自己シールド型耐スペースデブリ衝撃構造の開発 (シミュレーションによる解析)

Development of Self-shielding Bumper Against Space Debris (Aided by Simulation Analysis)

○学 波多 英寛 (九工大学) 正 赤星 保浩 (九工大)
学 常富 智紀 (九工大院) 学 河喜多 心哉 (九工大院)

Hidehiro Hata, Yasuhiro Akahoshi, Tomonori Tsunetomi, and Sinya Kawakita

Kyushu Institute of Technology

1-1, Sensui, Tobata, Kitakyushu, Fukuoka 804-8550

Key Words : Space Debris, Self-Shielding Bumper

1. はじめに

宇宙開発が進むにつれて、地球周回軌道にスペースデブリと呼ばれる不要な人工物体が増加してきた。それと共にデブリとの衝突という危険性が増加しつつ、今日の状態までいたった。現在建設中の国際宇宙ステーション(ISS)の日本の実験モジュール(Kibo)には、今までの研究開発により、直径1cm、速度7km/s以下のデブリから防護するバンパが完成されているが、観測が困難な直径1cm~10cmのデブリに対しては与圧壁の貫通が懸念されている^[1]。そこで、本著者らは、発想を転換して、ある程度の貫通は許容するが、急激な減圧を防ぎ、なおかつ圧力低下を一時的なものに食い止める方法として「自己シールド型耐スペースデブリ衝撃構造」を提案している^[2-4]。その方法としては貫通孔を適当な自己シールド材で、ある時間内に自動的に塞ぐ構造とする。実験ではシールド材選定が手探り状態であり、デブリ貫通時のシールド材の挙動が不明確な部分があり、地上実験では重力を補正しにくい、などの問題がある。そこで本研究では数値解析コードの開発について報告する。

2. 自己シールド実験

2.1 自己シールド型耐衝撃構造の概念

スペースデブリとの衝突により貫通孔が発生すると、内外の気圧差により圧力容器内の空気が流出する。これにより発生した気流の流れを利用して、貫通孔付近に存在する自己シールド材が移動して貫通孔を塞ぐ構造である。

2.2 実験装置

実験装置の外観をFig.1に示す。自己シールド材は糸に吊して配置する事により、重力補償を行っている。模擬貫通孔としては、直径1cmのデブリが衝突したときにKibouの与圧壁に開くと予想される2cmを採用した^[4]。この孔をゴムで塞ぎ、容器の内部を素素で0.2MPaまで加圧を行い、ゴムを破くことによりデブリとの衝突を模擬した。

Fig.1 Configuration of test chamber

2.3 実験結果と考察

実験に用いた自己シールド材の種類をTable1に示し、実験結果をFig.2に示す。解析を行う予定であるのは、Case 1、Case 5であり、Case 1では約100msecで0.13MPaまで減圧しており、Case 5では約100msecで自己シールド材が貫通孔を塞いでいることがわかる。

Table1 Self-shielding materials

Case No.	Self-shilding material	Diameter (mm)	Density (g/cm ³)
1	Non-shilding	—	—
2	Sponge-ball	39.50	9.731×10 ⁻³
3	Super-ball	30.06	6.516×10 ⁻¹
4	Super-ball with jell	33.06	9.880×10 ⁻¹
5	Styrol form	28.00	1.508×10 ⁻²
6	Styrol form with jell	31.00	4.14×10 ⁻¹
7	Soft tennis-ball	65.00	1.909×10 ⁻¹

Fig.2 Time history of the pressure in the chamber

3. 解析手法^{[5]-[7]}

本研究では自己シールド材を球として考え、それをFig.3に示すように計算領域中に置き、気流の流出と共に球が噴射口へ移動し、噴射口を塞ぐ構造とする。本解析を行うにあたり、まず自己シールド材を置かない場合(Case1)を考える。基本式としては、圧縮性の連続の式(式1)と、圧縮性のNavier-Stokes式(式2)を用いて速度と密度を求め、圧力を求めるのには、計算時間の短縮のため、擬似圧縮性法の擬似状態方程式(式3)を用いる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0 \quad \dots (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \mathbf{u} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} = -\nabla \cdot \boldsymbol{\tau} - \nabla p \quad \dots (2)$$

$$p = \delta p \quad \dots (3)$$

Fig.3 Model of simulation region

ここで ρ , $\underline{u}$, $\underline{\tau}$, p , δ は無次元式で、それぞれ気流の密度、気流の速度、粘性応力テンソル、圧力、擬似圧縮性係数を表す。 $\underline{\tau}$ は Newton の粘性法則を用いてひずみ速度で表せる。

次に自己シールド材を置く場合を考える。自己シールド材を球と考え、また、実際には自己シールド材を一つだけでなく複数個置くことが考えられるので、球同士の接触を考慮して多体接触による相互作用には離散要素法 (DEM) を用いる。気流と球との力学的な相互作用には両者の相対速度による抗力 (式 4) を考え、気流の Navier-Stokes 式 (式 5) と球の Lagrangian 型運動方程式 (式 6) を用いる。

$$S_p = \frac{3\pi\mu D_p(1+0.15Re_p^{0.687})D_n}{U_0\rho}(\underline{u}-\underline{u}_p)\xi(\epsilon) \quad \dots (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \underline{u} + \nabla \cdot \rho \underline{u} \underline{u} = -\nabla \cdot \underline{\tau} - \nabla p + S_p \quad \dots (5)$$

$$m_{pi} \frac{d(\underline{u}_{pi})_t}{dt} = \sum_j [(F_{nij})_t + (F_{sij})_t + (D_{nij})_t + (D_{sij})_t] + (F_{Di})_t \quad \dots (6)$$

式 (4) 中の S_p , μ , D_p , Re_p , $\underline{u}_p$, ξ (はそれぞれ、気流と粒子の相対運動によって生じる抗力による運動量授受を表す相互干渉項、粘度、粒子周りのレイノルズ数、粒子の速度ベクトル、気流の占める割合による抗力の増大を表す補正関数である。また、式 (6) 中の F_{nij} , F_{sij} は、接触点における法線方向および接線方向の接触力であり、時間ステップ当たりの相対増分を Δn , Δs とすると、接触点増分は式 (7) となる。ただし、接触点における法線方向バネ定数は Hertz の接触理論を用いて求める。

$$\Delta F_n = k_n \Delta n, \Delta F_s = k_s \Delta s$$

$$k_n = \left(\frac{E}{1-\nu_p^2} \right) \left(\frac{D_p}{4} \right)^{1/2} \delta^{1/2}, k_n = 0.2 k_s \quad \dots (7)$$

式 (7) 中の E , ν_p , δ はそれぞれ粒子の縦弾性係数、法線方向接触量及びポアソン比である。

また、式 (6) 中の D_{nij} , D_{sij} は、接触点における粒子同士の法線方向と接線方向の減衰力であり、接線方向の変形速度増分に比例する減衰力増分は、法線方向と接線方向の減衰係数である η_n , η_s は、DEM の基礎式である振動方程式が安定な解を持つ臨界減衰条件を用いると、式 (8) より求められる。

$$\Delta D_n = -\eta_n \Delta n, \Delta D_s = -\eta_s \Delta s$$

$$\eta_n = 2 \sqrt{m_{pi} k_n}, \eta_s = 2 \sqrt{m_{pi} k_s} \quad \dots (8)$$

式 (7), (8) より、時刻 t における粒子同士の接触点の法線方向及び接線方向の付着力 (C_F) を考慮した接触力と減衰力は式 (9) のようになる。

$$(F_n)_t = (F_n)_{t-1} + \Delta F_n - \left(\frac{|\Delta n| - \Delta n}{2|\Delta n|} \right) C_F \quad (D_n)_t = (D_n)_{t-1} + \Delta D_n$$

$$(F_s)_t = (F_s)_{t-1} + \Delta F_s - \text{sign}[(F_s)_t] C_F \quad (D_s)_t = (D_s)_{t-1} + \Delta D_s$$

$$\dots (9)$$

式 (9) 中の $\text{sign}[(f_s)_t]$ は正負を表す記号である。

本計算では、空間微分項などは 2 次の中央差分差分を用い、時間発展項の計算には前進差分を用いている。

4. 解析条件

材料パラメータとしては、Case 5 における発泡スチロール (直径 28.00mm, 密度 $1.508 \times 10^{-2} \text{g/cm}^3$) を用いる。境界条件は高圧側の領域では孔以外総て固体壁境界条件とする。低圧側は高圧側の壁以外は流出境界条件とする。高圧側は圧力を 0.1MPa、気流の密度を 1.205kg/m^3 とし、低圧側は 0.001MPa、気流の密度を $1.205 \times 10^{-2} \text{kg/m}^3$ とする。計算領域は、実験に用いた圧力容器の 1 辺の長さが 0.246 m なので、これを用いて、高圧側、低圧側、両方とも 1 辺を 0.246 m の立方体としている。

5. おわりに

今後、本解析コードを用い、圧力場、流れ場の解析を行い、自己シールド材の動きを求める。なおかつ、自己シールド材と貫通孔との密着性の検討、自己シールド材の変形のモデル化を行い、最終的には直径、密度、弾性係数、付着力、個数などのパラメータを変化させ、最適な自己シールド材の探索を行う事が課題である。

謝辞

なお、本研究は九州工業大学サテライトベンチャービジネスラボラトリーで行われたものであることを記し、感謝の意を表す。また、同大学混相流研究室の湯 晋一教授、梅影俊彦助教授には「粉体の流動化現象の数値解析」の解析を含め適切な助言を賜り、この場を借りて深く御礼を申し上げます。

参考文献

- [1] Kuniaki SHIRAKI and Narihiro NODA, Space Debris Protection Design Requirements and Optimum Shield Design for International Space Station JEM, Proceeding of 7th International Space Conference of Pasific-Basin Societies, (1997), pp.1007-1019.
- [2] 河喜多心哉, 自己シールド型耐スペースデブリ衝撃構造の開発, 平成 11 年度九州工業大学卒業論文集
- [3] 赤星保浩, 自己シールド型耐衝撃構造の開発, 平成 11 年度地上公募研究成果報告書フェーズ. 研究 (B) 萌芽的研究
- [4] Yasuhiro Akahoshi and Keisuke Yonehara, Introduction of Two-stage Light Gas Gun in SVBL and its Performance Test, (1997) pp.995-1006.
- [5] 保原充 大宮司久明 編, 数値流体力学 基礎と応用, 東京大学出版会, (1992)
- [6] 粉体工学会 編, 粉体シミュレーション入門, 産業図書, (1998)
- [7] 篠原亮一, 離散要素法を用いた粉体の流動化現象の数値解析, 平成 11 年度九州工業大学卒業論文集