

# 超小型衛星の衝撃試験レベル調整方法に関するシミュレーション\*1

## The Simulation about Adjustment Method of Shock Level of Nano Satellites

畑 村 透\*2・増 井 博 一\*2・趙 孟 佑\*2・前 野 一 夫\*3

Toru HATAMURA, Hirokazu MASUI, Mengu CHO and Kazuo MAENO

**Key Words:** Shock Test, Shock Response Spectrum, Nano Satellites, Simulation, LS-DYNA

**Abstract:** Development of small satellites (50 kg or less) is undergoing all over the world. Regardless its size, any satellite has to be tested for space environment. Various environment tests, such as vibration, vacuum, low and high temperature are necessary. Especially, shock test is one of the most difficult tests. The shock test needs to satisfy the SRS (shock response spectrum) requirement imposed by the launcher. If the SRS obtained in the test does not exceed the SRS requirement level, the test is invalid. At the same time, the SRS level as low as possible while satisfying the requirement is desired to protect the satellite from the overstress. SRS obtained by an air-gun type shock machine was analyzed using a commercial finite element code (LS-DYNA) to investigate the SRS at low frequencies, 100 to 300 Hz, which is very difficult to control in the actual test. The analysis showed that controlling the friction of the slide table is effective to change the slope of SRS at the low frequencies. The lower the friction, the higher slope of SRS is obtained.

### 1. はじめに

近年、超小型衛星（50 kg 以下）の開発が盛んに行われている。それに伴い衝撃試験の需要が高まっているが、国内に十分に対応できるだけの試験設備が整っているとは言えない状況である。我々は超小型衛星の衝撃試験を実施している数少ない機関の一つであるが、衝撃レベルのコントロールに課題を抱えている。衝撃試験はロケット打ち上げ側が、SRS (Shock Response Spectrum) で定義される衝撃レベルを設け、衛星開発サイドに試験実施を要求している。要求されるレベルはロケットごとにさまざまであるが、特に低周波域において差が大きい。例えばある主要なロケット同士で、100 Hz における SRS 値の差は、3 倍以上ある。SRS は、供試体が受けた衝撃に対し、そのダメージポテンシャルを評価する解析手法である。この SRS 加速度を、さまざまな構造、質量の人工衛星に対して、自在にコントロールすることが本研究の最終的な目標である。

第 1 図に衝撃試験の評価に関する例を示す。この例では、約 300 Hz 以下の周波数で、要求レベルを下回っている。つまり低周波側の衝撃強度を強くしなければならない。しかし、高周波側を維持しつつ、低周波側のみを Up させることは容易ではない。第 1 図の基準レベルは、低周波側の要求レベルが、その他多くのロケットに比べ高い。また、我々が行う試験の多くは、この規格を元に行っているため、高周

波側が試験要求を満たしていても、低周波側のレベルは満たせないことが多い。その反面、高周波側のレベル調整は、ゴムやアルミプレート等の緩衝材による効果も大きく、低周波側ほどの苦労は少ない。これらのことから我々は、最も優先度の高い課題として、低周波域における衝撃レベル調整方法を調査している。

我々の製作した衝撃試験機<sup>1,2)</sup>は、衛星を設置している治具を完全固定させず、樹脂レール上をスライドさせている。それにより摩擦を発生させ、緩やかにストップする仕組みである。これまでの実験の際の観察から、レールの摩擦係数を下げることによって、低周波側の衝撃レベル上昇効果が考えられたため、CAE (Computer Aided Engineering) 解析で実験と同様のコンフィギュレーションを再現し、確認した<sup>3)</sup>。

### 2. 実験装置

実験に使用した衝撃試験装置は、所謂空気銃で発砲時に素早く圧力解放を行うために、MO (Maeno-Oguchi) バルブ<sup>4)</sup>を使用している。計測時のコンフィギュレーションは第 2 図に示す。実験の流れとしては、スライド治具へ弾丸による衝撃 ⇒ 加速度ピックアップ ⇒ チャージアンプ ⇒ DAQ ⇒ PC の順にデータが送られる。さらに、PC で電圧データ (V) を加速度データ ( $m/s^2$ ) に変換し、SRS 解析を行う。試験が要求レベルを達成したかどうかは、CH1 の計測位置で判断する。

### 3. CAE 解析

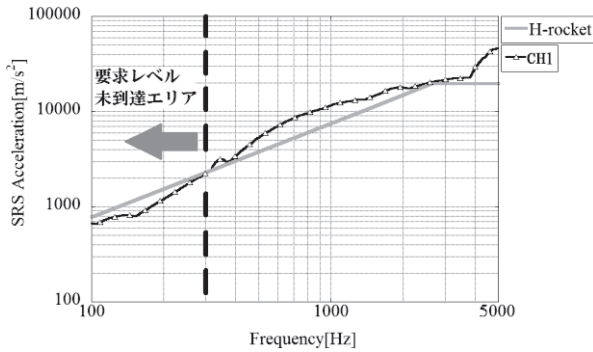
メッシュサイズや質量は第 1 表に、境界条件は第 2 表に示す。解析ソフトは LS-DYNA<sup>®</sup>を使用した。解析は弾丸からダミー衛星まで含む。

\*1 © 2015 日本航空宇宙学会

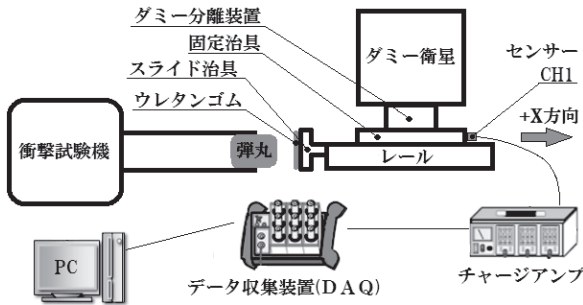
平成 26 年 7 月 4 日、第 46 回流体力学講演会/第 32 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウムにおいて発表。平成 26 年 7 月 9 日原稿受付

\*2 九州工業大学大学院工学府先端機能システム工学専攻

\*3 木更津工業高等専門学校



第 1 図 衝撃試験の評価例



第 2 図 コンフィギュレーション

第 1 表 メッシュサイズ・質量

部品名 (材質)	最大メッシュサイズ (mm)	質量 (kg)
ダミー衛星 (A5083)	15	35.62
ダミー分離装置 (A2017-T4)	12	2.77
固定治具 (A2017-T4)	8	2.88
スライド治具 (A2017-T4)	15	9.91
弾丸 (MC ナイロン)	12	1.0

第 2 表 境界条件

項目	条件
サンプリングレート	100000 point/sec
データ長	30 msec
減衰係数	0.15
レール摩擦係数	静止摩擦 0.5, 動摩擦 0.4
弾丸速度	25 m/sec (実測値)
重力定義	モデル全体に 1G
ボルト拘束	剛体拘束

第 3 表 実験値に対する解析値の倍率 (解析値/実験値)

レール摩擦係数	Frequency [Hz]	CH1(X)
静止摩擦 0.5 動摩擦 0.4	100~150 (ave.)	0.959
	150~200 (ave.)	0.892
	200~250 (ave.)	0.889
	250~300 (ave.)	0.889

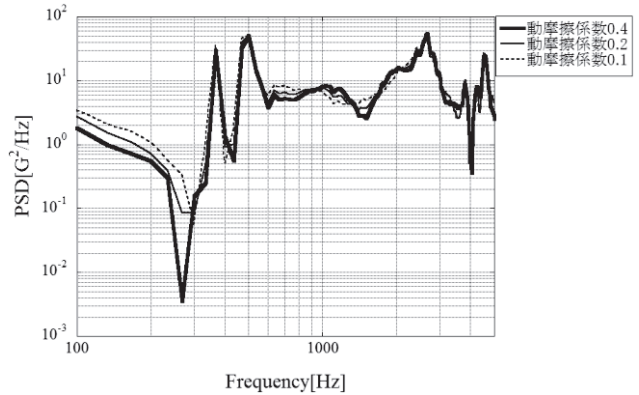
4. 結果および考察

解析値を実験値で割った値を、第 3 表に示す。実験値に関しては、試験機の再現性による誤差や計測誤差も存在する。そのため、完全な一致は考えられないことから、今回の 4.1~11.1%程度の誤差は、よく一致していると判断できる。

CAE 解析に一定の信頼性があることを確認した所で、次にレールの摩擦係数を低下させたセッティングに変更し、CAE 解析を行った。その結果を第 4 表に示す。わかり易く

第 4 表 SRS 値の倍率変化

Frequency [Hz]	静止摩擦 0.5	静止摩擦 0.25	静止摩擦 0.125
	動摩擦 0.4	動摩擦 0.2	動摩擦 0.1
100~150 (ave.)	1.0	1.151	1.474
150~200 (ave.)	1.0	1.095	1.243
200~250 (ave.)	1.0	1.012	1.014
250~300 (ave.)	1.0	1.012	1.014



第 3 図 摩擦係数違いによる PSD 値比較

するため、最初に行った解析値に対しての倍率で示す。摩擦係数を下げた場合、SRS 値の上昇が見られ、特に 100~150 Hz や 150~200 Hz は明確に上昇が確認できた。

上記についてさらに検証するため、振動解析で構造体の振動エネルギーの分布を調べるために、広く用いられている PSD (Power Spectral Density) 解析を行った。約 300 Hz 以下の周波数域において、PSD 値が上昇していることが確認できる (第 3 図)。また、衝撃試験の評価は衛星設置面 (固定治具上) であるが、念のため計測位置のばらつきも考慮し、固定治具上において数点確認し、CH1 と類似した結果を得た。

5. ま と め

衝撃試験の低周波側での SRS 値を調整する手法について、CAE 解析を用いて検討した。解析は、実験結果を最大 11.1%の誤差で再現できる。スライド用レールの摩擦係数を下げて解析を行った結果、低周波側の衝撃レベルが上昇した。また、高周波側では殆ど変化がなかった。摩擦係数の調整が、低周波側の衝撃レベルだけを上げる手法の一つとして有効である。

参 考 文 献

- 1) Hatamura, T., Kimoto, S., Masui, H. and Cho, M.: Development of a Shock Test Method Suitable for Nano-Satellites; Basic Study, Proceedings of 29th International Symposium on Space Technology and Science, 2013.
- 2) Hatamura, T., Kimoto, S., Masui, H. and Cho, M.: Development of a Shock Test Method Suitable for Nano-Satellites; Performance Evaluation, 5th Nano-Satellite Symposium, 2013.
- 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, 2014.
- 4) Maeno, K., Ohno, T. and Honma, H.: A Study of Hypersonic Shock Tunnel with a Diaphragmless Driver Section, Proc. 21st International Symposium on Shock Waves, Vol.2, 1997, pp. 1379-1384.