

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

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

Performance evaluation of pendulum impact test equipment and impact
resistance evaluation of MCPs

福場 惇哉, 吉岡 和夫, 桑原 正輝, 吉川 一郎

FUKUBA Junya, YOSHIOKA Kazuo, KUWABARA Masaki and YOSHIKAWA Ichiro

2020年2月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目 次

1	はじめに	2
2.	構築した衝撃試験システム	2
2.1.	振子式衝撃試験装置	2
2.2.	計測装置	4
2.3.	衝撃試験における衝撃試験要求値について	5
2.4.	衝撃試験装置の性能評価	6
2.4.1.	コントロール性評価	6
2.4.2.	再現性評価	7
3.	SRS 値の調整可能性について	8
3.1.	ハンマー先端および衝撃受け部	8
3.2.	供試体固定治具	12
3.3.	緩衝材	14
3.4.	錘	15
4.	MCP の衝撃試験	17
4.1.	衝撃試験対象	17
4.2.	試験に採用した衝撃試験環境	18
4.3.	衝撃加速度の計測位置の妥当性検証	19
4.4.	衝撃試験手順	21
4.5.	衝撃試験結果	24
4.6.	MCP の衝撃に対する寿命分布の推定	24
5	まとめ	26
	参考文献	26
	Appendix	27

振り子式衝撃試験装置の性能評価および MCP の衝撃耐性評価

福場 惇哉^{*1}, 吉岡 和夫^{*1}, 桑原 正輝^{*2}, 吉川 一朗^{*1}

Performance evaluation of pendulum impact test equipment and impact resistance evaluation of MCPs

FUKUBA Junya^{*1}, YOSHIOKA Kazuo^{*1}, KUWABARA Masaki^{*2}, YOSHIKAWA Ichiro^{*1}

ABSTRACT

Among the environmental tests in the spacecraft developments, an impact test is one of the most difficult tests. When we conduct an impact test, the most reliable method is to conduct an actual environmental test using pyrotechnic devices. However, pyrotechnic devices are so expensive and complicated to store and handle them that it is not practical to use them in each impact test of small satellites and components that have been actively developed in recent years. For the above reason, there is a growing need for facilities that can conduct impact tests instead of the actual environmental test, but the number of non-pyrotechnic test facilities in Japan is far from enough. Therefore, we built a pendulum-type impact test equipment. It was confirmed that the impact test environment of the HIIA rocket and Epsilon rocket was feasible using this impact test equipment, but the SRS value in the high frequency range was found to be overloaded by several thousand G. Regarding its reproducibility, it was confirmed that the variations of the SRS value were suppressed to $\pm 100\text{G}$ when the impact was applied 10 times. As a basis for improving the performance of the impact test equipment, we verified the possibility of adjusting the SRS value by selecting materials of each part of the equipment. As a result, it was confirmed that the frequency characteristics of the SRS value can be adjusted to some extent by using materials with different hardness. Furthermore, we conducted the impact test of the MCPs using the impact level that satisfies the impact test value of the Epsilon rocket, and we evaluated their impact resistance. As a result, the average value of the life distribution was about 8.1 times and the cumulative failure rate was over 90% when the impact was applied 14 times or more.

Keywords: Impact test, SRS, MCP

概要

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、実際に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、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実用的ではない。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を決して多くないのが現状である。そこで我々も衝撃試験施設の整備を目指し、振り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 HIIA 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。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 $\pm 100\text{G}$ 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

doi: 10.20637/JAXA-RR-19-005/0001

^{*} 2019 年 12 月 17 日受付 (Received December 17, 2019)

^{*1} 東京大学大学院新領域創成科学研究科 (Graduate School of Frontier Science, The University of Tokyo)

^{*2} 宇宙科学研究所 宇宙航空研究開発機構 (Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency)

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。

1. はじめに

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いる。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。実環境試験のように宇宙で実際に使用する火工品を用いて衝撃試験を行う場合、火工品による衝撃に個々の部品が耐えうるかを確認すればよい。しかし実環境試験は、火工品の使用によるコストの問題およびその保管や取り扱いの煩雑さから、小型衛星やコンポーネント単体に対する衝撃試験の選択肢としては現実的でない。実環境試験以外の試験方式で衝撃試験を行う場合には、試験で印加すべき具体的な衝撃環境がロランチャーから提示されており、これを確実に満たす試験の実施が求められる。衝撃試験要求は、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。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を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¹⁾。

実環境試験に代わる衝撃試験方式として、落下衝撃試験方式、動電型加振機方式および機械的インパクト方式などが知られている²⁾。それぞれの試験方式は一長一短であるが、その中でも機械的インパクト方式は他の方式と比べて、印加する衝撃の大きさの調整が容易であり、設計マージンの確認を目的とする試験の実施も可能である。また、SRS波形の傾斜や折れ点周波数の調整もある程度可能である事が先行研究で述べられている³⁾。しかし機械的インパクト方式を採用した衝撃試験装置が、実際にどの程度SRS波形を調整可能であるかはあまり議論されていない。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振子式の衝撃試験装置を建造し、その性能評価およびSRS値の調整可能性について検証を行った。またこの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た。

本論文では我々が建造した衝撃試験装置の性能評価、SRS値の調整可能性およびMCPの衝撃試験の結果について報告する。

2. 構築した衝撃試験システム

2.1. 振子式衝撃試験装置

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。我々が建造した振子式衝撃試験装置の外観および仕様を図 1, 2 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 HIIA ロケットの衝撃試験要求値およびイプシロンロケットの衝撃試験要求値とは、後述する図 6 (右) および図 7 (右) に示す SRS 値である。本衝撃試験装置は中央に振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。

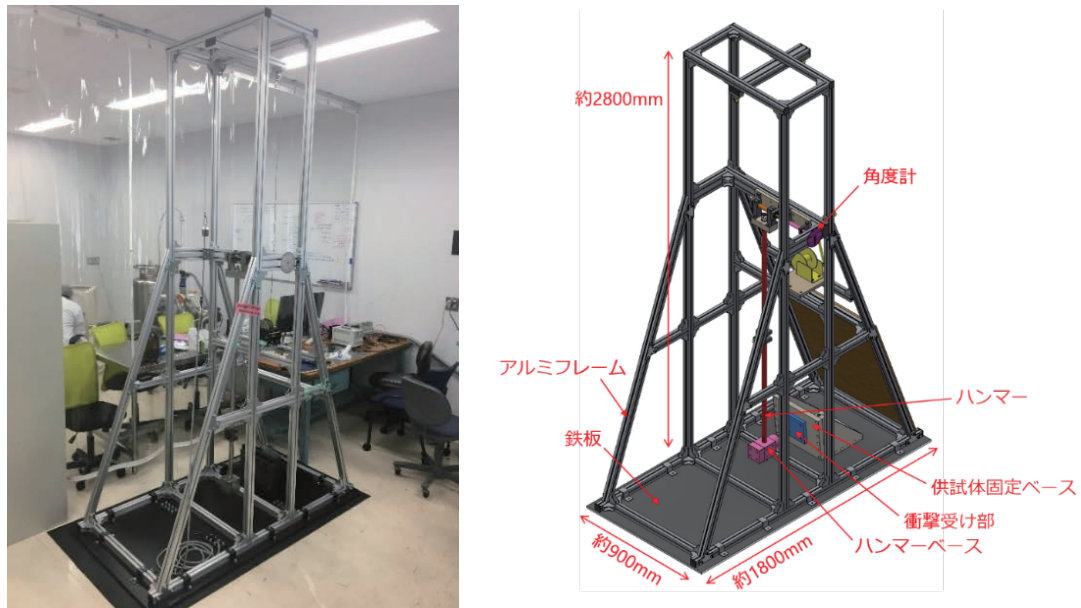


図 1. 建造した衝撃試験装置の外観（左）および各部名称（右）

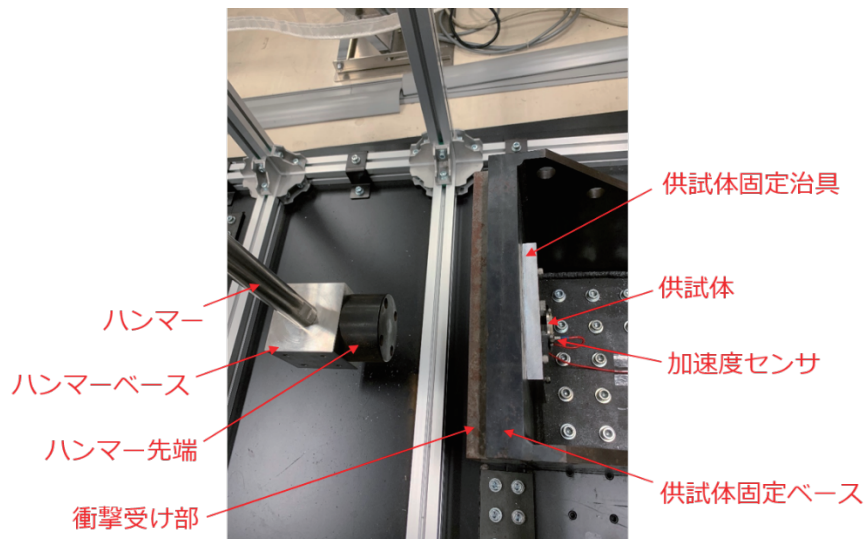


図 2. 供試体固定ベース周りの外観

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	HIIA ロケットの衝撃試験要求値：落下高さ約 230mm イプシロンロケットの衝撃試験要求値：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3. 左の下）
 チャージコンバータ : CH-6130（小野測器製）（図3. 左の上）
 データロガー : DS-3000（小野測器）（図3. 中央）
 接着剤 : Mounting wax 32279（Endevco 製）（図3. 右）



図3. 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4. 左）
 チャージアンプ : Model 133（Endevco 製）（図4. 右）
 データロガー : DS-3000（小野測器製）

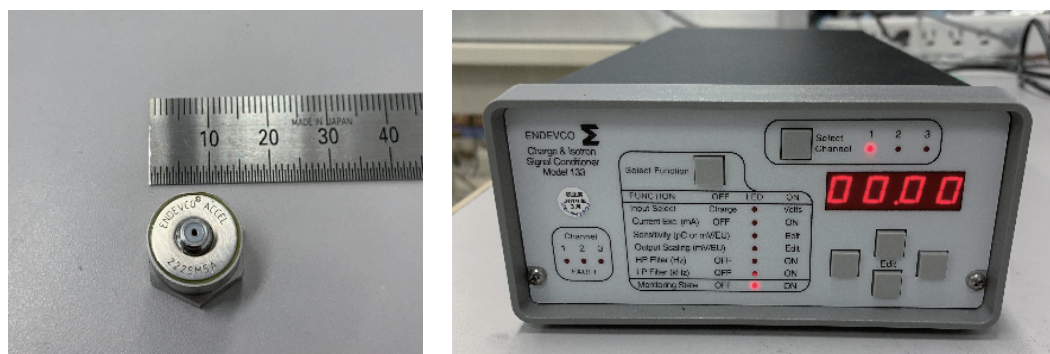


図4. 加速度センサ（左）およびチャージアンプ（右）

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

宇宙機搭載機器に対する衝撃試験要求は、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。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^り。

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。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^り。宇宙機的主要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。イプシロンロケットの衝撃試験要求値を図 5 に示す。ここで $G = 9.8 [m/s^2]$ 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 保持開放衝撃の 2 つを想定した衝撃環境として定義されている。

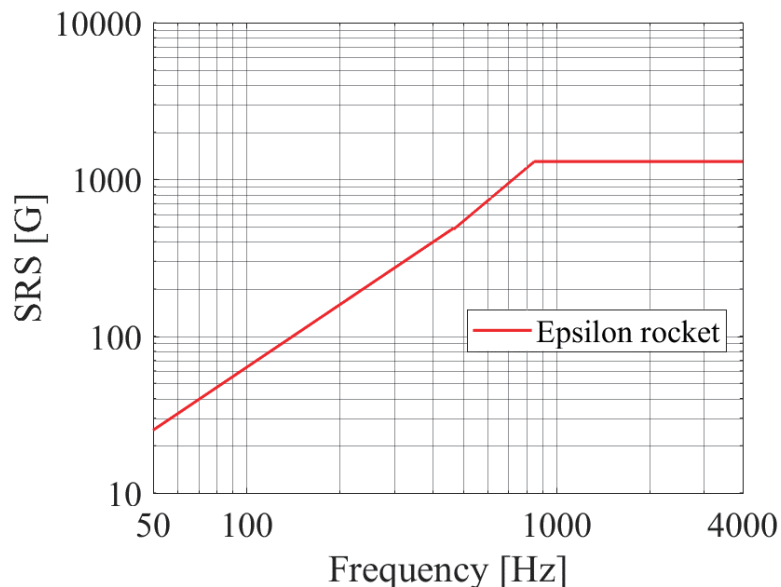


図 5. イプシロンロケットの衝撃試験要求値
横軸は周波数、縦軸は SRS 値を表している。イプシロンロケットの衝撃試験要求値は 50～4000Hz の周波数領域で定義されている。

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、衝撃試験要求値にできるだけ近い衝撃環境を実現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、同じ試験条件で複数回衝撃を印加した際に、どれくらいの精度で同程度の衝撃環境を再現できるかを示す能力である。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

HIIA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6と図7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になってしまう原因としては、衝撃試験装置の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数成分が励起されやすいと考えられる。

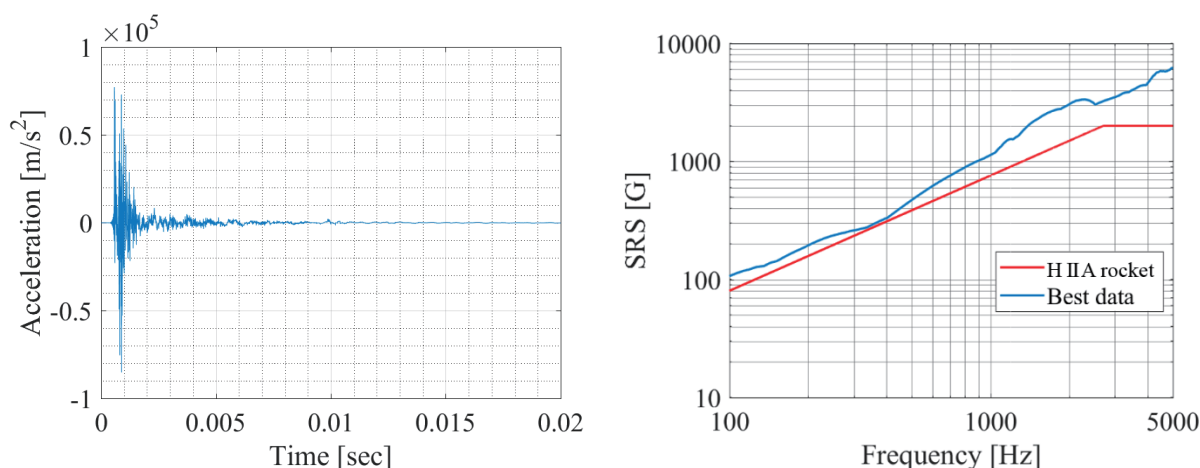


図 6. 計測した時系列加速度データ（左）およびHIIAロケットの
衝撃試験要求値に対するSRS値の比較（右）
時系列加速度データの横軸は時間、縦軸は加速度を表している。
SRS値比較のグラフの横軸は周波数、縦軸はSRS値を表している。

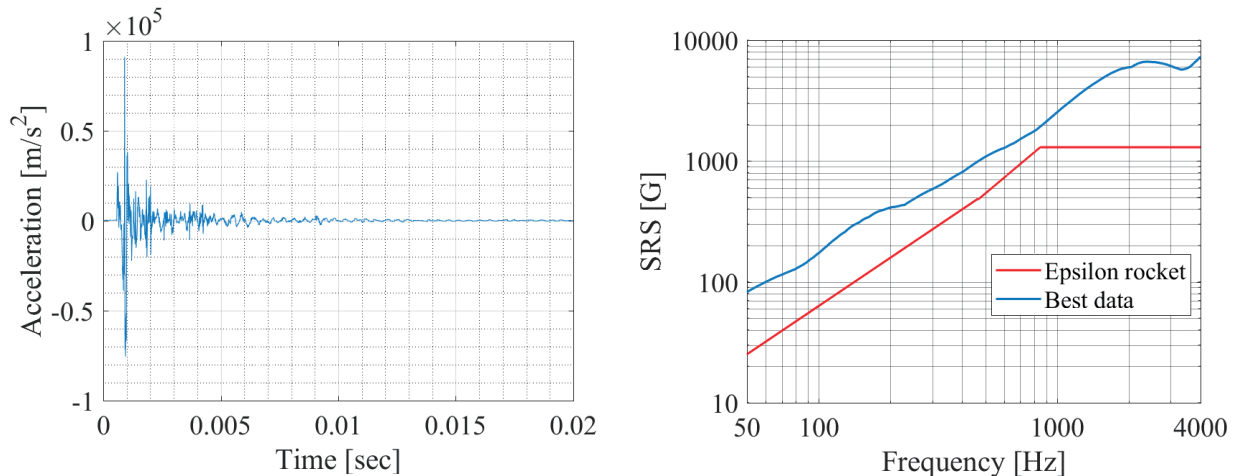


図 7. 計測した時系列加速度データ（左）および
イプシロンロケットの衝撃試験要求値に対するSRS値の比較（右）
時系列加速度データの横軸は時間、縦軸は加速度を表している。
SRS値比較のグラフの横軸は周波数、縦軸はSRS値を表している。

2.4.2. 再現性評価

HIIA 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 6 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 8 に示す。ただし、エラーバーを見やすくするために、図 8（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 $\pm 100\text{G}$ 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。

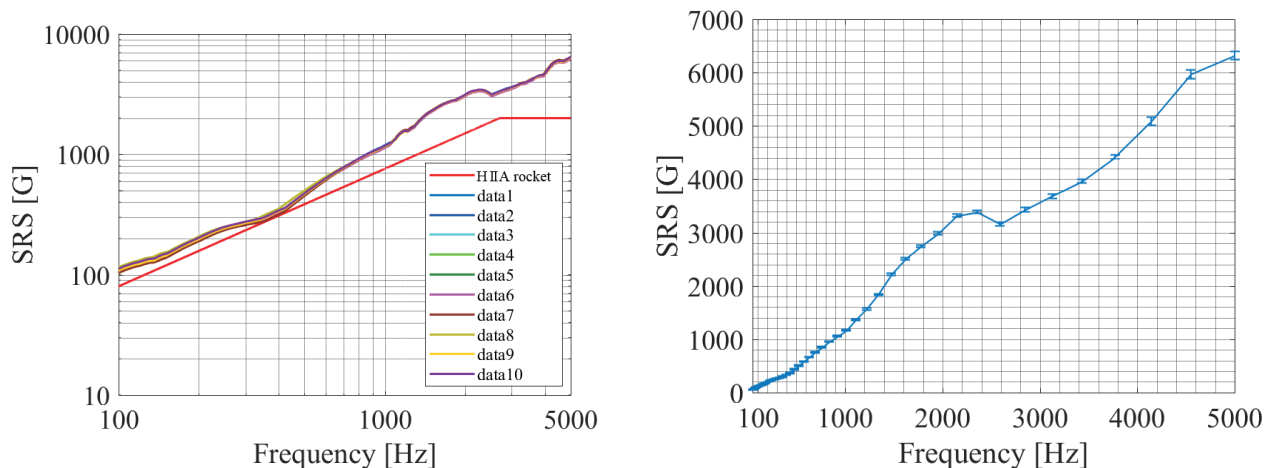


図 8. 同様の試験条件で 10 回衝撃を印加した際の各 SRS 値と HIIA ロケットの衝撃試験要求値との
比較（左）およびそれらの平均値と周波数毎の SRS 値のばらつき（右）
共に横軸は周波数、縦軸は SRS 値を表している。右図のエラーバーは 10 回計測における各 SRS 値の
周波数毎のばらつきの大きさを標準偏差で表している。

3. 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³⁾。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。こうした背景から我々は、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の 5 つである。尚、検証する周波数領域は、HIIA ロケットおよびイプ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

$$F = \frac{\Delta(mV)}{\Delta t} = m \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (1)$$

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⁴⁾。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⁵⁾。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⁶⁾。

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

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⁷⁾。

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

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

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 9)。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 10 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 10 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とが分かる。これは鋼や銅に比べて木材が柔らかいことで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。

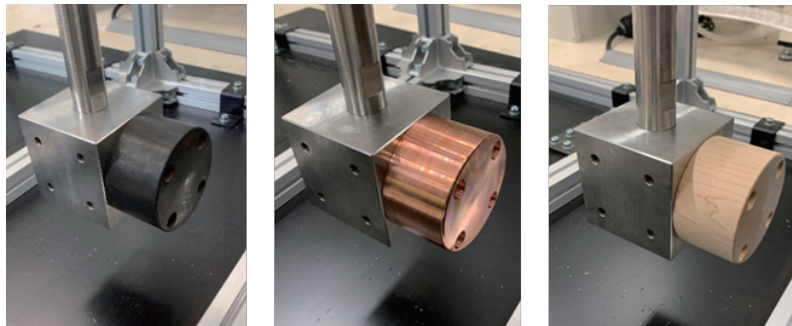


図 9. ハンマー先端の材質
左から鋼、銅、木材である。

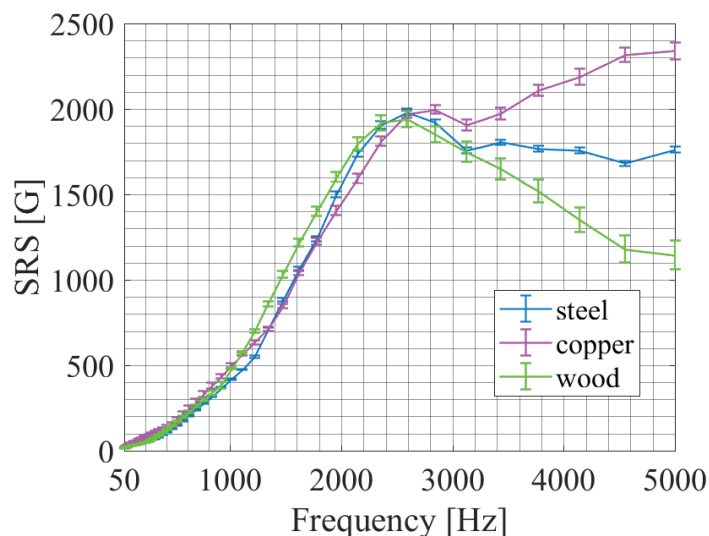


図 10. ハンマー材質の違いによる SRS 値の比較
横軸は周波数、縦軸は SRS 値を表している。エラーバーは 5 回計測における各 SRS 値の周波数毎のばらつきの大きさを標準偏差で表している。

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 11 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。

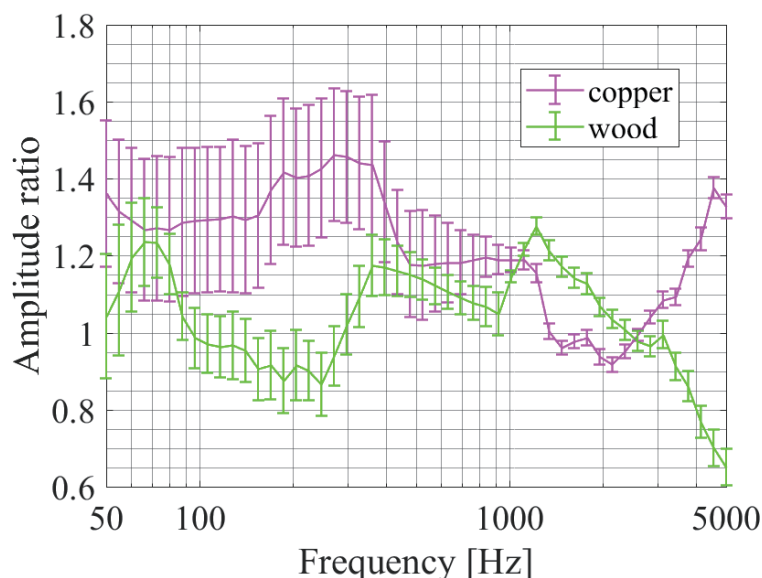


図 11. 鋼製ハンマーによる計測結果の SRS 値に対する、銅製ハンマーおよび木製ハンマーによる計測結果の SRS 値の比率
横軸は周波数、縦軸は比率を表している。エラーバーは誤差の大きさを示している。

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 12）。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。また供試体固定治具は 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 13 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 13 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。

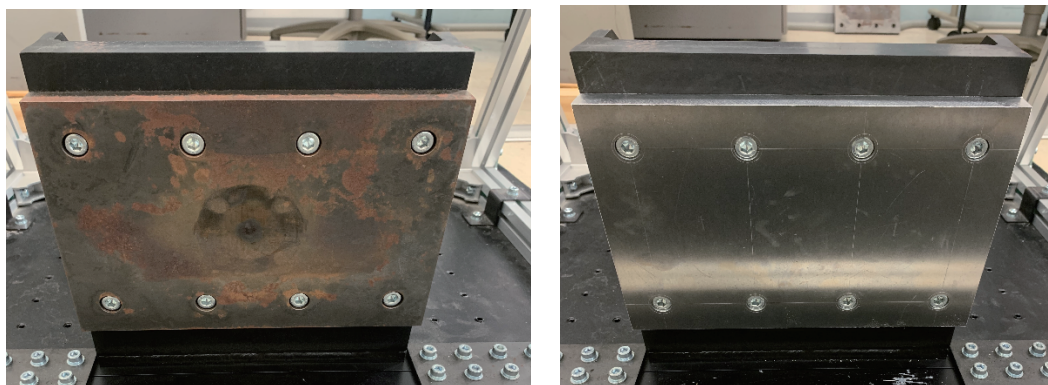


図 12. 鋼製の衝撃受け部（左）およびアルミ製の衝撃受け部（右）

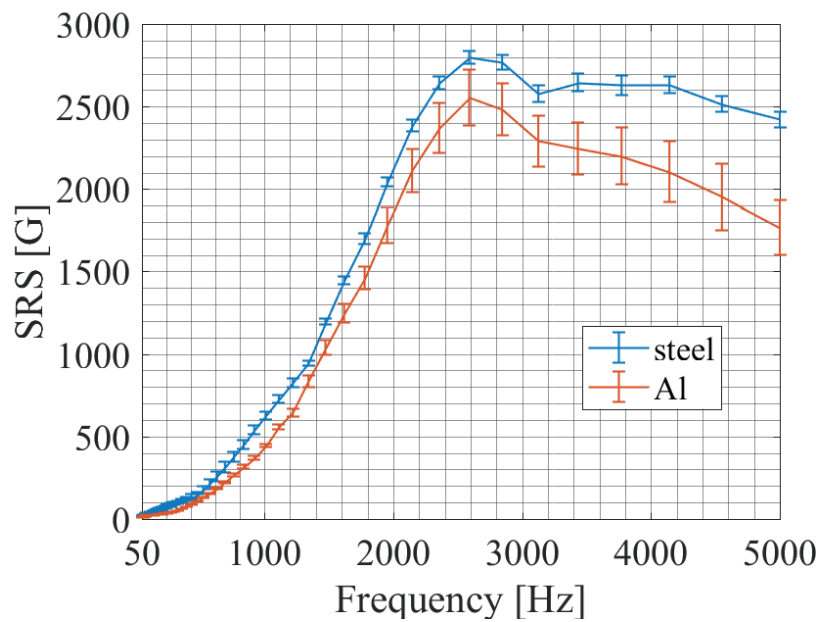


図 13. 衝撃受け部の材質の違いによる SRS 値の比較
横軸は周波数、縦軸は SRS 値を表している。エラーバーは 5 回計測における各 SRS 値の周波数毎のばらつきの大きさを標準偏差で表している。

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 14 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。

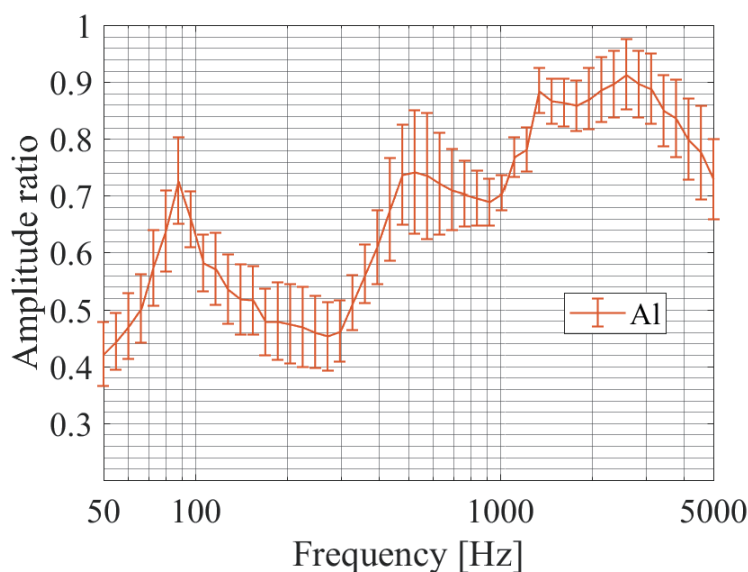


図 14. 鋼製衝撃受け部を用いた場合の SRS 値に対するアルミ製衝撃受け部を用いた場合の SRS 値の比率
横軸は周波数、縦軸は比率を表している。エラーバーは誤差の大きさを示している。

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 15 に示すような 4 種類の供試体固定治具と治具なし（衛星固定ベース本体）の 5 パターンである。

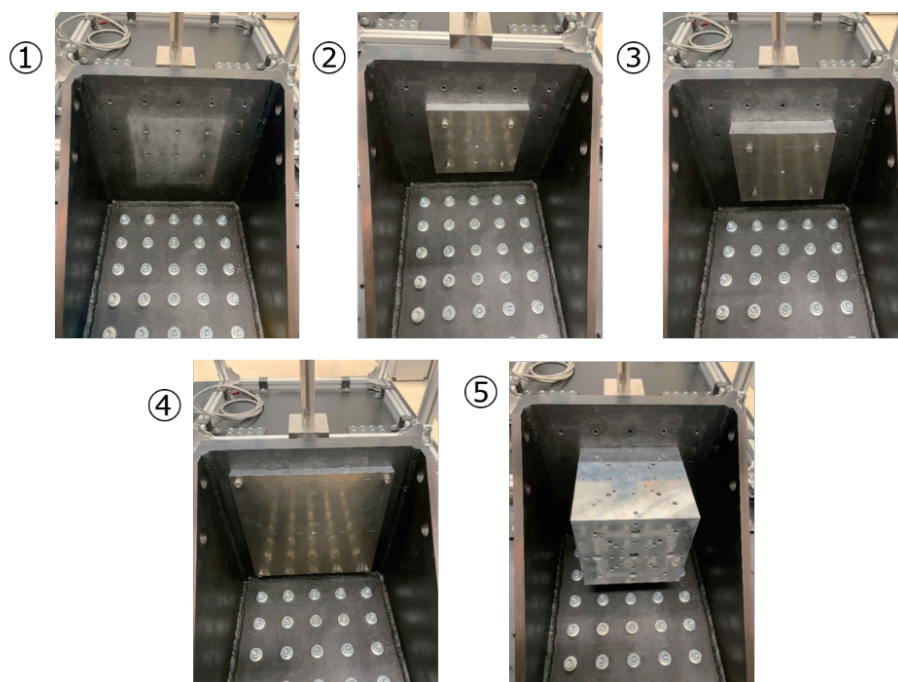


図 15. 供試体固定治具の種類

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。

②～③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 16 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。

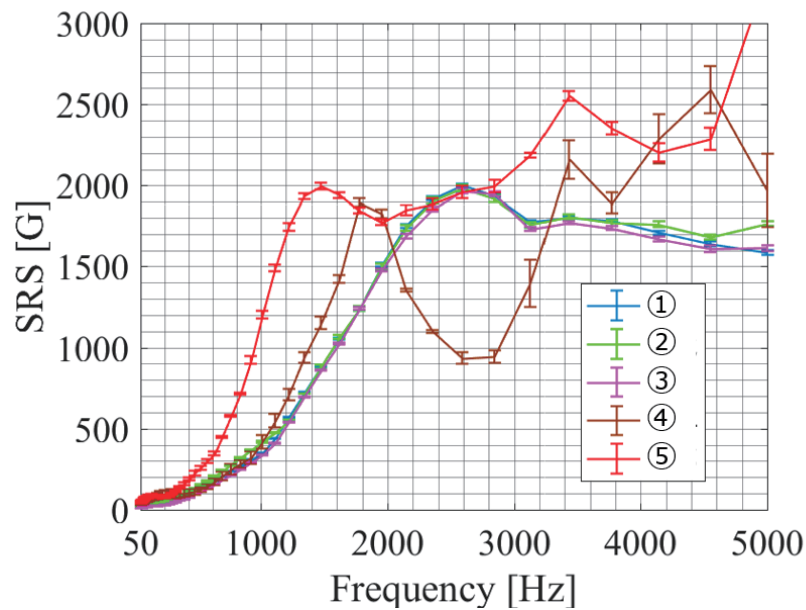


図 16. 供試体固定治具の違いによる SRS 値の比較

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の大きさを標準偏差で表している。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 17 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。

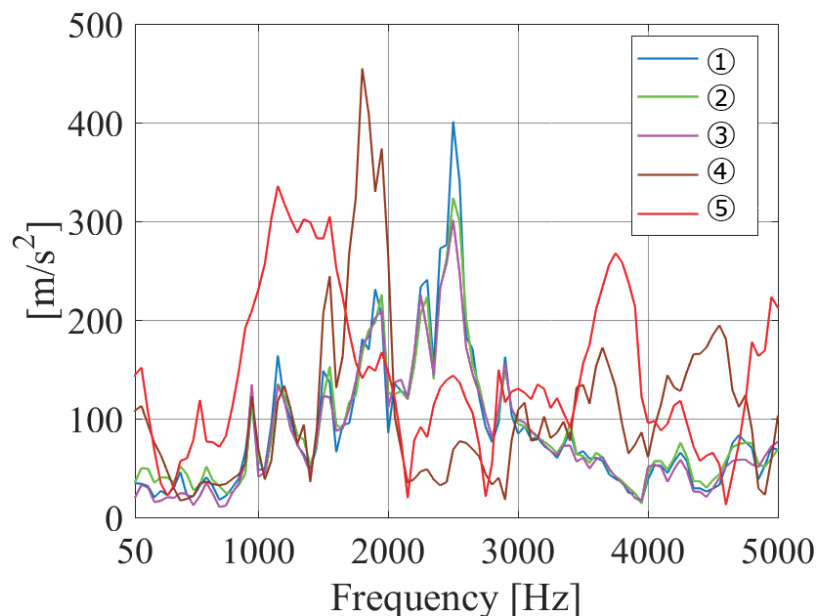


図 17. 印加された各衝撃波形のパワースペクトル

横軸は周波数、縦軸は振幅を表している。5 回計測の平均値をプロットしている。

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 18 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。

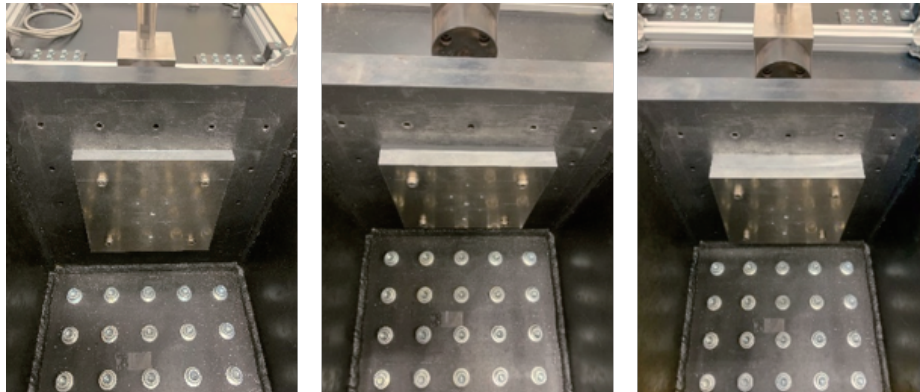


図 18. 緩衝材設置の様子
緩衝材なし（左）、バイトン有り（中央）、アルミ板有り（右）

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 19 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。

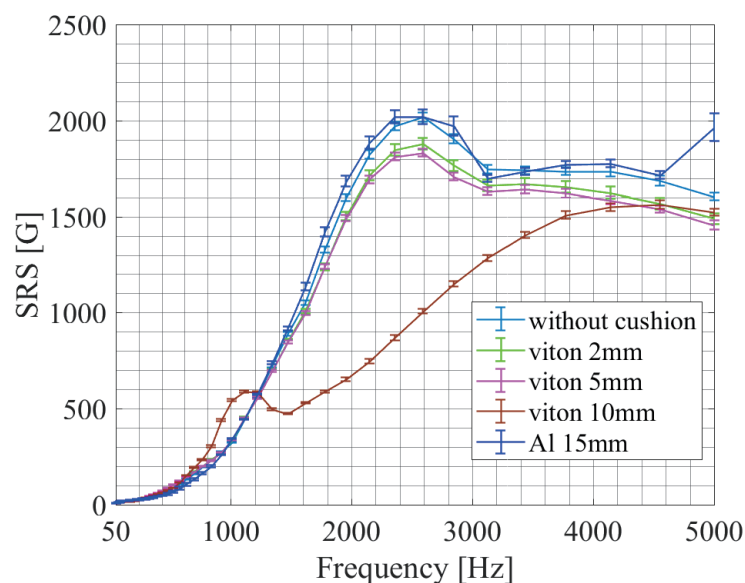


図 19. 緩衝材の違いによる SRS 値の比較
横軸は周波数、縦軸は SRS 値を表している。エラーバーは 5 回計測における各 SRS 値の周波数毎のばらつきの大きさを標準偏差で表している。

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 20 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、70Hz 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。

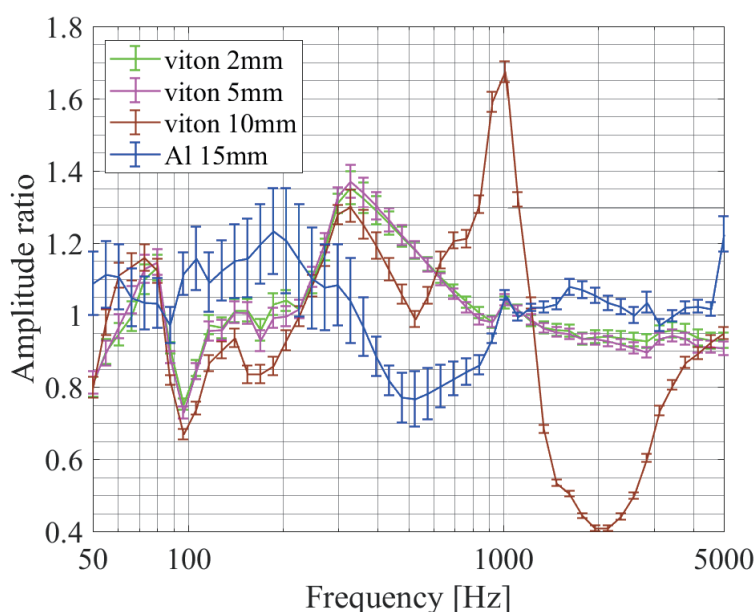


図 20. 緩衝材無しの場合の SRS 値に対する各緩衝材を用いた場合の SRS 値の比率
横軸は周波数、縦軸は比率を表している。エラーバーは誤差の大きさを示している。

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 21 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。

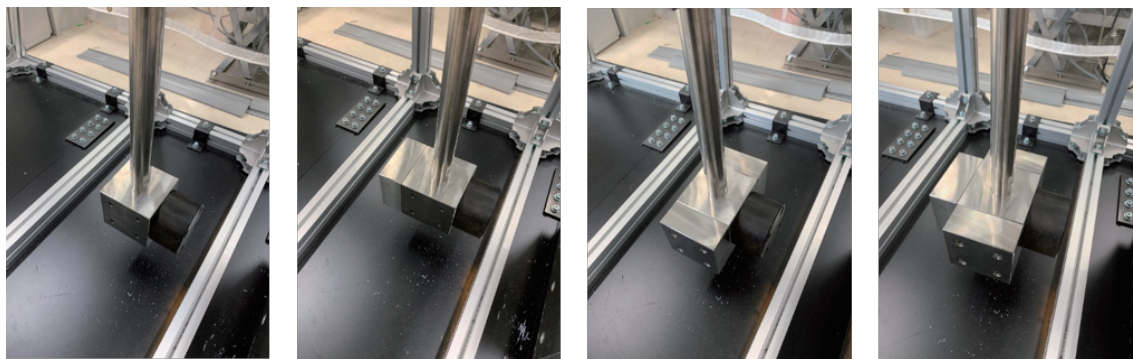


図 21. ハンマーベースに錘を取り付けた様子
錘無し（左）、錘 1 つ（中央左）、錘 2 つ（中央右）、錘 3 つ（右）

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 22 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 22 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。

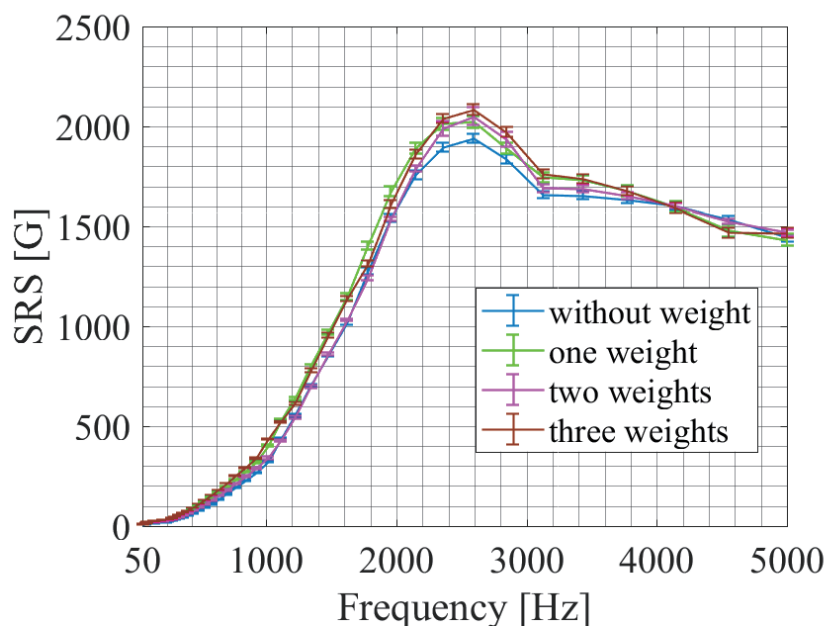


図 22. ハンマーベースの質量の違いによる SRS 値の比較
横軸は周波数、縦軸は SRS 値を表している。エラーバーは 5 回計測における各 SRS 値の周波数毎のばらつきの大きさを標準偏差で表している。質量の増加によって SRS 値が大きくなっている。

錘無しの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 23 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

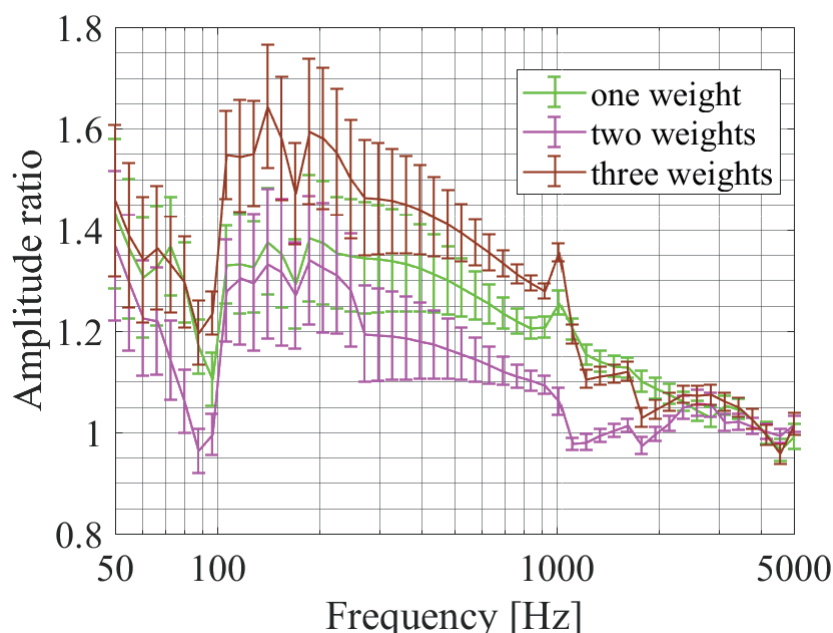


図 23. 錘無しの場合の SRS 値に対する錘有りの場合の SRS 値の比率
横軸は周波数、縦軸は比率を表している。エラーバーは誤差の大きさを示している。1000Hz 以上の高周波数領域と比べて、1000Hz 以下の周波数領域における増加率の方が大きいことが分かる。

以上の結果から、打ち上げ衝撃の 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。一般的に打ち上げ衝撃の SRS 特性は、HIIA 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場合が多い。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 11 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 23 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つ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。

4. 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、直径10μm程度の鉛ガラスでできた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 を重ねて用いられ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 アッセンブリに組み、衝撃試験を実施した。MCP アッセンブリの外観および構造を図 24 に示す。この MCP アッセンブリは、MCP を固定するために peek のスペーサーを使用している。供試体の MCP は浜松ホトニクス製の F1551 であり、大きさは直径 17.9mm である。

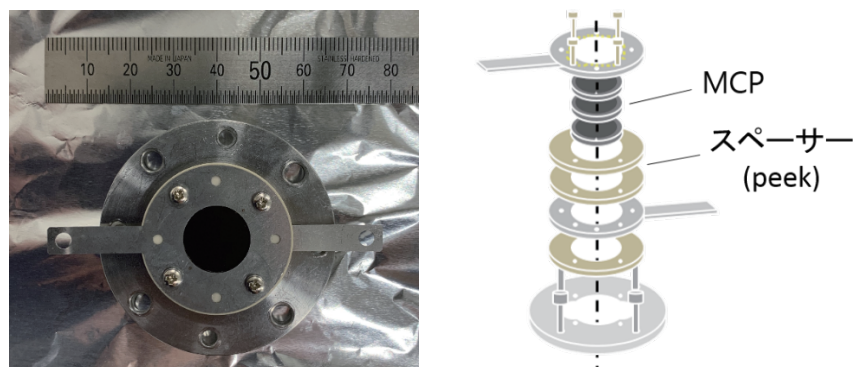


図 24. MCP アセンブリの外観（左）および構造（右）

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、圧電効果により電荷が発生する。これをチャージコンバータで電圧に変換し、データロガーで加速度に変換する。加速度センサの性能において、ダイナミックレンジと S/N 比はトレードオフの関係にある。つまりダイナミックレンジを広く取るためには電荷感度を下げる必要があるが、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う。

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 25 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られと考える。また SRS 値のばらつきに関して、加速度センサ 1 では $\pm 100\text{G}$ 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 $\pm 400\text{G}$ 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。

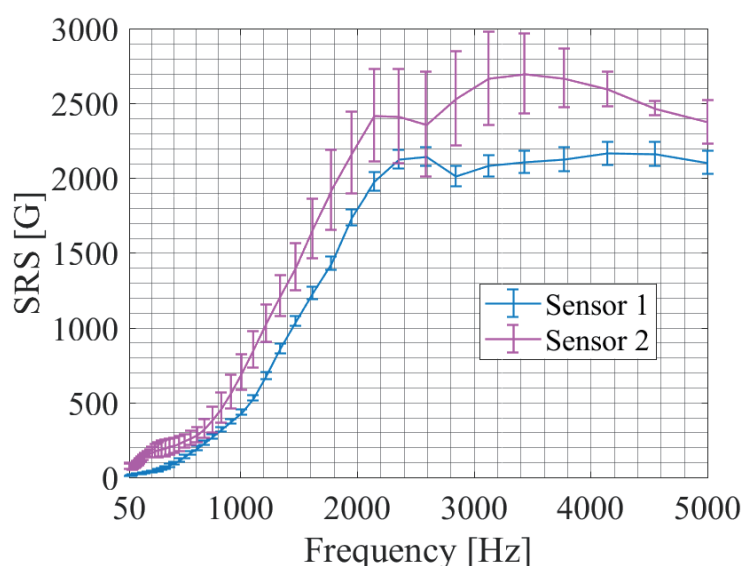


図 25. 加速度センサ 1 および加速度センサ 2 でそれぞれ計測した際の SRS 値の平均値とばらつき
横軸は周波数、縦軸は SRS 値を表している。エラーバーは 5 回計測における各 SRS 値の周波数毎のばらつきの大きさを標準偏差で表している。

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 26 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。

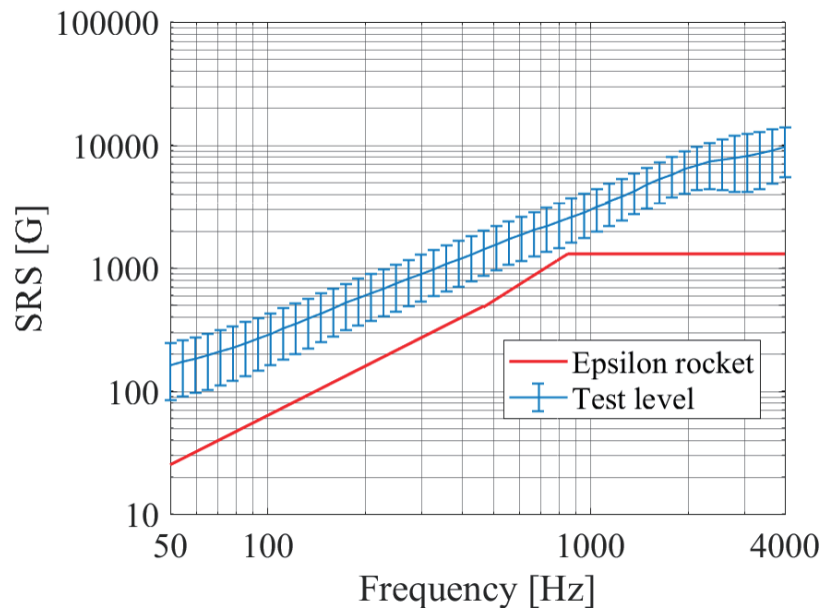


図 26. 試験で印加した全ての衝撃に対する SRS 値の平均値および周波数毎のばらつき
横軸は周波数、縦軸は SRS 値を表している。エラーバーは全ての衝撃に対する各 SRS 値の
周波数毎のばらつきの大きさを標準偏差で表している。

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で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 27 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 27. 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 アッセンブリを設置し、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 28）。

- 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。

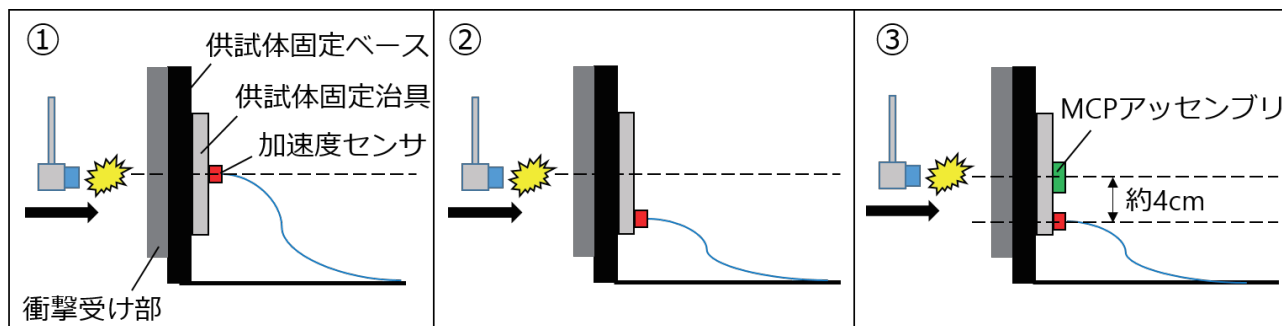


図 28. 計測位置の違いおよび供試体の有無の違いによる SRS 値への影響の検証

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を大きさを図 29 と図 30 に示す。図 29 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 30 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。だが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 値が試験要求値にそれ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。

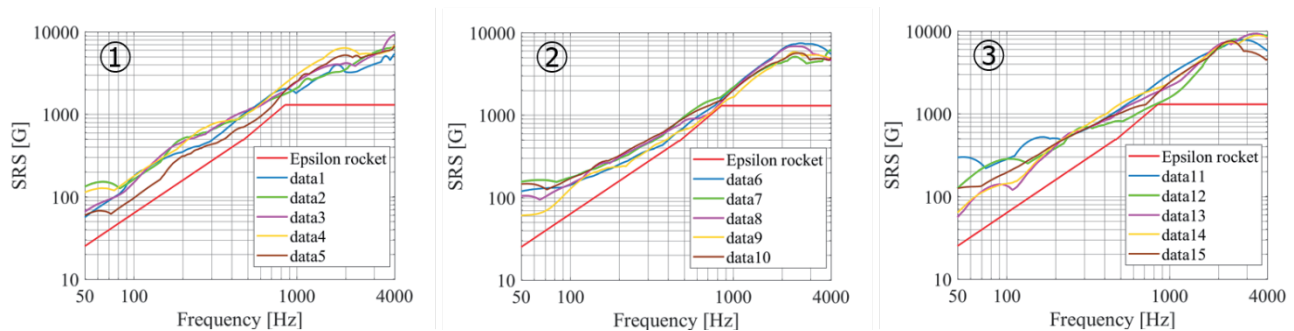


図 29. ①②③でそれぞれ 5 回計測した際の各 SRS 値と試験要求値の比較
横軸は周波数、縦軸は SRS 値を表している。

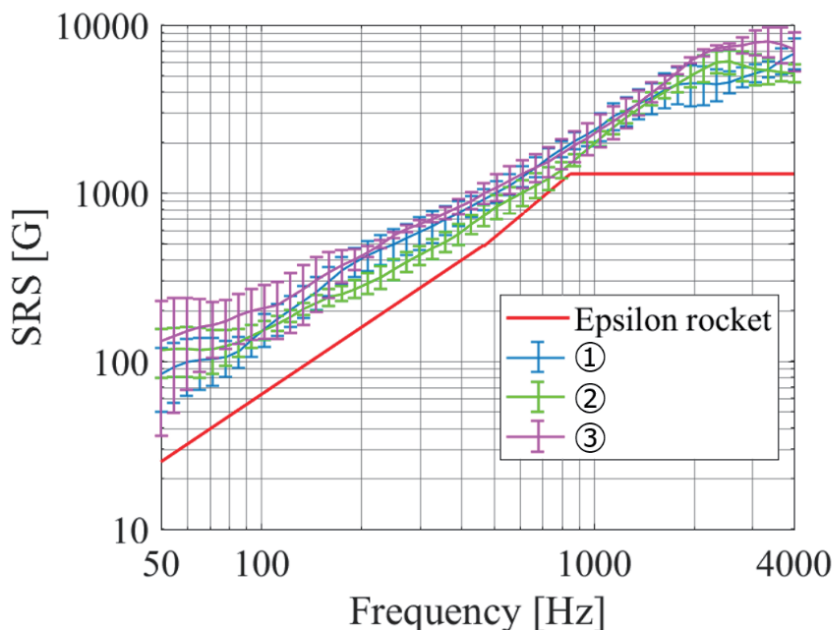


図 30. ①②③でそれぞれ 5 回計測した際の各 SRS 値の平均値と周波数毎のばらつき
横軸は周波数、縦軸は SRS 値を表している。エラーバーは 5 回計測における各 SRS 値の
周波数毎のばらつきの大きさを標準偏差で表している。

4.4. 衝撃試験手順

MCP の衝撃試験手順を図 31 のフローチャートに示す。

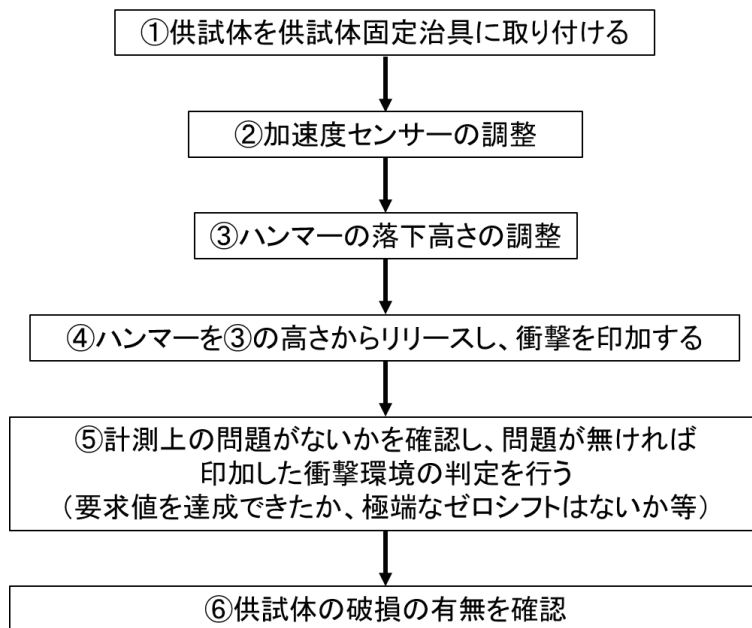


図 31. MCP の衝撃試験手順

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 27）。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 32 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¹⁾。

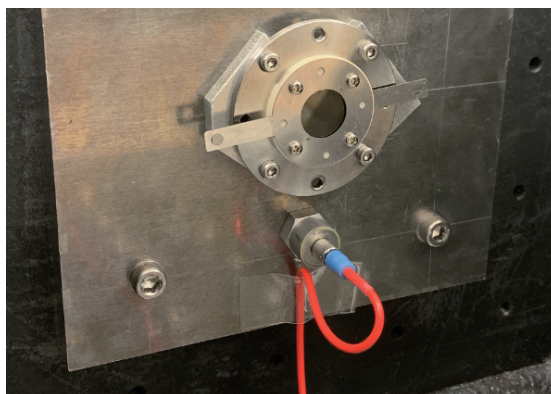


図 32. 加速度センサ周りのケーブル配線

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33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。

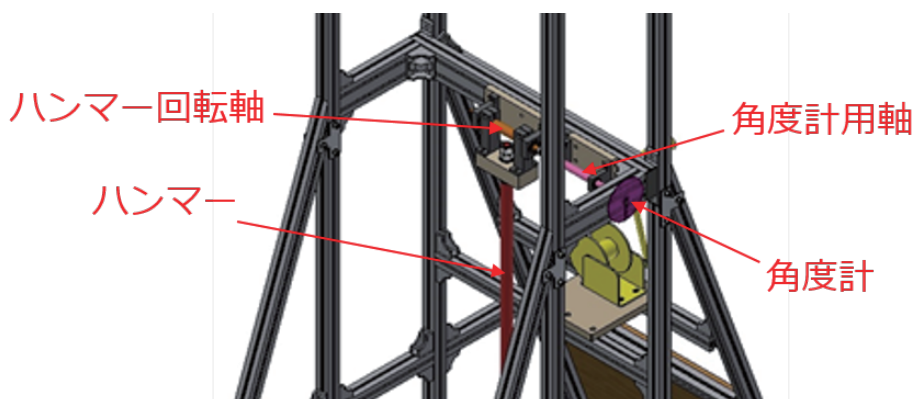


図33. 衝撃試験機の角度系等の外観

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ったと判定し、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ったと判定し、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34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。

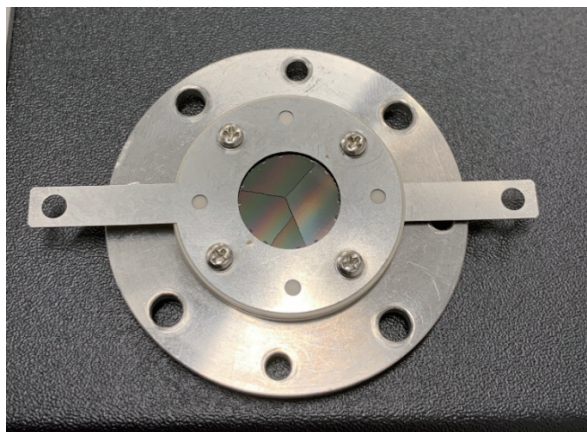


図34. 破損した MCP

4.5. 衝撃試験結果

MCP の衝撃試験結果を図 35 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。

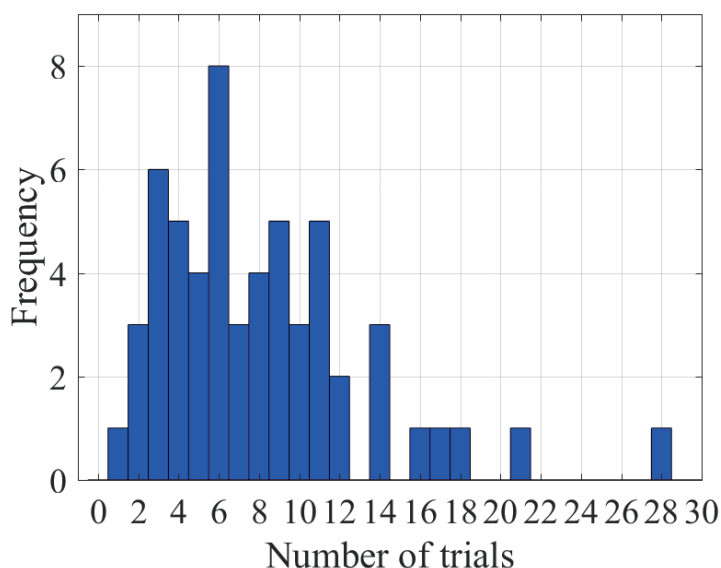


図 35. MCP の衝撃試験結果

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. MCP の衝撃に対する寿命分布の推定

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⁸⁾。ワイブル分布の確率密度関数は(3)式で表される。

$$f(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t}{\beta} \right)^{\alpha-1} \exp \left\{ - \left(\frac{t}{\beta} \right)^{\alpha} \right\} \quad (3)$$

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。今回はワイブルプロットを用いて、ワイブル分布を試験結果にフィッティングした。具体的な計算手順を Appendix に示す。

その結果、 $\alpha = 1.6$ 、 $\beta = 9.6$ が求まる。これらをパラメータに持つワイブル分布を試験結果にフィッティングしたものが図 36 である。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。

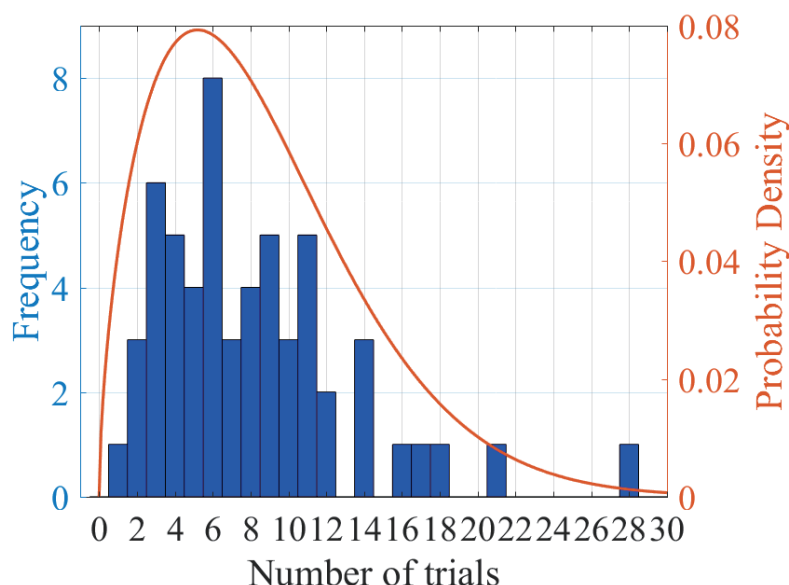


図 36. 試験結果に対するワイブル分布のフィッティング結果
横軸は印加した衝撃の回数を表している。左縦軸は各衝撃印加回数において破損が確認された供試体の数、右縦軸はフィッティングしたワイブル分布の確率密度を表している。

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37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。

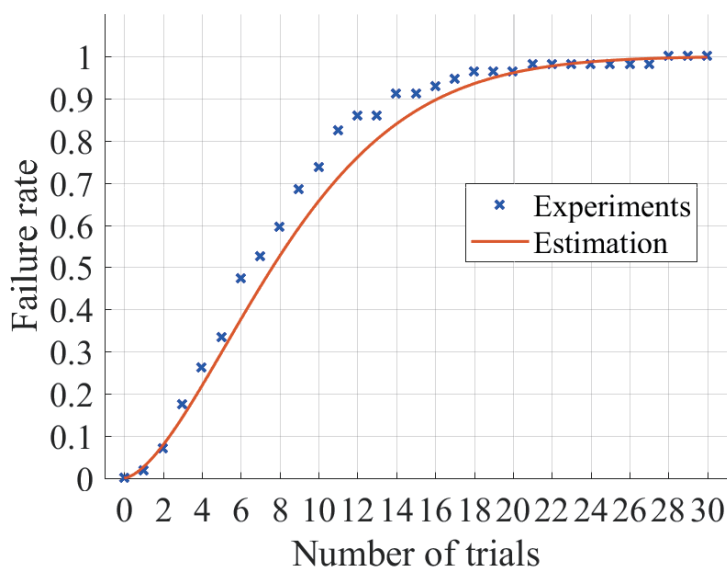


図37. 累積故障率の実験値および推定値の比較
横軸は印加した衝撃の回数、縦軸は累積故障率を表している。

ここで、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。一般的に、衛星や観測機器はPM品でQT試験を実施した後にFM品でAT試験を一回実施し、これをクリアしたFM品を実際に打ち上げる。つまりFM品はATレベルの衝撃を二回

経験することになる。今、このMCPのPM品が仮にQT試験をクリアしたと仮定し、本衝撃試験の衝撃環境がATレベルであるとする、FM品に対してATレベルの衝撃を二回印加したときの生存確率は約92%である。これは決して信頼性が高いと断言できるほどの値ではないと考えられる。しかし、本試験では衝撃源から供試体に対して極めて直接的に衝撃が印加されており、衝撃試験としてはかなり厳しいセッティングである。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¹⁾、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、AT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。本研究におけるこれ以上の定量的な議論は難しいが、今回の試験結果を、緩衝材の採用や機器設計の参考にすることが可能であると考えられる。

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⁹⁾。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

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{\sqrt{\frac{s^2}{n}}} \quad (3)$$

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 $p\text{値} = 7.2 \times 10^{-15} < 0.05$ 、母平均 $\mu = 2$ のとき $p\text{値} = 1.6 \times 10^{-12} < 0.05$ 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。

5. まとめ

我々は振子式の衝撃試験装置を建造し、HIIA 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、HIIA 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 程度に収めることが分かった。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重くすることで、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比率が大きくなることが分かった。

また、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 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、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、AT レベル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。

参考文献

- [1] 宇宙航空研究開発機構, 衝撃試験ハンドブック, JERG-2-130-HB001.
- [2] 畑村透, 超小型衛星に適した衝撃試験方法の開発, 2015, PhD Thesis, 九州工業大学.

- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 澤田稔, 木材の変形挙動, 材料, 1983, 32.359: 838-847.
- [8] 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.
- [9] 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.

Appendix

ワイブルプロットの計算手順は以下のとおりである。ワイブル分布の確率密度関数は(A.1)式で表される。

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

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。また、信頼度および不信頼度 (累積故障率) はそれぞれ(A.2)、(A.3)式で表される。

$$R(t) = \exp\left\{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha}\right\} \quad (\text{A.2})$$

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha}\right\} \quad (\text{A.3})$$

(A.3)より、

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

両辺に対数をとると、

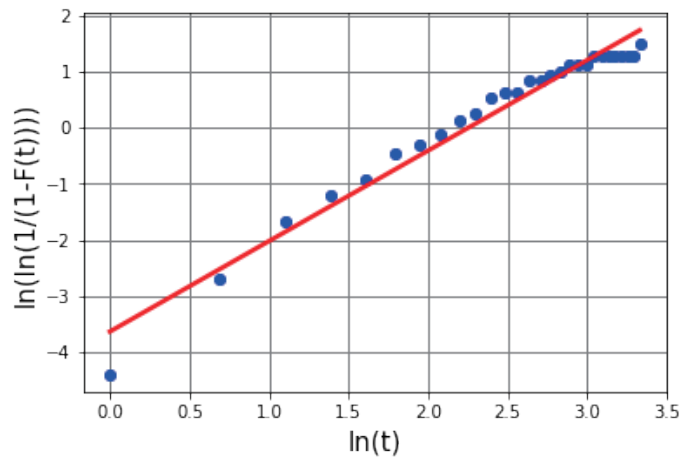
$$\ln[\ln\{1 - F(t)\}] = \ln\left(-\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha} = -\alpha \ln(t) + \alpha \ln(\beta)$$

$$\therefore \ln\left[\ln\left\{\frac{1}{1 - F(t)}\right\}\right] = \alpha \ln(t) - \alpha \ln(\beta) \quad (\text{A.4})$$

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

$$Y = \alpha X - \alpha \ln(\beta) \quad (\text{A.5})$$

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A.1)。



図A.1. 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。

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-19-005

JAXA Research and Development Report

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

Performance evaluation of pendulum impact test equipment and impact resistance
evaluation of MCPs

発 行 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1
URL: <http://www.jaxa.jp/>

発 行 日 2020年2月5日
電 子 出 版 制 作 松枝印刷株式会社

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等加工することを禁じます。
Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly
prohibited. All Rights Reserved.

