

振動加速度標準及び角振動標準に関する調査研究

穀山渉*

(平成 26 年 2 月 28 日受理)

A review on vibration acceleration standards and angular vibration standards

Wataru KOKUYAMA

Abstract

Dynamic motion measurement which includes rectilinear vibration and angular vibration has significant importance in automotive, aerospace, electric and other mechanical industries. To ensure traceability of measurements related to safety assessments in such industries, rectilinear and angular vibration standard are requested. Although rectilinear vibration standard has already established and maintained in many National Metrology Institutes (NMIs), national angular vibration standard has not. To meet recent calibration demands, two angular vibration standard facilities are planned to be developed at National Metrology Institute of Japan (NMIJ). One is for angular velocity calibration (constant rotation, 10 deg/s ~ 300 deg/s) and the other is for angular vibration (sinusoidal wave, 1 Hz ~ 1 kHz) calibration. In this report, transducers for linear and angular vibration, related international standards, industrial calibration needs and status of the national standards are reviewed. Our plan to develop and distribute angular vibration standards are also described.

1. はじめに

「運動計測」とは、ある対象の力学的な運動の計測を指す。これを運動の種類によって分類すると、直線運動（振動・衝撃）と回転運動（角振動）の計測の2種がある。現在、直線運動の計測器としてはレーザー干渉計や加速度計が、回転運動の計測器としてはジャイロや角加速度計、非接触回転計などが存在し、産業界の様々な場面で広く活用されている。例えば、ものづくり現場では製品に外的な振動や衝撃を加え、その際の構造の振動を加速度計やレーザー干渉計で計測することで、品質や安全性の評価が行われている¹⁾。また、ジャイロや加速度計が自動車や家電製品などへ組み込まれるようになり、安全装置や測位装置・ヒューマンインターフェースなどの幅広い用途へ利用が拡大している^{2),3)}。

このような計測器によって、安全性に関わる計測を行

う場合や貿易製品に関わる計測を行う場合などは、特にその計測信頼性を担保することが重要となる。そのために国際的に用いられている方法が、「計測器のトレーサビリティの確保」である。トレーサビリティとは、「測定の比較の連鎖によって、ある計測の能力や信頼性を、国家計量標準にまで直接または間接的にさかのぼって比較し、その妥当性を確認すること」である^{4),5)}。そのような連鎖が可能であることを指し、「トレーサビリティが確保できる」と表現する。その上で、各国の国家計量標準が国際比較によって同等性が確認されることで、世界的に計測器の信頼性・同等性が担保されるという仕組みになっている。そのようなトレーサビリティ体系を実現するため、各国は様々な計測量について、国家計量標準を整備・維持している。

我が国の国家計量標準機関である産業技術総合研究所・計量標準総合センター（National Metrology Institute of Japan, NMIJ）では、直線運動の物理量に相当する振動・衝撃加速度の計量標準を開発・確立し、産

* 計測標準研究部門 音響振動科 強度振動標準研究室

業界へと供給してきた^{6)~9)}。一方で、回転運動に対応する計量標準（角振動標準と呼ぶ）については、過去の計量標準整備計画の策定段階では直線運動のニーズのほうが大きかったため、優先して整備されてはこなかった*1。しかし、近年、技術進歩による回転運動計測器の普及に伴い、角振動標準のニーズが強まりつつある。例えば、自動車の走行安全性を確保するため、角速度をジャイロで検知し電子制御で車体姿勢を安定化する安全装置（横滑り防止装置）が急速に普及しており、ジャイロの計測信頼性が強く要求される¹⁰⁾。また、自動車やロボット的安全性評価試験では、人体への傷害影響の指標として、ジャイロや角加速度計からの計測値が用いられており¹¹⁾、それらの信頼性確保が強く求められる。加えて、これらの計測器への要求性能や、その校正に関連した規格・規制が国内外で確立されつつある^{12), 13)}。

本稿は、上述のような背景のもと、角振動標準の開発に向けて行った調査研究報告であり、以下のような内容で構成される。まず2節において、直線運動と回転運動のそれぞれの計測器について、種類と原理を概観する。3節では、運動計測器の産業界における利用方法やその市場の現状について解説し、関連する国際的な規格や規制についてまとめる。また、計量標準の必要性について論じる。4節では、運動計測器に必要な校正量とその校正方法について述べる。5節では、振動・衝撃加速度標準および角振動標準の現状について、簡単にまとめる。NMIJが保有する振動・衝撃加速度標準や、各国標準機関の状況について述べる。6節では、現状の課題について述べ、今後の展望として角振動標準の開発について解説する。最後に、7節を本稿のまとめとする。

2. 運動計測器

運動計測器には、計測方法で区別すると2種類ある。ひとつはレーザ干渉計（変位計・振動計）や非接触回転計といった、非接触型計測器である。もうひとつは加速度計・角加速度計やジャイロといった接触型計測器（慣性センサ）である。これらは計測対象に固定・接着させて用いるタイプである。本稿で言及する計測器を表1に分類して示す。

非接触型の計測器とは、ある基準位置との相対運動を測定するものである。これら計測器の原理は、レーザ光の干渉によるもの（レーザ干渉計）や、磁氣的結合を利

*1 回転に関する物理量については、静的な角度および静的なトルクの計量標準がすでに整備・供給されている。

用するもの、静電容量を利用するもの、LEDを利用するもの（光センサ）などがある。特に、レーザ干渉計はレーザの波長が長さ基準となるため、高精度かつSI基本単位へのトレーサビリティの確保が容易であるというメリットがある。一方で、このような非接触型の計測器を用いて絶対加速度*2を測定するには、防振台などによって基準位置を作り出し、計測器をそこに設置する必要がある。

接触型の計測器は、内部に働く物理的効果（慣性力など）の検知が計測原理である。大掛かりな装置を用いて基準位置を作り出す必要がないため、絶対加速度の計測が実務的に単純であるというメリットがある。反面、計測対象への計測器取り付け方法によって値が変わるなど、計測する上で注意すべき点もある¹⁴⁾。

2.1 振動・衝撃の計測器

直線運動には、振動と衝撃がある。振動とは、機械系の周期的な励起と定義される¹⁴⁾。その中で、一定周波数・連続正弦波状の振動を正弦波振動、広い周波数帯にわたるランダム状の振動をランダム振動と呼ぶ。一方、衝撃とは、機械系の非周期的な励起であって、短い持続時間および大強度といった特徴を持つものと定義される¹⁴⁾。典型的には、数ms以下の持続時間で、数百m/s²以上の強度をもつものを指すことが多い。以下では、それら2つを振動・衝撃とまとめて取り扱う場合もある。

振動・衝撃の計測は産業界での重要性が大きくなり、多くの解説書が出版されている（代表的なものとして、14）がある）ため、詳細はそれらに譲り、ここでは簡単な解説に留める。

2.1.1 非接触型の振動・衝撃計測

非接触型の振動計測器の代表的なものとして、レーザ干渉計が挙げられる。レーザ干渉計には、主にホモダイン方式*3を用いたレーザ干渉型変位計¹⁵⁾および主にヘテロダイン方式*4を用いたレーザドップラ振動計¹⁶⁾に分類される*5。どちらも対象にレーザを照射し、反射光と参

*2 慣性系を観測座標系とするときの計測対象の加速度。相対加速度と対比されて用いられる。

*3 対象からの反射光と復調に用いる参照光が同じ周波数である干渉計方式。

*4 対象からの反射光と復調に用いる参照光が異なった周波数である干渉計方式。

*5 ここでは、計測対象との間に光共振器を形成しない場合、すなわち単純マイケルソン方式を基本とした場合のみ言及する。

表1 運動計測器の分類

| | 非接触型 | 接触型 |
|-------------|------------------------|------------|
| 振動・衝撃（直線運動） | レーザ干渉計（変位計、振動計）、静電センサ等 | 加速度計 |
| 角振動（回転運動） | 非接触回転計、ロータリーエンコーダ等 | ジャイロ、角加速度計 |

照光との干渉によって対象の運動を計測しているが、前者は干渉縞の変化によって変位を計測し、後者は対象から反射した光に生じるドップラシフトによって速度を計測するという点が原理として異なる。

レーザ干渉型変位計とレーザドップラ振動計との性能面での大きな違いは、その測定周波数帯域である。ここで対象として、加速度が $A \text{ m/s}^2$ 、周波数 $f \text{ Hz}$ の振動運動を考える。変位計測における干渉縞のフリンジ数 n は、レーザの波長を λ として

$$n = \frac{2A}{\lambda(2\pi f)^2} \quad (1)$$

である。一方でフリンジ数に相当するドップラシフトの最大値は、光速を c として、

$$\Delta v = \frac{2A}{(2\pi f)c} v \quad (2)$$

と表され、速度分解能が周波数分解能に相当する。ただし $v = c/\lambda$ は光の周波数である。式 (1) および式 (2) の周波数依/性を考えると、一定の加速度レベルのもとでは、レーザドップラ振動計が高周波領域での計測に適しているといえる。市販のレーザドップラ振動計で一般的な製品は、数 MHz までの振動を計測することができる。

SI 基本単位へのトレーサビリティの確保という観点からは、レーザ干渉計は、レーザの波長が長さの定義となっているため有利であるが、実際上は、基準位置を作り出すために大掛かりな装置を要するのが難点となる。例えば、ISO 16063-11 では、加振器の振動発生に伴う反作用での相対運動^{*6}を加振レベルの 0.05 % 以下に抑えるため、加振される部分の質量の 2000 倍以上の質量を持つ台に干渉計を設置することを要求している。市販の除振装置などを組み合わせることでこの水準を実現できるため、特殊な装置を製作しなくても産業界で必要な不確かさ水準（0.3 % 程度から数%程度まで）の校正を行うことができる。このことから、ほとんどの国の計量標準機関において、振動・衝撃加速度標準を実現する一次校正装置の変位検出部としてレーザ干渉計が利用されている。

*6 基準位置となるレーザ干渉計自体の運動のこと。

2.1.2 接触型の振動・衝撃計測

接触型の振動・衝撃計測は、加速度計によって実現される。加速度計とは、加速度検知部に作用する加速度をさまざまな原理によって変換し、電圧信号として出力する機器である。通常、加速度検知部は計測対象に取り付けられるよう、数 g から数十 g 程度の軽量・小型な部分に格納されており、「加速度ピックアップ」と呼ばれる。このピックアップの機械的特性はサイズモ系（質量と弾性要素、減衰要素から構成される系）となっており、後述するように校正に大きな影響を与える。

加速度ピックアップは単体では電圧信号を出力せず、信号を変換する電氣的処理がさらに必要となる。そのため、加速度ピックアップに接続する電気機器が用いられ、それらは一般に「シグナルコンディショナ」と呼ばれる。「加速度計」という語は、加速度ピックアップとシグナルコンディショナのセットを指す用語である^{*7}ことに注意する必要がある。

加速度計の区分にはいくつかの方法があり、ある加速度計が「X 型加速度計」と呼ばれる場合、その分類基準が混在しているのが現状である。例えば、加速度を電気信号へ変換する計測原理で分類すると、静電容量型、圧電型、歪みゲージ型など^{*8}が存在する。また、加速度検知部の制御方法の区分としてサーボ型、計測器の製造方法の区分として、MEMS 型がある。本項では、それらの分類方法を用い、産業界でよく用いられる幾つかのタイプの加速度計を紹介する^{*9}。

静電容量型加速度計は、加速度ピックアップの内部にバネ-マス系によって構成されたコンデンサが格納されており、それに生じる加速度由来の変位を、静電容量の変化として検出するタイプの加速度計である。典型的には、直流成分（DC）～10 kHz 程度までの加速度を計測することができる。後述の MEMS 型として製造される

*7 後述する MEMS 型加速度計やアンプ内蔵型圧電加速度計などでは、この 2 つの要素が一体のパッケージに格納されている。

*8 その他には、熱流体型、磁気型などが存在するが割愛する。

*9 その他の分類方法は他の文献²⁾に譲り、ここでは割愛する。

のは多くはこのタイプである。

圧電型加速度計（典型的には 1 Hz ~ 20 kHz 程度の周波数帯で用いられる）は、慣性力によって圧電素子に生じる電荷を計測することによる加速度計である。圧電素子を格納する加速度ピックアップは、印加加速度に応じた電荷を出力する。これを受け電圧に変換するシグナルコンディショナは、通常「電荷増幅器」または「チャージアンプ」と呼ばれる。圧電型加速度計は、機械構造等の振動計測で用いられることが多い。広く普及して、長期安定性に優れることから、振動加速度標準における管理用加速度計として採用されている。

歪みゲージ型加速度計は、加速度ピックアップに、マスの取り付けられた金属材料が格納されており、慣性力が引き起こす金属材料の歪みによる、電気抵抗値変化を計測する加速度計である。DC~10 kHz 程度までの加速度を計測することができる。安価であることなどから、特に自動車衝突試験での衝撃計測に我が国では広く採用されている。

サーボ型加速度計は、典型的には DC~200 Hz 程度の低周波帯域での計測に用いられる加速度計である。加速度ピックアップには試験マスが格納されており、定位置に支持されている。この試験マスは、作用する慣性力によって変位が生じようとするが、電流をコイルに印加することで駆動力を発生し、慣性力を打ち消して元の位置に保持するフィードバック制御（サーボ制御）が行われている。その制御信号から試験マスに加わる慣性力を求めることで、加速度を計測する。サーボ型加速度計は数十 Hz 以下の低周波帯域で感度が高く、地盤や建築物といった大規模な構造における振動計測や、地震計測に多く用いられている。温度依存性や長期安定性にも優れた性能を持っており、当所でも低周波振動加速度標準用の管理用加速度計として採用されている。

MEMS 型加速度計

MEMS（微小電気機械システム、Micro Electro-Mechanical System）型とは、様々な原理の加速度計を MEMS 上で構成するという製造上の分類である。この場合、製造が容易となるように、計測原理としては静電容量型加速度計を構成していることが多い。MEMS は小型軽量・低消費電力化が可能であるとともに、半導体同様に大量生産できるため安価にもなるという大きな特長がある。近年は、MEMS 構造の工夫や信号読み出し回路系の技術進歩により、感度向上と雑音低減が進んできている。さらに、多軸・他種類のセンサを複合してワンパッケージ化できるといった利点もある。そのため、

携帯電話やデジタルカメラなどの家電製品へ急速に普及が進みつつある¹⁷⁾。また、小型省電力性から、今までに計測できなかった場所でも加速度計測が可能となりつつあり、特に人体に取り付け、人間の行動把握や医療効果測定等に用いる研究も広がっている¹⁷⁾。

2.2 角振動の計測器

角振動とは、回転方向の振動運動と定義される。 f_{vib} を当該運動における振動周波数 (Hz)、 A を振動の振幅 (rad) として、

$$\theta(t) = A \sin(2\pi f_{\text{vib}} t) \quad (3)$$

で表現される運動は、正弦波状の角振動である。本稿では、これを AC 角振動と呼ぶ。

一方、ある回転体の回転角 θ が時間 t に応じ

$$\theta(t) = \omega_{\text{rot}} t \quad (4)$$

と変化する場合が等速回転運動である。ここで、 ω_{rot} は回転の角周波数 (rad/s) である。本稿では、「角振動」という語にこのような等速回転運動も含むこととし、特に DC 角振動と呼ぶこととする。さらに、回転角 $\theta(t)$ が正弦波状ではなくランダム状に変化する場合（ランダム角振動）や、衝撃のような急激な変動をするような場合（角衝撃）も存在する。以下、本稿ではこれらの運動をまとめて、「角振動」という語で表現する。

2.2.1 非接触型の角振動計測

非接触型の角振動計測には、大きく分けて 2 種類ある。一つはレーザー干渉計などを用いた非接触回転計による計測、もう一つはロータリーエンコーダ等^{*10}による計測である。これらは、直線運動の場合と同様、相対運動の計測である。すなわち、計測器の固定位置基準とした相対的な回転量が計測されることとなる。角振動計測器の校正には、絶対運動を計測する必要があるため、地球の自転の効果などの計測器固定系自体の回転運動に注意しなければならない。よって、振動・衝撃の場合と同様、加振の反作用による計測器固定系の運動が影響しないように、計測器や加振器を設置する台に十分な慣性モーメントを持たせるなどの考慮も必要となる。ISO 16063-15¹⁸⁾では、台に回転運動する部分の 2000 倍の慣性モーメントを持つように要求している。

*10 ロータリーエンコーダは回転する軸に組込むのが一般的であり、非接触型には感じられないが、計測対象の円盤の相対運動を計測していることから、ここでは原理的には非接触型計測器であるとみなしている。

2.2.2 接触型の角振動計測

接触型の角振動計測器として、ジャイロと角加速度計がある^{*11}。ジャイロ (Gyroscope) は、角速度 (単位: deg/s)^{*12} を計測とする計測器である。一方、角加速度計 (Angular Accelerometer) は角加速度 (単位: deg/s²)^{*13} を計測とする計測器である。

ジャイロ

ジャイロは、計測原理によって数種類に分類される²²⁾。ここでは、代表的なものとしてリングレーザジャイロ (Ring Laser Gyro, RLG)、光ファイバジャイロ (Fiber Optic Gyro, FOG)、コリオリ振動ジャイロ (Coriolis Vibratory Gyro, CVG)、ダイナミカルリチューンドジャイロ (Dynamically-tuned Gyro, DTG)、原子光学ジャイロ (Atom-optic Gyro, AOG) を挙げる。それらの種類と計測原理について、表2にまとめる。

RLG や FOG (これらは合わせてレーザジャイロ、光ジャイロとも呼ばれる) は、サニャック効果²³⁾ を計測原理としている。これは、囲む面積 S の光干渉計に対して、角速度 (角運動量と同様にベクトル Ω で表現する) が印加されると、干渉光の位相 ϕ が

$$\delta\phi = \frac{4S}{c\lambda} \mathbf{n} \cdot \Omega \quad (5)$$

だけ変化する物理現象である。ただし \mathbf{n} は光干渉計が囲む平面に対する垂直方向ベクトル、 λ は光の波長である。レーザジャイロは非常に高性能であり、計測した角速度の積分によって角度を計測する装置にも使われている。一方で、高価であることや大型、消費電力が大きいことが問題点であり、航空機や鉄道・艦船などの大型移動体搭載用途が中心となっている。そのような問題点を解決するため、レーザジャイロを微小電気光学機械システム (MOEMS) で実現しようという研究も近年進められている。

^{*11} 19)-21) などの文献を始めとして、「角振動変換器」 (Angular transducer) という語も使われているが、これは回転計・ジャイロ・角加速度計といった回転運動の計測器全般を指している場合が多い。このため、本項では角振動変換器ではなく、角振動計測器という語を用いることにする。

^{*12} SI 単位系では rad/s が正式な表記であるが、産業界では広く deg/s が用いられている。そのため、本稿では deg/s を標準的な表記とする。また、場合によっては deg/h も使われることもあり、統一されていないのが現状である。

^{*13} 産業界で角加速度を表現する場合には、rad/s² もよく利用されている。そのため、本稿では併用することがある。

超高感度なレーザジャイロは、基礎物理学研究にも用いられている。現時点で世界最高感度のジャイロである、G-ring と呼ばれるリングレーザジャイロ²⁴⁾ は、一辺 4 m の正方形光路を持ち、計測分解能は 2×10^{-12} rad/s、ドリフトが $\pm 5 \times 10^{-12}$ rad/s 以内であると報告されている。この装置により、地表面回転運動の計測や地球自転ゆらぎの精密計測など、さまざまな地球物理学的成果が得られている^{24), 25)}。

CVG は、その名の通り「コリオリの力」を計測原理としている。これは、慣性系に対して回転している座標系において、動径方向の運動に作用する横方向の力である。この力により、回転座標系に置かれた振動する機械構造には、別の振動モードが励起されることになる。この励起を検出することで、系の回転速度を計測し、ジャイロとして動作させるという仕組みである。CVG の一種として、例えば半球を振動子として利用する半球形共振ジャイロ (Hemisphere Resonator Gyro, HRG)²⁶⁾ などがある。

DTG は慣性空間における角度方向 (絶対方向) を検出することによるジャイロである。角運動量保存則により、高速で回転する円盤の回転軸は慣性空間で固定された方向を向く。それを利用して検出器自身の持つ角速度を求めるのが原理である。レーザジャイロに比べ小型であり、出力が安定するまでの起動時間が短く (1 秒以内程度)、魚雷などの防衛機器等を中心に用いられている。機械的な原理を用いているため、長期安定性に欠けるのが欠点である。

AOG は、現時点では研究途上のジャイロである。光ではなく原子波のサニャック効果を用いている²⁷⁾。原理的な角速度検出能力が RLG や FOG に比べ数桁以上高いとされ、将来の精密ジャイロとして期待されており、今後の研究開発が待たれる。

加速度計と同様に、MEMS を製造方式として採用したジャイロもある。これは、MEMS 上に形成されたシリコン・水晶・ニオブ酸リチウムなどの材質の振動子に加わるコリオリ力を検知するものであり、CVG の一種ともいえる。半導体と同様な製法で生産することができるため、多くのメーカーが市場に参入している²⁸⁾。このような MEMS センサは、振動・衝撃計測と同様、小型化や大量生産による低価格化、センサの多軸化・複合化などの長が注目されており、後述するように近年急速に普及が進んでいる。

角加速度計

角加速度を計測対象とする角加速度計は、何種類かが

表2 ジャイロの種類と原理

| 種類 | 計測原理 | 利用する現象 |
|-----------------------|---------|--------------------|
| リングレーザジャイロ (RLG) | サニャック効果 | 光共振器でのレーザ発振 |
| 光ファイバジャイロ (FOG) | サニャック効果 | ファイバを通過した光の干渉 |
| コリオリ振動ジャイロ (CVG) | コリオリ力 | 機械構造 (MEMS 含む) の振動 |
| ダイナミカリチューンドジャイロ (DTG) | 角運動量保存 | 剛体円盤の回転 |
| 原子光学ジャイロ (AOG) | サニャック効果 | 冷却原子の干渉 |

市販されているが、ジャイロに比べると数量は極めて少ない。これらの多くは、ピエゾ抵抗型や静電容量型といった直線運動計測用の加速度計を内部に複数並べて配置し、それらの出力を加減算することで、回転方向の加速度を出力している²⁹⁾。流体ロータ型やガスロータ型といった、角加速度によって生じる内部の流体の動きを検知する方式も存在する。

3. 運動計測器の市場動向と規制・規格

3.1 振動・衝撃計測器の市場動向

振動・衝撃計測器は現在広く利用されており、その市場はある程度確立している。本節では、計量標準に関連する市場の現状と、その今後の動向について述べる。計測器の研究開発動向については、特許庁による調査報告書²⁾に詳述されており、割愛する。

3.1.1 振動・衝撃計測器の市場

市場に流通している振動・衝撃計測器のうち、計量標準の供給対象となっているのは、圧電型加速度計が大多数を占める。圧電型加速度計はその構成上電荷増幅器(チャージアンプ)を要するが、チャージアンプを加速度ピックアップ管体に内蔵させたアンプ内蔵 (IEPE^{*14}型) 加速度計がそのうちの多くを占めている。筆者による振動加速度計の製造・校正・ユーザー事業者へのインタビュー調査によると、加速度計販売数量の95%以上はアンプ内蔵型加速度計である。高温環境下での計測などの限定された用途にのみ、IEPE型以外の加速度計が使われている。

加速度ピックアップの取り付け方法にも、片面で取り

付けられるシングルエンド型と両面が取り付けられるバックトゥバック型の2種類がある。産業界での計測現場で利用されているのはシングルエンド型である。一方バックトゥバック型は、加速度計の比較校正時に参照加速度計として、校正対象となる加速度計を連結できるように設計されたタイプである。

3.1.2 振動・衝撃計測器の校正における動向 位相遅れの校正

近年の地震災害の多発により、石油タンクや高層ビルといった重要施設の振動の計測が、防災の観点から重要となっている。また、道路や橋、トンネルといった社会インフラの劣化が大きな課題となっており、その構造診断や状態監視の信頼性を確保することが重要なテーマとなってきた。そのように、構造の二次元的または三次元的な振動解析を行う場合は、複数の加速度計出力の振幅・位相を統合したベクトルデータとして評価が行われる。そのため、加速度計の感度だけではなく、位相遅れも校正することが必要とされる。特に、原子力発電所でのタービンの状態監視などでは、厳しい計測の信頼性とトレーサビリティが要求されており、対応する計量標準を確立していく必要がある。

遠心式加速度校正への対応

遠心式加速度校正とは、高速回転する遠心装置によって大きな加速度を計測対象に印加する校正方式であり、ISO 5347-7³⁰⁾として国際規格化されている。通常の振動校正では不可能な大加速度を印加できることが特長である。歪みゲージ型加速度計など、DC応答を持ち、かつ大加速度まで計測可能な加速度計に対する校正に多く用いられている。特に、国内自動車業界において、この校正方式が広く業界標準として用いられている。しかし、実際の計測器使用目的は衝撃(大加速度であるが、短時間で変化する)の計測であることが多く、遠心式加速度校正法のような静的な校正法の妥当性に問題が提起されている。そのため、遠心式加速度校正と、後述する衝撃

^{*14} Integrated Electronic Piezoelectric の略語であり、IEEE std 1451.4 で規格化されている。製品については、各社によって呼び名が異なっている。例えば、Deltatron (ブリュエール・ケアー社)、Piezotron (キスラー社)、Isotron (エンデブコ社)、ICP (PCB 社) などと呼称されている。

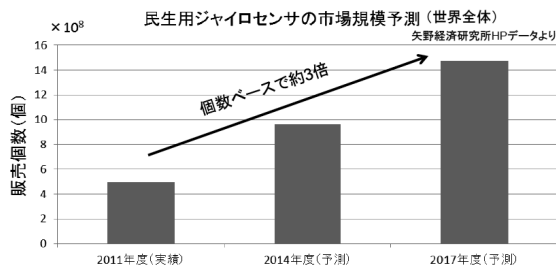


図1 民生用ジャイロの世界市場規模の予想 (矢野経済研究所発表データ²¹⁾よりグラフ化)

加速度校正との整合性を検証する必要がある。衝撃加速度校正は国際的に広く用いられているため、この整合性検証は、国内自動車業界の国際競争力の確保といった観点からも意義が大きい。

工業製品の基準認証への対応

近年、製品の基準認証における適合性評価試験では、試験と同等の加速度振幅での計測器校正を要求されつつある。すなわち、今までは、衝撃加速度の計測器を振動加速度で校正する（計測器応答の直線性が十分であると仮定する）という方法をとってきたが、それが許容されなくなってきている。例えば、リチウムイオン二次電池の安全規格 (IEC 62133³¹⁾) では、最大 1716 m/s^2 の衝撃を供試体に加えると規定されている (Clause 4.3.4) が、従来の振動加速度による計測器の校正では、高々数百 m/s^2 の加速度しか発生できず不十分であるとみなされ始めている。そのため、同等の振幅である衝撃加速度による校正の要望が強まっている。

3.2 角振動計測器の市場と動向

3.2.1 ジャイロの市場

ジャイロの市場規模に関するマーケット調査³²⁾によると、2011年度のジャイロ（防衛・航空宇宙用途を除く）の販売個数は約5億個である。その規模は年々拡大しており、2017年には約3倍の15億個程度にまで拡大すると予想されている（図1）。これは、特に家電、自動車向けにMEMS型ジャイロの搭載が拡大しているためである。

ジャイロを、産業界で一般に使われるグレード基準によって分類したものが、表3である。基準は、フランスの調査会社 Yole Developpement が発行しているマーケット分析³³⁾から引用した。戦術グレード以上の製品ではFOGおよびRLGが多くを占める一方、産業グレー

ドではMEMSジャイロが多く、戦術グレードでも一部シェアを持ち始めている。今後も戦術グレードのFOGやRLGの多くが、MEMSジャイロに置き換わっていくと予想される。

また、バイアス安定性と大まかな価格を軸として、市場におけるさまざまなアプリケーションを図2に整理した。近年のMEMS技術の進展により、かつての高性能FOGに匹敵するジャイロが数万円程度で販売され始めている。それに伴い、輸送機器やロボットなど計測の信頼性が重要な機器への一層の普及が予想され、校正の必要性も増大するものと考えられる。

3.2.2 ジャイロ市場と校正の今後の動向

前項で述べたように、信頼性や性能が高く安価なMEMSジャイロが登場していることにより、自動車を中心とした輸送機器への急速な普及が期待される。特に、自動車の横滑り防止装置 (Electronic Stability Control, ESC) への搭載が重要な位置づけを占める。

ESCとは、自動車のスリップを検知しブレーキ等を電子的に統合制御することで、運転者による車体のコントロールを確保する予防安全装置である。スリップ検知は、車速およびハンドル舵角などから推定した水平方向角速度 (ヨーレート) と、搭載ジャイロによって計測された実際の角速度との比較による。

ESCは、大きな事故抑制効果が実証されている。ESC搭載車は、非搭載車に比べ単独事故は35%、正面衝突事故は30%程度事故率が低い³⁴⁾。そのため、一台あたり15000円程度かかるコストを考慮しても、大きな費用便益があると分析されている³⁵⁾。このような有効性から、米国・カナダ・欧州・オーストラリアでは、ESCは新型生産車への搭載が義務化されている。また国内でも、2012年10月より（軽自動車は2014年10月以降に猶予）、全ての新型生産車にESC搭載が義務付けられており、今後急速に搭載が進むと想定される。それに伴い、ESCの試験装置やそれら計測器の校正が重要な役割を果たすと考えられる。

高い信頼性が要求される航空・宇宙用機器においても、MEMSジャイロ搭載品が登場してきている。例えば、米国連邦航空局 (FAA) の使用許可認証を取得した航空機用姿勢・方位基準装置³⁶⁾や、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が開発している航空機用慣性航法装置³⁷⁾がある。また、小型衛星搭載機器はリスク許容度が大型衛星に比べ高く新規製品を適用しやすいため、MEMSジャイロを利用した姿勢計測装置が適用され始めている³⁸⁾。これらの機器は、3.3.4節で後述する性能要求規

表3 ジャイロのバイアス安定性によるグレードと、ジャイロの種別シェア (2011年)

| グレード名 | バイアス安定性 (deg/h) | 主な使用用途 | 2011年時点シェア |
|--------|-----------------|--------|----------------------------------|
| 戦略グレード | < 0.05 | 慣性航法 | FOG 20%、RLG 65%、その他 15% |
| 測位グレード | 0.05 ~ 0.5 | 測位 | FOG 30%、RLG 50%、その他 20% |
| 戦術グレード | 0.5 ~ 5 | 姿勢検出 | FOG 40%、RLG 30%、MEMS 10%、その他 20% |
| 産業グレード | > 5 | 動揺制御 | FOG 10%、MEMS 55%、その他 35% |

格に従うよう製造・検査されている。

3.2.3 角加速度計の市場と動向

角加速度計は、ジャイロに比べ売上数量が非常に小さく、用途は限定されている。例えば、光学機器や防衛関係機器のプラットフォームの安定化、航空機や飛行体の姿勢検出といった、トルクや外力が重要なアプリケーションで用いられることが多い。また、近年は自動車衝突実験で使用される人体ダミーにも角加速度計が搭載され、追突事故における頭部回転衝撃の計測・評価が行われている。このとき用いられる角加速度計は、自動車の衝突安全性能に関わるため、信頼性担保が必要となる。これに対応するAC角振動(角加速度)標準は整備されていないのが現状である。

3.3 角振動に関する規制・規格

3.3.1 自動車予防安全性能

自動車の予防安全装置であるESCの性能試験時の計測器への要求は、既に規格化されている。例えば、米国の自動車試験規格FMVSS 126¹⁰⁾や欧州の規格ECE/TRANS/180/Add.8³⁹⁾では、ESCの性能試験に用いる試験装置搭載ジャイロに対して、表4のような計測範囲、分解能、精度^{*15)}の性能要求が示されている。我が国ではまだ規格化されていないものの、規制値が設定される場合は、同様の値が用いられると予想される。

3.3.2 自動車衝突安全性能

自動車の衝突安全性を評価するために、自動車メーカーや公的検査機関では、製造する自動車の衝突実験を実施している。その際用いられる計測機器は、安全性評価指標の算出に直接影響するため、計測の信頼性を

確保するための規制も存在する。米国自動車工業会による規格SAE J211⁴⁰⁾では、用いられる加速度計に対し、表5のような計測精度^{*16)}を要求しており、この値は米国の政府の衝突安全基準FMVSS 208³³⁾で引用されている。自動車衝突実験における計測器の仕様を定めたISO規格ISO6487¹²⁾、我が国の国土交通省が制定した規格TRIAS47⁴¹⁾や、欧州での安全規制E/ECE/TRANS/505, Regulation No. 94 (ECE R94)⁴²⁾でも、同じ規制値が適用されている。

角加速度計に関しては、要求値が規制文中にあらわに記載されておらず、明確になっていない。そのため、試験の現場においては、加速度計の要求値を準用し、表5のような計測精度要求を適用しているものと考えられる。

頭部傷害指標

近年、角加速度を用いた頭部傷害指標が複数検討されている。頭部傷害指標とは、衝突実験等における人体頭部ダミーに取り付けたセンサの計測値を、人体への影響度に変換した指標のことである。一般的に自動車分野の安全性評価試験を行う場合、ある一定の試験条件において人体ダミーに取り付けられたセンサの信号を計測する。その信号に規格で定められたフィルタを施したうえで、規定された計算式に則り傷害指標を算出する。その指標によって、製品の安全性能を判定しているのが一般的である。

一例として、BRIC (Brain Rotational Injury Criterion)¹¹⁾がある。これは、

$$BRIC = \frac{\omega_{max}}{\omega_{cr}} + \frac{a_{max}}{a_{cr}} \quad (6)$$

で算出される値である。ここで、 ω_{max} 、 a_{max} はそれぞれ角速度、角加速度の計測最大値、 ω_{cr} 、 a_{cr} は角速度、角加速度の基準値である。頭部傷害指標としては、その他にHIP (Head Impact Power)、PRHIC (Power Rotational

*15 GUMによれば、精度(accuracy)という明確でない表現を使うべきではないが、必ずしもGUMの考え方が広く浸透しているわけではない。後述する3.3節で述べるように、ここで要求されている精度とは、非直線性やスケールファクタ誤差を複合した計測の正確性という意味で用いられていると考えられる。

*16 前節と同様、ここで用いられている計測精度という用語も意味が不明確である。しかし、該当規格を含め、多くの場面では計測の不確かさの意味で精度と呼ぶことも多く、以下の本稿ではそのまま「精度」と表現する。

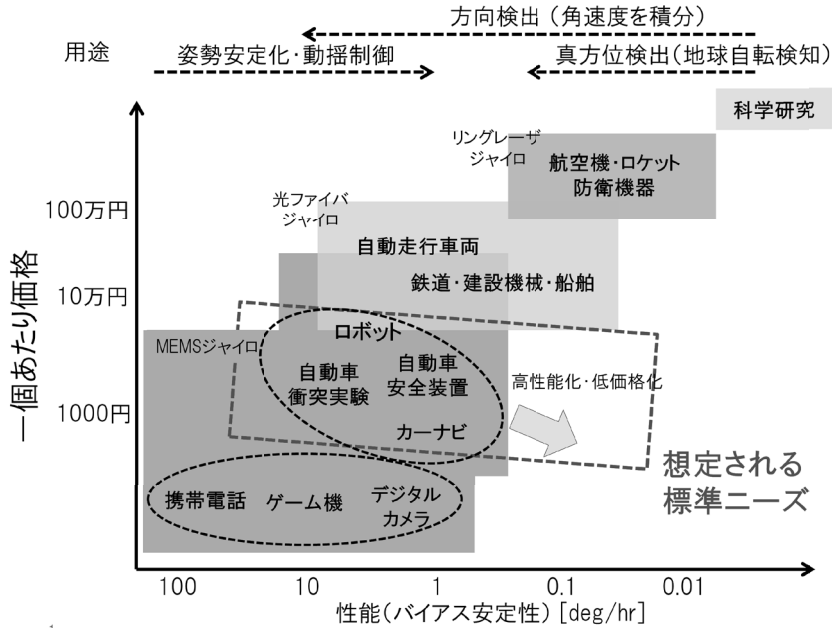


図2 価格帯およびバイアス安定性を軸に分類したジャイロの利用用途。赤点線枠は、計量標準のユーザとしての主なニーズがあると想定している領域を示す。

表4 米国の規制 FMVSS 126 で規定されている、ESC 試験時の計測ジャイロへの要求値

| 項目 | 規制値 |
|-----|----------------|
| レンジ | ± 100 deg/s |
| 分解能 | 0.004 deg/s 未満 |
| 精度 | 0.05 % 以内 |

表5 SAE J211 が要求する自動車衝突実験における加速度計測器の精度

| 周波数 | 要求精度 |
|-----------------|-------|
| DC (静的校正) | 1.5 % |
| ~ 400 Hz | 1.5 % |
| 400 Hz ~ 900 Hz | 2 % |
| 900 Hz ~ | 2.5 % |

Head Injury Criterion) などが提案されている。これらのなかでどの基準が適切に傷害影響を評価できるかは、議論がなされているところであるものの、このような傷害指標が交通事故による脳障害のレベルを表現すると思われる。そのため、この分野の動向に注目するとともに、標準ニーズが生じた場合速やかに対応できるよう、調査・準備を進めておく必要がある。特に、角加速度計測値が規制値に反映され、角加速度計のトレーサビリティが要求される可能性を踏まえると、AC 角振動標準に向けた検討も必要となる。

3.3.3 ロボットの安全性評価

少子高齢化社会に対応するため、人間と共存して動作する生活支援ロボットの開発が進んでいる。そのようなロボットは、人間に危害を加えないように安全性を確保することが普及の前提条件であるため、安全性評

価に関する研究・規格策定作業が進められている。例えば、ISO/FDIS 13482 はパーソナルケアロボットの安全性に関する規格であり、2013 年内に発行される予定である⁴³⁾。また、すでにそれに準拠した基準認証が実施され始めている。ISO/FDIS 13482 は概念規格であって、具体的な計測器への要求規制値が明記されていない。具体的な規制値は2016年頃に規格化される予定である。ロボットの安全性評価試験には、前項の自動車衝突試験と同様のダミー人形が使用されていることから、今後自動車の規制に準じた計測の信頼性要求が課せられると推測される。

3.3.4 その他の機器

その他の規制・試験規格として、ハードディスクドライブ (HDD) および航空用航法機器に関する規格がある。HDD については、国際ディスクドライブ協会

(International Disk Drive Equipment and Materials Association, IDEMA) がハンドリング規格⁴⁴⁾を制定している。ここでは、HDD のコンピュータへの取り付け・輸送・落下などの環境条件から、試験時の角加速度計測器に $100 \text{ rad/s}^2 \sim 100 \text{ krad/s}^2$ の計測レンジがあること、および周波数応答として $10 \text{ Hz} \sim 10 \text{ kHz}$ の帯域があることを要求している^{*17}。

航空用航法機器については、米国航空局 (FAA) が TSO (Technical Standard Order) を定めている。そのうち角振動計測器が関係する規格は TSO-C3d (Turn and Slip Instruments), TSO-C4c (Bank and Pitch Instruments), TSO-C5e, TSO-C6d (Direction Instruments) などである。いずれの規格も、米国自動車工業会が発行している航空機器用規格 SAE AS 8000 シリーズを引用しており、具体的な要求値はそれらに記載されている。ここでの要求値は、航法機器の出力 (方位角や傾き等) について精度や分解能の要求を定めており、ジャイロ自体への性能要求ではない。しかし、MEMS ジャイロを搭載した慣性計測装置で、これらの性能要求を満たすものも出始めており^{36), 45)}、今後の規制におけるトレーサビリティ要求の動向に注目する必要がある。

3.4 振動および角振動に関連する国際規格

上記のような計測器の市場や規制の状況に伴い、振動・衝撃および角振動の試験・校正に関連する国際規格が多数発行されている。ここでは、本稿に強く関係している ISO, IEC, IEEE の各国際規格について概観する。特に角振動に関連する国際規格を挙げ、その他の各国国内規格や各産業における業界規格については割愛する。

3.4.1 ISO 16063 シリーズ

国際標準化機構 (International Organization for Standardization, ISO) において、ISO 16063 シリーズ (Methods for the calibration of vibration and shock transducers)^{*18} として、振動・衝撃・角振動に関する校正法が規

格化されている。

各パートの内容および発効・改定年を表 6 にまとめる。パート 1 が基本コンセプト、10 番台が一次校正法、20 番台が比較校正法、30 番台が試験法、40 番台がその他の校正法となっている。一次校正法については、後の 4.1.1 節 (振動)、4.1.2 節 (衝撃) でも言及する。各国標準機関の多くは、このシリーズに準拠した校正装置を整備し、国家計量標準を供給している。

角振動の校正法に関しては、ISO 16063-15 および -23 (作業中) が該当する。ISO 16063-15 は、レーザ干渉計による角振動の一次校正法を規定している。後の 6.2.2 節で言及するようなレーザ干渉計を角振動計測装置として用いる校正方法を規定している。ISO 16063-23 は、角振動の比較校正法を規定するものであり、現在規格化作業中である。

3.4.2 IEC 62047-20 DIS

国際電気標準会議 (International Electrotechnical Commission, IEC) では、半導体デバイスの標準として IEC 62047 シリーズ (Semiconductor devices) が規格化されている。その一つとして、現在提案・審議中の規格が IEC 62047-20 DIS⁴⁶⁾ である。これは、小型ジャイロのデバイス定格および試験法についての標準であり、日本から提案されている。主に MEMS ジャイロを対象として、計測器の定格のフォーマットおよびそれらを測定するための試験方法について、規定している。

3.4.3 IEEE における関連規格

電子電気技術者協会 (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) では、内部のワーキンググループである Gyro and Accelerometer Panel が中心となって関連規格を策定している^{47), 48)}。そのうち、IEEE 1431-2004 (R2010)⁴⁹⁾ は、CVG の定格と試験法についての規格である。この中で CVG の特性試験項目について規定しており、IEC 62047-20 DIS とほぼ同様な項目を列挙し、その表示法を規定している。さらに、IEEE 671-1985 (R2008)²⁹⁾ は、(非ジャイロ型の) 角加速度計に関しての定格と特性試験項目について定めている。

また、加速度計やジャイロを統合した装置である「慣性計測ユニット」(Inertial Measurement Unit, IMU) のための用語定義⁵⁰⁾や、慣性計測ユニットをさらに全地球測位システム (Global Positioning System, GPS) 等と統合した装置である「慣性航法システム」(Inertial Navigation System, INS) 向けの用語定義⁵¹⁾なども IEEE で整備されている。これらは、歴史的な経緯から、慣性

*17 この規格にこだわらず、製品の付加価値を上げるため米国の軍用機器用の試験規格 MIL-STD-810G を適用していると謳っている製品もある。

*18 旧規格である ISO 5347 (Methods for the calibration of vibration and shock pick-ups) シリーズが、GUM で規定される不確かさに関する記述との不整合を解消するため、順次改定されてきたものである。ISO 5347 は日本工業規格 (JIS) で JISB 0908 としても規格化されていたが、ISO 16063 については、対応する JIS 規格は存在しない。

表6 2013年11月現在のISO 16063シリーズの各パート。NPは新作業項目 (New work item Proposal)、CDは委員会原案 (Committee Draft)、DISは国際規格案 (Draft International Standard) の略称である。「作業中」は、国際規格化が検討されているもののNPへとまだ移行していないことを示す。

| 規格番号 | 発効・改訂年/状態 | 内容 |
|--------------|-----------|----------------------------|
| ISO 16063-1 | 1998 | 基本コンセプト |
| ISO 16063-11 | 1999 | レーザ干渉計による振動加速度の一次校正法 |
| ISO 16063-12 | 2008 | 相互比較法による振動加速度の一次校正法 |
| ISO 16063-13 | 2001 | レーザ干渉計による衝撃加速度の一次校正法 |
| ISO 16063-15 | 2006 | レーザ干渉計による角振動の一次校正法 |
| ISO 16063-16 | (DIS) | 地球重力を用いた静的な加速度計校正法 |
| ISO 16063-21 | 2009 | 振動加速度の比較校正法 |
| ISO 16063-22 | 2005 | 衝撃加速度の比較校正法 |
| ISO 16063-23 | (作業中) | 角振動の比較校正法 |
| ISO 16063-31 | 2009 | 振動加速度計の横感度の試験法 |
| ISO 16063-32 | (CD) | 衝撃による加速度計の周波数・位相特性試験法 |
| ISO 16063-33 | (CD) | 磁場感度の試験法 |
| ISO 16063-41 | 2011 | レーザ振動計の校正法 |
| ISO 16063-42 | (DIS) | 高感度地震計の地球重力を用いた校正法 |
| ISO 16063-43 | (NP) | モデルに基づいたパラメータ決定による加速度計の校正法 |
| ISO 16063-44 | (作業中) | 手持ち式振動校正器の校正法 |

航法・測位・防衛機器といった用途の計測器向け規格の色彩が強い。以上の規格はいずれも、計測器の定格や試験項目とその表示法を定めており、校正方法について規定するものではない。

4. 運動計測器の校正

運動計測器は、一般的に加速度や角速度、角加速度といった力学的な量を電気的な量（電荷量または電圧）に変換して出力する機器である。このとき、両者は物理量として別のものであるから、計測の信頼性の確保のためには、変換係数を定めること、すなわち校正が必要不可欠となる。直線運動に関する振動・衝撃加速度の校正は、過去の文献^{52), 53)}に詳細に言及されているためここでは簡単に紹介するに留め、回転運動の計測器に関する校正に重点を置き述べる。

数値シミュレーションと計測器の校正

特記事項として、筆者が将来的に運動計測器校正のニーズの一つとなると考える、シミュレーションに関わる計測の信頼性確保についてここで簡単に述べる。近年、自動車や航空宇宙、防災といった様々な分野で、数

値シミュレーションが幅広く実施されている。計算機技術の急速な発達により、かつては不可能であった大規模なシミュレーションが可能となってきた。そのため、コストと手間がかかり実行回数に限りがある実験から、計算機上のシミュレーションに研究開発プロセスを移行しようという機運が高まっている。

一方、シミュレーションにおける仮定やモデルについて、妥当性を確認しなければならず、その際には実際の実験データと整合性を評価する必要が生じる。モデルが間違っていれば、いかに高速で緻密な計算を実行しても、間違った結果しか得られないためである。そして、そのような目的の実験における計測は、計測器出力値の信頼性が十分に確保されている必要がある。なぜなら、シミュレーションと実験の不一致が、モデルの誤りか計測の誤りか区別が付きにくいためである。よって、このような用途での計測器に対し計測信頼性の確保（校正とそのトレーサビリティ確保）の要求が高まっていくと考える。

本稿で扱っている運動計測器は、輸送機器やインフラといった、人命に直結するため安全性・信頼性が重要な用途で多く用いられている。今後、このような重要機器に対してもシミュレーションによる安全性評価が行われ

るようになる場合、将来の校正ニーズとなる可能性が高い。今後のこの分野の動向を捉えていくことが必要であると考えられる。

4.1 振動・衝撃計測器の校正

加速度計は、2.1.2 節に述べたほとんどの種類がサイズモ系であるため、計測系が固有周波数（共振周波数）を持ち、その周波数付近では感度が大きく変動する。そのため、周波数領域での感度特性を校正することが、計測信頼性を確保するために重要となる。

4.1.1 振動加速度校正

振動加速度について、一次校正法は ISO 16063-11⁵⁴⁾、比較校正法は -21⁵⁵⁾ に規定されている。加振器によって直線状の正弦波振動を校正対象に加えることにより、校正対象からの出力信号が得られる。同時に、レーザ干渉計などの計測器によって校正対象の運動を計測し換算することで、加速度値の参照信号が得られる。この2つの信号の比較から、校正値が算出される。前述の通り、加速度計は周波数特性を持つため、周波数ごとに校正することが一般に求められ、校正量は感度と位相遅れとなる⁵⁶⁾。このうち感度の校正が、NMIJ の保有する振動・衝撃加速度標準から産業界へ供給されている。

圧電型加速度計は、先述のように、電荷出力を持つピックアップとそれを電圧に変換する電荷増幅器のセットで計測に用いられている。そのため、校正対象としては、ピックアップ単体となる場合と電荷増幅器も含める場合の2通りがある。校正量は、ピックアップ単体の場合は $C/(m/s^3)$ を単位とする電荷感度に、電荷増幅器とセットの場合は $V/(m/s^3)$ を単位とする電圧感度になる。

4.1.2 衝撃加速度校正

衝撃加速度の一次校正法は ISO 16063-13⁵⁷⁾、比較校正法は -22⁵⁸⁾ に規定されている。いずれも、直線的なパルス状の加速度を校正対象に与える方法である。加速度を生成するためには、剛体衝突を利用する方法と、弾性体中の弾性波が生成する表面の加速度を利用する方法（ホプキンソンバー方式と呼ばれる）がある。

校正では、参照信号（レーザ干渉計で計測された変位から換算した加速度）と計測器出力信号の各ピーク値の比をとることで、感度値が求められる。この方法で測定される感度は Shock Sensitivity と呼ばれ、一般によく利用されている。一方、入出力波形をフーリエ変換することにより周波数領域での応答関数を求める校正方法もあり、この場合の感度は Complex Sensitivity と呼ばれる。

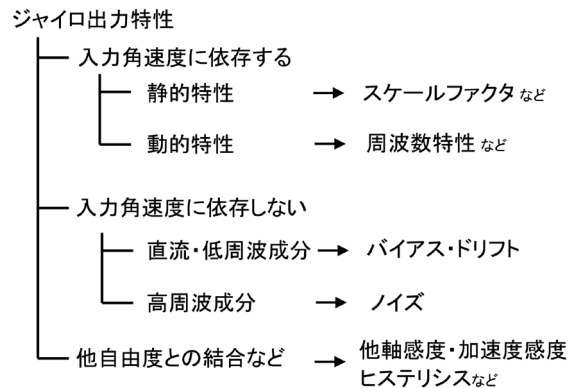


図3 ジャイロの入力-出力特性の分類。

4.2 角振動計測器の校正

4.2.1 計測器特性の表現

計測器の校正は、その入出力関係（入出力応答特性）に対して実施される。すなわち、物理的入力に対する電氣的出力の関係に対して、校正によって具体的な値付けをすることになる。ここで、角振動計測器の校正量を検討するために、ジャイロの入出力応答特性を整理すると、図3のように分類される。

この分類は、先述した IEC 62047-20 DIS や IEEE1431 による CVG のモデル方程式⁴⁷⁾ に基づき、著者が独自に整理しなおしたものである。

図3で列挙した特性以外にも、計測器の環境条件や絶対最大定格などが、計測器の仕様として表示される。しかし、それらは「入力-出力応答特性」からは離れ、校正には関係しない特性であるため、ここでは除外する。

1. 静的特性（スケールファクタなど）

ジャイロに印加される入力角速度 Ω [deg/s] が時間に依らず一定であると仮定する場合、計測器の入出力関係は静的特性で表現される。具体的には、入力に応じたジャイロの出力を $V(\Omega)$ [V] とすると、計測器の入出力関係として一般に

$$V(\Omega) = S\Omega + V_0 + \delta(\Omega) \tag{7}$$

が成り立つ。ここで、 S [V/(deg/s)] および、 V_0 [V] はジャイロの入出力関係を線形近似して得られる2つの係数である。また、 $\delta(\Omega)$ はその近似の残差にあたる。

S はスケールファクタ（感度係数）と呼ばれる。ジャイロの感度を校正場、このスケールファクタ S の値を求めることをいう。ここで、振動加速度計の校正において「感度」と呼ぶ場合、一般に特定の周波数の動的な入力に対する感度であり、ジャイロ校正における感度とは

厳密には異なる量を指していることに留意する必要がある^{*19}。また、スケールファクタが仕様と実際でどれだけずれているかをスケールファクタ誤差と呼び、単位は%を用いて表わされる。

$\delta(\Omega)$ は非直線性と呼ばれ、一般的には計測のフルスケールに対する比をとって%で表わされる。計測器の仕様としては、 $|\delta(\Omega)|$ の最大値が非直線性として示される。

II. 動的特性（周波数特性）

入力角速度が時間に依存する場合の出力の周波数応答特性を、「動的特性」と呼ぶ。すなわち、入力角速度と出力信号の関係式の両辺を下記のようにそれぞれフーリエ展開し

$$\Omega(t) = \int_0^{\infty} \tilde{\Omega}(f) e^{-2\pi i f t} df \quad (8)$$

その伝達関数を考える。

$$\tilde{V}(f) = \tilde{H}(f) \tilde{\Omega}(f) + \tilde{\delta}(f) \quad (9)$$

この (9) 式の右辺第一項 $\tilde{H}(f)$ を動的特性と呼ぶ。

$\tilde{H}(f)$ が十分に保たれる（通常 3 dB, 5 %等を基準とする）上限周波数は周波数帯域（Frequency Band）と呼ばれ、計測器の性能を表す重要な指標となっている。例えば、FOG は 1 kHz 程度の周波数帯域を持つが、MEMS ジャイロは数十 Hz であることが一般的であり、計測器の選定においても重要な特性である。

また、CVG などの機械的な計測原理を持つ計測器は、内部の構造の共振などにより、ゲインピーク（Gain Peak）を生じることもあるとされ、製造時の検査すべき特性の一つとなっている。

III. バイアス・ドリフト

(9) 式の右辺第二項 $\tilde{\delta}(f)$ は、入力角速度に依存しない出力を意味する。ここで、ある計測の継続時間を T としたとき、 $f \leq 1/T$ の周波数領域（相対的に低周波数領域）の変動成分をドリフトと呼ぶ。また、周波数がゼロの成分（すなわち、 $\tilde{\delta}(f)$ の DC 値）をバイアスと呼ぶ^{*20}。

バイアスは時間が経つと変動するのが一般的であり、バイアス安定性（Bias Stability）と呼ばれる^{*21}。単位は

^{*19} ISO 16063-42 DIS で言及されているような、地球重力場を用いた静的校正では、ここで述べている感度と同じ静的な感度を校正している。

^{*20} (7) 式の V_0 と同じ特性を指している。

^{*21} 時間変動する成分であるため、本来はドリフトと呼ぶべきであるが、ジャイロによる角速度計測の分野では、バイアス安定性と呼ばれている。

deg/h が用いられ、ある時間内にバイアスがどの程度変動するの範囲を表示する場合が多い。バイアスやドリフトは計測器の温度に強く影響されるため、それらの温度係数（単位は deg/h/°C などが用いられる）も重要視される。

IV. ノイズ

(9) 式の右辺第二項 $\tilde{\delta}(f)$ のうち、ドリフトよりも高周波帯域の成分はノイズと呼ばれる^{*22}。一般的にノイズ成分は、白色であることが多い。その場合、角速度のノイズ成分を積分して角度に換算すると、ある定数 c を用いて

$$\delta\theta(T) = c\sqrt{T} \quad (10)$$

と表される。ここで $\delta\theta(T)$ は角速度の計測ノイズを時間積分した角度偏差を示す。この時の定数 c が角度ランダムウォーク（Angle Random Walk, ARW）と呼ばれる。単位は deg/ \sqrt{h} で表わされることが多い。

本稿では、ノイズと前項のバイアス・ドリフトを時間スケールによって分類したが、双方を合わせて表示することもある。具体的には、(9) 式の右辺第二項 $\tilde{\delta}(f)$ を周波数領域ではなく、アラン分散の形式で表示する。その際は、ジャイロ静止時の角速度出力の安定度を、時間 τ に応じたグラフ $\sigma_w(\tau)$ として表示することが多い。

V. その他：他軸感度など

計測軸とは別の回転軸に対する応答（他軸感度）や、直線的な加速度入力に対する応答などがある。これらは、本来計測器に存在することが望ましくない特性である。一般的には小さな値であるものの、計測器の製造時には、これらの特性の試験も行われている。

4.2.2 校正量

前節で整理された特性を踏まえ、標準整備すべき校正量をその範囲について検討する。

角速度が計測量の場合

ジャイロのように、角速度が計測量として利用されている場合、出力角速度の値そのものの信頼性確保が求められる。つまり、直線性や分解能といった静的特性を校正する必要がある。

ここで、当面最も重要な計量標準の用途は、安全性評価のため計測の信頼性が厳しく求められる、自動車搭載

^{*22} 周波数が $1/T$ 付近のドリフトとノイズの境界が明確にあるわけではなく、曖昧である。

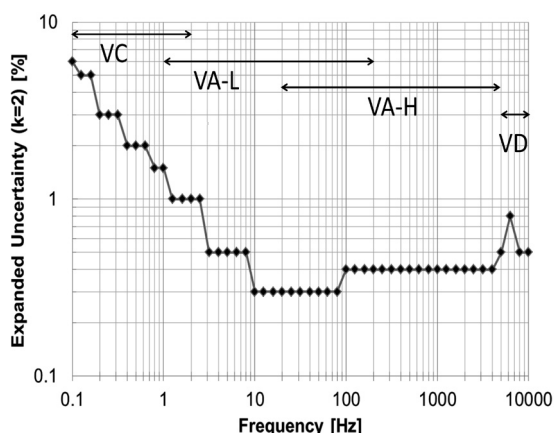


図4 NMIJにおける振動加速度計校正範囲と拡張標準不確かさ。VC, VA-L, VA-H, VDは、それぞれNMIJの保有する4台の振動加速度校正装置であり、各装置の校正周波数範囲を矢印で示している。

用MEMSジャイロの信頼性確保である。自動車試験における計測用ジャイロの規制(表4)などでは、精度が規制値として明記されている。「精度」という用語は不明確であるが、静的特性を表す(7)式から、総合的な計測の信頼性は、スケールファクタ誤差および非直線性にあると考えられる。一般には、スケールファクタ誤差よりも非直線性の方が大きな効果をもつため、当該規制値は、「非直線性0.05%以下」を少なくとも要求しているものとみなして差し支えないであろう。その要求に応じた性能のDC角振動を開発していく必要がある。

校正する角速度範囲としては、表4の規制値のみからは100 deg/sと読み取れるが、MEMSジャイロの製造者からは300 deg/s以下のDC角振動(角速度)校正が要望されており⁵⁰⁾、300 deg/sまでの範囲について対応する標準を整備する必要がある。また、将来的には、自動車衝突実験での人体ダミーに用いられている角速度計測器のためのDC角速度標準も必要とされるであろう。これに対応するためには、計測範囲を20000 deg/s程度までに将来的に拡張する必要がある。

角加速度が計測の場合

3.3.2節で述べたように、自動車衝突安全性評価において、計測器に対して表5のような規制が適用されており、また頭部傷害指標に関連して議論が進んでいる。このため、近い将来、角加速度計の感度や周波数応答に関する標準ニーズが発生する可能性がある。角加速度計は一定回転であるDC角振動による出力がないため、感度を校正するためにはAC角振動を印加する標準校正装置

(AC角振動標準)が求められる。

必要となる具体的な校正範囲と能力(角加速度レベル、周波数範囲、不確かさ等)については、現在のところ見通せない部分が多い。しかし、角加速度計の周波数帯域は数百Hz以上あり、それらの特性を評価するためには、最終的に1kHz程度までの角振動標準が必要となると推測される。

5. 運動計測標準の現状

5.1 振動・衝撃加速度標準の整備状況

振動加速度標準

NMIJの振動加速度標準は、0.1 Hzから10 kHzまでの周波数範囲において供給されている。加速度範囲は加振器の能力に依存し広い値を取ることができるが、品質システム上定義された推奨加速度は0.03 m/s²(0.1 Hzでの値)から200 m/s²(10 kHzでの値)である。当所で宣言している校正・測定能力(Calibration and Measurement Capabilities, CMC)は図4の通り、最大6%(0.1 Hz)、最小0.3%(10~83 Hz)である^{*23}。

この校正能力を実現するため、図5のように超低周波から超高周波まで4台(それぞれ周波数の低い方から、VC, VA-L, VA-H, VDと呼ぶ)の装置を整備している^{6), 52), 60)-64)}。低周波側の2台の装置(VCおよびVA-L)では、変位振幅が大きくなるため、レーザ干渉計信号から対象変位を求める方法として計数法(Fringe-counting method)^{*24}が採用されている。一方で、高周波側の装置(VA-HおよびVD)では、変位振幅が小さいため、正弦波近似法(Sine-approximation method)^{*25}が採用されている。

図5のように、低周波数帯で不確かさが大きくなっていく理由は、加速度振幅が小さいため、信号対雑音比が小さくなることや信号の歪みが大きくなるためである⁵²⁾。また5 kHz以上の高周波においても不確かさが大きくなっているが、これは寄生振動の影響^{65), 66)}や計測器自身の共振周波数に近くなり、計測の難易度が増すためである。また、特定の振動数では加振器等の共振のため、不確かさが大きくなる。これらの影響を低減するた

*23 これは、加速度計の電圧感度およびレーザ干渉計型振動校正装置に対する校正での値であり、加速度計の電荷感度の校正は一部異なっている。

*24 レーザ干渉計の電圧出力信号が零点を横切る回数をカウンタによって測定する方法。

*25 レーザ干渉計の電圧出力信号を処理し変位履歴を求めたうえで、正弦波でフィッティングを行う方法。

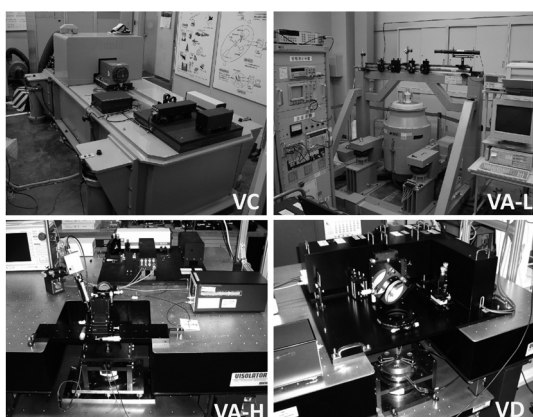


図5 NMIJにおける4台の振動加速度標準校正装置

め、最も高い周波数帯で用いている装置（VD）は二重光路で直交位相信号を検出するなどの工夫が施されている⁶⁾。

各国標準機関も、ISO 16063-11 に準拠して振動・衝撃加速度標準の整備・供給を進めている⁶⁷⁾。2013年1月時点で、28カ国が振動加速度に関して、CMCをBIPMのデータベースであるKCDB（Key Comparison Data Base）に登録している。市販の校正装置を購入し国家計量標準としている国も多いなか、NMIJは独自の装置を製作していることが特徴である。

1節で述べたように、国内で確立されたトレーサビリティ体系が国際的にも通用するためには、国際比較によって国家計量標準同士の同等性が確認されていることが必要条件となる^{*26)}。そのために、各国は可能な限り仲介器（安定性が確認された特定の計測器）を持ち回り測定する国際比較に参加している。各国は原則として、その国際比較により同等性が確認された校正範囲について、KCDBにCMCに登録している。登録範囲については、相互承認協定（Mutual Recognition Arrangement, MRA）により、発行した校正証明書が協定締結国において有効となる。

そのような枠組みの中、NMIJはいくつかの国際比較に参加してきた。例えば、2000年から2001年にかけて行われた国際比較CCAUV.V-K1⁶⁸⁾では40 Hz～5 kHzの範囲で感度測定が行われ、同等性が確認された。ま

*26) それ以外にも、国家計量標準が他国機関によるピアレビューを受けていること、ILAC-MRAの条件を満たすために校正機関のISO17025に対応した認定（ASNITE認定等）を取得すること、が必要である。

た、2009年から2012年にかけてはCCAUV.V-K2⁶⁹⁾として、10 Hz～10 kHzの範囲の位相遅れも含めた比較に参加した。現在幹事所でDraft Aレポートが取りまとめられているところである。さらに、アジア太平洋地域の計量標準機関が参加しているアジア太平洋計量計画（Asia-Pacific Metrology Programme, APMP）内で行われた3回の国際比較（APMP.AUV.V-K1⁷⁰⁾、APMP.AUV.V-S1⁷¹⁾、APMP.AUV.V-K1.1⁷²⁾）に参加している。

近年の各国標準機関の動向として、中高周波数領域の標準整備が完了したため、低周波数領域の振動加速度標準の整備に力点を置き始めている。具体的には、2004年12月のインドネシアのスマトラ沖巨大地震・津波、2008年5月の中国の四川大地震を契機に、地震動の計測に対応する1 Hz以下までの低周波振動加速度標準の国際的な整備が加速している。また、これらに対応した低周波領域の国際比較として、先述のAPMP.AUV.V-S1の他、欧州の計量標準機関の参加するEURAMET内でEURAMET.AUV.V-K3、アフリカの計量標準機関が参加するAFRIMETS内で、AFRIMETS.AUV.V-S2が実施されている。2014年からは、次期国際基幹比較CCAUV.V-K3（0.1 Hz～40 Hz）の実施が計画されており、14カ国が参加する予定である。

衝撃加速度標準

現在NMIJでは、加速度が200 m/s²～5000 m/s²の範囲の衝撃加速度標準が供給されている。対応する拡張標準不確かさは0.8%～1.0%である。この校正能力を実現するため、図6のように衝撃加速度標準校正装置1台（SAと呼ぶ）が整備されている^{1), 8), 53), 73), 74)}。衝撃加速度の生成は、圧縮空気によって棒状衝突体を加速し、加速度計が取り付けられた棒へ剛体衝突させる方式をとっている。校正対象に与えている衝撃加速度は、0.5 ms～2.5 msの作用時間で200 m/s²～5000 m/s²の範囲のピーク加速度を持つ直線運動である⁷⁴⁾。

国内においては、この校正装置と校正事業者3社とのラウンドロビンテストを実施し、それらの間の同等性を確認している⁵³⁾。海外においては、衝撃加速度の一次校正装置を整備している国は、筆者が確認する限り、ドイツ、中国、台湾、日本の4カ国のみである。しかし、近年ブラジル、メキシコ、タイといった他国標準機関でも急速に開発が進められつつあり、今後活発化していくことが見込まれている。

5.2 角振動標準の整備状況

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) は、ド

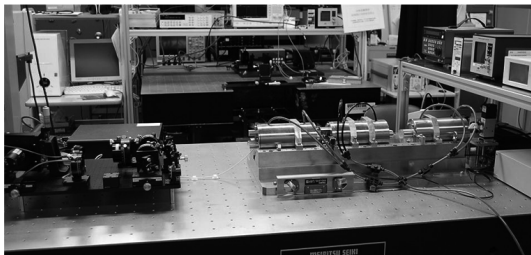


図6 NMIJの衝撃加速度標準校正装置

ドイツの国家計量標準機関である。PTBでは、90年代から角振動標準を開発している⁷⁵⁾。これが、角振動標準としては唯一、BIPM KCDBに登録されている。この標準はISO 16063-15に準拠しており、ドイツの認定機関であるDeutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS)を通じ、Volkswagen等の自動車メーカーで用いる角加速度計へ標準供給されている。

校正範囲は、角加速度範囲が $1 \text{ rad/s}^2 \sim 1400 \text{ rad/s}^2$ (およそ $60 \text{ deg/s}^2 \sim 80000 \text{ deg/s}^2$)、周波数範囲が $0.4 \text{ Hz} \sim 1000 \text{ Hz}$ 、拡張標準不確かさは $0.3\% \sim 0.5\%$ である⁷⁶⁾。また、KCDB未登録であるが、最大 40 rad/s の角速度(DC角振動)について校正サービスも提供している⁷⁷⁾。

Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS)は韓国の国家計量標準機関である。ここでは、デンマークのブリューエル・ケア社と協力し、ジャイ

ロ等の動的特性の校正装置の開発が進められている⁵⁹⁾。MEMS ジャイロの周波数特性を評価するための角振動発生装置を製作しており、 5 kHz までの角振動の発生が可能である。また、PTBとKRISSの間で二国間比較(CCAUV.V-S1)⁷⁸⁾が実施されており、それに基づいた国際基幹比較(CCAUV.V-K4)も計画されている。

中国の民間研究機関であるChangcheng Institute of Metrology and Measurement (CIMM)では角振動校正用のプロトタイプ装置を開発している。この機関からは、ISO 16063-15に対応した方法とエンコーダによる角度読み取りによる方法の相互比較や、角衝撃入力によるセンサ特性評価などが報告されている²¹⁾。

その他、メキシコの計量標準機関であるCENAM⁷⁹⁾やロシアの計量標準機関であるVNIIMにおいて、角速度や角加速度の国内での標準供給を行っている。

6. 運動計測標準の今後の課題

6.1 振動・衝撃加速度標準の課題と展開

現在、大部分の産業ニーズをみたす周波数範囲について、振動・衝撃加速度標準の整備が完了しているが、今後対応を要する課題も存在している。それらを図7内に丸囲みで示す。具体的には、以下の点である。

- 遠心加速度校正の同等性検証：3.1節で述べたように、国内自動車産業で広く用いられている遠心

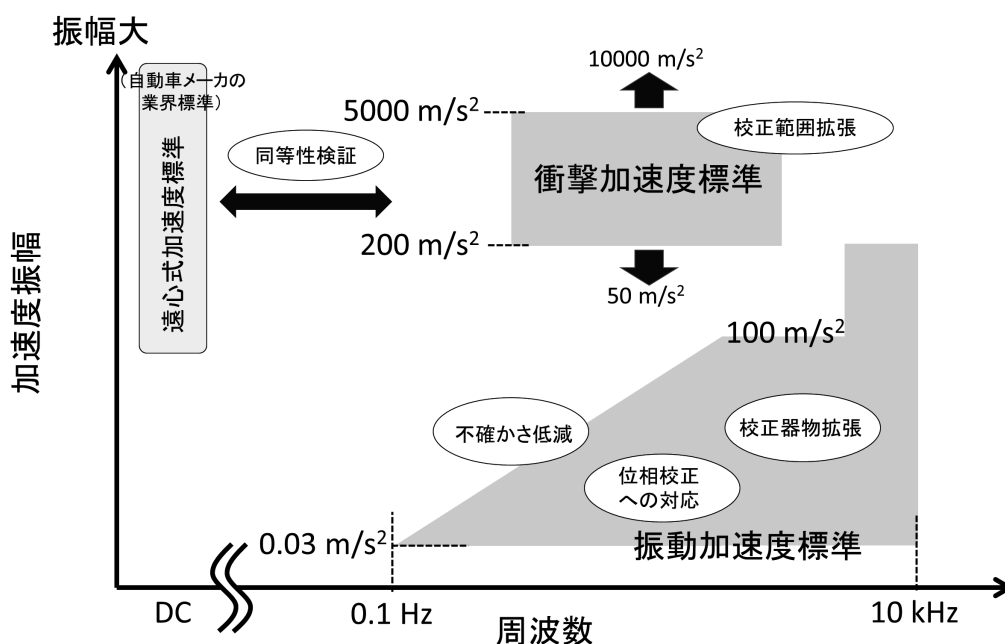


図7 NMIJが保有する振動・衝撃加速度標準が対応している範囲と、今後の課題

表7 角振動発生技術の比較. ボイスコイル型およびブラシレスモータ型についての典型的な装置のスペックを示す.

| | ボイスコイル | ブラシレスモータ |
|--------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 発生トルク | 大 ($\sim 10^5 \text{ deg/s}^2$ 程度) | 小 ($\sim 10^3 \text{ deg/s}^2$ 程度以下) |
| 可動角度範囲 | 小 (数 deg) | 大 (連続回転可能) |
| 角振動周波数 | 高周波 (数 Hz \sim 数 kHz) | 低周波 (数十 Hz 以下) |

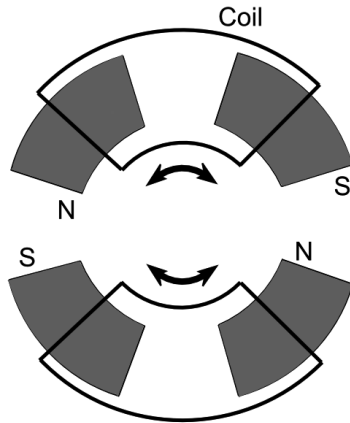


図8 ボイスコイル型角振動発生装置の概念図 (上部から見た断面の構造).

式加速度校正装置と、国際的に用いられている衝撃加速度校正装置の同等性を検証する必要がある。これは、国内産業界が欧州等のトレーサビリティを強く要求する地域へ自動車輸出する場合の通商の観点から、重要である。

- 校正器物の拡張：NMIJの供給する振動加速度標準は、産業界で多く用いられている種類の加速度計へ対応しきれていない部分がある。そのため、対象器物の拡張が要望されている。具体的には、アンプ内蔵型加速度ピックアップや、シングルエンド型の加速度ピックアップへの校正サービスの要望がある。特に、アンプ内蔵型加速度ピックアップについては、産業界におけるシェアを考えると校正ニーズは大きい。
- 衝撃加速度標準の校正範囲拡張：5.1節で述べた衝撃加速度標準の校正範囲では、航空宇宙・防衛産業における衝撃加速度計測範囲（最高 10^6 m/s^2 ）⁸⁰での校正ニーズへ対応しきれない。そのため、特殊なニーズではあるが、校正範囲の高加速度域への拡張が求められている。
- 位相校正への対応：3.1節で言及されているように、インフラの状態監視に加速度計を用いる場面などで、感度だけではなく位相遅れも重要となっ

てきている。原子力発電所のタービン計測などでは、複数の加速度計を用いたベクトル的な状態診断も行われており、信号の位相に関する信頼性が必要とされている。特に低周波帯域の位相校正に対応するためには、現在は計数法が用いられている装置を、正弦波近似法に対応できるよう変更する必要がある。

6.2 角振動標準の課題と今後の展開

今後、新規開発する角振動標準の技術課題は、以下の3点である。

- 角振動の発生技術：校正のために、安定した低歪みの角振動を、広い周波数・角速度・角加速度レンジにわたって発生できる技術が求められる。
- 角振動の計測技術：発生した角振動を計測し、校正のための参照値を算出するためには、トレーサビリティが確保されるとともに不確かさが小さい角振動の計測技術が求められる。
- 電気計測技術：校正対象の計測器の感度を算出するためには、出力電圧信号を低雑音に取得する電気計測技術が求められる。

6.2.1 角振動発生技術

角振動発生技術には、主としてボイスコイルとブラシレスモータの2種類がある。これらの簡単な特徴の比較を表7に示す。

ボイスコイル型角振動発生装置

ボイスコイル型角振動発生装置は、図8で示されるように、回転テーブルの面に平行な巻かれたコイルを持ち、その磁場によって発生させたトルクで回転テーブルを直接駆動する装置である。「動電型角振動加振器」とも呼ばれる。ISO 16063-15では“Electro-dynamic angular vibration exciter”として言及されている。

この方式の利点は、コイルからの電磁力が直接トルクとして回転テーブルに伝わるため、大きな角加速度を発生できる点である。また、テーブルを含めた回転部の構造がシンプルにできるため、その剛性を高くできる。そ

のため、高周波数帯（数 kHz 程度まで）の角振動の発生に対応可能である。例えば KRISS とブリューエル・ケアー社が共同で開発した装置は、この方式を採用しているため、5 kHz までの角振動を発生できる⁵⁹⁾。一方、難点は、ボイスコイルの構造上、可動範囲が数度程度と小さくなることである。そのため、低周波数の AC 角振動は、数 Hz 程度が発生の下限周波数となる。また、連続的な回転運動を発生しなければならない DC 角振動の校正には適用できない。

ブラシレスモータ型角振動発生装置

ブラシレスモータ型の角振動発生装置とは、回転テーブルを DC ブラシレスモータによって駆動するものである。テーブルの動きが回転計によって計測され、任意の波形の運動を実現するように、サーボ制御が行われる場合もある。慣性計測システムの試験装置（主に航空宇宙業界向けに市販されている）では、多くがこの方式で回転運動を生成しており、多軸回転装置も存在する。ISO 16063-15 において、“Angular vibration exciter based on a brushless electric motor” として挙げられている。

この方式の装置の利点は、360 度を超える連続的な回転が可能であるため、大振幅・低周波の角振動が発生可能なことである。一方で、難点は、発生トルクがボイスコイル型に比べると 1 桁以上小さくなる点や、モータから回転テーブルまでシャフトが必要となり、剛性を高めることができない点などがある。このため、発生角振動は数十 Hz 程度が上限となる。よって、低周波の AC 角振動や、DC 角振動の発生に適している方式であるといえる。

その他の方法

以上の 2 つ以外にも、主として HDD の回転衝撃試験のために開発された、角衝撃発生器も市販されている。これは、3.3.4 節で言及した HDD のハンドリング規格⁴⁴⁾ に準じ、最大 100 krad/s²、持続時間 0.5 ms~10 ms 程度の角衝撃に対応している。その角衝撃発生範囲を図 13 で示す。運動生成方法は、空気銃で加速された衝突体を円盤の周辺部に当てることで、円盤に対して衝撃状の回転運動を発生させるというものである。我々が目指す角振動標準に必要な領域より大幅に高周波・大振幅の領域の装置であり、当面は標準装置への利用を想定しない。しかし、将来的に角衝撃の標準が求められてきた場合には、注目すべき方式となるであろう。

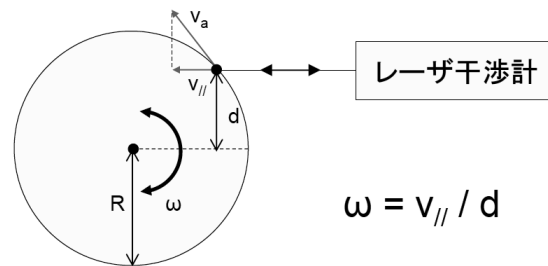


図 9 ISO 16063-15 に規格化されているレーザー干渉計による角振動計測の概念図

6.2.2 角振動計測技術

角振動の計測技術にはさまざまなものがあるが、有力な方法としてレーザー干渉計とロータリーエンコーダの 2 つを挙げる。

レーザー干渉計

角振動を計測する方法の一つとして、レーザー干渉計を回転の運動計測に用いる方法がある。これは、ISO16063-15 にも規定されており、5.2 節で述べたドイツ PTB が整備している角振動標準でも採用されている方式である。

その計測の概念図を、図 9 に示す。レーザー反射体としてレトロリフレクタ（コーナーキューブとも呼ばれる）または回折格子が、回転テーブルの円周上に取り付けられる。ここで、直線的な振動・衝撃加速度標準の場合と同様に、測定点における光軸方向の変位または速度が計測される。その計測値と回転軸からの距離から、回転テーブルの角速度が算出される。具体的には、レーザーによる計測点と回転中心までの垂線の長さを d とすると、角速度 ω は、レーザー干渉計によって計測される垂直方向速度 $v_{||}$ を用いて、

$$\omega = \frac{v_{||}}{d} \tag{11}$$

と表わされる。この方式の利点として、 $v_{||}$ はレーザー干渉計によって高精度に測定できるため、計測の分解能が高いことがあげられる。

一方で、幾何学形状への不確かさの要求が厳しくなる点が難点である。前式において $v_{||}$ と d の間に相関がないと仮定した場合の不確かさの伝搬則は

$$u^2(\omega) = \left(-\frac{v_{||}}{d^2}\right)^2 u^2(d) + \frac{1}{d^2} u^2(v_{||}) \tag{12}$$

となる。これより、例えば角速度の不確かさとして $u(\omega) < 0.1\%$ を要求する場合、 $u(d) < 0.15 \text{ mm}$ が必要条件となる。ただし、ここで $d=150 \text{ mm}$ および $u(v_{||})$

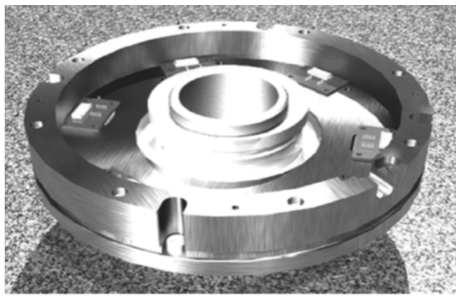


図 10 自己校正型ロータリーエンコーダ (写真提供：NMIJ 幾何標準研究室渡部氏)

が十分小さいとした。一般的に、レーザ干渉計では光線のスポットサイズが 1 mm 以上の場合が多いことを考え合わせると、光学系や機械系の幾何学的形状を調整してこのような小さな不確かさを実現するには、技術的難易度が高くなる。

ロータリーエンコーダ

ロータリーエンコーダによって、回転テーブルの回転角を計測し、その時間変化から角振動を計測するという方法もある。この方法はレーザ干渉計に比べ簡便であるため、産業界で角振動計測が必要な場合には、こちらが広く利用されている。一方、装置を軸に合わせて取り付ける必要がある点が難点である。

NMIJ 幾何標準研究室では、自己校正型ロータリーエンコーダ (Self-calibratable rotary encoder, SelfA)^{81), 82)}を開発している。その外形写真を図 10 に示す。

SelfA の角度校正原理は、等分割平均法⁸³⁾と呼ばれる NMIJ が保有する角度の国家標準器に採用されている方法である。等分割平均法は、角度偏差が一回転すると元に戻る回転対称性を利用した手法である。具体的には、計測器内部のロータリーエンコーダを、計測器と同軸に取り付けられたロータリーエンコーダに対して相対角度位相を等角度間隔にずらした複数位置において互いの角度信号の比較計測を行い、得られた信号を演算することでエンコーダ目盛りの理想角度からのずれ (角度偏差) を抽出する。国家標準器の校正能力は、世界トップクラスの拡張不確かさ 0.01 秒角 ($k=2$) である。

SelfA は、この等分割平均法をロータリーエンコーダ単体内部で実現させたものである。具体的には、複数個の信号読み出しヘッドを等間隔に取り付け、一つのヘッドから出力される角度信号を他の複数個のヘッドから出力される角度信号と比較計測し、等分割平均法と同じ解析を行うことで、角度偏差を抽出する。

SelfA は一回転中のデータ取得のみでデータ解析ができるため、最新の回転テーブルの偏心の影響や実使用状態における角度偏差などを評価することが可能である。ただし、等分割平均法で求めた角度偏差には、原理的に抽出不可能な周波数成分がある (読み出しヘッド数の整数倍の次数の角度偏差成分) という点は留意する必要がある。

計測における地球自転の考慮

特筆すべき点として、特に DC 角振動計測にあたっては、地球自転の効果に注意する必要がある。例えば、計測器を鉛直方向が計測回転軸となるように設置した場合、設置場所の緯度を θ_{lat} とし、回転速度のバイアス ω_{bias} が

$$\omega_{\text{bias}} = \sin(\theta_{\text{lat}}) \omega_{\text{ER}} \quad (13)$$

だけかかる。ここで $\omega_{\text{ER}} \approx 4.2 \times 10^{-3} \text{ deg/s}$ は地球の自転角速度 (Earth Rate) である。ここで、最大計測範囲が $\pm 100 \text{ deg/s}$ で 16 ビット出力を持つジャイロの場合、分解能は $3 \times 10^{-3} \text{ deg/s}$ となる。このことから、地球自転の効果も校正における無視できないバイアスとなる。

6.2.3 電気信号の計測

電気信号の計測に関して、大きく 2 点の技術的な問題がある。1 点目は、回転テーブル上の計測器からの出力信号をどのように伝送するかである。DC 角振動標準では、テーブルは連続的に回転するため、通常のケーブルはねじれてしまい、使用することができない。解決策として、スリップリング (回転する軸に電気的接点を組み込んだ部品) の利用が考えられるが、電気的ノイズや機械的摩擦抵抗などが校正に対して影響しないかどうか、入念に試験する必要がある。スリップリング以外では、無線通信や磁気を利用した非接触信号伝送などの手段も存在する。

2 点目は、デジタル出力信号への対応である。高性能なジャイロの多くは、デジタル値を出力しているのが一般的である。また、安価な MEMS ジャイロも、家電や自動車機器への適用性を高めるために、周辺回路とともにパッケージ化しデジタル出力を持つ場合がほとんどである。

デジタル出力の場合、伝送路における電気的ノイズの影響がアナログ出力に比べ非常に小さくなり、不確かさ低減の観点から有利となる。一方で、内部でデータの補正処理などを施した上で出力しているジャイロもあり、そのような場合において、校正方法や不確かさ評価法を別途検討する必要がある。さらに、デジタル出力の伝

送プロトコルとして、SPI (Serial Peripheral Interface), I²C (Inter-Integrated Circuit), RS-232C/RS-422 を利用したテキスト通信など数種類があるため、対応に労力を要するのも難点である。デジタル出力計測器の校正については、ISO 16063 シリーズでは想定されていないが、性能試験における注意点が IEEE std 671 Appendix C で言及されている。それらの資料を参考にしながら、校正における諸問題を検討していく計画である。

6.2.4 開発計画

以上の技術的な背景を踏まえ、我々は表 8 に示すような 2 台の校正装置を開発する計画を立てている。発生できる角振動の周波数領域に応じて、それぞれ低周波を NMIJ-L、高周波側を NMIJ-H と本稿では呼ぶ。それぞれについてプロトタイプ装置をすでに開発しており、その外形を図 11 および図 12 に示す。

NMIJ-L は、DC 角振動や数 Hz 以下の低周波の AC 角振動に対応する装置である。角振動の発生は DC サーボモータによって行う。また、角振動の計測はロータリーエンコーダを搭載することで実現する。特に、ロータリーエンコーダとして SelfA を搭載し、校正器物の搭載や環境変化にロバストになることが大きな特長である。

NMIJ-H は、高周波の AC 角振動に対応する装置である。角振動発生にボイスコイル型を用いることで、高周波までの角振動に対応させる。この場合可動角度が小さいため、角振動の計測にレーザ干渉計を用いる。これにより、ISO 16063-15 にほぼ準拠した装置となる見込みである。図 12 で示されているプロトタイプは、300 Hz において 10 deg/s の振幅の角振動が発生可能である。

角振動校正範囲

上述した範囲の 2 種類の角振動標準校正装置プロトタイプの角振動発生能力と、KRISS が保有する装置や産業ニーズなどとの比較を図 13 に示す。

このような図は、トリバタイトグラフと呼ばれるものである。図上のある点 (例えば f_a Hz, ω_a deg/s) は、最大角速度 ω_a で周波数が f_a の正弦波状の角振動

$$\omega(t) = \omega_a \sin(2\pi f_a t) \tag{14}$$

を表現する。このとき、角振動の最大振れ角 θ_a [rad] と最大角加速度 A_a [rad/s²] は

$$\theta_a = \frac{\omega_a}{2\pi f_a} \tag{15}$$

および

$$A_a = 2\pi f_a \omega_a \tag{16}$$

表 8 整備予定の 2 種類の角振動標準

| | 第一段階 (NMIJ-L) | 第二段階 (NMIJ-H) |
|---------------|-------------------------|-----------------------|
| 角振動発生装置 | ブラシレスモータ型 | ボイスコイル型 |
| 角振動計測装置 | 自己校正型ロータリーエンコーダ | レーザ干渉計 |
| 角度トレーサビリティの確保 | 角度標準を搭載 | 長さ標準より組立 |
| 校正範囲 | DC 角振動 (10 ~ 300 deg/s) | AC 角振動 (1 Hz ~ 1 kHz) |
| 評価対象 | 静的特性 (非直線性・感度係数等) | 動的特性 (周波数特性) |

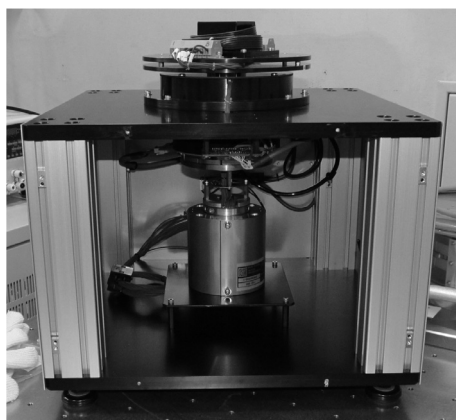


図 11 低周波角振動校正装置プロトタイプ

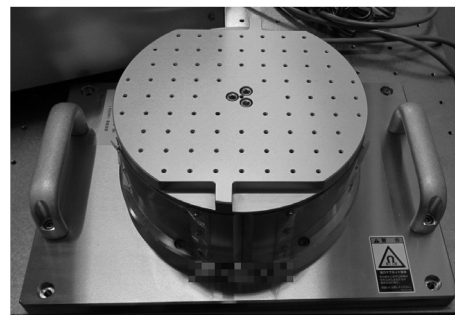


図 12 高周波角振動校正装置プロトタイプ。今後レーザによる計測系を整備する予定である。

となるから、振れ角一定条件や、角加速度一定条件は、図上で直線として表現することができる。これより、ある角振動発生器の加振性能（振れ角範囲、角速度範囲、角加速度範囲）を図上の範囲として、示すことができる。図13においては、縦軸（角速度）がジャイロの直線性評価に必要な方向であり、横軸（周波数）がジャイロおよび角加速度計の周波数特性評価に必要な方向となる。

DC角振動標準については、標準供給対象となるESC試験用ジャイロの最大計測範囲は、60 deg/s～300 deg/sの範囲であることが多い。IEC 62047-20 DIS記載のスケールファクタの試験法では、最大計測範囲を5分割して試験するとの規定があり、実際多くのジャイロメーカーもその方法を採用している。よって、それに対応する範囲として最小10 deg/s、最大300 deg/sを範囲とした。

また、AC角振動標準については、産業界におけるニーズとして、角速度で300 deg/s程度までおよび周波数で上限1 kHz程度が要求されており⁵⁹⁾、それを目標とする。現在のプロトタイプでは発生トルクに不足があるため、装置の能力増強（発生トルクが現在の10倍程度、可動範囲が10倍程度）が必要となる。

SIトレーサビリティの確保

角振動は組立量であり、標準校正装置自身も角度、時間、電圧の各量についてSIトレーサビリティを確保する必要がある。角度については、NMIJ-LはSelfAを内部に持っているため、その角度校正によってトレーサビリティを確保する。具体的には、回転テーブルに別のSelfAを取り付けて校正する方法を検討している。NMIJ-Hは、レーザ干渉計を用いて長さ標準から角度を組み立てる。

時間については、角振動の不確かさへ及ぼす影響を考えると、NMIJ-LとNMIJ-Hのいずれの装置も、信号処理系のクロックをトレーサブルに校正すれば、十分であると想定している。

電圧については、校正器物がアナログ信号を出力する計測器の場合は、電圧を計測するデジタイザに対してトレーサブルな電圧校正を行う。一方で、デジタル信号を出力する計測器の場合、電圧に関してのトレーサビリティをどのように取り扱うか検討する必要がある。

6.2.5 標準整備とその供給

DC角振動とAC角振動という2つの領域の角振動が校正ニーズとしてあることに対応し、2段階にわけて計

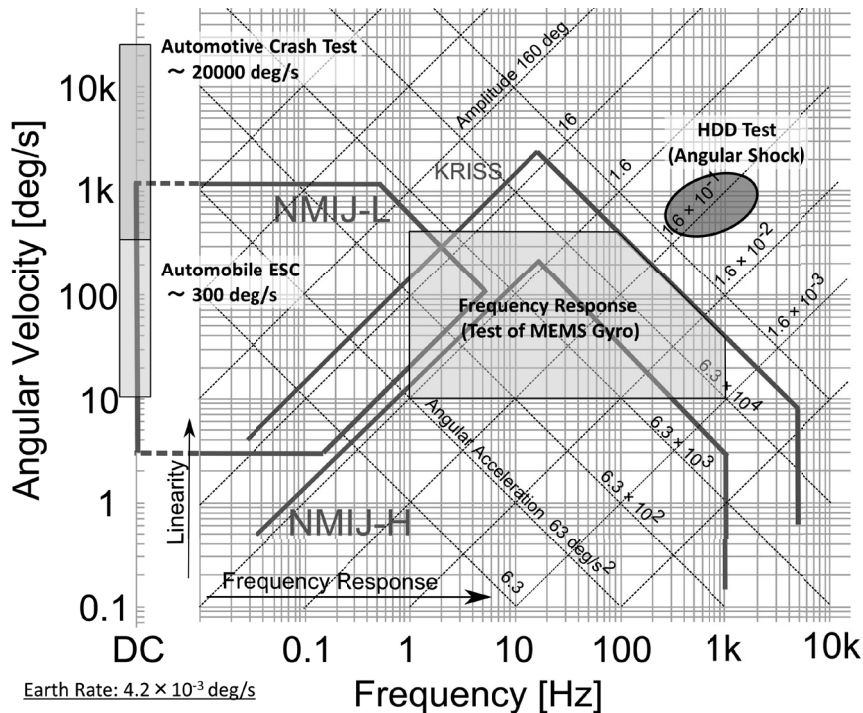


図13 NMIJが保有する2つのプロトタイプ装置（NMIJ-L、NMIJ-H）の発生可能な角振動範囲。それぞれの装置について、太線で囲まれた範囲の角振動を発生することができる。同時に、産業界における角振動の試験・校正ニーズの大きな範囲を図示している。角衝撃は持続時間を周波数に換算して図示しており、連続正弦波ではない。

量標準を整備していく計画である。まず最初の段階は、DC角振動標準をNMIJ-Lを基本とした連続回転装置を用い、ジャイロの非直線性を中心とした静的特性評価のための計量標準を供給する。その後、ボイスコイル型の角振動発生装置(NMIJ-Hの能力増強型)を開発し、ジャイロの周波数特性評価や角加速度計の特性といった動的評価のための計量標準を供給する。

これらの整備によって、ジャイロの非直線性・バイアス評価から周波数特性評価までを一貫して標準供給できる体制とし、自動車やロボットの安全性評価に貢献する計量標準を確立する。

事業者への供給方法

角振動標準が確立した後、当面は依頼試験(一般)として事業者からの校正依頼を受ける予定である。その場合、トレーサビリティを供給する方法として、高性能ジャイロを仲介器として値付けするか、あるいは角振動計測器の内部のロータリーエンコーダを動的校正し、角振動を組立量とみなすか、の2通りが考えられる。どのようなスキームが最適であるかは、労力やコスト・技術的な妥当性などを含め、今後検討していく必要がある。

6.2.6 標準供給後の展開

標準供給後の展開として、特筆すべき点が2点ある。1点目は、開発した角振動校正装置を商品化して、校正事業者へ提供することである。計画するDC角振動標準は、内部の角度基準としてSelfAが搭載されていることが大きな特徴である。SelfAは安価であり(不確かさが1秒角を切るものでも50万円弱)、取付状態・計測環境による偏差を、組込み状態で出力できるという大きなメリットがある。そのため、開発するDC角振動校正装置は、現場での使用にも親和性が高いといえ、校正装置それ自体を産業界に展開できる可能性がある。

2点目は、角振動の組立量への移行である。角振動はSI組立単位であり、必ずしも国家計量標準機関が標準を保有する必然性はない。よって、十分な技術を保有している校正事業者自身が、角度、時間および電気についてのトレーサビリティを確保した上、組立量として角振動標準を確立するほうが望ましい。その場合、NMIJの役割は、計量標準を供給する形から技能試験における参照値の提供を行うという形に移行すると考えられる。

7. まとめ

運動計測には、直線的な振動・衝撃計測と回転の角振

動計測があり、それぞれの計測器は非接触型と接触型に分類される。これらの計測器は、ものづくりや社会の安心・安全を支える分野で広く活用されており、その計測の信頼性を確保することが重要である。NMIJでは、それに対応する振動・衝撃加速度標準の整備を行ってきており、その現状と今後の課題について概観した。

角振動標準については未整備であり、各国の現状と産業界のニーズについて調査した。ジャイロ・角加速度計による角振動計測のうち、価格や数量で市場の多くを占めるのが、輸送機器や家電に搭載されるジャイロである。特に、自動車の横滑り防止装置の試験用ジャイロや、安全性評価のための衝突実験などで用いられる角加速度計に計量標準のニーズがあると考えられる。校正量として、ジャイロのための非直線性・周波数特性、および角加速度計の周波数特性評価に必要な角振動標準が求められている。

それに対応するため、NMIJにおいて2種類の装置(ブラシレスモータ式の低周波校正装置、ボイスコイル式の高周波校正装置)を段階的に整備する計画である。具体的には、10 deg/s ~ 300 deg/sの範囲のDC角振動標準をまず立ち上げ、その後1 Hz ~ 1 kHzのAC角振動標準を整備する。DC角振動標準にはSelfAが組み込まれ、内部の角度基準によってトレーサビリティがとられることが特長である。その簡便性、ロバスト性を生かし、校正装置の商品化や組立標準への移行といった展開も想定されている。

謝辞

調査研究を実施するにあたり、様々な関係者の皆様の多大なご指導・ご支援を頂きました。ここに深く感謝致します。強度振動標準研究室の大田室長には何度もコメントを頂き、その都度適切なアドバイスを下さいました。また、菊池前音響振動科長、三戸音響振動科長、白田計量標準管理センター長、研究室の野里様をはじめとした皆様からも様々なご指導・ご支援を頂きました。共同研究者である幾何標準研究室の渡部様、堀口様、また、見学や意見交換に対応して下さった各メーカの皆様に感謝いたします。計測標準研究部門の山田首席研究員にも大変お世話になりました。ありがとうございました。

参考文献

- 1) 野里英明, “安全安心の評価に必要な加速度標準の開発”, 産総研 *TODAY* (2010).

- 2) 特許庁, “平成 21 年度特許出願技術動向調査報告書: 加速度センサ”, (2010), http://www.jpo.go.jp/shiryu/pdf/gidou-houkoku/21acceleration_sensor.pdf.
- 3) Michael Perlmutter and Laurent Robin, “High-Performance, Low Cost Inertial MEMS: a Market in Motion!” in *Proceedings of Inertial Sensors and Systems 2012* (2012).
- 4) 今井秀孝, 計測の信頼性評価—トレーサビリティと不確かさ解析 (日本規格協会, 1996).
- 5) 山崎弘郎, 田中充, 計測技術の基礎 (コロナ社, 2009).
- 6) 大田明博他, “多重光路型レーザ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**, 612-620 (2006).
- 7) 大田明博, 振動加速度標準の高度化に関する研究, Ph. D. thesis, 電気通信大学 (2007).
- 8) H. Nozato, T. Usuda, A. Oota, and T. Ishigami, “Calibration of vibration pick-ups with laser interferometry: part IV. Development of a shock acceleration exciter and calibration system”, *Measurement Science and Technology* **21**, 065107 (2010).
- 9) T. Usuda, “Status Report NMIJ/AIST”, (BIPM CCAUV 8th meeting, 2012) May, 2012. http://www.bipm.org/cc/CCAUV/Allowed/8/AUV_NMIJ_2012_CCAUV2012-14.pdf.
- 10) U.S. Department of Transportation NHTSA, “Laboratory Test Procedure for Electronic Stability Control Systems”, (2008).
- 11) Erik G Takhounts, Vikas Hasija, Stephen A Ridella, Steve Rowson, and Stefan M Duma, “Kinematic rotational brain injury criterion (bric)”, *Enhanced Safety of Vehicles*, 11-0263(2011).
- 12) “ISO 6487: 2012 Road vehicles – Measurement techniques in impact tests – Instrumentation”, (2012).
- 13) U.S. Department of Transportation NHTSA, “Occupant crash protection”, (1999).
- 14) C.M. Harris and A.G. Piersol, *Harris' shock and vibration handbook*, Vol. 5 (McGraw-Hill, 2002).
- 15) M. Born, E. Wolf, and A.B. Bhatia, *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light* (Cambridge University Press, 1999).
- 16) P Castellini, M Martarelli, and EP Tomasini, “Laser Doppler Vibrometry: Development of advanced solutions answering to technology's needs”, *Mechanical Systems and Signal Processing* **20**, 1265-1285 (2006).
- 17) 江刺正喜, *MEMS マテリアルの最新技術* (シーエムシー出版, 2007).
- 18) “ISO 16063-15 Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 15: Primary angular vibration calibration by laser interferometry”, (2006).
- 19) A. Dunworth, “Digital instrumentation for angular velocity and acceleration”, *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* **18**, 132-138 (1969).
- 20) G.T. Jankauskas, JR La Course, and DE Limbert, “Optimization and analysis of a capacitive contactless angular transducer”, *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* **41**, 311-315 (1992).
- 21) L. Zhang and J. Peng, “Calibrating angular transducer using sinusoidal and shock excitation”, in *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1457 (2012) p. 176.
- 22) 多摩川精機, *ジャイロセンサ技術* (東京電機大学出版局, 2011).
- 23) EJ Post, “Sagnac effect”, *Reviews of Modern Physics* **39**, 475 (1967).
- 24) K.U. Schreiber, T. Kluegel, J.-P.R. Wells, R.B. Hurst, and A. Gebauer, “How to detect the Chandler and the annual wobble of the earth with a large ring laser gyroscope”, *Physical Review Letters* **107**, 173904 (2011).
- 25) M.F. Nader, H. Igel, A. M.G. Ferreira, D. Kurrle, J. Wassermann, and K.U. Schreiber, “Toroidal free oscillations of the Earth observed by a ring laser system: a comparative study”, *Journal of Seismology*, 1-11 (2012).
- 26) David M Rozelle, “The hemispherical resonator gyro: From wineglass to the planets”, in *Proceeding 19th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting* (2009) pp. 1157-1178.
- 27) M. Kasevich, “Precision atom interferometry”, *Bulletin of the American Physical Society* **57** (2012).
- 28) 熊谷秀夫, “移動体制御における MEMS ジャイロの台頭”, *精密工学会誌* **77**, 8-11 (2011).
- 29) “IEEE std 671-1985 (R2008) Specification Format Guide and Test Procedure for Non Gyroscopic Inertial Angular Sensors”, (2008).
- 30) “ISO 5347-7 Methods for the calibration of vibration and shock pick-ups – Part 7: Primary calibration by centrifuge”, (1993).
- 31) “IEC 62133 ed2.0: Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes - Safety

- requirements for portable sealed secondary cells, and for batteries made from them, for use in portable applications”.
- 32) 矢野経済研究所, “民生用加速度・角速度センサの世界市場に関する調査結果 2012”, (2012).
- 33) Yole Development, “Gyroscopes and IMUs for Defence, Aerospace & Industrial: Market Report 2012–2017”, (2012).
- 34) Masami Aga and Akio Okada, “Analysis of vehicle stability control (VSC)’s effectiveness from accident data”, in *PROCEEDINGS OF 18TH INTERNATIONAL TECHNICAL CONFERENCE ON THE ENHANCED SAFETY OF VEHICLES, HELD NAGOYA, JAPAN, 19–22 MAY 2003* (2003).
- 35) H Baum, 藤原徹, T Geißler, 城所幸弘, U Westerkamp, “自動車横滑り防止装置の費用便益分析”, GRIPS Policy Information Center Discussion Paper (2009).
- 36) Elecia White and Jose A Rios, “FAA Certification of a MEMS Attitude and Heading Reference System”, in *Proceedings of the 2002 National Technical Meeting of The Institute of Navigation* (2001) pp. 158–169.
- 37) Toshiaki Tsujii, Takeshi Fujiwara, Yoshimitsu Suganuma, Hiroshi Tomita, and Ivan Petrovski, “Development of INS-Aided GPS Tracking Loop and Flight Test Evaluation”, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration* 4, 15–21 (2011).
- 38) 中村揚介, 大谷崇, 高橋康之, 井上浩一, 平子敬一, “小型実証衛星 4 型 (SDS-4) の研究開発 (宇宙応用シンポジウム)”, 電子情報通信学会技術研究報告. SANE, 宇宙・航行エレクトロニクス 111, 7–10 (2011).
- 39) UNECE, “ECE/TRANS/180/Add.8 Electronic stability control systems”, .
- 40) Society of Automotive Engineers, “Instrumentation for Impact Test Part 1, Electronic Instrumentation”, (1995).
- 41) 国土交通省, “TRIAS 47-1993 前面衝突時の乗員保護の試験方法”, (1993).
- 42) UNECE, “Protection of occupants against frontal collision”.
- 43) “ISO/FDIS 13482 Robots and robotic devices - Safety requirements for personal care robots”.
- 44) International Disk Drive Equipment and Materials Association, “IDEMA R1-98 : HDD Handling Environment Assessment & Simulation for Procedure Using Test Tailoring”.
- 45) J Bartholomeycz, S Zimmermann, U Breng, W Gutmann, M Hafen, E Handrich, M Huber, U Kempfer, H Kopmann, J Kunz, *et al.*, “MEMS based inertial measurement unit for attitude and heading reference systems”, in *Integration Issues of Miniaturized Systems-MOMS, MOEMS, ICS and Electronic Components (SSI), 2008 2nd European Conference & Exhibition on (VDE, 2008)* pp. 1–8.
- 46) “IEC 62047-20: Semiconductor devices - Microelectromechanical devices - Part 20: Gyroscopes”.
- 47) L.O. Thielman, S. Bennett, C.H. Barker, and M.E. Ash, “Proposed IEEE coriolis vibratory gyro standard and other inertial sensor standards”, in *Position Location and Navigation Symposium, 2002 IEEE* (IEEE, 2002) pp. 351–358.
- 48) R.K. Curey, M.E. Ash, LO Thielman, and CH Barker, “Proposed IEEE inertial systems terminology standard and other inertial sensor standards”, in *Position Location and Navigation Symposium, 2004. PLANS 2004* (IEEE, 2004) pp. 83–90.
- 49) “IEEE std 1431-2004 (R2010) Specification Format Guide and Test Procedure for Coriolis Vibratory Gyros”, (2010).
- 50) “IEEE std 528-2001 (R2007) Standard for Inertial Sensor Terminology”, (2007).
- 51) “IEEE std 1559-2009 Standard for Inertial Systems Terminology”, (2009).
- 52) T. Usuda and T. Kurosawa, “Calibration methods and their uncertainty for vibration transducers”, *Metrologia* 36, 375–383 (1999).
- 53) 野里英明他, “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, 800–806 (2011).
- 54) “ISO 16063-11 Methods for the calibration of vibration and shock transducers - Part 11: Primary vibration calibration by laser interferometry”, (1999).
- 55) “ISO 16063-21 Methods for the calibration of vibration and shock transducers - Part 21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer”, (2003).
- 56) 白田孝, 振動加速度計測の高度化に関する研究, Ph.D. thesis, 東京工業大学 (2000).
- 57) “ISO 16063-13 Methods for the calibration of vibra-

- tion and shock transducers – Part 13: Primary shock calibration using laser interferometry”, (2001).
- 58) “ISO 16063-22 Methods for the calibration of vibration and shock transducers - Part 22: Shock calibration by comparison to a reference transducer”, (2005).
- 59) W.S. Cheung, “IMPROVED FEATURES OF ANGULAR VIBRATION EXCITERS”, Proceedings of IMEKO TC-22 Symposium, Daejeon, Korea (2012).
- 60) T. Usuda, E. Furuta, A. Ohta, and H. Nakano, “Development of laser interferometer for a Sineapproximation method”, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 4827 (2002) pp. 29–36.
- 61) T. Usuda, A. Ohta, T. Ishigami, O. Fuchiwaki, D. Misaki, H. Aoyama, and S. Sato, “The current progress of measurement standards for vibration in NMIJ/AIST”, in *Proceedings of SPIE*, Vol. 5503 (2004) pp. 30–38.
- 62) A. Ohta, T. Usuda, T. Ishigami, H. Aoyama, and S. Sato, “Development of primary calibration system for vibration acceleration standard extending to higher frequency range”, in *Proc. of 12th International Congress on Sound and Vibration* (2005).
- 63) 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 & 1st TC22, Mexico, ID-103 (2007).
- 64) T. Usuda, A. Oota, H. Nozato, T. Ishigami, Y. Nakamura, and K. Kudo, “Development of charge amplifier calibration system employing substitution method”, in *Proceedings of the IMEKO TC3, TC16 and TC22 International Conference*, Vol. 106 (2007).
- 65) A. Oota, T. Usuda, and H. Nozato, “Correction and evaluation of the effect due to parasitic motion on primary accelerometer calibration”, *Measurement* 43, 719–725 (2010).
- 66) A. Oota, T. Usuda, H. Nozato, T. Ishigami, and T. Kikuchi, “Estimation of uncertainty contribution of transverse sensitivity and vibration distribution on primary accelerometer calibration”, in *XIX IMEKO World Congress, Lisbon, Portugal (Sep. 2009)* (2009).
- 67) “BIPM CCAUV Web Page”, <http://www.bipm.org/en/committees/cc/cauv/>.
- 68) HJ von Martens, C. Elster, A. Link, A. Täubner, and W. Wabinski, “CCAUV. V-K1 Final Report”, *Metrologia* 40, 09001 (2003).
- 69) “Technical Protocol of the CIPM Key Comparison CCAUV.V-K2”, (2009), http://kcdb.bipm.org/appendixb/appbresults/CCAUV.V-K2/CCAUV.V-K2_Technical_Protocol.pdf.
- 70) HJ von Martens, C. Elster, A. Link, W. Wöger, and PJ Allisy, “Linking the results of the regional key comparison APMP. AUV. V-K1 to those of the CIPM key comparison CCAUV. V-K1”, *Metrologia* 41, 09002 (2004).
- 71) Q. Sun and I. Veldman, “Final report on supplementary comparison APMP. AUV. V-S1”, *Metrologia* 50, 09001 (2013).
- 72) “Technical Protocol of the APMP Key Comparison APMP.AUV.V-K1.1”, (2010), http://kcdb.bipm.org/appendixb/appbresults/CCAUV.V-K1/APMP.AUV.V-K1.1_Technical_Protocol.pdf.
- 73) H. Nozato, T. Usuda, A. Oota, T. Ishigami, and K. Kudo, “Development of shock acceleration calibration machine in NMIJ”, in *Proc. of IMEKO TC-22 Symposium, Merida, Mexico*.
- 74) H. Nozato, T. Usuda, A. Oota, S. Okamoto, K. Yamamoto, H. Unejima, K. Kawaguchi, and I. Tamio, “A round robin test of shock acceleration calibration among two private laboratories and NMIJ”, in *Proceedings of IMEKO 2010 TC3, TC5 and TC22 Conferences* (2010) pp.225–228.
- 75) A. Täubner and H.J. von Martens, “Measurement of angular accelerations, angular velocities and rotation angles by grating interferometry”, *Measurement* 24, 21–32 (1998).
- 76) “BIPM Key Comparison Database”, http://kcdb.bipm.org/appendixc/AUV/DE/AUV_DE.pdf.
- 77) “EURAMET TC Project Details”, (2012), http://www.euramet.org/index.php?id=1858&no_cache=1&ctcp_projects%5Bcmd%5D=details&ctcp_projects%5Buid%5D=188.
- 78) “Technical Protocol of the Bilateral Comparison in Primary Angular Vibration Calibration”, (2012), http://kcdb.bipm.org/AppendixB/appbresults/CCAUV.V-S1/CCAUV.V-S1_Technical_Protocol.pdf.
- 79) Guillermo Silva-Pineda (BIPM CCAUV 8th meeting, 2012) June, 2012.
- 80) 尾崎元美, 相澤雄助, 柏瀬伸行, 石塚丈洋, “高衝撃下での信管用光学・電子部品の耐衝撃性評価法について”, (平成 24 年度防衛技術シンポジウム, 2012)

- Nov. , 2012.
- 81) Tsukasa Watanabe, Hiroyuki Fujimoto, and Tadashi Masuda, "Self-Calibratable Rotary Encoder", *Journal of Physics: Conference Series* 13, 240-245 (2005).
- 82) 渡部司, "ロータリエンコーダに角度標準は必要か - 角度偏差の「見える化」を可能にしたロータリエンコーダの開発", 構成学 1, 296-304 (2008).
- 83) T Masuda and M Kajitani, "High accuracy calibration system for angular encoders", *Robotics and Mechatronics* 5, 4480 (1993).