

振動計測の信頼性と国際同等性の確立について

— 振動・加速度・衝撃計測標準の国家標準開発 および関連技術の開発と国際比較の歩み —

白田 孝^{1*}、大田 明博²、野里 英明²、穀山 渉²

計測の一貫性（いつ、どこで、誰が測定したかによらず比較評価が可能）を確保するためには、単位やその基準となる量（国家一次計量標準）が統一されているだけでは不十分である。今日では各国の計量標準機関（日本では産業技術総合研究所等）が参加する、国際相互承認（Mutual Recognition of Arrangement: MRA）の枠組みの下で、計測結果の相互比較等同等性を評価する活動が行われている。この論文では、産総研における振動校正技術の開発と、同等性評価を巡る国際的な動きを通して振動計測の信頼性と同等性確立について振り返る。あわせて今後の課題と展望を論じる。

キーワード: 振動、加速度、衝撃、校正、計量標準、同等性評価、国際比較、国際標準化

Establishing reliability in vibration measurement and its international equivalency

—Development of national metrology standards for vibration, acceleration, shock measurement and progress on international comparisons—

Takashi USUDA^{1*}, Akihiro OOTA², Hideaki NOZATO² and Wataru KOKUYAMA²

The metric system and primary national metrology standards are necessary, but not sufficient for obtaining measurement equivalency. Recently, national metrology institutes of various countries including NMIJ/AIST of Japan are participating in international comparisons to confirm equivalency of their measurement capabilities, under a mutual recognition of arrangement (MRA). In this report, we describe progress on improving vibration measurement at NMIJ/AIST, along with global activities for establishing MRA. We also discuss future issues for improving vibration measurements.

Keywords: Vibration, acceleration, shock, metrology standard, inter comparison, equivalency evaluation, international standardization

1 はじめに

1.1 振動計測の概要と校正の必要性

振動は地震等の自然現象や建造物、航空機、鉄道、自動車等の工業製品を通して人間の生理、生活に深い関わりをもっている。また、機械の振動は性能低下や故障を招き、時として労働災害や人身事故を引き起こす。振動計測は機械技術の黎明期から重要な技術と位置づけられ、人間にとって快適で安全な環境を守りつつ、科学技術の恩恵を享受するために、ますます重要なものとなってきている。

振動量計測における測定者（あるいは測定装置）は、

空間座標において動かない点（不動点）にいない限りならぬ。このような不動点は図1に示すように、ばねとおもりからなるサイズモ系で擬似的に作り出すことができる。振動に際しておもりは慣性によってその場、すなわち不動点にとどまろうとする。そしておもりと筐体との相対変位やおもりに働く慣性力を検出することで振動量を計測することができる。実際の検出機構には導電コイル（変位）、ひずみゲージ（ひずみ）、ロードセル（力）等さまざまな要素が用いられる。このようなサイズモ系による振動測定器を、この項では振動計と総称する。地震計、航空機の慣性航法に用

1 産業技術総合研究所 計量標準総合センター 研究戦略部 〒305-8563 つくば市梅園 1-1-1 中央第3、2 産業技術総合研究所 計量標準総合センター 工学計測標準研究部門 〒305-8563 つくば市梅園 1-1-1 中央第3

1. Research Promotion Division of National Metrology Institute of Japan, AIST Tsukuba Central 3, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8563, Japan
* E-mail: takashi.usuda@aist.go.jp, 2. Research Institute for Engineering Measurement, National Metrology Institute of Japan, AIST Tsukuba Central 3, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8563, Japan

Original manuscript received December 14, 2016, Revisions received February 26, 2017, Accepted February 27, 2017

いられる加速度計、近年ではスマートフォンに内蔵される加速度センサー等も振動計である。

一方図1から予測されるとおり、振動が不動点を中心とした小刻みなものであればおもりは不動点にとどまり続けられるが、その範囲を超えるとばねによる復元力により、もはやおもりが不動点にとどまることは難しくなる。このような特性は、ばねの剛性や、ばね振り子とみなしたときの固有振動、および図1では省略しているが振動を抑制する粘性要素（ダンピング）から決定され、振動計メーカーは、地震、橋梁やビル等構造物の振動、機械振動、衝突現象等、用途別に最適な設計を行っている（図2）。

振動計が設計どおりの特性を有するかは校正によって確認されねばならない。校正は振動計を任意の振動数で加振し、その変位をレーザー干渉計で測定すると同時に振動計からの電気出力を測定することで得られる。校正結果は単位振動入力（変位、速度または加速度）に対する電氣的

な出力として与えられる。このような振動計校正装置を図3に示す^[4]。このとき外来振動等が影響せぬよう、校正装置全体を十分免震するのは言うまでもない。

このようなレーザー干渉計を用いた校正を、長さの定義に直接関係づけられることから1次校正と呼ぶ。1次校正された振動計を基準として、他の振動計を比較校正することを2次校正と呼ぶ。産総研で1次校正された振動計は、振動計メーカーや民間の校正事業者における基準となり、より多くの振動計が2次校正される。そして2次校正された振動計は振動試験や地震計等、さまざまなアプリケーションに用いられる。このように国家標準と振動計測の現場とが、校正によって切れ目なくつながることを計測のトレーサビリティと呼ぶ（図4）。

1.2 計測の国際整合性を巡る動きと我が国の対応

90年代以降、東西体制の終焉と欧州のEUへの統合等、グローバル化が加速する中で各国が国内に課す技術的基

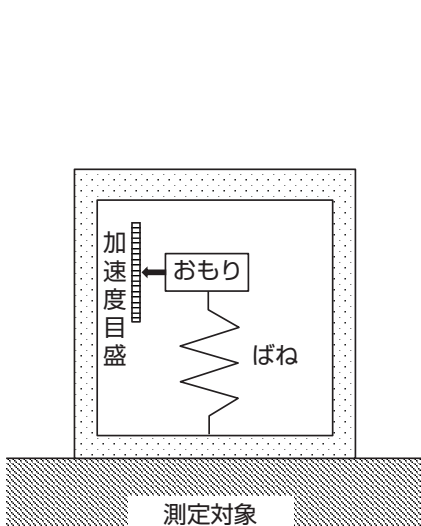


図1 サイズモ系による振動計

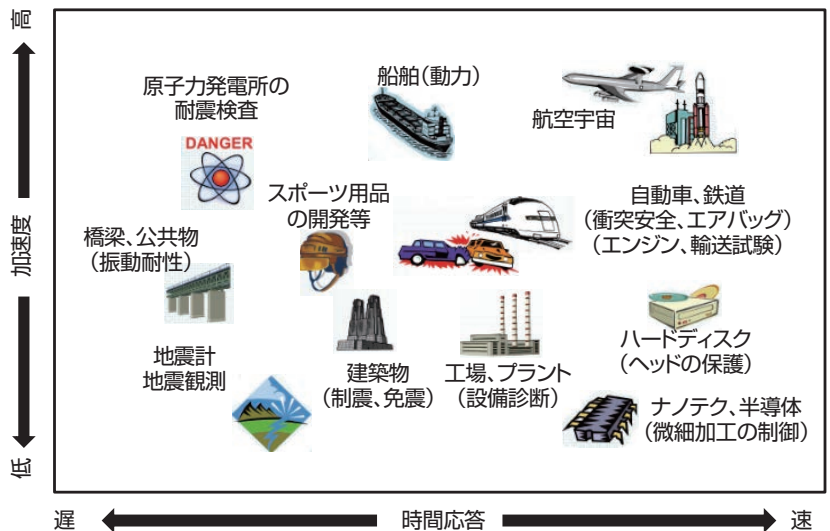


図2 振動計測が求められる分野と振動の特性

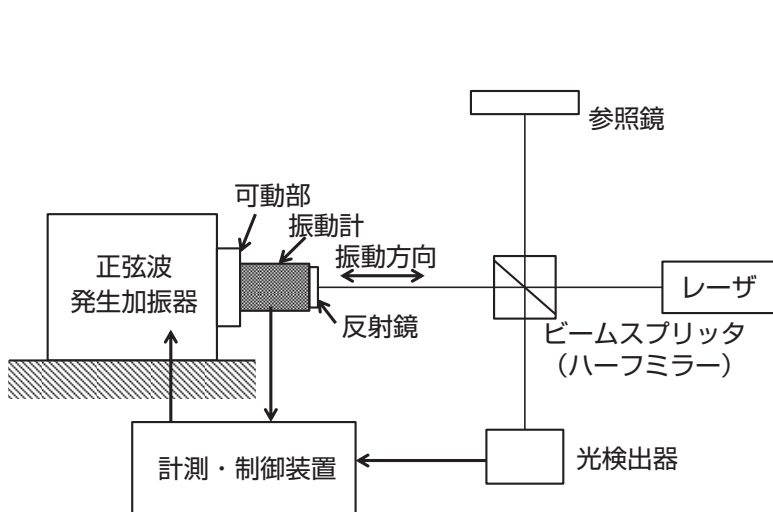


図3 振動計校正装置

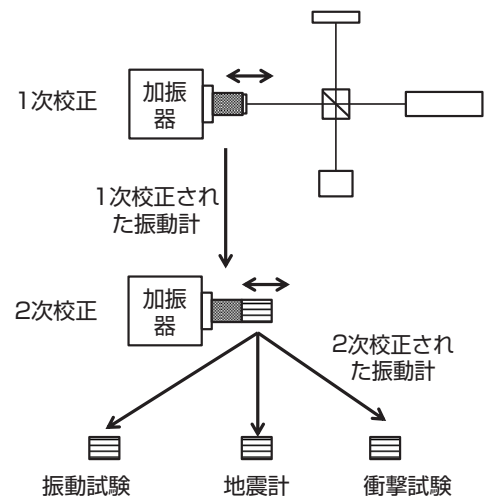


図4 振動計の校正におけるトレーサビリティ

準の国際化も求められるようになっていた。そして1995年にWTO(世界貿易機関)の下でTBT協定(貿易の技術的障害に関する協定)が結ばれたことで、技術的基準はローカルルールによらずに、ISO(国際標準化機構)やIEC(国際電気標準会議)等の国際規格に求め、それを相互に受け入れるべきである、という動きが決定的となった。計量標準においても、それまで各国の国家計量標準機関(National Metrology Institute: NMI)を頂点として、いわゆるトレーサビリティ^[2]を国の枠で確保していた体制から、メートル条約の元で各国計量標準の同等性を評価する仕組みづくりが検討された。そして1999年に相互受け入れ覚書(以下、起草した国際度量衡委員会の略字CIPMをとってCIPM-MRAと称する)^[3]が結ばれ、国際比較による同等性評価とその公表が行われることとなった。

そして同等性評価に必要な国際比較の種類・範囲は、メートル条約加盟国の関係者から構成される、技術諮問委員会(Consultative Committee)によって審議されることとなった。振動に関しては、1998年に音響・超音波・振動諮問委員会(Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration: CCAUV)が創設され^[4]、振動計に関する初の国際比較の議論が始まった。

このような時代背景を迎えていた1990年代中頃まで、我が国の国家計量標準機関(当時は工業技術院計量研究所)における振動計校正は、低振動数(4~90 Hzまで、その後改正により80 Hzまで)の公害用振動計のみを対象に行われており、その他の分野ではユーザやメーカーが独自に校正を行っていた。このため、計量研究所では平成7年度(1995年度)から2年半に渡り、国内振動計測関連企業13社からなる「振動加速度トレーサビリティ検討委員会(以下検討委員会)」を組織し、校正ニーズの調査を行った。その結果、振動試験や自動車の衝突試験等の必要性等から、振動計校正の国家標準として従来の80 Hzまでに加え、振動数領域5 kHzまで、加速度振幅1~100 m/s²を早急に立ち上げるべきであるとの合意に至った。また、参考値として振動加速度計出力の位相遅れ(位相特性)も重要であるとの認識が得られた。

この論文では、上記で述べた1995年当時を起点として、我が国における振動計校正法の開発と、同等性評価を巡る国際的な動きを述べる。構成は以下のとおりである。

第2章では2000年までに行われた5 kHzまでの振動計校正における国家標準の確立と第1回国際比較への対応について述べる。

第3章では10 kHzまでの振動計校正における国家標準の確立と2010年前後に行われた第2回国際比較への対応について述べる。

第4章では0.1 Hzまでの振動計校正における国家標準の確立と2015年前後に行われた第3回国際比較への対応について述べる。

第5章では衝撃校正の国家標準確立と遠心加速度校正との整合性評価について述べる。

第6章でこの論文全体をまとめ、今後の展望を述べる。

2 5 kHzまでの振動計校正における国家標準の確立と第1回国際比較への対応

この章では検討委員会で合意された5 kHzまでの振動計校正の国家標準確立と、同時期に行われた国際比較への対応について述べる。

2.1 研究開発のシナリオ

図3に示した校正装置のレーザ干渉計はマイケルソン型と呼ばれる、変位計測等では最も基本的な形式である。レーザ光源から発出された波長、位相が一定の、いわゆるコヒーレントな光はビームスプリッターで光路が分割され、それぞれ参照鏡と振動計に導かれる。校正の対象となる振動計の端面にはレーザ光を反射する反射鏡が取り付けられており、振動計の変位を、二つの光線の光路差として測定することができる。干渉光強度は光路差0.5波長毎に周期的に変化し、光検出器によって検出される。したがって例えば光源に波長632.8 nmのヘリウムネオンレーザを用いると、干渉光強度は316.4 nm毎に明暗を繰り返すのでサブマイクロメートルレベルの分解能は比較的容易に実現できる。さらに静的な変位の測定では干渉光強度を内挿することでより高い分解能を得られるが、振動という、本質的に精密計測とは相容れない環境下で高い分解能を得ることは容易でない。

一方変位、速度、加速度はそれぞれ微分積分の関係にあるので、振動が正弦状であるとき、それぞれと振動数の関係は図5で与えられる。検討委員会で合意された振動数領域の上限である5 kHzにおいて変位振幅は100 nm程度(加速度振幅100 m/s²において)となり、分解能向上が必須となる。

しかし振動環境下にあつては振動に起因する光軸のブレ等により、干渉光強度自体が変動し、静的な変位振幅のように強度を内挿することで分解能を向上することはできない。また、図3に示した干渉計で得られる情報は振幅のみで、時間軸における振動と振動計からの出力差(位相)を評価することはできない。

技術的目標は振動数領域5 kHzまで、加速度振幅1~100 m/s²における振動計校正を、位相特性評価と共に実現することにある。また国際比較による同等性評価に際し、不確かさ評価がなされ、かつ経常的な校正業務に耐

えうの堅牢性、安定性を有することが必要である。

2.2 要素技術の選択と開発

校正装置は主として、

- ・レーザ干渉計
- ・加振器
- ・コントローラーおよび電気計測系

から構成される。このうち、要求される校正範囲や位相特性評価の必要性から、レーザ干渉計を新規開発することは必須であった。一方、加振器については信頼性・耐久性のある機械要素を短期間で開発することは困難であることから、当時評価が確立していた市販加振器を導入した（板ばねで可動部分を保持した、動電型加振器を使用）。また、インタフェースやパーソナルコンピューター（PC）の能力向上が著しいことから、コントローラーにはPCを用いる一方、電気計測系には汎用の電圧計や周波数カウンタを

用い、将来の性能向上への要求に柔軟に応えられるシステムとした。温度・湿度の制御や、外来振動が十分除去された除震台等、校正環境を整備・評価することは言うまでもない。図6は開発した干渉計の原理である。

干渉計は変形マイケルソン型である。光源（He-Ne レーザ 波長 632.8 nm）からのレーザ光は偏光板により直線偏光される。その後 1/4 波長板を通過し、円偏光となる。次に無偏光ビームスプリッタにより、測定光と参照光とに分離される。参照光は参照鏡で反射され、偏光板により直線偏光となる。測定光は振動計端面に取り付けた反射鏡により反射され、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。各偏光成分は二つの光検出器により検出される。

図7は振動加速度と検出された干渉信号の関係である。円偏光において位相が 90° 異なった偏光方向の干渉信号

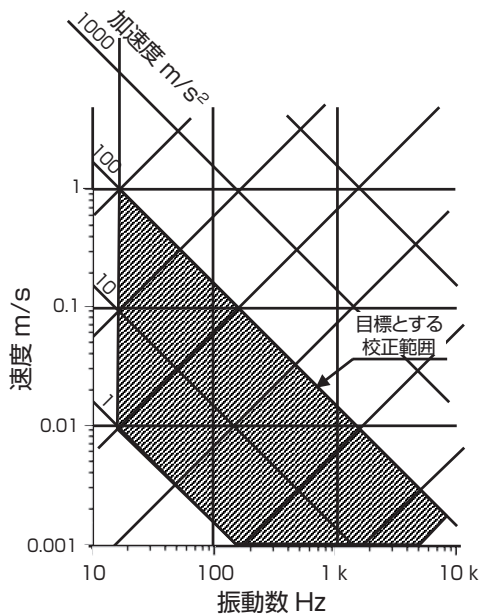


図5 正弦波振動における変位、速度、加速度の関係と校正範囲

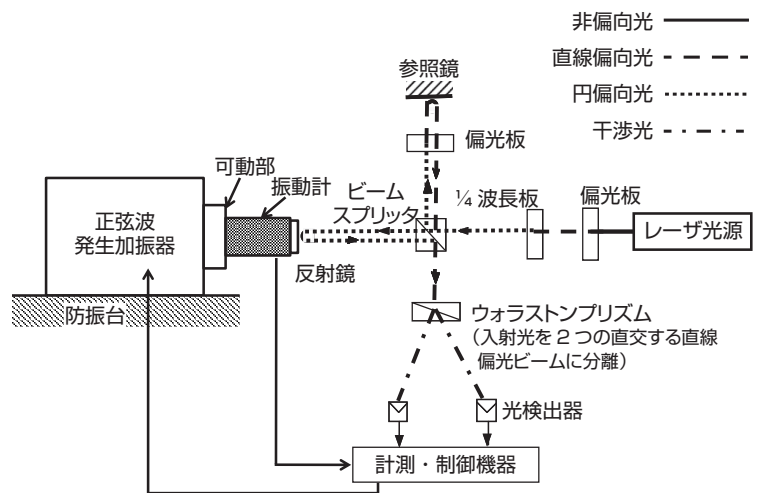


図6 開発したレーザ干渉計

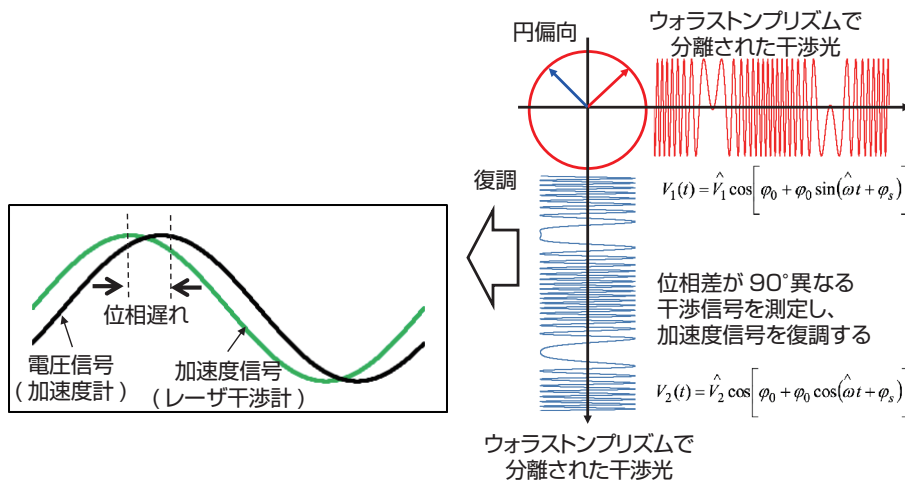


図7 検出された干渉信号

が得られるため、測定対象である振動計が振動した時、二つの光検出器からの信号は図7右のようになる。振動方向が反転するたび、干渉計の出力は反転し、振動方向が弁別できる。二つの出力を適当なアルゴリズムで復調することにより、振動計の変位(およびその微分信号である速度、加速度)波形が得られる。この結果を振動計からの電氣的出力と比較することにより、校正および位相特性の評価が可能となる。この干渉計ではまた、二つの干渉信号の位相から変位を復調するため、光軸のブレ等により、干渉光強度自体が変動しても内挿精度の悪化が抑えられるという利点がある。図8は開発した校正装置の外観である⁶⁾。

2.3 第1回国際比較の実施とその結果

国際比較は仲介器と呼ばれる共通の器物を各国 NMI において測定し、その結果を比較するものである。前項までに紹介した校正装置の開発中、CCAUV において初めての国際比較が計画されていた。検討内容は、測定範囲の決定、仲介器の選定、測定条件の設定、測定結果の処理方法、および参加機関の事前調整等である。CCAUV の議論を経て、国際比較の実務的な処理を担う、幹事所 (Pilot laboratory) がドイツの NMI である物理工学研究所 (PTB) に委ねられ、PTB が中心になってさらに詳細が検討された。著者の一人はこの時 PTB に招聘研究員として滞在しており、測定条件決定の議論にも関与することができた。測定条件で特に懸案となったのは、振動数範囲であった。10 kHz までの測定を希望する参加機関もあったが、仲介器の安定性や高周波特性がまだ十分検証できていないことなどから 5 kHz までの測定結果を比較することが合意された。こうして 2000 年から 2001 年に掛けて、12 参加機関による国際比較が行われた⁶⁾。この国際比較では仲介器として圧電素子を用いた振動計が採用されており、その感度 (単位出力あたりの圧電出力) を校正した。図9はその国際比較の一部参加国の結果を示す。

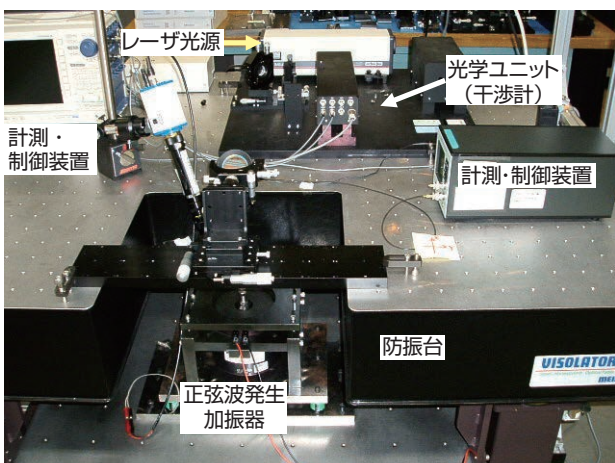


図8 開発した5 kHzまでの振動計校正装置

縦軸は仲介器の校正值、横軸は振動数である。振動数が高くなるに従い、サイズモ系の共振の影響で感度が上がっていることが判る。参加機関の測定結果はその不確かさと共に統計的に処理され、本国際比較における最も確からしいと推定される値・基幹比較参照値 (key comparison reference value) が決定される。各機関の測定結果が、不確かさの範囲でこの参照値と整合していれば、国際同等性を証明できたことになる。産総研の校正結果は良好なものであった。一方、参加機関によっては図9に示すとおり 1% 以上の偏差を示す場合もあった。当時各機関が自己評価していた不確かさは、0.5% 内外であったことから、この結果は一部機関に対して校正装置の見直しを迫るものとなった。また、振動数が高い程各機関の偏差が大きくなる傾向がみられたことから、より高い振動数における国際比較の必要性が認識されることとなった。

3 10 kHzまでの振動計校正における国家標準の確立と第2回国際比較への対応

第1回の国際比較が行われた当時、我が国においては第2期科学技術基本計画 (平成13 (2001) 年3月30日閣議決定) を受けた知的基盤整備計画が策定され、2010年を目途に世界最高水準の知的基盤を整備することが要請された。そのうちの計量標準整備は産総研・計量標準総合センターに委ねられた。そして振動計校正に関しては、すでに産業界では 5 kHz 以上の振動計測が行われていることから、10 kHz までの国家標準の確立が目標とされた。この章では 10 kHz までの振動計校正の国家標準確立と、同時期に行われた国際比較への対応について述べる。

3.1 研究開発のシナリオ

図5に示したとおり、振動計に印加される振動数が増加すると、加速度値を一定に保とうとする場合変位振幅は振動数の2乗に反比例する。したがって、加速度値 100

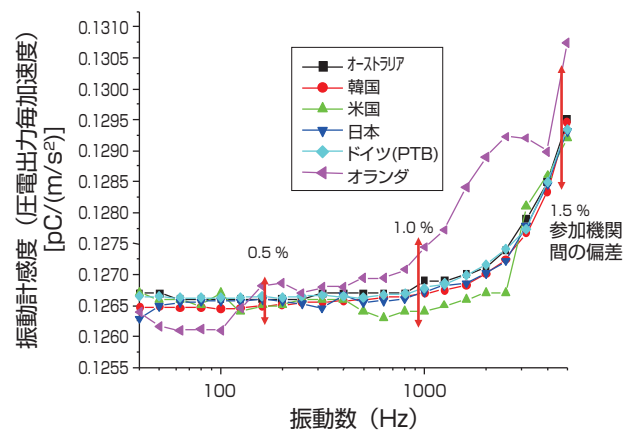


図9 第1回振動計校正国際比較結果の一例

m/s²を保つ場合、5 kHzでは変位振幅が100 nmであるのに対し、10 kHzではその1/4の25 nmに減少する。このような微小変位振幅は第2章で示した装置の校正能力を超えるため、全く新たなレーザー干渉計が必要となった。また、運動を発生する加振器についても、振動ひずみや共振等の影響でもはや従来の板ばねで可動部分を保持する動電型加振器では一様な直進振動を発生することができない^{[7][8]}ため、磁歪素子等の固体アクチュエータも含め、より安定性に優れた新たな加振器が必要となった。電気計測系も、より高速なサンプリングが必要となるなど、見直しがなされた。そして校正能力としては我が国産業界からの要請や、ドイツ等先進工業国で行われている校正実績を踏まえ、拡張校正不確かさで0.3%~1.0%を目標とした。

3.2 要素技術の選択と開発

前項に示した要件から、レーザー干渉計については全く新規に開発した。その技術的な特徴は、反射光学系を導入し、光路差を従来より倍増したことである。具体的には、2重光路型と4重光路型のレーザー干渉計の2種類を試作し、その特性および操作性を検討した^[9]。図10は開発した4重光路型のレーザー干渉計の光学系配置、および光路の詳細を示している。

特徴は図10(a)に示した、4重光路光学系によって、振動計に導かれた測定光が4回折り返され、分解能を向上することにある。光学素子を組み合わせ、光の偏光方向を制御、選択することで実現しており、その詳細を図10(b)に示す。①から入射した光は、偏光ビームスプリッタの反射・透過面②において参照光と測定光に分離され、測定光は振動計の測定面③において反射する。反射した光はコーナーミラーの反射面④、⑤を経て再び振動計の測定面⑥において反射する。以後番号順に光が反射し、最後に参照光と合成され、干渉が生じる。

干渉光出力自体は図7に示した直角位相光として検出されるため、適当な復調によって振動波形を再現することができる。本干渉計の大きな利点は、測定対象においてコーナーキューブミラー等の、特殊な反射鏡を必要とせず、平面反射鏡で光路差倍増が行えるという点にある。10 kHzという振動領域では、あらゆる部材が弾性変形を生じるため、振動部分ではできる限り単純な構造とすることが望ましく、このような構造を単純化できる特徴は校正における不確かさ低減に大きく寄与する。本干渉計の評価を行ったところ、予定した25 nmを上回る、16 nmまでの振幅変位を検出できることを確認した。

これと同様に、2重光路型レーザー干渉計も試作・評価し、当初の目標どおり25 nmまでの振幅変位を検出できることを確認した。これらの結果を踏まえ、実際の校正事業へ転用したときの校正担当者の技術レベルや校正作業時間等の効率を勘案して、干渉光信号のSN比や光軸アライメントに関する操作性といった技術的課題を検討した結果、2重光路型レーザー干渉計を採用することとした。

次に加振器であるが、候補として第2章で開発した5 kHzを上限とする校正装置と同様な板ばねで可動部分を保持した動電型加振器、固体アクチュエータ、および空気軸受けで可動部分を保持した導電型加振器を検討した。振動振幅が数十nmレベルになる本校正条件においては、板ばねで保持するタイプではもはや意図する振動方向以外の、寄生振動が相対的に無視できない大きさとなり、適用を除外した。 piezoや磁歪素子は有力な候補であったが、振動波形にひずみが大きく校正には不向きであることが判った。最終的に空気軸受けで可動部分を保持した動電型加振器を採用した。このようにして開発した10 kHzを上限とする校正装置を図11に示す^[10]。

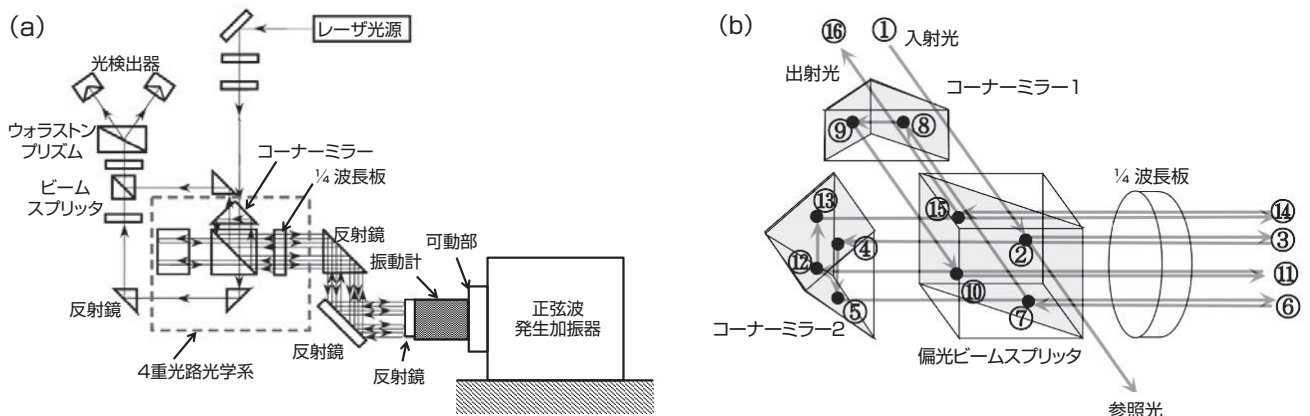


図10 開発したレーザー干渉計の構成と光路配置
(a) 光学系配置図、(b) 測定光の光路

3.3 第2回国際比較の実施とその結果

第2章第3節で紹介した第1回の振動計校正国際比較後、CCAUVでは第2回となる国際比較を実施することを決定した。その際高振動数での同等性を評価する必要性から、校正範囲は10 kHzまでとし、モーダル解析や自動制御等で必須情報となる、振動計の位相遅れも評価比較することが決議された。そして2009年～2012年に掛けて、参加15機関による国際比較が行われた^[11]。幹事所は第1回同様、ドイツ物理工学研究所 (PTB) であった。

図12は10 kHzにおける校正結果の一例である。図において、基幹比較参照値を原点として、参加機関の偏差を縦軸に表している。エラーバーは各機関の宣言不確かさである。偏差の多少が直ちに参加機関の優劣を示すわけではないが、参加機関間の偏差が数%にまで及んだ第1回の国際比較結果に比べ、(ロシアを除く) いずれの機関も偏差は1%程度であり、また相互に不確かさの範囲で整合しており、高振動数域における各国校正結果の同等性

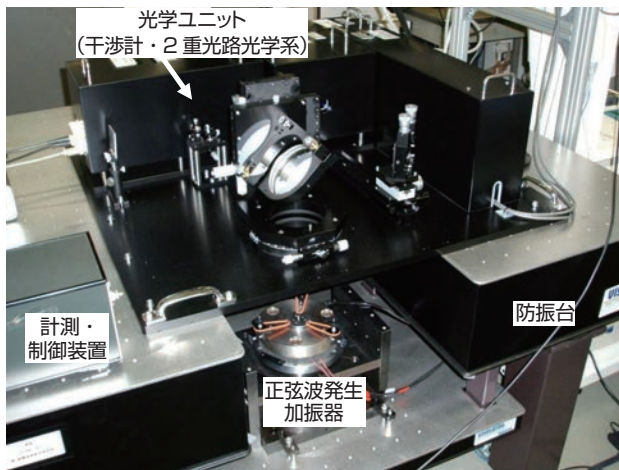


図11 開発した10 kHzまでの振動計校正装置

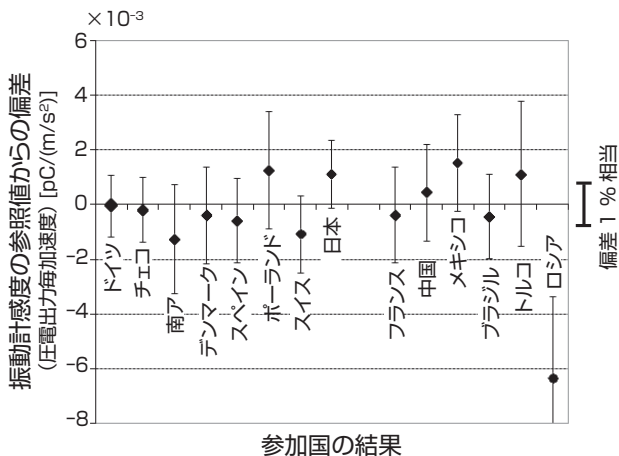


図12 第2回振動計校正国際比較結果の一例

がより満たされたことが伺える。一方で、参加各機関で計測された過程で、仲介器の特性が変化したことが認められた(図12はそのような変化を回帰分析で補正した結果である)。仲介器の特性変化は国際比較の信頼性を大きく毀損する問題である。現在 CCAUV では新たな国際比較を2017年以降に開始すべく、適切な仲介器の選定と、移送中の仲介器取扱方法等を含め、検討が進められている。

4 0.1 Hzまでの振動計校正における国家標準の確立と第3回国際比較への対応

第2章、第3章では主として高振動数域への校正能力の拡張について述べたが、図2で示したとおり、振動計は地震観測(地震計)や橋梁等の振動モニタリングにも利用されている。そしてこれらの振動数は数十 Hz から、時には0.1 Hz 程度の低振動数に及ぶ。近年、建物等の耐震性が強化される一方で、高層ビル等では柔構造の導入により、むしろ低振動数(長周期)の地震波が大きな揺れにつながる、などの問題が報告されており、低振動数域での振動計校正も同様に重要である。この章ではこのような低振動数に対応可能な国家標準の確立と第3回国際比較への対応および結果について述べる。

4.1 研究開発のシナリオ

低振動数域における振動計測の信頼性に対する懸念は地震国である我が国において特に強く認識されており、旧計量研究所時代から地震計等の評価に資する校正装置の導入が進められてきた。図13がその外観である。空気軸受けにより保持された可動部分は、動電型リニアモーターにより、360 mm のストロークに渡って振動する^[12]。なお、図5に示したとおり、振動数が低下すると同じ変位振幅を保持しても発生する加速度は小さくなり、本装置で発生可能な加速度振幅は $0.03 \text{ m/s}^2 \sim 20 \text{ m/s}^2$ の範囲である。このように微小な加速度で大振幅の変位を発生させる場合、



図13 開発した下限振動数が0.1 Hzの振動計校正装置

運動の非一様性による加速度波形のひずみが相対的に大きくなり、校正結果の不確かさを増大させる。そのため、摩擦の極めて小さい空気軸受けを採用することによって、波形ひずみを1%以下へ低減した正弦波形の発生を達成している。一方レーザ干渉計については基本的には第2章で示した変形マイケルソン型の干渉計を用いて振動計の感度および位相評価を可能にしている。

4.2 要素技術の選択と開発

低振動数域の振動計校正では一般に振動のストロークの制約から小さい加速度しか発生できない。このとき、発生した加速度に対する振動計出力信号は小さくS/N比が悪化し、不確かさが増大する。そこで取得した信号を計算機上でフィルタリング処理することによって、S/N比を高め不確かさを低減する、デジタルフィルターを採用した^[13]。

デジタルフィルター自体は目新しい方法ではないが、0.1 Hz (周期 10 秒) においてフィルタリングに必要な数十波形を取得しようとする、1 回に数ギガバイト以上のデータを取り込み、復調処理を行う必要があり計算負荷が大きかった。しかしここ数年の計算機の能力向上により現実的な時間で処理が可能となった。

一連の開発と最適化により、0.1 Hz における不確かさを 0.15 %、位相シフトとして 0.05° という性能を達成することができた。

4.3 第3回国際比較の実施とその結果

一方、CCAUV においてはここまでもっぱら高振動数域での国際比較を行っていた。これは、工業的な振動計測ではもっぱら高振動数域が関心事であったこと、低周波の振動計は地震計や航空機の慣性航法用等、特殊用途が多かったことによる。また、このような振動計は大陸間弾道ミサイル等軍事転用が可能であり、国際比較の俎上に載せるには時期尚早であったことによる。

そのような中、日本をはじめ各国で大きな地震災害があったことなどから低振動数域での振動計校正への関心が高まった。また 1998 年の CCAUV 設立と、その後の 2 回の国際比較を経て国際社会における振動計測への関心と国際比較の重要性への理解も深まっていた。このことから低振動数用の振動計を仲介器とし、下限振動数を 0.1 Hz とする第 3 回の国際比較が 2013 年から 2015 年に掛けて行われ、14 機関が参加した（なお大量破壊兵器等の保有が危惧される国に対しては、このような軍事転用可能な測定技術に関する国際比較参加は制限されている）。

図 14 は本国際比較結果の一例で、0.1 Hz における各機関の同等性を示している^[14]。図 12 同様、基幹比較参照値を原点として、参加機関の偏差を縦軸に表している。エラーバーは各機関の宣言不確かさである。

参加した 14 機関のうち、最も難易度の高い 0.1 Hz まで測定可能であったのは中国、ドイツ、デンマーク、南ア、メキシコ、オーストラリア、シンガポールおよび日本の 8 機関だけであり、その他の 6 機関はデータの提出を断念し棄権した。産総研の提出した結果は 8 機関の中で最も小さい不確かさであるとともに、基幹比較参照値とも整合した。ただし、本結果の意味するところは仲介器そのもののもつ特性も含めて今後 CCAUV で議論されるところである。

5 衝撃校正の国家標準確立と遠心加速度校正との整合性評価

ここまで述べた技術開発と国際比較への参加を通じて、産総研計量標準総合センターでは一定の国際同等性が担保された、0.1 Hz から 10 kHz までの振動計校正が可能となっている。

一方、自動車の衝突安全性能評価等では、数百 m/s² ~ 数千 m/s² 加速度領域に及ぶ計測が行われており、この領域ではもはや加振器による正弦波動的な振動での振動計評価は不可能である。この章ではこのような要請に対して開発した、衝撃校正の国家標準について述べる。また、産業界で多用されている遠心校正との整合性評価と ISO への取り組みについて述べる。

5.1 研究開発のシナリオ

制御工学や機械力学において、衝撃的な入力を数学的に表す関数として、ディラックのデルタ関数 $\delta(x)$ が知られている。デルタ関数は、ある 1 点で無限大の値をとりそれ以外の点では 0、また $[-\infty, \infty]$ の範囲で積分すると 1 となる関数 (図 15) である。

デルタ関数を周波数領域に変換すると、すべての周波数成分で一定の値をもつことが示される。つまりデルタ関数はあらゆる周波数成分を均等に含んだ信号であり、制御対象や機械要素の振動数特性を評価する上で理想的な入力

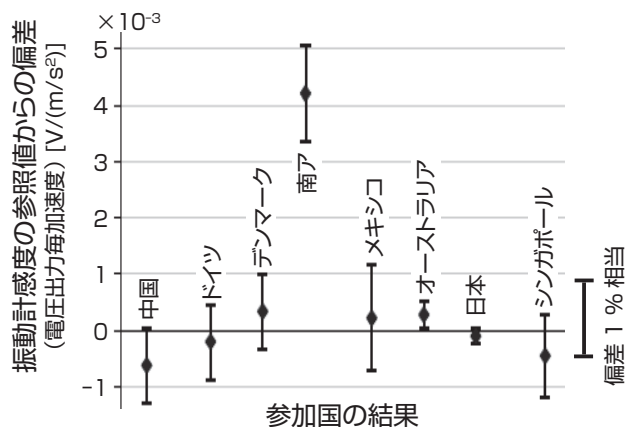


図 14 第 3 回振動校正国際比較結果の一例

となる。このような関数を運動（衝撃的な加速度）として発生できれば、振動計の振動数特性を全域に渡って評価することが可能である。しかし現実にはこのような運動を発生するのは不可能である。一方、評価対象である振動計においても、ニーズに応じて振動数特性や感度を最適化している。むやみに広帯域の衝撃的な入力を与えると、評価における S/N 比悪化を招いたり、時には振動計自体の破壊を招いたりする。したがって、所望する持続時間と、波高値を有する機械的な衝撃加速度を発生する技術が必要となる。

高レベルな加速度の発生技術としては、B. Hopkinson によって提案された弾性波の反射による方法があり^[15]、過去その原理を応用した振動計の校正も報告されている^[16]。しかし弾性波は弾性率という物性に律速されるため、発生加速度の振幅および持続時間の自由度が低い、発生加速度の波高値がニーズに比べて高すぎる、といった問題があった。

そこでそれに代わる衝撃加速度の発生技術として、剛体の衝突による運動量置換を用いた。図 16 は弾性波と剛体衝突それぞれの衝撃的な加速度発生原理を模式的に示している。剛体衝突では運動エネルギーが与えられたハンマーが、評価対象である振動計が取り付けられたアンビルに衝突する。ハンマーの運動量がアンビルに置換され、半波正弦波状の加速度が生じる。加速度の波高値や持続時間は、ハンマーに与えられる運動量や、ハンマーとアンビルとの間にゴム等の緩衝材を入れることである程度制御可能である。

5.2 要素技術の選択と開発

剛体の衝突による衝撃的な加速度を安定的に発生させるために、アンビルやハンマーは動作方向に対しては摩擦

なく移動し、また動作方向以外には運動の自由度が拘束されていることが望ましい。そこで、金属棒状のアンビルとハンマーを、エアベアリングで保持する構造とした。アンビルとハンマーはエアベアリングにより金属棒長手方向には自由に運動し、半径方向にはエアベアリングの空気膜による剛性で拘束される。この結果長手方向以外の振動が抑制され、S/N 比の向上に寄与している。アンビルとハンマーの間にはウレタンゴムで作製された緩衝材が取り付けられており、圧縮空気で加速されたハンマーは緩衝材の弾性力を通じてアンビルおよび振動計に半波正弦波状の加速度を印加する。

干渉計については、当初前章までで用いた干渉光強度が光路差 0.5 波長毎に周期的に変化する、ホモダイン型と分類されるレーザ干渉計を用いたが、その後反射ミラーが不要で測定対象からの散乱光でも干渉信号が得られる、ヘテロダイン型レーザ干渉計を採用した。ヘテロダイン型干渉計は、速度に応じてドップラーシフトする測定対象からの散乱光を、ヘテロダイン検波して速度信号を検出する装置である。ヘテロダイン検波における差周波数は、数十 MHz に及び、従来はアナログ検波が主流であった。このため振動波形の復調に位相遅れや振動数に応じたゲインの低下が避けられず、校正には不向きであった。しかし近年の波形メモリ (A/D 変換とデータロガー) の性能向上および大容量化により、全信号をデジタル化することが可能となった。本システムではこのように全デジタル化した信号を元に振動波形を復調している。図 17 は開発した校正装置である^[17]。

図 18 は開発した装置で得られる加速度波形とその加速度入力により得られた振動計からの出力波形である。加速度の波高値 (A_p) は 3000 m/s^2 に達している。加速度の

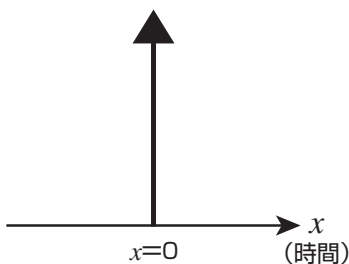


図15 $x=0$ で無限の値を有した場合のデルタ関数

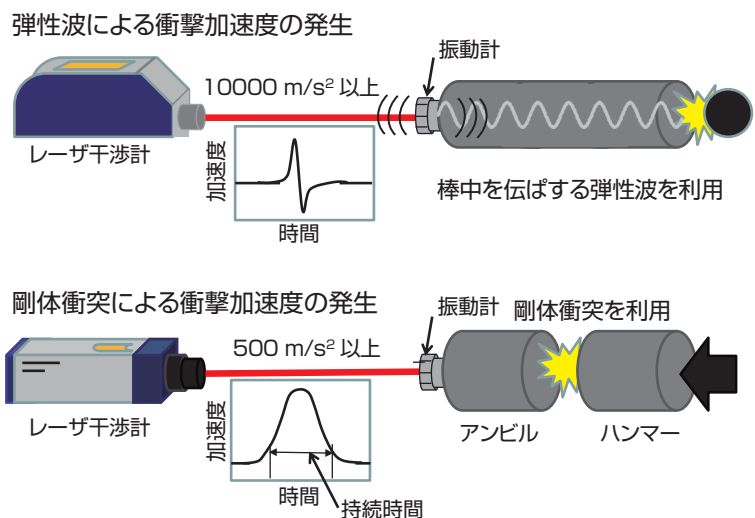


図16 衝撃加速度の発生と振動計の校正

波高値と振動計出力の波高値 (V_p) の比から振動計の特性を校正できる。

衝撃加速度の国際比較は、CCAUV の元で検討が進み CCAUV.V-K4 として、中国と日本が共同幹事所となって間もなく開始される予定である。

5.3 遠心校正との整合性評価とISO規格の発行

前項までの開発により、振動計の振幅線形性評価の国家標準も確立した。ところで加速度は遠心力によっても発

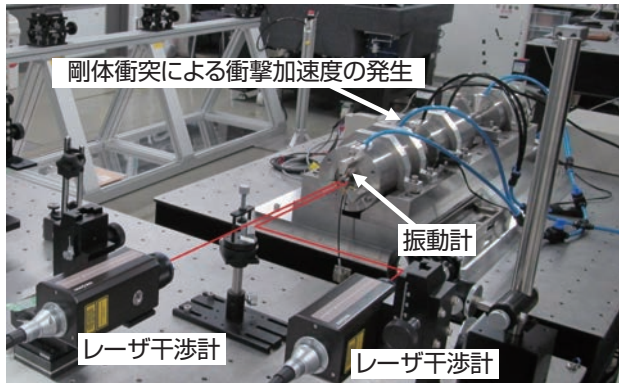


図17 開発した衝撃校正装置

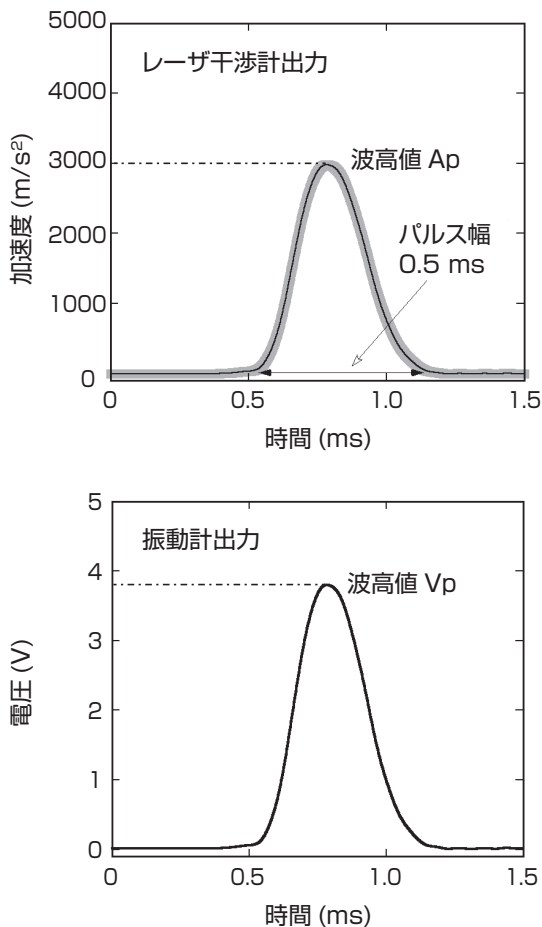


図18 衝撃校正装置で得られた加速度波形と振動計からの出力

生させることができる。我が国では関係企業の努力により、安価で高性能なひずみゲージが普及し、ひずみゲージをサイズモ系の検出機構に用いた振動計が普及している。ひずみゲージは DC 成分に対しても感度を持ち、遠心力のような一定の加速度を基準として校正が行われてきた。これに対して欧米では検出機構に DC 成分に対する感度が低い、 piezo 起電素子を用いた振動計が普及し、衝撃加速度による校正が一般的であった。双方の校正装置と発生する加速度の概要を図 19 に示す。

遠心校正は回転速度と、振動計の回転中心からの距離から、印加加速度を算出し、印加加速度と振動計出力との比から校正を行う。これに対し衝撃校正では振り下ろし式のハンマー等で校正対象の振動計に衝撃的な加速度を加え、同軸上に取り付けられた参照振動計との出力比から校正を行う。どちらも簡便な方法であるが、直ちに双方の校正結果が同等であるとは言い難い。それでも従来は多国間の自動車衝撃安全性評価等で問題が表面化することはなかった。ところが安全性評価への関心の高まりと共に、評価に用いられる各計測器の同等性やトレーサビリティが改めて問われるところとなった。そして遠心校正法の妥当性評価と、ISO 化が日本に委ねられることとなった。ここにおいて衝撃校正を主とする他国の賛同を得るために、遠心校正の妥当性を検証した実験結果を提示することは必須であった。

そこで産総研、国内大手自動車会社等が連携し、ひずみゲージ式振動計の遠心校正に関する国際標準規格^[18]の発行に取り組み、同時に遠心校正の技術的妥当性について評価した。評価には株式会社共和電業、トヨタテクニカルディベロップメント株式会社、一般財団法人日本自動車研究所、株式会社日産クリエイティブサービスが協力し、各社が保有する遠心校正装置と、産総研での衝撃加速度校正装置により同一の振動計を校正しその結果を比較し

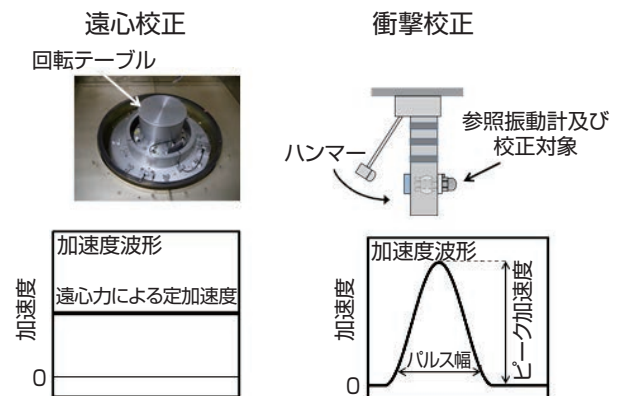


図19 産業界で用いられている大振幅加速度における校正法

た。その結果、4 機関における遠心校正の結果は、産総研の校正結果と不確かさの範囲で一致し、かついずれの結果も路上走行車衝突試験規格^[19]で要求される衝撃計測の確度(1.8%)内にすべて含まれた。これにより、産総研が所有する衝撃校正装置と各機関が所有する遠心校正装置との同等性が確認され、遠心校正による技術的な有用性を示すことができた。そしてこれらの結果を踏まえ、遠心校正の国際規格を ISO として発行した^[20]。自動車衝突試験の安全性評価の際に、ISO 準拠した校正法により評価されたひずみゲージ式振動計を用いることで、国内自動車メーカーの海外輸出に対する障壁を軽減できる。また、長年自動車業界が蓄積してきた時間変化を伴わない遠心校正のバックデータに対して、実際の衝突試験と同じく時間変化を伴う衝撃校正と整合する技術的エビデンスを与えることができた。

6 まとめと展望

この論文では 1990 年代中頃から今日まで、20 年に渡る我が国振動計校正の国家標準確立について述べた。また、並行して行われた国際同等性確立を巡る動きを、国際比較や ISO 化を通して述べた。図 20 はこの論文で報告したそれぞれの項目をシナリオにまとめたものである。

WTO の議論を受けて計量標準の国際同等性が懸案となった時、国際的には CCAUV が設立され、同等性評価の議論が始まった。幸運にも国内においては、ニーズの調査とその結果を受けた国家標準開発の体制が整いつつあった。レーザ光源、光学素子、静圧軸受けなどの機械要素について、我が国には優れたメーカーが存在し、望みうる最高の要素技術を標準開発に投入することができた。そして同等性評価における国際比較の折々で、著者らのスタッフが国際比較の幹事所に滞在するなど、国際的な視点で経緯を追うことができたことも幸運であった。また、開

発した国家標準をツールとして、それまで事業者レベルで独自に行われていた校正結果の同等性を評価し、ISO として発行するなど、我が国工業製品・試験結果の国際化に寄与できたと考えている。

一方、測定範囲に対するニーズは振動数・振幅双方でさらに拡がりつつある。また、半導体型微細加工をベースとした MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術の進歩により、振動センサーや角速度センサー(ジャイロ)が安価に製造され、スマートフォンに内蔵されるまで普及している。また、多方向の振動を検出できる多軸センサーや、ジャイロと一体になったハイブリッドセンサーも普及している。これらのセンサーは一般に慣性センサーと呼ばれるが、その校正方法開発も重要な課題である。この論文では詳述する余地はなかったが、著者らのグループではジャイロの校正装置開発に着手している(図 21)^[21]。一方で、際限なく校正装置を開発し続けることも現実的とは言えない。遠心校正の同等性評価と国際標準化で論じたとおり、既存の技術の同等性を明らかにし、標準化によって計測の信頼性を確保することも必要であろう。

海外に目を転じると、アジアの経済成長を背景に新興計量標準機関の発展がめざましい。このような中でこれら新興 NMI は自らの校正結果の妥当性を国際比較に求めがちである。国際比較は同等性評価の最も直接的なエビデンスとなりうるが、その前提として参加各機関が独立に校正結果の自己評価を行うことが重要である。自己評価を怠り系統的な偏差を見落とすなどすると、各機関の結果から統計的に算出する参照値を悪化させることになりかねない。また、同じ市販品を多くの機関が導入すると、装置そのものの傾向がバイアスとなって影響する可能性がある。このようになるともはや同等性の評価ではなく、同じ装置による再現性評価になりかねない。我々は先進 NMI の一員として、要素技術から独自に標準開発に取り組む姿勢を失って

研究目標→	0.1 Hz までの校正	5 kHz までの校正	10 kHz までの校正	衝撃加速度校正
開発の背景・ニーズ	・地震計信頼性評価 ・防振・免震	・振動試験などに必要な基本的国家標準	・世界トップクラスの振動試験 ・安全性評価	・安全性評価 ・周波数領域と時間領域における同等性
要素技術	・静圧軸受 ・ロングワードメモリ ・信号処理	・ホモダイン干渉計 ・信号処理	・ホモダイン干渉計と光路差増倍技術 ・信号処理	・剛体衝突による加速度発生 ・ヘテロダイン干渉計 ・デジタル復調
普及策と波及効果	・標準供給 ・国際比較への寄与	・標準供給 ・国際比較への寄与	・標準供給 ・国際比較への寄与	・標準供給 ・国際比較への寄与 ・国際規格の提案と制定

図20 この論文の主要項目と研究開発のシナリオ

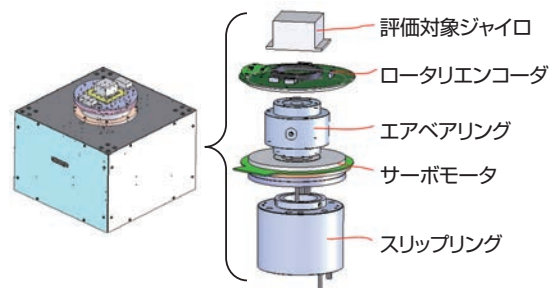


図21 ジャイロの校正装置

はならないだろう。今後も国内の関係機関と協力し、振動を始めとする慣性計測の信頼性を確立し、同時に国際的な場でのリーダーシップを確保していきたい。

この論文では振動計測に関する取り組みを論じたが、今後も計測のニーズは深化し、精度への希求は止むことがない。同時にグローバル化の進行により測定結果の同等性もますます求められる。このような技術的、地域的な拡がりの中で計測の普遍性・不変性を維持していくためには、NMI間の自由で科学的な批判精神に基づく相互理解も欠かせない。計量標準の分野においては国際比較の結果という、科学的エビデンスに基づいた相互批判（レビュー）精神が文化として確立している。同時に、国際比較という多国間プロジェクトを共同して運営するという互助精神・相互信頼も確立している。科学技術開発の競争が激化する一方、透明性や信頼性が問われる中においてNMIが構築してきたこのような文化、メカニズムが、人類の共通財産であるべき科学技術の進展に寄与するヒントもあることを指摘し、この論文の結びとしたい。

参考文献

- [1] 白田孝: JCSS に基づく振動計測のトレーサビリティ, *騒音制御*, 30 (5), 384–385 (2006).
- [2] 白田孝: 計測のトレーサビリティ, *光技術コンタクト*, 51 (11), 4–9 (2013).
- [3] 白田孝: 計量標準における国際相互承認の現状, *AIST Today*, 4 (2), 22–25 (2004).
- [4] T. Usuda: The footsteps from the first to 10th CCAUV meetings and the future activities, http://www.bipm.org/cc/CCAUV/Allowed/10/Topic_USUDA-CCAUV-15-40.pdf (2015).
- [5] T. Usuda, M. Dobosz and T. Kurosawa: The methods for the calibration of vibration pick-ups by laser interferometry. Part III: Phase lag evaluation, *Measurement Science and Technology*, 9, 1672–1677 (1998).
- [6] H.-J. von Martens, C. Elster, A. Link, A. Täubner and W. Wabinski: CCAUV.V-K1 final report, *Metrologia*, 40, Tech. Suppl., 09001 (2003).
- [7] Q. Sun, W. Wabinski and T. Burns: Investigation of primary vibration calibration at high frequencies using the homodyne quadrature sine-approximation method: problems and solutions, *Meas. Sci. Technol.*, 17 (8), 2197–2205 (2006).
- [8] G. P. Ripper, G. A. Garcia and R.S. Dias: Primary accelerometer calibration problems due to vibration exciters, *Proc. of XVIII IMEKO World Congress*, (2006).
- [9] 大田明博, 白田孝, 青山尚之, 佐藤宗純: 多重光路型レーザー干渉計による高周波数用振動加速度校正装置の開発, *電気学会論文誌E*, 126 (11), 612–620 (2006).
- [10] A. Oota, T. Usuda, H. Nozato, T. Ishigami, H. Aoyama and K. Kudo: Development of primary calibration system for high frequency range up to 10 kHz, *Proc. Of IMEKO 20th TC3, 3rd TC16 and 1st TC22 International Conference*, (2007).
- [11] Th. Bruns, G. P. Ripper and A. Täubner: Final report on CIPM key comparison CCAUV.V-K2, *Metrologia*, 51, Tech. Suppl., 09002 (2014).
- [12] T. Usuda, A. Ohta, T. Ishigami, O. Fuchiwaki, D. Misaki, H. Aoyama and S. Sato: The current progress of measurement standards for vibration in NMI/AIST, *Proc. SPIE. Sixth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications*, 30–38 (2004).
- [13] W. Kokuyama, T. Ishigami, H. Nozato and A. Ota: Improvement of very low-frequency primary vibration calibration system at NMI/AIST, *Proc. of XXI IMEKO World Congress “Measurement in Research and Industry”*, (2015).
- [14] S. Qiao, Y. Lifeng, C. Bartoli, I. Veldman, G. P. Ripper, Th. Bruns, T. R. Licht, J. Kolasa, C. Hof and G. S. Pineda: Final report of CCAUV.V-K3: key comparison in the field of acceleration on the complex charge sensitivity, *Metrologia*, 54, Tech. Suppl., 09001 (2017).
- [15] B. Hopkinson: *Collected Scientific Papers*, Cambridge University Press, (1921).
- [16] K. Ueda, A. Umeda and H. Imai: Uncertainty evaluation of a primary shock calibration method for accelerometers, *Metrologia*, 37 (3), 187–198 (2000).
- [17] 野里英明, 白田孝, 大田明博, 石神民雄, 岡本誠治, 山本健, 畝嶋浩, 川口和晃, 澤田輝男, 菅野出: 衝撃加速度を用いた加速度計校正のラウンドロビンテスト—国家標準にトレーサブルな衝撃加速度校正システムの開発—, *精密工学会誌*, 77 (8), 800–806 (2011).
- [18] ISO 16063-17: Methods for the calibration of vibration and shock transducers—Part 17: Primary calibration by centrifuge, (2016).
- [19] ISO 6487: Road vehicles—Measurement techniques in impact tests—Instrumentation, (2015).
- [20] 産総研: 自動車業界との連携による国際標準規格 ISO 16063-17の発行, http://www.aist.go.jp/aist_j/new_research/2016/nr20160906/nr20160906.html (2016).
- [21] W. Kokuyama, T. Watanabe, H. Nozato and A. Ota: Angular velocity calibration system with a self-calibratable rotary encoder, *Measurement*, 82, 246–253 (2016).

執筆者略歴

白田 孝 (うすだ たかし)

1987年東京工業大学総合理工学研究科精密機械システム専攻修了。90年通商産業省工業技術院計量研究所（現産総研）入所。2015年より計量標準総合センター研究戦略部長（現職）。ドイツ物理工学研究所（PTB）招聘研究員（1998年～99年）、フランス国立科学研究センター（CNRS）招聘研究員（2000年～01年）、国際度量衡局（BIPM）招聘研究員（2010年～11年）、12年より国際度量衡委員（CIPM）、14年よりCCAUV議長。博士（工学）。この論文では5 kHzまでの校正装置開発と、全般に渡る構成を担当した。



大田 明博 (おおた あきひろ)

1992年筑波大学大学院工学研究科博士課程構造工学専攻中退。92年通商産業省工業技術院計量研究所（現産総研）入所。2007年電気通信大学大学院電気通信学研究科博士後期課程知能機械工学専攻修了。博士（工学）。現在計量標準総合センター工学計測標準研究部門総括研究主幹。この論文では10 kHzまでの校正装置開発とヘテロダイン干渉計のデジタル化を主として担当した。



野里 英明 (のざと ひであき)

1999年東京工業大学工学部卒。2004年東京大学新領域創成科学研究科博士課程修了。2004年大阪大学工学研究科特任研究員。2005年産総研入所。現在計量標準総合センター工学計測標準研究部門主任研究員。ドイツ物理工学研究所 (PTB) 客員研究員 (2011年～2012年)。博士 (科学)。この論文では衝撃校正装置の開発および遠心校正装置との整合性評価を主として担当した。



穀山 渉 (こくやま わたる)

2012年東京大学理学系研究科物理学専攻博士課程修了。博士 (理学)。同年産総研入所。現在、計量標準総合センター工学計測標準研究部門研究員。この論文では 0.1 Hz までの振動校正装置におけるレーザー干渉計の改善や不確かさ低減を主として担当した。また、慣性センサーとしてのジャイロ評価技術の開発等に從事している。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント (田中 充: 産業技術総合研究所)

我が国産業現場の振動加速度計測の信頼性を国内外に客観的に明示するために必要な国家計量標準の技術開発と国際的整合性確保の過程を俯瞰的に記述し、成果として実用センサー性能の基準認証体制確立まで言及している。各要素技術記述は良く要点を捉え、また同計測の産業インパクトについても分かり易く述べている。読者は、これら研究成果とその普及実績を理解することにより、著者らが開発中のジャイロ計測への取り組みのシナリオを容易に把握し期待するに至るだろう。

コメント (村山 宣光: 産業技術総合研究所)

振動・加速度・衝撃計測標準の国家標準開発を事例として、国家

標準を確立するための要素技術とそれらをどのように組み合わせる必要があるかを紹介した論文であり、シンセシオロジーに相応しい内容です。

議論2 産業現場での成果利用の分かり易い説明について

コメント (村山 宣光)

国家標準が産業界でどのように活用されているかをもう少し具体的に紹介していただけるとこの論文の価値が増すと思います。また、国家標準と実際の現場で行われている校正作業との関係や繋がりについても言及されるとよいと思います。

回答 (臼田 孝)

ご指摘に従い、「1.1 振動計測の概要と校正の必要性」に国家標準がどのように供給され、また活用されているかについて最後のパラグラフを加筆し、図4を加えました。

議論3 今後のシナリオについて

コメント (田中 充)

衝撃加速度センサー校正については、今後国際比較を通して同等性を確認するとされています。単色周波数の振動については、すでに国際比較に基づいて確認され、産業界での計測の信頼性を支えることになるというシナリオが確立されていることと比べると、この衝撃加速度センサー校正はその途上、しかも終盤に差し掛かっているというストーリーになりますね。さらに、静的加速度校正の課題については、まさにこの衝撃加速度センサーでの成果を運用していることになるのです。・・・だとしてみると、最後の課題取り組み成功への産総研の自信が何に基づいているのか、さらには ISO の他国のエキスパートがなぜ特定の国のその取り組み成功をもって規格出版を了解したかのかが注目されます。これは決して馴れ合いではない、しかし学会の研究者仲間の合意でもないと言えます。ドイツ滞在の効果や、まとめの最終部分等に関連の記述が散見されますが、相互信頼のシナリオを1パラグラフ程度にまとめて加筆してはどうでしょうか？

回答 (臼田 孝)

「6 まとめと展望」の最終部分に考えられ得るシナリオとして最終のパラグラフを加筆しました。