頼性のある物理化学モデルを構築しつつ、高エンタルピー流れの現象を解明していくことが強く望まれる。

参考文献

- 1) 山本行光：HOPE, HYFLEXにおける高温実在気体数値解析，第28回流体力学講演会講演集，1996，pp. 35-38.
- 2) 麻生 茂ら：化学的非平衡を考慮した衝撃波を伴う流れの数値計算，第28回流体力学講演会講演集，1996，pp. 43-46.
- 3) 満田正彦ら：高エンタルピー流れの2次元非平衡解析，第28回流体力学講演会講演集，1996，pp. 39-42.
- 4) 溝端一秀：ノズル膨張流における分子振動・解離・再結合の連成，第28回流体力学講演会講演集，1996，pp. 233-236.
- 5) 森岡敏博ら：画像分光法を用いた空気中の強い衝撃波背後の発光観測，第28回流体力学講演会講演集，1996，pp. 229-232.
- 6) 鈴木宏二郎ら：アブレーションを伴うMUSES-Cカプセルまわりの化学非平衡衝撃層解析，第28回流体力学講演会講演集，1996，pp. 47-54.
- 7) 藤田和央ほか：高温大気からの輻射解析，第28回流体力学講演会講演集，1996，pp. 51-54.
- 8) 鈴木宏二郎ら：極超音速非平衡衝撃層における輻射の影響，第28回流体力学講演会講演集，1996，pp. 55-58.
- 9) 木原 尚ら：アーク加熱風洞の特性試験，第28回流体力学講演会講演集，1996，pp. 59-62.
- 10) 鈴木真也ら：アーク加熱風洞性能の相似性について，第28回流体力学講演会講演集，1996，pp. 63-66.
- 11) 満田正彦ら：アークヒータの数値解析と実験，第28回流体力学講演会講演集，1996，pp. 67-69.
- 12) 稲谷芳文ら：サンプルリターンミッションの再突入飛行環境模擬装置について，第28回流体力学講演会講演集，1996，pp. 217-218.
- 13) 濱本直樹ら：鈍頭物体まわりのアーク加熱室素流の回転・振動温度測定，第28回流体力学講演会講演集，1996，pp. 221-224.
- 14) 山田哲哉ら：LIFによる高エンタルピー気流中のNO分子の回転/振動温度計測，第28回流体力学講演会講演集，1996，pp. 225-228.
- 15) 水野雅仁ら：燃焼駆動式CO₂ガスダイナミックレーザの急進期における超音速流れ場の可視化，第28回流体力学講演会講演集，1996，pp. 79-83.
- 16) 滝 史朗ら：ラム・アクセレレータ始動の数値シミュレーション，第28回流体力学講演会講演集，1996，pp. 71-74.
- 17) 佐宗章弘ら：ラム加速機の始動過程に関する実験研究，第28回流体力学講演会講演集，1996，pp. 75-78.

一特 集一

「希薄気体力学：実験と数値計算」報告ならびに 最近の宇宙機関連の希薄気体力学の発展について^{*1}

安 部 隆 士^{*2}

Key Words: Rarefied gas dynamics, Spacecraft, Aerobrake

希薄気体力学に関する現在の問題点を集中的に議論するため、流体力学講演会において特別企画を構成す

著者紹介

安部 隆士 (正会員)

1949年生。福岡県出身。1978年東京大学大学院修了，同年東京工業大学助手，1981年宇宙科学研究所助教授。現在，宇宙科学研究所宇宙輸送研究系教授。宇宙工学に関わる気体力学の研究に従事。日本物理学会，日本機械学会，日本ロケット協会，AIAA各会員。

る役目を仰せつかった。これを受けて、現在活発に研究を進めている諸先生に講演を依頼し、96年度流体力学講演会において特別企画「希薄気体力学：実験と数値計算」として実施された¹⁾。希薄気体力学に関しては、このような試みは私の記憶では初めてであり、ご講演の雰囲気も一味違って、普段にも増して活発な質疑応答が交わされた。この稿では、前半でこのシンポジウムの紹介を行い、後半では実飛行への応用の観点からの最近の希薄気体力学の動向を紹介する。

シンポジウムでは、まず、大和田先生(京大)から、「平行平板間の希薄気体の熱伝達と温度分布：温度比が大きい場合」というタイトルで講演をいただいた。問題自身は、古くから研究が進められてきたものであるが、ボルツマン方程式をなるべく忠実に数值的に解くことを目指しており、事実上スタンダードな解を得ることをねらったものである。

^{*1} 平成9年2月10日原稿受理 A Report on the Organized session "Rarefied Gas Dynamics: experiment and analysis" and recent development of Rarefied Gas Dynamics in relation to Space Vehicles

^{*2} 宇宙科学研究所 Takashi Abe

次に大西先生（鳥取大）から「Navier-Stokes による蒸発・凝縮過程のシミュレーション」という講演をいただいた。蒸発凝縮現象はさまざまな応用を持ちながら、蒸発・凝縮相界面の近傍は本質的に気体の非平衡性に支配されるため、基本的にはボルツマン方程式をもとに解析を行う必要があり、応用上困難を残していた。一方界面近傍以外では、Navier-Stokes 方程式で記述できるため、界面近傍で生じるプロセスを Navier-Stokes 方程式の境界条件として取り扱うことにより応用に適したものとなる。今後の発展に期待したい。

次に山本先生（岡山大）より「物理吸着状態にある二壁面間の希薄気体の流れ」についてのご講演があった。従来壁面における気体分子の散乱については単純なモデルしかなく、誘起される流れの妥当性については多くの議論が続いていた。希薄な流れでは、物体表面で散乱された分子が物体表面から離れた位置までその分布関数的特徴を残すため、物体表面での分子の散乱の形態は流れそのものに大きな影響を持つことになるためである。山本先生は2壁面間に誘起される流れの解析において壁面での散乱現象を分子動学的に扱い、壁面における気体分子の取り扱いに注意を払う必要があることを示された。従来、この問題に関してはさまざまな議論があったものの、定説がなく先生のご講演は、ある方向を示したものと考えられる。

続いて、手島先生（京都教育大）により「超音速ジェットの構造解析」についての講演があった。オリフィスあるいはノズルから噴出する超音速希薄ジェットは、古くから解析が行われているが、この講演では、DSMC 法により、さまざまな希薄パラメータについて全空間で構造を把握することが可能であることが示されている。超音速ジェットの構造はなじみのあるものであるが、さまざまな希薄パラメータについて構造の変化を網羅的に説明していただき、改めてその面白さを教えていただいた次第である。

次に、松本氏（IHI）より「超音速自由噴流における高温空気の非平衡現象」についてご講演をいただいた。手島先生のご講演とは異なり、よどみ点状態が高エンタルピー状態であり、化学的熱的非平衡性があらわになってくる流れである。このご講演では、特に熱的非平衡性に着目し、各分子毎に振動温度を定義する手法により、振動温度の並進温度からの非平衡性が現れることを詳細な解析によりあらわにしている。

最後に青木先生（京大）により「Numerical Analysis of a Supersonic Rarefied Gas Flow past a Flat Plate at an Angle of Attack」についてのご講演をいただいた。ご講演では、最近の数値解析の発達を強調

され、分布関数に現れるべき非連続を正確に考慮することにより、より信頼できる解を見出せることを示した。

今回講演をいただいた諸先生以外にも、活発に研究を進められている諸先生がいっぱいいるが、当方の準備不足もあり、都合が合わず、講演をお願いできなかった経緯がある。しかしながら、希薄気体力学に関して集中的に討議できたことは、参加者にとって有意義であったとおもわれる。できれば、次の機会をいただければ幸いである。

さて、ここで視点を転じてこの特別企画では見られなかった観点からの最近の希薄気体力学の動向を紹介する。希薄気体力学は、高々度を飛行する宇宙機の出現にその端を発し、高々度での宇宙機に対する大気の効果把握することが最初の課題であった。希薄気体の特徴は、密度の減少に起因して分子間衝突が希薄になるために生じる非平衡現象にある。この観点からすれば、希薄気体力学の応用は高々度を飛行する宇宙機に対する空力効果のみならず、地上においてもさまざまな応用が見出され、発展を続けている。この稿の後半では、高々度を飛行する宇宙機に対する空力的効果という観点から、最近の動向及び現状を紹介する。

希薄な流れの物体への効果は、通常その効果自身が微弱であり、実験的な困難もあるため、実験も限られたものである。実験的には、Koppenwallner ら²⁾ による簡単な幾何学形状を持つ物体に対する抵抗係数、熱伝達係数などの計測がなされ、希薄の効果の指標である Knudsen 数（分子平均自由行程/物体代表長さ）が1前後において、希薄気体効果を見逃せる連続流で予想される値から、希薄気体効果の極限としての自由分子流れで予測される値まで変化することが示されている（第1図）。しかしながら、希薄な流れでは、物体表面で散乱された分子が物体表面から離れた位置までその分布関数特徴を残すため、物体表面での分子の散乱の形態は流れそのものに大きな影響を持つことになる。Kopenwallner らの計測でも、物体の表面状態の違いによる効果が指摘されており、その微視的観点からの理解が残されている。その理解のためさまざまな努力がなされており、Gas Surface Interaction という研究領域を形成している。この領域は、物性論的立場から最近活発な研究活動を示している分野でもあり、モレキュラー・ビームを用いて原子分子が固体表面と干渉する際に生じる散乱、吸着、化学反応、分子内部自由度励起などの現象が研究されている。物性論的立場から扱われる材料は主に清浄な結晶面であるが、最近の研究は原子分子との干渉において物質によりさまざまな様態を示すことを示しており、航空宇宙

第1図 円板の抵抗係数と希薄度の関係

Flight configuration.

Aeroassist Flight Experiment vehicle trajectory.

第2図 AFE用の機体、及び予定飛行経路

関連で問題とするいわゆる汚れた工学的表面についての微視的な理解はさらに複雑なものになるであろうことを示唆している。そのため、工学的な意味では単純化されたモデルが用いられているのが現状である。一つは、鏡面散乱モデルであり分子は鏡面散乱方向に散乱されるものとされる。他は、拡散モデルであり、原子分子が表面に吸着された後、表面の温度に従いMaxwell (平衡) 分布で四方に均一に散乱されるものとされる。通常 accommodation 係数といわれるパラメータでそれぞれの効果を線形結合して、用いられることになる³⁾。

希薄気体の効果を予測するための実験的手法が限られるため、数値的手法が開発されている。希薄気体の挙動をあらわすためには、ボルツマン方程式を解く必要があるが、ボルツマン方程式を直接解く以外に、超

粒子によるシミュレーションが開発されており、一般的な手法となっている。この方法は直接シミュレーションモンテカルロ法として知られているものであるが、近年その原理の理解が進み⁴⁾、さらに、高速のスキームが開発されるなど、確立されつつある⁵⁾。

高々度を飛行する宇宙機は一般に高速であり、低めの高度を飛行する際には、分子間衝突頻度が高まり、分子の内部自由度が励起されたり解離反応が進むなどの実在気体効果に関わる非平衡性を考慮する必要が出てくる。これらの効果についても、DSMC法での取り扱いに関して、近年改良が加えられており、ほぼ確立されてきたといえる⁶⁾。

希薄気体力学のもともとの発端は高々度を飛行する宇宙機であったが、そのころ予測されていた宇宙機はせいぜい 250 km 程度の高度であり、大気の効果によ

り軌道が減衰するという意味で、大気の効果はむしろ宇宙機にとって邪魔なものとしての扱いであった。しかしながら、近年大気飛行中に期待される気体力学的減速を利用して軌道を変更する宇宙機の必要が認識され、計画としては完遂しなかったものの、米国において AFE (Aeroassist Flight Experiment) 計画として開発研究が行われた⁷⁾ (第2図)。この計画では、ほぼ月軌道から地球大気へ進入して大気による減速により地球低軌道に至る将来型の軌道間輸送機を想定し、その最重要開発要素である地球大気による減速フェーズの技術的問題点の克服を目指したもので、そのために低軌道から速度約 10 km/s で進入し、最低高度約 80 km まで進入した後に再び低軌道に戻る飛行が計画された。この軌道では、宇宙機は希薄気体の領域から連続流れにいたる広範の流れを経験することになり、このため活発な研究が展開された⁸⁾。その研究の一端として、希薄から連続流れにいたる極超音速流れに対して DSMC によるシミュレーションが行われ、それらの研究を通してスキーム等の開発が促された趣がある。

惑星大気による減速を利用した宇宙機という点では、前記の AOTV とは異なり、減速量としては小さいながら、さらに高層での減速を複数回行って必要な減速量を達成する方法がエアロブレーキ技術として知られている。このエアロブレーキ技術は、特に重量制限の厳しい惑星探査において、その威力を発揮されるものとして期待されるものである。このエアロブレーキでは、飛行領域は自由分子流から中間流 (Knudsen

数~1) までの飛行であり、すべての飛行領域は希薄流れの領域で行われる。このため希薄流れでの宇宙機の空力特性の把握が不可欠となる。先にのべたように希薄流れでは、飛行体の空力特性には、飛行体表面/分子干渉が大きな影響をもち、その把握が期待されていた。エアロブレーキ技術の世界初のデモンストレーションは我が国の科学衛星「飛天」によって行われている¹⁰⁾ (第3図)。飛行後の解析によれば、飛行体の機体表面/分子干渉は、意外にも、おおまかにいえば拡散モデルでも説明がつけられることを示している¹¹⁾。このことは、拡散モデル自身を正当化しているというより、飛行体表面から散乱される分子はその方向はともあれ低速の分子として散乱されることを示唆している。微視的観点からの飛行体表面/分子干渉は相変わらず暗中模索であるが、少なくとも工学的にはひとつの指針が得られたものと考えている。エアロブレーキ技術の発展という観点からは、この「飛天」によるデモンストレーションが契機となり、米国の金星探査機 (Magellan) により金星大気を利用したエアロブレーキが成功裏に実施され、惑星探査宇宙機への本格的応用が始まっている¹²⁾。現在火星に向けて飛行中の米国の探査機 (Mars Global Surveyor) でもこの技術が火星大気を利用して行われることになっている。また、わが国の科学衛星プラネット B でも火星大気を利用したエアロブレーキが行われるものと思われる。

希薄気体の応用としては、エアロブレーキばかりでなく、宇宙空間から地球大気に再突入し、地表に達す

at aerobrake

Mass: 197 kg

Configuration: cylinder (1.4m ϕ $\times$ 0.7m)

Spin-Stabilized (20RPM)

第3図 エアロブレーキ時の科学衛星「飛天」機体概要（飛行方向のスピン方向に一致）
及び大気飛行中の減速度（上2段）のクイックルック画面

る宇宙機でも上層大気を通過する際に希薄機体流れを経験することになる。米国において、近年再突入体を経験する非平衡現象の把握を目指した実験が行われた。Bow-Shock Ultra-Violet (BSUV) として知られる飛行実験であり、特に非平衡流れでの輻射量の予測が実験結果と整合しないとされていたが、BoydらのDSMCの解析によれば、実験結果とよく一致する結果が得られている⁹⁾。これは、NOの生成プロセスを正確に記述することによって得られたものであり、内部自由度励起/解離を含むDSMC法の応用例である。わが国でも、OREX実験機においていくつかの計測が行われ、DSMCによる予測値と妥当な一致を見せている¹³⁾。また、打ち上げの首尾により結果が得られていないが、わが国とドイツとの国際共同計画として実行されたEXPRESS計画においても、希薄気体効果としてのスリップ速度を計測することが計画された¹⁴⁾。

さらに高い軌道での衛星に与える空力的効果としては、科学衛星「陽光」による実験がある。「陽光」では、高い姿勢精度を要求され、そのため、鋭敏な姿勢制御が搭載されたため、高い精度での姿勢変動擾乱が計測可能であった。この高度では、空力的効果としては、自由分子流として予測することが可能であり、低温表面での拡散反射を仮定した予測値は計測データをよく説明することが示されている¹⁵⁾。これは、科学衛星「飛天」での経験とよく一致している。

このように、宇宙機関連の希薄気体力学は関連の宇宙実験とともに今後も発展を期待されている。希薄気体力学自身は、これ以外にも多様な応用性を秘めているが、ここでは、あえて宇宙機関連に話題を絞って紹介した。なにかのご参考になれば望外の喜びである。

参 考 文 献

- 1) 第28回流体力学講演会講演集, 平成8年.
- 2) Koppenwallner, G. and Legge, H.: Drag of Bodies in Rarefied Hypersonic Flow, *Progress in Aeronautics and Astronautics*, Vol. 103, 1980, p. 44.
- 3) Bird, G. A.: *Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flow*, Oxford University Press Inc., New York, 1994.
- 4) Nanbu, K.: Theoretical Basis of the Direct Simulation Monte Carlo Method, *Rarefied Gas Dynamics*, p. 369, 1986.
- 5) Koura, K.: Null Collision Technique in the Direct-Simulation Monte Carlo Method, *Physics of Fluids*, 29 (1986), pp. 3509-3511.
Abe, T.: Modification of Nanbu's method of DSMC by Using the Null-collision Technique, *Rarefied Gas Dynamics*, VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1991, pp. 929-936.
- 6) Haas, Brian L. and Boyd, D.: Models for Direct Monte Carlo Simulation of Coupled Vibration-Dissociation, *Phys. Fluids*, (1993), pp. 478-489.
Koura, K.: Statistical Inelastic Cross-section Model for the Monte Carlo Simulation of Molecules with Continuous Internal Energy, *Phys. Fluids A*, (1993), pp. 778-780.
Abe, T.: Inelastic Collision Model for Vibrational-Translational and Vibrational-Vibrational Energy Transfer in the Direct Simulation Monte Carlo Method, *Physics of Fluids*, 6, 9 (1994), pp. 3175-3179.
Abe, T.: Statistical Model for Molecular Internal Energy Exchange in DSMC Method for Rarefied Flow Analysis, The Institute of Space and Astronautical Science Report No. 654, Oct. 1994.
- 7) Walberg, G. D., Siemers, P. M., Calloway, R. L. and Jones, J. J.: The Aeroassist Flight Experiment, IAF Paper 87-197, 1987.
- 8) Moss, J. N. and Price, J. M.: Direct Simulation of AFE Forebody and Wake Flow with Thermal Radiation, NASA TM 100673, 1988.
Moss, J. N., Bird, G. A. and Dogra, V. K.: Nonequilibrium Thermal Radiation for an Aeroassist Flight Experiment Vehicle, AIAA-88-0081, 1988.
Dogra, V. K., Moss, J. N. and Simmonds, A. L.: Direct Simulation of Aerothermal Loads for an Aeroassist Flight Experiment Vehicle, AIAA-87-1546, 1987.
- 9) Boyd, I. D., Bose, D. and Candler, G. V.: Monte Carlo Modeling of Nitric Oxide Formation Based on Quasi-Classical trajectory Calculations, AIAA-96-1845, 1996.
- 10) Abe, T., Kawaguchi, J., Saito, S., Ichikawa, T. and Uesugi, K.: The World's First Cis-Lunar Aerobrake Experiment Preliminary Report of the Results, Proc. 47 Annual Meeting of the Institute of Navigation, at Williamsburg, 1991, pp. 29-37.
- 11) Abe, T., Suzuki, K. and Kawaguchi, J.: Aero-thermodynamic Flight Environment of "HITEN" Spacecraft at the Aerobrake Experiment, *Aerothermochemistry of Spacecraft and Associated Hypersonic Flow* p. 21-26, 1993, Proc. IUTAM symposium at Marseille, 1992 September.
Abe, T.: Numerical Analysis of Aero-thermodynamic Environment of "HITEN" Spacecraft at the Aerobrake Experiment, Int'l Symp. Rarefied Gas Dynamics, at Vancouver, BB-3, 1992.
- 12) Lyons, D. T.: Aerobraking Magellan: plan versus reality, AAS94-118, 1994.
- 13) Inouye, Y.: OREX FLIGHT—Quick Report and Lessons Learned, Proc. 2nd Europ. Symp. on Aerothermodynamics for Space Vehicles, ESTEC, ESA SP-367, pp. 271-278, 1995.
- 14) Auweter-Kurtz, M., Hald, H., Koppenwallner, G. and Speckmann, H. D.: German Experiments Developed for Reentry Missions, *Acta Astronautica*, 38, 1 (1996).
- 15) Abe, T., Hinada, M., Ninomiya, K. and Kimura, M.: Measurement and Prediction of Aerodynamic Effect on "YOKOH" Satellite at Lower Earth Orbit, Int'l Symp. Rarefied Gas Dynamics, at Vancouver, EB-5, 1992.