

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

修了年月 2020 年 3 月

複雑理工学専攻 47186120 福場惇哉

指導教員 吉川一朗 教授

キーワード：衝撃試験, SRS, MCP

1 研究背景

宇宙機開発における衝撃試験では、宇宙ミッション内で発生する衝撃環境に対する衝撃耐性の確認を行う。主な衝撃発生イベントとしては、ロケットからの衛星分離やフェアリング分離の際に用いられる火工品の使用が挙げられる。衝撃試験の一番確実な方法はこれらの火工品を実際に用いて行う実環境試験である。しかし、火工品はコストが高く取り扱いが煩雑であるため、低予算且つ短納期で開発が行われる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現実的でない。こうした背景から、実環境試験に代わる試験方法の開発および衝撃試験施設の整備の需要が近年高まっている。そこで、今回我々は衝撃試験システムの構築を行った。また、衝撃試験装置が抱える衝撃環境の調整に関する課題について、その調整方法の検証を行った。更に、構築した衝撃試験システム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ことを確認した。

2 振子式衝撃試験装置

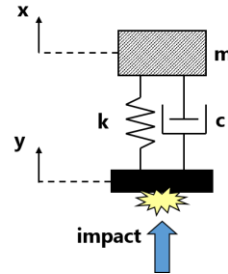
今回我々が建造した振子式衝撃試験装置の外観を図1に示す。供試体固定ベースの大きさは 280mm 四方であり、これより小さい供試体であればネジで固定し衝撃試験を実施することが可能である。



図1. 衝撃試験装置の外観 (左) および各部名称 (右)

2.1 宇宙ミッションにおける衝撃試験要求値

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2に示すような1自由度振動系に加速度 $\ddot{y}(t)$ 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。



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

相対変位 $z(t) = x(t) - y(t)$ より
 $m\ddot{z}(t) + c\dot{z}(t) + kz(t) = -m\ddot{y}(t)$
 $\therefore \ddot{z}(t) + 2\xi\omega\dot{z}(t) + \omega^2z(t) = -\ddot{y}(t)$
ただし、 $\omega = \sqrt{k/m}$ 、 $\xi = c/(2m\omega)$

これを $\ddot{x}(t)$ について解くと、
 $SRS(\omega, \ddot{y}(t)) = \max(|\ddot{x}(t)|)$

図2. SRS の数学モデル

ここで 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図3に示す。衝撃試験を実施する際には、このような衝撃環境を実現することが求められる。

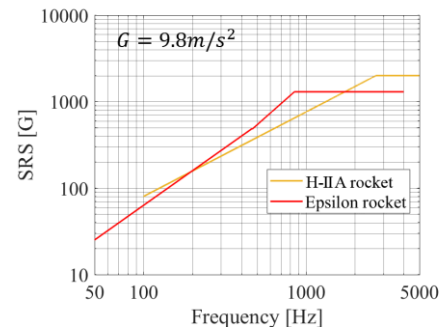


図3. 宇宙ミッションにおける衝撃試験要求値

2.2 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り、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示す。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り、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。今回はこれらの評価指標を用いて衝撃試験装置の性能評価を行う。

2.2.1 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試験要求値と再

現した衝撃環境の比較を図4に示す。低周波数領域ではいずれも数十から数百G程度の差に収まっているが1000Hz以上の高周波数領域では数千G程度の過負荷となることが分かった。

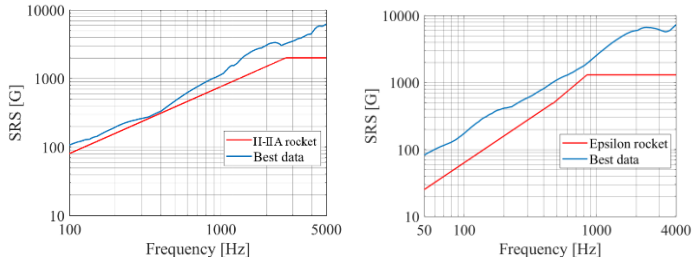


図4. H-IIA ロケット (左) およびイプシロンロケット (右) の試験要求値との比較

2.2.2 再現性評価

H-IIA ロケットの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。10回計測したそれぞれの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(標準偏差 $\pm 1\sigma$)を図5に示す。SRS値のばらつきは大きなところでも $\pm 100G$ 程度に収まっていることが分かった。

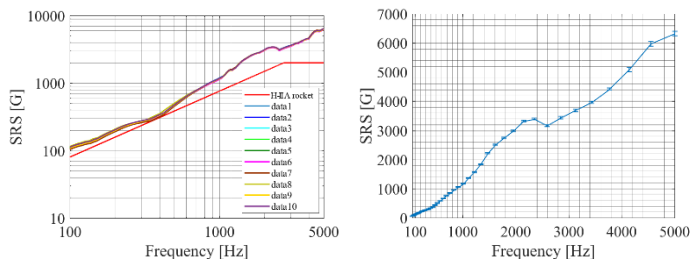


図5. それぞれの計測におけるSRS値(左)および10回計測の平均値とばらつきの大きさ(標準偏差 $\pm 1\sigma$)

2.3 SRS値の調整可能性検証

ここではハンマー先端の材質によるSRS値への影響について述べる。今回、ハンマー先端の材質に鋼と銅および木材の3種類を用いた。各SRS値の比較および鋼ハンマーに対する銅ハンマーと木材ハンマーのSRS値の比率を図6に示す。木材のような柔らかい材質を用いることで高周波成分を抑制することが可能であり、特に5000Hzでは鋼に比べて木材を使用した場合、約30%程度SRS値が抑制されていることがわかる。

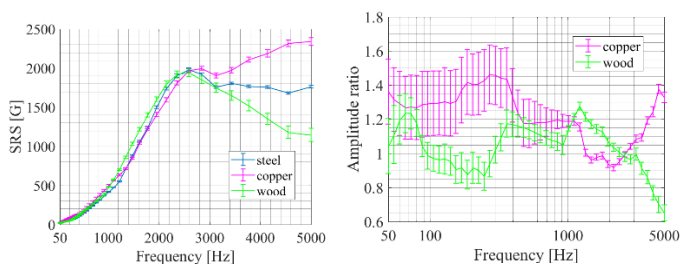


図6. ハンマー材質の違いによるSRS値の比較(左)および鋼ハンマーに対する比率(右)

3 MCPの衝撃試験

更に今回、光学観測機器に広く用いられるMCPと呼ばれる電子増倍素子に衝撃試験を実施し、衝撃耐性を調査した。供試体であるMCPアセンブリの外観を図7に示す。このMCPは外形寸法 $\phi 17.9\text{mm}$ 、厚さ0.48mmであり、3枚重ねを1セットとしてアセンブリに固定されている。供試体の総数は57セットであり、印加した衝撃の大きさはイプシロンロケットの試験要求値を満たす衝撃レベルである。破損判定は目視検査にて行った。

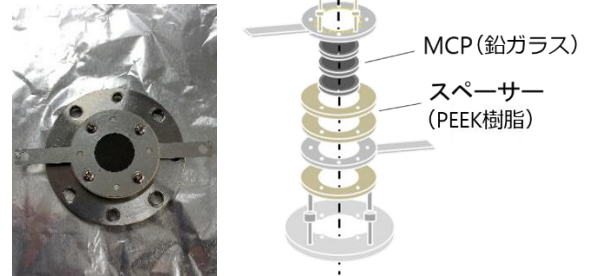


図7. MCPアセンブリの外観(左)および構造(右)

3.1 衝撃試験結果

MCPの衝撃試験結果および試験結果にフィッティングを行って得られた寿命分布(ワイブル分布)を図8に示す。ここでワイブル分布の確率密度関数は次式で表される。

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

(フィッティングの結果 $\alpha = 1.6, \beta = 9.6$)

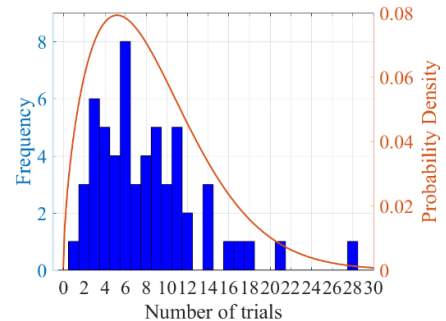


図8. 試験結果およびワイブル分布のフィッティング結果

横軸は印加した衝撃の回数であり、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、右縦軸はワイブル分布の確率密度を表している。試験結果より、中央値は7回、平均値は約8.1回、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。

4 まとめ

振子式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性能評価を行った。また、衝撃試験装置の性能向上の足掛かりとして、SRS値の調整可能性に関する検証を行った。更に、本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することが可能である事を確認した。