

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

環境試験技術報告

ウェーブレット技術を用いた衝撃応答波形の「ゼロシフト」抽出および検証方法

施 勤忠, 安藤 成将

2005年2月

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

宇宙航空研究開発機構研究開発報告
JAXA Research and Development Report

環境試験技術報告
ウェーブレット技術を用いた衝撃応答波形の
「ゼロシフト」抽出および検証方法

Removing Zeroshift of Proshock Measurement Data by
Wavelet Techique and Its Verification

施 勤忠 、安藤 成将

Qinzhong SHI , Shigemasa ANDO

宇宙基幹システム本部 試験センター

2005年2月
February 2005

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

ウェーブレット技術を用いた衝撃応答波形の「ゼロシフト」抽出 および検証方法

宇宙航空研究開発機構 宇宙基幹システム本部・試験センター 施勤忠、安藤成将

キーワード：シグナルプロセッシング、パイロショック、ウェーブレット、過渡データ、
衝撃応答波形(SRS : Shock Response Spectrum)

要約

宇宙機には衛星分離機構、ソーラパネルやアンテナなどコンポーネントの展開機構に火工品が広く採用されている。これら機構の作動による衝撃は数千 G に及ぶ非常に高い加速度と数十 kHz の高周波成分が生じる。その結果、多くの場合において、加速度センサへ過大な応力が印加されることなどによって計測された加速度に「ゼロシフト」が発生してしまう。このようなゼロシフトを「完璧に」防ぐ方法はないと考えられているが、宇宙機開発の検証試験現場においては、実用上使用可能補正手法の開発が望まれている。本稿では、実用上重要な 2 つの課題であるゼロシフトの判定方法、及び補正手法の手順の確立や信頼性について検討した。

ゼロシフトの判定方法については、正・負 SRS (Shock Response Spectrum) による判定法と速度による判定法がある。補正手法については、衝撃などの瞬時現象に最も適しているウェーブレットを用いた補正手法の手順を確立し、手法の信頼性について基礎実験による検証を行ない、本手法の有効性を確認した。

1. はじめに

宇宙機コンポーネントは、設計や試験を通じて、さまざまなフライト環境に対する耐衝撃性が確認されなければならない。爆発ボルトや分離ナットなどの火工品を用いた分離機構は、宇宙航空開発研究機構 (JAXA) においてもさまざまな人工衛星のロケットからの切り離しや、宇宙空間における太陽電池パネルおよびアンテナなどの機器およびコンポーネントの展開に広く採用されている。このような火工品を用いた機構は、瞬時に数千 G 以上の高い加速度、且つ数十 kHz に達する高周波数成分を生じさせる。その結果、加速度センサのセンシング圧電素子の共振や過剰応力、シグナルコンディショナへの過負荷によって発生する¹⁾オーバーロードなどによって、衝撃試験で取得した加速度データに重大な欠陥が含まれることがある。特に火工品取付け付近に計測を行なうセンサについては、センサメーカーにとってさえ欠陥信号を完全に防止できるセンサの開発は非常に困難である。現実的には、供試体への負荷や蓄積疲労の問題を配慮して再試験を実施しない、高衝撃用の加速度センサの取付けなどに制限があるなどの理由により、欠陥が含まれる計測データ補正し

てを利用せざるを得ない。言うまでもなく、最良の処置は計測系オーバーロードなどによる重大な欠陥があるデータを廃棄し、使用しないことであるが、計測データ中の欠陥の一部である「ゼロシフト」と呼ばれる軽微な欠陥については、補正が有効であると考えられる。「ゼロシフト」は、計測加速度がゼロ点を離れて上下振動する現象をいい、JAXA の経験によると、中高度 4 トン級以上の衛星の PAF (ペイロードアダプターフィッティング) 分離衝撃試験において、6 割強のデータに「ゼロシフト」の発生が認められた。このような「ゼロシフト」信号では、SRS 解析の結果では低い周波数成分が上昇し、正しい評価ができない。ただし、「ゼロシフト」は、通常加速度センサのセンシング素子の過負荷や部品の瞬時移動によるヒステリシス現象であり、本来のデータは保存されているため補正が可能である。本稿では、軽い欠陥である「ゼロシフト」に対する補正方法について報告する。

「ゼロシフト」補正については、海外の研究が幾つか報告されている。Smallwood 氏は、指数関数あるいはウェーブレット解析アプローチに基づいて、加速度信号の小さな欠陥を除去する手法を提示しているが、ウェーブレットについては、固定レベル 5 を使用している^{[2],[3]}。ESA (欧州宇宙局) の衝撃試験機関 (CASA ESPACIO) の Quintana 氏は多項式を使って「ゼロシフト」信号の速度を算出した^[4]。しかし、すでに述べたように「ゼロシフト」は計測システムのあらゆる箇所が発生する可能性があるため、どの方法を用いても全ての情報の回復は見込めない。この観点から、手法の確立や精度の検証が重要である。本稿は衝撃応答における「ゼロシフト」が含まれる加速度の補正指針を提示している。また、「ゼロシフト」の判定方法については、正・負 SRS による判定法と速度による判定法を検討する。

試験センターでは、個別研究の一環として平成 13 年度から大型分離衝撃試験設備の衝撃加速度データに発生するゼロシフトについて調査研究を開始した。一連の調査、研究によってウェーブレット補正手法を開発し、多数の基礎実験データより手法の有効性を検証した。この成果は、平成 14 年 9 月、ウェーブレットによる「ゼロシフト」の偽信号成分除去方法として国内及び欧米において特許の申請を行った。また、ALOS、WINDS、SELENE などの多くのプロジェクトからの依頼による計測データの補正を実施した。

本稿では、「ゼロシフト」の原因を述べ、ウェーブレットを用いた「ゼロシフト」補正の原理及び最適なウェーブレット構成方法などの手順を提示する。また、信頼性の検証については、基礎実験の結果において、「ゼロシフト」が発生しない歪みゲージによる計測データと比較し、補正手法の有効性及び信頼性について検証する。

2. ゼロシフトの発生原因及び SRS 解析結果への影響

「ゼロシフト」を含んだ信号を SRS 解析した場合、低周波成分が実際の環境よりも通常数百 G 高いレベルを示す。「ゼロシフト」は、タイムヒストリーから一目で判別できる場合があるが、最も危険なケースはタイムヒストリーから目視では認識できない「ゼロシフト」である (隠れた「ゼロシフト」という)。「ゼロシフト」の発生原因については Chu が報告

している^[4]。

- (1) センサ素子に負荷される過剰な加速度
- (2) センサ部品の物理的な運動
- (3) ケーブルノイズ
- (4) センサベースの歪み
- (5) シグナルコンディショナへの過負荷

ここで、(1)～(3)について詳細な説明を述べる。

2.1. センサの圧電素子の過剰応力

磁界中の鉄の磁化現象と同様に圧電素子センサは強電界中において分極されている。安定した強誘電性圧電素子では、圧電電荷出力は圧電素子の材料引張力または圧縮力に比例する。しかしながら、圧電素子に過剰応力がかかると、幾つかの素子は分極前の状態に戻り、その結果、加速度センサには、ニセの出力が発生する。また、圧電素子の加速度センサは、通常共振周波数において 30dB を超える共振増幅率 (Q 値) をもつので、圧電素子に予想以上の過剰応力が与えられることになり、ニセの出力が生じ、「ゼロシフト」が発生する。

衝撃試験の場合、高いピークかつ高周波成分の加速度が加速度センサに負荷されており、加速度センサの圧電素子に過剰応力が与えられて「ゼロシフト」が発生する可能性が非常に高い。

2.2. センサ部品の物理的な運動

図 1 に示す典型的な加速度センサの構造を用いて加速度センサの原理を説明する。加速度センサの圧電素子 (PE Element) への応力は、入力加速度に対する質量 (Mass) の反作用によって生じるので、質量と素子との間のずれは出力誤差となる。圧縮型の加速度センサでは、引張り力の線形出力を発生させるのに、細いボルト (Threaded Post) によってプリロードを与える。素子が高い加速度を受けたときに応力波はベースから素子のアセンブリへ伝達していく。引張り波はプリロードのクランプ力を超えて PE 素子はリラックス状態となり、小さな相対運動が隣接 PE 素子と Mass 間や PE 素子と Base 間に発生する。これらのずれはニセの出力となり、「ゼロシフト」として現れる。

2.3. ケーブルノイズ

圧電素子型の加速度センサには同軸ケーブルが使われている。十分に固定されていないケーブルは弾性を持ち、高い加速度の衝撃を受けた場合、摩擦電気効果が生じてニセの信号出力となり、「ゼロシフト」として現れる。また、図 2 に示すように、物理的に同軸ケー

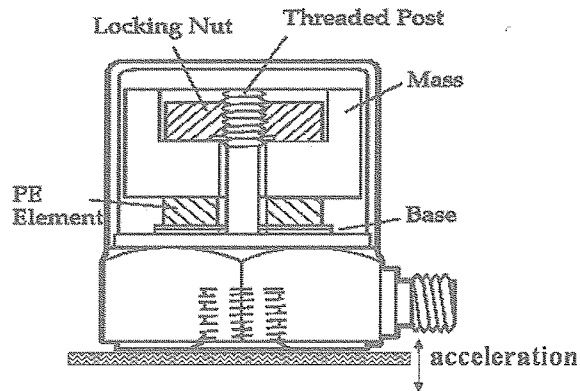


図1 典型的な加速度センサの構造

ブルが壊れた場合、ケーブルの誘電体 (Dielectric) とその誘電体外側のシールド(Shield) との間が部分的に剥離し、この局部で定常の電荷が生じる。この電荷はアンプなどの入力へ流され、中央導体(Center Conductor)の方に合流して検出され、ニセ出力となる。そしてケーブルの剥離がなくなると誘導体およびシールドは再び一緒になり、すでに捕捉された電子は次にシールドの中へ流れて逆極性の第2パルスとなる。

典型的なケーブルの運動による「ゼロシフト」の例を図3に示す。この実験結果はEndevco社が公表したもので、半正弦波パルスを入力とし、Endevco社の Compression Wave Shock Calibrator を使って行われた^[1]。また、高品質の同軸ケーブル、高インピーダンス加速度センサが使われ、ケーブルを柔軟に曲げられるように引き回されている。加速度応答から見ると逆極性のパルスが生じて「ゼロシフト」出力が現れている。

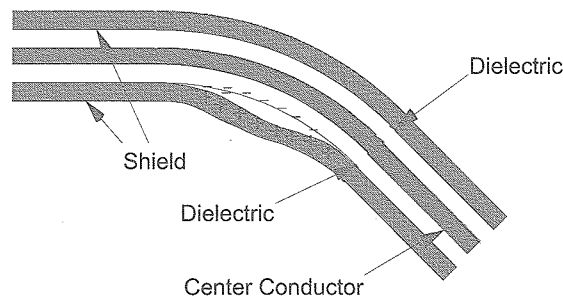


図2 ケーブルの剥離で生じる電荷

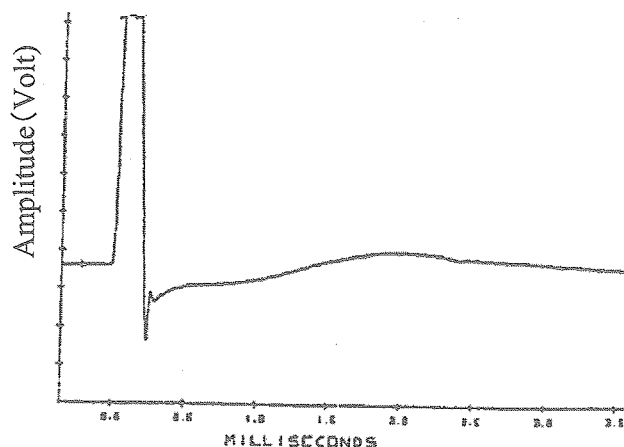


図3 ケーブル運動によるゼロシフト

以上に述べたような現象の発生に伴い、特に火工品付近では加速度センサによる正確な加速度の計測が困難であり、この環境で「ゼロシフト」の発生を防止する方策はない。「ゼロシフト」を含んだ信号の補正が唯一の現実的な選択であろう。そのためゼロシフトのあるデータの補正手法が強く求められている。ただし、データの補正手法は、あくまで、計測信号の中、真の成分に偽の成分が混在しているものみに限定しており、オーバーロードなどの重大な欠陥によって真の信号成分まで破壊されてしまう場合には、補正不可であることに注意すべきである。

3. ゼロシフトの判定方法

「ゼロシフト」では、時系列の応答がゼロ点から明らかにシフトし、一目瞭然で「ゼロシフト」と確認できる場合がある。しかし「ゼロシフト」であっても、常にゼロ点が明確にシフトするわけではないので目視確認が難しい場合もある。隠れた「ゼロシフト」信号については、定量的に異常な信号を判定する方法が重要である。「ゼロシフト」信号の確認方法は数種類報告されている^{[2],[3]}。通常、応答はゼロを中心にして正負の両方向に振れるため、どの周波数領域でも正と負の最大値はほぼ等しくなる。さまざまな周波数領域での正と負のSRS値の差は一つの判定方法となりうる。また、計測した加速度を積分して求めた速度によって隠れたゼロシフト信号を判定する方法は最も有効である。以下にこの2種類の判定方法の定量化について提案する。

3.1 正・負SRSによる「ゼロシフト」判定方法

正・負SRSによる「ゼロシフト」程度の判定方法は、式(1)に示す EV_1 の計算式であり、全周波数領域における正・負SRSの比の絶対対数値の最大値とする判定方法である。

$$EV_1 = \max_f \left\{ \log \left| \frac{SRS_p(f)}{SRS_n(f)} \right| \right\} \quad (1)$$

周波数帯 f の正方向の SRS (m/s^2) を $SRS_p(f)$ 、負方向の SRS (m/s^2) を $SRS_n(f)$ (基準加速度を $1g=0db$) とする。この例を図 4 に示す。同図の上の図は、ゼロシフトが起きたデータで、正側 SRS_p と負側 SRS_n が異なり、下の図は正常な波形であり、正負側の SRS_p 、 SRS_n がほぼ一致している。正・負 SRS 対数の差の最大値が EV_1 の物理意味である。

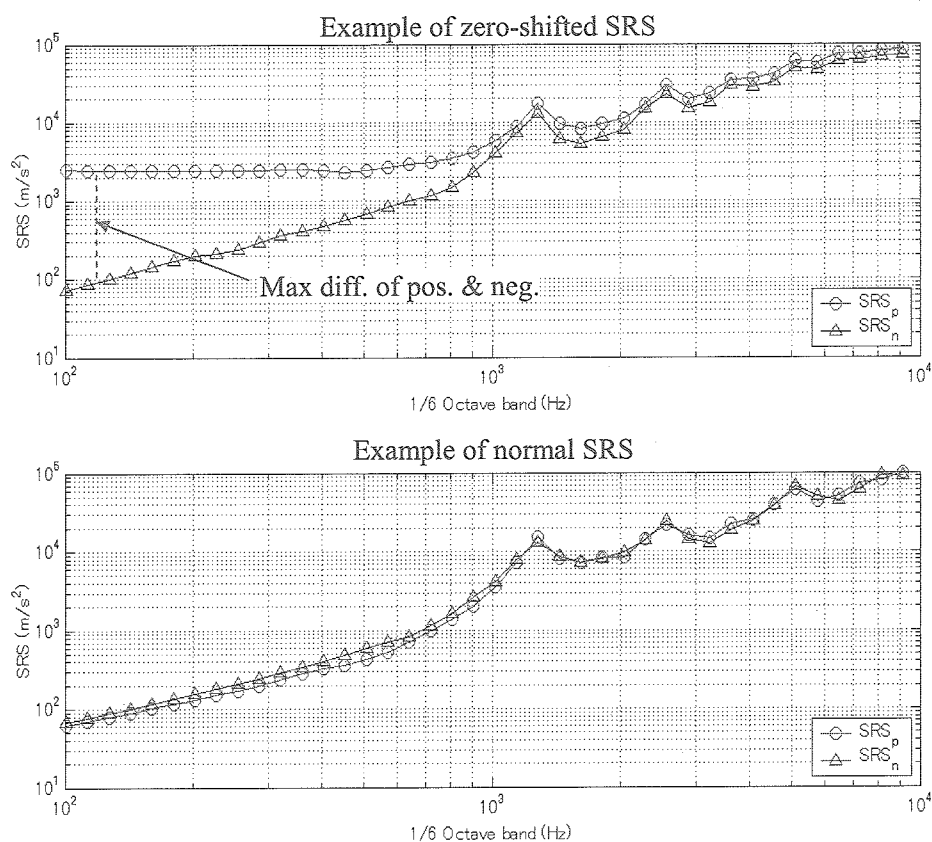


図 4 正・負 SRS によるゼロシフト判定

3. 2 速度による「ゼロシフト」判定方法

「ゼロシフト」の程度に関する判定のもう 1 つの方法は、速度である。速度は計測の加速度を積分して求められる。構造体の速度応答は、加速度と同様に、通常平衡点を中心として振れる。図 5 に示すように生じた通常の振動信号の速度 (上の図) は、応答の振幅が時間と共に減衰するが、ゼロシフトが発生した場合の速度 (下の図) にはヒステリシスが現れ、ゼロの平衡状態に戻らないという物理的に解釈ができない結果となる。加速度信号に「ゼロシフト」が含まれている場合、時間と共に積分した速度に「ゼロシフト」の分だ

け誤差が蓄積されていく。蓄積される積分は「ゼロシフト」の大きさと時間間隔の両方に支配される。時間間隔が長いほど蓄積される積分は大きくなる。サンプリング時間による影響を排除するため、式(2)のように EV_2 は時間間隔に対し標準化する。

$$EV_2 = \frac{V(T)}{T} = \frac{\sum_k (a(k \cdot \Delta) \cdot \Delta)}{T} \quad (2)$$

$V(T)$ (m/s)は時間 T における速度、 T はサンプルデータの終点時間、 k はサンプリング点、 a は加速度(m/s²)の時系列、 Δ はサンプル間隔(s)である。 EV_2 は速度の傾きまたは平均加速度の傾きを示し、物理的に「ゼロシフト」の量が増えるに従って大きくなる。

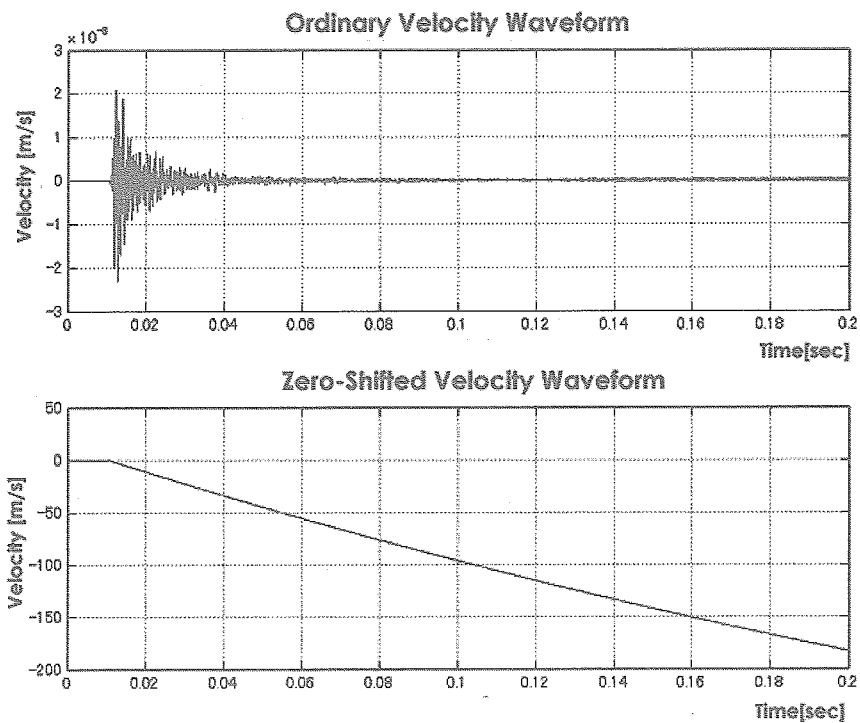


図5 速度によるゼロシフトの判定方法

4. ウェーブレット技術を用いたデータ抽出

前述のようにゼロを平衡の中心とし、正負側に振れる正しい衝撃速度と、一方的に上昇または低下する「ゼロシフト」の組み合わせである。正しい速度は、時間とともに減衰し、平衡中心に戻ってくるので、瞬時的（ローカル）な現象であるが、偽の速度は、時間とともに絶対値が大きくなってゆき、長期的（グローバル）な現象である。この様なローカルとグローバル現象が混在する信号を処理する技術としてはウェーブレット手法が最も適し

ている。ウェーブレットシグナルプロセッシング技術はローカルな時間領域抽出のために数十年前に開発された⁵⁾。ウェーブレット解析によって、長時間間隔ではより正確な低周波の情報、短時間間隔では適切な高周波の情報の利用が可能である。周期現象に適するフーリエ変換 (FFT : Fast Fourier Transform) のような、グローバルというよりむしろローカルな表現ができるという特性により、ウェーブレットはグローバルおよびローカルの両方を見るには非常に効果的な技術と考えられる。

フーリエ変換とウェーブレット変換に用いる基本波形 (マザーウェーブレットと呼ぶ) の違いを図6に示す。フーリエ変換に用いる正弦波波形は、周期を持って+と-無限時間 (空間) へ延々に伸び、ウェーブレットに用いる波形は、一部の時間 (空間) に限ってゼロでないが、それ以外の時間 (空間) において全てゼロである (ローカル)。フーリエ変換をウェーブレットに例えば、異なる周波数 (周期) を持つグローバルな基本波形によって波形を表すに対して、ウェーブレットはマザーウェーブレットと呼ばれるローカルな基本波形を用いて波形を表現することである。ウェーブレットのマザーウェーブレットは非常に複雑でローカルな形であることが多い。ウェーブレットのパラメータは、マザーウェーブレットの種類及び信号分解の細かさを意味する「レベル」である。信号はこれらのマザーウェーブレット群の組み合わせによって構成され、ウェーブレットの「レベル」によって分解されていき、高いレベルを指定することでより細かく分解できる。一般的に、信号 $s(t)$ をウェーブレットとして用いて下記の式(3)、(4)によって表現する。

$$C(a, b) = \int_0^{\infty} s(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \phi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

$$s(t) = \frac{1}{K_{\phi}} \iint_{a,b} C(a, b) \frac{1}{\sqrt{a}} \phi\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{da \cdot db}{a^2} \quad (4)$$

ここで、 $\phi(t)$ はマザーウェーブレットであり、 a はスケール、 b はトランスレーション、 K_{ϕ} はマザーウェーブレットおよび信号 $s(t)$ による定数である。

通常、マザーウェーブレットは複雑な波形であり、様々なマザーウェーブレットが提案されているが、本稿では、Daubechies (次数 $N=3$) のマザーウェーブレットを使用している⁵⁾。式(3)で求めたウェーブレット係数 $C(a, b)$ によって信号を図7に示すように階層で分離する。

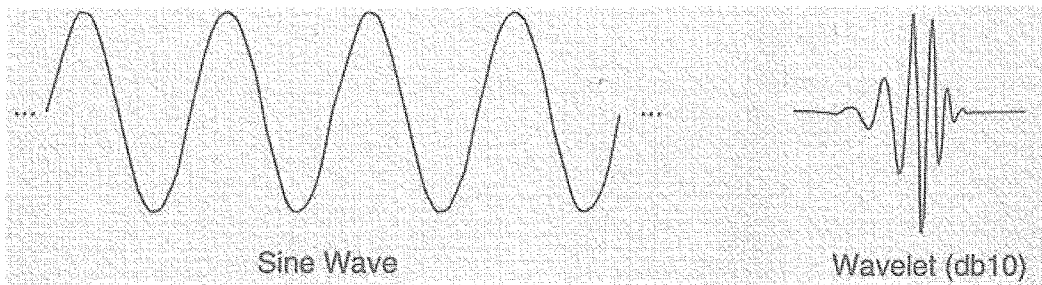


図6 フーリエ変換とウェーブレット変換に用いる波形の比較

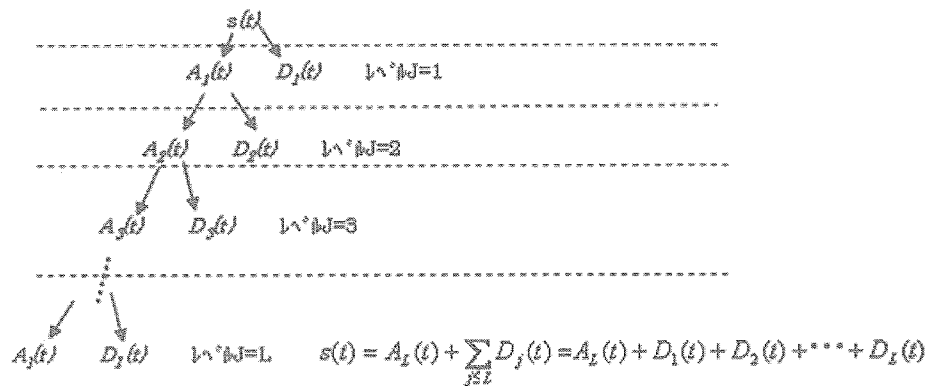


図7 ウェーブレットによる信号分解

ウェーブレットを用いて信号 $s(t)$ を $A_L(t)$ (Approximation) と $D_J(t)$ (Details) に分離する際、最も重要なウェーブレットのパラメータである最適なウェーブレットの「レベル」 L_{opt} を選定する方法及び基本的なデータ修復手順を確立する。この手順は以下のとおりである。

- i. 加速度を積分し速度を計算する。
- ii. ウェーブレットを用い、信号をウェーブレット「レベル」 L が徐々に増やして $A_L(t)$ と $D_J(t)$ ($J=1,2,3,\dots,L$) に分解する。
- iii. 最適「レベル」 L_{opt} および詳細の組合せを選択、信号を抽出し速度の傾きを除去する。

最適「レベル」の選定については、点火のタイミングを判断ポイントとし、「レベル」が増加するに連れ、変化の遅い成分が分離され、ある「レベル」 L_{opt} を超えると、点火タイミングの前に、大きな応答が現れている。この「レベル」 L_{opt} を最適なレベルとする。

- iv. 速度を微分して補正後の加速度を計算し、補正後のSRSを求める。

図8にはこのプロセスを示す。図8の例では、信号 $s(t)$ をウェーブレット「レベル」8まで分解し(図では、 $L1\sim L8$)、つまり、速度 $s(t)$ が $A8$ と $D1\sim D8$ に分解される。 $D8$ の信号は点火のタイミング (Firing timing) より前に既に大きい応答が現れており、構造物

の衝撃によるものではないことから、D7以降は採用しない、最適な「レベル」 L_{opt} を7（図6では、 $L_{opt}=L7$ ）とする。ゼロシフトのない速度がD1~D7から再構成されることになる。

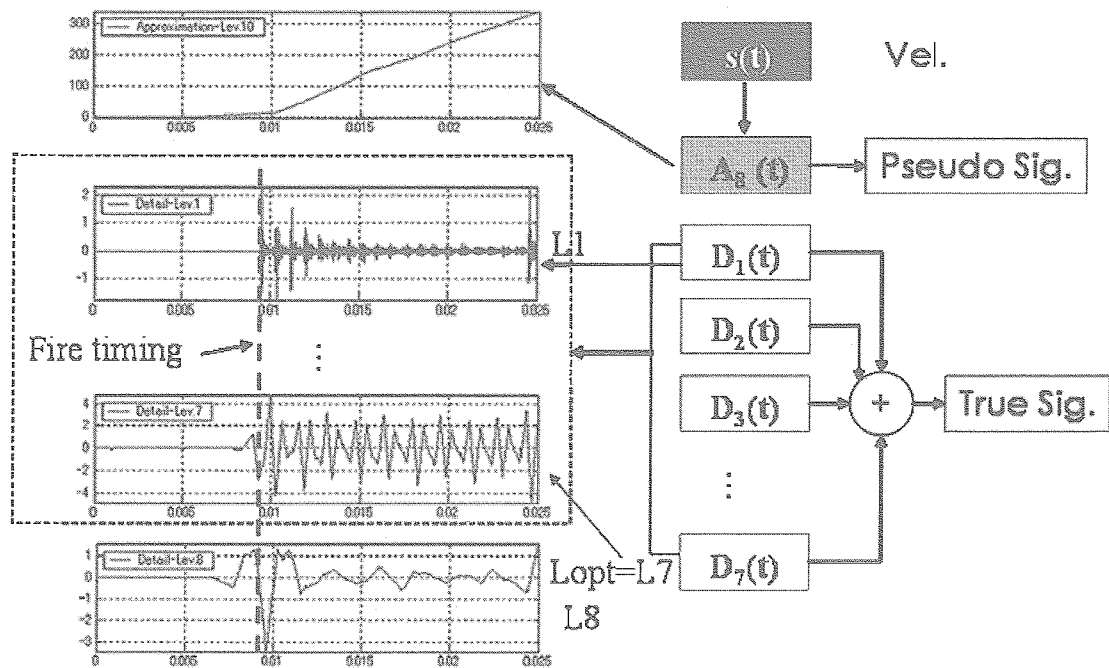


図8 最適なウェーブレット「レベル」の選定法

5. 基礎実験による手法の検証

図9に示す Devise(Hokinson) Bar を用いた高衝撃加速度シミュレーターを使用して上記手順の基礎実験を行なう。この試験装置はエアーコンプレッサで作動するプレートでバーの末端に衝撃を与え、バーの反対側に取り付けた加速度センサで加速度を測定する。また、印加した加速度の真値を棒の中央にある歪ゲージによって計測する⁶⁾。

この基礎実験は、JAXA 所有の主な加速度センサ（Σ2225、225、2222C、7255C、7270A）を使用して実施した。各種の加速度センサを3個程サンプルとして使用し、100G から10,000G の加速度を印加し、ゼロシフトの発生状況を調査する。各種の加速度センサの使用可能な衝撃レベルを表1に纏めてあるが、これらの結果はあくまで高衝撃加速度シミュレーターを用いた試験結果であり、実際の分離衝撃試験の場合、ベース歪や衝撃波の伝搬など、より厳しい環境であると考えられる。よって、実際の分離衝撃試験においては、もっと低い加速度レベルでもゼロシフトが発生する可能性があると考えられる。

Devise Bar による基礎実験結果の一例として、加速度センサΣ2225に印加ピーク加速度約20,000gとした結果を示す。前述の手順に従い、最適な「レベル」 L_{opt} をL7とし、信号合成はD1~D7を使用する。これらの結果を図10に示しており、同図の左側は計測の加

速度（上）及び速度（下）、右側は、補正後の加速度（上）及び速度（下）である。補正前の信号と比べると、補正後の加速度にほとんど変化は無いが、一方で補正後の速度では傾きが解消されている。補正後 SRS と歪みゲージで測定した真の SRS の比較を図 1 1 に示す。補正後と真の SRS の差は僅か + 4 dB 以内であるが、安全側である。

この手法は、各衛星プロジェクトなどの火工品による衝撃試験に適用した実績がある。特に、衛星の PAF 分離衝撃試験の数百チャンネル分に及ぶ加速度補正にも適用されている。代表的な例を図 1 2 に示す。左側の図は補正前の加速度、速度及び SRS、右側が補正後である。時間領域における補正後加速度は補正前とほぼ等しいが、補正後速度は補正前よりも理にかなった振動信号になり、補正前速度の偏った成分は除去されている。さらに、補正後加速度の正および負の SRS は互いに等しい値に近寄り、500Hz 以上の高周波成分は補正前と等しい。

表 1 各種の加速度センサの計測可能なレベル (Devis 棒の試験結果)

All type of sensors are manufactured by ENDECVO.

Sensor	Low (100G)	Mid (1,000G)	High (10,000G)	Max (50,000G)
2225	○	○	X(20,000G) X(10,000G)	-
225	○	○	X	-
2222C	○?	○?	X	-
7255A	○	○	○	-
7270A	○	○	○	○

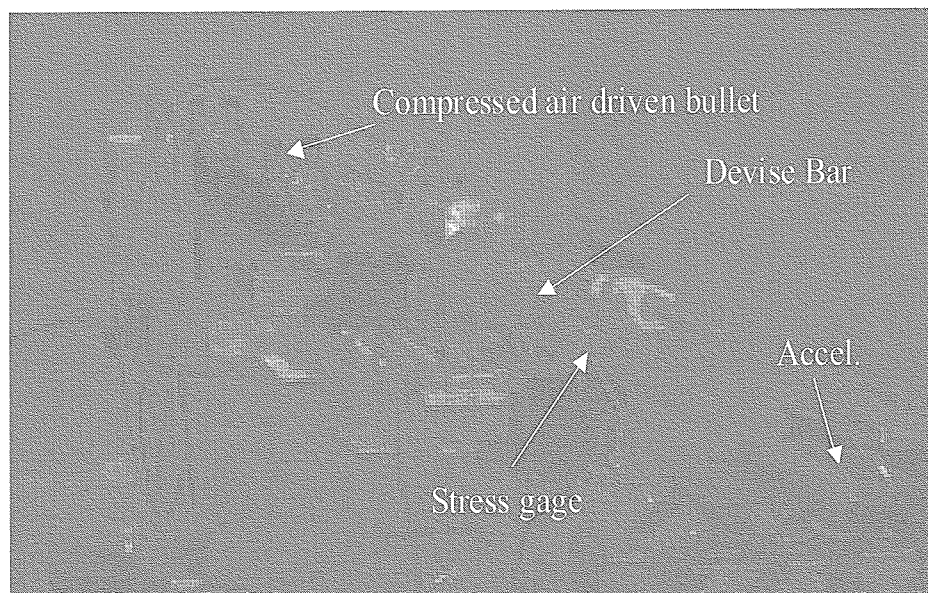
This result is not final conclusion.

- : Usable
- X: Unusable
- ?: Uncertain at this time, further investigation is needed.

6. まとめ

宇宙機には火工品を用いた分離機構が広く使用されている。衝撃応答加速度波形に「ゼロシフト」などによる軽微な欠陥が含まれると計測データが使用できなくなる。本稿では、「ゼロシフト」が発生した場合の補正方法及び手順を新たに確立し、手法の精度及び信頼性について、基礎実験を用いて検証し、その有効性を示した。この研究成果は、日本国内許出願（特願 2002-256871）及び海外（US patent Application No.10/652,034、EU 許願 03255425.5）に特許出願している。本報告で示した手法を衝撃試験設備のデータ処理機能として整備しており、試験センターは多くの実測データを処理した実績があり、今後要望に応じて補正を実施する。「ゼロシフト」の判定については、正・負の SRS 対数の最大値による EV1、速度の傾きによる EV2 という「ゼロシフト」発生量を定量的に判定するための手法を提示したが、閾値の設定までにまた至っていない。今後、多くのデータを集めて

統計処理し、閾値によって自動化を実現する予定である。



(note: This basic shock simulation is supplied by IHI Aerospace Corp.)

図9 Devise 棒による基礎実験の装置

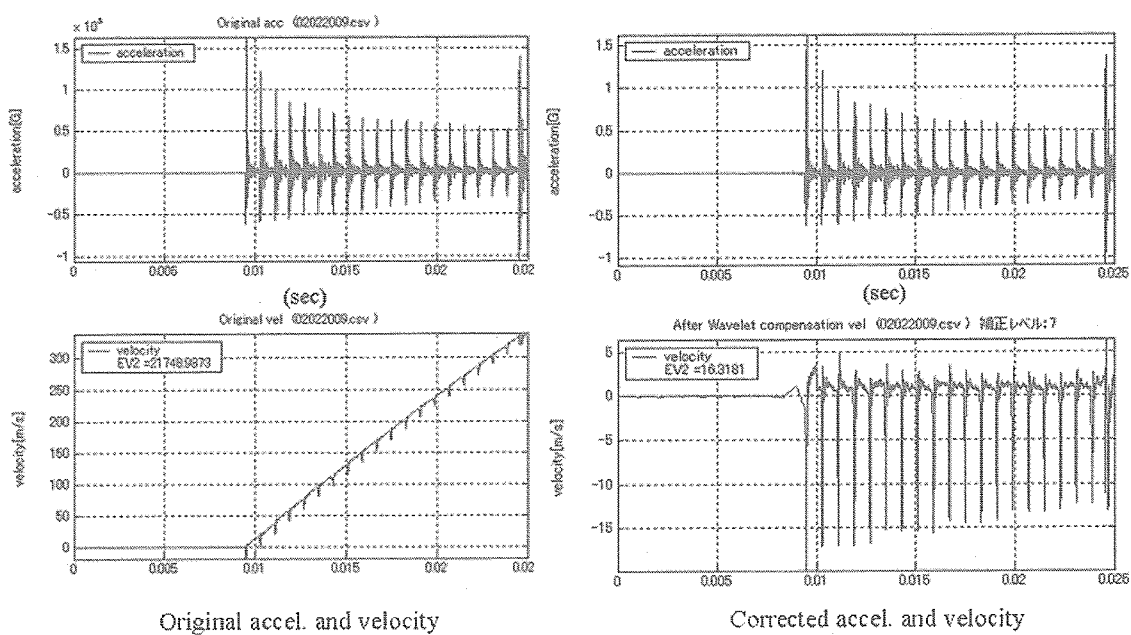


図10 基礎実験の計測結果（補正前（左）、後（右））

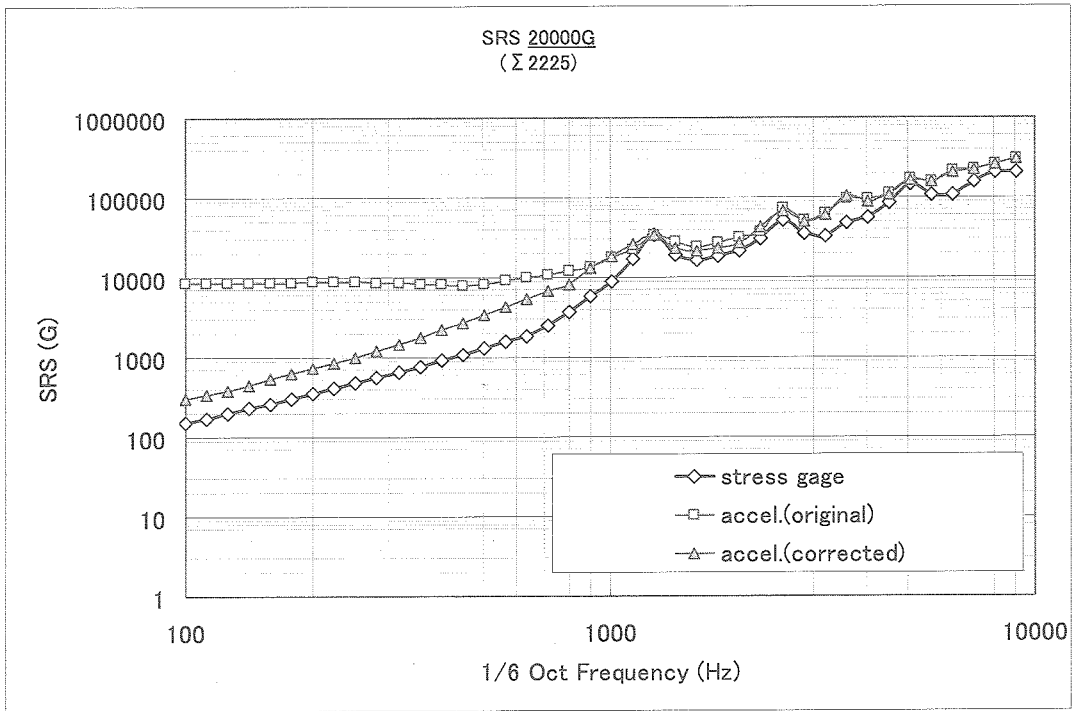


図 11 基礎実験の SRS 比較

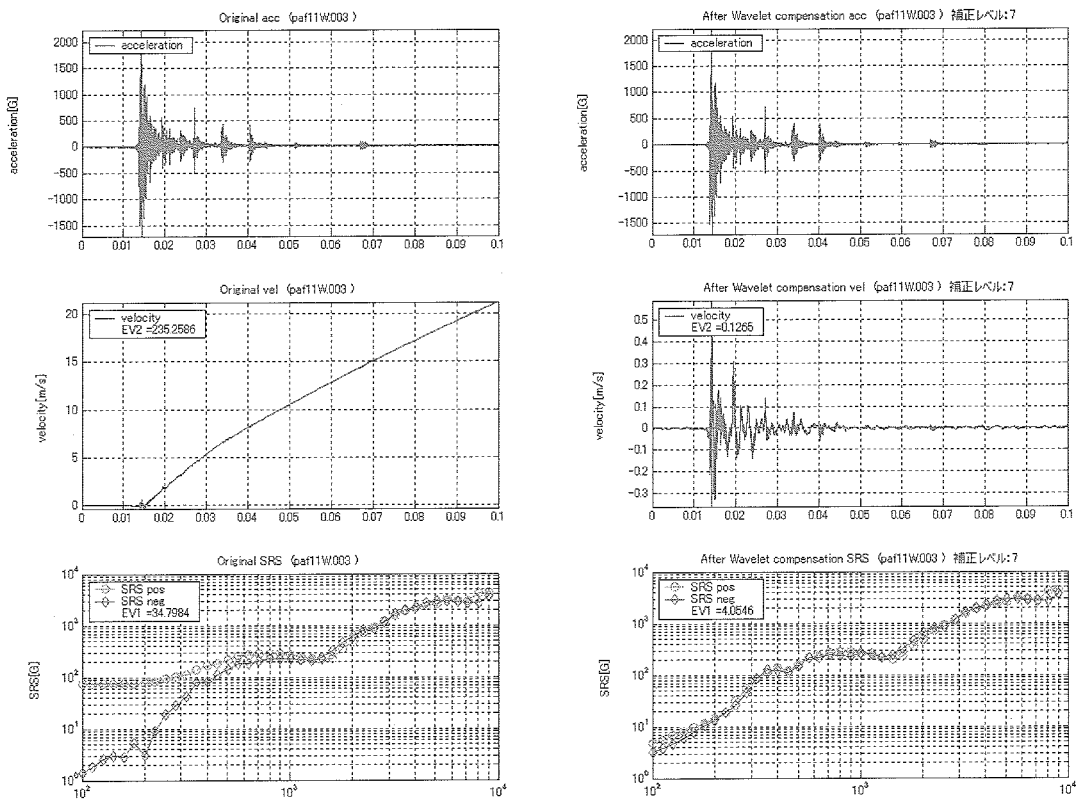


図 12 衛星 PAF 分離衝撃試験の補正例 (補正前 (左)、補正後 (右))

参考文献

- [1] A. Chu, "Zeroshift of Piezoelectric Accelerometers in Pyroshock Measurements", Pyrotechnic Shock Workshop, 57th Shock and Vibration Symposium, 1987.
- [2] D. Smallwood and J. Cap, "Salvaging Pyrotechnic Data with Minor Overloads and Offsets", Journal of IEST, pp. 27-35, May/June 1999.
- [3] D. Smallwood and J. Cap, "Salvaging Transient Data with Overloads and Zero Offsets", Proc. 68th Shock and Vibration Symp., SAVIAC, Arlington, Virginia, 1998.
- [4] J. Quintana, J. Perez, F. Sanz, "Experience and Future Trends in the Process of Qualification of Payloads to the Pyroshock Environment", Proc. 4th Int. Symp. On Environmental Testing for Space Progeammes, Liege, Belgium, June, 2001.
- [5] S. Mallat, "A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet representation", IEEE Pattern Anal. and Machine Intell., Vol.11, No. 7, pp.674-693.
- [6] K. Ueda and A. Umeda, "Characterization of Shock Accelerometers Using Davis Bar and Laser Interferometer", Experimental Mechanics, Sept. 1995.
-

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-04-020

発行日 2005年2月3日
編集・発行 独立行政法人宇宙航空研究開発機構
〒182-8522
東京都調布市深大寺東町七丁目4番地1
TEL 0422-40-3000 (代表)
印刷所 株式会社 ビー・シー・シー・
東京都港区浜松町2-4-1

©2005 JAXA

※本書(誌)の一部または全部を著作権法の定める範囲を超え、無断で複写、複製、転載、テープ化およびファイル化することを禁じます。

※本書(誌)からの複写、転載等を希望される場合は、下記にご連絡ください。

※本書(誌)中、本文については再生紙を使用しております。

<本資料に関するお問い合わせ先>

独立行政法人宇宙航空研究開発機構 情報化推進部 宇宙航空文献資料センター



宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency