

B11 アルミ円柱を用いた距離減衰モデルの開発

石走紗矢佳, 波多英寛 (熊本大学)

Sayaka Ishibashiri, Hidehiro Hata (Kumamoto University)

1. 緒言

ロケットや人工衛星等の宇宙機器には、衛星分離やフェアリング分離時の火工品使用による衝撃荷重が印加される。そのため、打ち上げ環境を模擬した衝撃環境試験を衛星や各コンポーネントで行い、それらの健全性を評価する必要がある。現在の衝撃環境試験として、爆破衝撃試験や、落下式衝撃試験、ハンマリング試験など、様々な衝撃試験が実施されている⁽¹⁾。また、これらの試験は、規定された従来の衝撃試験設計ガイドラインのもと実施されている。ガイドラインに示されているモデル化された衝撃波の損失係数は、コンポーネントに対する衝撃環境条件の推測や、安全マージンを考慮した設計に利用されている⁽²⁾⁽³⁾。近年、宇宙開発産業分野の活性化が望まれ、従来の宇宙開発よりも更なる低コスト・迅速化が求められる⁽⁴⁾。しかし、従来の試験方法では、試験形態のサイズや安全性から、場所やコストの制限があり、また、落下式などの剛体運動による衝撃印加方法では慣性力による損傷のリスクがある。また、新しい材料や構造に対して、従来のガイドラインによるモデルの適応性も考慮しなければならない問題である。

このような背景に対応する低リスクで効率的な環境試験および宇宙機器の設計のために、試験条件予測や設計パラメータの知見が有効であると考え、様々な試験体における衝撃伝播特性について検討を行った。実施方法としては、本研究室で開発した簡易式衝撃試験装置を用い、加速度時間履歴の測定および SRS, FFT 解析を行う。本論文では、アルミ円柱試験体における衝撃伝播特性として、距離減衰について示す。

2. 実験装置・方法

2.1 試験対象物

試験体を図 1 に示す。A2017 材料の円柱であり、直径は 90mm, 長さ L[mm]は, 90, 135, 180, 270, 360mm の 5 種類を準備した。試験体の端面に衝撃を印加し、もう端面に計測点を設け、打撃点と計測点の距離を距離減衰の長さとする。



図 1 アルミ円柱試験体

2.2 衝撃発生装置

本実験に用いた簡易式衝撃試験装置の構造を図 2 に示す。バネを圧縮し、弾性力を解放することで、打撃子を試験体に衝突させ、試験体に衝撃を負荷させる仕組みである。バネの圧縮量を一定にする機構により、ほぼ同じ条件の衝撃印加が可能となっている。打撃子は、SUS303 材料, 直径 20mm, 質量約 300g である。

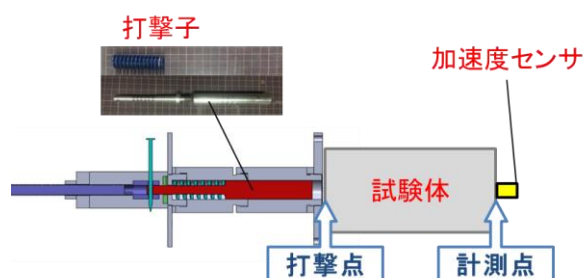


図 2 簡易式衝撃試験装置の構造

2.3 実験方法

試験体を入れ替えることにより距離減衰の長さを変化させ、距離減衰を検討する。加速度センサ(PCB 製 M350B21)を用いて加速度計測を行い、SRSを求めることで衝撃力を評価する。打撃速度は約7m/s, サンプルング間隔は1 μ sec, 測定時間は11msecである。

また、試験体と衝撃試験装置の固定方法を図3に示す。衝撃試験装置と試験体打撃面はボルト2本で接面され、装置のみバイスに挟んで固定されている。

同条件での実験を3~5回行い、加速度時間履歴から積分して算出した伝播運動エネルギーにおける中央値3つのデータを用いて評価を行う。



図3 固定方法

3. 実験結果

加速度時間履歴の代表としてL=90, 180, 270mmの結果を図4に示す。試験体の長さが大きくなると、立ち上がりの加速度振幅値が小さくなる傾向であった。それに従い、減衰も小さくなっており、距離によって加速度の減衰に影響があると考えられる。SRSおよびFFTの結果を図5に示す。長さに応じて、500Hz付近の低周波数帯域においてSRSの減衰傾向が現れ、5,000Hz以降、SRSの山の部分(ピーク値)が発生する周波数に変化が現れた。

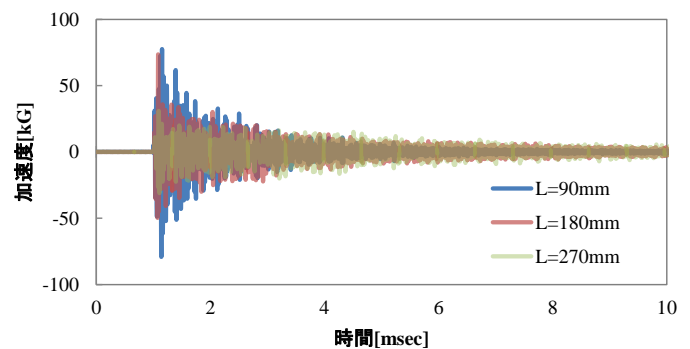


図4 加速度時間履歴(代表)

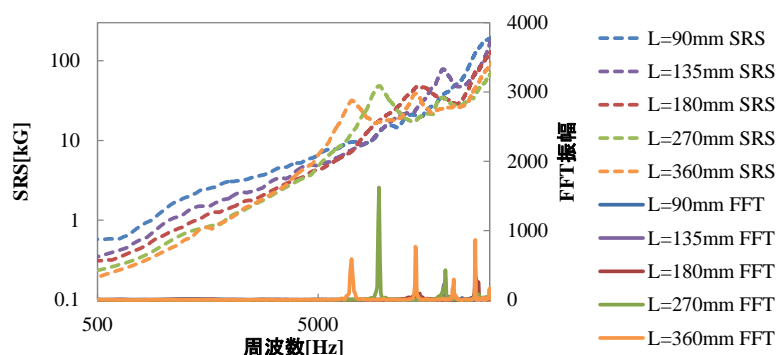


図5 SRS および FFT 結果

4. 考察

低周波数帯域の SRS 減衰については、距離による影響であり、SRS ピーク値の周波数推移については、振動モードが影響していると考え、以下の考察を行った。

印加点での計測は行っていないため、印加点に一番近い $L=90\text{mm}$ を基準とした SRS の正規化(図 6)を行った。5,000Hz 以降に表れる最大比率における周波数を SRS ピーク値周波数とし、ゼロシフトおよびピーク値の影響を除くために 500~1,100Hz における比率平均値を低周波数帯域の SRS 距離減衰率とする。

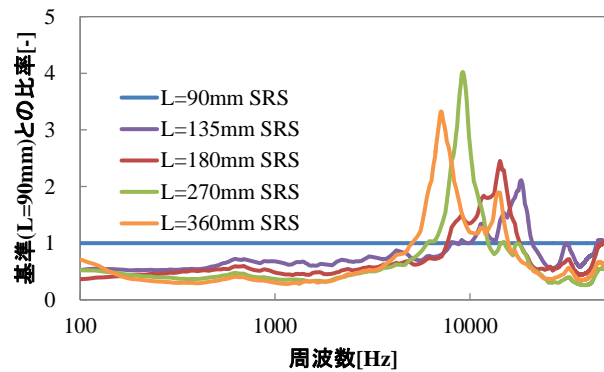


図 6 SRS 正規化

ピーク値周波数推移を引き起こした振動モードを検討するため、基本的な振動モデルとして、1 次、2 次、3 次における縦振動と曲げ振動について考えた。縦振動および曲げ振動の固有振動数の式を、式(1)、(2)に示す。

$$\text{縦振動の固有振動数} \quad f = \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda_n}{l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \dots \text{式(1)}$$

$$\text{曲げ振動の固有振動数} \quad f = \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda_n}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad \dots \text{式(2)}$$

(λ_n : n 次の固有振動数, l : 長さ[m], E : ヤング率[Pa], I : 慣性モーメント, ρ : 密度 $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$, A : 断面積 $[\text{m}^2]$)

計算値と実験値の比較を図 7 および図 8 に示す。縦振動と曲げ振動で比較すると、曲げ振動の方が実験結果に近いと考えられる。図 7 より、曲げ振動の 2 次モードが SRS ピーク値周波数の推移に影響を与えている可能性が考えられる。曲げ振動の式より、距離の二次関数で SRS ピーク値周波数および SRS 距離減衰のモデル化を行った。低周波数帯域における SRS 減衰率モデルを図 9 に、SRS ピーク値における周波数帯域推移のモデルを図 10 に示す。どちらも決定係数 R^2 が極めて 1 に近く、良好なモデルを得ることができた。

5,000Hz 以降に現れるピーク値の影響により、ピーク値付近の周波数における SRS は距離減衰の傾向を示さないことが分かった。しかし、運動エネルギーは距離によって減衰している要素として考えられる。加速度時間履歴から速度時間履歴を算出し、全時間で積分した値の二乗である比運動エネルギー v^2 を、 $L=90\text{mm}$ で正規化したのち伝播運動エネルギーのモデル化を行った。その結果を図 11 に示す。速度時間履歴を求める際、ゼロシフトによる誤差をなくすように積分後の傾きを取り除く手順を手作業により行った。基準である $L=90\text{mm}$ における伝播運動エネルギーは 2,380 J/kg であった。図 11 より、距離の二次式によるモデルを得ることができた。また、一定条件でばらつきがあった要因として、加速度からエネルギー値を算出する際、ゼロシフトの影響を完全に除去できていないからだと考えられる。

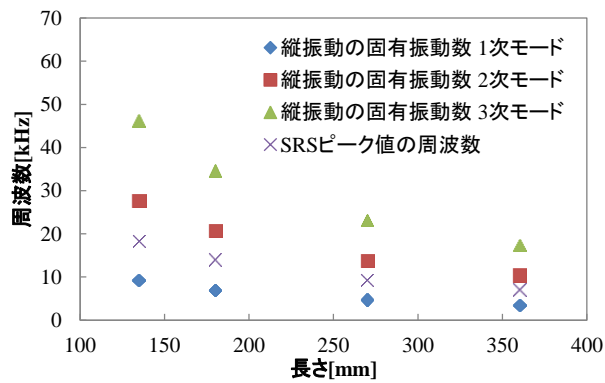


図 8 縦振動モードによる考察

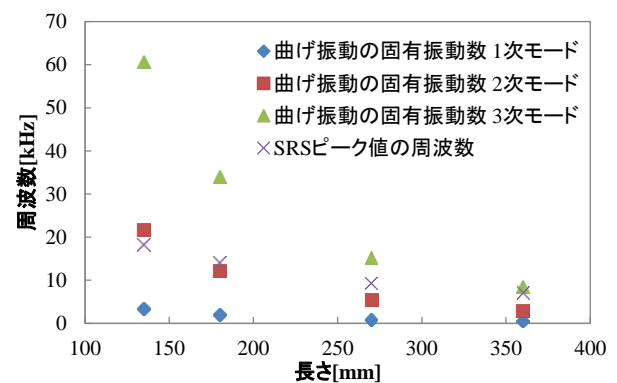


図 7 曲げ振動モードによる考察

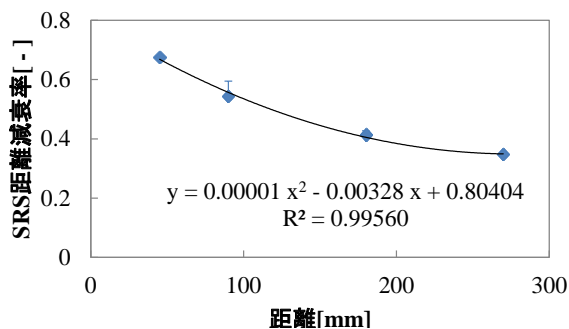


図 9 低周波数帯域における
SRS 距離減衰モデル

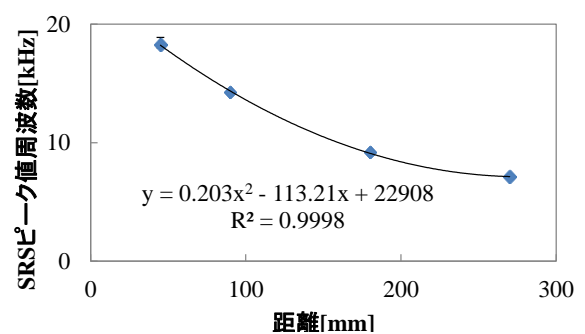


図 10 SRS ピーク値における
周波数推移モデル

5. 結言

本研究では、試験条件予測や設計パラメータの知見を得ることを目的とし、アルミ円柱試験体を用いて衝撃伝播特性について検討を行った。加速度計測の結果、低周波数帯域における SRS の距離減衰モデル、SRS ピーク値の周波数帯域推移モデルおよび伝播運動エネルギーのモデルを得ることができた。また、SRS ピーク値周波数に対して、2 次モードの曲げ振動の固有振動数が影響している可能性があること、SRS および伝播運動エネルギーは距離に応じて減衰することを確認した。

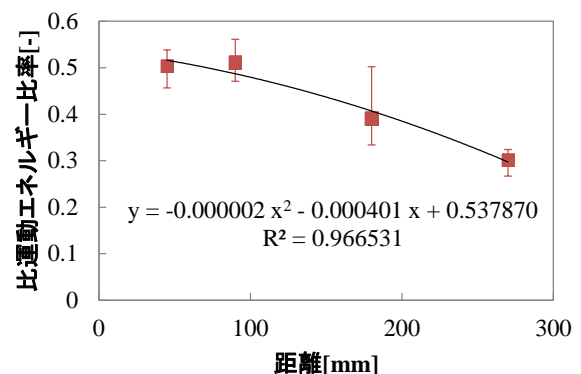


図 11 伝播運動エネルギー距離減衰モデル

6. 参考文献

- (1) 日本機械学会編, 機械工学便覧 応用システム編 ㍻11 宇宙機器・システム, pp.147-148, 2007
- (2) Michael G.Ryschkewitsch, National Aeronautics and Space Administration, Pyroshock Test Criteria, NASA Washington, DC 20546-0001, NASA-STD-7003, 2011
- (3) Dr.M.B.McGrath, W.P.Rader, Aerospace Systems Pyrotechnic Shock Data, NASA Goddard Space Flight Center, NAS5-15208, 1970
- (4) 堀秀輔, JAXA における航空宇宙分野への新たな展開, 日本機械学会 2015 年度次大会講演論文集, AC1500082000