

# 衝撃加速度を用いた加速度計の校正法について

中島 富男\*

Tomio Nakajima

近年、衝撃加速度による加速度計の校正方法がISO16063シリーズの規格の一環として制定された。衝撃加速度による加速度計の校正のためには、制御された衝撃加速度の発生が必要であり、ISOにおいては剛体運動による方法とホプキンソン棒を用いた方法が規格化された。本報では、それらのISOの規格を基に、衝撃加速度による加速度計校正法について、校正法の内容、衝撃加速度発生装置及び信号処理法を紹介する。また、校正のために必要となる振動加速度標準及び衝撃加速度標準供給の日本国内の動向、及び、平成17年度に導入したホプキンソン棒を用いた加速度計特性評価装置の概要についても紹介する。

キーワード：衝撃加速度、加速度計、校正方法、ホプキンソン棒

## 1. はじめに

機械や構造物の振動や衝撃現象を実験的に観察する手段として加速度計測を行うことが一般的である。加速度を計測するセンサは加速度計や加速度ピックアップ、または単に加速度センサと呼ばれる。本報では最も一般に使われる加速度計と呼ぶことにする。

加速度計を用いた実験が商取引に伴う場合や法規上の必要性がある場合には、使用する加速度計は、長さや質量を計測する計測器と同様に計量標準とのトレーサビリティが要求され、定期的な校正が必要となる。また、加速度計の経年劣化や運搬・保管時等の加速度計の不適切な取扱による機能の損傷等をチェックするためにも、定期的な加速度計の校正は必要である。

加速度計の校正方法には振動加速度による方

法、回転円盤を用いる方法等が一般的に行われている。IICにおいても計測事業部において振動加速度による加速度計校正事業を行っている

本報では加速度計の校正方法の一つである、新しい衝撃加速度による加速度計の校正方法について解説する。

尚、IIC技術研究所では平成17年8月に、図1-1に示す高衝撃加速度による加速度計特性評価装置を



図1-1 ホプキンソン棒を使った衝撃加速度発生装置

\* 技術研究所

(株)アイ・エイチ・アイ・エアロスペース (IA)より移管し、IIC磯子事業所内に設置した。

## 2. 加速度計校正の現状と衝撃加速度による校正法のニーズ

加速度計の校正は一般に振動加速度によりおこなわれている。日本国内においては、独立行政法人 産業技術総合研究所 計量標準総合センター (略称 NMIJ) により、振動加速度の表2-1に示す1次標準 (プライマリー) の供給が実施または計画されており、NMIJの一次標準を基に校正された基準加速度計を2次標準 (セカンダリー) として使用し、エンドユーザー向けの加速度校正が可能となっている。よって、振動加速度については、国家標準とのトレーサビリティが確立されている。

ところで、エンドユーザーが加速度計を適用して計測する現象は様々である。極端な場合では、たとえば弾頭の着弾試験で100万m/s<sup>2</sup>を超えるような現象の計測に適用される場合がある。

自動車の衝突安全性を確認する衝突実験では数千m/s<sup>2</sup>の加速度が発生し、衝突実験用ダミーに取付けられた加速度計の計測結果は、開発データとしてだけでなく、法規により自動車の安全性を判

表2-1 NMIJによる振動加速度一次標準の供給状況

振動加速度周波数帯域	振動加速度一次標準供給状況
0.1Hz~80Hz	2005年度までに供給予定
1Hz~200Hz	供給済
20Hz~5kHz	供給済み
5kHz~10kHz	2005年までに供給予定

断するものとして使用されている。

宇宙用ロケットでは、段間分離やフェアリングの開頭に爆薬を使用した火工品が使われるため、数万から数十万m/s<sup>2</sup>の衝撃加速度がロケット構造体やロケットの制御機器等の搭載機器及び精密な観測機器を搭載した人工衛星などのペイロードに負荷される。そのため、ロケット本体はもちろん、ペイロードである人工衛星であっても、そのような衝撃環境に耐えうることが必須である。

上記の様に、自動車や宇宙機の開発では、実験による衝撃加速度の正確な計測は非常に重要な要素である。また、自動車や宇宙機の衝撃試験は実機相当品を供試体とするため、試験費用は高額であり、取得データを有効に使用されることが期待され、試験結果の信頼性が高いことが求められる。

それでは、重要な衝撃加速度を計測する実験で使用される加速度計の精度は、どのように確保されているであろうか。表2-2に代表的な加速度メーカーの製品仕様の例を示す。カタログスペックでは百万m/sec<sup>2</sup>まで計測可能となっているものがある。しかし、一般に加速度計の校正は、振動加速度10~100m/sec<sup>2</sup>でしか行われていない。

このような低い加速度により校正された結果を高衝撃加速度の計測に適用してよいものかについて疑いをもつユーザーもいる。そのようなユーザーへの対応として、加速度メーカーでは高衝撃加速度による校正を独自の方法により提供している。

衝撃加速度の計測精度を高める必要性については、日本をはじめとして、欧州や米国及び韓国等の

表2-2 衝撃加速度計測用加速度計のカタログスペックの例

	E社製品	P社製品	E社製品
センサタイプ	圧電式 電荷出力型	圧電式 ICP型	半導体ゲージ式
加速度計測レンジ	980k(m/s <sup>2</sup> )	1000k(m/s <sup>2</sup> )	19.6k(m/s <sup>2</sup> )
周波数帯域	1~10kHz	1~10kHz	0~3kHz
共振周波数	100kHz	200kHz以上	10kHz以上
センサ感度	0.0026(pC/(m/s <sup>2</sup> ))	0.005(mV/(m/s <sup>2</sup> ))	0.02(mV/(m/s <sup>2</sup> ))

国家計量標準を供給する公的機関でも問題意識を持ち、衝撃加速度の標準供給についての研究が各国の計量標準供給機関でなされている。近年その成果がISOの規格として規定されるようになってきた。

### 3. 衝撃加速度を用いた加速度計校正法のISO規格と日本における衝撃加速度標準の整備動向

加速度計の校正法は従来ISO5347シリーズで規定されていたが、1990年代後半からISO16063シリーズが制定され、順次移行するようになってきた。表3-1にISO16063シリーズの表題を記す。

衝撃加速度による加速度計の校正法としては、2001年に一次標準（プライマリー）校正法であるISO16063-13<sup>[1]</sup>が制定され、2005年に二次標準

（セカンダリー）校正法であるISO16063-22<sup>[2]</sup>が制定された。

加速度計校正の概念は振動加速度による場合も衝撃加速度による場合も共通である。図3-1に加速度計校正の概念を示す。一次標準はレーザー干渉計である。そして、レーザー干渉計を用いて二次標準となる標準加速度計を校正し、エンドユーザー所有の加速度計は2次標準の標準加速度計との比較校正（Back to Back）により行われ、国家標準とのトレーサビリティが確保される。

但し、振動加速度による校正法と衝撃加速度による校正法ではアウトプットとなる校正結果が異なる。振動加速度による場合の校正結果は加速度計感度である（圧電型加速度計の例であれば、1.0

表 3 - 1 ISO16063シリーズによる加速度計校正法の規格（2006年1月現在）

ISO 規格番号：制定年	規格タイトル
ISO16063-1：1998	Method for the calibration of vibration and shock transducers - Part1: Basic Concepts
ISO16063-11：1999	Method for the calibration of vibration and shock transducers - Part11: Primary vibration calibration by laser interferometry
ISO16063-12：2002	Method for the calibration of vibration and shock transducers - Part12: Primary vibration calibration by reciprocity method
ISO16063-13：2001	Method for the calibration of vibration and shock transducers - Part13: Primary shock calibration using laser interferometry
ISO16063-21：2003	Method for the calibration of vibration and shock transducers - Part21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer
ISO16063-22：2005	Method for the calibration of vibration and shock transducers - Part21: Shock calibration by comparison to a reference transducer
ISO/PRF16063-15：審議中	Method for the calibration of vibration and shock transducers - Part15: Primary angular vibration calibration by laser interferometry
ISO/WD16063-31：審議中	Method for the calibration of vibration and shock transducers - Part31: Testing of transverse vibration sensitivity

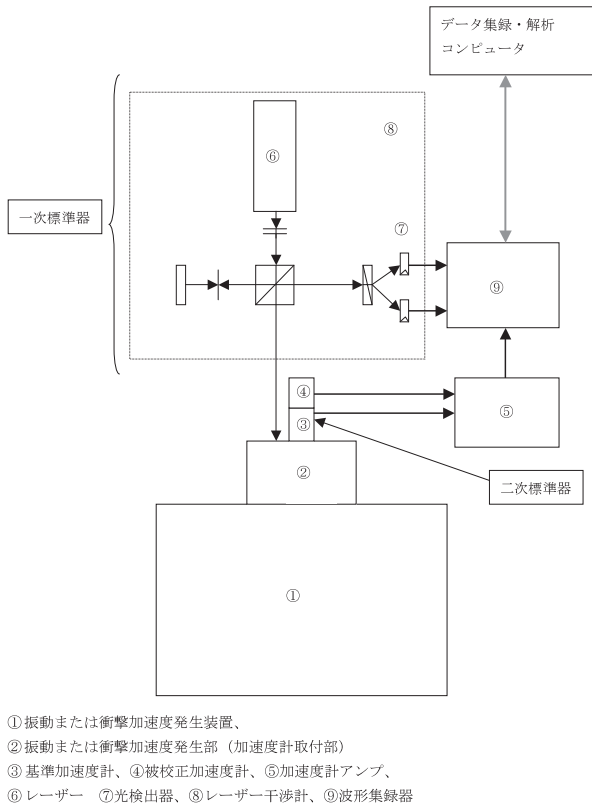


図 3-1 加速度計校正の概念図

pC/(m/s<sup>2</sup>)と言うような値となる)。一方、衝撃加速度による校正結果はISO16063-13及びISO16063-22に準拠すればピーク感度となる。

加速度計感度は加速度計測において、加速度計アンプ等にセンサ感度として設定する値であり、加速度計計測にとって必要不可欠な値である。一方、ピーク感度については、現状計測器等へ反映する値とはなっておらず、計測結果を補正する場合に使用するような値となる。よって、現状では、ISOに準拠して実施した衝撃加速度による校正結果だけでは、ユーザは加速度計測を実施できず、従来からの振動加速度による校正も必要である。

ISO16063-13及びISO16063-22により衝撃加速度による校正法が規定されても、公的機関により計量標準の供給が行われないと計測器のトレーサビリティが確保できない。2006年1月の時点におい

て、日本における衝撃加速度の一次標準を供給する公的機関は無く、NMIJが2010年までに供給を行うとの計画を公表している状況である。NMIJの計量標準の供給計画は下記のURLにより見る事が可能である。<http://www.nmij.jp/index.html>

衝撃加速度の一次標準供給はドイツのPTBが行っているため、二次標準としたい標準加速度計の校正をPTBに依頼することにより、PTBトレーサブルとすることは可能である。

#### 4. 衝撃加速度による加速度計校正方法

##### 4.1 衝撃加速度発生装置

衝撃加速度による加速度計の校正を行うに当たっては、再現性の良い成型された衝撃加速度を発生させる装置が必要となる。ISO16063-13（一次校正法）とISO16063-22（二次校正法）に記載された衝撃発生装置は同一のものではない。しかし、衝撃を発生させる力学的概念は共通であり、両方の規格とも剛体運動により衝撃加速度を発生させる方法と、金属丸棒の軸方向に伝播する弾性波パルスが端面で反射するときに発生する衝撃加速度を利用する方法の2種類の方法を示している。二つの方法は加速度レベルにより使い分ける。

ISO16063-13に記載されているガイドラインによれば、剛体運動による衝撃加速度発生装置は加速度レベルが100 m/s<sup>2</sup>～5000 m/s<sup>2</sup>の場合に適用し、弾性波パルスの端面反射時に発生する衝撃加速度発生装置は1000 m/s<sup>2</sup>～100000 m/s<sup>2</sup>の条件に適用する。加速度レベルが重複している部分は、衝撃加速度の持続時間により使い分ける必要がある。

##### 4.2 剛体運動を用いた衝撃発生装置

剛体運動を利用した衝撃加速度の発生は図4-1に示すような概念図となる。

被校正加速度計が取付けられたアンビルにハンマを衝突させることにより、アンビルの運動を励起する。ハンマ及びアンビルとも金属製が一般的

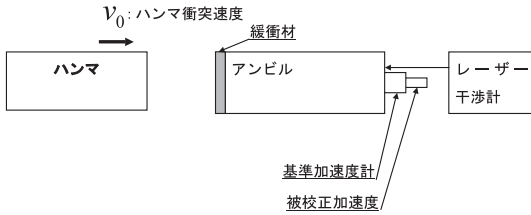


図 4-1 剛体運動による衝撃加速度発生装置の概念図

である。ISO16063-13では、ハンマとアンビルが共にスチール製で直径30 mm×長さ200 mmの丸棒が例示されている。衝撃加速度レベルと衝撃持続時間の調整のため、アンビルとハンマの間にはバネやゴム等の緩衝材が置かれる。

被校正加速度計に印加される加速度の方向と基準信号（一次校正法ではレーザー干渉計からの信号、二次校正法では基準加速度計の出力信号）の方向のずれが小さくなるように、ハンマ及びアンビルの運動を単純な一軸方向の直線運動とすることが要求される。そのため、ハンマ及びアンビルの支持構造は機械的外乱が少なく、且つ、円滑な1軸方向の運動を許容する必要がある。

また、アンビルに再現性のよい加速度を印加させるためには、ハンマとの衝突速度を制御することが必要であり、バネ力や空気圧力によりハンマを射出する方法が採用される。

ハンマをアンビルに衝突させてアンビルの1方向の剛体運動を発生させるため、剛体運動による衝撃発生装置と呼ばれるが、ハンマとアンビルの衝突により発生する加速度は、二つの質点の衝突を伴う一次元運動モデルにより、定性的な理解が可能である。

図4-2のような二つの質点と一つのパネの運動モデルを考える。ハンマの質量を $m_1$ 、アンビルと加速度計を合わせた質量を $m_2$ 、アンビルとハンマ間の緩衝材のパネ定数を $k$ とすれば、ハンマとアンビルの衝突によりアンビルに発生する加速度 $u(t)$ は

$$u(t) = v_0 \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}} \omega_2 \sin\left(\sqrt{\frac{1+\mu}{\mu}} \omega_2 t\right) \quad (\text{式4-1})$$

ここで、 $0 \leq t \leq T$ であり、 $t$ はハンマとアンビルの衝突開始を基点とした時間、 $T$ は衝撃持続時間である。また、ここで、 $v_0$ はハンマとアンビル衝突開始時のハンマの速度、 $\mu = m_1 / m_2$ はハンマとアンビルの質量比、及び、 $\omega_2 = \sqrt{k/m_2}$ を表す。

式4-1により、アンビルに印加される加速度波形はハーフサインとなる。また、衝撃加速度最大値は

$$u_{\max} = v_0 \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}} \omega_2 \quad (\text{式4-2})$$

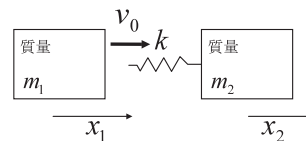
衝撃持続時間 $T$ は

$$T = \frac{\pi}{\omega_2} \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}} \quad (\text{式4-3})$$

と表される。

衝撃加速度発生装置では $\mu$ 及び $m_2$ が固定され、また、 $v_0$ には最大値の制限があることが一般的である。よって、最大加速度値と衝撃持続時間の調整はバネ定数の変更が最も容易となる。バネ定数 $k$ はハンマとアンビル間に置かれた緩衝材の機械的特性の代表値であり、式4-2及び式4-3から、緩衝材の機械的特性により最大加速度値と衝撃持続時間は相互に依存する関係にあることが定性的に理解できる。

ISO16063-13及びISO16063-22には共に、最大加速度値が衝撃持続時間に依存する旨が明記されている。



$m_1$ : 質点1の質量  $m_2$ : 質点2の質量  
 $x_1$ : 質点1の変位  $x_2$ : 質点2の変位  
 $k$ : 質点1と質点2衝突時バネ定数  $v_0$ : 質点1と質点2衝突時相対速度

図 4-2 二つの質点の衝突運動モデル



#### 4.3 弾性波パルスを用いた衝撃発生装置

両端が拘束されていない金属丸棒の片端面をハンマ等で叩くと、棒中に縦波の弾性波パルス発生し下流へ伝播する。弾性波パルスは棒のもう一方の端面（自由端面）で反射する。弾性波パルスの自由端面での反射の際に、棒軸方向の衝撃加速度が発生することが知られており、この加速度を加速度計の校正に利用することができる。このような弾性波パルスを利用する金属丸棒はホプキンソン棒またはデービス棒と呼ばれる。本報では一般的なホプキンソン棒と呼ぶことにする。ホプキンソン棒を使った加速度計校正方法は、加速度計メーカーや各国の計量標準研究機関に採用されている普遍性のある方法である。

ホプキンソン棒の長さ $L$ が径 $D$ よりも十分に大きければ、衝撃力の印加された端面から軸方向に適切な距離が離れた位置では弾性波パルスは棒の断面に一樣に広がった1次元の平面波として扱うことができる<sup>13)</sup>。

また、ホプキンソン棒の軸方向の剛体運動が拘束されておらず、且つ、弾性波パルスの減衰や分散が無視できるほど小さいとすれば、自由端で発生する加速度 $u(t)$ は、自由端から距離だけ離れた上流位置での棒軸方向のひずみ $\varepsilon(t-l/C)$ との間に、

$$u(t) = 2C \frac{d}{dt} \varepsilon(t-l/C) \quad (\text{式4.4})$$

となる関係がある。ここで、 $C$ は棒の縦波の位相速度 $\sqrt{E/\rho}$ であり、 $E$ は棒のヤング率、 $\rho$ は密度である。 $\frac{d}{dt} \varepsilon(t-l/C)$ はひずみの時間微分を取ることを意味する。

この関係は、金属丸棒中を伝播する縦波の自由端での境界条件より求まる。

図4-3にホプキンソン棒を用いた加速度計校正の概念図を示す。ホプキンソン棒は軸方向の剛体運動が拘束されず、且つ円滑に運動できるようにボールベアリングやエアベアリングにより支持される。

衝撃力の印加はホプキンソン棒端面に飛翔体（プロジェクトイル）を衝突させる方法が一般的である。通常、プロジェクトイルは空気圧により射出される。この方法により、ハンマ等で打撃するよりも再現性の良い結果を得ることができる。

ホプキンソン棒を使うと衝撃持続時間は数 $10 \mu\text{s}$ ～ $100 \mu\text{sec}$ 程度で $1000 \text{ (m/sec}^2\text{)}$ から $100000 \text{ (m/sec}^2\text{)}$ （持続時間依存性あり）の衝撃加速度範囲を対象とできるため、高衝撃加速度を対象とする場合には有効な手段である。

加速度計を校正するための基準信号は、一次校正法の場合は、ホプキンソン棒自由端面の運動をレーザー干渉計により計測した信号（速度または変位）であり、二次校正法では、ISO16063-22によればひずみゲージかレーザードップラー振動計

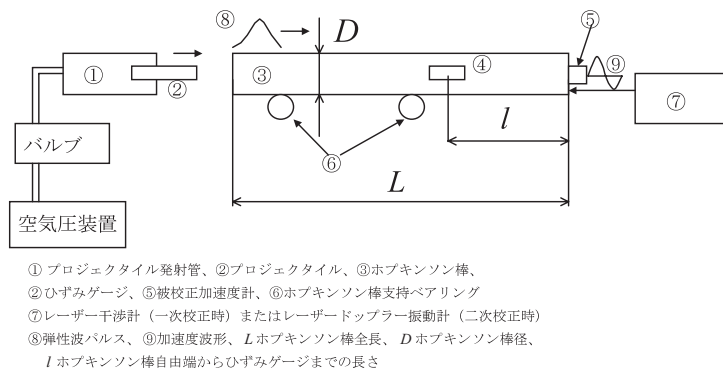


図4-3 ホプキンソン棒を用いた衝撃加速度発生装置の概念図

の計測信号（ともに速度の次元となる）である。

一次校正法のISO16063-13ではレーザー干渉計の信号を基準にして、標準加速度計を校正すると記載されており、二次校正法のISO16063-22の記載と整合性に疑問がある。ISO16063-13で示された一次標準と、ISO16063-22で示されている二次標準器のトレーサビリティを確保するためには、二次標準器のとなるひずみゲージまたはレーザードップラー振動計を、一次標準のレーザー干渉計により校正することが必要である。

なお、剛体運動による衝撃加速度の発生では、加速度波形が半正弦波となることを示したが、ホプキンソン棒を用いた校正法ではひずみ $\epsilon$ が半正弦波状パルスとなり、加速度波形は正弦波状となる。

また、ホプキンソン棒を伝播する弾性波パルスは棒の両端で反射を繰り返すが、加速度計の校正には、最初の入力波により発生する加速度のみを使用する。図4-4にホプキンソン棒に軸方向に貼

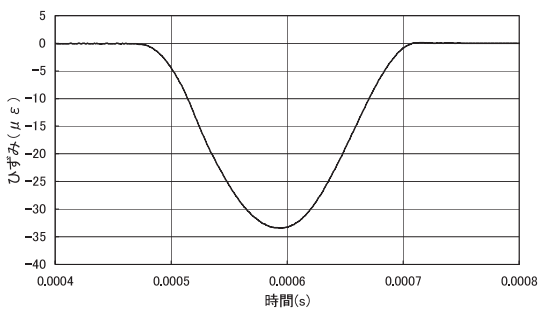


図 4-4 (1) ホプキンソン棒軸方向ひずみ波形の例

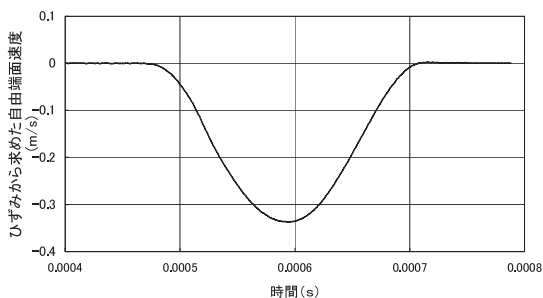


図 4-4 (2) ホプキンソン棒軸方向ひずみ波形の例 (ひずみから求めた自由端面の速度波形)

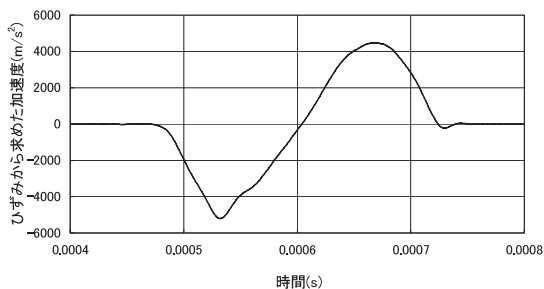


図 4-4 (3) ホプキンソン棒軸方向ひずみ波形の例 (ひずみから求めた自由端面の加速度波形)

付したひずみゲージによる弾性波パルス波形の例を示す。図4-4にはひずみ信号を処理して得られる自由端面の速度と加速度波形についても示した。

#### 4.4 信号処理とピーク感度の導出について

##### (1) 一次校正法の信号処理と出力

一次校正法の場合、剛体運動による衝撃発生装置の場合もホプキンソン棒を用いた衝撃発生装置の場合も、基準信号はレーザー干渉計の出力信号である。レーザー干渉計の出力信号は速度または変位の次元をもつため、時間軸またはフーリエ変換を用いた周波数軸での微分操作が必要となる。また、微分操作の前後でレーザー干渉計の信号及び被校正加速度計信号にノイズ除去を目的としたフィルタ処理が必要である。

レーザー干渉計の信号を処理して得られたホプキンソン棒自由端の加速度の時系列が $a(t)$ 、被校正加速度計の信号を $u(t)$ とし、それぞれの最大値を $a_{peak}$ 、 $u_{peak}$ とすると、ピーク感度 $S_{sh}$ は

$$S_{sh} = \frac{u_{peak}}{a_{peak}} \quad (式4-5)$$

により定義される。ISO16063-13内に記載は無いが、 $a_{peak}$ と $u_{peak}$ には同時性が必要と考えられる。

ピーク感度は単一の値であるが、ISO16063-13の付属書Cにおいて、ピーク感度の周波数特性に関する信号処理方法が記載されている。

被校正加速度計の出力信号のフーリエ変換した結果を $X_u(f)$ 、レーザー干渉計の信号から求め

た速度信号のフーリエ変換結果を  $X_v(f)$  とすると、複素ピーク感度  $\underline{S}$  は

$$\underline{S}(f) = \frac{X_u(f)}{j2\pi f X_v(f)} = \frac{|X_u(f)| \exp[j\varphi_u(f)]}{|2\pi f X_v(f)| \exp[j\varphi_v(f) + \frac{\pi}{2}]} \quad (\text{式4-6})$$

と定義される。

ここで、 $j$  は虚数単位、 $f$  は周波数、 $\varphi_u(f)$  と  $\varphi_v(f)$  は  $X_u(f)$  と  $X_v(f)$  の位相を表す。

この関係より、 $\underline{S}$  の絶対値  $\hat{S}$  と位相  $\Delta\varphi$  が以下のようにになる。

$$\hat{S}(f) = \frac{|X_u(f)|}{|2\pi f X_v(f)|} \quad (\text{式4-7})$$

$$\Delta\varphi(f) = \varphi_u(f) - \varphi_v(f) - \frac{\pi}{2} \quad (\text{式4-8})$$

なお、ピーク感度  $S_{sh}$  の不確かさの許容値と導出法については ISO16063-13 の本文および付属書 A で記載されているが、ピーク感度の周波数特性についての不確かさについての記載はない。現状では、ピーク感度の周波数特性については参考データとして取り扱わざるを得ない。

## (2) 二次校正法での一次校正法の信号処理と出力

### ① 剛体運動による衝撃加速度発生装置の場合

剛体運動による場合には、基準加速度計の出力信号及び被校正加速度計の出力信号に適切なフィルタ処理を行った後の時系列信号の最大値をそれぞれ  $u_{S,peak}$ 、 $u_{X,peak}$  とすると、被校正加速度計のピーク感度  $S_{shX}$  は

$$S_{shX} = S_{sh} \frac{u_{X,peak}}{u_{S,peak}} \quad (\text{式4-9})$$

ここで、 $S_{sh}$  は基準加速度計を一次校正法で校正したときのピーク感度である。

なお、 $S_{shX}$  の周波数特性についても、一次校正法の場合と同様に定義することが可能である。また、不確かさについての取扱については一次校正法の場合と同様である。

### ② ホプキンソン棒を用いた二次校正法の場合

二次校正法のホプキンソン棒の基準信号はひずみゲージまたはレーザードップラー振動計からの信号であり、これらは共に被校正加速度計が取付けられたホプキンソン棒端面の速度信号である。よって、被校正加速度計のピーク感度を導出するためには、基準信号を時間軸上または周波数軸上で微分操作を行うか、又は、被校正加速度計の信号に積分操作を行うことが必要である。ISO16063-22 においては、両方の方法が記載されている。ピーク感度の導出処理は①の場合と同様である。

## 4.5 剛体運動としての加速度と弾性波パルスにより発生する加速度の分離について

剛体運動を用いた衝撃装置発生装置では、アンビルの剛体運動による加速度とアンビル内を伝播する弾性波により自由端面で発生する加速度を分離する必要がある。また、ホプキンソン棒の場合についても同様に、弾性波パルスにより発生する自由端面の加速度とホプキンソン棒の剛体運動による加速度の分離も必要である。

### (1) 剛体運動による衝撃発生装置の場合

ハンマとアンビル間の相互作用を、線形バネによると仮定したときの剛体運動によるアンビルの加速度の持続時間は、式4-3、

$$T = \frac{\pi}{\omega_2} \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}}$$

によるが、この運動の支配的な周波数  $f_{rigid}$  は、

$$f_{rigid} = \frac{1}{2T} \quad (\text{式4-10})$$

である。一方、アンビルの長さを  $L_A$  とすると、弾性波がアンビル内を往復する周波数  $f_{elastic}$  は、

$$f_{elastic} = \frac{C_A}{2L_A} \quad (\text{式4-11})$$

で表される。ここで、 $C_A$  は弾性波の音速である。これは、アンビル内を伝播する縦波の最低次数の共振周波数である。



具体的な数値として、

$$T = 1 \text{ ms}$$

$$L_A = 200 \text{ mm}$$

$$C_A = 5000 \text{ m/s}$$

とすると、

$f_{\text{rigid}} = 500 \text{ Hz}$ ,  $f_{\text{elastic}} = 12.5 \text{ kHz}$  を得る。

よって、信号集録時及び信号処理時に適切なローパスフィルタを使用することで、剛体運動による加速度と弾性波パルスによる加速度の分離が可能である。ISO16063-13では、アンピルを伝播する縦波の共振周波数を  $10/T$  以上にする必要があると記載されている。

(1) ホブキンソン棒による衝撃加速度発生装置の場合

ホブキンソン棒の場合の剛体運動による加速度と弾性波パルスによる加速度の分離は、剛体運動による衝撃加速度発生装置の場合よりも簡単である。

ホブキンソン棒とホブキンソン棒を支持する部位との摩擦の影響を無視すれば、ホブキンソン棒の剛体運動としての加速度が作用する時間は、プロジェクトイルとホブキンソン棒が接触している間のみである。この時間は弾性波パルスの持続時間  $T$  に等しい。一方、弾性波パルスがホブキンソン棒の途中に貼付されたひずみゲージ位置または自由端に到達する時間を  $t_{\text{gage}}$  及び  $t_L$  とするとき、

$$t_{\text{gage}} = \frac{L-l}{C} > T \quad (\text{式4-12})$$

及び

$$t_L = \frac{L}{C} > T \quad (\text{式4-13})$$

を満足すれば、信号計測位置に弾性波パルスが到達する前に、剛体運動が終了している。そのため、信号集録開始時刻をひずみゲージに弾性波が到達する時刻よりも前になるようにスタートトリガを設定できれば、剛体運動による加速度と弾性波パルスの自由端面反射による加速度

を分離できる。

なお、ホブキンソン棒により加速度計の校正を行う際には、ホブキンソン棒の長さ、自由端面からひずみゲージ位置までの距離  $l$  より、衝撃持続時間  $T$  の最大値  $T_{\text{max}}$  が制約される。

①基準信号がレーザー干渉計、レーザードップラー振動計場合または基準加速度計の場合

$$T_{\text{max}} < \frac{2L}{C} \quad (\text{式4-14})$$

②基準信号がひずみゲージの場合

$$T_{\text{max}} < \frac{2l}{C} \quad (\text{式4-15})$$

式4-14及び式4-15ともに、基準信号が弾性波パルスを検知したのち、再度、弾性波パルスを検出するまでの時間となっている。

## 5. I I C のホブキンソン棒を使った 加速度計特性評価装置

I I C のホブキンソン棒を使った加速度計特性評価装置の計測ブロック図を図5-1に示す。

ホブキンソン棒はSUS304直径30 mm×長さ2000 mmと真鍮直径22 mm長さ3500 mmを主に使用している。100000 (m/s<sup>2</sup>)以上の衝撃加速度を得るために、SUS304直径20 mm×長さ2000 mmと直径15 mm×長さ1500 mmもある。ホブキンソン棒はボールベアリングで支持されている。プロジェクトイルはアルミ製の直径14.6 mm×長さ45 mmを標準品としている。プロジェクトイルは最大0.4 MPaまでの空気圧で射出され、射出速度の最大値は約1 m/sである。

基準信号は半導体ひずみゲージの信号である。ブリッジ回路にダミーゲージ2枚を使用した4ゲージ法を採用し、ブリッジバランスの良好な保持と、ゲインを大きくする手法を取っている。ひずみアンプは共和CDV-200A及び波形記録器は横河AR4400である。

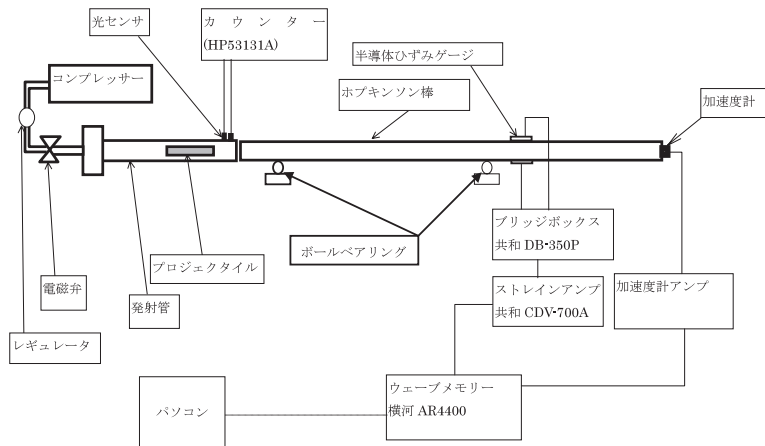


図 5-1 ホプキンソン棒を使った衝撃加速度発生装置計測ブロック図

## 6. 結 言

衝撃加速度を用いて加速度計を校正する手法について、近年制定された ISO 規格を基に解説した。筆者は、ホプキンソン棒を用いて加速度計の周波数特性を取得する技術についての研究を数年間行ってきた。ISO により規格化された技術内容とは完全に一致するものではないが、ホプキンソン棒の使用は普遍性のある手法であり、これまでに取得できている技術は有効である。

日本国内では、衝撃加速度標準の供給されるまで、まだ数年を要する見込みであり、今後は、関連する技術動向を注視しながら、衝撃加速度標準の供給時期を目標とし、校正成績書に周波数特性を添付するための精度の確保等による付加価値を高める研究を行っていきたいと考える。

本報の内容は、当該 ISO から図表の引用や、筆者がホプキンソン棒を使用して過去に取得したデータを示した方が分かりやすいものとなったと思うが、著作権及び社外との知的財産取扱の制約からできなかったことを了解頂きたい。

なお、ISO 化された一次校正法はドイツ PTB が提案し制定された規格であり、二次校正法は米国の NIST が提案したものであることを記しておく。

一次校正法の衝撃発生装置の概要は PTB の下記の URL で見ることができる。

[http://www.ptb.de/en/org/1/13/131/seite\\_5\\_1\\_5.htm](http://www.ptb.de/en/org/1/13/131/seite_5_1_5.htm)

[http://www.ptb.de/en/org/1/13/131/seite\\_5\\_1\\_6.htm](http://www.ptb.de/en/org/1/13/131/seite_5_1_6.htm)

## 参考文献

- [1] ISO16063-13, 2001, Method for the calibration of vibration and shock transducers - - Part13 : Primary shock calibration using laser interferometry
- [2] ISO16063-22,2005,Method for the calibration of vibration and shock transducers - - Part21 : Shock calibration by comparison to a reference transducer
- [3] K.Tanaka et al., Plastic Stress wave Propagation in a Circular Bar Induced by a Longitudinal Impact, K. Kawata and I. Shior i(Eds) Macro- and Micro-mechanics of High Velocity Deformation and Fracture, Berlin, Springer-Verlag 1987, pp317-326



技術研究所  
中島 富男

TEL. 045-759-2927  
FAX. 045-759-2155