

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13919

研究課題名（和文）実在気体効果が衝撃波サーフィン現象に与える影響

研究課題名（英文）Effect of real gas on shock wave surfing phenomena

研究代表者

嶋村 耕平（Shimamura, Kohei）

筑波大学・システム情報系・助教

研究者番号：90736183

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では空気力学・熱力学の観点から再突入物体の崩壊プロセス解明を目指した学術的研究を行った。具体的にはシミュレーションによる空力係数、加熱等の予測と並行して、衝撃風洞や膨張波管といった超高速大気圏突入実験が可能な風洞実験を進めるための計測を行った。超軌道速度での気流生成が可能な膨張波管を使用した、熱流束計測手法を確立し、また同時に風洞の気流状態をプローブや非接触で計測できる手法を開発した。またモンテカルロ直接法を用いたシミュレーションにより空力係数について予測を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今後運用の終了した宇宙構造物など大型デブリの大気圏再突入と地上へのリスクは増々高まり予測技術の高精度化は不可欠であると考えられる。衝撃波が干渉することで発生する加熱は通常の20倍程度の異常加熱が発生することが知られているが、サンプルリターンや小惑星などの軌道速度以上での大気圏突入については熱流束と合わせて未知の領域である。本研究は今後の超軌道速度でのデストラクティブリエントリーモデル化、落下予測に貢献可能である。

研究成果の概要（英文）：The study on the effect of hypersonic interaction between bodies was conducted for the high accuracy prediction, which finally aimed to predict debris dispersion of destructive reentry of space vehicles. The present paper described evaluation the lift and drag coefficients in the hypersonic condition, where the altitude and the velocity are 80 km and 7.5 km/s, respectively. The direct simulation of Monte Carlo method was used assuming two dimensional the ideal Air gas with two circular column. As a result, CD and CL decreased with increasing the distance between the body. The translational temperature distribution was up to  $2.7 \times 10^4$  K behind the shock wave. When the distance between two body is equal to the diameter, the CD and CL for outside were significantly decreased.

研究分野：空気力学

キーワード：極超音速流れ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年人工衛星等宇宙構造物を制御落下させる場合において安全上どのような対策や配慮が必要となるかについて議論がなされている。また諸外国におけるこれらの基準に差異があり、欧州ではこの分野でのリスク評価基準レベルが高く将来的な国際基準制定に向けて日本独自の研究開発が始まったばかりである。宇宙デブリの落下予測において物体干渉流れの知見は必要不可欠である。具体的には、軌道上での運用を終了後大気圏への自然落下に任せて廃棄するロケットや人工衛星等に対しては、大気圏通過後の残存物による落下危険度を評価することが必要である。(文献 ~ )

これまで日本ではオブジェクト指向型と呼ばれるデブリ落下予測システム(ORSAT-J)によるリスク評価が行われてきた。突入高度や速度を仮定し、物体は球や四角柱などの単純化されて個々の物体が地上に分散する具合を評価している。現状では、構造体の破壊過程や物体間の流れ場干渉による空力特性および熱化学特性は極めて簡単なモデルであり、このためリスク評価は冗長に安全側にある。世界標準でのリスク評価を行うためには、より複雑な形状での空力・熱的な特性に関する知見が必要となる。(文献 ~ )

正確なデブリリスク評価のためには極超音速流中の物体の崩壊現象を解明する必要がある。この崩壊現象は空力加熱による溶融現象と物体間の衝撃波干渉による空力特性が影響する機械的な現象に起因する(メデューサの頭モデル)。また超音速気流中の物体干渉流れは「衝撃波サーフィン」と呼ばれ、<sup>2</sup>物体の大きさや位置がそれぞれの空力性能に影響を与えることが知られている。一方で、再突入構造物の崩壊で検討すべき高度(70~80 km)や突入速度(<7.5km/s)においては極超音速気流中では実在気体効果により、物体の衝撃波形状が変化し空力特性をこれまでの理論(非粘性理想気体)で説明することが難しいと考えられる。また親物体と子物体の衝撃波が干渉することで発生する加熱は通常の20倍程度の異常加熱が発生することが知られているが、サンプルリターンや小惑星などの軌道速度以上でのサブオービタルからの大気圏突入については熱流束と合わせて未知の領域である

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、実在気体効果が空力特性および熱特性に与える影響を定量的に評価し、再突入における物体干渉気流中の物体崩壊メカニズムを明らかにすることである。これまでに理学分野での火球・流星の観測・理論、工学分野での宇宙機での実機計測(Fire II, X-plane 等)など様々な角度からこの物理現象へのアプローチがなされているが、気体力学的観点からの現象解明に向けた観測や理論構築が取り組まれた例はなく、デブリ予測モデルは依然として空力・熱的にもシンプルな構造を組み合わせたものが主流である。したがって本研究ではこのような問題意識のもと、「実在気体効果が物体干渉における空力特性に与える影響」や「サブオービタル突入環境における干渉物体の表面熱流束」を数値計算及び実験的なアプローチを行う。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 空力加熱の実験計測

本研究では、サブオービタル再突入気流生成には JAXA 所有の膨張波管を使用し、クロメル-コンスタンタン(E型)同軸型熱電対を埋め込んだ直径18mmの球表面の熱流束を測定した。試験時間が数十マイクロ秒と極めて短いため1MHzの高応答性を持つアンプを開発した。本実験では、気流速度は7.2 km/sとしている。

#### 3.2 空力特性の数値解析

飛行高度、軌道により空気の密度の少ない高度100 km前後の崩壊が始まるとみられる領域での粒子法(直接モンテカルロ法[文献 ])を用いて2つの物体間の抗力係数と揚力係数を求めた。計算条件は表1のようになっており計算領域は0.5m×1.0mで直径12 cmの2つの円柱にかかる力を求めている。

表1. 直接モンテカルロ法における計算条件

Velocity	7.5 km/s
Altitude	80 km
Gas	Air (N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> )
Temperature	200 K
Number density	$3.8 * 10^{20} \text{ m}^{-3}$

### 4. 研究成果

まず実験結果について、衝撃波速度7.8 km/s、気流速度7.2 km/s、温度5900 K、密度0.02 kg/m<sup>3</sup>の気流に対して熱流束は90 MW/m<sup>2</sup>が得られた。同条件に対して Tauber-Sutton の理論熱流束から107 MW/m<sup>2</sup>と大よその一致を得ることができた。また数値解析については、2物体の間隔を無次元比(2物体の中心距離/円直径)  $d = 0.3$  から1.5まで4条件について計算を行った。

図1はその温度分布を示しており、激み点近傍でおよそ25000Kであった。物体の距離が近い条件( $d = 1.0$ )では高温領域が2物体間に広がる。一方で $d=1.5$ の条件では相互の影響は見られなかった。図2に揚力係数  $C_L$  と抗力係数  $C_D$  を2つの物体についてそれぞれ示す。物体1と2をそれぞれ図1の下と上の円に対応する。抗力係数揚力係数ともに  $d = 1.0$  を超えると減少する傾向があることが明らかになった。本研究では崩壊する流れ場に対して実験的または数値解析的なアプローチを進めてきた。今後はより詳細なモデルを実験と数値解析の両方から進めることにより、実在気体の効果が物体に与える影響を引き続き明らかにする。

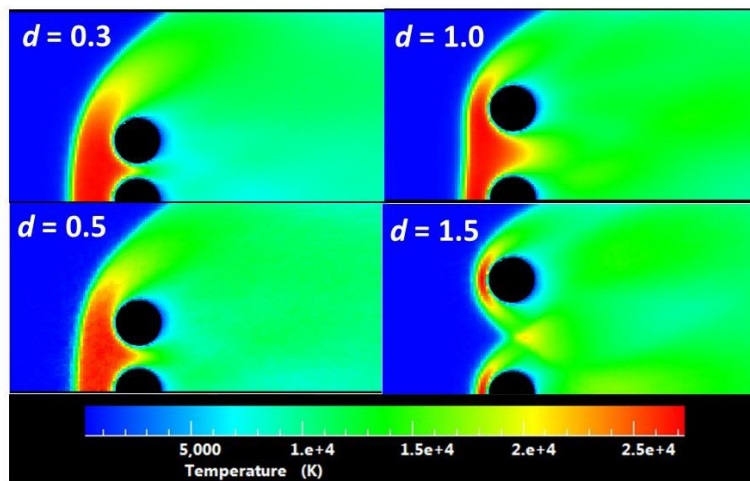


図1 無次元距離  $d$  に対する2物体周りの並進温度分布

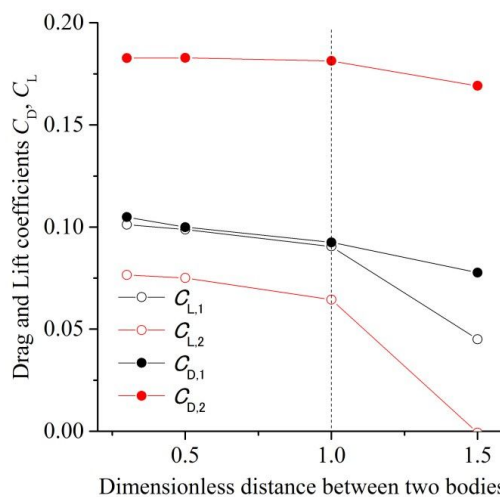


図2 無次元距離  $d$  に対する2物体の揚力係数と抗力係数

< 引用文献 >

Connor B. O., "Handbook for limiting orbit debris", NASA-HANDBOOK 8719.14 (2008).  
 Klinkrad, H., "Space Debris Models and Risk Analysis", Springer (2006).  
 Lips, T., and Fritsche B., "A comparison of commonly used re-entry analysis tools," Acta Astronautica, Vol. 57, 2005, pp.312-323.  
 Stulov V. P., "Determining the Parameters of Fragmenting Meteoroids from Their Braking in the Atmosphere", Solar System Research, Vol. 34, 2000, pp.496-500  
 Passey, Q. R. and Melosh, H. J. "Effects of atmospheric breakup on crater field formation." Icarus 42, 1980, pp.211-233  
 Laurence S. J. and Deiterding R., "Shock-wave surfing", J. Fluid Mech. Vol. 676, 2011, pp.396-431.  
 Birds G. A., "The DSMC method" CreateSpace Independent Publishing Platform, (2013)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shimamura Kohei, Okamoto Atsushi, Fujiwara Yusuke, Higo Yusuke, Yamada Kazuhiko, Komuro Tomoyuki, Tanno Hideyuki	4. 巻 1
2. 論文標題 High-speed visualization for test-time evaluation of a JAXA HEK-X free-piston driven expansion tube	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIAA paper	6. 最初と最後の頁 1556
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/6.2019-1556	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shimamura Kohei, Okamoto Atsushi, Fujiwara Yusuke, Higo Yusuke, Yamada Kazuhiko	4. 巻 TBD
2. 論文標題 Evaluation of test time and flow conditions for 35 mm square bore free-piston driven expansion tube	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan	6. 最初と最後の頁 TBD
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 K. Shimamura, A. Okamoto, R. Fujiwara, R. Watanabe, M. Matsui, K. Yamada, H. Tanno, T. Komuro, K. Sato, K. Itoh
2. 発表標題 Test Time Evaluation of Free-Piston Driven Expansion Tube HEK-X
3. 学会等名 International Workshop of Shock Tube Technology（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shimamura Kohei, Okamoto Atsushi, Fujiwara Yusuke, Higo Yusuke, Yamada Kazuhiko, Komuro Tomoyuki, Tanno Hideyuki
2. 発表標題 High-speed visualization for test-time evaluation of a JAXA HEK-X free-piston driven expansion tube
3. 学会等名 AIAA SCITECH FORUM 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Shimamura, K. Yamada, H. Tanno
2. 発表標題 Design And Characteristics of The Suborbital Expansion Tube HEK-X For Afterbody Heating Of Sample Return Capsule
3. 学会等名 15th Annual International Planetary Probe Workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤原侑亮, 岡本 誉史, 嶋村耕平, 山田 和彦, 丹野 英幸, 手塚 亜聖
2. 発表標題 HEK-X膨張波管における高速応答熱電対を用いた淀み点熱流束計測
3. 学会等名 第50回流体力学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡本誉史, 藤原侑亮, 嶋村耕平, 山田 和彦, 丹野 英幸, 松井 信
2. 発表標題 可視化技術を用いた膨張波管HEK - Xの試験時間推定
3. 学会等名 第50回流体力学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 可視化による斜め衝撃波及び離脱衝撃波を用いた 膨張波管の有効試験時間評価
2. 発表標題 岡本誉史, 藤原侑亮, 嶋村耕平, 山田 和彦, 丹野 英幸, 松井 信
3. 学会等名 第49期日本航空宇宙学会年会講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	山田 和彦  (Yamada Kazuhiko)  (20415904)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙飛行工学研究系・准教授   (82645)	