の周波数特性測定), 機講論, No. 910-62 C (1991-10), 80.
- (17) 梅田・上田, デービス棒とレーザ干渉計によるひずみゲージの動特性に関する研究(第1報, 原理の確認), 機論, 59-559, A (1991), 566.
- (18) 梅田・上田, デービス棒とレーザ干渉計による AE センサの周波数特性評価, 機講論, No. 920-78 E (1992-9), 197.
- (19) 上田・梅田, デービス棒とレーザ干渉計によるインパクトハンマの周波数特性評価, 機講論, No. 920-78 E (1992-9), 200.
- (20) 臼田・梅田・上田, 微小構造の動的応答に関する研究(第2報, デービス棒によるシリコン微小構造の残留応力評価), 機講論, No. 920-78 B (1992-9), 531.