

振動加速度校正技術

臼 田 孝

A Method for the Calibration of Vibration and Acceleration

Takashi USUDA

Precise and reliable measurements of vibration are frequently required in diverse fields of industry. The sensitivity and the phase response of vibration transducers are required to be accurately known. This paper outlines a method for the calibration of vibration and acceleration, and also describes a laser interferometer for the method newly developed at the Advanced Industrial Science and Technology (AIST). The developed laser interferometer is a homodyne, phase shifted Michelson type which has quadrature outputs. This interferometer satisfies international standard (ISO 16063-11) and can be applied to vibration and acceleration pick-up sensitivity calibration up to 5 kHz. The calibration system enables phase shift evaluation of the transducers as well.

Key words: metrology, vibration and acceleration transducers, interferometer, international comparisons

1. 振動量の計測

振動量は長さと時間からなる組み立て量であり、振動変位、振動速度および振動加速度に分類することができる。

振動量計測における測定者（測定装置）は、絶対座標系において静止していかなければならない。測定者が常に絶対座標に固定されているならば、測定対象の座標（位置）を計測することで振動変位が計測できる。これは変位センサーや（変位出力型）レーザー干渉計による測定に相当する。このような測定系を構成できない場合は、図1に示すように、ばねとおもりからなるサイズモ系を構成し、測定対象とは無関係な基準位置を作り出すことで実現できる。サイズモ系の固有振動数が測定対象の振動数に比べ十分大きいとき、直接測定するのは測定対象物の加速度である。そのため、近接センサーやレーザー干渉計による振動量（変位または速度）計測と区別するために、サイズモ系からなる振動計測装置を振動加速度計（または単に加速度計）とよぶ。

近年、レーザードップラー振動計など、光波干渉技術を用いた測定器の進歩はめざましいが、工業的には振動加速度計がもっとも広く用いられている。これは比較的安価

で、測定対象の素材や表面の特性にかかわらず測定が可能であることなどによる。また、地震や移動機械の振動など、外部に絶対座標を求めることが困難な場合は、振動加速度計による測定が唯一の手段となる。

サイズモ系からなる振動加速度計の出力信号自体は長さ、時間いずれの基本量とも直接結びつかない。このため振動加速度計は必ず校正が必要となる。そのためにはレーザー干渉計などの、長さの標準に対してトレーサブルな測定装置が必要となるが、これは前述したとおり相対的な振動量を測定する装置である。そのため振動加速度計の校正是、

- (1) 大地の微動など、外来振動を十分遮断した校正環境において、
- (2) 絶対座標系に固定されたレーザー干渉計で振動加速度計の位置を測定し、
- (3) 同時に振動加速度計出力（通常電圧値）を測定することにより実現できる。このように、レーザー干渉計を用いて、長さの標準にトレーサブルな変位測定によって行う校正を一次校正とよぶ。振動加速度計測は、近年移動機械の衝突安全性向上（エアバッグ）や民生機器の静粛性向上

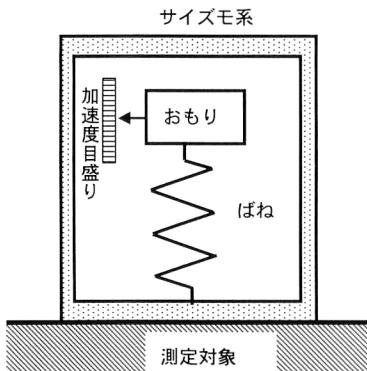


図1 サイズモ式振動加速度計.

に資する計測等、さまざまな分野で重要性を増している。それに伴い、振動加速度計の精密な校正技術が求められている。本稿では振動加速度計の校正技術について紹介する。

なお、SI(国際単位系)における振動加速度を表す唯一の単位は m/s^2 である。分野によっては慣例的に G(重力加速度) や Gal(1 Gal=0.01 m/s²) を用いているが、これらは好ましくないことを指摘しておきたい。

2. 校 正 装 置

振動加速度計の感度および振動数特性は、加振機によって一定加速度、振動数の正弦状の振動を加えることで評価できる。ここで、加速度振幅 $\hat{a} [m/s^2]$ 、振動数 $f [Hz]$ 、および変位振幅 $\hat{d} [m]$ は

$$\hat{a} = 4\pi^2 f^2 \hat{d} \quad (1)$$

なる関係にあるので、レーザー干渉計による変位振幅 \hat{d} の測定値から加速度が決定できる。振動加速度計の使用範囲(加速度振幅)は $0.1 m/s^2$ 未満から $1000 m/s^2$ 以上に及ぶため、これら範囲の一部を校正するだけでも測長範囲 $10 nm \sim 1 m$ 、速度 $0 \sim$ 数 m/s レベルのダイナミックレンジをもつレーザー干渉計が必要になる。さらに振動音響ノイズ下で測定が行われるため、外乱に強く、ある程度の光軸変化(干渉光強度の変動)を許容することが必要である。

産業技術総合研究所(産総研)では国際規格(ISO)¹⁾に準じた校正システムを構築した²⁾。図2はその原理図である。光源(He-Ne レーザー、波長 $632.8 nm$)からのレーザー光は偏光板 p1 により直線偏光される。その後 $1/4$ 波長板 qr を通過し、円偏光となる。次に無偏光ビームスプリッター(NBS)により、測定光と参照光とに分離される。参照光は、参照鏡 M1 で反射され、偏光板 p2 により直線偏光となる。測定光は振動加速度計端面に取り付けた反射鏡 M2 により反射され、参照光と干渉する。干渉光はウォラストンプリズム WP により位相が 90° 異なる、直角位相光に分離される。各偏光成分は光検出器 PD1, PD2 により検出される。

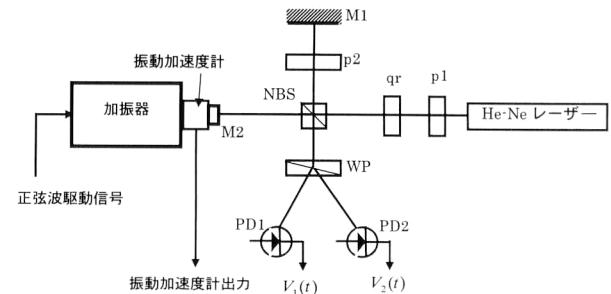


図2 正弦波近似法による校正装置の概要.

M2 が振動加速度計とともに光軸方向に正弦状に運動したときの干渉光強度は光検出器で検出される。時間 t における PD1, PD2 出力の交流成分 $V_1(t)$, $V_2(t)$ はそれぞれ以下のように表せる。

$$V_1(t) = \hat{V}_1 \cos[\varphi_0 + \hat{\phi}_M \sin(\omega t + \varphi_s)] \quad (2)$$

$$V_2(t) = \hat{V}_2 \sin[\varphi_0 + \hat{\phi}_M \sin(\omega t + \varphi_s)] \quad (3)$$

ただし、 \hat{V}_1 , \hat{V}_2 は電圧振幅、 φ_s は振動の初期位相、 φ_0 は光波の初期位相で、干渉計の初期光路差に依存する。 ω は角振動数で、振動数 f に対し $\omega = 2\pi f$ である。 $\hat{\phi}_M$ は位相振幅で、変位振幅 \hat{d} との関係は次式で与えられる。

$$\hat{\phi}_M = \frac{8\hat{d}\pi}{\lambda} \quad (4)$$

ただし λ は光源の波長である。位相変位 $\varphi_M(t)$ は PD1, PD2 出力の比を用いて次式で表される。

$$\varphi_M(t) = \arctan \frac{V_2(t)}{V_1(t)} + m\pi \quad (5)$$

ここで m は arctan の周期性による不連続性を防ぐよう、適当なアルゴリズムにより選ばれる整数値である²⁾。これらの関係から位相振幅 $\hat{\phi}_M$ 、変位振幅 \hat{d} を求めることができる。

位相変位出力型の干渉計とすることで、光軸変化などにより干渉光強度(PD1, PD2 出力)が変動しても、内挿精度が悪化しないという利点がある。また、振動の位相情報が得られるため、振動加速度計出力の位相遅れを評価することが可能である³⁾。実際にはさらに S/N 比や操作性を向上させるために、図3に示す差動光学系による干渉計を開発した⁴⁾。これらの設備により、1 Hz~5 kHzにおいて 0.3~1.5%の不確かさ(包含係数 2)で振動加速度計の感度校正を実現している。

3. 振動加速度標準の国際的現状と標準供給体系

振動量計測の重要性の高まりから 1999 年、国際度量衡局に音響・超音波・振動計測に関する技術諮問委員会(CCAUV)が設置された。そして 2000~2001 年にかけて、同諮問委員会による振動加速度計測としては初の国際基幹比較が行われた。これは圧電型振動加速度計を各国標準研

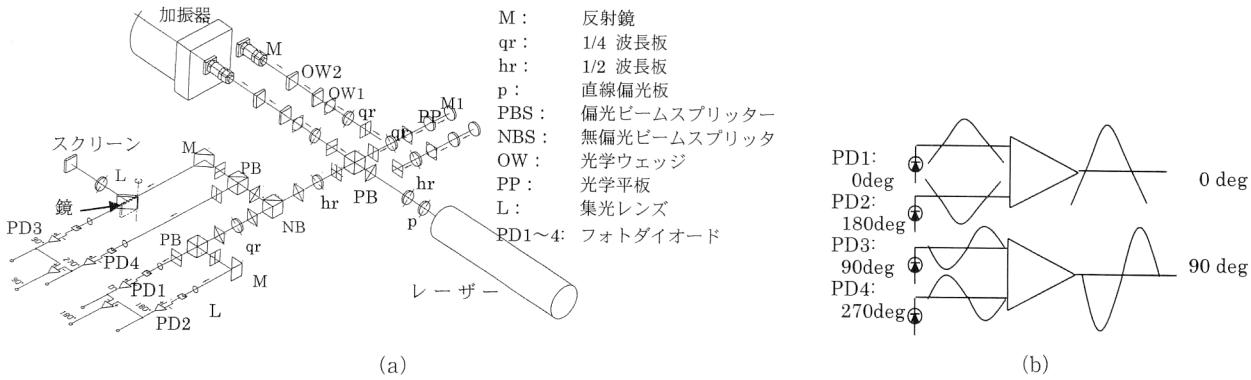


図3 差動出力による干渉計。(a) 光学系の構成, (b) 差動出力による干渉計。

究所(ドイツ・PTB, アメリカ・NIST, 日本・産総研等, 参加12機関)がもち回り測定し, 校正結果を相互比較するというものである。最終報告が間もなく公開予定であるが, 産総研の測定結果は参加機関中上位に位置される見込みである。すなわち, 校正不確かさ0.3~1.5%は世界的みて上位の技術水準にあるということである。振動量が長さと時間という, きわめて測定精度が高い基本量からなることを考えると, これはいかにも悪いように思える。

図4は日本の振動加速度の標準供給体系とそれに介在する不確かさ要因を示している。国家標準として位置づけられる産総研の校正装置は, 振動加速度計による国際比較を通して同等性が裏付けられている。そして下位の校正装置, 測定機器も振動加速度計を仲介器(トランスファースタンダード)として同等性が裏付けられている。すなわち, 振動加速度標準とは, 振動加速度計の校正技術を基盤とした標準体系であるといえる。このため, 長さと時間の測定不確かさ以外に図4に示した不確かさ要因が介在するため⁵⁾, 国際的にも 10^{-3} レベルの校正不確かさが常識的な値とされている。また振動加速度計が産業界でひろく用いられる現状をみれば, 加速度計の校正技術を基盤とした標準体系は合理的であるともいえる。

産総研では2005年までに, 振動加速度計の校正範囲を0.1 Hz~10 kHzに拡大する予定である。さらにパルス的な振動量を評価できるよう, 技術開発を進める予定である。これらは干渉計, 防振機構, 高速A/D変換, 加振装置等総合的な技術が必要とされる。

一方, 近年レーザードップラー干渉計に代表される, 動的変位計測機器の進展は著しく, 性能上はメガヘルツオーダーの振動測定が可能なものも珍しくない。振動加速度計の校正技術を基盤とした現状の標準体系と整合性を保つつ, これら動的変位計測機器をどう位置づけるかは今後の課題である。この際, 性能上は可能であっても, 実際の測定では偏光分離誤差, 筐体の剛性, 散乱光偏光成分による

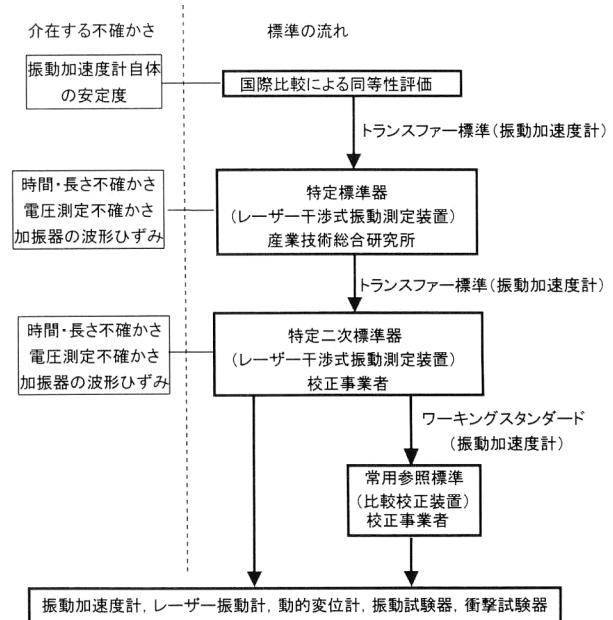


図4 日本の振動加速度の標準供給体系と不確かさ要因。

ノイズ, 復調回路線形性, S/N比等考慮すべき不確かさ要因は多い。これらの評価方法を検討中である。

文 献

- ISO16063-11: "Methods for the calibration of vibration and shock pick-ups. Part 11: Primary vibration calibration by laser interferometry," (International Organization for Standardization, 2000).
- 臼田 孝, M. Dobosz, 黒澤富蔵, 豊田幸司: "正弦波近似法による振動ピックアップ感度の校正と不確かさの評価および現行法との比較", 精密工学会誌, 64 (1998) 1165-1170.
- 臼田 孝, 黒澤富蔵: "市販振動加速度ピックアップの位相特性", 精密工学会誌, 66 (2000) 458-462.
- T. Usuda, E. Furuta, A. Ohta and H. Nakano: "Development of laser interferometer for a Sine-approximation method," Proc. SPIE, 4827 (2002) 29-36.
- T. Usuda and T. Kurosawa: "Calibration methods and their uncertainty for vibration transducers," Metrologia, 36 (1999) 375-383.

(2002年9月24日受付)