

微小振動計測の信頼性評価に関する調査研究

下田智文*

(2021年1月30日受理)

A review on reliability evaluation for micro-vibration measurement

SHIMODA Tomofumi

Abstract

Vibration measurement is a very important tool in industry and society. Recently, demands for micro-vibration measurement below 0.1 m/s^2 have been growing in the field of infrastructure health monitoring, vibration measurement of satellites, monitoring of nuclear explosion, and so on. To guarantee the reliability of those measurement, it is essential to evaluate characteristics of the vibration sensors, such as frequency response down to 10^{-4} m/s^2 or self-noise level. In this paper, trend of vibration measurement, sensors, market scale, and reliability evaluation technologies in recent years is overviewed, with a focus on micro-vibration. The current status of vibration calibration systems is also reviewed, and technical prospects to extend the calibration acceleration range is discussed.

1. はじめに

振動は産業の広い分野で用いられてきた重要な観測量である。振動とは物体の位置・速度・加速度が時間変化する現象であり、その計測によって対象物の運動状態を知ることができるほか、その力学的特性や振動発生源の情報などを得ることができる。これらの情報は運動状態の検知や安全装置の導入、損傷診断などに用いられてきた。このように振動は汎用的な計測量であり、計測対象は自動車・電子機器などの身近なものからビル・橋梁などの社会インフラ、地球観測まで広範にわたっている。振動は通常、振動センサやレーザー干渉計などによって計測され、適切な信号処理によって情報の抽出が行われる。計測される周波数・振幅も用途に応じて様々であり、典型的には、周波数範囲は 0.01 Hz から数 10 kHz 、振幅範囲は 10^{-6} m/s^2 から 10^2 m/s^2 にわたって計測ニーズが存在している。

計測値が信頼できるかどうかは一般に重要な問題であ

るが、特に安全性に関わる計測を行う場合や、異なる国・企業の間で取引を行う場合には信頼性の保証が求められる。そのための必要条件の一つは計測に用いるセンサの感度（周波数応答）や雑音特性などが正しく把握されていることである。特に感度の校正においては信頼性の証として「トレーサビリティの確保」が求められ、切れ目のない校正の連鎖によって国家計量標準まで遡れる必要がある。我が国では振動に関しては計量標準総合センター（National Metrology Institute of Japan, NMIJ）が振動センサの周波数応答を校正する特定標準器を保有し国家計量標準として管理している。同装置を用いて、メートル条約に関する計量法トレーサビリティ制度に基づいた標準供給だけでなく、共同研究などの枠組みで様々な振動センサ評価も行われている。また他国の国家計量標準機関との国際比較に参加するなどして校正能力を検証し、計測の国際的な同等性を確保している。

前述の通り振動の計測ニーズは様々な周波数・振幅範囲にわたって存在しているため、センサの特性評価もその範囲をカバーできることが望ましい。特に近年では産業技術の高度化に伴い、 0.1 m/s^2 を下回る微小振動計測

* 分析計測標準研究部門音波振動標準研究グループ

の需要が増している。例えばインフラの微小振動に基づき劣化・損傷を診断する技術が研究されているほか、人工衛星など静かな環境下での振動を計測するなどのニーズがあり、そこで用いられる振動センサ評価の要求も出てきている。しかし、これまでの振動加速度標準は主に 10 m/s^2 程度の比較的大きな振動について供給されてきたため、評価可能な振幅範囲の拡大が必要な状況となっている。将来的な標準供給範囲拡大の可能性を見据え、評価技術の整備を進める必要がある。

本調査研究では、社会的ニーズが増している微小振動の計測とその信頼性保証に焦点を当てつつ、振動計測分野の全体的な技術動向および課題について調査した結果を報告する。まず第2章では振動の計測と題して、計測ニーズと振動センサの現状・動向をまとめる。続く第3章では振動センサの評価について、NMIJと各国の振動加速度標準供給状況や課題について述べる。その後第4章で、本研究の主題である微小振動計測の信頼性評価技術整備へ向けて、センサ評価技術の課題解決の展望をまとめる。最後に第5章をまとめとする。

2. 振動の計測

振動とは周期的に加速度またはその積分量である速度・変位が時間変化する現象を指す。特に大きな変動が短時間に加わる現象は衝撃と呼ばれ振動と区別されることも多い。振動は周波数と振幅によって特徴づけられる波で表現され、実際の現象では様々な周波数・振幅の波の重ね合わせが観測される。計測対象の力学特性や現象の規模・タイムスケールによって特徴的な周波数・振幅が異なるため、現象に応じて様々な範囲での計測が行われる。またそれらに応じて異なるタイプの振動センサが利用される。

ここで振動の表現についてまとめておく。振動は通常、変位 x 、速度 v 、加速度 a のいずれかで表されるが、正弦波振動についてそれぞれの表式は

$$\begin{aligned} x(t) &= \hat{x} \sin(2\pi f t + \varphi) \\ v(t) &= \frac{dx}{dt} = \hat{v} \sin\left(2\pi f t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right), \quad \hat{v} = 2\pi f \hat{x} \\ a(t) &= \frac{d^2x}{dt^2} = \hat{a} \sin(2\pi f t + \varphi + \pi), \quad \hat{a} = (2\pi f)^2 \hat{x} \end{aligned} \quad (1)$$

となる。 f は振動の周波数、 φ は初期位相であり、 \hat{x} 、 \hat{v} 、 \hat{a} をそれぞれ変位振幅、速度振幅、加速度振幅と呼ぶ。上式の通り、同じ加速度振幅でも低周波では大変位振幅、高周波では微小変位振幅となる。本稿では主に加速度によって振動を表現するが、いずれの量を通常用いる

かは分野によっても異なる。また加速度の単位はSI単位である m/s^2 で表すことがルールとなっており本稿もそれに従う。一方で慣習的に用いられる単位として、

$$\cdot 1 \text{ G} = 9.80665 \text{ m/s}^2 \text{ (標準重力加速度)}$$

$$\cdot 1 \text{ Gal} = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$\cdot 1 \text{ kine} = 10^{-2} \text{ m/s}$$

などが残っている分野もある。

2.1 振動計測の需要と動向

振動計測の需要を周波数・加速度ごとにまとめたものを図1に示す。従来の代表的な産業・社会ニーズとしては自動車の試験や工場設備診断、地震観測などがあった。例えば自動車に搭載される部品は走行時の振動下で使用されるため耐振動性の確認が求められる。自動車ではボディの共振やエンジンの振動など多様な振動源が関連しており、数 Hz から数 kHz において 1 m/s^2 から 100 m/s^2 程度の加速度が発生するため、同範囲での振動を加えた耐力試験が行われる。安全性や快適性を調べる観点からも振動の計測が行われる。その他、工場などの機器の劣化・故障を振動加速度の変化から診断することも行われており、機器の種類や運転状態に応じて 100 Hz から数 10 kHz の振動が計測される。また地震観測においては 10 Hz 以下の低周波をメインとして、震度によって様々な振幅の振動が計測対象となる。計測震度 I は、振動波形の加速度がある値 a 以上となる時間の合計が 0.3 s となるように a を求め、

$$I = 2 \log_{10} \left(\frac{a}{a_0} \right) + 0.94, \quad a_0 = 10^{-2} \text{ m/s}^2 \quad (2)$$

と定義される¹⁾。周期や波形によるが計測震度 5.0 で約 1 m/s^2 オーダーの振動に相当する。

このように産業・社会における主な計測ニーズは比較的大きな加速度が対象であった。しかし近年では、より加速度の小さい微小振動の計測ニーズが増しつつある。続く 2.1.1 節でその具体例を紹介する。「微小振動」の明確な定義はないが、以下では加速度振幅がおおよそ 0.1 m/s^2 を下回るもの、または変位振幅が 1 nm を下回るものを微小振動と呼ぶことにする。

2.1.1 微小振動計測ニーズ

インフラ・建造物診断

微小振動計測の主要なニーズはインフラ診断のための振動計測である。近年、世界的にインフラ（道路・橋梁・トンネル・ビルなど）の老朽化が問題となっており健全度の診断技術の開発が求められている。インフラメンテナンスに関する市場規模は 2016 年時点の推計で、

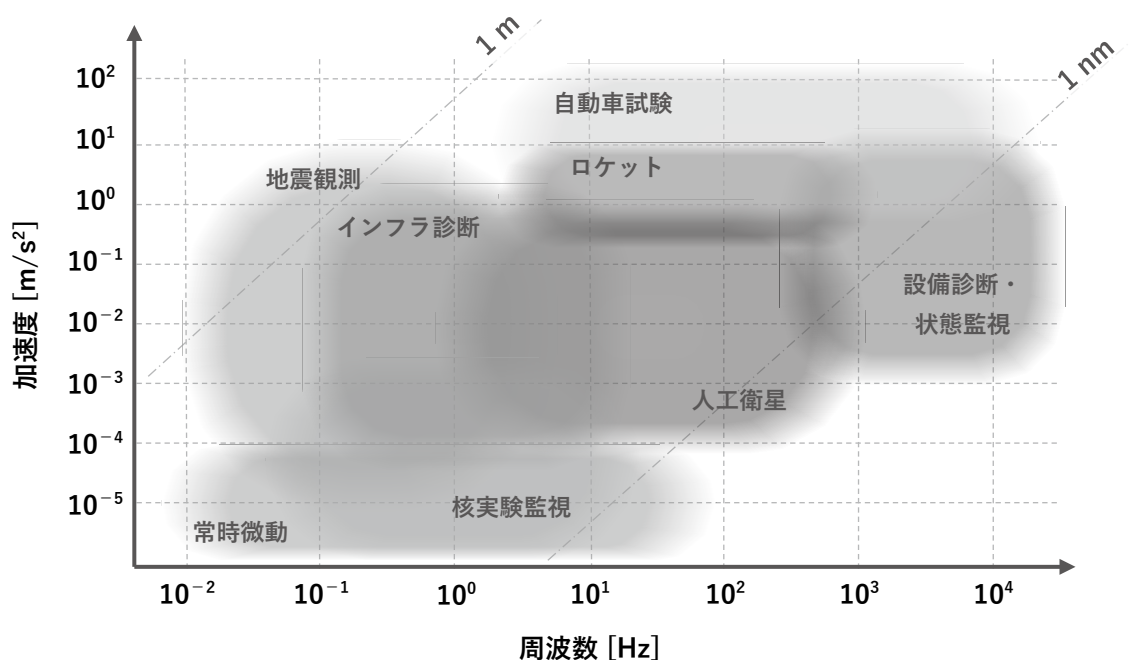


図1 周波数・加速度ごとの振動計測需要. 1 m および 1 nm の変位振幅に相当する加速度をそれぞれ点鎖線で示した.

国内で約 5 兆円, 世界的には約 200 兆円とされている²⁾. 日本においては高度経済成長期に建設されたインフラが多く, 一般的な耐用年数 50 年を超える橋梁・トンネルの割合は今後 15 年程度で倍増すると見込まれており³⁾, メンテナンスにかかる費用も今後 30 年間で合計 170 兆円を超えると推計されている⁴⁾. 費用を抑えるためには劣化を早期に検知し機能上の不具合が発生する前に対策を行う予防保全が不可欠であるが, 目視や打音による定期点検では人的コストや個人差などの問題があり, より効率的かつ客観的な診断技術開発が大きな社会ニーズとなっている.

診断手法の一つとして研究されているのが, インフラに取り付けたセンサの計測値から健全度を診断する構造ヘルスマニタリングである. 振動計測による構造ヘルスマニタリングでは, 振動特性 (共振周波数, 減衰特性, モード形状等) の変化から構造物の劣化・損傷を検知することが行われる⁵⁾. 振動特性を継続的に得るためには必ずしも大きな振動源が存在しないため, 地面の常時微動や周囲の交通・風による微小振動の計測が必要となる. そのため典型的なインフラの固有振動数である 0.1 Hz から 10 Hz 程度の周波数範囲で, 10^{-4} m/s^2 から 10^{-1} m/s^2 程度の振動計測ニーズがある. 常時微動を利用した振動特性測定例として, 鉄骨造建物について数%/年の固有振動数・減衰定数の経年変化が見られたこと^{6),7)}や, 地震の前後で数%の変化が見られたことが

報告されている^{7),8)}. ある閾値を超える経年変化が起きた場合に補強を行ったり, また地震などの災害後に立ち入りの可否を判断するような方法が提案されている. メーカー各社や建設業界なども構造ヘルスマニタリングシステムやそのためのセンサの開発を進めている⁹⁾⁻¹¹⁾. ただし振動特性の変化と構造物の損傷状態がどのように対応しているかは構造物の個性にも依存し明確ではないため, 安全/危険を判断する基準は確立されておらず, 実用に向けてはさらなる研究が必要となっている. また, センサの配置方法など具体的な運用方法についても検討が進められている¹²⁾.

インフラ診断技術は内閣府が推進する戦略的イノベーション創造プログラム^{9),13)}や, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) が進める「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト」¹⁴⁾などで研究開発が進められてきた. 振動計測以外にも様々な方法が研究されており, X線や中性子などを用いた部材内部の腐食検査や, 走行車からレーザースキャンにより表面状態を高速診断する技術, モアレ画像から変形を測る技術¹⁵⁾などがある. 振動計測は建造物の全体的な特性を把握するのに向いており, また参照点を必要とせず常時観測ができるという利点があり, 簡易的な特性診断に使われることが予想される.

人工衛星の振動計測

近年、人工衛星が様々な用途で利用されつつある。中でも重要な用途の一つが地球観測であり、陸域観測・災害監視などを目的とした衛星では数10 cmの空間分解能¹⁶⁾、指向角度に換算すると0.5 μrad の精度が要求されるものもある。また遠方との通信を行う衛星においてもアンテナの高い指向精度が要求される。JAXAの擾乱管理標準によれば約50 μrad を下回る指向精度が要求される場合には衛星擾乱の管理が必要とされている¹⁷⁾。軌道上の人工衛星では、姿勢制御系やアンテナ、システム機器、冷凍機などの動作により1 Hzから1 kHzの帯域において 10^{-4} m/s^2 から 10^0 m/s^2 程度の振動が発生していることが報告されている^{18), 19)}。このような振動擾乱はカメラの手ブレと同様に撮像精度などを悪化させる問題が指摘されており²⁰⁾、その対策のために上記の微小振動擾乱を計測するニーズがある。例えば、深宇宙との通信を行う衛星において、加速度計で計測した衛星の微小振動データをもとにフィードバック制御でアンテナ指向方向を安定化する研究などがある²¹⁾。

核実験監視

核軍縮・不拡散の実現に向け包括的核実験禁止条約(Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty, CTBT)が1996年に国連総会で採択され、その実現に向けた準備が行われている。現在のところ米国・中国など一部の国の批准の見通しが立っておらず発効には至っていないが、条約の遵守の検証制度として国際監視制度の準備が進められている。国際監視制度は地震波、放射性核種、水中音波、微気圧振動の4つの観測網からなり²²⁾、地震波観測では世界各地170か所に設置した地震計により核爆発で生じる地震波の監視を行う。断層すべりによって生じる自然の地震波と地下核実験のような爆発による地震波とは波形中のP波とS波の比率が異なることが分かっている²³⁾ため、そのような波形の特徴や、推定された波源位置、信号のスペクトルなどの情報から核実験を検知し監視することが行われる²⁴⁾。地下核爆発による地震波の振幅は爆発の規模や観測点との距離にも依存するが、例えば震源から500 km離れた地点において、TNT火薬換算で19 ktの爆発(アメリカ合衆国, 1958)の場合 10^{-3} m/s^2 オーダー、138 ktの爆発(アメリカ合衆国, 1982)の場合 10^{-2} m/s^2 オーダーの振動が1 Hz前後において観測されている^{25), 26)}。より遠方での観測も含めると、 10^{-3} m/s^2 を下回る微小振動の計測ニーズとなる。またここで使われるセンサに対しては、感度・位相遅れについてそれぞれ5%, 5 degの不確かさでの校正とトレーサビリティが要求されている²⁷⁾。

機器状態監視

工場において機器の状態を振動計測に基づき診断する方法は古くから用いられてきた手法である。動機械の故障の主要因は転がり軸受であるが、振動では軸受けの様々な形の損傷を機器動作中に検知できることから最も広く利用されてきた^{28), 29)}。故障初期段階として軸受けに軽微な損傷が発生すると、傷と構成部品との衝突により構造物の共振周波数(>10 kHz)での振動が励起される。損傷が進行するにつれて、転動体通過周波数と呼ばれるより低周波数(数100 Hzから数kHz)の振動が発生する³⁰⁾。近年では従来の定期点検による時間基準保全(Time-Based Maintenance, TBM)から、機器を常時監視しその劣化状態に応じてメンテナンスを行う状態基準保全(Condition-Based Maintenance, CBM)への移行の流れがあり、故障初期段階の異常振動を検知するニーズがある。損傷の進行に伴い振動も増大する傾向にあるため、微小振動を正確に計測することができれば故障を早期に検知でき、点検コストの抑制につながると期待されている。異常と判断される振動のレベルは機器によるため一律な基準はないが、 10^{-4} m/s^2 から 10^{-1} m/s^2 の微小振動が対象となる場合^{31), 32)}から、 10 m/s^2 程度の場合²⁹⁾まで様々なケースがある。

常時微動観測による地盤特性推定

地盤の振動特性の把握は、建築における耐震設計や強震時の振動レベル推定など防災の観点から重要である。振動特性を決める地盤構造はボーリング調査により調べることができるが、調査にかかる費用・時間の問題から、より簡易な調査方法として地面の常時微動を使った振動特性測定が研究されている。具体的には、単点観測した常時微動の水平動/鉛直動のスペクトル比(H/Vスペクトル)から地盤の固有周期を求める方法³³⁾や、地震計アレイ観測から表面波(Rayleigh波)の速度分散を計測し逆解析により地下の地盤構造を推定する方法³⁴⁾などが用いられている。常時微動は場所により 10^{-7} m/s^2 から 10^{-4} m/s^2 (帯域幅10 Hzを仮定)まで様々であり³⁵⁾、基本的には微小振動の計測が求められる。

2.1.2 微小振動以外の重要な計測ニーズ動向

本稿の主題からは逸れるが重要なトピックとして、微小振動以外の計測需要動向を紹介する。

高周波(>10 kHz)振動計測

電気自動車やハイブリッド車の普及に伴い、従来のガソリン車とは異なる振動源として、モータの駆動に用い

られるインバータのリアクトル振動等の問題が生じている。インバータはキャリア周波数に依存して通常 10 kHz 以上の高周波振動を発生させるため、インバータの生産ラインにおける合否判定のために高周波振動計測のニーズが高まってきている。後ほど紹介するように 10 kHz 超の高周波振動に関してはセンサの信頼性評価技術に課題が残っており、評価技術の整備も求められている。

長周期地震動観測 (<0.6 Hz)

東日本大震災 (2011) や熊本地震 (2016) を経て、周期が 1.5 s を超える長周期地震動³⁶⁾の問題が広く認識されるようになってきた。このような振動周期は高層ビルの典型的な固有周期と一致するため、共振によりビルに大きな変形が生じ損傷につながるほか、高層階において家具・什器転倒などの被害を招く。特に前者は変形率が 1/100 を超えると構造物に損傷が出ると言われており、被災後のビルの危険度判定において重要な情報となることから、このような低周波・大振動の計測ニーズが出ている。

2.2 振動センサの種類と開発動向

振動センサは加速度・速度・変位を電圧・電荷などの電気信号に変換する装置であり、信号がいずれの物理量に比例するかに応じて加速度センサ・速度センサ・変位センサ等と呼ばれる。ただし実際は区別なく加速度センサ等と呼ぶことも多い。信号の微積分処理によってある程度の互換は可能だが、ノイズ特性や出力信号のバイアス等の影響が問題となるため、計測したい量や周波数によって適切なセンサが選択される。

振動センサは接触型と非接触型に大別される。接触型センサは対象にピックアップを直接取り付け、慣性系に対する振動を計測するものである。参照点を用意する必要が無いという利点があり、産業的に主流の振動計測方法となっている。非接触型センサはある参照点から対象までの相対振動をレーザー等によって計測するものである。回転するタービンや微細部品の振動、生産ライン中の計測など、センサの取り付けが難しい場合に用いられる。正確な振動を測るためには参照点の振動が十分小さい必要がある。以下でそれぞれのセンサについて具体的な方式などを簡単に紹介する。

2.2.1 接触型振動センサ

主に普及している接触型の振動センサは、図 2 に示すようにサイズモ系と呼ばれるバネ-マス系で構成されている。質量 m の試験マスがバネ定数 k 、減衰定数 γ の

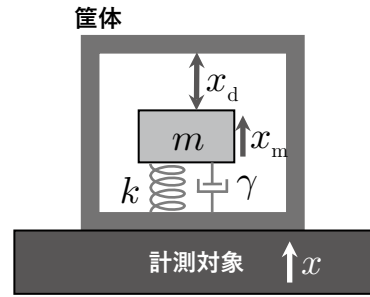


図 2 振動センサ（接触型）の模式図

バネで筐体内部に保持されており、筐体と試験マスの相対変位 x_d を測ることで慣性系を基準とした振動を計測する。計測対象と試験マスの変位をそれぞれ x 、 x_m とし運動方程式を書くと

$$m\ddot{x}_m = -m\gamma(\dot{x}_m - \dot{x}) - k(x_m - x) \quad (3)$$

となる。これをフーリエ変換 ($x(t) \rightarrow \tilde{x}(f)$, $\dot{x}(t) \rightarrow -(2\pi f)\tilde{x}(f)$ 等) して整理すると、相対変位 x_d の周波数応答は以下のようなになる：

$$\tilde{x}_d(f) \equiv \tilde{x} - \tilde{x}_m = \frac{-f^2}{f_0^2 + i\gamma f/Q - f^2} \tilde{x},$$

$$f_0 \equiv \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad Q \equiv \frac{2\pi f_0}{\gamma} \quad (4)$$

ここで f_0 と Q はそれぞれサイズモ系の共振周波数と Q 値である。共振周波数よりも高い帯域 ($f \gg f_0$) では $\tilde{x}_d \propto \tilde{x}$ となり計測対象の変位に比例した信号が得られ、低い帯域 ($f \ll f_0$) では $\tilde{x}_d \propto -(2\pi f)^2 \tilde{x}$ となり計測対象の加速度に比例した信号が得られる。主に地球観測や防災で用いられる広帯域地震計では f_0 を低くして変位を計測し、微分回路を通して速度信号を出力するようになっている³⁷⁾。一方、産業で広く用いられている加速度センサでは共振周波数を高くしそれ以下の帯域で加速度を計測する方式が一般的となっている。

筐体と試験マスとの相対変位 x_d を電気信号に変換する原理は様々であり、代表的なものを以下に挙げる：

・静電型

筐体と試験マスに対となる静電極板を設置し、静電容量変化から距離変化を計測する方式。絶対位置を測定できるため DC 加速度の計測が可能。広帯域地震計や後述する MEMS 加速度センサで多く採用されている。

・圧電型

試験マスを保持するバネに圧電素子を用い、応力に比例して生じる電荷を計測する方式。生じた電荷は内部のインピーダンスによって減衰していくため DC 加速

度には感度を持たない³⁸⁾。機械的強度が高く共振周波数が高いため、数 10 kHz までの高周波振動や衝撃計測に適しており、自動車試験や工場設備診断で広く用いられている。

• **抵抗型**

バネにピエゾ抵抗素子を取り付け、応力に比例した抵抗値の変化を計測する方式。圧電型と同様に高周波振動計測に用いられ、かつ DC 加速度にも感度を持つ。

• **光学型**

光学的に変位を計測する方式。例えば光源と受光素子を筐体に設置し、その間に光の一部を遮るよう試験マスを置き、マスの位置に応じた受光量変化を計測する方法などがある。

• **動電型**

試験マスと筐体にコイルと磁石をそれぞれ設置し、相対速度に比例して生じる誘導起電力を計測する方式。原理上電源が不要（アンプを除く）であり、地震観測や資源探査などフィールドで多く用いられる。

• **周波数変化型**

双音叉型の水晶振動子をバネとして用い、 x_d に比例した張力による振動周波数変化（バイオリンの弦と同原理）を計測する方式。

産業においては静電型・圧電型・抵抗型が主に用いられており、特許出願件数ベースではこれらの合計が全体の 7 割強を占める（2009 年時点³⁹⁾。

また上記のような検出原理による分類のほかに、動作

方法や製造方法に応じて以下の呼び方も浸透している：

• **サーボ型**

上記原理で検出した変位をもとに、フィードバック制御により試験マス位置を一定に保ちながら計測を行う方式。動作位置が安定しているため線形性に優れている。一般にサーボ型加速度センサと呼ばれる低周波（約 100 Hz 以下）用センサや広帯域地震計など高感度なセンサで広く採用されている。

• **MEMS (Micro Electro Mechanical System) 型**

製造方式による分類であり、試験マス・バネの機械要素と検出回路等を微細加工によって基板上に集積したものを指す。小型・安価・低消費電力という利点があり、近年の研究開発が著しく進んでいる。検出原理は静電型のものが多い。

代表的な振動センサについて典型的な計測範囲を図 3 に示す。微小振動計測に関しては、低周波数帯ではサーボ加速度センサまたは広帯域地震計、高周波数帯では圧電型加速度センサが一般的に用いられる。しかし 2.2.3 節で述べるように、近年では MEMS 型加速度センサの低雑音化の研究開発が進んでおり、高感度で知られるサーボ加速度に匹敵する低雑音を実現している例もあるなど、今後の発展が期待される。

2.2.2 非接触型振動センサ

非接触型センサは計測のための参照点を必要とし、計測対象との間の相対振動を計測する。代表的な計測方法

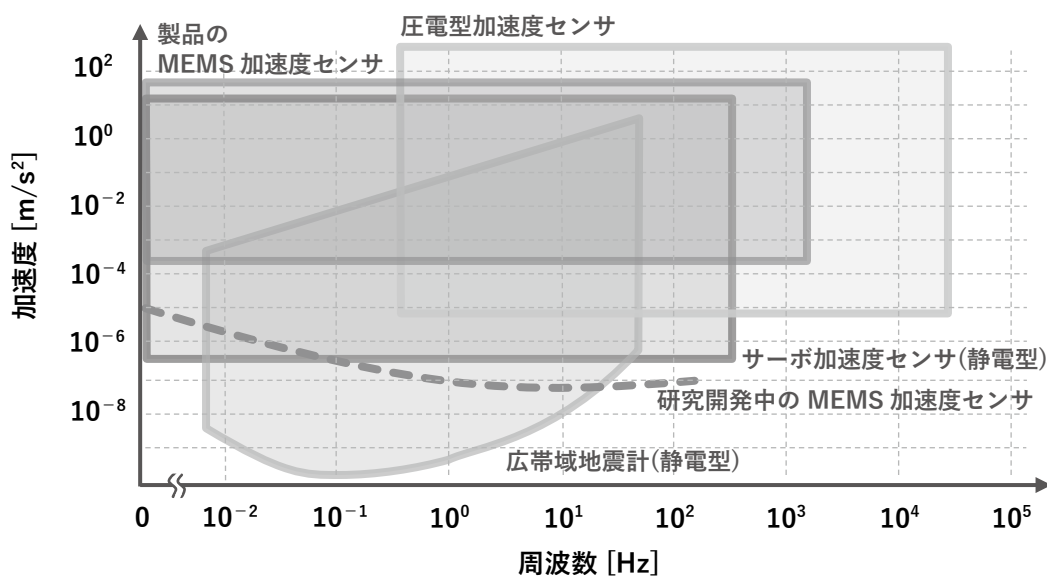


図 3 振動センサの種類ごとの典型的な計測範囲

としては以下の2つがある：

・レーザー干渉計

計測対象にレーザー光を当て、その反射光と参照光の干渉から変位を計測する方式。光学系の雑音やビーム径等にも依るが、典型的にはレーザー波長以下の高い変位分解能と数 m 以上のダイナミックレンジを持ち、十分な反射率があれば反射面の性質によらず測定が可能である。近年ではヘテロダイン干渉計と呼ばれる光学系を用い、対象の速度に比例した信号周波数シフトを検出することで速度を計測する LDV (Laser Doppler Vibrometer) と呼ばれる装置が普及している。これらレーザー光学系は一般に高価なため高精度な計測が要求される場合に用いられる。

・渦電流式

参照点となるセンサヘッドから高周波磁界を発生させ、対面した計測対象との距離に応じたインピーダンス変化から距離を計測する方式。計測対象面は導体に限られるが、レーザー干渉計よりも簡易な計測が可能である。

2.2.3 振動センサの開発・市場動向

振動センサ全体の市場は2007年時点で1,000億円規模と推計されており、拡大していく傾向にある³⁹⁾。自動車試験に用いられる圧電型加速度センサ、高精度な計測に用いられるサーボ加速度センサ、地球観測に用いられる地震計、などは当面は各分野で一定の需要を保つと思われる。今後特に着目すべきはMEMS加速度センサに関する動向である。半導体加工技術の進展に伴いMEMS加速度センサの利用が拡大している。安価・小型・低消費電力であるという利点は近年のIoT (Internet of Things) 化の流れに適しており、スマートフォンなどの身近な電子機器に用いられているほか、スマートファクトリーやインフラ診断など多くのセンサが必要となる場合にもこれらの特徴は大きな利点になる。既に民生機器や車載センサにおいては不可欠な要素となっている。

MEMS加速度センサは従来の高感度振動センサと比較すると試験マスが小型であるため、マス周囲の気体から受ける雑音などが大きい傾向にあり、図3に示されるように既に製品として流通しているMEMS加速度センサは微小振動計測には向かないものが多かった。しかし近年、研究レベルでは加速度の雑音スペクトル密度が $10^{-7} (\text{m/s}^2)/\text{Hz}^{1/2}$ 程度まで低減されたMEMS加速度センサも開発されており⁴⁰⁾⁻⁴⁴⁾、常時微動レベルを計測するような地球観測・資源探査等でも使用されつつある。今後は微小振動計測が要求される様々な分野でも重要度が

増していくことが予想される。

MEMS加速度センサは直線加速度だけでなく、3軸出力のものも多く製造されている。ジャイロと組み合わせることで6軸出力の慣性計測ユニットとしてモジュール化されたものも多い。慣性計測はGNSS (Global Navigation Satellite System) の電波を用いずに自身の位置・姿勢を判別するものであり、自動運転やドローンなどの市場で今後需要が増大していくことも予想される。

また、MEMSに限らないが、デジタル信号を出力するセンサの利用も拡大している。これはA/D変換器がセンサ内部に組み込まれており、UART, I²C, SPI通信などを介して信号を読み出すタイプのものである。IoTデバイスへの組み込みが容易であるほか、デジタル信号はアナログ信号と異なり伝送による劣化を受けにくいという利点があるため、インフラ計測などでも利用が考えられている。使用上は複数センサの時刻同期が技術課題となる場合がある。

3. 振動センサの評価

前述のように様々な振動センサが計測に用いられるが、センサの出力は電気信号(電圧・電荷等)またはデジタル値であり、計測対象の加速度との対応は明確ではない。従って振動を正確に測るためには以下の要素で特徴づけられるセンサ特性の評価が必要である：

- ・周波数応答(感度・位相遅れ)
- ・自己雑音
- ・非線形性
- ・バイアス・ドリフト
- ・環境変動(温度・湿度・磁場など)に対する応答

これらを正確に評価し把握することは計測信頼性の保証に不可欠である。

最もニーズが大きいのは周波数応答の校正である。校正とは入力の振動と出力の電気信号との間の振幅比(感度)と位相遅れを測定することであり、一般に周波数依存性を持つため周波数ごとの校正が行われる。校正については、NMIJなどの計量標準機関による標準供給や国際比較による国際同等性の確認など、信頼性を保証する枠組みが整備されている。校正方法や関連する動向は続く3.1節から3.2節で説明する。

また特に微小振動を計測する上ではセンサ内部の熱雑音や電気雑音によって生じる自己雑音レベルも重要である。自己雑音は通常、パワースペクトル密度 $P_n(f)$ (単位： $(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$)で特徴づけられ、微小信号の測定限界を決める。例えばある周波数区間 $f_1 < f < f_2$ の信号成

分を計測する際、雑音の RMS 値は

$$a_{rms} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} P_n(f) df} \sim \sqrt{P_n(f)} \times \sqrt{f_2 - f_1} \quad (5)$$

となる。また単一周波数 f_0 の振動を計測する場合、時間 T の信号から検出できる振幅の限界は、

$$\hat{a}_{min} \sim \sqrt{P_n(f_0)/T} \quad (6)$$

である。このような計測限界を明らかにするために雑音スペクトルの計測が求められる。計測方法については 3.4 節で紹介する。

応答の非線形性とは、計測する加速度に対して出力信号が線形でないことである（雑音成分を除く）。具体的には加速度の高次成分やヒステリシスなどがある。このような非線形性は信号を歪ませるため、振動計測において高調波が発生するなどの影響が出る。非線形性の評価としては、異なる振幅に対する感度の差などによって評価が行われている。

バイアスはセンサ出力値に一定のオフセットが乗るもので、ドリフトは測定時間内に一定の割合で変化していく成分である。これらは慣性航法など、加速度センサの出力値を積分して位置に変換する場合に大きな誤差要因となる。

また環境変動に対する応答として、代表的なものは温度変動に伴うバイアス成分の変化 $((m/s^2)/K)$ またはセンサ感度の変化 $((V/(m/s^2))/K)$ がある。これらは特にインフラ計測など、野外など過酷な環境での計測が求められる場面において特性の把握が重要となる。

微小振動計測に関連して特に評価ニーズがあるのは、

- ・微小振動に対する周波数応答の校正
- ・自己雑音スペクトルの評価

である。本章ではこれらについて、一般的な方法と関連する動向をまとめる。3.1 節から 3.3 節で校正について述べ、3.4 節で雑音評価について述べる。

3.1 振動センサの校正方法

振動センサの校正方法は主に、国際標準化機構 (International Organization for Standardization; ISO) が定める ISO 16063 シリーズで規格化されている。シリーズに含まれる規格の概要を表 1 にまとめる。ISO 16063-1⁴⁵⁾ にその概要が記されており、他は大別すると一次校正法 (10 番台)、比較校正法 (20 番台)、その他の特性の評価 (30 番台)、その他の校正法 (40 番台) に分かれる。振動の一次校正法にはいくつかの規格があるが、ISO

16063-11⁴⁶⁾ に定められるレーザー干渉計と線形加振器を用いた校正が推奨されており、NMIJ 等の計量標準機関ではこの方法が採用されている。校正精度・トレーサビリティの点で優れており、これに勝る校正法はないのが現状である。センサによってはこれと併せて DC 加速度への応答を地球重力を使った方法 (ISO 16063-16⁴⁷⁾) で評価し、低周波感度校正值の確認に用いるなどしている。このように一次校正されたセンサと校正対象を同時に加振し比較する校正法 (二次校正法) が ISO 16063-21⁴⁸⁾ に定められており、多くの校正事業者ではこの方法が採用されている。

用途は限られるがレーザー干渉計以外の校正法としては、回転円盤の遠心力を用いる方法がある。遠心力による DC 加速度応答の校正法は ISO 16063-17⁴⁹⁾、低周波大加速度への応答の校正法は ISO 5347-8⁵⁰⁾ に定められている。前者は自動車の衝突試験で用いられるような大加速度用のセンサ評価に用いられてきた。後者は ISO 16063-11 のような線形加振では発生が難しい低周波の大振動 (1 Hz 以下で 100 m/s²) に対する応答を校正できる利点がある。産業用センサの校正にはあまり用いられていないが、2.1.2 節で紹介したような長周期地震観測の信頼性評価手法の一つとして検討されている。その他地震計におい

表 1 ISO 16063 シリーズ

規格番号	概要
16063-1	基本コンセプト
16063-11	レーザー干渉計による振動の一次校正法
16063-12	相互比較法による振動の一次校正法
16063-13	レーザー干渉計による衝撃の一次校正法
16063-15	レーザー干渉計による角振動の一次校正法
16063-16	地球重力による DC 加速度の一次校正法
16063-17	遠心校正による DC 加速度の一次校正法
16063-21	振動の比較校正法
16063-22	衝撃の比較校正法
16063-23	角振動の比較校正法 (準備中)
16063-31	横感度の試験法
16063-32	衝撃印加による加速度計の周波数特性試験法
16063-33	磁場感度の試験法
16063-34	固定温度での感度試験法
16063-41	レーザー振動計の校正法
16063-42	地球重力による高精度地震計の校正法
16063-43	モデルに基づいたパラメータ同定による加速度計の校正法
16063-44	手持ち式振動校正器の校正法
16063-45	校正用組み込みコイルを用いたその場校正法

では、センサに組み込まれたコイルに電流を流し、対となる磁石との間に発生する電磁力を使ってセンサ応答を評価する方法が広く用いられている⁵¹⁾。ISO 16063-11 による校正技術が十分整備されていない 0.1 Hz 以下の応答評価ができる利点があるが、トレーサビリティが確保された校正ではないという問題がある。

3. 1. 1 一次校正法：ISO 16063-11

前述の通り最も一般的な振動センサの校正方法は、レーザー干渉計と線形加振器を用いる方法である。校正システムの概要を図 4 に示す。評価対象の振動センサを線形加振器で加振し、レーザー干渉計で計測した可動部の変位 x とセンサ出力信号 V が記録される。信号処理の方法は計数法・零点法・正弦波近似法があるが、前者 2 つは振動の位相情報を得られないことから、近年では正弦波近似法が主流である。その場合レーザー干渉計は変位を連続計測できることが求められ、代表的な光学系として図 5 に示す 2 位相ホモダイン干渉計が用いられている。この干渉計では、1/4 波長板を通し円偏光（縦横で位相が 90°異なる偏光）にしたレーザーをビームスプリッターで分岐し、片方が計測対象に当てられる。もう片方は偏光板を通して電場方向が斜めに傾いた直線偏光（縦横で同位相の偏光）に変換されて変位計測の参照鏡に当てられる。これらの反射光を再びビームスプリッターで合わせ、縦横の偏光に分離すると位相の異なる 2 つの干渉光信号が得られる。2 信号で描かれるリサージュ曲線は 1 周が $\lambda/2$ (λ : レーザー波長) の変位に相当するため、リサージュ曲線の位相を復調することで連続的な変位が求められる。正弦波近似法では、このように得られた信号 x 、 V を正弦波で近似して

$$\begin{aligned} x &= \hat{x} \sin(2\pi ft + \varphi_x) + b_x \\ V &= \hat{V} \sin(2\pi ft + \varphi_V) + b_V \end{aligned} \quad (7)$$

とし、得られた振幅の比・位相の差からセンサの感度 S ・位相遅れ $\Delta\varphi$ を計算する。式 (1) に示した変位と加速度の変換を考慮して、

$$S = \frac{\hat{V}}{(2\pi f)^2 \hat{x}}, \quad \Delta\varphi = \varphi_V - \varphi_x - \pi \quad (8)$$

としたものが校正値となる。電圧出力のセンサについては校正結果は電圧感度（単位：V/(m/s²)）で得られる。圧電型のような電荷出力のセンサでは、電荷電圧変換を行うチャージアンプと組み合わせて校正し電圧感度を求めた後、チャージアンプ単体を別途校正した結果を用いて電荷感度（単位：C/(m/s²)）に変換することが行われる。

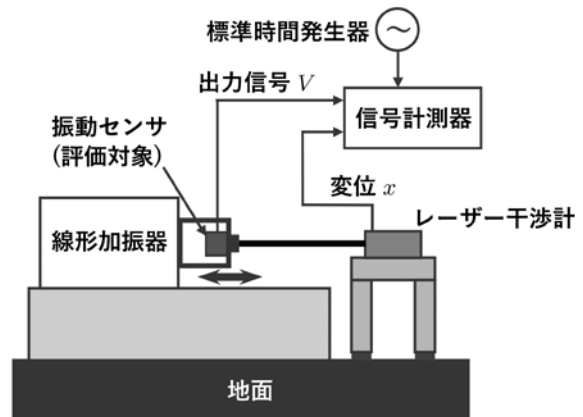


図 4 線形加振器とレーザー干渉計による一次校正法

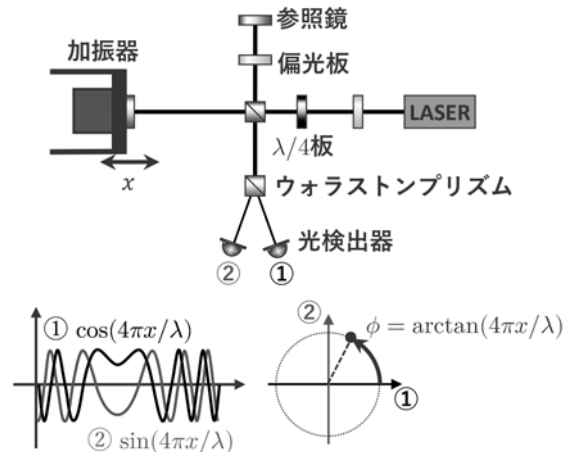


図 5 2 位相ホモダイン干渉計による変位計測

感度の校正値は、電圧・長さ・時間の 3 つの物理量で構成される。それぞれ、標準電圧発生器によって校正された信号計測器による電圧計測、レーザー波長を基準とした変位計測、標準時間発生器と同期した信号計測、によって各物理標準にトレーサブルな校正結果が得られるようになっている。レーザーには、国際度量衡委員会 (Comité International des Poids et Mesures, CIPM) が勧告する標準周波数リストに挙げられており長さ計測において広く普及している He-Ne レーザー（波長 632.8 nm）がよく用いられる。

校正のための加振の振幅については明確に規定されていないが、振動センサの応答が完全に線形である保証はないことから、計測時と同程度の振幅で加振して応答することが望ましい。加振器を用いる方式では、高周波数帯では加振力の限界である数 100 m/s²、低周波数帯ではストロークの限界である数 100 mm、が発生できる振

動の上限となる。より大加速度での校正が必要な場合、前述のような回転円盤での校正のほか、衝撃による校正を行う場合も多い。衝撃による校正では加振器の代わりに、過渡的な加速度運動を発生させるために剛体衝突や弾性波伝播による衝撃発生装置が用いられる。

3.1.2 NMIJの校正装置

NMIJではISO 16063-11に従った振動校正装置を2台保有しており、それぞれ低周波振動（0.1 Hz から 200 Hz）と高周波振動（20 Hz から 10 kHz）の校正に用いられている。装置の写真を図6に示す。校正における不確かさは0.2%から0.5%程度が実現されており、産業界のニーズ（典型的には不確かさ数%）を満たしている。

3.2 振動校正に関する国際的な状況

海外の国家計量標準機関（National Metrology Institute, NMI）でもISO 16063-11に従った振動校正が行われており、各国がそれぞれの装置を構築している。この節では国際的な振動校正技術の整備状況をまとめる。

3.2.1 国際比較

各国が整備している振動校正技術は国際比較によって同等性の確認が行われてきた。比較においては仲介器と呼ばれる器物を各国で持ち回り、それに対して各国のNMI

が付けた校正値の比較が行われる。国際比較は技術的な検証を行うだけでなく、各国の校正結果を相互に受け入れる国際相互承認協定（Mutual Recognition Arrangement, MRA）の根拠ともなっており、国際的な取引を円滑に進めるために重要な役割を担っている。その際、国際比較の結果をもとに国際度量衡局（Bureau International des Poids et Mesures, BIPM）のデータベースに登録された校正・測定能力（Calibration and Measurement Capabilities, CMC）が参考にされる。国際比較はCIPMが行うCIPM基幹比較と、その参加機関を幹事として地域計量組織（Regional Metrology Organization, RMO）が行うRMO基幹比較がある。振動に関するCIPM基幹比較は2000年から2019年にかけて4度行われた（表2）。それぞれ12か国から15か国が参加しており、NMIJは全てに参加してきた。

3.2.2 校正技術の整備状況

表2に示されるようにこれまで振動に対する周波数応答の校正技術が整備されてきたほか、自動車の人体安全性等に関連して衝撃応答の校正技術の整備も進められCCAUV.V-K4が行われた。振動に関して低周波数帯と高周波数帯で行われた国際比較CCAUV.V-K3とCCAUV.V-K2等¹の結果を見ると、およそ0.5 Hz から 10 kHzの間では各国間で同等性が確認されているといえる。一方で0.5 Hz以下の低周波数帯では校正に対応できていない機関もあり、0.1 Hzでは14か国中8か国のみが校正値を報告していた。また10 kHz以上の高周波数帯では各機関が校正値を出しているものの、各々が主張する不確かさよりも大きい数%のばらつきが校正値間に見られていた。このように校正技術の周波数範囲についてはまだ技術整備の余地が残っている。その中でNMIJは0.1 Hzの校正について各機関の中で最小の不確かさを実現して

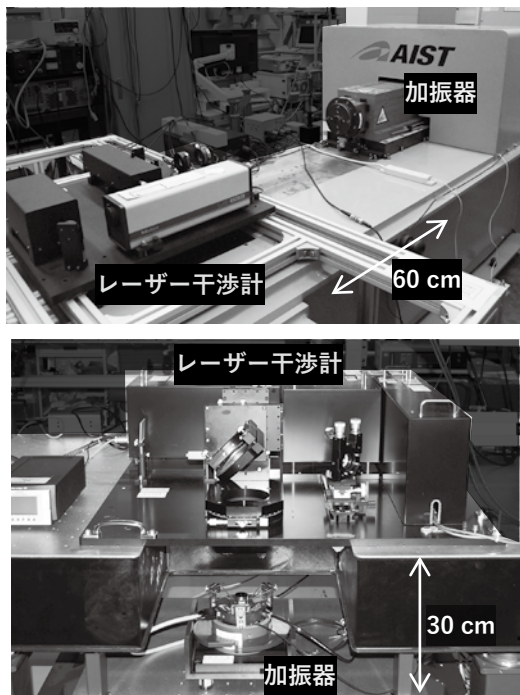


図6 NMIJの振動校正装置（上：低周波，下：高周波）

表2 振動に関するCIPM基幹比較

	周波数	加速度(推奨値)
CCAUV.V-K1 (2000年開始)	40 Hz to 5 kHz	10 m/s ² to 200 m/s ²
CCAUV.V-K2 (2009年開始)	10 Hz to 10 kHz	50 m/s ² to 100 m/s ²
CCAUV.V-K3 (2015年開始)	0.1 Hz to 40 Hz	0.05 m/s ² to 30 m/s ²
CCAUV.V-K5 (2017年開始)	10 Hz to 20 kHz	50 m/s ² to 100 m/s ²

※ CCAUV.V-K4は衝撃に関する国際比較

¹ CCAUV.V-K5の方が最新だが結果は未公表

いるほか、高周波の校正についても他機関と矛盾のない結果を出しており、技術整備は比較的進んでいる状態と言える。

また比較の際に推奨される振幅も表2に示すように0.05 m/s²から200 m/s²程度となっている。低周波数帯の比較では加振ストロークの制限から小さい加速度が推奨値となっているが、それを除けば概ね10 m/s²以上の大きな加速度で校正を行うことが推奨されている。これは2.1節で述べたように従来の主要な産業ニーズの領域を反映している。校正可能な振幅範囲、特に下限については、ドイツのPTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) が周波数によって0.001 m/s²への対応を行っている⁵²⁾が、他は明示されておらず調べられていない機関も多いと思われる。その理由としては、センサ応答の線形性を仮定すれば校正結果は振幅によらないため、周波数範囲の整備に比べて優先度が低いことが考えられる。むしろ一般に線形性の保証はないため振幅範囲の拡大も必要であるが、現状ではあまり技術整備は進んでいない状況となっている。

3.3 振動センサ校正の技術向上ニーズと課題

産業・社会ニーズに応じて校正技術に求められる内容は大きく分けて、

- ①校正可能な周波数・加速度範囲の拡大
- ②校正可能な対象の拡大

がある。以下の小節にそれぞれの詳細を記す。

3.3.1 校正周波数・加速度範囲の拡大

2.1節で挙げたような計測ニーズの拡大に伴い、校正範囲の拡大が求められている。2.1.1節で紹介した微小振動計測ニーズに合わせ、微小振動に対するセンサ応答の評価技術整備が必要である。特にインフラ診断など安全に関わる計測や、人工衛星などコストが高い装置における計測では信頼性評価の重要性は高いと思われるため、NMIJのような計量標準機関が評価技術を整備しておくことは重要である。微小振動でのセンサ応答については実際に評価依頼が出てきつつあるという実情がある。また2.1.2節で紹介したように自動車・地震観測分野から周波数範囲の拡大も求められている。

ここで、校正によって求めるセンサ応答は入力加速度と出力信号の比であり、センサの応答が完全に線形であれば校正結果は用いる加速度の大きさには依らないことを再度述べておく。しかし特に新規開発される振動センサなどでは線形性の保証がないため、計測対象に合わせた加速度での校正を行うために加速度範囲拡大が必要で

ある。またセンサ評価を求めるメーカー視点では、センサが微小振動に対して応答することの保証を付けるという意味での評価需要もある。

NMIJの振動校正装置を例に、校正可能な周波数・振幅範囲の現状と範囲拡大における技術課題を図7にまとめる。他国も同様の原理で校正を行っていることから、概ね同様の状況であると推測される。黒実線で囲んだ範囲は3.1.2節で紹介した2台の校正装置いずれかが対応できる範囲であり、加速度の上限は加振器で発生できる限界、下限は校正システムの雑音で決まる限界としている(詳細は第4章で述べる)。周波数範囲は標準供給を行っている範囲としており、0.1 Hz以下または10 kHz以上での校正も一部対応は可能であるが、図中に示したような技術的課題がある。図1と比較すると自動車業界の計測ニーズは概ねカバーできているが、2.1.1節に挙げた微小振動計測ニーズには対応できていない範囲も多いことが分かる。以下、加速度・周波数範囲の上限・下限拡張における技術的課題を具体的に紹介する。

加速度範囲を微小振動へ拡張する上で、校正不確かさは例えば10 Hzにおいて表3のように変化する。現在の主要な不確かさ要因である加振反作用・横振動などは加振の加速度に依存しないと思われるが、表に示したように微小振動で寄与が増大し無視できなくなるものがある。このうち主要な要因として以下のような技術課題を挙げる。本稿の主題でもあるため重要な内容は次章で詳しく紹介するとし、ここでは概略を述べる。

干渉計振動雑音の低減(防振)

図4においてレーザー干渉計側も振動している場合を考える。慣性系を基準として校正対象のセンサとレーザー干渉計光学系の変位を x_s 、 x_0 とすると、センサは \dot{x}_s に比例した信号 $V=S\dot{x}_s$ を出力する(S :感度)のに対し、干渉計は2つの相対変位 x_s-x_0 を計測する。従って式(8)によって求められる感度の校正値 S_c は、

$$S_c = \frac{\tilde{V}}{(2\pi f)^2(x_s - x_0)} = S \frac{\dot{x}_s}{\dot{x}_s - \dot{x}_0} \quad (9)$$

となり、真の感度 S と偏差を持つ校正値が得られてしまう。偏差の大きさは、加振する振幅 \dot{x}_s と光学系の振動振幅 \dot{x}_0 の比(または加速度換算で $\hat{a}_s = (2\pi f)^2 \dot{x}_s$ と $\hat{a}_0 = (2\pi f)^2 \dot{x}_0$ の比)で決まる。光学系の主な振動源は地面振動であり、典型的な都市部では $10^{-5}(\text{m/s}^2)/\text{Hz}^{1/2}$ 程度のスペクトルを持つランダムな振動である。振幅への換算は式(6)と同様であり、校正時間を10 sとすると地面振動の寄与は振幅 $\hat{a}_0 = 3 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$ に相当するため、現在の通常の校正($\hat{a}_s \sim 10^1 \text{ m/s}^2$)ではほとんど問題に

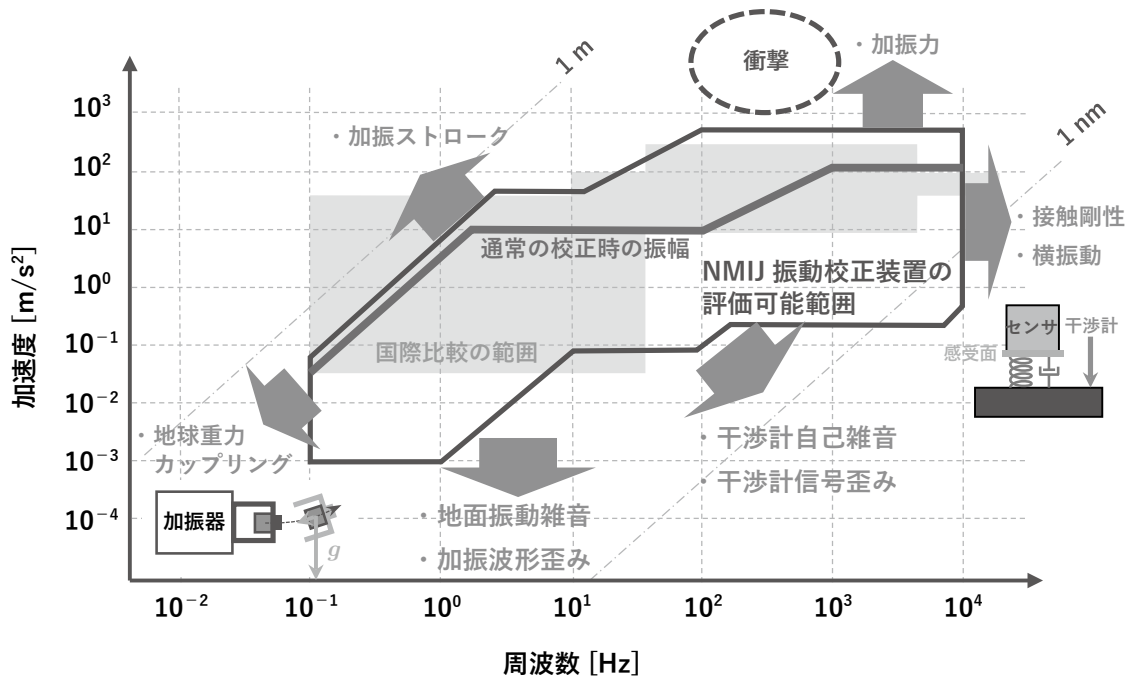


図7 現状の振動校正範囲と拡張のための技術的課題

表3 振動校正における主な不確かさ要因（特に微小振動に関連するものを中心に記載）。NMIJの低周波振動校正装置を例に、周波数10 Hzにおいて異なる加速度振幅で加振し校正を行った際の感度校正値の不確かさへの寄与（%）を示す。

不確かさ要因	10 m/s ² 加振	10 ⁻³ m/s ² 加振
加振反作用による		
干渉計振動	0.05 %	0.05 %
加振器の横振動 ^{※1}	0.02 %	0.02 %
信号計測器の電圧雑音 ^{※2 ※3}	3×10 ⁻⁷ %	3×10 ⁻³ %
干渉計振動雑音 ^{※3} (地面振動・音響)	3×10 ⁻⁵ %	0.3 %
干渉計自己雑音 ^{※3}	3×10 ⁻⁵ %	0.3 %
干渉計信号歪み ^{※4}	10 ⁻⁶ %	1 %
加振波形歪み	< 0.01 %	(未評価)
地球重力カップリングの補正 ^{※5}	10 ⁻⁵ %	0.01 %

※1 横振動 2%、センサの横感度 1%を仮定

※2 校正対象のノミナル感度 0.1 V/(m/s²)、信号計測器の雑音 10⁻⁸ V/Hz^{1/2}を仮定

※3 積分時間 10 sを仮定

※4 歪み 5 nmを仮定

※5 傾斜計測精度 0.1 μradを仮定

ならないが、10⁻² m/s²を下回る微小振動での校正においては0.1%以上の誤差を生む要因となり無視できない。そのため、レーザー干渉計を地面の振動から切り離す防振の導入が必要となる。防振技術の展望については次章で詳しく述べる。このほか周波数によっては周囲の音響によって生じる振動も問題となる場合がある。

干渉計自己雑音の低減

レーザー干渉計の自己雑音成分も地面振動雑音と同様に参照変位計測の誤差になる。寄与の仕方は式(9)と全く同じであるが、干渉計は通常、変位に関してフラットな雑音スペクトルを持つため高周波数帯で特に大きな寄与となる。これを低減するためには干渉計光学系の改良が必要となる。技術的な展望は次章で述べる。

干渉計信号歪みの低減・対策

レーザー干渉計は図5のように波長を基準にして変位を計測する。そのため半波長の変位ごとに信号の歪みが生じることが知られており⁵³⁾、サイクリックエラー等と呼ばれる。例えば図5の光学系の例では、偏光やパワーの分離比の不完全さなどによってリサーチ曲線が理想的な円形から歪んでしまい、復調によって得られる変位にも誤差が生じる。信号歪みは変位の振幅・位相の推定誤差になり校正値の誤差要因となる。特に校正に用いる正弦波振動の振幅が波長と同じオーダーになるにつれ寄与が大きくなるため、高周波・微小振動の校正において

低減・対策が必要である。対策の展望については次章で述べる。

加振波形歪みの低減・対策

校正に用いられる加振器は通常エアベアリングによって可動部を保持しているが、外乱（地面振動・音響）や位置制御雑音に加わることで可動部は微小に振動している。このような振動は校正のための正弦波振動に重畳されるため、特に微小加振においてはきれいな正弦波で加振することができなくなる。ただし単一周波数の信号を抜き出す場合、センサの線形性が良ければ加振波形の歪みは校正結果に大きな影響を及ぼさない。従って歪んだ波形の信号処理方法の確立によって解決できる可能性があり、必ずしも加振器の改良は必要としない。

地球重力カップリングの補正

低周波数側の微小振動への拡大においては、加振の非直線性による地球重力のカップリングが問題となる。これは水平方向に加振を行う場合に、ガイドが完全な直線でないことで振動センサが傾いてしまい、地球の重力加速度 g の一部がセンサの感度軸方向に混入するものである（図 7）。水平方向に x 変位した点での傾きを $\theta(x) \sim Cx$ とすると、 $g\theta(x)$ の重力加速度成分が加振による加速度 \ddot{x} に重畳される。レーザー干渉計は \ddot{x} を計測するため、センサが受ける加速度との間に差が生じてしまい校正値の誤差となる。その比率はフーリエ成分で書くと

$$\frac{-(2\pi f)^2 \ddot{x} + g\dot{\theta}}{-(2\pi f)^2 \ddot{x}} \sim 1 - \frac{gC}{(2\pi f)^2} \quad (10)$$

となり、第 2 項の分だけ実際の感度と異なる校正値が得られることになる。式 (10) の示すように周波数の 2 乗に反比例して低周波で寄与が大きくなる。

振動センサにおける重力カップリングの問題は地震計の分野では以前より知られていた⁵¹⁾。校正における問題としては 2016 年の先行研究で指摘された⁵⁵⁾ほか、NMIJ も独立にこの問題を認識しており、加振に伴う傾きを計測することで補正を行ってきた。補正に伴う不確かさは式 (10) の係数 C の決定精度で決まる。例えば 0.1 Hz で 100 mm 振幅で加振し校正を行う場合、重力カップリングの寄与を 1% に抑えるためには、約 3 μrad の精度で傾きを決定する必要がある。より低周波・微小振動での校正においては、数 10 nrad オーダーの傾き決定精度が求められる。

BIPM の音響・超音波・振動諮問委員会 CCAUV (Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound, and Vibration) が出した戦略文書 (2019 年 - 2029 年)⁵⁶⁾ では地震観測網に関連した要求から、0.008 Hz までの低周波数での校正が求められている。これに対応するためには上記

のような高精度な傾き計測の導入が必要である。

そのほか、加速度範囲を大加速度へ拡大するためには用いる加振器の加振力およびストロークの向上が必要である。加振器自体の開発が要求されるため NMIJ が着手している例はあまりないが、梁の共振を利用した振動増幅によって大振動を実現する研究⁵⁴⁾などが高周波数帯では一部行われている。低周波数帯では 3.1 節冒頭で紹介したような遠心力による校正法もあり、線形加振との同等性を検証した上で大加速度の校正に用いる可能性もある。

高周波数側への拡大では、振動センサの取付部の接触剛性が問題となる。これはセンサ表面と取付対象面の材質や表面状態に応じて、接触面が弾性バネのようにはたらく効果である。これによって図 7 中に図示したようにセンサの感受面とレーザー干渉計で計測する面の間に差が生じ校正結果の誤差要因となる。この問題は国際比較 CCAUV.V-K2 において各国の校正結果が高周波でばらつく要因として広く認識された⁵⁷⁾。以来、接触剛性の寄与に関する先行研究⁵⁸⁾⁻⁶⁰⁾によって、表面粗さや材質依存性が調べられてきている。現状では接触剛性の寄与を除くことはできておらず、今後は接触剛性のモデル⁶¹⁾などをもとに寄与を下げる改善を行うか、接触剛性の影響を受けにくい校正方法の開発が必要である。

3.3.2 校正対象の拡大

3.3.1 節で述べた内容は現行装置の性能向上を目指すものだが、振動センサの開発動向に応じて評価対象を質的に拡大することも必要である。2.2.3 節で挙げたように、デジタル出力型の振動センサや多軸出力のセンサの利用が拡大しているため、これらに合わせた校正システム構築が求められる。

デジタル出力型センサの校正法についてはごく近年議論が始まっており、既存のアナログセンサ校正との違いが先行研究で検討されてきた^{62), 63)}。主な違いは信号のサンプリングがセンサ内部の A/D 変換器で行われることであり、そのため校正に用いる参照信号（干渉計など）との時刻同期の問題が重要であるとの指摘がある⁶⁴⁾。振動センサではないが、既にデジタル出力型センサの時刻同期を実装して校正を行った先行研究なども存在する⁶⁵⁾が、校正の不確かさなど十分な議論はされていない状態である。今後は不確かさの評価も含め手法の検証・確立が必要となる。デジタル出力型センサへの対応も CCAUV の戦略文書に挙げられている重要なトピックである。

また多軸出力センサについては、多軸感度の校正および異なる自由度間のカップリングの評価などが求められ

る。先行研究では多軸加振システムの導入⁶⁶⁾や治具を使って傾けて加振する手法⁶⁷⁾が研究されている。

3.4 自己雑音の推定方法

振動センサの自己雑音は前述の通り計測限界を決めるほか、校正における不確かさ要因ともなるため、評価して把握しておくことが重要である。自己雑音推定法は地震観測の分野でいくつかの方法が提案されており、レビュー論文⁶⁸⁾などにまとめられている。センサの出力は主に振動信号と自己雑音成分の和になっており、振動信号成分を除くことで雑音が推定される。その際特に地面の常時微動などの背景振動が妨げとなるため、背景振動の小さい環境で雑音評価を行うか、複数センサを用いて相関解析により雑音成分のみを抽出する方法がある。

1 センサ法

センサの自己雑音が地面の常時微動よりも大きい場合は、評価対象センサ単独で地面に設置すれば雑音成分の計測が可能である。典型的には $10^{-5}(\text{m/s}^2)/\text{Hz}^{1/2}$ 以上の雑音スペクトルを持つセンサであればこの方法で容易に評価ができる。さらに常時微動の小さい土地で計測を行うか、防振台を用いることによって、 $10^{-7}(\text{m/s}^2)/\text{Hz}^{1/2}$ 程度までの雑音は評価が可能なる場合もある。高感度振動センサを除けばこの方法で十分な場合も多いが、得られたスペクトルが自己雑音成分なのか実際の振動なのか区別ができないため、簡易評価として用いられることが多い。

2 センサ法

図3に示すように、広帯域地震計をはじめ超高感度センサでは、センサの自己雑音よりも小さな振動環境を用意することが難しい。そのような場合、異なるセンサ同士の自己雑音は無相関であることを利用した雑音スペクトルの推定法が用いられる。先行研究⁶⁹⁾が提案する2つのセンサを用いる方法では、同位置に設置した2センサの信号の相関を取ることで実際の振動信号成分を求め、各センサの信号から差し引くことで自己雑音成分のスペクトルを抽出することができる。ここで各センサの応答は正確に校正されている必要があり、校正誤差は背景振動の混入を招き自己雑音推定能力の低下につながる。NMIJでは図6の振動校正装置を用いることで正確な校正値を求め、雑音の推定精度を向上させる研究が行われている⁷⁰⁾。

3 センサ法

2センサ法の改良として、同位置に置かれた3つのセンサを用いることで正確な校正を要求しない方法も提案されている⁷¹⁾。3つのセンサが同じ振動を受けるように設置する必要があるため2センサよりさらに手間はかか

るが、応答の校正を必要としない分高い背景振動除去ができる。先行研究では背景振動より3.5桁程度低い自己雑音を抽出した例がある⁶⁸⁾。研究開発中のものを除くと、現在最も低雑音なセンサである広帯域地震計の雑音スペクトルが $10^{-10}(\text{m/s}^2)/\text{Hz}^{1/2}$ 程度であるから、地球上の低振動な環境と組み合わせれば殆どのセンサはこの方法で雑音推定が可能と思われる。

自己雑音推定はトレーサビリティが求められるような評価ではないためメーカーやユーザーが独自に行う場合も多いが、校正と併せてNMIJに評価依頼が来ることもある。また微小振動校正ではセンサの自己雑音が校正の繰り返し不確かさの要因になりうるため、評価技術を整備しておく意義は大きい。ただし基本的な評価法は確立されているため新規開発要素は少ないと思われる。

4. 微小振動計測の信頼性評価技術開発の展望

微小振動計測に関連した状況を改めてまとめる。図1および2.1節で紹介したように 0.1 m/s^2 を下回る微小振動計測ニーズが拡大している。それに伴い微小振動での周波数応答校正およびセンサ自己雑音の評価技術の整備ニーズがあり、特に前者は開発要素があり重要度が高い。インフラ計測など主要な社会ニーズに対応するためには、 0.1 Hz から数 100 Hz の範囲で校正加速度範囲を 10^{-4} m/s^2 程度まで拡大することが目標となる。しかし図7が示すように現在の振動校正装置では対応できない範囲も多い。3.1節で述べたようにISO 16063-11で定められた校正手法の他に有効な手法はないのが現状であるから、現行の校正装置の延長として3.3.1節で挙げたような技術課題を解決することが必要である。

校正装置に比較的大きな改良が必要となるのは、干渉計振動雑音（主に地面振動に由来）と干渉計自己雑音の低減である。後述するように干渉計信号歪みは信号処理の工夫で低減できる見込みがある。現行装置について計測された干渉計振動雑音、干渉計自己雑音の寄与を図8に示す。縦軸は加速度のパワースペクトル密度で表しており、周波数に依存した積分時間 T を用いて式(6)より振幅推定誤差に換算できる。この振幅推定誤差が0.1%以下に収まることを要求した校正加速度の下限が図7の加速度範囲の下限を決めている。図8を見ると、いずれの装置もおおよそ 10 Hz 以下の低周波数帯で干渉計振動雑音、より高周波数帯で干渉計自己雑音の寄与が支配的となる。 10^{-4} m/s^2 まで校正範囲を拡大するためには、これらをおおよそ $10^{-7}(\text{m/s}^2)/\text{Hz}^{1/2}$ まで下げる必要が

求される。ここで、評価対象の振動センサに加わる地面振動は加振信号歪みとしてはたらくため、3.3.1節で述べたように必ずしも低減の必要はなく、信号処理によって回避できることを述べておく。

上記の目標をもとに、今後 NMIJ の振動校正装置に関して以下の研究開発を行うことを検討している：

- ・レーザー干渉計防振装置の導入
- ・低雑音・低歪みレーザー干渉計の開発
- ・校正における干渉計信号歪み対策手法の確立

本章ではこれらの具体的な展望を述べる。

4.1 防振技術の導入

地面振動雑音は 10 Hz 前後で $10^{-4}(\text{m/s}^2)/\text{Hz}^{1/2}$ 程度の寄与があるため、これを 3 桁近く低減する必要がある。地面などの振動を遮断する防振技術は様々な分野で使われており、大きく分けて受動防振と能動防振の 2 つがある。受動防振は防振対象を振り子で懸架しその共振周波数以上で振動伝達を抑えるものである。能動防振は防振対象の振動をセンサで計測しフィードバック制御によって抑えるものである。技術的難易度は前者の方が低いが、外乱への耐性の面では後者の方が勝る。

受動防振における防振比 \tilde{H} は、理想的な振り子では

$$\tilde{H} = \frac{f_0^2}{f_0^2 + i f_0 f / Q - f^2} \sim \begin{cases} 1 & (f \ll f_0) \\ -\left(\frac{f_0}{f}\right)^2 & (f \gg f_0) \end{cases} \quad (11)$$

となる。ここで f_0 、 Q はそれぞれ懸架系の共振周波数と Q 値である。高い防振比・広い防振帯域を得るために共振周波数を下げることが重要であり、10 Hz で 3 桁の防振を実現するためには、 $f_0 < 0.3 \text{ Hz}$ が要求される。多少の妥協を許せば、単純にワイヤで吊るだけでも共振周波数 ($f_0 = \sqrt{g/l}/2\pi$, g : 重力加速度, l : ワイヤ長) は $l = 1 \text{ m}$ で 0.5 Hz となるため 10 Hz で 1/400 倍の防振は可能である。より共振周波数を下げ方法として、バネと反バネを組み合わせることで復元力を打ち消す先行研究があり、代表的な機構として倒立振り子や圧縮板バネ (図 9) がある。先行研究では共振周波数を 0.012 Hz まで低減した例が報告されている⁷²⁾ほか、バネ-反バネ機構は市販の低周波防振装置でも採用されている実績がある。このような低共振周波数懸架系を導入しレーザー干渉計を防振すれば要求される地面振動雑音低減が実現できると見込まれる。ただし懸架された部分は風・音などの外乱に弱くなるため、大気中では防風・防音などの対策と併せて用いることが必要である。

能動防振における防振比はフィードバック制御ゲインの逆数となり、ゲインが 1 を超える周波数範囲を制御帯域と呼ぶ。十分な防振比・帯域を得るためには適切な制御設計が必要となるが、制御発振の回避など技術的難易度は高い。典型的には、0.1 Hz から数 10 Hz の間が防振帯域となり、低周波では地球重力成分の混入、高周波では構造共振による発振などが帯域を制限する。制御では地面振動以外の外乱による振動も同様に抑えることができるため、受動防振に比べて外乱耐性は高い。先行研究では 0.3 Hz から 10 Hz の間で約 3 桁の防振を実現した例がある⁷³⁾。

上記のようにいずれの方法でも防振の要求を満たすことは可能である。ただし校正装置においては図 8 が示すように 1 Hz から 10 Hz の振動が顕著であるから、技術

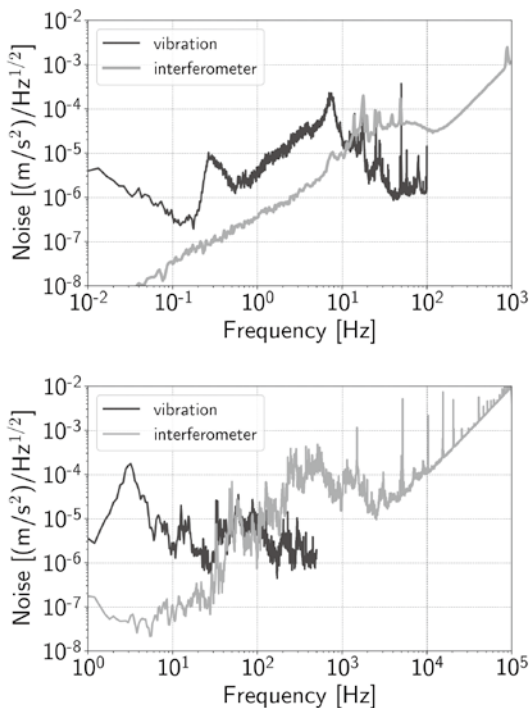


図 8 現振動校正装置の干渉計振動雑音・干渉計自己雑音 (上: 低周波校正装置, 下: 高周波校正装置)

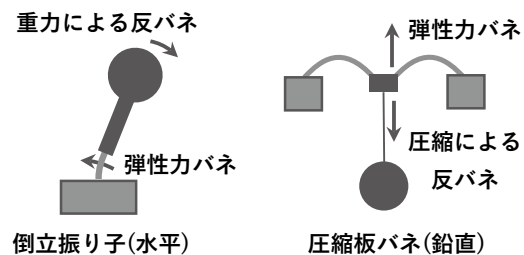


図 9 代表的なバネ-反バネ機構

的難易度も考慮すると受動防振で十分であると思われる。

4.2 低雑音干渉計開発

数 10 Hz 以上の高周波数帯では干渉計の自己雑音低減が必要である。校正加速度範囲の拡大を 0.1 Hz から 500 Hz の間で行うとすると、加速度単位の雑音の目標値 $10^{-7}(\text{m/s}^2)/\text{Hz}^{1/2}$ は変位換算で $10^{-14} \text{ m/Hz}^{1/2}$ に相当する。干渉計の雑音は通常こちらの変位単位で表すため、以下この値を用いるとする。現行の干渉計はこの要求を満たさないため、低雑音干渉計の開発が必要である。

レーザー干渉計の雑音は様々な研究の中で調べられており、典型的には 10 Hz から 1 kHz の間では地面振動・音響などの外乱による光学素子の振動雑音、1 kHz 以上の高周波では散射雑音やレーザー周波数雑音、検出器等の電気雑音などが支配的となることが知られている。NMIJ の振動校正装置においても図 8 中に示される低周波側の構造を持ったスペクトルは前者、高周波側のフラットなスペクトルは後者が寄与していると思われる。

地面振動・音響による振動雑音は外乱の遮断で低減できる。また光学系を堅牢な構造にすることで外乱耐性を上げることも有効である。地面振動は 4.1 節で述べた防振の導入によって低減できると見込まれる。音響についてはレーザー干渉計の光学系に十分な遮音を施すか真空中に設置することで低減が可能である。ただし校正装置では加振器上に設置される鏡(図 5)が大気中にある必要があるため、真空化する場合は他の光学素子のみを小型真空槽に封入するような構成が必要となる。先行研究では、真空中・防振台上に干渉計を設置することで 30 Hz から 100 Hz において $10^{-14} \text{ m/Hz}^{1/2}$ の雑音を実現した例がある⁷⁴⁾。

高周波の雑音は設計段階の計算で推定できるものが多い。主要な雑音源として、散射雑音とレーザー周波数雑音に関する低減の展望を以下に示す：

散射雑音

光検出器が受ける光のパワーは量子的に揺らぎをもち、レーザー干渉計信号を変位に復調するうえでの雑音となる(散射雑音)。雑音のパワースペクトル密度は以下の式で表される：

$$\delta x_{\text{shot}} = \sqrt{\frac{hc\lambda}{8\pi^2\eta P_{\text{PD}}}} \quad (\text{単位：m/Hz}^{1/2}) \quad (12)$$

ここで、 h ：プランク定数、 c ：光速、 P_{PD} ：光検出器入射パワー、 η ：光検出器の量子効率、 λ ：レーザー波長、である。 $\eta=0.8$ 、 $\lambda=632.8 \text{ nm}$ とすると、 δx_{shot} を $10^{-14} \text{ m/Hz}^{1/2}$ 以下に抑えるには $P_{\text{PD}} > 20 \text{ }\mu\text{W}$ が要求される。市販さ

れている数 mW クラスの He-Ne レーザーによって散射雑音は十分に低減できると見込まれる。

レーザー周波数雑音

レーザー干渉計はレーザー波長を基準として対象の変位を計測するため、波長の揺らぎ(⇔周波数揺らぎ)は変位計測雑音となる。周波数揺らぎ $\delta\nu$ に等価な変位雑音は、

$$\delta x_{\text{freq}} = \frac{\delta\nu}{\nu} \Delta L \quad (13)$$

となる。 $\nu=c/\lambda$ はレーザー周波数、 ΔL は参照鏡側と計測対象側の光路長さ(図 5)である。He-Ne レーザーの周波数揺らぎについての報告は少ないが、市販レーザーに関して 500 Hz 付近で $\delta\nu \sim 10^2 \text{ Hz/Hz}^{1/2}$ と報告した例⁷⁵⁾がある。この値を用いると $\delta x_{\text{freq}} < 10^{-14} \text{ m/Hz}^{1/2}$ に抑えるには $\Delta L < 50 \text{ mm}$ が要求されるが、この精度での光路長の調整は容易に行うことができる。

低雑音な干渉計は宇宙実験^{78),79)}や地震計開発^{74),76)}、長さ標準⁷⁷⁾などの精密計測分野で研究開発が行われてきた。干渉計の光学系構成は図 5 の 2 位相ホモダイン干渉計の他に、近年はヘテロダイン干渉計(光学系構成例：図 10)方式もよく用いられる。これは周波数シフトを加えたレーザーと計測対象側のレーザーとのビート信号を計測し、シフト周波数で復調することで変位信号を得る方式である。周波数シフトを加える素子としては、光学結晶に音響波を印加し回折格子として作用させる音響光学変調器(AOM)がよく用いられる。本節で述べた雑音についてはホモダイン/ヘテロダインどちらの光学系でも同程度のレベルとなる。例として先行研究のうち比較的低雑音を実現したものをいくつか図 11 に挙げる。近年では干渉計の方式によらず $10^{-14} \text{ m/Hz}^{1/2}$ から $10^{-13} \text{ m/Hz}^{1/2}$ 程度の雑音レベルが達成されており、微小振動校正の要求を達成できる見込みはある。先行研究と比べて振動校正装置に特有の開発要素としては、上で述べたように計

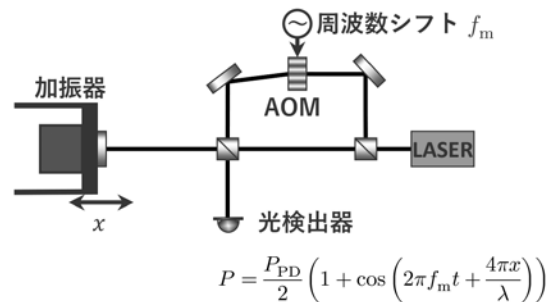


図 10 ヘテロダイン干渉計による変位計測の一例

$$P = \frac{P_{\text{PD}}}{2} \left(1 + \cos \left(2\pi f_m t + \frac{4\pi x}{\lambda} \right) \right)$$

測対象が大気中にあることと、比較的大きな変位（数 10 cm）の計測にも対応できる必要があることなどが挙げられる。

NMIJ では低雑音干渉計を開発すると同時にヘテロダイン干渉計へ移行することを検討している。これは独自開発した高精度な FPGA 位相計⁸⁰⁾を復調器として用いることでその後の信号処理が簡易化できるためである。現行装置で用いられている 2 位相ホモダイン干渉計では加振中のリサージュ曲線をトレースするために数 MHz の速さでのデータ取得が必要であり、長時間の計測を行うと莫大なデータ量になるという実用上の問題があった。上記位相計では復調済みの変位信号が出力されるためデータ量を大幅に削減できる。ホモダイン干渉計のリアルタイム変位変換を開発して導入するのに比べ、既存の位相計で対応できるため技術的ハードルは低い。

4.3 干渉計信号歪み対策

干渉計の信号は半波長の変位ごとに歪み（サイクリックエラー）が生じることが知られている^{53),81)}。振動の変位振幅が小さくなるにつれ相対的に歪みの影響は大きくなり、振幅が波長と同程度のオーダーになると無視できない不確かさ要因となる。そのため高周波または微小振動の校正において対策が必要となる。

振動校正におけるサイクリックエラーの影響を簡易的なモデルで考える。正弦波振動 $x = A \sin(2\pi ft)$ (A : 振幅, f : 周波数) に対して半波長変位ごとにピーク値 x_c の歪

み成分が加わるとして、計測される信号 x_m を

$$x_m = x + x_c \sin\left(\frac{4\pi x}{\lambda}\right) \quad (14)$$

とモデル化する。 $x_c = 0.1 \text{ nm}$, 1 nm , 10 nm の場合について、 x_m を正弦波近似することで推定される振幅と真の変位振幅 A との差を数値計算した結果を図 12 に示す。計算結果を基にすると、校正不確かさへの寄与を 0.1 % 以下に抑えるためには歪みを約 0.1 nm 以下に抑えることが要求される。ただし実際には原因によって半波長周期だけでなく 1/4 波長周期等の歪みも生じるため⁸²⁾、要求値もファクター程度異なりうる。

一般的には光学系の調整・データ処理によって信号歪みを低減することが行われている。例えばビームスプリッターの分岐比や異なる偏光同士の混入などが信号歪みの要因となるため、これらの精密な調整を行うか、影響が出にくい光学系構成にすることで歪みは低減できる。またデータ処理によるエラーの補正もよく行われており、2 位相ホモダイン干渉計などではリサージュ曲線の楕円パラメータをフィッティングで求め円に補正する方法（Heydemann 補正⁵³⁾）が有名である。先行研究ではホモダイン干渉計・ヘテロダイン干渉計いずれについても歪みを 10 pm 以下まで低減した例が報告されており⁸²⁾⁻⁸⁴⁾、校正における要求値も実現できる見込みがある。ただし振動校正用の干渉計では動的な計測を行うため、アラインメントの安定度などの影響で先行研究と同程度の歪み低減を実現できるかどうかは評価が必要である。

近年提案されている別のアプローチとして、校正時に低周波ドリフトを加えることで信号歪みの影響を平均化する方法がある。正弦波振動を測る場合、信号歪みは振動中心位置に依存して振幅を大きくも小さくもするため、これをスイープするような背景変位を加えることによって平均的な誤差が 0 になるようにする方法である。各時

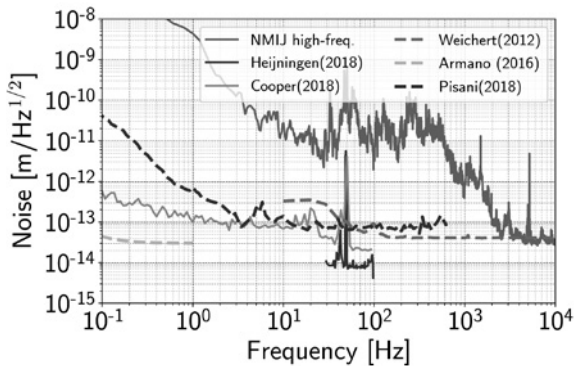


図 11 干渉計雑音の先行研究例。実線はホモダイン干渉計方式（青：Heijningen (2018)⁷⁴⁾、緑：Cooper (2018)⁷⁶⁾）、点線はヘテロダイン干渉計方式（赤：Weichert (2012)⁷⁷⁾、橙：Armano (2016)⁷⁸⁾、ピンク：Pisani (2018)⁷⁹⁾）を示す。Heijningen (2018) は真空中・防振台上での計測、Armano (2016) は衛星上での計測である。参考のため NMIJ の高周波校正装置用干渉計の雑音を灰線で示した。

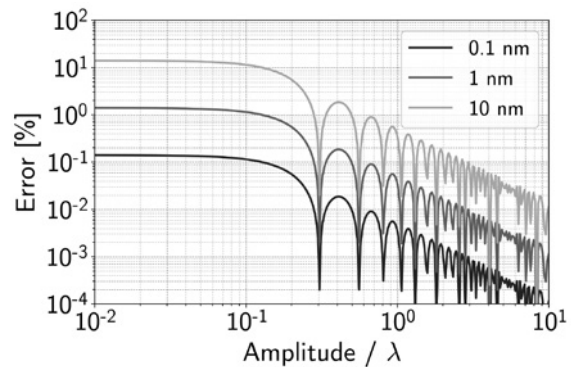


図 12 サイクリックエラーによる正弦波振動の振幅推定誤差。横軸はレーザー波長単位で表した振動振幅。

刻における変位信号の歪みを消すことはできないが、正弦波振動の振幅・位相のみが重要な場合にはこの手法が適用できる。現在の高周波校正装置ではこの手法が一部採用されており、加える低周波ドリフトの最適化や歪み低減の適用限界については研究が進められているところである。本手法を併用することで、光学系調整やデータ処理への要求を軽減することができると見込まれる。

4.4 微小振動校正の今後の展開

今後は以上のような校正装置の改良を行い、校正不確かさの評価や現行システムとの同等性検証を経て、微小振動対応の振動校正システムとして確立していくことを目指している。システムは様々なセンサ評価に応用することができ、例えば広帯域地震計のようなレンジの狭い超高感度センサも実際の計測対象に近い微小振動で校正ができる。現在地震計について広く行われている組み込みコイルによる電気的な応答評価と比較することで、地球観測分野全体における振動計測の不確かさの検証につながる。特に位相遅れについては、地震波の到着時刻推定に直結するため信頼性の高い評価を行う意義は大きい。その他、デジタル出力型センサへの対応や、温度・湿度を変えた実環境評価の実装などを行い、実ニーズに合わせた質的な評価対象拡大も進める。

3.3.1節でも述べたように、微小振動でのセンサ校正は実際にいくつかの依頼が出てきつつある状況であり、今後も同様のニーズがあると見込まれる。特にインフラ診断などは国家規模のニーズがあり人々の安全にも関わる計測であるため、計測信頼性が明確に求められるようになる可能性もある。そのため校正システムはトレーサビリティの確保・不確かさの評価などの点で現行システムと同様に信頼性の高いシステムであることが望ましい。本章で示した校正装置の改良計画は基本的に現行システムの延長であるため、校正のトレーサビリティは同様に確保できるほか、不確かさに関しても質的には現行システムと同様の評価を行えばよい。

世界的な動向としては、国際比較による検証を微小振動に関して行うことが検討されている様子はなく⁵⁶⁾、しばらくは校正周波数範囲の整備が優先課題となると思われる。NMIJは国際比較が行われた周波数範囲では比較的小さな校正不確かさを実現しており整備が進んだ状態である。次のステップとして校正加速度範囲の拡大に着手することで、各国に先んじて校正技術整備を進められると期待される。

5. まとめ

振動は汎用的な計測量であり産業・社会の様々な分野で用いられている。2.1節で紹介したように近年では特に、インフラ診断・人工衛星振動計測・核実験監視などで微小振動の計測ニーズが増している。これらは防災・防衛の面で人々の安全を支えるほか宇宙開発などの産業分野の発展につながるため、計測信頼性の評価が重要であり、そのために振動センサの出力特性の把握が不可欠である。微小振動計測においては、特に周波数応答の校正やセンサ自己雑音推定などが求められる。本稿ではこれらの技術の現状を概観し、微小振動計測の信頼性評価技術の整備について今後の展望をまとめた。

振動センサは計測対象と同程度の振幅で校正されることが望ましく、上記の微小振動計測ニーズからは加速度振幅で 10^{-4} m/s^2 程度まで校正技術を整備するニーズがある。一方で国際的には校正周波数範囲の整備に比べて加速度範囲の整備は進んでいない状況である。NMIJの校正装置も図7が示すように 10^{-3} m/s^2 から 10^{-1} m/s^2 程度が校正可能な下限となっており、防振技術の導入・干渉計の低雑音化・干渉計信号歪みの対策などが必要な状況であった。

上記技術開発の展望を第4章で示したが、具体的には

- ・低周波受動防振の導入（共振周波数 $<0.3 \text{ Hz}$ ）
 - 干渉計振動を 10 Hz 前後で3桁低減
- ・レーザー干渉計の低雑音化（防音・光学設計）
 - 干渉計自己雑音を $10^{-14} \text{ m/Hz}^{1/2}$ 以下に低減
- ・干渉計信号歪みの調整・低減
 - 歪み $<0.1 \text{ nm}$ に低減 & ドリフトによる平均化

等を行うことにより、 10^{-4} m/s^2 程度までの校正範囲拡大が見込めることが分かった。これらの各技術を統合して微小振動の校正システムとして確立することが必要である。今後は実ニーズに合わせた評価対象の質的拡大なども併せて進め、様々な高感度振動センサの評価に対応することで、広い分野での微小振動計測の信頼性向上に貢献することが期待される。

謝辞

調査研究報告の執筆にあたり、様々な方からのご指導・ご支援をいただきましたことをここに感謝申し上げます。音波振動標準研究グループの野里英明研究グループ長、穀山渉主任研究員には振動加速度標準のことを一から教えていただきました。様々な質問にも詳しく答えていただき、本研究の骨子となる知識を身に付けることができました。また工学計測標準研究部門の大田明博部

門長には以前の振動校正のお話しなどを聞かせていただく機会があり、現状に至るまでの経緯など学ばせていただきました。音波振動標準研究グループの高橋弘宜主任研究員、山田桂輔主任研究員にはミーティングの際などに研究に関するアドバイスをいただきました。発表を聞いていただいた計量標準総合センターの様々な方からご意見・ご質問をいただき、改めて振動加速度標準の研究を見直す機会を得られました。また共同研究者やメーカーの皆様とも意見交換の機会があり、振動センサのユーザー、メーカー、校正事業者など様々な立場の動向やご意見を知ることができました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省 気象庁, 「計測震度の算出方法」, https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/kaisetsu/calc_sindo.htm
- 2) 国土交通省, 「インフラメンテナンスを取り巻く状況」, 2016
- 3) 国土交通省, 「社会資本の老朽化の現状と将来」, 2014, https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01.html
- 4) 国土交通省, 「国土交通省所管分野における社会資本の将来の維持管理・更新費の推計」, 2018, https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01_01.html
- 5) D. Goyal, B. S. Pabla, "The Vibration Monitoring Methods and Signal Processing Techniques for Structural Health Monitoring: A Review." *Arch Computat Methods Eng*, Vol. 23, p. 585 (2016)
- 6) 荒川利治, 山本和也「常時微動測定に基づく鉄骨造高層建物の振動特性に関する経年変化および時間変動」, 日本建築学会技術報告集, 第19号, 61-66 (2004)
- 7) 荒川利治, 菊永祐太「実測データに基づく鉄骨造高層建物の構造ヘルスマニタリングと減衰特性評価」, 日本建築学会技術報告集, 第19巻, 第42号, 419-424 (2013)
- 8) 鶴村香苗, 川瀬博「微動測定に基づく地震前後におけるRC造中低層建物の振動特性比較」, 日本建築学会構造計論文集, 第73巻, 第627号, 717-723 (2008)
- 9) S. Sakaue, H. Yao, T. Suzuki, "Applied MEMS Micro-vibration Sensors and Structural Health Monitoring", *Fuji Electric Review*, Vol. 58, No. 1, p. 32 (2012)
- 10) 市川真太郎 et al., 「構造物ヘルスマニタリング向け加速度計 JA-70SA の開発」, 日本航空電子技報, No. 37, 2 (2015)
- 11) 吉田隆司 et al., 「建物の構造ヘルスマニタリングシステムの開発」, NEDO インフラ維持管理シンポジウム (2018)
- 12) 国土技術政策総合研究所, 「多世代利用住宅の維持管理・流通を支える構造ヘルスマニタリング技術の利用ガイドライン (案)」, 2011, <http://www.nilim.go.jp/lab/ieg/tasedai/seika/shmguideline.pdf>
- 13) 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP), 「インフラ技術総覧」, 2019, <https://www.jst.go.jp/sip/k07.html>
- 14) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト『インフラモニタリング技術』」, 2019, <https://www.nedo.go.jp/content/100887966.pdf>
- 15) 津田浩, 李志遠, 王慶華, 「サンプリングモアレ法を用いた橋梁の変形分布計測」, 精密工学会誌, Vol.83, No.12 (2017)
- 16) 一般財団法人リモート・センシング技術センター, 衛星総覧一覧, <https://www.restec.or.jp/satellite/index.html>
- 17) 宇宙航空研究開発機構 (JAXA), 「擾乱管理標準」, JERG-2-152A (2012)
- 18) 神吉博 et al., 「柔軟宇宙構造物の振動制御」, 三菱重工技報, Vol. 32, No. 2 (1995)
- 19) D. Yu, G. Wang, Y. Zhao, "On-Orbit Measurement and Analysis of the Micro-vibration in a Remote-Sensing Satellite", *Advances in Astronautics Science and Technology*, Vol. 1, p. 191 (2018)
- 20) European Cooperation for Space Standardization, "Space engineering – Spacecraft mechanical loads analysis handbook", ECSS-E-HB-32-26A (2013)
- 21) S. Lee et al., "Accelerometer-assisted tracking and pointing for Deep Space Optical Communications: concept, analysis and implementations", *2001 IEEE Aerospace Conference* (2001)
- 22) 外務省, 「包括的核実験禁止条約 (CTBT)」, <https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kaku/ctbt/index.html>
- 23) W. R. Walter, K. M. Mayeda, H. J. Patton, "Phase and Spectral Ratio Discrimination between NTS Earthquakes Explosions. Part I: Empirical Observations", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 85, No. 4, p. 1050 (1995)
- 24) M. Z. Zolkaffly, F. I. A. Rashid, "The Comprehensive

- Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBT): seismic monitoring”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 555, 012010 (2019)
- 25) C. Romney, “Amplitudes of seismic body waves from underground nuclear explosions”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 64, No. 10, p. 1489 (1959)
- 26) W. R. Walter et al., “Body-Wave Methods of Distinguishing between Explosions, Collapses, and Earthquakes: Application to Recent Events in North Korea”, *Seismological Research Letters*, Vol. 89, No. 6, p. 2131 (2018)
- 27) J. Marty, “The International Monitoring System: Overview, Measurement Systems and Calibration”, Workshop of the Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration -Measurement of imperceptible matters, 20 September 2017
- 28) 野田万朶, 「転がり軸受の異常診断」, ターボ機械, 13 巻, 3 号, p. 174 (1985)
- 29) R. B. Randall, J. Antoni, “Rolling element bearing diagnostics - A tutorial”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 25, No. 2, p. 485 (2011)
- 30) Technical Associates of Charlotte, “Illustrated Vibration Diagnostics Chart”
- 31) J. Zarei, M. A. Tajeddini, H. R. Karimi, “Vibration analysis for bearing fault detection and classification using an intelligent filter”, *Mechatronics*, Vol. 24, No. 2, p. 151 (2014)
- 32) 迫孝司, 「軸受における異常兆候の早期検知と診断に関する研究」, Ph.D Thesis (2012)
- 33) Y. Nakamura, “A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface”, *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, Vol. 30, No. 1, p. 25 (1989)
- 34) 長尾毅, 紺野克昭, 「常時微動アレ観測に基づく表層地盤の平均 S 波速度推定精度に関する研究」, 土木学会論文集, Vol. 2002, No. 696, p. 225 (2002)
- 35) J. Peterson, “Observations and modeling of seismic background noise”, *US Geological Survey, Open-File Report*, 93-322 (1993)
- 36) 国土交通省 気象庁, 「長周期地震動について」, <https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/choshuki/index.html>
- 37) B. Townsend, “Symmetric Triaxial Seismometers”, *Encyclopedia of Earthquake Engineering* (2014)
- 38) J. Karki, “Signal Conditioning Piezoelectric Sensors”, *Texas Instruments Application Report*, SLOA033A (2000)
- 39) 特許庁, 「特許出願技術動向調査報告書 加速度センサー (要約版)」(2010)
- 40) T. Deng et al., “Microelectromechanical Systems-Based Electrochemical Seismic Sensors With Insulating Spacers Integrated Electrodes for Planetary Exploration”, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 16, No. 3, p. 650 (2016)
- 41) W. Wu, Z. Li, J. Liu, J. Fan and L. Tu, “A nano-g MEMS accelerometer for earthquake monitoring”, *2017 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS)*, p. 599 (2017)
- 42) D. Yamane et al., “A MEMS Accelerometer for Sub-mG Sensing”, *Sensors and Materials* vol. 31, No. 9 p. 2883 (2019)
- 43) C. Zhao et al., “A Resonant MEMS Accelerometer With 56ng Bias Stability and 98ng/Hz^{1/2} Noise Floor”, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 28, No. 3, p. 324 (2019)
- 44) A. Isobe et al., “Design of Perforated Membrane for Low-Noise Capacitive MEMS Accelerometers”, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 20, No. 3, p. 1184 (2020)
- 45) ISO 16063-1:1998, “Methods for the calibration of vibration and shock transducers — Part 1: Basic concepts”
- 46) ISO 16063-11:1999, “Methods for the calibration of vibration and shock transducers — Part 11: Primary vibration calibration by laser interferometry”
- 47) ISO 16063-16:1999, “Methods for the calibration of vibration and shock transducers — Part 16: Calibration by Earth’s gravitation”
- 48) ISO 16063-21:2003, “Methods for the calibration of vibration and shock transducers — Part 21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer”
- 49) ISO 16063-17:2016, “Methods for the calibration of vibration and shock transducers — Part 17: Primary calibration by centrifuge”
- 50) ISO 5347-8:1993, “Methods for the calibration of vibration and shock pick-ups — Part 8: Primary calibration by dual centrifuge”
- 51) E. Wielandt, “Seismic sensors and their calibration” in *New Manual of Seismological Observatory Practices* (2002)
- 52) Calibration and Measurement Capabilities of PTB, <https://www.ptb.de/cms/en/metrological-services/>

- calibration-and-measurement-capabilities-of-ptb.html
- 53) P. L. M. Heydemann, "Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers", *Applied Optics*, Vol. 20, No. 19, p. 3382 (1981)
 - 54) C. Cai, Z. Liu, Y. Xia, "Primary High Acceleration Calibration System at NIM", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1065, 222007 (2018)
 - 55) T. Bruns, S. Gaziuch, "Correction of shaker flatness deviations in very low frequency primary accelerometer calibration", *Metrologia*, Vol. 53, No. 3, p. 986 (2016)
 - 56) CCAUV, "Strategy 2019 to 2029", <https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccauv/>
 - 57) A. Täubner et al., "The influence of different vibration exciter systems on high frequency primary calibration of single-ended accelerometers", *Metrologia*, Vol. 47, No. 1, p. 58 (2010)
 - 58) T. Bruns, A. Link, A. Täubner, "The influence of different vibration exciter systems on high frequency primary calibration of single-ended accelerometers: II", *Metrologia*, Vol. 49, No. 1, p. 27 (2012)
 - 59) H. Nozato et al., "An investigation into the influence of mass inertia using primary calibration of the back-to-back accelerometer by laser interferometry", *Metrologia*, Vol. 56, No. 6, p. 065006 (2019)
 - 60) G. P. Ripper, G. B. Micheli, R. S. Dias, "A proposal to minimize the dispersion on primary calibration results of single-ended accelerometers at high frequencies", *Acta IMEKO*, Vol. 2, No. 2, p. 48 (2013)
 - 61) X. Shi, A. A. Polycarpou, "Measurement and Modeling of Normal Contact Stiffness and Contact Damping at the Meso Scale", *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 127, No. 1, p. 52 (2005)
 - 62) M. Mende, P. Begoff, "Sensors with Digital Output – A Metrological Challenge", *19th International Congress of Metrology*, 22002 (2019)
 - 63) M. Galetto et al., "Uncertainty evaluation in calibration of low-cost digital MEMS accelerometers for advanced manufacturing applications", *CIPM Annals*, Vol. 68, No. 1, p. 535 (2019)
 - 64) B. Seeger, T. Bruns, S. Eichstädt, "Methods for dynamic calibration and augmentation of digital acceleration MEMS sensors", *19th International Congress of Metrology*, 22003 (2019)
 - 65) B. Seeger, L. Klaus, D. Nordmann, "Dynamic Calibration of Digital Angular Rate Sensors", *Acta IMEKO*, Vol. 9, No. 5, p. 394 (2020)
 - 66) Z. Liu et al., "Development of a tri-axial primary vibration calibration system", *Acta IMEKO*, Vol. 8, No. 1, p. 33 (2019)
 - 67) A. Prato, F. Mazzoleni, A. Schiavi, "Traceability of digital 3-axis MEMS accelerometer: simultaneous determination of main and transverse sensitivities in the frequency domain", *Metrologia*, Vol. 57, No. 3, p. 035013 (2020)
 - 68) A. T. Ringler et al., "Seismometer Self-Noise and Measuring Methods", *Encyclopedia of Earthquake Engineering* (2014)
 - 69) L. G. Holcomb, "A direct method for calculating instrument noise levels in side-by-side seismometer evaluations", *U.S. Geological Survey Open-File Report*, 89-214 (1989)
 - 70) 穀山渉, 野里英明, 服部浩一郎, "高精度な感度計測を応用した低雑音加速度計の自己雑音レベル測定", 2016年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, A44 (2016)
 - 71) R. Sleeman, A. Wettum, J. Trampert, "Three-channel correlation analysis: a new technique to measure instrumental noise of digitizers and seismic sensors", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 1, p. 258 (2006)
 - 72) A. Takamori et al., "Inverted pendulum as low-frequency pre-isolation for advanced gravitational wave detectors", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 582, No. 2, p. 683 (2007)
 - 73) F. Matichard et al., "Seismic isolation of Advanced LIGO: Review of strategy, instrumentation and performance", *Classical and Quantum Gravity*, Vol. 32, No. 18, p. 185003 (2015)
 - 74) J. V. Heijningen, A. Bertolini, J. F. J. Brand, "A novel interferometrically read out inertial sensor for future gravitational wave detectors", *2018 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, pp. 1-5 (2018)
 - 75) J. Hrabina et al., "Frequency Noise Properties of Lasers for Interferometry in Nanometrology", *Sensors*, Vol. 13, No. 2, p. 2206 (2013)
 - 76) S. J. Cooper et al, "A compact, large-range interferometer for precision measurement and inertial sensing," *Classical and Quantum Gravity*, Vol. 35, p. 095007 (2018)

- 77) C. Weichert et al., "A heterodyne interferometer with periodic nonlinearities smaller than ± 10 pm", *Measurement Science and Technology*, Vol. 23, p. 094005 (2012)
- 78) M. Armano et al., "Sub-Femto-g Free Fall for Space-Based Gravitational Wave Observatories: LISA Pathfinder Results", *Physical Review Letters*, Vol. 116, p. 231101 (2016)
- 79) M. Pisani, M. Zucco, "An accelerometer for spaceborne application with interferometric readout", *Measurement*, Vol. 122, p. 507 (2018)
- 80) W. Kokuyama, H. Nozato, T. R. Schibli, "Phase meter based on zero-crossing counting of digitized signals", *arXiv: 2009.01137* (2020)
- 81) C-M. Wu, R. D. Deslattes, "Analytical modeling of the periodic nonlinearity in heterodyne interferometry", *Applied Optics*, Vol. 37, No. 28, p. 6696 (1998)
- 82) J. Watchi et al., "Contributed Review: A review of compact interferometers", *Review of Scientific Instruments*, Vol. 89, No. 12, p. 121501 (2018)
- 83) M. Pisani et al., "Comparison of the performance of the next generation of optical interferometers", *Metrologia*, Vol. 49, No. 4, p. 455 (2012)
- 84) S. Yokoyama et al., "A heterodyne interferometer constructed in an integrated optics and its metrological evaluation of a picometre-order periodic error", *Precision Engineering*, Vol. 54, p. 206 (2018)
- ※上記文献は一般的に公開・入手可能なものを示している