

# 衝撃加速度標準の現状と供給に関する調査研究

野里 英明\*  
(平成 17 年 10 月 31 日受理)

## A Survey on Status and Supply of Shock Acceleration Standard

Hideaki NOZATO

### Abstract

This report is descriptive of a status on acceleration standard using vibration and shock methods in national metrology institutes, and further, analysis about a range of the acceleration standard to meet the needs in a national industrial market. As a result, it is found that the acceleration standard with a typical value of 200 ~ 5000 m/s<sup>2</sup> is desired in the market, typically represented by automobile and electronic instrument industries. However, since it is difficult to generate precise vibration acceleration in the range more than 200 m/s<sup>2</sup>, the acceleration generation using a shock method would be required. The desired acceleration regime has been realized using a collision motion between two rigid bodies only in PTB and supplied as a shock acceleration standard. In this paper, each certain specification of excitation and diagnostic systems for shock acceleration calibration is evaluated.

### 1. 加速度計測の必要性

加速度値は、物体の運動を表す物理量であると同時に、自動車及び宇宙・航空、家電業界等において、工業製品の対人安全性並びに品質安定性という観点から重要なパラメータと位置付けられている。産業界において、加速度計測は物的・人的安全性評価のみならず広範な用途で行われており、それらの事例を図1に紹介する。加速度の高いものでは宇宙・航空産業での衝撃測定が挙げられ、低加速度では地震の評価指標である震度測定が挙げられる。IT産業や半導体業界においては、携帯電話やHDD、電子機器類等の衝撃試験や振動負荷試験に利用されており、データ損失や回路の誤動作を未然に防止する高付加価値として提供されている。また、自動車業界においても対人安全性という観点から衝撃実験の評価手段として使用されており、加速度計測の重要性は飛躍的に増大している。

近年、従来に比べより高い衝撃性能を持つ製品開発が求められており、同時にその製品がユーザの必要条件を高いレベルで満足させることが必要とされる。民間企業においては軽量で高剛性の材料と衝撃吸収材で構成され

た製品に対する衝撃特性、及び落下時の衝突姿勢に応じた製品の衝撃特性をシミュレーション並びに加速度計測の両面から評価して、振動及び衝撃等に対する許容条件の定量化に取り組んでいる。従って、衝撃耐性の定量化には再現性の高い実験的観測が重要となる。加速度値の許容条件を明示することは製品使用者に安全で快適な生活環境を提供することにつながり、高精度で信頼性の高い加速度計測が必要とされる。

20世紀後半から通商のグローバル化に伴い、国外及び国内のユーザ間において加速度計測の同等性が重要視さ

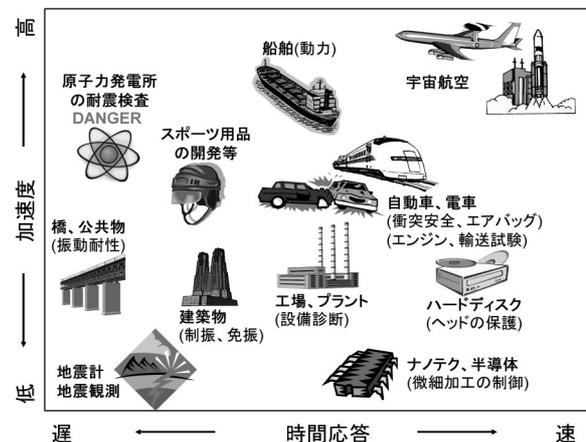


図1 産業界における加速度計測の用途

\* 計測標準研究部門 音響振動科

れてきた。その為には、国家標準研究所が国際相互承認に基づいた計量標準を供給することが必要であり、その計量標準がユーザ側の計測条件に合った標準でなければならない。つまり、ユーザに対して効果的な加速度標準を供給するには、提供する加速度標準が校正ニーズと整合すること、並びに加速度計の校正方法、その校正技術、不確かさ評価、さらには国際的な整合性を満足するトレーサビリティ体系を我々NMJ (National Metrology Institute of Japan) が時宜に応じて提供しなければならない。本稿ではこの初期段階として、産業界の校正ニーズに適合する加速度領域及び加速度発生装置(これ以降、加振器と呼ぶ)の現状、校正装置開発に必要な技術について評価及び検討を行い、調査報告書として取りまとめた。

## 2. 加速度計とその市場規模

物体の運動を計測する測定者(あるいは測定装置)は、絶対座標系において静止していなければならない。測定者が常に絶対座標の原点に固定されているならば、測定対象の座標(位置)を計測することで物体の運動が計測できる。これは変位センサやレーザ干渉計による測定に相当する。このような測定系を構成できない場合は、ばねとおもりからなるサイズモ系を構成し、測定対象とは無関係な基準位置を作り出すことで実現できる。変位、速度、加速度はそれぞれ微分・積分の関係にあるが、サイズモ系では多くの場合、直接測定するのは測定対象物の加速度である。その為、変位センサやレーザ干渉計による運動(変位または速度)計測と区別するために、このようなサイズモ系からなる計測センサを加速度計と呼ぶ。加速度計は測定対象の素材や表面の特性に関わらず測定が可能であること、レーザ干渉計に比べ安価であること等から、工業的に最も広く利用されている。また、地震や移動機械の振動及び衝撃測定など、外部に絶対座標を求めることが困難な場合は、加速度計による測定が加速度計測の唯一の手段となる。

さて、加速度は長さと時間の二つの基本量から成り立つが、サイズモ系からなる加速度計の出力信号自体は基本量となら結びつきはない。このため、レーザ干渉計を用いて、絶対座標下で長さ標準にトレーサブルな変位計測を行って加速度計の一次校正をしなければならない。

加速度計は、前述の振動及び衝撃計測ばかりでなく、静止状態の検知及び移動速度や距離の算出にも使用される。身の回りでは、民生機器の衝撃回避機能及び自動車のエアバック、ゲーム機の画面操作、ナビゲーションシステムにおける位置・速度計測が挙げられ、工業計測に

おいては輸送の振動検査や構造物の耐震評価などにも用いられる。私達を取り巻く環境において加速度を伴う現象は多種多様であることから、各現象の運動レベル(変位、速度、加速度の振幅)及び応答時間に応じて、適切な加速度計を選択すべきである。ここでは代表的な加速度計として電荷出力型加速度計を紹介し、その測定原理を図2に示す。加速度値の出力要素は圧電素子であり、三角柱のセンターポストと錘重を結合させるスプリング(ばね)の役割を果たしている。圧電素子には錘重の質量とそれに作用する加速度の積に相当する力(慣性力)が働き、慣性力に比例した電荷が生じる。錘重の質量は不変である為、加速度に比例した電荷が電圧として出力される。圧電型加速度計においてはDC加速度を検出できないが、歪みゲージ型や静電型加速度計ではDC成分の検出が可能である。

最近では半導体微細加工技術の応用、いわゆるマイクロマシニング(MEMS)技術により、シリコン基板上にセンサやアンプ、信号処理回路を内蔵した半導体センサが量産されており、その需要が高まっている。その一例として、半導体センサの市場推移を図3に示す。2004年度実績では、加速度計・出荷数量は前年比24.6%増の1億6230万個、出荷金額は前年比14.8%増の521億円に達

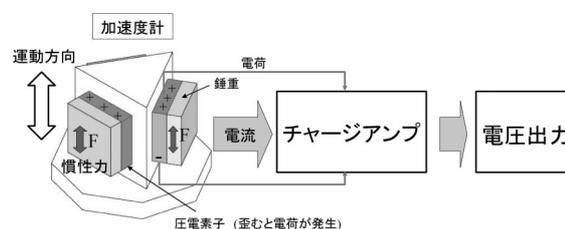


図2 圧電式加速度計の計測原理

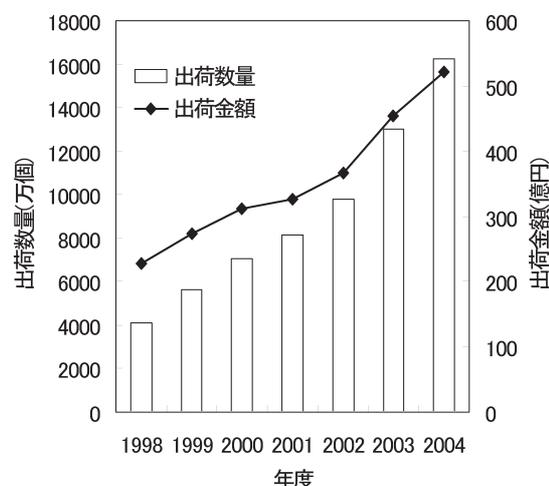


図3 半導体センサにおける出荷数量(棒)及び出荷金額(折線)の年度推移

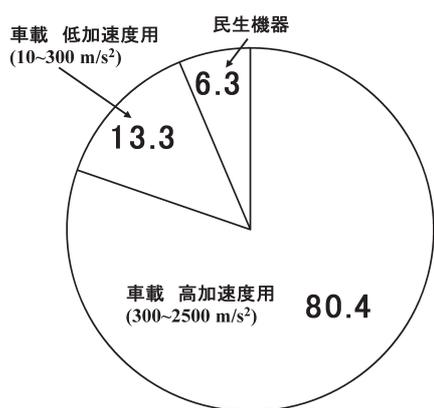


図4 半導体センサの需要分野別内訳 (2004年度実績)

し、1998～2004年度までの年平均成長率は数量ベース25.8%、金額ベース14.8%となっている<sup>1)</sup>。半導体センサの需要分野は、図4に基づくと車載・高加速度用(300～2500 m/s<sup>2</sup>)と車載・低加速度用(10～200 m/s<sup>2</sup>)、民生機器の3分野に大別されるだろう。車載・高加速度用では、主にエアバッグ用途で使用されており、現在欧州においてサイドエアバッグの搭載率が上昇しているためだと推測される。車載・低加速度用の用途としては、サスペンション制御や4WD-ABS(アンチロック・ブレーキシステム)等で、自動車の動的制御を行う車両安定化向けが挙げられる。また、米国を中心として、SUV(スポーツ・ユーティリティ・ビークル)向け横転防止装置等の新規用途での搭載が検討されており、より一層の市場拡大が考えられる。民生機器では、2003～2004年にかけて2軸加速度計のコストダウンが進んだことから、モバイルや家電機器等への採用が活発化している。さらに近年では、国内エレクトロニクスメーカーを中心に3軸加速度計の製品化が相次ぎ、携帯電話やHDDオーディオプレーヤーに採用されており、今後の需要拡大が推測される。

### 3. 加速度計の校正方法

加速度計の校正には加振器を用いた加速度運動の発生が必要不可欠である。代表的な加振方法としては、振動方式と衝撃方式が挙げられる。それぞれの加速度波形の典型例を図5に示す。振動方式では周期的な加速度波形が発生されることから、測定回数を増やすことで計測不確かさを小さくできる。対して、衝撃方式ではパルス的な加速度波形が発生されるので、測定回数を増やして計測不確かさを小さくすることはできない。その為、加速度運動の再現性が重要になる。

振動加速度校正の国際的な工業規格ISO 16063-11<sup>2)</sup>においては、レーザ波長を参照基準とした計数法及び零点

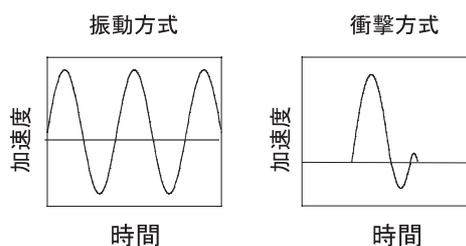


図5 振動方式(左)と衝撃方式(右)で発生される加速度波形の典型例

法、正弦波近似法により加速度計の一次校正を規定している。振動方式による加速度計の国際比較は2000～2001年に日本を含む参加12ヶ国間で行われた<sup>3)</sup>。しかし、衝撃加速度校正はその国際工業規格であるISO 16063-13<sup>4)</sup>は存在するものの、国際比較は行われておらず、またPTB(Physikalisch-Technische Bundesanstalt)のみCMC登録されているのが現状である。

振動方式による加速度標準の供給範囲について各国標準研究所の現状を報告する。表1に示すように、多くの国家標準研究所において加速度振幅200 m/s<sup>2</sup>程度が上限となっている。何故なら加速度振幅の増大に伴い、測定装置自体に振動や歪み等の相対運動が発生するからである。この結果、レーザ干渉計が絶対座標に固定されているという仮定が満たせず、校正の不確かさを悪化させる要因となる。さらに振動数が高くなり変位振幅が小さくなるにつれて加振器の振動方向に対する横ぶれが表面化してくる。これらの理由から、振動方式では加速度振幅200 m/s<sup>2</sup>以上の加速度計校正は事実上困難である。

衝撃方式による加速度標準については、PTBのみがCMC登録されており、その供給範囲について紹介する。PTBにおいては振動方式では校正が難しいとされる200 m/s<sup>2</sup>以上の加速度に対して、加振原理の異なる二種類の装置を用いて100～100000 m/s<sup>2</sup>の加速度領域を実現している。両装置の詳細は後述するが、弾性波の伝ばや剛体の衝突で発生される加速度を計測して、不確かさ1～2%で標準供給を行っている。上述の調査結果から、振動方式及び衝撃方式を用いた加速度標準の供給範囲は概ね図6のように示されるであろう。

表1 各国標準研究所における振動加速度の一次校正範囲

各国の標準研	周波数(Hz)	加速度(m/s <sup>2</sup> )	不確かさ(%, k=2)
日本NMIJ	1-5 k	0.5-100	0.3-1.5
ドイツPTB	0.1-20 k	0.1-200	0.2-0.5
アメリカNIST	2-20 k	0.2-200	1.0-3.0
韓国KRISS	20-5 k	10-100	0.5-1.0

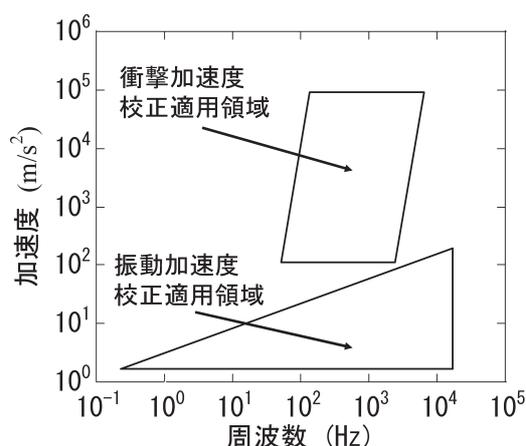


図6 振動方式と衝撃方式によって校正可能な加速度領域

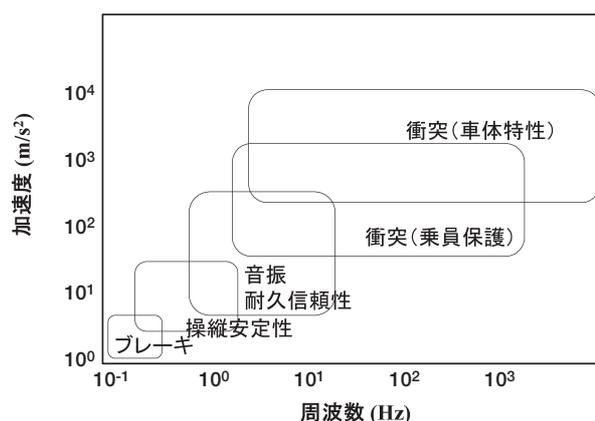


図7 自動車の製品試験で行われる加速度計測の主要用途及びその加速度領域

#### 4. 産業界における加速度標準のニーズ

200 m/s<sup>2</sup>以上の加速度標準(振動方式では校正が困難)について、産業界のニーズ調査を報告する。図4で前述した加速度計の主要需要先である自動車業界に着目してみると、その工業的目安の一例としては、1984年にアメリカで採択された衝突安全の客観的基準FMVSS208項が挙げられる。本基準では、「時速30マイル(48 km/h)で硬い壁に衝突させた時、ドライバーに作用する加速度は60 G (588 m/s<sup>2</sup>)以下であるべき」と規定している<sup>5)</sup>。また、国内の衝突安全テスト基準(JNCAP)においても、「50 km/hでコンクリート壁にフロント前面衝突した時、その胸部傷害値が加速度で60 G (588 m/s<sup>2</sup>)以下であればよい」と規定している<sup>6)</sup>。もう一つ工業的目安の事例として挙げると、頭部損傷基準(Head Injury Criteria: HIC)が挙げられる。その定義を式(1)に記す。

$$HIC = \left[ (t_2 - t_1) \left( \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \alpha dt \right)^{2.5} \right]_{\max} \quad (1)$$

ここで、 $\alpha$ は加速度を表しており、 $t_1$ 、 $t_2$ はそれぞれ加速度が作用する時間の始点と終点を意味する。このHICパラメータは、衝撃が脳に及ぼす影響を数値化したもので、瞬間的な加速度値の規定でなく、加速度が作用する時間を考慮して算出している。このパラメータは自動車業界だけでなく、衝撃緩和材やシートベルト等の製品開発における目安としても採択されている。このパラメータにおいて脳に深刻な損傷が残らないとされる目安は、 $HIC < 1000$ かつ $G_{\max} < 200$  G (1960 m/s<sup>2</sup>)とされている<sup>6)</sup>。

自動車業界で行われる加速度計測の用途を図7にまと

めた。自動車は様々な開発技術の結晶であり、広帯域な加速度と応答時間に適合する計測が必要とされる。対人・車体衝突の実機テストは各自動車メーカーにおいて入念に行われており、衝突時の頭部や胸部加速度値の計測は製品開発上重要である。また、先に紹介した車載・高加速度用半導体センサ(300~2500 m/s<sup>2</sup>)はエアバッグやサイドエアバッグの動作制御に利用されており、安全な運転環境を提供する一翼を担っている。

民生機器(電子機器類)の分野に目を向けると、携帯に便利で様々な環境に対応可能なノートPCや携帯電話の普及が進んでおり、その耐衝撃性能が重要視されている。ノートPCの開発には各メーカー側の開発及び対策が進んでおり、特に2.5インチ、1.8インチといった小型HDDは高い耐衝撃性能が必要とされる。例えば、HDDを机の上に立てた状態で、横に倒しただけで数百m/s<sup>2</sup>以上の衝撃を受ける。あるメーカーではHDDの保護機能として、ノートPCに3軸加速度計を搭載して、衝撃や振動を検知したら磁気ヘッドをHDDの記録領域外に退避させてヘッドクラッシュを回避させている。また、HDDのサスペンションアームもより軽量化、高剛性化を果たしており、図8に見られるように動作時の耐衝撃性は3000 m/s<sup>2</sup>、非動作時の耐衝撃性は10000 m/s<sup>2</sup>程度にまで向上している<sup>7)</sup>。これらの効果により、高さ90 cmからの衝撃落下試験にも耐えるノートPCが製品化されている。

宇宙・航空業界では、ロケットや飛行機は一台当たりの単価が高く、巨額の経費を要することから搭載される機器には高い信頼性が求められる。部分的な機器試験ではその評価が難しく、高コストを要する実機試験では高い信頼性を持つ加速度計測が必要とされる。エンジン点火、ロケットの段階分離で衝撃源付近には数万~数十万

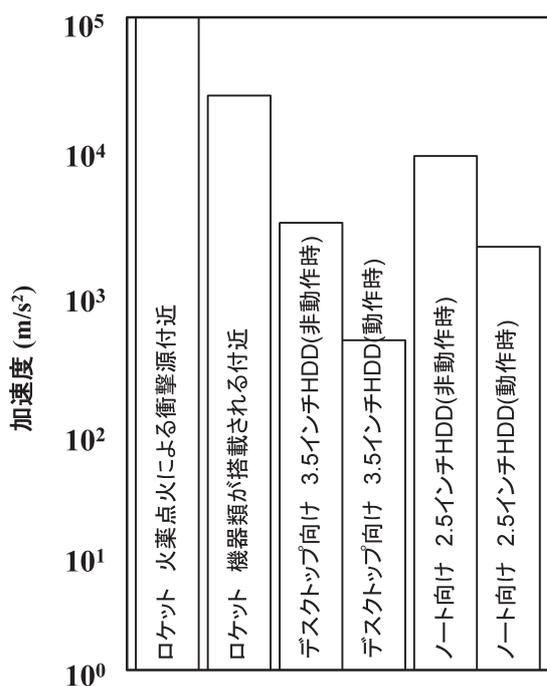


図8 ロケットに搭載される機器類及びHDDで必要とされる耐衝撃性能

m/s<sup>2</sup>の衝撃加速度が発生するが、機器類は衝撃源から離してソフトマウントされることにより、加速度は数百～数千 m/s<sup>2</sup>にまで抑制される。実際、旧宇宙科学研究所のMVロケットにおいては、ノーズフェアリング開頭時に数千 m/s<sup>2</sup>の衝撃加速度の発生が報告されている<sup>8)</sup>。このことから、ロケットや人工衛星等の信頼性評価には数百～数千 m/s<sup>2</sup>の加速度計測が重要となってくるであろう。

上述した調査及び検討結果を受けて、数百～数千 m/s<sup>2</sup>の加速度校正ニーズが高いことが明らかとなった。図9に各ユーザ（メーカーや事業者）が要望する加速度領域及び開発すべき装置目標（黒の破線で表示：200～5000 m/s<sup>2</sup>）を示す。さらにHICパラメータの閾値であるHIC=1000

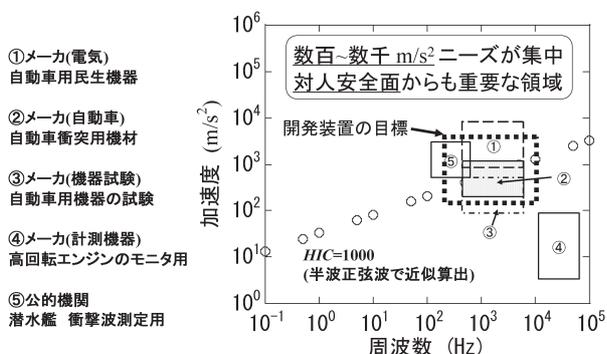


図9 産業界において要求される加速度領域及び標準供給すべき加速度領域

(白抜き点)も同様な加速度領域に該当することから、数百～数千 m/s<sup>2</sup>の加速度標準供給は対人安全性という重要な側面も持つであろう。しかし、その加速度領域には高い校正ニーズがあるにも関わらず、ほとんどの国家標準研究所では標準が整備されていない。ISO16063-11に基づいた国家標準研究所による数百 m/s<sup>2</sup>未満に於ける振動校正結果を元に計測が行われているのが現状である。実情に見合った校正がなされていない（測定領域に対して校正値の担保がされていない）状況が危惧されることから、NMIJにおいても数百～数千 m/s<sup>2</sup>の加速度標準を供給する意義は大きく、200～5000 m/s<sup>2</sup>の加速度を発生可能とする加振器を製作しなければならない。

### 5. 衝撃加速度標準の現状

PTBにおいては加速度の発生原理が異なる二種類の校正装置（高域加速度校正装置・中域加速度校正装置）を用いて、100～100000 m/s<sup>2</sup>の衝撃加速度標準を供給しており、またCMC登録がなされている唯一の国家標準研究所である。PTB以外の標準研究所では、NIST (National Institute of Standards and Technology) が衝撃加速度標準の一次校正を謳っているが、CMC登録されていないのが実情である。

#### PTB-高域加速度校正装置

この装置で発生される加速度は弾性波の伝ばによって実現される。その校正概念を図10に示す。校正原理を簡単に説明すると、長い金属棒中を伝ばする弾性波によって衝撃加速度を発生させて、その変位計測にはHe-Neレーザ干渉計を用いている。弾性波によって衝撃加速度を発生させる手法は、材料の圧縮試験に端を発し、歴史的にはB. Hopkinsonに提案されたSplit-Hopkinson Pressure Bar Methodの原理的装置にまでさかのぼることができる<sup>9)</sup>。発生できる加速度は、縦弾性波速度と歪みの時間微分である変形速度によって与えられる。縦弾性波速度は分散がなく材質によって一意に決定されるので、変形速度の調節や異なる材質を使用することで加速度を調整する。その加速度波形は半波正弦波で近似でき、PTBの場合、ピーク加速度は不確かさ1%以内で1000～100000 m/s<sup>2</sup> (2～5 kHz) を実現している。

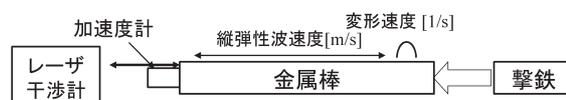


図10 PTBにおける高域加速度校正装置

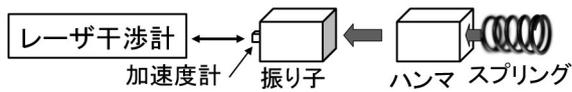


図11 PTBにおける中域加速度校正装置

### PTB-中域加速度校正装置

この装置で発生される加速度は剛体間の衝突によって実現される。その校正概念を図11に示す。校正原理を簡単に説明すると、剛体間(振り子とハンマ：円柱状のスティール)の衝突運動によって加速度を発生させて、その変位計測は高域加速度校正と同様に He-Ne レーザ干渉計で行っている。計測すべき加速度は剛体間の衝突運動によって発生させなければならないので、もし衝突時に振り子内部に弾性波が生ずると計測ノイズとなる。ハンマの前面(衝突面)にはパッド(緩衝材)が取り付けられており、衝突時に振り子内部に弾性波が発生しないような対策が採られている。高域加速度校正装置と同様にその加速度波形は半波正弦波で近似でき、そのピーク加速度は不確かさ2%以内で  $100 \sim 5000 \text{ m/s}^2$  ( $50 \sim 1000 \text{ Hz}$ ) を実現する。またPTBでは、この装置を用いた標準的な校正条件は、ピーク加速度  $2500 \text{ m/s}^2$  でパルス幅(持続時間)  $2 \text{ ms}$  ( $250 \text{ Hz}$ ) と設定されている。

## 6. 今後の展望

### 衝撃加速度用加振器の構想

加速度計測に対する校正ニーズの調査及び分析を行った結果、数百～数千  $\text{m/s}^2$  の加速度領域に需要が高いこと

が判明した。これを受けて、数百～数千  $\text{m/s}^2$  の加速度が発生できる加振器を開発すべきで、PTBにおいては剛体の衝突運動でその加速度領域を実現している。加振原理はバネ式、空気圧方式など今後さらなる検討を要するが、剛体間衝突を利用した加速度運動の採用が妥当と推察される。開発すべき校正装置の構想を図12に示す。振り子及びハンマの材質やその質量は検討を要するが、ハンマの振り子との衝突面には適当な緩衝材を取り付け、振り子に加振方向への推進力のみを伝達する必要がある。上述した方法論に基づいて、衝撃加速度校正装置の測定系及び加振系の考察を以下に行う。

### ・測定系

測定系にはレーザー干渉計を検討中であり、その光学系を図12に示す。レーザー干渉装置には He-Ne レーザ ( $\lambda=632.8 \text{ nm}$ ) を用いたホモダイン方式が検討されており、変位分解能は使用するレーザの半波長で決定される。光学系の仕組みを説明すると、偏光板で直線偏光となったレーザ光は  $1/4$  波長板により円偏光となり、ビームスプリッタ (BS) を通過後に参照光と測定光へ分離される。加速度計端面で反射された測定光は参照光との干渉後に、ウォラストンプリズムにより水平及び直角偏光成分へと分離され、それぞれフォトダイオードで検出される。フォトダイオード単体の時系列信号から加速度計の位相特性を評価可能であり、さらに、その加速度運動が半波正弦波形で実現されるなら正弦波近似法を用いた位相特性評価も可能となる<sup>10)</sup>。

図12に示した中域衝撃加速度校正装置の構想を基に測定系の試算を行う。標本化定理によると、原信号に含ま

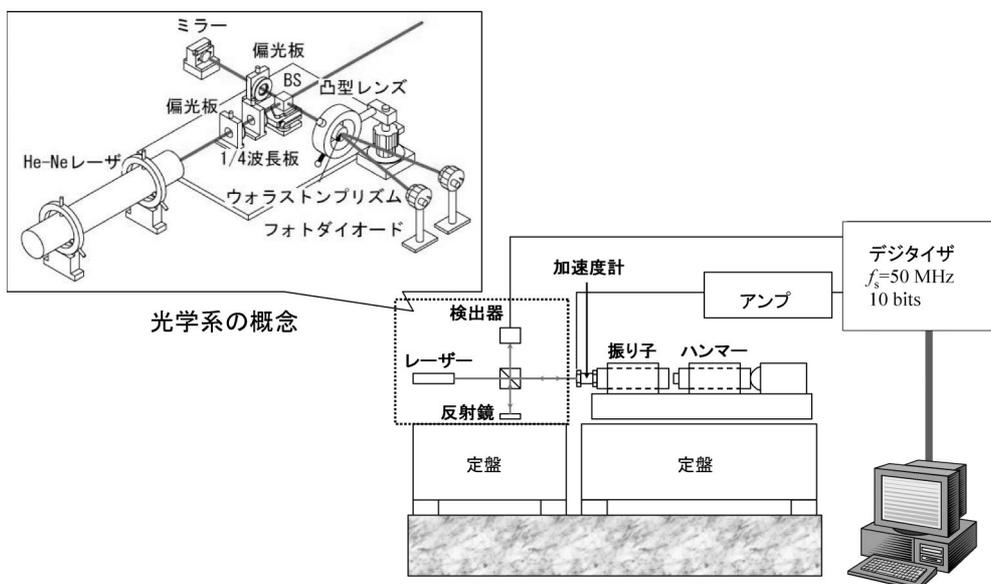


図12 開発すべき中域加速度校正装置の構想図及びレーザー干渉装置の原理

れる周波数の2倍の周波数でサンプリングを行うと原信号を復調できることが知られている。従って、レーザ干渉計で計測できる測定対象物の上限速度は、サンプリング周波数 $f_s$ を50 MHzとすると以下の式で表せる。

$$\frac{\lambda}{2} \times f_s \times \frac{1}{2} = 7.91 \text{ m/s} \quad (2)$$

レーザ干渉計による速度計測は、DC成分からその速度評価が可能であることから、ダイナミックレンジは、DC～7.91 m/sとなる。

半波正弦波で仮定される加速度波形から、レーザ干渉計で測定可能な速度領域を評価する。加速度波形とその速度波形は式(3)及び(4)で与えられる。

$$\alpha(t) = \alpha_0 \sin 2\pi ft \quad (3)$$

$$v(t) = \frac{\alpha_0}{2\pi f} (1 - \cos 2\pi ft) \quad (4)$$

ここで、 $\alpha_0$  (m/s<sup>2</sup>) と  $f$  (Hz) はそれぞれ加速度振幅と半波正弦波の振動周波数を表す。He-Neレーザを用いたレーザ干渉計の速度測定はDC～7.91 m/sのダイナミックレンジを持つことから、加速度運動の評価可能な加速度振幅と振動周波数は式(4)より次式で表せる。

$$0 < \frac{\alpha_0}{2\pi f} (1 - \cos 2\pi ft) < 7.91 \quad (5)$$

式(5)に基づいた速度分布を図13に示す。この結果から、200 Hz以上の振動周波数においては200～5000 m/s<sup>2</sup>の加速度振幅が測定可能であるが、200 Hz未満の振動周波数領域においては加速度振幅が4000 m/s<sup>2</sup>以上では測定不可能となる。この評価は50 MHzのサンプリング周波数と標本化定理に基づいた条件下で行った。 $f < 200$

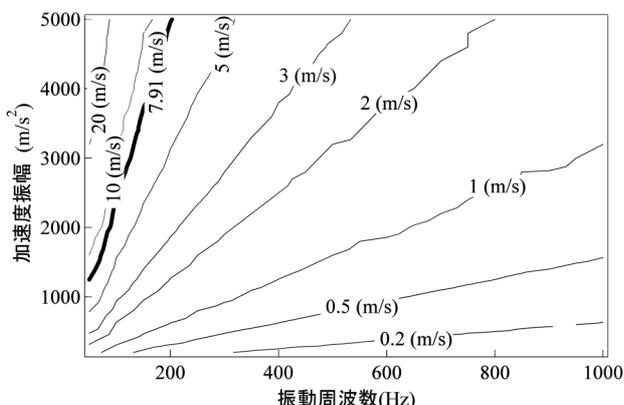


図13 ハンマ速度の振動周波数及び加速度振幅に対する依存性

Hz,  $\alpha_0 > 4000$  m/s<sup>2</sup>の速い現象を測定する為には、50 MHz以上のサンプリング周波数で干渉波形を記録するか、レーザ干渉装置を改良(ヘテロダイン式の導入)することが検討される。

#### ・加振系

衝撃加速度校正装置に搭載する加振器の加振原理について検討する。重力を作用力とする自由落下、人工的に作り出した外力(バネ、空気圧)を作用力とする方法が候補となる。ここでは、空気圧を利用して作用力を発生する方法を取り上げ、力学的観点からハンマの加振に必要な空気圧を評価する。

衝突前のハンマ速度を  $V$  とし、衝突後のハンマと振り子の速度を  $v, u$  とすると、運動量保存の法則とはねかえりの式( $e=1$ と仮定)から以下の式が成立する。

$$MV = Mv + mu \quad (6)$$

$$1 = -\frac{v-u}{V} \quad (7)$$

$M$  (kg) と  $m$  (kg) はそれぞれハンマ及び振り子の質量を表す。式(6)、(7)から式(8)を導く。

$$V = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{m}{M} \right) u \quad (8)$$

PTBと同仕様のハンマと振り子を用いた場合、ハンマと振り子は両方ともスチール製の円柱状(直径30 mm、長さ200 mm)であることから、底面積は  $15^2 \times 10^{-6} \pi$  m<sup>2</sup> で質量は1.1 kgと与えられる。これらの条件から、空気圧を  $P$  (Pa) とすると、下記の式が成立する。

$$\int F dt = mu = 15^2 \times 10^{-6} \pi P \Delta t = 1.1u \quad (9)$$

$\Delta t$  (s) は空気圧がハンマに作用する時間(作用時間)を意味する。ここで、先ほど試算したレーザ干渉計による速度計測で測定可能な上限値から、 $u=7.91$  m/sを代入する。式(9)から必要な空気圧と作用時間の関係を図14に示す。この結果から、作用時間が5～10 msであるなら  $1 \times 10^6 \sim 3 \times 10^6$  Paでハンマを加振できることが推察される。流体力学に基づいたガス圧による速度計算は、加速距離を十分にすることでガスの音速まで試験片の速度を達成できる<sup>11)</sup>。しかし、図12に示した衝撃加速度校正装置においては加速距離の制約やハンマに与える運動量等からPTBの校正装置を参考にしたほうが実績及び効率の面から有効であると判断した。

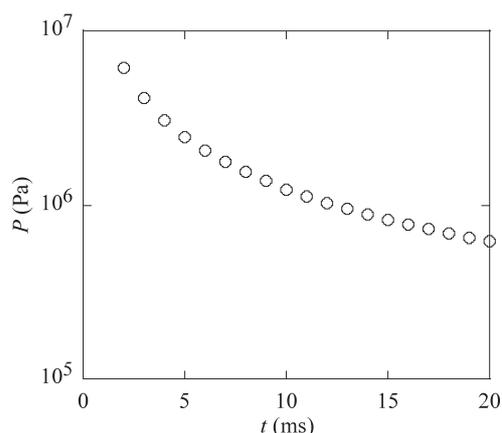


図14 ハンマの加振に必要な空気圧の作用時間依存性

## 7. まとめ

本調査論文では、衝撃加速度標準の現状と産業界に要求される加速度校正ニーズを示すと共に、適当な条件下の衝撃加速度運動に対してレーザ干渉計を用いた測定系の試算を行った。以下にその成果を示す。

1. 加速度標準の加振方式としては振動及び衝撃方式が挙げられ、各国標準研究所で振動方式により供給できる加速度振幅の上限は200 m/s<sup>2</sup>程度であった。その理由として、200 m/s<sup>2</sup>以上の加速度振幅では測定装置自体に振動や歪み等の相対運動が発生して、校正の不確かさを悪化させるからである。また、PTBにおいてのみ、衝撃方式を用いて200 m/s<sup>2</sup>以上の衝撃加速度の一次校正を行っており、CMC登録がなされている。
2. 振動方式による加速度計の国際比較は2000-2001年にかけて参加12ヶ国間で行われたが、衝撃方式を用いた加速度計の国際比較は行われていない。
3. 産業界における加速度標準の校正ニーズを整理した。その結果、自動車業界において対人・車体衝撃（数百～数千 m/s<sup>2</sup>）評価の観点からその需要が高く、宇宙航空業界や電子機器業界においても同様の傾向を示した。本調査研究から、200～5000 m/s<sup>2</sup>の加速度標準を早急に立ち上げる必要性を確認できた。
4. 200～5000 m/s<sup>2</sup>の衝撃加速度校正装置の開発に向け

て、加振系と測定系の試算を行った。加振原理に関しては空気圧を作用力とした剛体の衝突運動という力学的観点から考察した。また、測定系に関しては、He-Neレーザ干渉計を用いた変位計測ではサンプリング周波数を50 MHzとすると、200～4000 m/s<sup>2</sup> (50～1000 Hz)の加速度運動は測定可能であろう。

## 8. 謝辞

本調査研究における衝撃加速度標準の全般に関して、親切なるご指導ならびにご助言頂いた白田孝室長に深く感謝申し上げます。佐藤宗純科長、大田明博研究員には有益な情報提供や懇切なるご指摘を頂きました。また、強度振動標準研究室の皆様には大変お世話になりました。ここに厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) <http://www.yano.co.jp/pdf/press/050125.pdf>
- 2) ISO 16063-11: Methods for the calibration of vibration and shock transducers, Part 11: Primary vibration calibration by laser interferometry
- 3) H-J von Martens *et al*, *Metrologia* **40**, 09001 (2003).
- 4) ISO 16063-13: Methods for the calibration of vibration and shock transducers, Part 13: Primary shock calibration using laser interferometry
- 5) National Highway Traffic Safety Administration, Document 49 CER Ch. V (10-1-04 Edition) P520.
- 6) 別添23 前面衝突時の乗員保護の技術基準, 新・道路運送車両の保安基準 交文社 p979 平成16年1月.
- 7) <http://arena.nikkeibp.co.jp/qa/parts/20031031/106401/>
- 8) 小野田淳次郎, M-V型ロケットの構造・機構 宇宙科学研究所報告 特集第47号 2003年3月.
- 9) B. Hopkinson, *Collected Scientific Papers*, Cambridge University Press, 1921.
- 10) 白田孝, *Bulletin of NRLM* **49**, No.207 (2000).
- 11) S. K. Combs, *Rev. Sci. Instrum.* **64**, 1679 (1993).