

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820414

研究課題名(和文) 極超音速希薄風洞を用いた希薄空力計測システムの構築と粒子計算表面モデルの開発

研究課題名(英文) Development of an Aerodynamic Measurement System and Gas-Surface Interaction Modeling in a Hypersonic Rarefied Wind Tunnel

研究代表者

小澤 宇志(Ozawa, Takashi)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・研究開発本部・研究員

研究者番号：70567544

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)：高度70km以上における地球再突入流れ，火星大気突入流れ，超低高度衛星周りの流れ等は極超音速希薄流となっており，希薄空力特性を把握することが重要である．JAXAの100mm極超音速希薄風洞(HRWT; Hypersonic Rarefied Wind Tunnel)ではマッハ数10を超えるような極超音速希薄流の生成が可能であり，本研究ではまず，ピトー圧希薄補正計測法を構築し，極超音速希薄気流検定精度の向上に成功した．さらに，吊り下げ式模型を用いた変位計測と粒子数値解析の融合による物質表面係数計測手法の開発および希薄空力直接計測手法の開発により極超音速希薄空力予測の信頼性が向上した．

研究成果の概要(英文)：It is crucial to improve understanding of aerodynamic characteristics in hypersonic rarefied gas flows for a variety of aerospace situations, such as earth reentries, Mars atmospheric entries, or the Super Low Altitude Test Satellite. The 100-mm Hypersonic Rarefied Wind Tunnel (HRWT) at Japan Aerospace Exploration Agency is capable of generating rarefied hypersonic flows with a Mach number greater than 10. In order to improve the understanding of HRWT nozzle flow characteristics, first we have developed a rarefaction model for pitot tube measurements. Second, we have developed an integration scheme between HRWT measurements using pendulous models and particle simulations for the determination of surface accommodation coefficients and aerodynamic coefficients, which results in the improvement of the reliability and accuracy of aerodynamic prediction for hypersonic rarefied flows.

研究分野：工学

キーワード：航空宇宙工学 希薄風洞 数値解析 希薄気体力学 DSMC 極超音速流

1. 研究開始当初の背景

(1) 極超音速希薄気体における空力特性解明の需要が近年増加している。

① 火星等の惑星探査では、地球よりも大気が薄いため、エアロシェルが大気突入して軌道制御を行う際には、希薄な大気による影響を正確に評価しなければならないが、現状では表面係数が不確定であるために高速希薄領域での空力係数の精度は±15%程度である。しかし、着陸地点の精度が必要なミッションでは、抵抗係数で±10%、モーメント係数で±5%の精度で把握する必要がある。

② サンプルリターン等の再突入においても、希薄流領域における不安定性の解明が重要であり、エアロシェルの希薄空力特性を正確に把握しなければならない。

③ JAXA の超低高度衛星技術試験機(Super Low Altitude Test Satellite; SLATS)等、高度 160~200 km を周回するような超低高度衛星が近年提案されている。この高度において適切な誘導制御を行うためには高速希薄気体中の衛星の空力特性を正確に評価する必要がある。

(2) JAXA においてマッハ数(M)10 以上、クヌーセン数(Kn)0.1 以上の流れを作り出す 100mm 極超音速希薄風洞(HRWT)を構築中である。

(3) 世界的に見ても実験と数値計算の双方による希薄空力評価システムが存在しないため、双方のアプローチによる空力特性評価システムの確立が必要不可欠である。

2. 研究の目的

極超音速希薄風洞実験と粒子数値解析を行うことにより、極超音速希薄気体空力現象の観測手法の確立とともに、物質表面係数測定法の確立を目的とする。極超音速希薄流領域におけるピトー圧希薄補正計測法を構築し、極超音速希薄流れの気流検定精度を向上させることにより、模型を用いた希薄空力計測と粒子数値解析の融合による物質表面係数の特定を目指す。さらに、得られたデータを用いて粒子数値計算におけるより正確で新しい表面モデルを構築することで、数値計算希薄空力予測の精度を向上させ、超低高度衛星の誘導制御システムや惑星大気突入エアロシェル等の軌道制御システムの信頼性の向上を目指す。

3. 研究の方法

(1) 極超音速希薄流計測用ピトー管を開発し、気流検定システムを構築する。また、ピトー圧希薄補正モデルを確立し、希薄風洞の性能を高精度に評価する。

(2) 吊り下げ式模型を用いた希薄風洞変位計測と数値計算の融合による解析を行い、表面熱適応係数計測手法を構築する。

(3) エアロシェル型模型の希薄空力特性直接計測手法を構築し、希薄空力特性評価技術の高精度化を図る。

(4) 様々な物質の表面特性を計測し、物質表面係数依存性を評価する。

4. 研究成果

(1) 3 種類の極超音速希薄流計測用ピトー管を製作し、ピトー圧の希薄効果を評価するとともに、DSMC (direct simulation Monte Carlo) 粒子数値解析により、ピトー圧希薄補正モデルを構築した。

① 45 度コンカルノズルを用いた極超音速ノズル流れの特性を 3 種類の極超音速希薄流計測用ピトー管を用いて評価した(図 1 参照)。

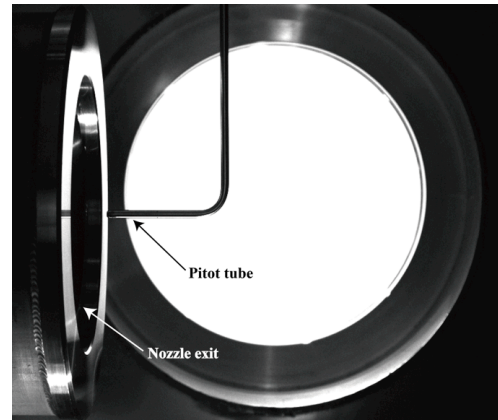


図 1: HRWT ピトー圧計測写真。

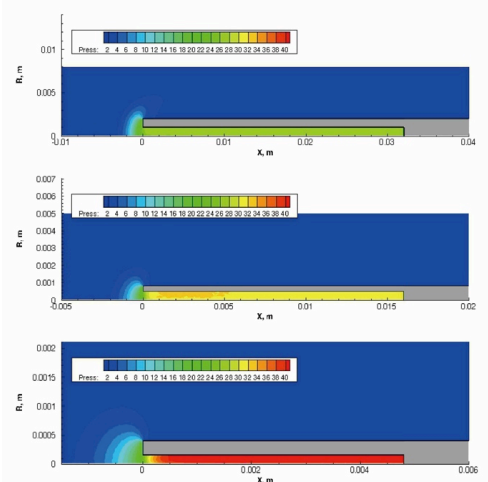


図 2: ピトー管周りの圧力等高線図の比較: 外径 4.0 mm(上), 1.6 mm(中), 0.8 mm(下)。

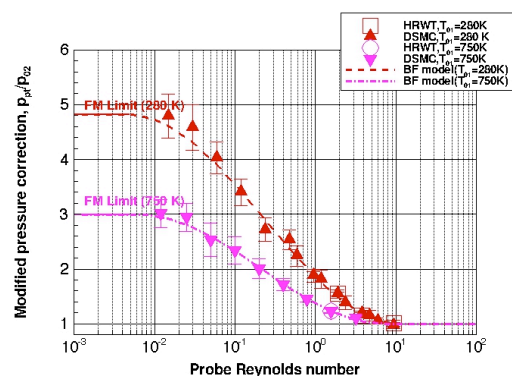


図 3: ピトー圧希薄効果のレイノルズ数依存性の比較。

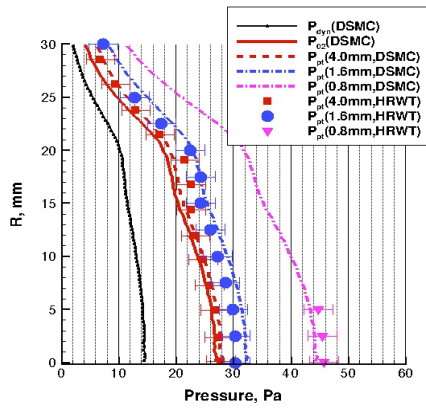


図 4: ノズル半径方向ピトー圧分布の計測結果と BF モデルによる解析結果の比較。

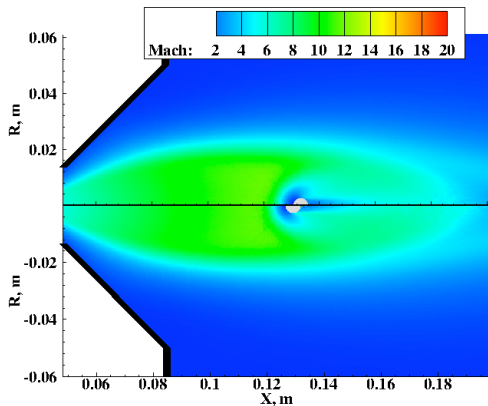


図 5: アルミニウム球模型の変位比較: 拡散反射(上), 鏡面反射(下)。

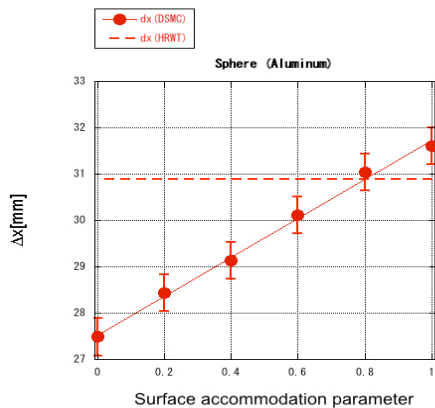


図 6: アルミニウム球模型の変位と表面係数 (α) の相関性及び計測結果の比較: $\alpha(\text{Al})=0.80 \pm 0.06$ 。

② ピトー管周りの流れを DSMC (direct simulation Monte Carlo)法で解析し(図 2 参照), 希薄効果を評価することによって, ブリッジング関数(Bridging Formula: BF)を用いたピトー圧希薄補正モデルを確立した(図 3 参照)。

③ CFD(Computational Fluid Dynamics) / DSMC 連成数値解析手法を用いて HRWT 試験部のピトー圧分布を評価(図 4 参照)することにより, 気流特性の評価精度が向上した。

(2) 吊り下げ式模型を用いた希薄風洞変位計測と数値計算の融合による解析を行い, 表面

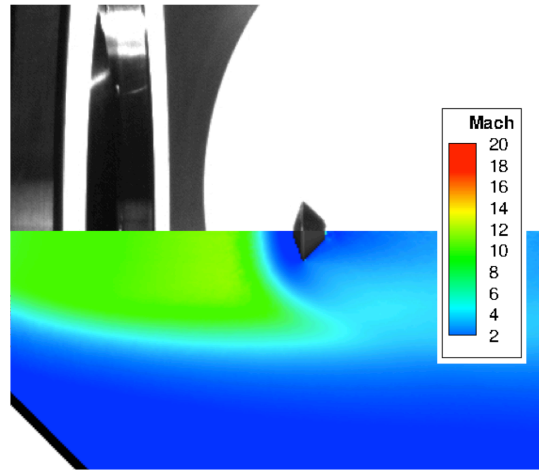


図 7: エアロシェル模型の変位比較: HRWT 画像(上), DSMC 計算(下)。

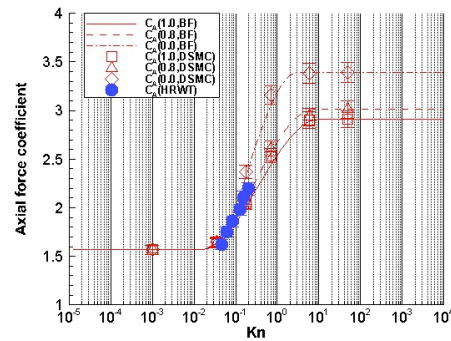


図 8: 迎角 0 度のエアロシェルにおける軸力係数のクヌーゼン数依存性: ブリッジング関数(拡散反射, $\alpha=0.8$, 鏡面反射), DSMC(拡散反射, $\alpha=0.8$, 鏡面反射), HRWT の比較。

熱適応係数計測手法を構築した。

① DSMC 極超音速流れ場と HRWT 計測用球模型を融合した数値解析手法を確立した(図 5 参照)。

② 球模型を高精度自動ステージから細糸(直径 $20 \mu\text{m}$ 以下, 長さ 220mm)でノズル出口から設定された位置に吊るして, CCD カメラを用いた画像処理技術により模型の変位計測を行った。

③ 球模型の変位と表面熱適応係数の相関性を評価することにより表面熱適応係数を決定する手法を確立した(図 6 参照)。

(3) エアロシェル型模型の希薄空力特性直接計測手法を構築し, 希薄空力特性評価技術の高精度化を実現した。

① 2 本吊り下げ式エアロシェル型模型を用いた 2 方向 CCD カメラ画像処理による微小空力 3 自由度計測システムを構築した。

② DSMC 極超音速流れ場にエアロシェル模型を融合した 3 自由度変位解析手法を構築し, エアロシェルの希薄空力直接計測手法を確立した(図 7 参照)。

③ 表面熱適応係数の決定と希薄空力直接計測を組み合わせることにより, 希薄空力特性の予測精度が向上した(図 8 参照)。

(4) 様々な物質の表面特性を計測し, 物質表

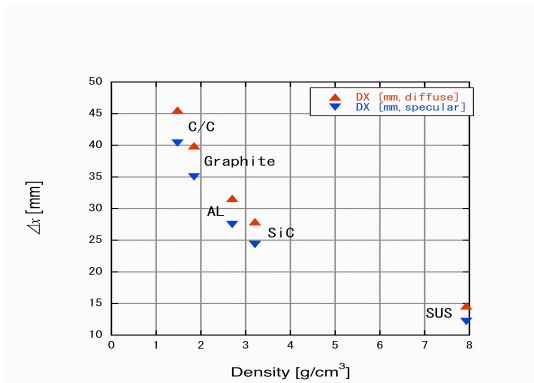


図 9: 希薄風洞における拡散反射モデルと鏡面反射モデルの場合の変位差と模型密度の相関性。

面係数依存性を評価した。

① 金属やカーボン系素材の球模型の変位と表面熱適応係数の相関性を評価し、表面熱適応係数決定精度を検証した(図 9 参照)。

② 金属製(ステンレス鋼, アルミニウム)及びカーボン系素材(グラファイト, SiC, C/C コンポジット)の合計 5 種類の吊り下げ式球模型を製作し、それぞれ変位計測を行うことによって物質表面係数依存性を評価した。

(5) 今後の発展として、まず、表面熱適応係数の速度比依存性・ガス化学種依存性を評価し、表面係数のデータベースを構築する。次に、自由度を増やした模型変位計測システムの構築及びレーザー変位計等を組み合わせた計測システムによる計測精度の向上を実現することにより、3 種類の物質表面係数(熱適応係数, 運動量適応係数, 付着係数)それぞれの決定手法の構築を目指す。最終的に、希薄風洞計測と数値計算の融合による解析を行い、新しい希薄気体表面モデルを開発し、ミッション軌道決定精度への影響を評価する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① 小澤宇志, 鈴木俊之, 藤田和央, “極超音速希薄空力特性に及ぼす表面モデルの影響,” 宇宙航空研究開発機構特別資料, 査読有, *JAXA-SP-14-010*, 2015, pp. 133-137, <https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/handle/a-is/499186>
- ② Ozawa, T., Suzuki, T., and Fujita, K., "Aerodynamic Measurements and Computational Analyses in Hypersonic Rarefied Flows," *AIAA Journal*, 査読有, 2015 (accepted), DOI:10.2514/1.J053889
- ③ Ozawa, T., Fujita, K., and Suzuki, T., "Development of an Aerodynamic Measurement System for Hypersonic Rarefied Flows," *Review of Scientific Instruments*, 査読有, Vol. 86, No. 1, 2015,

015105,
DOI:10.1063/1.4905569

- ④ Ozawa, T., Suzuki, T., and Fujita, K., "Measurements of Surface Accommodation Coefficients for Rarefied Aerodynamics," *AIAA Paper* 2015-0981, 査読無, 53rd Aerospace Sciences Meeting, Kissimmee, Florida, Jan. 5-9, 2015, DOI:10.2514/6.2015-0981
- ⑤ Ozawa, T., Suzuki, T., and Fujita, K., "Rarefied Aerodynamic Measurement in Hypersonic Rarefied Wind Tunnel," *AIP Conference Proceedings*, 査読有, edited by and Quanhua Sun, Vol. 1628, 2014, pp. 1284-1291, DOI: 10.1063/1.4902739
- ⑥ 小澤宇志, 藤田和央, “希薄(低圧)風洞の紹介,” *ながれ「特集: 風立ちぬ 風洞の物語」*, 査読有, Vol. 33, No. 3, 2014, pp. 273-278, <http://www.nagare.or.jp/publication/nagare/archive/2014/3.html>
- ⑦ Suzuki, T., Ozawa, T., and Fujita, K., “Study of Aerodynamic Characteristics Evaluation Under Hypersonic Rarefied Flows,” *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, 査読有, Vol. 12, No. ISTS29, 2014, pp. Po_2_13-Po_2_21, DOI:10.2322/tastj.12.Po_2_13
- ⑧ Ozawa, T., Suzuki, T., and Fujita, K., "Experimental and Computational Investigation of Rarefied Hypersonic Aerodynamics," *AIAA Paper* 2014-1214, 査読無, 52nd Aerospace Sciences Meeting, National Harbor, Maryland, Jan. 13-17, 2014, DOI:10.2514/6.2014-1214
- ⑨ 小澤宇志, 鈴木俊之, 藤田和央, “極超音速希薄風洞流れ場の粒子計算解析,” 宇宙航空研究開発機構特別資料, 査読有, *JAXA-SP*, Vol. 13-011, 2013, pp. 47-52, <https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/handle/a-is/13440>
- ⑩ Suzuki, T., Ozawa, T., and Fujita, K., “Aerodynamic Characteristics Evaluation Under Hypersonic Rarefied Flow Conditions,” *AIAA Paper* 2013-3019, 査読無, 44th Thermophysics Conference, San Diego, CA, June 24-27, 2013, DOI:10.2514/6.2013-3019

[学会発表] (計 10 件)

- ① 小澤宇志, 鈴木俊之, 藤田和央, “極超音速希薄風洞におけるピトー圧及び希薄効果の解析,” 平成 26 年度衝撃波シンポジウム, 伊香保, 群馬, 日本, 2015 年 3 月 9 日-11 日.
- ② Ozawa, T., Suzuki, T., and Fujita, K., “Measurements of Surface Accommodation Coefficients for Rarefied Aerodynamics,”

AIAA Paper 2015-0981, 53rd Aerospace Sciences Meeting, Kissimmee, Florida, Jan. 5-9, 2015.

- ③ Ozawa, T., Suzuki, T., and Fujita, K., "Rarefied Aerodynamic Measurement in Hypersonic Rarefied Wind Tunnel," 29th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics 2014, July 13-18, 2014, Xi'an, China.
- ④ 小澤宇志, 鈴木俊之, 藤田和央, “極超音速希薄空力特性に及ぼす表面モデルの影響,” 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, 弘前文化センター, 青森県弘前市, 2014年7月3日-7月4日.
- ⑤ Ozawa, T., Suzuki, T., and Fujita, K., "Experimental and Computational Investigation of Rarefied Hypersonic Aerodynamics," 52nd Aerospace Sciences Meeting, Jan. 16, 2014, National Harbor, Maryland.
- ⑥ 小澤宇志, 鈴木俊之, 藤田和央, "エアロシエル空力性能の評価3-希薄空力," 平成25年度宇宙航行の力学シンポジウム, 2013年12月5日, 宇宙科学研究所, 相模原.
- ⑦ 小澤宇志, 鈴木俊之, 藤田和央, “極超音速希薄風洞流れ場の粒子計算解析,” 第45回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 1E07, 2013年7月4日, 東京, 日本.
- ⑧ 小澤宇志, 鈴木俊之, 藤田和央, 極超音速希薄風洞開発と希薄空力数値計算融合, 第146回流体懇話会, 2013年5月10日, 電気通信大学 東4号館 8階 AV会議室, 調布, 東京.
- ⑨ Suzuki, T., Ozawa, T., and Fujita, K., “Study of Aerodynamic Characteristics Evaluation Under Hypersonic Rarefied Flows,” 29th International Symposium on Space Technology and Science, June 6, 2013, Nagoya, Japan.
- ⑩ Suzuki, T., Ozawa, T., and Fujita, K., “Aerodynamic Characteristics Evaluation Under Hypersonic Rarefied Flow Conditions,” 44th Thermophysics Conference, June 26, 2013, San Diego, CA, USA.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

小澤 宇志 (OZAWA TAKASHI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・研究
開発本部・研究員

研究者番号：70567544

(2)研究分担者

無

(3)連携研究者

無