

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06611

研究課題名(和文) 極超音速希薄風洞を用いた火星希薄空力計測システムの構築及び凝縮による影響評価

研究課題名(英文) Development of Measurement System for Martian Rarefied Aerodynamics and Investigation of Condensation Effect in Hypersonic Rarefied Wind Tunnel

研究代表者

小澤 宇志(Ozawa, Takashi)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究開発員

研究者番号：70567544

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：火星大気突入は希薄な大気のため、極超音速希薄流領域が広く、二酸化炭素環境における希薄空力特性を把握することが重要である。本研究では、極超音速希薄風洞においてヒーター部を製作することにより、CO₂極超音速希薄気流の生成が可能となった。また、低温希薄流領域におけるCO₂過飽和現象をノズル流のピトー圧分布計測とピトー管周りの流れ場を粒子数値解析によって検証することにより、過飽和領域を評価した。さらに、吊り下げ式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手法を用いて物質表面係数計測手法を開発し、凝縮による影響を評価することにより、CO₂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)：For Mars atmospheric entry, it is crucial to improve understanding of aerodynamic characteristics in CO₂ hypersonic rarefied gas flows. The 100-mm Hypersonic Rarefied Wind Tunnel (HRWT) at Japan Aerospace Exploration Agency has been extended to CO₂ rarefied hypersonic flows by installing a new heater system. In this work, we first developed a pitot tube measurement system and a particle simulation code for CO₂ condensing flows. According to particle simulation results for flows around pitot tubes, we have analyzed super-saturation region for CO₂. Second, we have developed an integration scheme between HRWT measurements using pendulous models and particle simulations for the determination of CO₂ surface accommodation coefficients and analyzed condensation effect on the accuracy of aerodynamic prediction for CO₂ hypersonic rarefied flows.

研究分野：航空宇宙工学

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 CO₂ 空力特性解明の需要が近年増加している。JAXA では近年様々な火星惑星探査ミッションが計画されている。火星大気突入ミッションでは、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する必要がある。現状では CO₂ 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) 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)が構築されているが、不活性ガスに限定されている。

(3) 世界的に見ても CO₂ 希薄空力現象を解明するシステムが存在しないため、実験と数値計算の双方のアプローチによる CO₂ 空力特性評価システムが必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究は、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、物質表面係数の計測手法・凝縮による影響評価手法の確立を目的とする。窒素が主成分の地球大気と比べ、二酸化炭素を主とした火星等の大気では、大気突入の際に生じる空力を数値解析で予測することは物質表面係数や凝縮等の影響により困難である。そこで CO₂ 環境下で極超音速希薄流れの気流検定手法を確立し、モデルを用いた希薄空力計測と粒子数値解析の融合による手法を用いて物質表面係数の特定および凝縮による影響の評価を目指す。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火星用表面モデル・凝縮モデルを構築することで、希薄空力予測精度を向上させ、惑星大気突入機等の軌道制御システムの信頼性向上を目指すものである。

3. 研究の方法

(1) 極超音速希薄風洞において CO₂ ノズル流 DSMC 数値解析を行い、ノズル部及びヒーター部の設計・製作を行う。

(2) CO₂ 希薄空力計測用ピトー管を開発し、ピトー圧計測結果と DSMC 数値計算を融合する手法を用いて、試験気流がどのような温度・圧力分布を持つかを明らかにし、試験環境・過飽和による凝縮線の評価する。

(3) 2 方向画像処理を用いた吊り下げ式モデルに作用する微小空力計測システムを開発する。

(4) DSMC 数値解析を行い、微小空力計測と数値解析を融合することにより、拡散・鏡面反射比等、物質表面係数の材質に対する依存性を明らかにする。

(5) 凝縮による空力への影響を評価し、CO₂ 希薄領域における凝縮現象のモデル化を行う。

4. 研究成果

(1) 極超音速希薄風洞において CO₂ ノズル流 DSMC 数値解析を行い、ノズル部及びヒーター部の設計・製作を行った。

CFD(Computational Fluid Dynamics)-DSMC (direct simulation Monte Carlo) 連成計算(図 1 参照)を行うことにより、45 度コニカルノズルを使用した場合においてクヌーセン数(代表長 5 mm)が 0.1 以上、マッハ数 10 以上の CO₂ 気流が生成可能なヒーター部を設計した。図

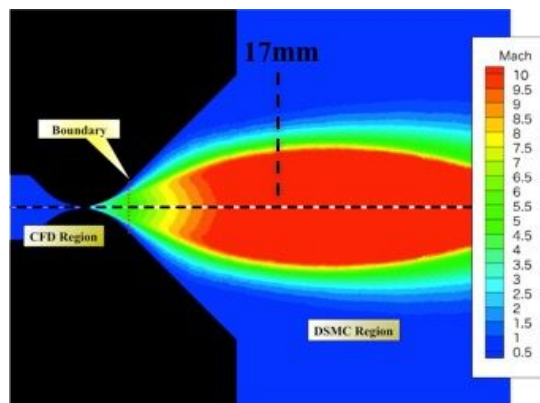


図 1: 45 度コニカルノズルを用いた CO₂ ノズル流のマッハ数等高線図。

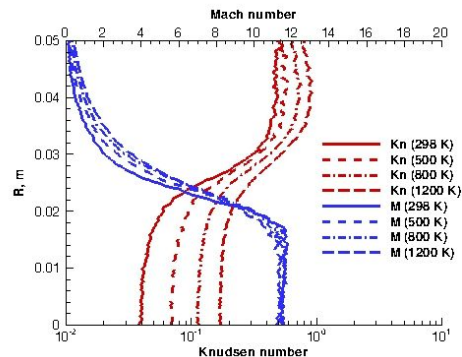


図 2: HRWT 計測領域におけるクヌーセン数とマッハ数半径方向分布の淀み温度依存性。



図 3: HRWT の CO₂ ヒーター部写真。

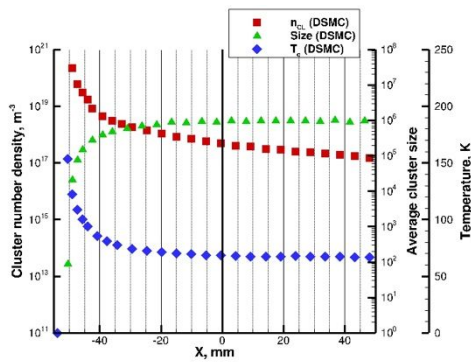


図 4: 中心線上における CO₂ ノズル流内のクラスターの数密度, サイズ, 温度の変化.

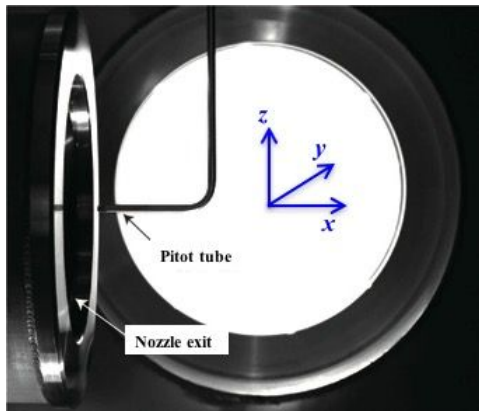


図 5: CO₂ ノズル流ピトー圧分布計測写真.

2 に HRWT 計測領域におけるクヌーセン数とマッハ数半径方向分布の淀み温度(T_0)依存性を示す. クヌーセン数が 0.1 以上になるためには, 淀み温度を 700 K 以上まで加熱する必要がある, その仕様を満たすスーパータルモジュールを用いたヒーターの製作を行った(図 3 参照).

(2) 極超音速希薄流計測用ピトー管を開発し, ピトー圧解析による気流検定システムを構築した.

まず, DSMC 数値解析において CNT(Classical Nucleation Theory)法を用いた凝縮モデルを開発し, 45 度コニカルノズルを用いた CO₂ 極超音速ノズル流の特性を評価した. ヒーターによる加熱がない場合, 図 4 に示すように, クラスターがノズル出口から上流 50 mm 付近で核生成され, その後下流に行くほど気流膨張, 凝縮, 合体凝縮, 蒸発等の効果によってクラスター数密度は低下するが, クラスターサイズは大きくなるのがわかった. また, クラスター数密度は核生成の閾値モデルに強く依存するが, サイズと温度はそれほど依存しないことが判明した.

気流予測精度を評価するため, 外径 4mm の極超音速希薄流計測用ピトー管を用いて圧力分布を計測(図 5 参照)し, DSMC 数値解析の結果と比較検証した. ピトー管内外部の流れ場がノズル流中のクラスター数密度に依存し, ピトー圧に影響を及ぼす結果を図 6 に示す. 非加熱の場合では, クラスター数密

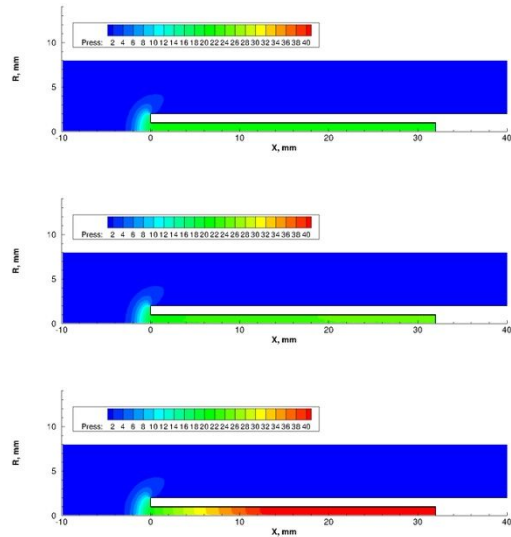


図 6: ピトー管(外径 4mm)の圧力分布の比較 [$n_{CL}=1 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$ (上), $n_{CL}=1 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ (中), $n_{CL}=5 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ (下)].

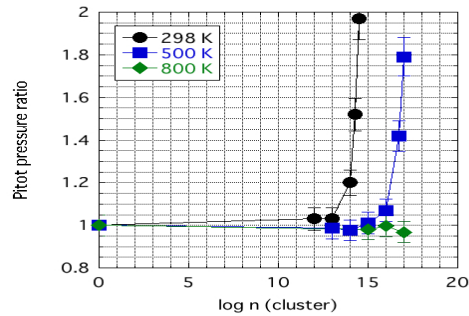


図 7: ピトー圧比のクラスター数密度・淀み温度依存性

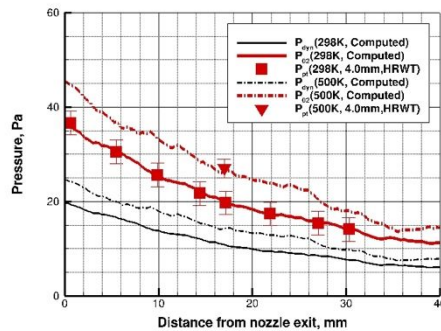


図 8: CO₂ ノズル流の中心軸上のピトー圧分布の比較.

度が 10^{14} m^{-3} を超えるとピトー圧が急激に高くなるが, 淀み温度が 500 K まで加熱されると, クラスター数密度が 10^{16} m^{-3} までピトー圧は変化しないことが判明した(図 7 参照).

CO₂ ノズル流の中心軸上におけるピトー圧分布の比較を図 8 に示す. 計測結果は凝縮による影響を無視した数値解析の結果と良い一致を示している. すなわち, ヒーターを使用しない非加熱の場合でも凝縮によるピトー圧への影響は無視できることがわかった.

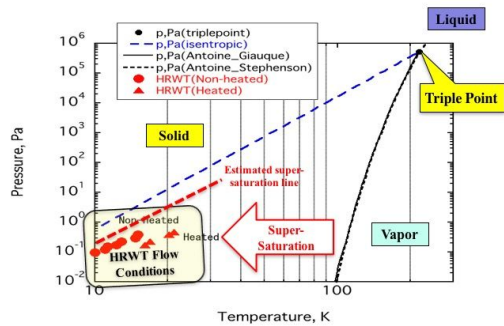


図 9: 推定された二酸化炭素過飽和領域。

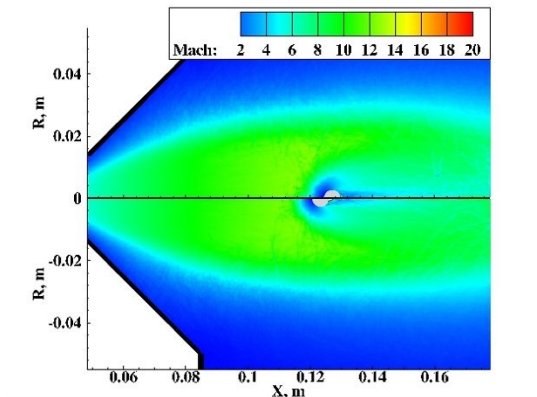


図 10: CO₂ 希薄流におけるアルミニウム球模型の変位比較：拡散反射(上)，鏡面反射(下)。

この結果により従来の CNT モデルでは凝縮による影響が過剰であることが判明したため、凝縮核生成の閾値を修正したモデルを考案した。

(3) これらのピトー圧計測結果をもとに過飽和による凝縮線を評価した。その結果を図 9 に示す。窒素の場合と同様に三重点を通る等エントロピー線に近い低温・低圧領域まで過飽和領域が広がっていることが判明した。また、HRWT 計測領域では非加熱の場合であっても凝縮現象が希薄空力予測に及ぼす影響は大きくないことが判明した。

(4) 2 方向画像処理を用いた吊り下げ式模型に作用する 3 自由度の微小空力計測システムを開発し、3 自由度の微小空力計測と数値解析を融合することにより、拡散・鏡面反射比を用いた表面熱適応係数評価手法を構築した。

球模型を高精度自動ステージから細糸でノズル出口から設定された位置に吊るし、CCD カメラを用いた画像処理技術により模型の 2 方向変位計測を行った。また、DSMC 極超音速流れ場と HRWT 計測用模型を融合した数値解析手法を用いることによって、球模型表面状態が鏡面から拡散反射に変化した場合の変位差を評価した(図 10 参照)。

球模型の変位と表面熱適応係数はほぼ線形関係の特性(図 11 参照)があり、その特性を活かした表面熱適応係数決定手法を確立した。二酸化炭素気流におけるアルミニウム表

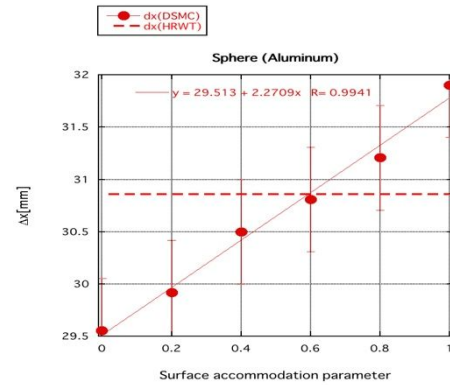


図 11: CO₂ におけるアルミニウム球模型の変位と表面係数()の相関性及び計測結果の比較：(Al, CO₂)=0.59 ± 0.11。

面熱適応係数は淀み温度 500 K の気流では約 0.6 であり、窒素の場合の 0.8 と比べて鏡面反射比が高い傾向にあることが判明した。

(5) 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した。

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、CO₂ における表面熱適応係数物質依存性を評価した。

非加熱の CO₂ 気流を使用した場合、加熱したケースよりも全体的に拡散反射比が高い表面熱適応係数の結果となった。非加熱の場合、気流中に含まれるクラスターサイズが大きく、数密度も高い傾向にある。そのため、模型前方に生じている衝撃層背後においてクラスターの蒸発が進行する寄与が大きいため、表面係数評価において拡散反射比が高い結果を示すことがわかった。

(6) 今後の発展として、加熱したケースのデータを増やすことによって、CO₂ 表面熱適応係数計測誤差の低減を図る。また、表面熱適応係数の速度比依存性を評価し、表面係数データベースの高精度化を目指す。さらに、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、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 5 件)

Ozawa, T., Suzuki, T., and Fujita, K., "Pitot Pressure Analyses in CO₂ Condensing Rarefied Hypersonic Flows," 30th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, AIP Conference Proceedings, 査

読有, edited by Andrew Ketsdever and Henning Struchtrup, Vol. 1786, 2016, 190010, DOI:10.1063/1.4967688.

小澤宇志, 今村俊介, 川崎春夫, 鈴木俊之, 藤田和央, 佐々木雅範, “超低高度衛星の希薄空力特性評価に向けた希薄風洞計測と数値解析,” 宇宙航空研究開発機構特別資料, 査読有, JAXA-SP-16-007, 2016, pp. 167-171.

小澤宇志, 鈴木俊之, 藤田和央, “高クヌーセン数領域における極超音速希薄流数値解析,” 宇宙航空研究開発機構特別資料, 査読有, JAXA-SP-15-013, 2016, pp. 91-96.

Ozawa, T., Suzuki, T., and Fujita, K., “Investigation of Rarefaction and Condensation Effects in Hypersonic Rarefied Flows,” *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, 査読有, Vol. 14, No. ists30, 2016, pp. Pe_1-Pe_6.

Ozawa, T., Suzuki, T., and Fujita, K., “Investigation of Condensation Effect in CO₂ Hypersonic Rarefied Flows,” *AIAA Paper 2016-1729*, 査読無, 54th Aerospace Sciences Meeting, San Diego, CA, Jan. 4-8, 2016.

[学会発表](計11件)

Ozawa, T., Suzuki, T., and Fujita, K., “Investigation of Condensation and Evaporation Effect on CO₂ Hypersonic Rarefied Aerodynamic Measurements,” 31th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, July 23-27, 2018, Glasgow, UK.

小澤宇志, 鈴木俊之, 藤田和央, “二酸化炭素極超音速希薄流における表面熱適応係数計測,” 第61回宇宙科学技術連合講演会, 新潟, 日本, 2017年10月25日-27日.

Fujita, K., Suzuki, T., Takayanagi, H., Ozawa, T., Nomura, S., Takizawa, N., Matsuyama, S., Lemal, A., and Mizuno, M., “Research on Shock-induced Aerothermodynamics for Future Planetary Explorations,” 31st International Symposium on Shock Waves, July 9-14, 2017, Nagoya-Aichi, Japan.

小澤宇志, 今村俊介, 川崎春夫, 鈴木俊之, 藤田和央, 佐々木雅範, “超低高度衛星の希薄空力特性評価に向けた極超音速希薄風洞計測,” 第60回宇宙科学技術連合講演会, 函館アリーナ, 函館市, 2016年9月6日-9月9日.

Ozawa, T., Suzuki, T., and Fujita, K., “Pitot Pressure Analyses in CO₂ Condensing Rarefied Hypersonic Flows,” 30th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics 2016, July 10-15, 2016, Victoria, Canada.

小澤宇志, 今村俊介, 川崎春夫, 鈴木俊之, 藤田和央, 佐々木雅範, “超低高度衛星の

希薄空力特性評価に向けた希薄風洞計測と数値解析,” 第48回流体力学講演会/第33回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 金沢歌劇座, 石川県金沢市, 2016年7月6日-7月8日.

Ozawa, T., Suzuki, T., and Fujita, K., “Investigation of Condensation Effect in CO₂ Hypersonic Rarefied Flows,” 54th Aerospace Sciences Meeting, San Diego, CA, Jan. 4-8, 2016.

小澤宇志, 鈴木俊之, 藤田和央, “高クヌーセン数領域における極超音速希薄流数値解析,” 第47回流体力学講演会/第33回数値シミュレーション技術シンポジウム最優秀賞受賞講演, 調布航空宇宙センター, 2015年10月23日.

小澤宇志, 鈴木俊之, 藤田和央, “二酸化炭素極超音速希薄流における凝縮モデルの検討,” 第59回宇宙科学技術連合講演会, かごしま県民交流センター, 鹿児島市, 2015年10月7日-10月9日.

Ozawa, T., Suzuki, T., and Fujita, K., “Investigation of Rarefaction and Condensation Effects in Hypersonic Rarefied Flows,” *ISTS Paper 2015-k-37*, 30th International Symposium on Space Technology and Science, July 4-10, 2015, Kobe-Hyogo, Japan.

小澤宇志, 鈴木俊之, 藤田和央, “高クヌーセン数領域における極超音速希薄流数値解析,” 第47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, 東京大学生産技術研究所, 東京都目黒区, 2015年7月2日-7月3日.

6. 研究組織

(1)研究代表者

小澤 宇志 (OZAWA TAKASHI)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究開発員

研究者番号: 70567544

(2)研究分担者

鈴木 俊之 (SUZUKI TOSHIYUKI)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・主任研究開発員

研究者番号: 20392839

(3)連携研究者

藤田 和央 (FUJITA KAZUHISA)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究領域主幹

研究者番号: 90281584