

東京大学大学院新領域創成科学研究科
複雑理工学専攻

令和元年度

修士論文

振子式衝撃試験装置の性能評価および

MCPの衝撃耐性評価

2020年2月日提出

指導教員 吉川 一郎 教授

福場 惇哉

論文要旨

宇宙機の開発段階における環境試験の中でも、衝撃試験は最も実施が困難な試験の一つである。衝撃試験を行う際には、実際の宇宙ミッションで使用される火工品を用いて行う実環境試験が一番確実である。火工品とは火薬や爆薬の爆発反応を利用する加工製品のことであり、主に衛星分離や構造物展開の際に締結ボルトを切断する目的で使用される。しかし、火工品は非常に高価であり且つその保管および取り扱いの手続きが煩雑であるため、近年開発が盛んに行われている小型衛星やコンポーネント単体の衝撃試験にその都度使用することは現実的ではない。こうした背景から、実環境試験に代わる衝撃試験実施環境の整備の必要性が高まってきているが、全国的に見ても試験施設の数決して多くないのが現状である。そこで我々は宇宙ミッションを想定した衝撃試験施設の整備を目指し、振子式の衝撃試験装置を建造した。この衝撃試験装置を用いて H-IIA ロケットとイプシロンロケットの衝撃試験環境が実現可能であることを確認した。しかし、高周波数領域では SRS 値が数千 G 程度過負荷となってしまうことが分かった。実現される衝撃環境の再現性に関しては、10 回衝撃を印加した際の SRS 値のばらつきが $\pm 100G$ 程度に抑えられていることを確認した。また、衝撃試験装置の性能向上の足掛かりとして、装置各部の材質選択等による SRS 値の調整可能性について検証を行った。その結果、剛性の異なる材質を用いることで SRS 値の周波数特性をある程度調整可能であることを確認した。更に本研究では、イプシロンロケットの衝撃試験要求値を満たす衝撃環境を用いて MCP (Micro Channel Plate) の衝撃試験を実施し、その衝撃耐性を評価した。その結果、寿命分布の平均値は約 8.1 回であり累積故障率が 90% 以上となるのは 14 回以上衝撃を印加した場合であることが分かった。

第 1 章では、本研究の背景と目的を記述した。

第 2 章では、今回我々が建造した衝撃試験装置の仕様および使用する計測装置、そして衝撃試験装置の性能評価について記述した。コントロール性に関しては SRS 値の高周波成分が試験要求値に対して数千 G 程度過負荷となってしまうことが分かった。再現性に関しては H-IIA ロケットの試験要求値を満たす衝撃環境において、10 回計測の SRS 値のばらつきが $\pm 100G$ 程度に抑えられることが分かった。

第 3 章では、振子式衝撃試験装置によって実現される衝撃環境 (SRS 値) の調整可能性について記述した。特に、ハンマー材質を剛性の低いものにするすることで SRS 値の高周波成分の過負荷を抑制することが可能であり、ハンマー先端の質量を大きくすることで低周波成分を押し上げることが可能である事が分か

った。

第4章では、実施したMCPの衝撃試験とその結果について記述した。MCPに印加した衝撃はイプシロンロケットの試験要求値を満たす衝撃環境であり、合計57セットのMCPに対して衝撃試験を実施した。その結果、衝撃に対する寿命の中央値は7回、平均値は約8.1回であった。更にこの寿命分布に対するフィッティングによって得られたワイブル分布を用いて、イプシロンロケットへの搭載可能性に関する考察を行い、本衝撃試験装置を用いて宇宙機搭載機器の衝撃耐性を評価することが可能である事を確認した。

最後に第5章では、第2章から第4章までの総括および衝撃試験装置開発の今後の課題について記述した。

目次

第1章 序論

- 1.1 背景
- 1.2 研究目的

第2章 構築した衝撃試験システム

- 2.1 振り子式衝撃試験装置
- 2.2 計測装置
- 2.3 衝撃試験における衝撃試験要求値について
- 2.4 衝撃試験装置の性能評価
 - 2.4.1 コントロール性評価
 - 2.4.2 再現性評価

第3章 SRS 値の調整可能性について

- 3.1 ハンマー先端および衝撃受け部
- 3.2 供試体固定治具
- 3.3 緩衝材
- 3.4 錘
- 3.5 宇宙機の衝撃試験要求に対する最適な組み合わせの考察

第4章 MCP の衝撃試験

- 4.1 衝撃試験対象
- 4.2 試験に採用した衝撃試験環境
- 4.3 衝撃加速度の計測位置の妥当性検証
- 4.4 衝撃試験手順
- 4.5 衝撃試験結果
- 4.6 衝撃に対する MCP の寿命分布の推定

第5章 まとめ

参考文献

謝辞

第1章 序論

1.1 背景

近年、世界的に小型衛星の開発が盛んに行われている。開発段階における環境試験は小型衛星の信頼性向上に重要な役割を担っており、衛星単位あるいは観測機器等のコンポーネント単位での試験の実施が要求されることも多い。環境試験では振動や衝撃、熱真空などに対する耐性を確認する必要がある。その中でも衝撃に関する試験は最も実施が困難な試験の一つである。

ロケットおよび衛星等の宇宙機では、打ち上げから運用までの各ミッションにおいて様々な衝撃発生イベントが存在する。具体的な衝撃発生イベントは、ロケット段間分離および衛星分離、アンテナ等の展開構造物の解放、太陽光電池パドル保持開放、ロケットエンジンの点火・燃焼終了、フェアリング分離などである[宇宙航空研究開発機構, 2017]。これらのほとんどは火工品（火薬や爆薬の爆発反応を利用する加工製品）の使用によって発生する衝撃現象である。宇宙機に使用される火工品にはセパレーションナットやカッター組立、ワイヤーカッターなどがある[宇宙航空研究開発機構, 2017]。例えばカッター組立とは衛星分離に主に使用されるもので、飛行中の衛星と衛星分離部（PAF）を繋ぐマルマンバンドの締結ボルトを切断する火工品である。カッター組立の作動原理は、隔壁型起爆管内で火薬を起爆することで内部の圧力が上昇し、ブレードが加速されることでその運動エネルギーを利用して締結ボルトを切断する。このような火薬の使用によって大きな衝撃が発生し、ロケットに搭載される衛星等は非常に厳しい衝撃環境にさらされることとなる。地上で行う衝撃試験ではこのような衝撃を模擬した衝撃環境を実現することが求められる。

衝撃試験の方法としては、実際のミッションで使用される火工品を用いて行う実環境試験が一番確実である。しかし実環境試験は火工品の使用によるコストの問題に加え、その保管や取り扱いが煩雑であることから、低予算且つ短納期で開発が行われる小型衛星やそれに搭載されるコンポーネント単位に対する衝撃試験の選択肢としては現実的でない[畑村, 2015]。こうした背景から実環境試験以外の衝撃試験方式の研究開発がこれまでも行われてきた。代表的な衝撃試験方式としては、供試体を取り付けた高剛性な台を落下させることで台の衝撃面を衝突させ衝撃を印加する落下試験方式や、加振機を用いて衝撃を印加する動電型加振機方式、そして供試体をプレートやビーム（梁）に固定してハンマーなどで衝撃を印加する機械的インパクト方式に大別される[宇宙航空研究開発機構, 2017]。畑村の研究[畑村, 2015]によると、これらの試験方式の中でも機

機械的インパクト方式が最も優れた試験方式であることが示唆されているが、依然として宇宙機に対する衝撃試験の実施には課題が多く残されている。

こうした背景から、我々は機械的インパクト方式を採用した衝撃試験装置に関する研究を行った。

1.2 研究目的

衝撃試験装置に求められる性能は大きく分けて二つある。一つ目は、ミッション毎に提示される衝撃試験要求値を過不足なく実現しつつ過負荷を回避するコントロール性であり、二つ目は同様の試験条件で実現される各衝撃環境のばらつきを小さく抑える再現性である。畑村の研究[畑村, 2015]では、機械的インパクト方式におけるコントロール性と再現性についての検証が行われており、中でもコントロール性に関してはその調整の難しさが述べられている。ここで、実際のミッションで提示される衝撃試験要求値を図 1 に示す。**SRS** (衝撃応答スペクトラム) とは、1 自由度振動系の共振周波数がある定められた範囲で推移させ、共振周波数毎に当該 1 自由度系のベースに衝撃加速度が入力された際の最大加速度応答を算出した結果として得られる周波数歴のスペクトラムである。定義される衝撃環境の周波数範囲はミッション毎に異なるが、外形は概ね同じであり、このような要求値を全周波数領域において達成する衝撃環境での試験の実施が求められる。衝撃試験装置は一般的にその剛性の高さから、高周波成分が励起されやすい傾向にあるため、高周波成分の要求値達成は比較的容易である。その一方で低周波成分については、その調整の手立ての少なさから、多くの場合印加する衝撃の大きさ自体を大きくすることによって要求値の達成を目指すことが多い。しかしこれではほとんどの場合、高周波成分が過負荷となってしまう問題が生じる。**SRS** 値の調整方法についてはその使用材料などに関する先行研究[波多, 2014]もなされているが、あまり定量的に議論されていない。そこで本研究では振子式衝撃試験装置において、使用する材料特性の違いによる **SRS** 値の調整可能性に関する研究を行った。

さらに本衝撃試験装置を用いて、光学観測機器に広く用いられる **MCP** (Micro Channel Plate) の衝撃試験を実施し、その衝撃耐性を調査した。そしてこの **MCP** が実際の宇宙ミッションに搭載可能であるかについて考察した。

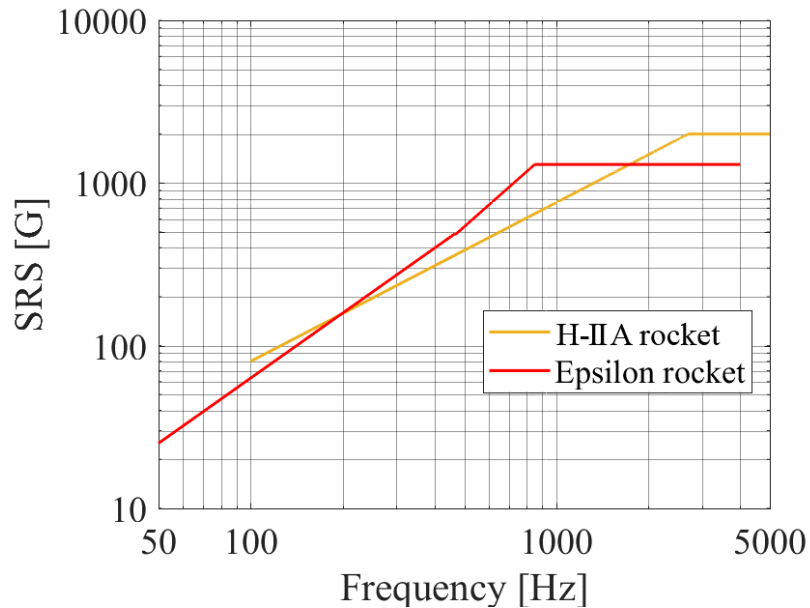


図 1. H-IIA ロケットおよびイプシロンロケットの衝撃試験要求値

第 2 章 構築した衝撃試験システム

2.1 振り子式衝撃試験装置

我々は今回、機械的インパクト方式を採用した振り子式の衝撃試験装置を建造した。機械的インパクト方式とは、供試体をプレートやビーム（梁）に固定し、ハンマーなどで衝撃を加え、供試体に衝撃加速度を印加する方式である。我々が建造した振り子式衝撃試験装置の外観および仕様を図 2, 3 および表 1 に示す。ここで、表 1 に示す実現可能な衝撃環境例の H-IIA ロケットの試験要求値およびイプシロンロケットの試験要求値とは、図 1 に示す SRS 値である。本衝撃試験装置は中央に振り子式のハンマーを有しており、これを供試体固定ベースに取り付けられた衝撃受け部に打ち付けることで衝撃を加え、供試体固定治具を介して供試体に衝撃を印加する。供試体に印加される衝撃加速度は、供試体固定治具上の供試体と同一面にて、加速度センサを用いて計測を行う。衝撃試験装置の床面には質量 150kg の鉄板を用いており、この鉄板にアルミフレームを固定している。また、鉄板の下に滑り止め用マットを敷くことにより衝撃試験装置自体の横移動を防止し、衝撃試験装置全体の剛性を確保している。ハンマー先端部分の

接触面には R1000 程度の曲率を持たせており、且つ材質の交換が可能で、鋼や銅、木材などを選択できる。また、ハンマーベースには錘を取り付けることができ、ハンマーベース部分の質量は 5.3~12.8kg まで調整可能である。衝撃受け部も材質の交換が可能であり、鋼やアルミを選択することができる。供試体固定ベースの寸法は縦 280mm×横 280mm であり、これより小さい供試体であれば供試体固定治具にネジで固定し衝撃試験を実施することが可能である。

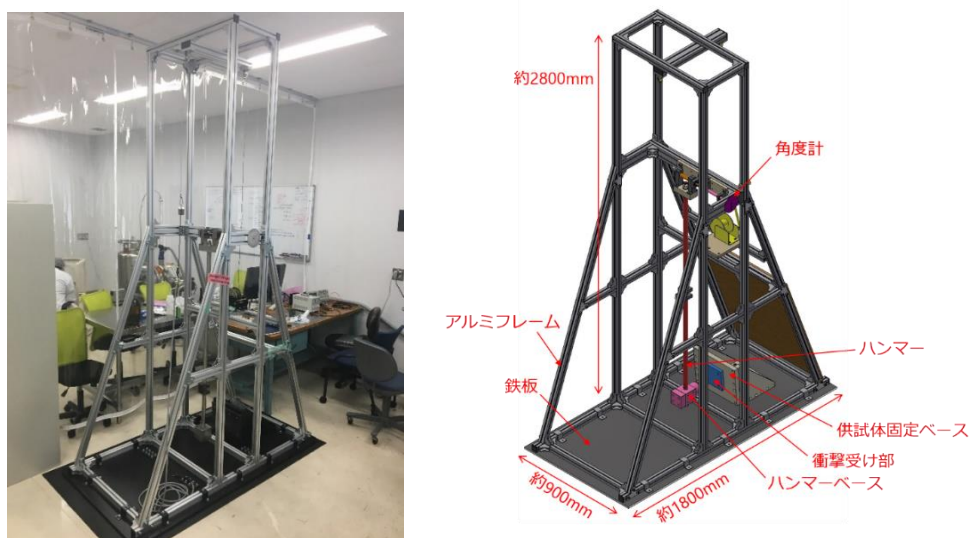


図 2. 建造した衝撃試験装置の外観（左）および各部名称（右）

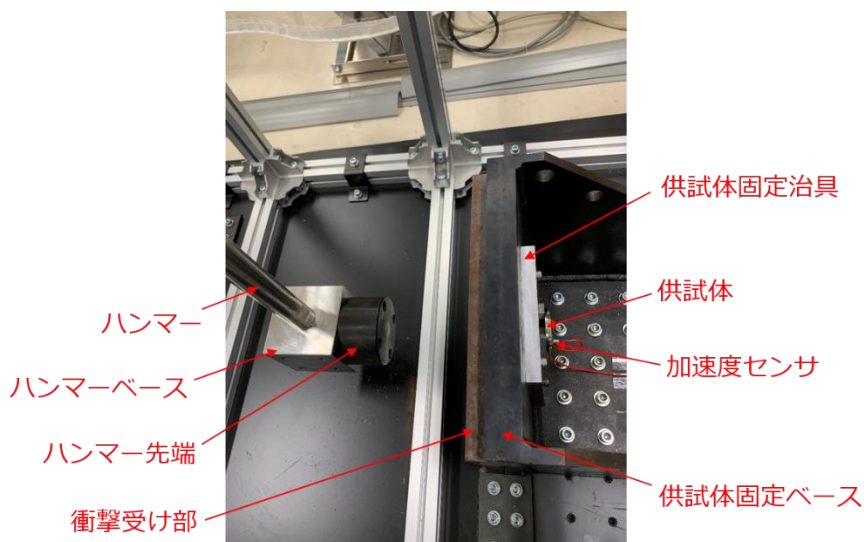


図 3. 供試体固定ベース周りの外観

表 1 衝撃試験装置の諸元

試験方式	振子式
本体寸法	W900mm×L1800mm×H2800mm
ハンマー落下高さ	0～3400mm
供試体固定ベース寸法	W280mm×L280mm
実現可能な衝撃環境例	H-IIA ロケットの試験要求値：落下高さ約 230mm イプシロンロケットの試験要求値：落下高さ約 300mm

2.2 計測装置

今回構築した衝撃試験システムでは、印加する衝撃の大きさに応じて 2 種類の加速度センサを使い分けて計測を行う。使用している加速度センサ、チャージコンバータ（チャージアンプ）およびデータロガーの組み合わせは以下のとおりである。尚、計測可能な周波数レンジは最大 40kHz である。また、各加速度センサの主な仕様を表 2 および表 3 に示す。

- ①加速度センサ : NP-2106（小野測器製）（図 4. 左の下）
 チャージコンバータ : CH-6130（小野測器製）（図 4. 左の上）
 データロガー : DS-3000（小野測器）（図 4. 中央）
 接着剤 : Mounting wax 32279（Endevco 製）（図 4. 右）



図 4. 加速度センサおよびチャージコンバータ（左）データロガー（中央）
接着剤（右）

表 2. 加速度センサ NP-2106 の諸元

計測軸	1 軸
電荷感度	0.0397 [pC/m/s ²]
最大測定加速度	100,000 [m/s ²]
共振周波数	60kHz 以上
取り付け方法	接着

②加速度センサ : Model 2225M5A (Endevco 製) (図 5. 左)

チャージアンプ : Model 133 (Endevco 製) (図 5. 右)

データロガー : DS-3000 (小野測器製)

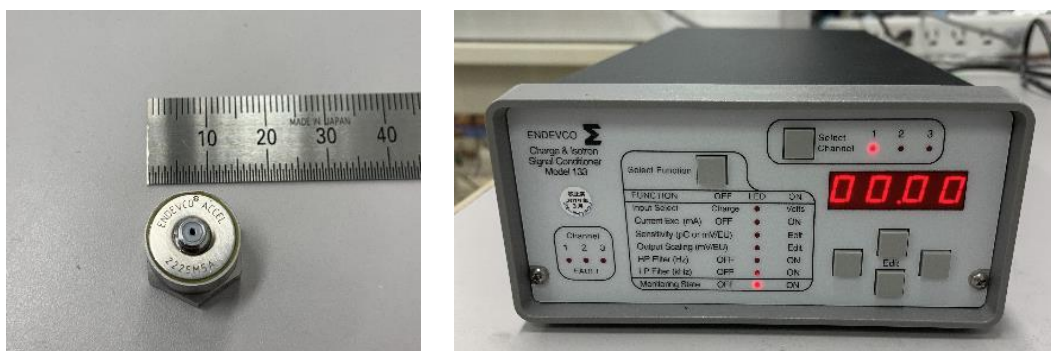


図 5. 加速度センサ (左) およびチャージアンプ (右)

表 3. 加速度センサ Model 2225M5A の諸元

計測軸	1 軸
電荷感度	0.0022 [pC/m/s ²]
最大測定加速度	1,000,000 [m/s ²]
共振周波数	80kHz
取り付け方法	ネジ止め

以後、加速度センサ NP-2106 を加速度センサ 1、加速度センサ Model 2225M5A

を加速度センサ 2 とそれぞれ呼称する。

2.3 衝撃試験における衝撃試験要求値について

衝撃試験要求値は、衝撃応答スペクトラム（SRS）で評価されることが一般的である。SRS とは図 6 に示すような一連の 1 自由度の振動系に、ベースから加速度 $\dot{y}(t)$ が入力された時の、振動系の絶対加速度応答 $\ddot{x}(t)$ の最大ピーク値である。ここで、図 6 中の m , k , c はそれぞれ 1 自由度振動系の質量、剛性および減衰係数である。この計算を周波数毎に実行し、それぞれの周波数に対応する最大値をプロットしたものが SRS の解析結果である。

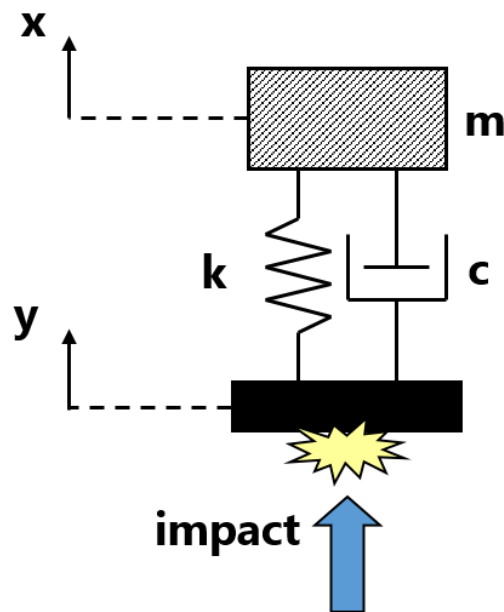


図 6.1 自由度振動系

ここで、1 自由度振動系の運動方程式を式 (1) に示す。

$$m\ddot{x}(t) + c(\dot{x}(t) - \dot{y}(t)) + k(x(t) - y(t)) = 0 \quad (1)$$

式 (1) を相対変位 $z(t) = x(t) - y(t)$ で表すと、式 (2) となる。

$$m\ddot{z}(t) + c\dot{z}(t) + kz(t) = -m\ddot{y}(t) \quad (2)$$

式 (2) をモードパラメータで表すと式 (3) となる。

$$\ddot{z}(t) + 2\xi\omega\dot{z}(t) + \omega^2z(t) = -\ddot{y}(t) \quad (3)$$

ここで、 $\omega = \sqrt{k/m}$ 、 $\xi = c/(2m\omega)$ である。

式 (3) で加速度 $\ddot{y}(t)$ は任意の関数であり、一般的には式 (4) に示すような単位インパルス応答関数 $h(t)$ を用いて畳み込み積分により解く。

$$z(t) = \int_0^t \ddot{y}(\tau)h(t-\tau)d\tau \quad (4)$$

式 (3) のような 1 自由度系のインパルス応答関数は式 (5) を解いたものである。

$$\begin{aligned} \ddot{z}(t) + 2\xi\omega\dot{z}(t) + \omega^2z(t) &= 0 \\ z(t=0) &= 0, \quad \dot{z}(t=0) = 1 \end{aligned} \quad (5)$$

式 (5) の解は、

$$h(t) = \frac{1}{\omega_d} e^{-\xi\omega t} \sin(\omega_d t) \quad (6)$$

である。

式 (6) を式 (4) に代入し、積分学の Leibnitz 則 (式 (7))

$$\frac{d}{dt} \int_0^t f(\tau)g(t-\tau)d\tau = f(t)g(0) + \int_0^t f(\tau) \frac{dg(t-\tau)}{dt} d\tau \quad (7)$$

により、絶対加速度は次式となる。

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) &= \frac{1}{\omega_d} \int_0^t \ddot{y}(\tau) [e^{-\xi\omega(t-\tau)} (\omega_d^2 - \xi^2\omega^2) \sin \omega_d(t-\tau) \\ &\quad + 2\xi\omega_d \cos \omega_d(t-\tau)] d\tau \end{aligned} \quad (8)$$

式 (8) を式 (4) と比べると、1 自由度系のインパルス加速度応答関数は

$$\begin{aligned}\hat{h}(t) &= \frac{1}{\omega_d} e^{-\xi\omega(t)} (\omega_d^2 - \xi^2\omega^2) \sin(\omega_d t) + 2\xi\omega_d \cos(\omega_d t) \\ &= e^{-\xi\omega(t)} [\alpha \sin(\omega_d t) + \beta \cos(\omega_d t)]\end{aligned}\quad (9)$$

となる。ここで、 $\alpha = (\omega_d^2 - \xi^2\omega^2)/\omega_d$ 、 $\beta = 2\xi\omega$ 、 $\omega_d = \sqrt{1 - \xi^2}\omega$ である。

1 自由度系の振動加速度応答とベース加速度との関係は

$$\ddot{x}(t) = \int_0^t \ddot{y}(\tau) \hat{h}(t - \tau) d\tau \quad (10)$$

となる。

式 (10) を離散化 $t = k\Delta$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) し (Δ はサンプリング刻み)、離散化した式の両辺に z 変換を施すと

$$\ddot{X}(z) = \hat{H}(z) \ddot{Y}(z) \quad (11)$$

となる。

ここで、 $\ddot{X}(z)$ 、 $\ddot{Y}(z)$ 、 $\hat{H}(z)$ はそれぞれ $\ddot{x}(t)$ 、 $\ddot{y}(t)$ 、 $\hat{h}(t)$ の z 変換であり、 $\ddot{H}(z)$ は伝達関数と呼ばれる。

$$\begin{aligned}\hat{H}(z) &= Z\{\hat{h}(t)\} \\ &= \alpha Z\{e^{-\xi\omega(t)} \sin(\omega_d t)\} + \beta Z\{e^{-\xi\omega(t)} \cos(\omega_d t)\} \\ &= \frac{Cz^2 + Dz + E}{z^2 - Az - B}\end{aligned}\quad (12)$$

ここで、

$$\begin{aligned}A &= 2 \cos(\omega_d \Delta) e^{-\xi\omega\Delta} \\ B &= e^{-2\xi\omega\Delta} \\ C &= 2\xi\omega\Delta \\ D &= \omega\Delta e^{-\xi\omega\Delta} \left\{ \frac{\omega}{\omega_d} (1 - 2\xi^2) \sin(\omega_d \Delta) - 2\xi \cos(\omega_d \Delta) \right\} \\ E &= 0\end{aligned}$$

式 (12) を式 (11) に代入すると、離散時系列における計算は式 (13) の逐次計算となる。

$$\ddot{x}(k) = A\ddot{x}(k-1) + B\ddot{x}(k-2) + C\ddot{y}(k) + D\ddot{y}(k-1) + E\ddot{y}(k-2) \quad (13)$$

衝撃応答スペクトラム解析は、ベースの加速度 $\ddot{y}(t)$ を入力した場合における式 (13) に示す 1 自由度振動系の加速度応答 $\ddot{x}(t)$ のデジタルフィルタの出力の最大値である。通常、SRS 解析では $\xi = 5\%$ 、または $Q = 1/(2\xi) = 10$ を用いる。

従って、SRS の計算式は

$$SRS(\omega, \ddot{y}(t)) = \max(|\ddot{x}(t)|) \quad (14)$$

となる。

宇宙機の衝撃環境の予測法には、試験実績に基づく手法と解析的手法の 2 つがある[宇宙航空研究開発機構, 2017]。中でも試験実績に基づく手法としては、同一あるいは類似した構造様式を持つ宇宙機のフライトデータや地上での衝撃試験データ等をそのまま利用して衝撃環境を予測する直接計測法や、各種衝撃源の SRS 値に対して距離や締結部などによる減衰を加えることで搭載部位における SRS 値を求める経験的手法などがある。宇宙機の主な衝撃源としては火工品の使用が挙げられる。具体的にはフェアリングの開頭やロケットからの衛星の分離、太陽電池パドルの展開などの際に火工品が使用される。ここでイプシロンロケットの衝撃試験要求値を図 7 に示す。 $G = 9.8 \text{ [m/s}^2\text{]}$ である。ロンチャーから提示されるイプシロンロケットの衝撃試験要求値は、衛星分離衝撃および SAP 保持開放衝撃を想定した衝撃環境として定義されている。

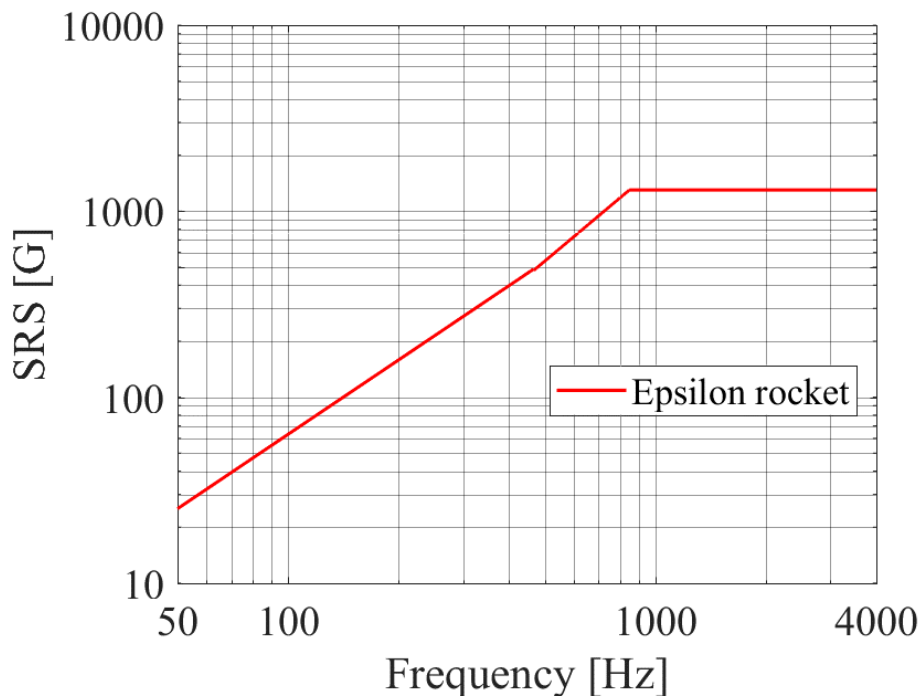


図 7. イプシロンロケットの衝撃試験要求値
 横軸は周波数、縦軸は SRS 値を表している。イプシロンロケットの試験要求値は 50~4000Hz の周波数領域で定義されている。

2.4 衝撃試験装置の性能評価

衝撃試験装置に要求される性能は、大きく分けて二つある。一つ目はコントロール性である。これは、ミッション毎に提示される衝撃試験要求値を過不足なく実現しつつ過負荷を回避する能力を意味する。コントロール性が高いことで、供試体に必要以上の負荷が掛かることを回避することができ、想定外の破壊を防ぐことができる。二つ目は再現性である。これは、同様の試験条件で実現される各衝撃環境のばらつきを小さく抑える能力である。再現性が高く、繰り返し安定して同程度の衝撃環境を実現することができれば、印加した衝撃の試験要求値未達成による再試験を回避することができ、無駄な疲労蓄積の回避に繋がる。今回我々が建造した衝撃試験装置について、この二つの評価指標を用いて性能評価を行った。

2.4.1 コントロール性評価

H-IIA ロケットおよびイプシロンロケットの衝撃試験要求値を目標に衝撃環境を再現した。計測した時系列加速度データおよびSRS値による試験要求値との比較のグラフを図8と図9に示す。尚、計測に用いたハンマー先端の材質および衝撃受け部の材質は共に鋼であり、供試体固定治具は150mm×150mm×15mmのアルミ板、ハンマーベースに錘は装着していない。低周波数領域ではどちらの場合も、要求値に対する差は数十から数百G程度の範囲に収まっているが、1000Hz以上の周波数領域では数千G程度の過負荷となっていることが分かる。高周波数領域で特に過負荷となってしまう原因としては、ハンマー先端の材質とハンマーが衝突する衝撃受け部の材質が共に鋼であることから、金属同士の衝突によって高周波成分が励起されやすいためと考えられる。

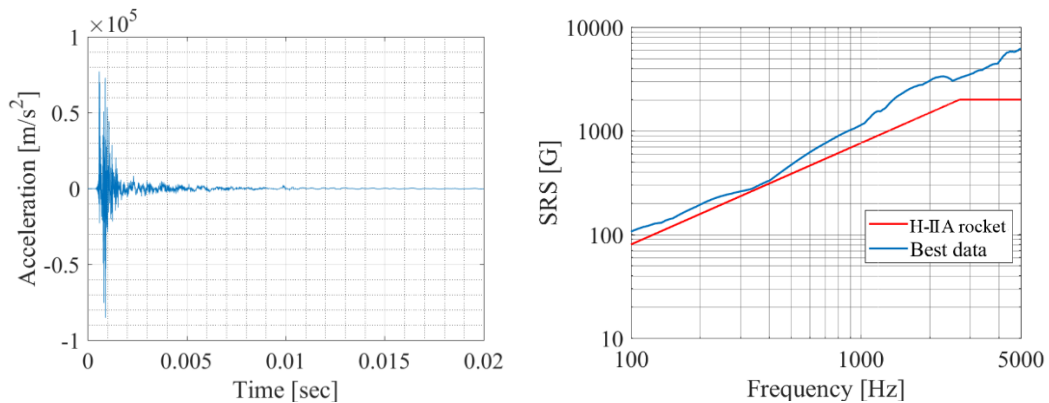


図8. 計測した時系列加速度データ（左）および
H-IIA ロケットの衝撃試験要求値に対するSRS値の比較（右）
時系列加速度データの横軸は時間、縦軸は加速度、SRS値比較のグラフの
横軸は周波数、縦軸はSRS値を表している。

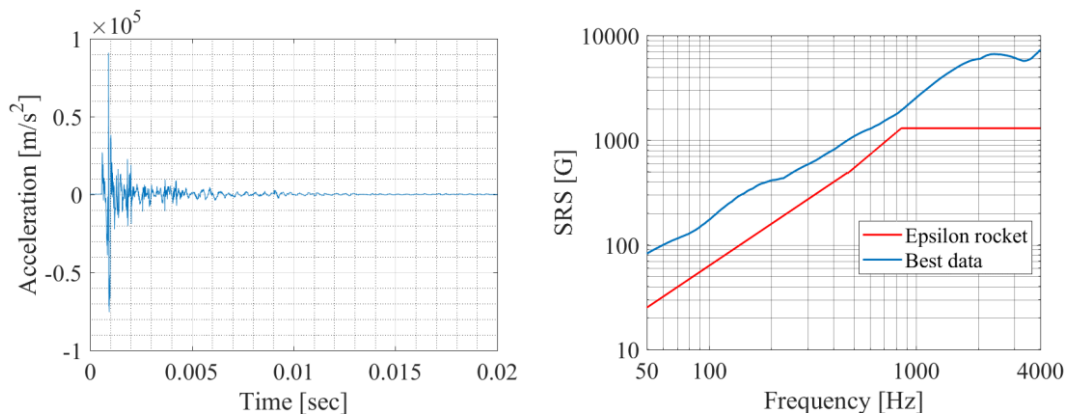


図9. 計測した時系列加速度データ（左）および
 イプシロンロケットの衝撃試験要求値に対するSRS値の比較（右）
 時系列加速度データの横軸は時間、縦軸は加速度、SRS値比較のグラフの
 横軸は周波数、縦軸はSRS値を表している。

2.4.2 再現性評価

H-IIA ロケットの衝撃試験要求値を満たす衝撃環境において、再現性を検証した。図8と同様の試験条件のもと衝撃を印加し、加速度センサ1を用いて衝撃加速度を10回計測した。それぞれの計測結果に対するSRS値、および10回計測の平均値と周波数毎のばらつきの大きさを図10に示す。ただし、エラーバーを見やすくするために、図10（右）は縦軸と横軸を共に線形スケールで表示している。SRS値のばらつきは大きなところでも±100G程度に収まっており、十分に再現性の高い試験装置であると判断できる。

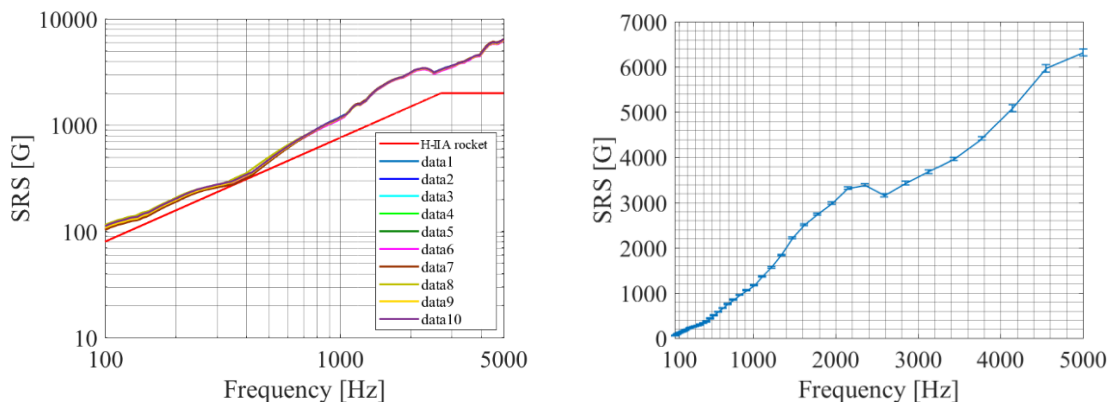


図 10. 10 回衝撃を印加した際の各 SRS 値と H-IIA ロケットの衝撃試験要求値との比較 (左) およびそれらの平均値と周波数毎の SRS 値のばらつき (右) 共に横軸は周波数、縦軸は SRS 値を表している。右図のエラーバーは各 SRS 値の周波数毎のばらつき (標準偏差 $\pm 1\sigma$) を表している。

第 3 章 SRS 値の調整可能性について

衝撃試験要求値を満たす衝撃環境を実現する際には、高周波数領域における SRS 値と低周波数領域における SRS 値のバランスがしばしば問題となる。一般的に低周波数領域の SRS 値の調整はその手立ての少なさから困難とされている [畑村ほか, 2015]。低周波数領域の試験要求値を達成するためには、印加する衝撃の大きさ自体を大きくする方法が最も簡単であるが、この場合高周波数領域において試験要求値に対し過負荷となってしまうことが多い。本衝撃試験装置でも同様の課題を抱えており、高周波成分を抑えつつ低周波成分を押し上げる方法が必要である。SRS 値の調整方法として緩衝材の使用や衝撃体の材質の選択などが知られているが、これらの効果について定量的に議論をしている例は少ない。こうした背景から、振子式衝撃試験装置における SRS 値の調整可能性について検証を行った。具体的にはハンマー先端の材質、衝撃受け部の材質、供試体固定治具の形状や大きさ、緩衝材の使用およびハンマーベースの質量について検証を行った。尚、検証する周波数領域は、H-IIA ロケットおよびイブシロンロケットの衝撃試験要求値が提示されている 50~5000Hz とした。

3.1 ハンマー先端および衝撃受け部

一般的に、質量 m の物体が速度 V で衝突する際の衝撃力 F は

$$F = \frac{\Delta(mV)}{\Delta t} = m \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (15)$$

で表される。ここで $\Delta V = V - V'$ (V : 衝突速度、 V' : 衝突後速度=0) であり、 Δt は2つの物体が接触している時間である。今、衝突速度 V はハンマーの落下高さによって決まり、接触時間 Δt は物体の質量や硬さ、形状、接触面積などに影響を受けると考えられる[石川ほか, 2008]。しかし衝撃現象において、この Δt を求めることは困難である。 Δt の大小を考える手立てとして、ここでは接触剛性を考える。接触剛性とは物体と物体がぶつかる際の荷重-変位曲線における除荷曲線の初期点での除荷勾配に相当する[多賀, 2016]。衝撃体の先端を曲率半径 R_1 の球面とし、被衝撃体の接触部が平面である場合の接触剛性は次式で表される[横山, 2014]。

$$K = \frac{4}{3} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \sqrt{R_1} \quad (16)$$

ここで ν : ポアソン比、 E : 縦弾性率である。添え字1と2はそれぞれ衝撃体および被衝撃体を表す。接触剛性の大きさは接触する物体間の硬さを表しており、接触剛性が大きくなるにつれて、荷重に対する変形の割合が小さくなる。つまり接触剛性が大きいほど、物体が衝突してから離れるまでの接触時間 Δt が小さくなる。以上のことから、硬い物体が衝突する場合には Δt が小さくなるため高周波成分が励起されやすく、柔らかい物体が衝突する場合には Δt が大きくなるため高周波成分が励起されにくいと考えられる。

今回検証を行うハンマー材質は鋼 (炭素鋼 S45C)、銅 (タフピッチ銅 C1100) および木材 (ハードメイプル) であり、衝撃受け部の材質は鋼 (炭素鋼 S45C) とアルミ (A5052) である。それぞれの縦弾性率およびポアソン比を表4に示す[澤田, 1983]。

表 4. 各材質の物性値

	縦弾性率 [GPa]	ポアソン比
鋼 (炭素鋼 S45C)	205	0.25
銅 (タフピッチ銅 C1100)	118	0.33
アルミ (A5052)	70.6	0.30
木材 (ハードメイプル)	12.6	0.46

ここで衝撃体を鋼と銅および木材とし、被衝撃体を鋼およびアルミとしたときのそれぞれの接触剛性を、(衝撃体, 被衝撃体) = (鋼, 鋼) の接触剛性に対する比率として表 5 に示す。これを参考にハンマー材質および衝撃受け部の材質の違いによる SRS 値への影響を考察する。

表 5. 各材質の組み合わせによる接触剛性の比率

衝撃体 \ 被衝撃体	鋼 (炭素鋼 S45C)	アルミ (A5052)
鋼 (炭素鋼 S45C)	1	0.52
銅 (タフピッチ銅 C1100)	0.76	0.45
木材 (ハードメイプル)	0.14	0.12

まず、ハンマー先端の材質の違いによる SRS 値への影響を検証する。ハンマー先端の材質として鋼、銅、木材の 3 種類を用いた (図 11)。それぞれのハンマーで衝撃を印加した際の SRS 値の比較を図 12 に示す。ここで SRS 値の違いを見やすくするために、縦軸と横軸を共に線形スケールで表示している。尚、使用した衝撃受け部の材質は鋼、供試体固定治具は 150mm×150mm×15mm のアルミ板であり、印加する衝撃の大きさは折れ点周波数 (ここでは約 2600Hz) における SRS 値が 2000G 程度となる衝撃環境とした。図 12 を見ると、折れ点周波数以上の周波数領域で傾向が大きく異なることが分かる。鋼や銅の SRS 値は折れ点周波数以上の周波数領域で横這いもしくは上昇しているのに対し、木材を使用した場合は高周波成分が抑えられている。これは鋼や銅に比べて木材が柔らかいため接触剛性が低くなり、衝突時に木材がクッション効果を示すことで高周波成分の励起が抑えられているものと考えられる。

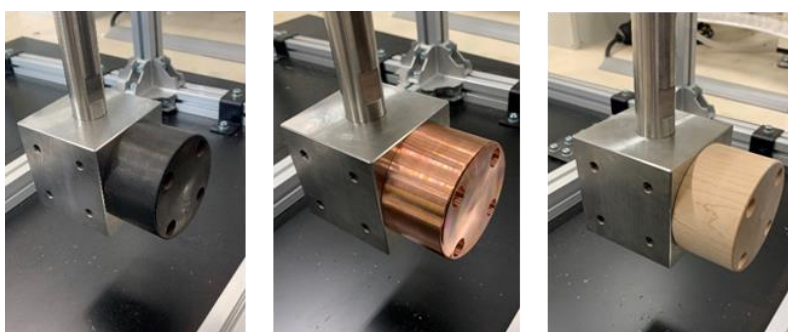


図 11. ハンマー先端の材質
鋼 (左)、銅 (中央)、木材(右)

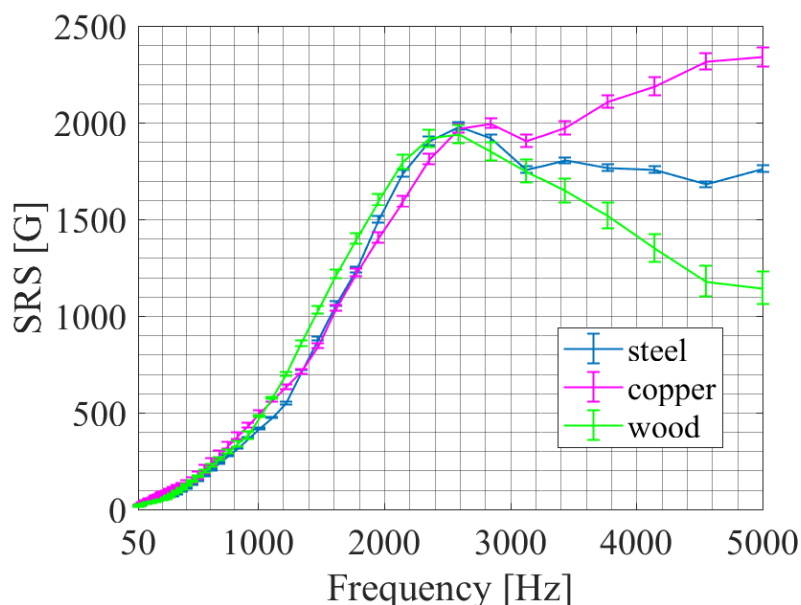


図 12. ハンマー材質の違いによる SRS 値の比較
横軸は周波数、縦軸は SRS 値を表している。エラーバーは 5 回計測における各 SRS 値の周波数毎のばらつき (標準偏差 $\pm 1\sigma$) を表している。

鋼製ハンマーで衝撃を印加した際の SRS 値に対する、銅製ハンマーおよび木製ハンマーで衝撃を印加した際の SRS 値の比率の比較を図 13 に示す。ここで周波数特性の違いを見やすくするために、縦軸を線形スケール、横軸を対数スケールで表示している。上述したように折れ点周波数以上の周波数領域では木製ハ

ンマーによる減衰効果が顕著であり、5000Hzにおいては鋼製ハンマーと比べて約30%程度SRS値が抑制されている。また、低周波数領域では概ね-20%~+30%辺りで推移していることが分かる。一方、銅製ハンマーの場合は接触剛性を考えると鋼ハンマーよりも高周波成分が小さくなると考えられるが、今回の結果では鋼ハンマーよりも大きいSRS値を示している。

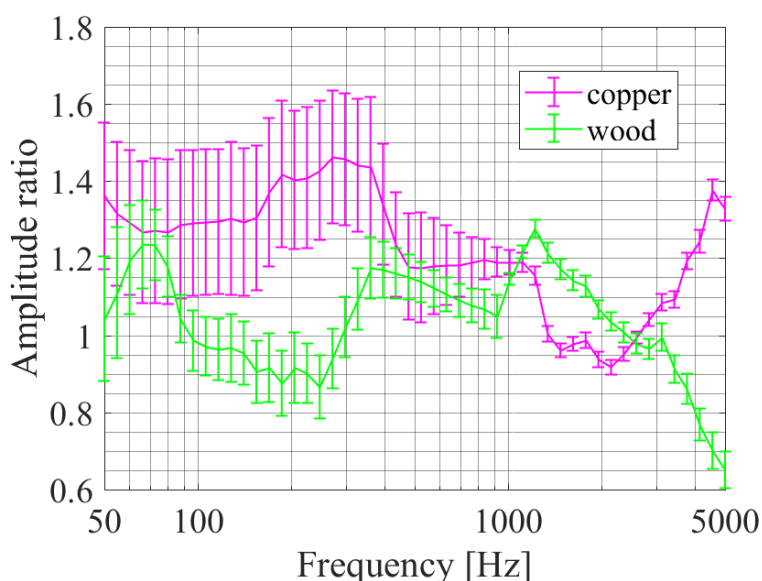


図 13. 鋼製ハンマーによる計測結果の SRS 値に対する、銅製ハンマーおよび木製ハンマーによる計測結果の SRS 値の比率
横軸は周波数、縦軸は比率、エラーバーは誤差の大きさを表している。

次に、衝撃受け部の材質の違いによる SRS 値への影響を検証する。衝撃受け部に用いる材質は鋼とアルミである (図 14)。寸法は同じであり、衝撃を印加する方向の厚さは共に 30mm である。ハンマー先端の材質は鋼、供試体固定治具は 150mm×150mm×15mm のアルミ板である。これらの衝撃受け部に対して、ハンマーの落下高さを揃えて衝撃を印加した際の SRS 値の比較を図 15 に示す。ここで SRS 値の違いを見やすくするために、縦軸と横軸を共に線形スケールで表示している。図 15 より、衝撃受け部にアルミを用いることによって、鋼を用いた場合に比べて SRS 値が全体的に小さくなっていることが分かる。

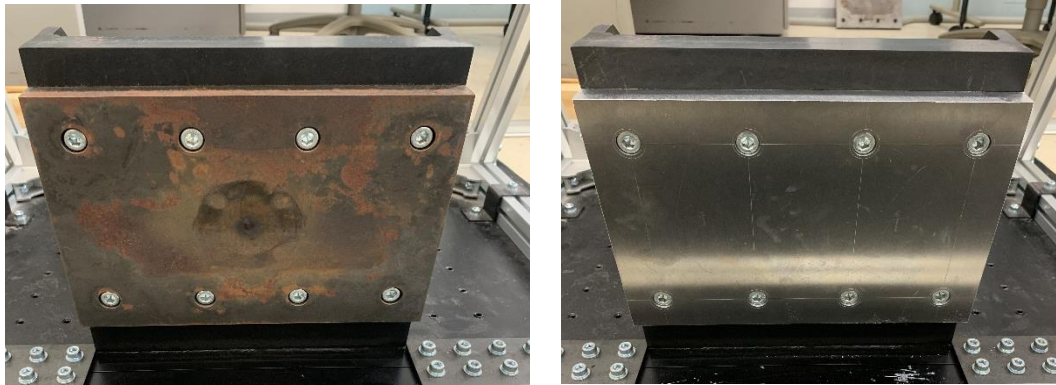


図 14. 鋼製の衝撃受け部（左）およびアルミ製の衝撃受け部（右）

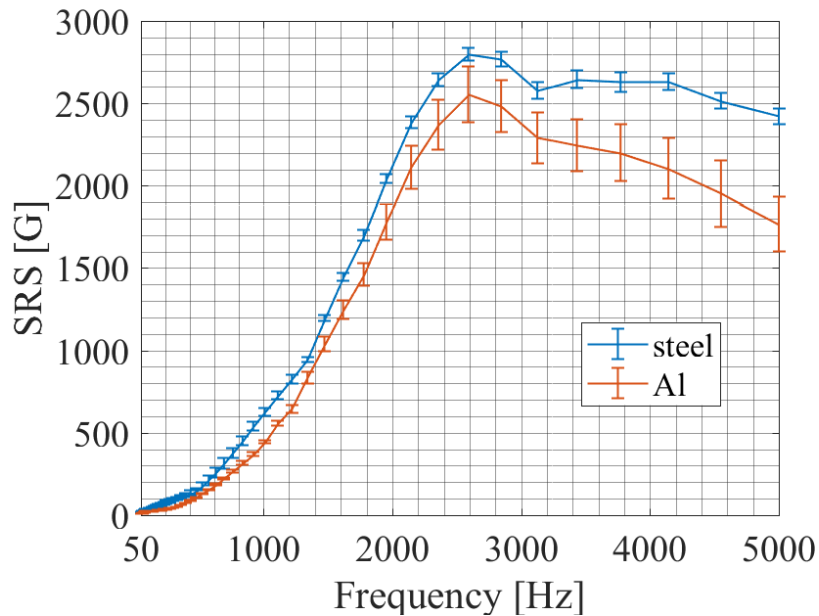


図 15. 衝撃受け部の材質の違いによる SRS 値の比較
横軸は周波数、縦軸は SRS 値を表している。エラーバーは 5 回計測における各 SRS 値の周波数毎のばらつき（標準偏差 $\pm 1\sigma$ ）を表している。

衝撃受け部が鋼である場合の SRS 値に対する、衝撃受け部がアルミである場合の SRS 値の比率の比較を図 16 に示す。尚、周波数特性の違いを見やすくするために縦軸を線形スケール、横軸を対数スケールで表示している。衝撃受け部にアルミを使用した場合、鋼を使用した場合よりも全体的に SRS 値が小さくなっている。これは鋼よりもアルミの方が柔らかいことで接触剛性が低くなり、クッ

ション効果によって衝撃力のピーク値が小さくなったものと考えられる。ただし均一に減衰されるのではなく、1000Hz 以上の高周波成分よりも 1000Hz 以下の低周波成分の方がより顕著に減衰していることが分かる。

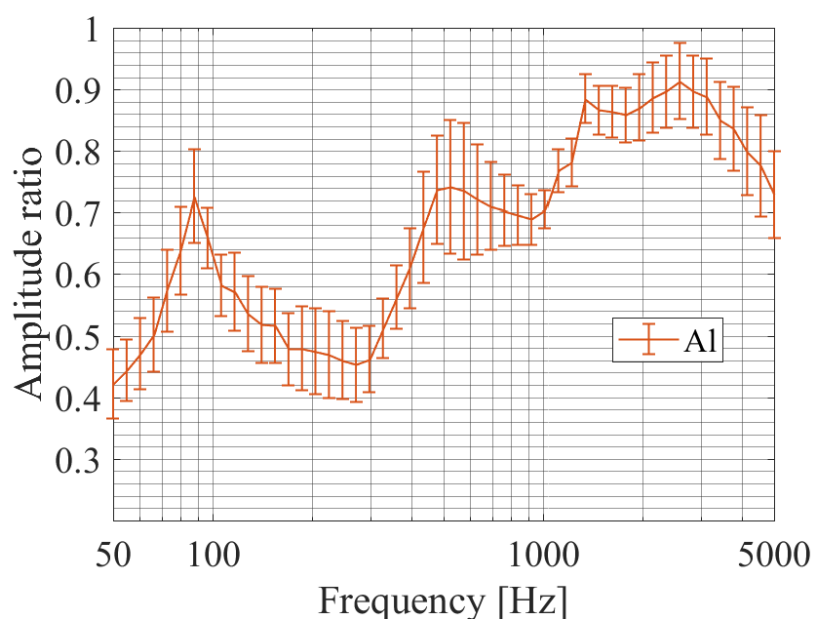


図 16. 鋼製衝撃受け部を用いた場合の SRS 値に対する
アルミ製衝撃受け部を用いた場合の SRS 値の比率
横軸は周波数、縦軸は比率、エラーバーは誤差の大きさを示している。

3.2 供試体固定治具

供試体固定治具の形状や大きさによる SRS 値への影響を検証する。今回対象としたのは、図 17 に示すような 4 種類の供試体固定治具と治具なし（供試体固定ベース本体）の 5 パターンである。

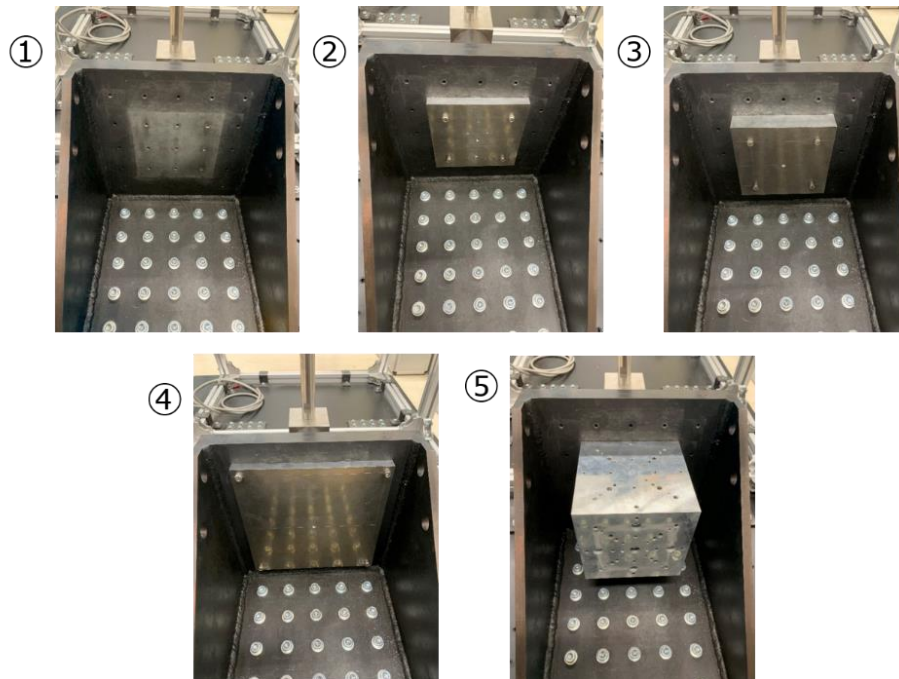


図 17. 供試体固定治具の種類

①は供試体固定治具を取り付けていない状態の供試体固定ベース本体である。

②～⑤の供試体固定治具は全てアルミ製である。

各供試体固定治具の寸法（縦×横×厚さ）は、②150mm×150mm×15mm、③150mm×150mm×30mm、④220mm×220mm×15mm、⑤150mm×150mm×150mm である。各供試体固定治具の固定位置は、②③④は四つ角をネジ止めで固定しており、⑤は手前の面から中央および各辺の midpoint 付近をネジ止めにより固定している。これらに対して衝撃を印加した際の **SRS** 値の比較を図 18 に示す。ここで **SRS** 値の違いを見やすくするために、縦軸と横軸を共に線形スケールで表示している。尚、使用したハンマー材質は鋼であり、印加する衝撃の大きさは折れ点周波数における **SRS** 値が 2000G 程度となる衝撃環境とした。①②③の **SRS** 値は同じ傾向を示しており、その折れ点周波数は 2600Hz 辺りである。ところが④と⑤は **SRS** 値の傾向が①②③と比べて大きく異なっていることがわかる。特にその折れ点周波数に注目すると、④の折れ点周波数は 1800Hz 辺りであり、⑤の折れ点周波数は 1500Hz 辺りとなっている。

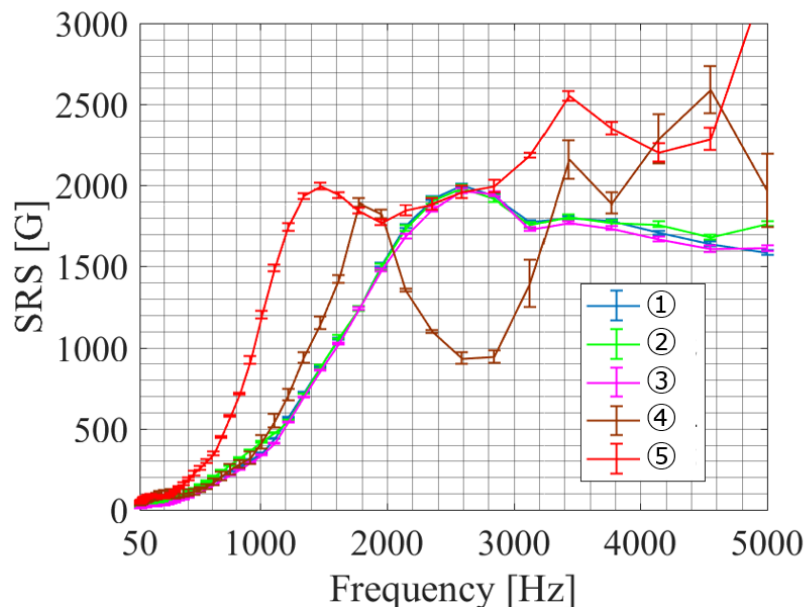


図 18. 供試体固定治具の違いによる SRS 値の比較

横軸は周波数、縦軸は SRS 値を表している。エラーバーは 5 回計測における各 SRS 値の周波数毎のばらつき（標準偏差 $\pm 1\sigma$ ）を表している。①②③は同じ傾向を示しているが、④と⑤の SRS 値は大きく異なることが分かる。

ここで、それぞれに印加された衝撃波形のパワースペクトルを図 19 に示す。①②③は 2500Hz 辺りにピークが位置しており、④は 1900Hz 辺り、⑤は 1150～1550Hz 辺りにピークが来ていることが分かる。これは各供試体固定治具を取り付けた際の、供試体固定ベースと供試体固定治具を合わせた固有振動数の変化により、折れ点周波数の位置が移動しているものと考えられる。ただし計測の周波数分解能は 50Hz である。

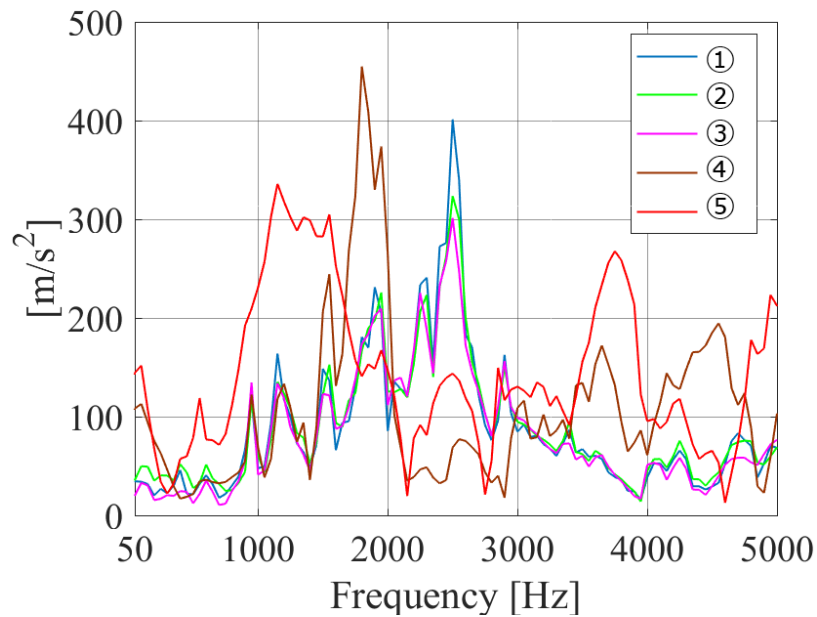


図 19. 印加された各衝撃波形のパワースペクトル
横軸は周波数、縦軸は振幅を表しており、5 回計測の平均値を示している。

3.3 緩衝材

供試体固定ベースと供試体固定治具の間に緩衝材を使用した場合の SRS 値への影響を検証する。使用する緩衝材の種類はバイトン（フッ素ゴムシート）およびアルミ板である。供試体固定治具は 150mm×150mm×15mm のアルミ板であり、緩衝材の大きさも 150mm×150mm である。また、使用したハンマー材質および衝撃受け部の材質は鋼である。緩衝材を図 20 のように、供試体固定治具と共締めで供試体固定ベースとの間に設置する。

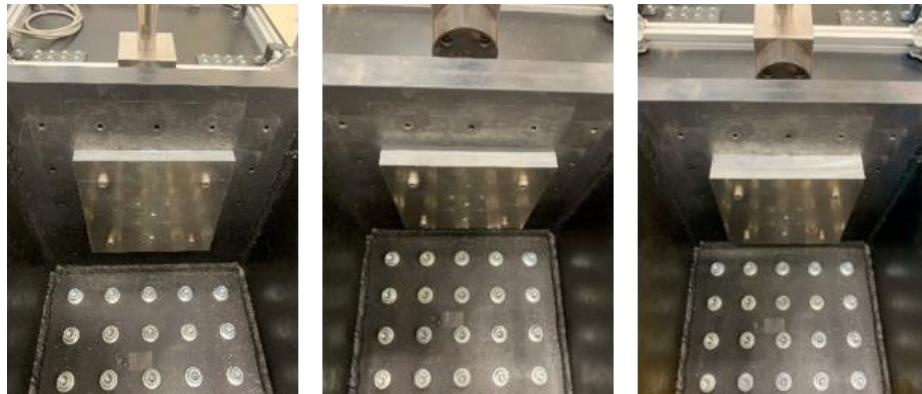


図 20. 緩衝材設置の様子

緩衝材なし（左）、バイトン有り（中央）、アルミ板有り（右）

同じハンマー高さで衝撃を印加した際の、緩衝材無し、バイトン厚さ 2mm、5mm、10mm、およびアルミ板厚さ 15mm の場合における SRS 値の比較を図 21 に示す。ここで SRS 値の違いを見やすくするために、縦軸と横軸を共に線形スケールで表示している。緩衝材無しの場合と比べて、バイトンを用いた場合にはその厚さに応じて SRS 値が小さくなっていることが分かる。

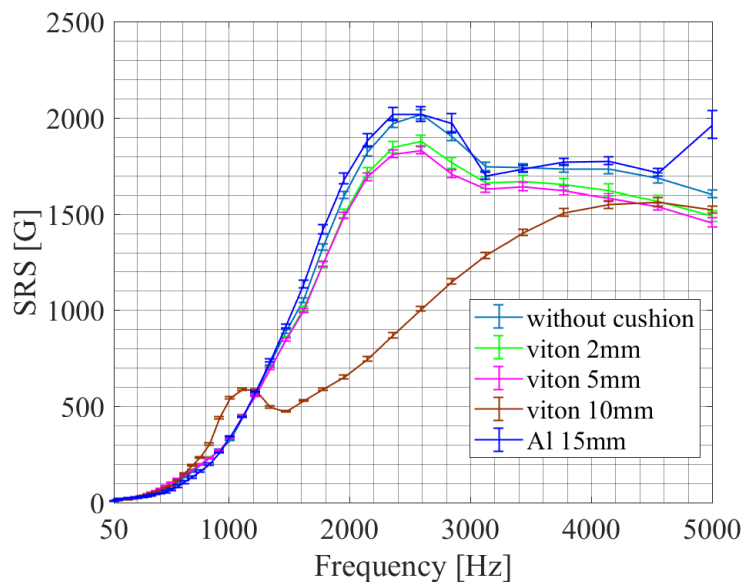


図 21. 緩衝材の違いによる SRS 値の比較

横軸は周波数、縦軸は SRS 値を表している。エラーバーは 5 回計測における各 SRS 値の周波数毎のばらつき（標準偏差 $\pm 1\sigma$ ）を表している。

緩衝材無しの場合の SRS 値に対する、各緩衝材を用いた場合の SRS 値の比率の比較を図 22 に示す。ここで周波数特性の違いを見やすくするために、縦軸を線形スケール、横軸を対数スケールで表示している。バイトンを使用した場合、50~100Hz や 200~1000Hz 辺りで SRS 値が大きくなっているが、1000Hz 以上の高周波成分は軒並み減衰していることが分かる。特にバイトン厚さ 10mm の場合、1000Hz あたりで+70%程度 SRS 値が大きくなっているが、それよりも高周波数領域においては減衰効果が顕著であることが分かる。アルミ板を緩衝材に用いた場合については、500Hz あたりで SRS 値が小さくなる傾向を示している。

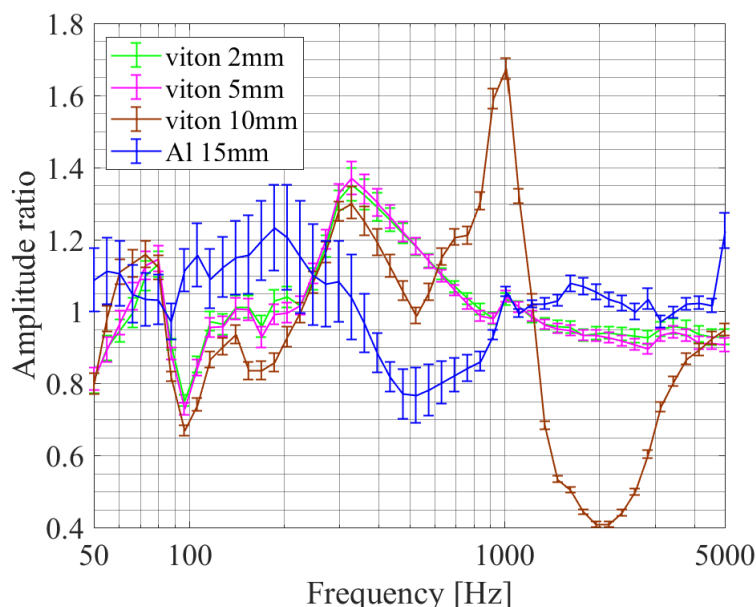


図 22. 緩衝材無しの場合に対する各緩衝材を用いた場合の SRS 値の比率
横軸は周波数、縦軸は比率、エラーバーは誤差の大きさを示している。

ここで 50~5000Hz におけるパワー合計値、および緩衝材無しの場合のパワー合計値を基準としたそれぞれのパワー合計値の比率を表 6 に示す。バイトンの厚さが増すごとにパワー合計値が減少していき、バイトン厚さ 10mm においてはパワー合計値が約 50%減少していることが分かる。また緩衝材にアルミ板を用いた場合は、パワー合計値で見るとほとんど減少していないことが分かる。

表 6. 50～5000Hz におけるパワー合計値と各比率

	パワー合計値 [$(m/s^2)^2$]	比率
緩衝材無し	1.25×10^6	1
バイトン 2mm	1.17×10^6	0.936
バイトン 5mm	1.12×10^6	0.896
バイトン 10mm	6.53×10^5	0.522
アルミ板 15mm	1.22×10^6	0.976

3.4 錘

ハンマーベースに錘を取り付けた場合の SRS 値への影響を検証する。ハンマーベースに錘を取り付けた様子を図 23 に示す。錘無しの状態のハンマーベースの質量は 5.3kg、錘 1 つあたりの質量は 2.5kg であるため、ハンマーベース部分の質量は 5.3～12.8kg まで調整が可能である。

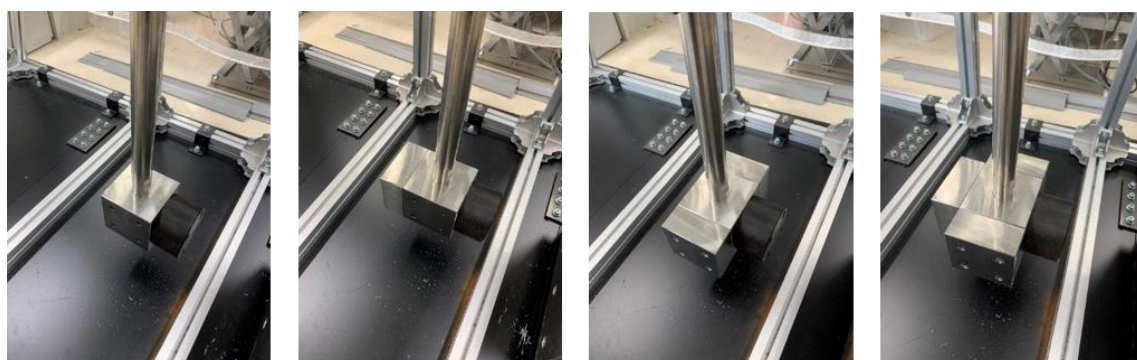


図 23. ハンマーベースに錘を取り付けた様子
錘無し（左）、錘 1 つ（中央左）、錘 2 つ（中央右）、錘 3 つ（右）。

同じ高さからハンマーを落下させて衝撃を印加した際の、錘の数の違いによる SRS 値の比較を図 24 に示す。ここで SRS 値の違いを見やすくするために、

縦軸と横軸を共に線形スケールで表示している。使用しているハンマー材質および衝撃受け部は鋼であり、供試体固定治具は 150mm×150mm×15mm のアルミ板である。図 24 を見ると、錘を増やすことで SRS 値が全体的に大きくなっていることが分かる。

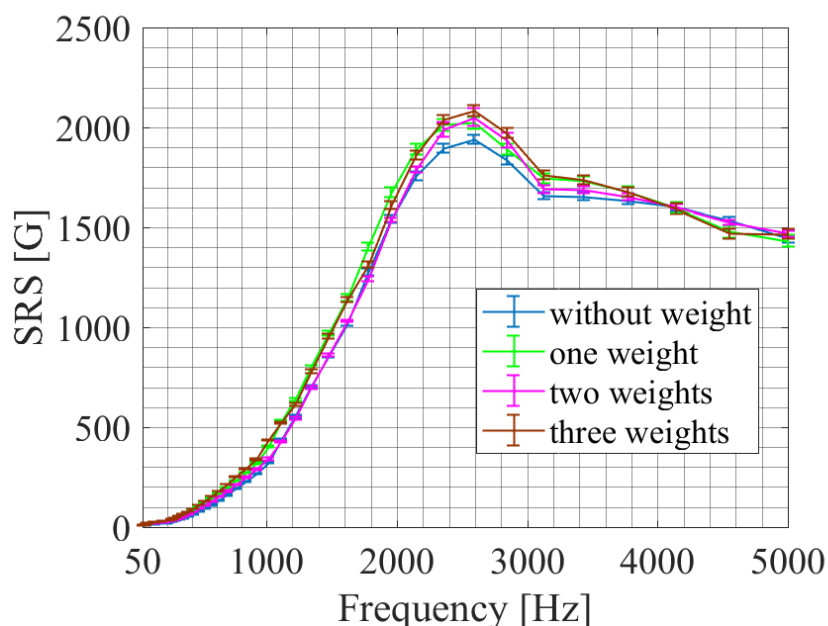


図 24. ハンマーベースの質量の違いによる SRS 値の比較
横軸は周波数、縦軸は SRS 値を表している。エラーバーは 5 回計測における各 SRS 値の周波数毎のばらつき（標準偏差 $\pm 1\sigma$ ）を表している。

錘無し状態で衝撃を印加した場合の SRS 値に対する、錘を取り付けた状態で衝撃を印加した場合の SRS 値の比率の比較を図 25 に示す。ここで周波数特性の違いを見やすくするために、縦軸を線形スケール、横軸を対数スケールで表示している。1000Hz 以上の高周波数領域では、錘無しの場合と比較して大きくても 10% 程度の増加であるのに対し、1000Hz 以下の低周波数領域では、特に錘を 3 つ取り付けた場合には大きいところで 50% 程度増加していることが分かる。これは、高周波成分を抑えつつ低周波成分を押し上げたいという本衝撃試験装置の要求に合致する傾向である

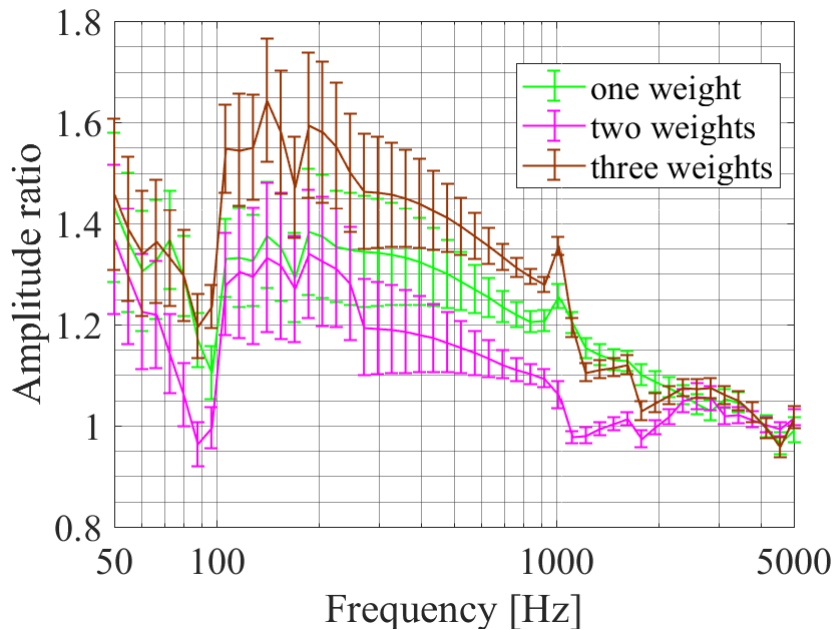


図 25. 錘無しの場合の SRS 値に対する錘有りの場合の SRS 値の比率
 横軸は周波数、縦軸は比率を表している。エラーバーは誤差の大きさを示して
 いる。1000Hz 以上の高周波数領域と比べて、1000Hz 以下の周波数領域に
 おける増加率の方が大きいことが分かる。

3.5 宇宙機の衝撃試験要求に対する最適な組み合わせの考察

以上の結果から、宇宙ミッションにおける衝撃環境の SRS 特性へのアプローチにおける最適な組み合わせについて考察する。一般的に宇宙ミッションにおける衝撃環境の SRS 特性は、H-IIA ロケットやイプシロンロケットの試験要求値にも見られるように、大体 1000~3000Hz 辺りの範囲に折れ点周波数が位置し、それよりも高周波数領域では横ばいか減少するケースが多い。従って試験要求値の折れ点周波数で SRS 値が最大となる衝撃環境を実現することが理想的である。これを実現するためには、ハンマー材質に木材を用いることで高周波成分を抑制する方法が有効であると考えられる。ただし図 13 を見ると、ハンマー材質に木材を使用した場合、100~400Hz で SRS 値が小さくなる傾向があることが分かる。この部分を補う候補として、錘の使用が挙げられる。図 25 より、錘を使用した場合 100~1000Hz の SRS 値の増加率が他の周波数領域と比べて大きいことが分かる。また、錘を用いることで木材の質量の軽さによる衝

撃力の不足も補うことができると考えられる。更に、供試体固定治具の固有振動数を上手く調整することができれば、試験要求値の折れ点周波数辺りに衝撃環境のピーク値を持ってくることが可能であると予想されるため、これも有効な手段の一つであると考えられる。

第4章 MCP の衝撃試験

4.1 衝撃試験対象

今回、我々は MCP (Micro Channel Plate) に対して衝撃試験を実施し、その衝撃耐性を調査した。MCP とは光学観測機器に広く用いられている電子増倍素子であり、鉛ガラスでできた直径12 μm のチャンネルを束ねた構造をしている。光学観測に用いられる際は、電子の増倍率を上げるために、3~5枚の MCP を重ねることが一般的である。今回の衝撃試験では MCP3枚を1セットとして MCP アセンブリに組み、衝撃試験を実施した。MCP アセンブリの外観および構造を図26に示す。MCP アセンブリは、電気絶縁性と機械的耐性の高い PEEK 樹脂のスペーサーを用いて MCP を固定している。供試体の MCP は浜松ホトニクス製の F1551-01 であり、その仕様を表7に示す。

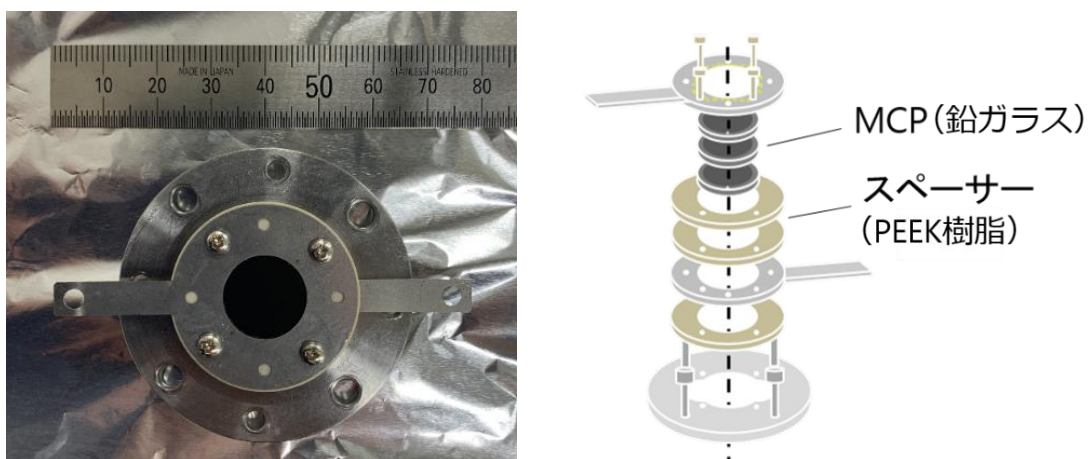


図 26. MCP アセンブリの外観 (左) および構造 (右)

表 7. MCP (F1551-01) の諸元

段数	3 段
外形寸法	Φ17.9mm
厚さ	0.48mm
チャンネル径	12μm

4.2 試験に採用した衝撃試験環境

加速度を計測する際には、加速度センサ内の圧電素子に力が加わることで、圧電効果により加速度に比例した電荷が発生し、これを電荷増幅器に入力することで加速度を計測する。加速度センサの性能において、計測可能な加速度上限と電荷感度はトレードオフの関係にある。つまり計測可能な加速度上限を高く取るためには電荷感度を下げることが必要だが、電荷感度が低いほど S/N 比は悪くなり、計測結果は計測時のノイズ等による外的要因の影響を受けやすくなってしまふ。

ハンマーの落下高さや使用する供試体固定治具など、同じ試験条件のもとで 5 回ずつ衝撃を印加した際の、加速度センサ 1 および加速度センサ 2 で計測した衝撃加速度の各 SRS 値の平均値とばらつきの大きさを図 27 に示す。ここで SRS 値の違いを見やすくするために、縦軸と横軸を共に線形スケールで表示している。加速度センサ 2の方が加速度センサ 1よりも全体的に大きな SRS 値を示しているが、これは加速度センサの取り付け方法の違いによるものであると考えられる。加速度センサは本来ネジ止めで取り付けることが理想的であり、グリースや接着剤による取り付け方法では、接着面の存在が計測結果に少なからず影響を与えると考えられる。また SRS 値のばらつきに関して、加速度センサ 1では±100G程度であるのに対し、加速度センサ 2では大きなところで±400G程度であることがわかる。これは上述したように、加速度センサの電荷感度の違いによる S/N 比の差が原因であると考えられる。

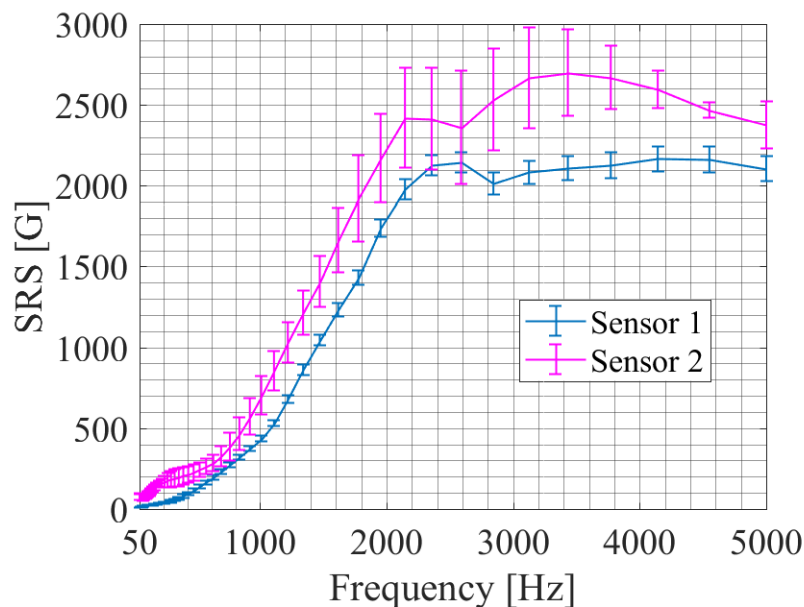


図 27. 加速度センサ 1 および加速度センサ 2 で計測した際の
それぞれの SRS 値の平均値とばらつき

横軸は周波数、縦軸は SRS 値を表している。エラーバーは 5 回計測における
各 SRS 値の周波数毎のばらつき（標準偏差 $\pm 1\sigma$ ）を表している。

今回の衝撃試験では、イプシロンロケットの衝撃試験要求値を満たす衝撃環境を MCP に印加して試験を実施した。ただし加速度センサの計測上限の問題から、加速度センサ 2 を用いて衝撃加速度の計測を行った。実際に衝撃試験で印加した全ての衝撃に対する SRS 値の平均値および周波数毎のばらつきの大きさを図 28 に示す。ここでハンマーの落下高さは約 300mm であり、ハンマー材質および衝撃受け部の材質は鋼、用いた供試体固定治具は 150mm×150mm×15mm のアルミ板である。ハンマーベースに装着する錘や、バイトン等の緩衝材は使用していない。

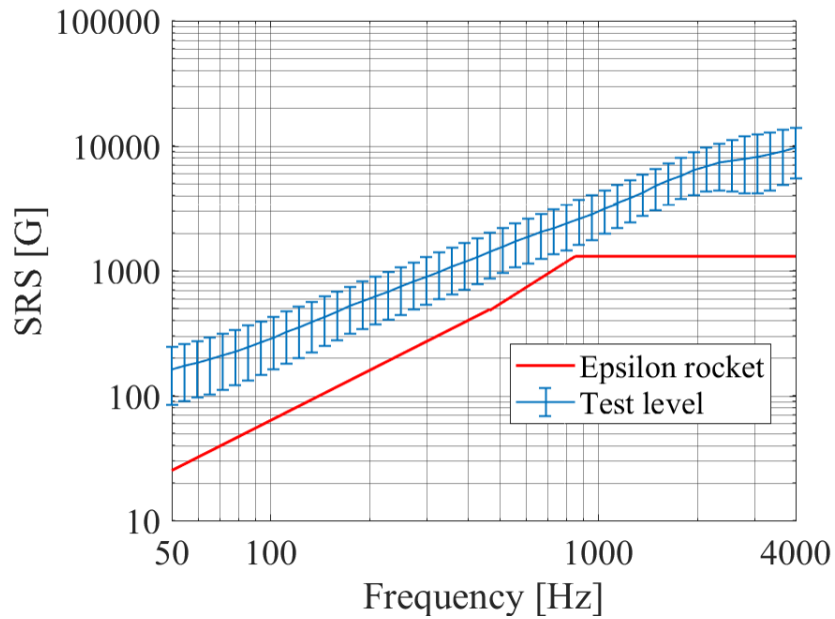


図 28. 印加した全ての衝撃に対する SRS 値の平均値および周波数毎のばらつき
 横軸は周波数、縦軸は SRS 値を表している。エラーバーは全ての衝撃に対する
 各 SRS 値の周波数毎のばらつき（標準偏差 $\pm 1\sigma$ ）を表している。

4.3 衝撃加速度の計測位置の妥当性検証

計測に用いた加速度センサ 2 は、供試体固定治具に対してネジ止めに取り付けを行うため、供試体である MCP と完全に同じ位置の衝撃加速度を計測することは不可能である。そこで図 29 のように、加速度センサを供試体から約 40mm 下の位置に取り付けて計測を行った。

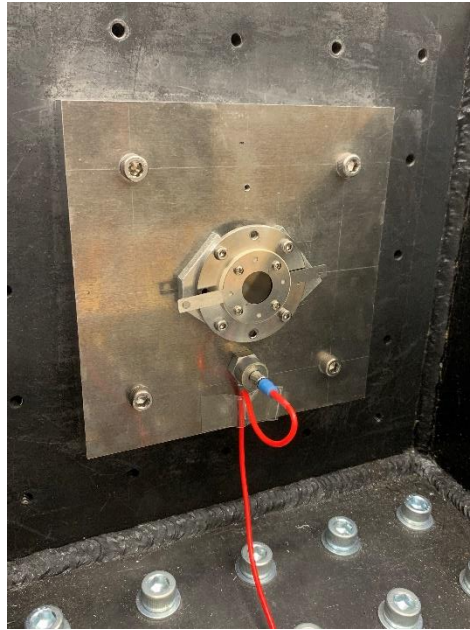


図 29. MCP の衝撃試験時における加速度センサの取り付け位置
供試体固定治具の中央に MCP アセンブリを設置し、中央から約 40mm 下の位置にネジ止めで加速度センサ 2 を取り付けしている。

ここでは、計測位置の違いおよび供試体の有無の違いによる SRS 値への影響を調べ、本試験の計測位置の妥当性について検証する。検証手順は以下のとおりである (図 30)。

- ①供試体を取り付けていない状態で、供試体固定位置の衝撃加速度を計測する
- ②供試体を取り付けていない状態で、試験時に計測を行う位置の衝撃加速度を計測する
- ③供試体を取り付けた状態で、試験と同様に衝撃加速度を計測する

①と②を比較することで計測位置の違いによる SRS 値への影響を評価し、更に③も併せて比較することで供試体の有無の違いによる SRS 値への影響を評価する。尚、①②③においてハンマーの落下高さやハンマー材質、供試体固定治具等は全て同じ条件であり、異なるのは加速度センサの位置と供試体の有無のみである。

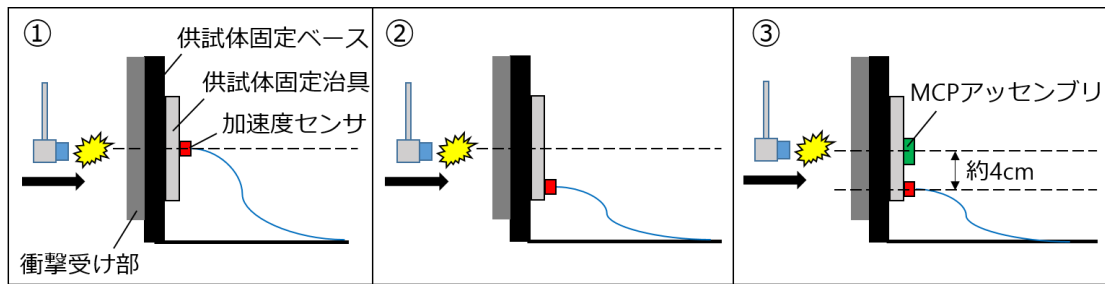


図 30. 計測位置の違いおよび供試体の有無の違いによる SRS 値への影響の検証

①②③について、それぞれ 5 回ずつ計測を行った際の SRS 値およびその平均値と周波数毎のばらつきの大きさを図 31 と図 32 に示す。図 31 より①②③のいずれも、同じハンマーの落下高さでイプシロンロケットの試験要求値をクリアしていることが分かる。次に図 32 の①と②を比較する。加速度センサ 2 の S/N 比の低さにより正確な定量的比較が困難ではあるが、200~1000Hz あたりの周波数領域で②の SRS 値が①よりも小さくなり、また 1000Hz 以上の周波数領域で②の SRS 値が①よりも大きくなる傾向が見て取れる。しかし全体的には概ね同じ傾向を示していることが分かる。また同図で②と③を比較すると、1000Hz 以下の周波数領域では③の SRS 値の方が②よりも大きくなっており、ばらつきも大きい。これは供試体を取り付けたことによる影響であると考えられる。しかしばらつきの下限値は①②③のいずれも試験要求を満たしている。また 1000Hz 以上の周波数領域では③が①や②よりも大きな SRS 値を示す傾向にあることが分かる。しかしこの周波数領域では①②③いずれも試験要求値に対して 3000~4000G 程度の過負荷であるため、③の SRS 値が試験要求値によほど近づかない限りは供試体固定位置での SRS 値も試験要求値を達成していると考えられる。

従って、③の計測方法で衝撃加速度を計測し、イプシロンロケットの試験要求値を達成していれば、供試体にもイプシロンロケットの試験要求値以上の衝撃が印加されていると考えて良いと判断した。

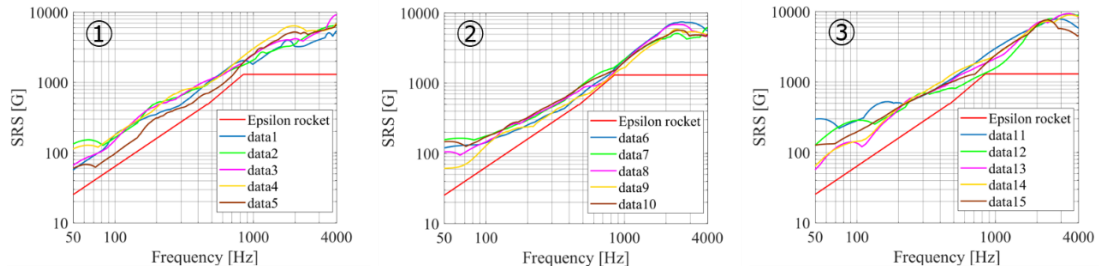


図 31. ①②③でそれぞれ 5 回計測した際の各 SRS 値と試験要求値の比較
横軸は周波数、縦軸は SRS 値を表している。

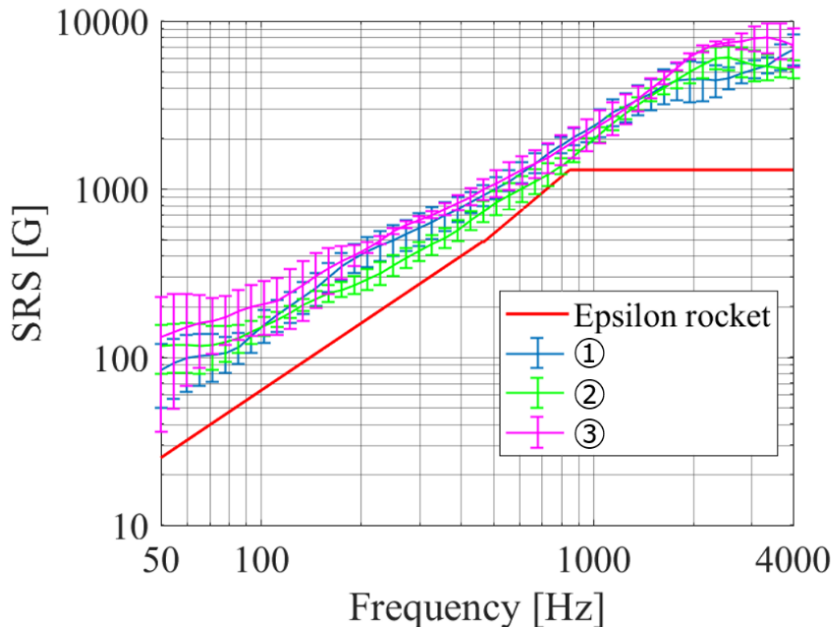


図 32. それぞれ 5 回計測した際の各 SRS 値の平均値と周波数毎のばらつき
横軸は周波数、縦軸は SRS 値を表している。エラーバーは 5 回計測における
各 SRS 値の周波数毎のばらつき（標準偏差 $\pm 1\sigma$ ）を表している。

4.4 衝撃試験手順

MCP の衝撃試験手順を図 33 のフローチャートに示す。

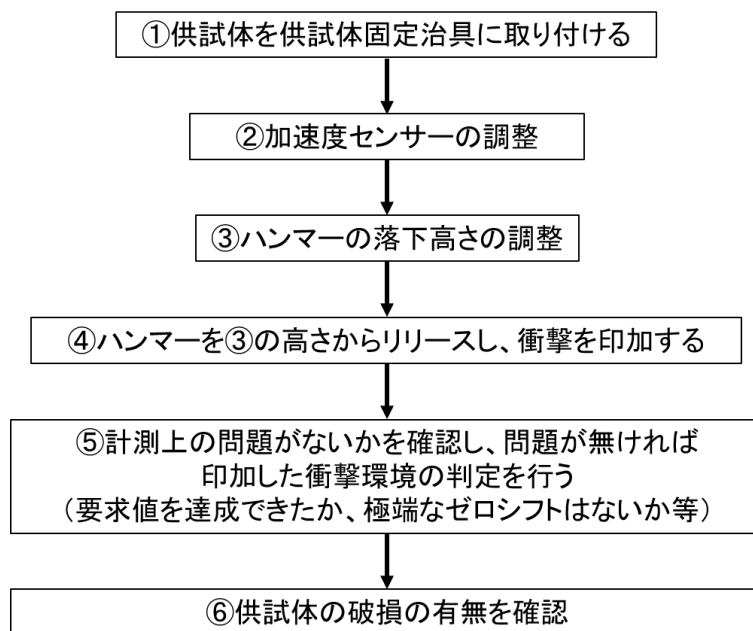


図 33. MCP の衝撃試験手順

手順①：供試体を供試体固定治具に取り付ける

MCP3 枚を MCP アセンブリに組み、供試体固定ベースに設置された供試体固定治具に取り付ける。ここで加速度センサ 2 を供試体から約 40mm 下の位置に取り付ける（図 29）。供試体固定治具と供試体および加速度センサの取り付け時にはそれぞれトルク管理を行う。トルク値は、供試体固定治具：5.2[N・m]（M6）、供試体（MCP アセンブリ）：0.63[N・m]（M3）、加速度センサ：2[N・m]（1/4–28 UNF）である。

手順②：加速度センサの調整

加速度センサのケーブルコネクタ部分に緩みがないかの確認や、ケーブルの配線の確認を行う。加速度センサのケーブルを図 34 のように供試体固定治具にテープで固定することによって、ケーブルと加速度センサ及び供試体固定治具間の相対運動を押さえ、ケーブルコネクタ部分の緩みを防止する。



図 34. 加速度センサ周りのケーブル配線

手順③：ハンマーの落下高さの調整

ハンマーの落下高さの調整は、衝撃試験装置に取り付けられた角度計（アナログ）を用いて行う。角度計の目盛りは1度刻みである。図 35 のように、ハンマーを固定する回転軸と角度計が連動する設計になっている。今回の衝撃試験ではハンマー角度 39 度（鉛直方向とのなす角）、落下高さ約 300mm で衝撃を印加する。

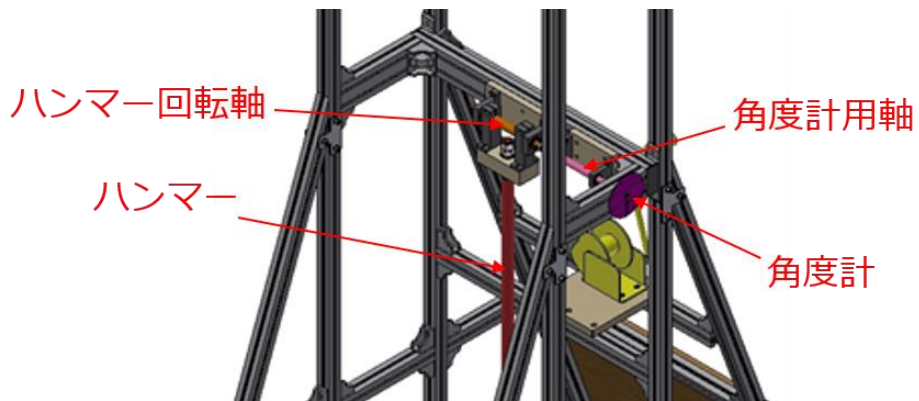


図 35. 衝撃試験装置の角度計等の外観

手順④：ハンマーを③の高さからリリースし、衝撃を印加する

手順③で設定した角度までハンマーを振り上げ、初速度がゼロとなるように

ハンマーをリリースして衝撃を印加する。衝撃を印加した直後、ハンマーが衝撃受け部に二度打ちすることがないように注意する。

手順⑤：計測上の問題がないかを確認し、問題が無ければ印加した衝撃環境の判定を行う

供試体や加速度センサおよびケーブルコネクタ部分に異常がないかを確認し、異常が無ければ計測された衝撃加速度の時系列波形の確認を行う。具体的には加速度センサやチャージアンプの飽和による計測データのクリッピングの発生、コネクタの緩み等による間欠的な外部ノイズ、ランダムなスパークおよび顕著なゼロシフトがないことを確認する。これらの問題が見つかった場合は、試験が上手く実施できなかつたと判定し、その試行は試験結果に含めないこととする。正しく計測が行われていることを確認した後に **SRS** 解析を行い、イプシロンロケットの衝撃試験要求値を達成しているかどうかを確認する。試験要求値を達成していない場合、試験が上手く実施できなかつたと判定し、その試行は試験結果に含めないこととする。

手順⑥：供試体の破損の有無を確認

供試体を供試体固定治具から取り外す。MCP アセンブリから MCP を取り外し、破損の有無を確認する。破損の有無の判定方法は目視検査にて行う。実際に破損した MCP を図 36 に示す。目視検査によって破損が確認されなかった場合は、再び MCP アセンブリに組み、手順①から試験を再度行う。

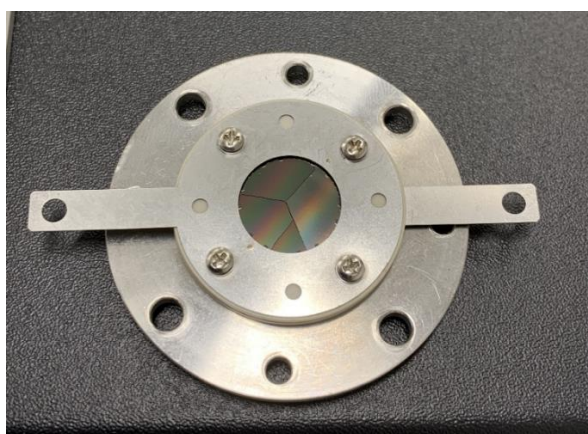


図 36. 破損した MCP

4.5 衝撃試験結果

MCP の衝撃試験結果を図 37 に示す。試験に用いた供試体の総数は 57 セット (MCP の総数は $3 \times 57 = 171$ 枚) である。横軸は印加した衝撃の回数であり、縦軸はそれぞれの衝撃印加回数で破損した供試体の数である。試験の結果より、中央値は 7 回、平均値は約 8.1 回であった。

同図を見ると、1 回や 2 回で割れる個体がある一方で、10 回以上の衝撃の印加にも耐える個体があることがわかる。これは MCP がガラスという脆性材料でできており、破壊の起点となる微小な欠陥 (最も弱い部分) の分布に個体差があるためだと考えられる。

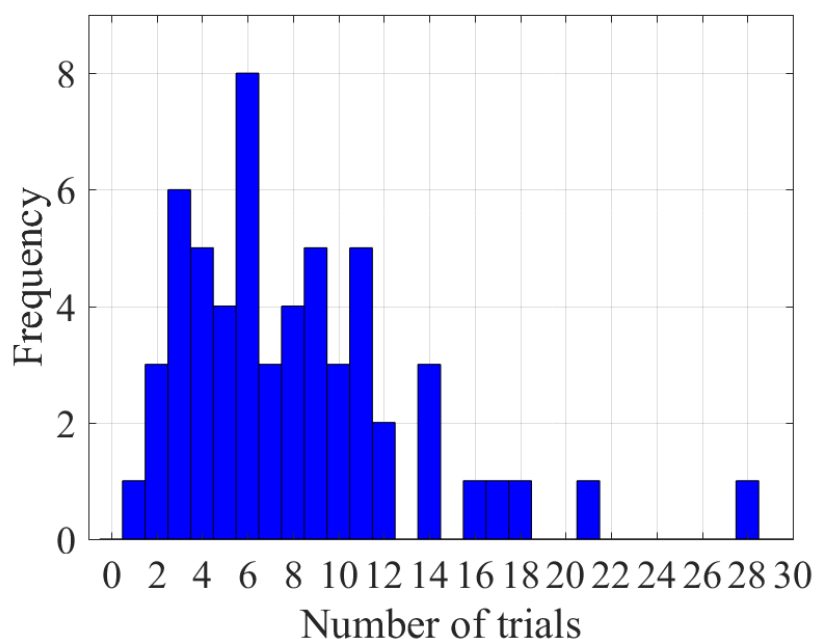


図 37. MCP の衝撃試験結果

横軸は印加した衝撃の回数、縦軸は各衝撃印加回数において破損が確認された供試体の数を表している。試験に用いた供試体の総数は 57 セットである。

4.6 衝撃に対する MCP の寿命分布の推定

ガラスは脆性材料であるため、その表面あるいは内部に存在する微小な欠陥（最も弱い部分）が破壊の起点となり、亀裂を進展させる。その強度は材料内部の最弱部に支配されるのでワイブル分布に従う強度分布を示すことが知られている[志波ほか, 1998]。ワイブル分布の確率密度関数は式 (17) で表される。

$$f(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left\{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right\} \quad (17)$$

ここで α は形状パラメータ、 β は尺度パラメータであり、 t は衝撃の印加回数に対応する。今回ワイブルプロットを用いてワイブル分布のフィッティングを行った。ワイブルプロットの手順は以下のとおりである。ワイブル分布の信頼度および不信頼度（累積故障率）はそれぞれ式 (18) と式 (19) で表される。

$$R(t) = \exp\left\{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right\} \quad (18)$$

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right\} \quad (19)$$

式 (19) より

$$\ln\{1 - F(t)\} = \left(-\frac{t}{\beta}\right)^\alpha$$

両辺に対数をとると、

$$\ln[\ln\{1 - F(t)\}] = \ln\left(-\frac{t}{\beta}\right)^\alpha = -\alpha \ln(t) + \alpha \ln(\beta)$$

$$\therefore \ln\left[\ln\left\{\frac{1}{1 - F(t)}\right\}\right] = \alpha \ln(t) - \alpha \ln(\beta) \quad (20)$$

ここで、 $Y = \ln\left[\ln\left\{\frac{1}{1 - F(t)}\right\}\right]$, $X = \ln(t)$ とおくと、式 (20) は

$$Y = \alpha X - \alpha \ln(\beta) \quad (21)$$

と表される。従ってパラメータ α および β は、横軸が $\ln(t)$ 、縦軸が $\ln\left[\ln\left\{\frac{1}{1-F(t)}\right\}\right]$ のグラフ上に試験結果をプロットし、最小二乗法による線形回帰によって求めることができる (図38)。

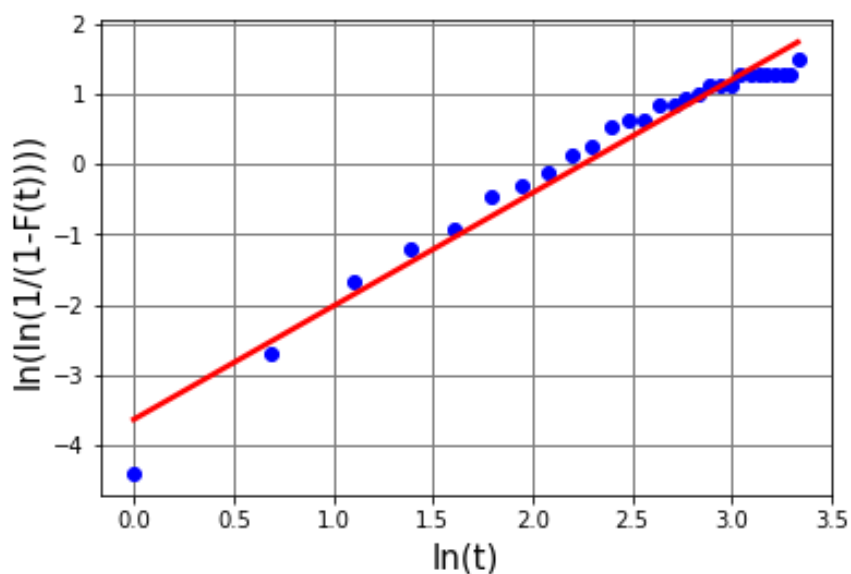


図38. 最小二乗法による線形回帰

この結果、 $\alpha = 1.6$, $\beta = 9.6$ が求まる。これらをパラメータに持つワイブル分布を図39に示す。フィッティングしたワイブル分布の中央値は約7.6回、平均値は約8.6回であった。

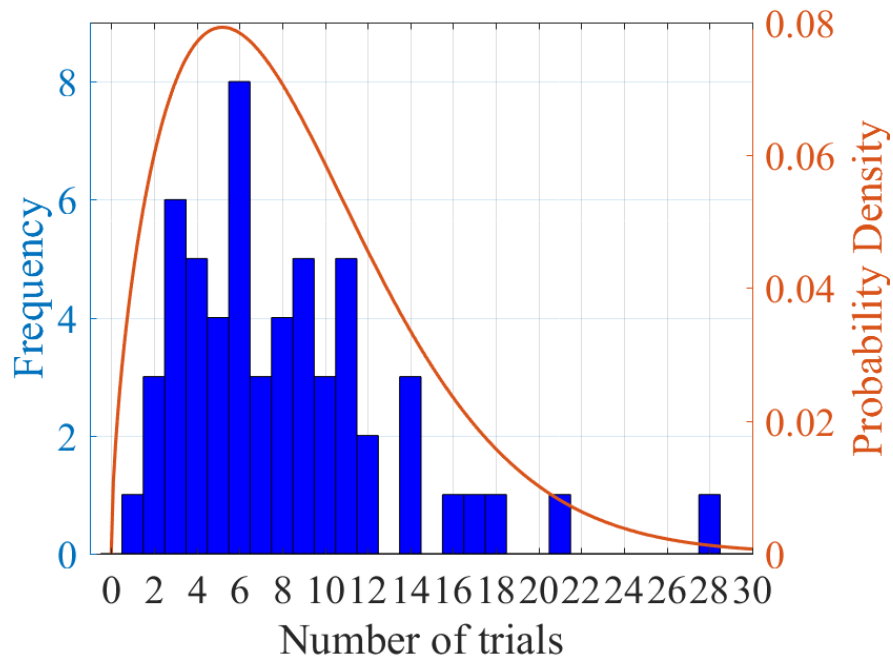


図39. 試験結果に対するワイブル分布のフィッティング結果

横軸は印加した衝撃の回数を表している。

左縦軸は各衝撃印加回数において破損が確認された供試体の数、
右縦軸はフィッティングしたワイブル分布の確率密度を表している。

また、実験結果およびフィッティングしたワイブル分布それぞれの累積故障率の比較を図40に示す。累積故障率が90%以上となるのは、実験結果では14回、フィッティングしたワイブル分布では約16回であった。

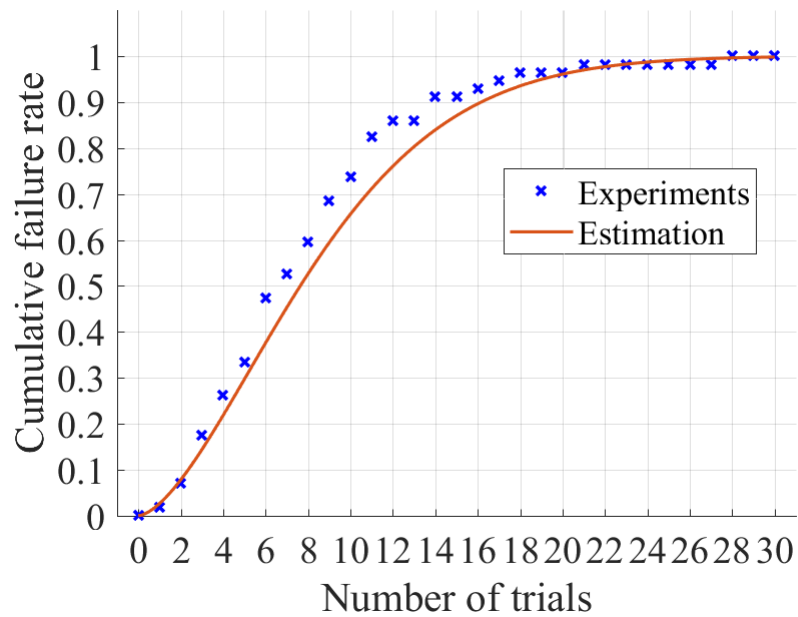


図40. 累積故障率の実験値および推定値の比較
 横軸は印加した衝撃の回数、縦軸は累積故障率を表している。

次に故障率に関する考察を行う。ワイブル分布が示す故障率は式 (22) で表され、形状パラメータ α の値によって大きく異なる傾向を示す (図41)。

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha-1} \quad (22)$$

- $\alpha < 1$. . . 故障率が減少 (初期故障型)
- $\alpha = 1$. . . 故障率が一定 (偶発的故障型)
- $\alpha > 1$. . . 故障率が増大 (摩耗的故障型)

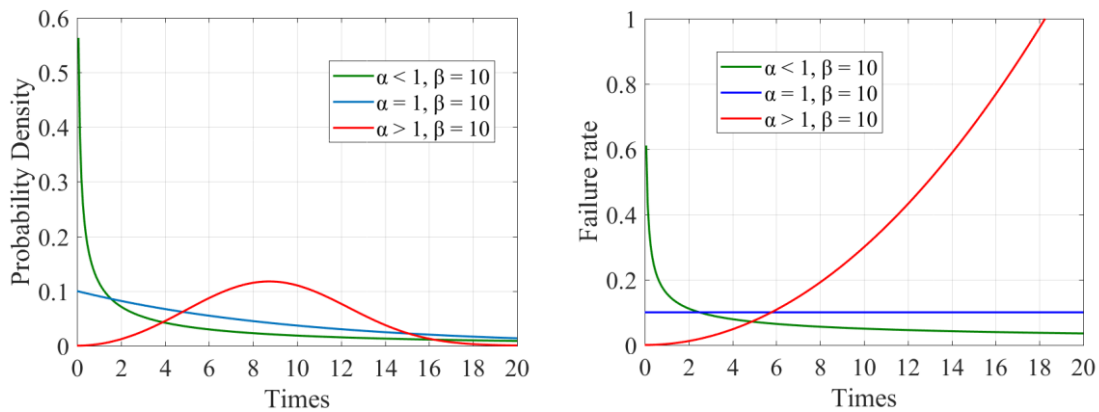


図41. ワイブル分布の形状パラメータによる
確率密度関数（左）および故障率（右）の違い（ $\alpha = 0.5, 1, 3$ ）

本試験結果の形状パラメータは $\alpha = 1.6$ であるため、本試験に用いたMCPのイプシロンロケットの衝撃環境における故障率は摩耗的故障型であることが分かる。

更に、本試験に用いたMCPがイプシロンロケットによる打ち上げに耐え得るかについて、フィッティングから得られたワイブル分布を用いて考察する。宇宙ミッションにおける衝撃試験の実施内容は厳密にはミッション毎に異なるが、一般的には認定試験（最大予測環境+3dBの衝撃を印加する試験）を認定試験用モデルに対して2回、受入試験（最大予測環境の衝撃を印加する試験）をフライトモデルに対して1回実施する場合が多い [宇宙航空研究開発機構, 2017]。本論文でこれまでに述べてきた衝撃試験要求値とはこの最大予測環境のことである。また、ここでの認定試験用モデルとはプロトタイプモデル（フライトモデルの設計を認定する為に製造される宇宙機システム）やエンジニアリングモデル（宇宙機システムの電氣的設計や機械的設計を確立する為に使用されるモデル）であり、これらはフライトモデル（実際にフライトに供されるモデル）と基本的に同じに作られている。プロトタイプモデルやエンジニアリングモデルが認定試験をクリアした後、フライトモデルに対して受入試験を実施し、受入試験をクリアしたものをフライトに供する。フライト本番では搭載される宇宙機は最大予測環境を一度経験するため、フライトモデルは最大予測環境の衝撃を合計で二回経験することになる。

今回衝撃試験を実施したMCP（またはこのMCPを搭載した観測機器）のプロトタイプモデルが認定試験をクリアしたと仮定し、今回の衝撃試験の衝撃環境がイプシロンロケットの最大予測環境であるとする、フライトモデルに対し

て衝撃を二回印加したときの生存確率は約92%である。本試験は衝撃源から供試体に対して極めて直接的に衝撃を印加しており、衝撃試験としてはかなり厳しい設定である。実際の打ち上げ時には、衝撃源から衛星や観測機器の取り付け位置までの距離や締結部、および緩衝材等の使用による減衰効果が働くと考えられるため[宇宙航空研究開発機構, 2017]、受入試験一回の実施と打ち上げによる衝撃が印加された際の生存確率はこれよりも高くなると考えられる。

以上のように、本衝撃試験装置を用いて宇宙機搭載機器に衝撃試験を実施し、その衝撃耐性を評価することが可能である事を確認した。

また、今回の試験の統計的有意性について、母平均 μ に関する検定を行う。母集団が正規分布に従う場合、標本平均の差に対してt検定を用いることができる。本試験は寿命試験でありデータはワイブル分布に従うが、大標本の場合 ($n \geq 30$ 程度) は中心極限定理より、標本平均は母集団分布にかかわらず正規分布に従うと仮定して差し支えない[金子ほか, 2007]。今、帰無仮説を「母平均は 2 以下である」、対立仮説を「母平均は 2 よりも大きい」とし、有意水準を 5%とする。ここで、標本の大きさ： $n = 57$ 、標本平均： $\bar{x} = 8.1$ 、標本分散： $S^2 = 25.8$ である。母分散が未知の場合、不偏分散： $s^2 = \frac{n}{n-1} \times \text{標本分散} = 26$ を用いる。帰無仮説の元で

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{\sqrt{\frac{s^2}{n}}} \quad (23)$$

とすると、 t は自由度 $n - 1$ のt分布に従う。ここで、母平均 $\mu = 1$ のとき p 値= $7.2 \times 10^{-15} < 0.05$ 、母平均 $\mu = 2$ のとき p 値= $1.6 \times 10^{-12} < 0.05$ である。従って帰無仮説を棄却し、対立仮説「母平均は 2 より大きい」を採択する。

第5章 まとめ

我々は振子式の衝撃試験装置を建造し、H-IIA ロケットとイプシロンロケットの衝撃試験要求値に対して、コントロール性および再現性の二つの評価指標を用いて性能評価を行った。コントロール性に関しては、低周波数領域ではどちらの場合も試験要求値に対して数百 G 程度の範囲に収めることができたが、高周波数領域では数千 G 程度の過負荷となってしまうことが分かった。再現性に関

しては、H-IIA ロケットの試験要求値を満たす衝撃環境において 10 回計測を行ったところ、SRS 値のばらつきは大きいところでも±100G 程度に収まることが分かった。また衝撃試験装置の性能向上の足掛かりとして、SRS 値の調整可能性について検証を行った。その結果、ハンマー材質に木材のような柔らかいものを用いることで、鋼製のハンマーを使用した場合と比較して高周波成分を 20～30%程度抑制することが可能であることが分かった。また、衝撃受け部にアルミ板を用いると、鋼を用いた場合と比べて全体的に SRS 値が小さくなるが、高周波成分よりも低周波成分の方がより大きく減衰される傾向が見られた。また、供試体固定治具の大きさや形状によって SRS 値の折れ点周波数の位置を調整することが可能であることが分かった。そして、衝撃体であるハンマーの質量を大きくすることで SRS 値全体が大きくなるだけでなく、高周波成分に比べて低周波成分の上昇率が大きくなることが分かった。

更に、振子式衝撃試験装置を用いて MCP の衝撃試験を実施し、その衝撃耐性を評価した。印加した衝撃の大きさは、イプシロンロケットの衝撃試験要求値を満たす衝撃環境である。その結果、衝撃耐性の寿命分布の平均値は約 8.1 回であり、累積故障率が 90%を上回るのは 14 回以上衝撃を印加した場合であることが分かった。更に、この MCP のイプシロンロケットへの搭載可能性について、試験結果へのフィッティングにより求めたワイブル分布を用いて検証したところ、最大予測環境の衝撃を二回印加した際の生存確率は約 92%であることが分かった。このように、本衝撃試験装置を用いて宇宙機搭載機器に衝撃試験を実施し、その衝撃耐性を評価することが可能である事を確認した。このように観測機器の故障原因となり得る部品に対し、本試験の様に衝撃試験を実施し、その寿命分布を調べることによって、宇宙ミッションの信頼性をより高めることが可能であると考えられる。

本研究で機械的インパクト方式の衝撃試験装置における SRS 値の調整可能性について検証を行ったが、依然として改善の余地は大きい。衝撃体や被衝撃体に使用できる素材の種類には限界があり、材料選定によるこれ以上の改善は難しいと推測されるが、その一方で供試体固定治具による SRS 値の調整可能性はまだまだ未知数であり、固有振動数などを上手く利用することでより試験要求値に適した衝撃環境を再現できると考えられる。

参考文献

宇宙航空研究開発機構, 宇宙機一般試験標準ハンドブック, JERG-2-130-

HB007A, 2017

宇宙航空研究開発機構, 衝撃試験ハンドブック, JERG-2-130-HB001, 2017.

畑村透, 超小型衛星に適した衝撃試験方法の開発, 九州工業大学, 博士学位論文, 2015.

波多英寛, 石走紗矢佳, 藤原和人, 川島扶美子, 簡易的衝撃試験装置における打撃材料についての検討, 第23回スペース・エンジニアリング・コンファレンス, 2014.

畑村透, 増井博一, 趙孟佑, 前野一夫, 超小型衛星の衝撃応答予測に関するシミュレーション, 第46回流体力学講演会/第32回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム論文集, 2015, pp.113.

石川信隆, 大野友則, 藤掛一典, 別府万寿博, 基礎からの衝撃工学, 森北出版株式会社, 2008年3月, pp.18.

多賀瞬, 薄膜機械的特性評価装置 (ナノインデント), 九州大学中央分析センター, 2016, vol.35 No.3 133

横山隆, 衝撃工学の基礎と応用, 共立出版株式会社, 2014年5月, pp.104-106.

澤田稔, 木材の変形挙動, 材料, 1983, 32.359: 838-847.

志波光晴, 岸輝雄, セラミックスの破壊靱性, 日本金属学会会報, 1998, 27.8: 644-649.

真壁肇, 信頼性工学入門, 日本規格協会, 2017年7月, pp60-63

金子治平, 上藤一郎, よくわかる統計学 I 基礎編, ミネルヴァ書房, 2007年10月, pp.126-128

謝辞

私が東京大学大学院 新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻 修士課程に在学中の2年間において、本修士論文を書き上げるにあたり、多くの方から多大なご協力とご指導を賜りましたのでその謝意を著します。東京大学大学院 新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻 吉川・吉岡研究室に所属する博士課程の鈴木文晴様、疋田怜奈様には、発表資料や執筆物の添削に多大なご協力をしていただきました。同じく修士課程の荒尾昇吾様、勝瀬陸様、佐藤愁太郎様、鈴木雄大様、米本周平様、張天旭様、西村晟八様、泉田啓之介様、小野真聖様、野村香菜枝様、赤玉裕匡様、大村公斗様、楊航様、Yashar Parhat 様、林暉揚様、史維佳様には日頃から実験に協力をしてくださいました。心より感謝いたします。また、同研究室出身で宇宙航空研究開発機構（JAXA）の桑原正輝様にも感謝申し上げます。吉岡和夫講師には日々多くのご指導を賜りました。吉岡講師のご指導なしでは研究活動を進める事ができませんでした。心より感謝申し上げます。そして、吉川一朗教授には指導教官として研究室配属時から本研究の遂行、執筆指導、発表指導など研究全般においてご指導を賜りました。研究に限らず、多くのことを先生から学ばせていただきました。心より感謝申し上げます。

最後に、学生生活を支えてくれた両親に心より感謝申し上げます。