平成２５年度スペースプラズマシンポジウム

「はやぶさ2」SCI の地上較正実験

門野敏彦[1]，荒川政彦[2]，辻堂さやか[2]，保井みなみ[3]，長谷川直[4]，黒澤耕介[5]，白井慶[4]，早川雅彦[4]，岡本千里[4]，　佐伯孝尚[4]，今村裕志[4]，矢野創[4]，中澤暁[4]，小川和律[4]，飯島祐一[4]，平田成[6]，高木靖彦[7]，和田浩二[5]

[1]産業医科大学, [2]神戸大学大学院理学研究科, [3]神戸大学自然科学系先端融合研究環重点研究部, [4]宇宙航空研究開発機構, [5]千葉工業大学惑星探査研究センター, [6]会津大学コンピュータ理工学部, [7]愛知東邦大学

１．はじめに

はやぶさ2探査機に搭載予定のSCI(Small Carryon Impactor)は直径15cm，質量2kg，中空の銅球である．これを小惑星表面に秒速2kmで衝突させて形成されるクレーターや放出物の分布を調べる予定である．クレーターなどから天体表面がどのような状態(組成・構造)であるかを推定するためには，予め状態がわかっている標的にSCIと同様の飛翔体を衝突させて，どのようなクレーターが形成されるのかを知っておく必要がある．しかしながら，SCIのような中空の飛翔体を使った衝突実験は過去にあまり行われておらずデータが少ない．そこで，本集録では，宇宙研の二段式水素銃を使って中空飛翔体を加速し石膏・玄武岩に衝突させてクレーターを調べ、その結果を基にして次の３点について報告する．

(a)　SCI飛翔体の衝突する向きによるクレーターサイズの違い

(b)　球や円柱を用いた結果との比較

(c)　数値計算との比較

２．実験

中空であるSCIを模擬するために，我々は銅製の中空の円柱（底付）を用意した（図１）．

図１：実験に使った銅製中空円柱飛翔体（右は断面）．
直径は3.2 mm，長さは5.0 mm，肉厚は0.2 mm.

飛翔体の向きを変えて衝突させて，できたクレーターを調べた．比較のため，円柱（中身が詰まっているもの），円管（中空で底がないもの），球，を用いた実験も行った．飛翔体の材質は銅，アルミニウム，ナイロンである．衝突速度は２および４km/s，標的は石膏と玄武岩を使った．

３．結果

３−１．クレーター形状

クレーター形状を測定し（図２a），垂直な２方向のプロファイル（図２bは一例）から，表面の直径Ds，スポールしていない部分の直径Di，標的表面からの深さdを求めて平均した．

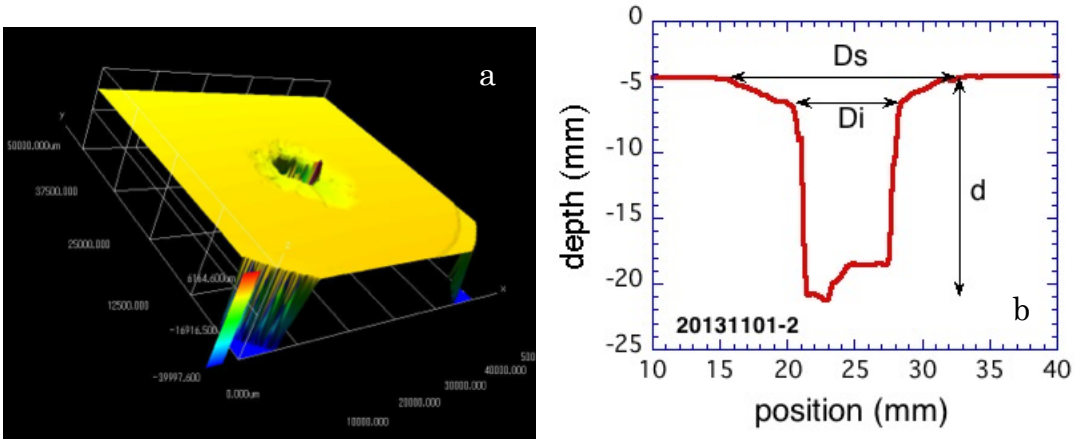

図２．a. クレーター形状．b. プロファイル．

３−２．飛翔体の向きによる違い

石膏に対して1.8 km/sおよび3.9 km/s，玄武岩に対して1.9 km/sで飛翔体の向きを変えて衝突させた結果を表１に示す．比較のため，ほぼ同じバルク密度であるアルミ球の場合も示してある．

表１	標的	速度	飛翔体形状	Ds	Di	d
1030-1	石膏	1.89	] →	10.8	6.81	15.7
1030-2	石膏	1.82	[→	7.15	5.83	10.6
1031-4	石膏	1.87	Al 球	13.1	8.26	13.9
1101-2	石膏	1.84	] →	19	7.58	17.4
1030-3	石膏	3.86	] →	41.1	13.8	24.5
1031-1	石膏	3.88	[→	35.7	12.4	25.8
1031-6	石膏	4.19	Al 球	36.7	13.6	12.9
1031-2	玄武岩	1.91	] →	29.4		5.51
1031-3	玄武岩	1.9	[→	24.7		5.84
1031-5	玄武岩	1.92	Al 球	19.9		3.38

同じ衝突条件でも結果にはばらつきがある．石膏も玄武岩も飛翔体の向きの違い( ] →と [→）による結果の違いはばらつきの範囲内に見える．

３−３．球と円柱を使った従来の結果との比較

Ds，Di，dを飛翔体の直径で規格化し，標的の強度を単位体積あたりの飛翔体運動エネルギーで規格化した無次元パラメータπ_3でプロットする．中空底付飛翔体だけでなく，円管，球飛翔体についても同時にプロットしてある．Ds（図３上）はおおきくばらついている．それに対してDi（図３中）は石膏と玄武岩でオフセットがあるが，同じ物質の結果は直線に並んでいるように見える．また，d（図３下）は物質によらず直線上に乗っているようだ．Diとdの図には比較のため堆積岩の結果（+）もプロットした（1）．Diでは，堆積岩の結果は玄武岩と石膏のちょうど中間にまたがるように分布している．標的の強度だけでなく，空隙率のようなパラメータも重要なのかもしれない．dでは，ほぼ今回の結果に近いところに堆積岩の結果もあるが，傾きは多少，今回の方が急であった．

３−４．数値計算(iSALE)との比較

Wünnneman, Collins, Ivanovらは，流体コード（SALE）を衝突(impact)用に改良して公開している（2）．今回のこのコードを使って底付中空円柱飛翔体の衝突を数値的に計算してクレーターサイズを求め，実験と比較した．

中空円柱飛翔体が底から石膏に1.8 km/sおよび玄武岩に1.9 km/sで衝突した場合の結果を比較する（表２）．どちらの場合もばらつきの範囲内で合っているように見える．iSALEは従来の室内実験で用いられることが少ないSCIのような中空の飛翔体にも適用が可能であるようだ．

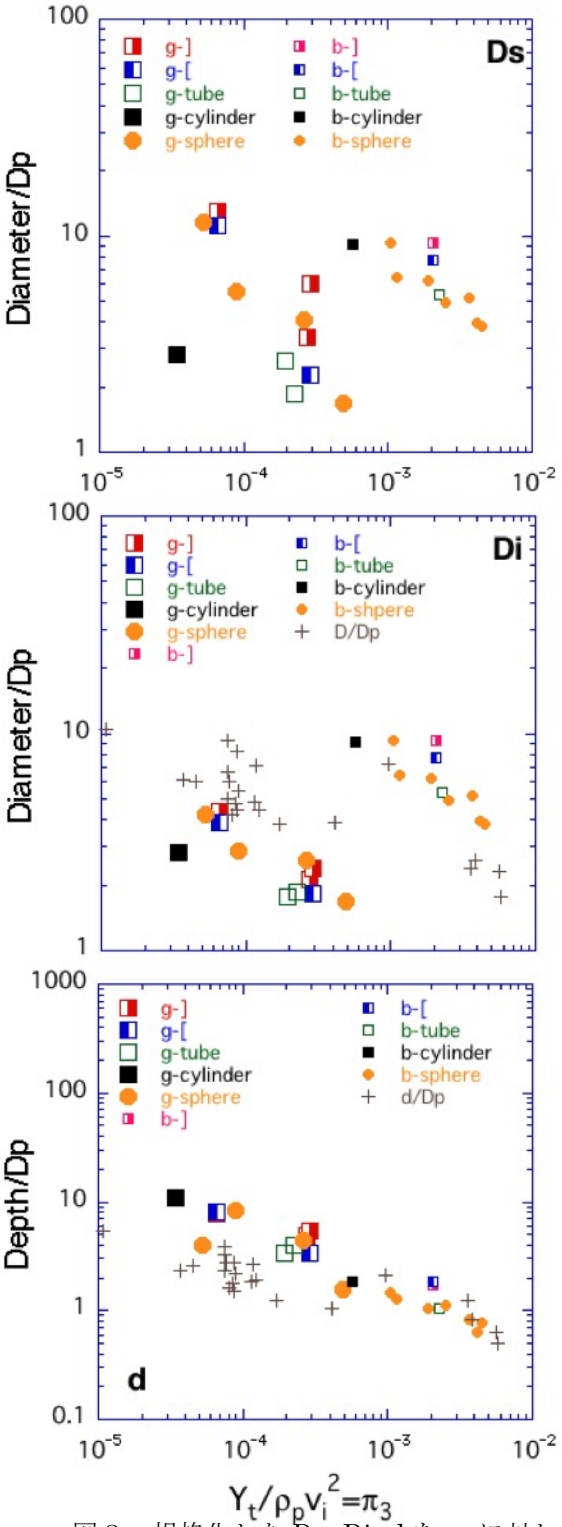

図３．規格化したDs, Di, dをπ_3に対してプロット

表２	石膏			玄武岩	
	Ds	Di	d	Di	d
iSALE	16.1	10.1	19.2	28	5.54
EXP.	19	7.58	17.4	29.4	5.51

４．まとめ

底付中空円柱を用いて「はやぶさ２：SCI」を模擬する衝突実験を行った．(i) 飛翔体の向きによってクレーター形状に違いが出るかどうかを調べた．ばらつきの範囲内では違いは見られない．(ii) 標的強度と単位体積あたりの飛翔体運動エネルギーによる無次元パラメータによってクレーターサイズをプロットすると，直径は石膏と玄武岩でオフセットがあるが，深さは共に同じ直線上に乗る．(iii) iSALEを使って今回の実験と同じ条件でのクレーターを数値計算によって求め，実験結果と比較すると，iSALEは中空飛翔体の衝突実験結果をよく再現できることがわかった．

今後は砂のターゲットなどに対して実験を行い，中空飛翔体による衝突クレーターのデータを増やしていく予定である．また，iSALEが中空飛翔体の衝突に対しても使えるめどが立ったので，実際に「はやぶさ２：SCI」によって天体表面に形成されたクレーターから表面物性などを考察する際には，従来の実験結果に加えて中空飛翔体の実験結果，さらにiSALEを使った数値計算を組み合わせて考察することによって，より多くの情報を引き出すことが可能となるであろう．

参考文献

1. A. Suzuki et al., Laboratory Experiments on Crater Scaling-Law for Sedimentary Rocks in the Strength Regime. *J. Geophys. Res.*, vol. **117**, E08012, doi: 10.1029/2012JE004064 (2012).

2. http://www.isale-code.de