

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月1日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360413

研究課題名（和文） 大気圏突入飛行体の熱気体力学を応用した氷天体の極超音速アストロバイオロジー研究

研究課題名（英文） Study on Hypersonic Flow for Astrobiology around Icy Entry Object Based on High Temperature Gas Dynamics of Atmospheric Entry Vehicle

研究代表者

鈴木 宏二郎（SUZUKI KOJIRO）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：10226508

研究成果の概要（和文）：原始地球で頻発したと考えられる氷天体の大気圏突入について、その極超音速高温流れに関する現象の解明を行った。氷球を用いた極超音速風洞実験では、空力加熱で溶けた氷が肩部で再凝結して帽子のつば状の氷が広がる現象などを発見した。高温化学反応流の数値解析では、二酸化炭素と窒素の混合である原始地球大気と、氷表面からの水蒸気が衝撃波背後の高温気流中で反応し、重要な生命前駆物質のひとつであるシアン化水素が生成され、後方の大気に放出される機構が示された。

研究成果の概要（英文）：On the early earth, the atmospheric entry of an extraterrestrial icy object is thought to occur frequently. In this study, the hypersonic and high temperature flow around such an entry object has been investigated. The hypersonic wind tunnel experiment using a spherical ice piece reveals the phenomenon that the melted ice due to the aerodynamic heating is re-frozen in the shoulder region to form a brim-like icy structure around the body. The numerical analysis of the chemically reacting high temperature flow indicates that in the high temperature flow behind the shock wave, hydrogen cyanide, which is one of the important prebiotic materials, is produced from the ablation gas of ice and the early earth's atmosphere composed of carbon dioxide and nitrogen molecule. The hydrogen cyanide produced around the entry object is distributed into the atmosphere behind it.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2010年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2011年度	2,900,000	870,000	3,770,000
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：大気圏突入・極超音速流・熱化学非平衡流・アブレーション・氷天体・アストロバイオロジー・風洞実験・数値流体力学

1. 研究開始当初の背景

(1) 生命の起源とその普遍性を宇宙的視点か

ら探ることを目的とした「アストロバイオロジー」は、1990年代後半に米国 NASA によ

って提唱されて以来、我が国においても研究分野として定着しつつある。しかし、その担い手は理学系の地球惑星科学分野の研究者であり、多分野の融合的研究となっていないのが現状である。一方、航空宇宙工学では、「宇宙における生命」が宇宙探査の重要なテーマのひとつであると認識されてはいるが、「手段としての宇宙機」の研究開発に努力が集中され、アストロバイオロジーに直接関わる研究が行われることはなかった。

(2) しかし、航空宇宙工学において、アストロバイオロジー研究と密接に関係し、有用な手段となり得る技術や手法は少なくない。空気力学の分野では、宇宙輸送機や惑星探査機への適用を目的として、大気圏突入時の極超音速高エンタルピー気体力学（超高速超高温の気体力学）の研究が精力的に進められている。そこで行われている飛行体まわりの気体の熱化学反応や、飛行体を空力加熱から防御するアブレーションに関する研究成果は、惑星大気と生命誕生の関係、天体衝突と地球大気との干渉、他の天体からの生命源物質飛来の可能性、など多くのアストロバイオロジー的研究課題に対して有用な知見をもたらすものと期待される。

(3) 例えば、地球大気に高速で突入する回収カプセルのアブレタから発生する熱分解ガスが、機体前方に発生する衝撃波によって高温となった空気と反応してできるガス種の中に HCN（シアン化水素）や CN（シアン）があることが知られている。この HCN や CN は生命の素となるアミノ酸生成過程において重要な化学種である。航空宇宙工学において機体を空力加熱から保護するアブレタは重要な技術課題であるが、その研究成果は彗星の核などの氷天体が大気圏に突入した際の現象の理解に役立つものと期待される。一方、極超音速・高エンタルピー風洞では、空力加熱による表面溶融から崩壊に至る現象の再現が可能であり、この設備を氷天体の大気圏突入時における崩壊／消滅や、氷からの熱分解ガスと大気との熱化学反応などに活用することでアストロバイオロジー研究への貢献が期待される。しかし、これらの実験設備を活用した研究が宇宙工学者や地球惑星科学者によって行われた例はこれまでにない。

(4) 本研究は、上記のような状況を打破することを主たる動機として提案された。これまでに宇宙機の研究開発の目的で培われてきた、大気圏突入体まわりのアブレーションガスを含む極超音速化学非平衡流れシミュレーション、極超音速風洞実験、分光による高温プラズマ流の非接触気流診断、等の知見を活用してこれらのアストロバイオロジー的問題に取り組むことは、融合的研究として成果が期待できる。

2. 研究の目的

本研究は、航空宇宙工学の極超音速高エンタルピー気体力学で確立している流体数値シミュレーション技術および極超音速・高エンタルピー風洞実験技術を応用し、「氷天体」、「大気圏突入」、「極超音速高エンタルピー気体力学」をキーワードにアストロバイオロジー的知見をもたらす3つのサブテーマを解明する。それらの総合的考察を通じて、航空宇宙工学と地球惑星科学を融合した「極超音速アストロバイオロジー」の先駆的研究とする。

(1) 大気圏に突入する氷天体の崩壊現象の解明：

大気圏に突入する氷天体が空力加熱により崩壊／消滅する過程を極超音速風洞で模擬する。氷の形状や質、構造（コアの有無）など、様々なケースについて実験を行い、その崩壊過程に関する高速ビデオおよび表面温度画像を取得し、パターン分類する。また、風洞実験と並行し、氷天体まわりの極超音速流れと形状変化に関する数値解析を行う。

(2) 大気圏に突入する氷天体およびその内部物質の残存可能性の解明：

(1)の結果を踏まえ、大気圏突入軌道解析と組み合わせることで、大気圏に突入する氷天体の残存可能性について、その評価法を確立する。

(3) 惑星大気に突入する氷天体まわりの極超音速高エンタルピー気流中における化学反応メカニズムの解明：

氷天体が惑星大気に突入した際の極超音速流れにおける熱化学反応生成物が、アミノ酸生成に寄与する可能性を明らかにする。地球大気圏突入回収カプセル用に開発されたアブレーションガスを含む極超音速化学非平衡流れ解析コードを拡張し、原始惑星大気と氷天体からのアブレーションガスの熱化学反応に適用する。特に、突入天体の後流で見られる HCN や CN などの生命前駆物質生成に注目し、それらが大気圏突入天体の後流から大気中に拡散していく可能性について検討する。数値解析の検証データ取得のため、プラズマ風洞および分光による気流診断法を用いた実験を行う。

3. 研究の方法

(1) 極超音速風洞実験による氷天体の崩壊現象の解明：

大気圏に極超音速で突入する氷天体の挙動を観察するため、極超音速風洞実験を行った。実験は東京大学柏キャンパスに設置されている極超音速高エンタルピー風洞 (http://daedalus.k.u-tokyo.ac.jp/wt/wt_index.htm) を用いて行った。風洞のノズル出口直径は 200mm であり、マッハ数 7.0~7.1 の一

様流が直径約 120mm の範囲で得られている。気流の全圧 P_0 は最大 950kPa、全温 T_0 は最大約 1000K、持続時間は最大 60 sec である。図 1 に実験で用いた氷球の典型例を示す。氷は直径 15mm のアクリル球のまわりに型を用いて球状に作られており、その初期直径は 40mm である。アクリル球はベークライト棒で断熱されつつ風洞測定部の模型支持部に装着される。 $P_0=950\text{kPa}$ 、 $T_0=650\text{K}$ のとき、初期直径でとった主流レイノルズ数は 1.5×10^5 となる。気流スタート前に供試体は流路の外に退避しており、気流が安定した後射入投入される。供試体は指定した時間（通常 30~40 sec）、気流中に保持された後、流路から退避し、通風運転が終了する。なお、本極超音速風洞中で、初期球形状におけるよどみ点圧力は 10kPa、よどみ点加熱率は 100kW/m^2 のオーダーであり、これは半径 100m の天体が高度 60km の地球大気を速度 8km/s で飛行した際の値にほぼ相当する。

氷の状態が観察される現象にどのような影響を与えるかを調べるため、実験には以下のバリエーションがある。

- ①氷：水の氷（標準）、炭酸水の低密度氷、ドライアイスと水の氷の混合（水蒸気と二酸化炭素が表面から噴出する）など
- ②コア：アクリル（標準）、鉄（高熱伝導）、発泡アルミ、コア無し など
- ③測定：シュリーレン法による衝撃波観察、ビデオ画像、赤外線カメラによる表面温度画像、高速ビデオによる氷塊崩壊過程観察、天秤による氷塊にかかる空気力変化の計測など

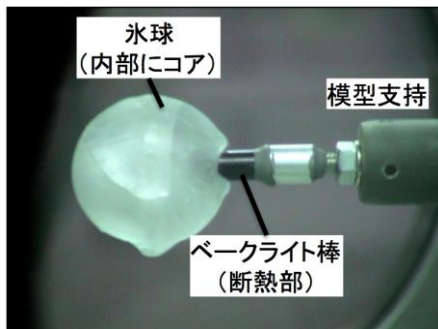


図 1 風洞測定部に設置された実験用氷塊

(2) 氷天体の大気圏突入軌道と地表到達可能生の解析：

原始地球大気に突入する氷天体の軌道解析を行うためには、大気モデル、アブレーションによる損耗率の推算モデル、損耗によって形状が変化することを考慮した空力特性モデルなどが必要である。本研究では、これらに関する(1)による研究に先立つ初期検討を行った。圧力や密度の高度分布は、主に惑星の質量に依存するため、天体としての惑星

形成完了時には、現在の高度分布とあまり変わらないものと仮定した。氷天体の初期形状は球とし、大気圏突入中にアブレーションによる損耗を受けた際にも球形状を保つものと仮定した。各瞬間に天体表面が受ける空力加熱は、デブリ落下解析用のモデルを利用した。

(3) 大気圏突入氷天体まわりの極超音速化学反応流数値解析：

ここで扱うのは、 CO_2/N_2 大気中における H_2O アブレーションを伴う衝撃層流れであるが、その解析に必要な化学反応モデルは N_2/O_2 大気における CFRP アブレタをもつ回収カプセル周りの化学反応流解析に必要なものとほぼ同じである。本研究では小惑星サンプルリターンミッションはやぶさのカプセル解析用に構築された化学的非平衡 26 化学種モデルをベースとした。ただし、このモデルには水蒸気 H_2O やそれが分解して生成される OH が含まれていないので、それらを加え 28 化学種モデルにした。考慮する化学種は N_2 , O_2 , N , O , NO , NO^+ , e^- , N^+ , O^+ , N_2^+ , O_2^+ , C , C_2 , C_3 , CO_2 , CO , CN , CO^+ , C^+ , H , H_2 , HCN , HCO , C_2H_2 , C_2H , CH , H_2O , OH の 28 種である。また、 H_2O の噴出しのモデルも CFRP アブレーションにならって定式化された。

ここでは、振動励起や化学反応進行の非平衡性を考慮した熱的・化学的非平衡流を解析する。熱的非平衡性は Park による 2 温度モデルを用いている。熱化学非平衡流では、振動温度や化学組成（質量分率）は衝撃波前後で不連続に変化することはなく、熱的緩和や化学反応によって緩やかに変化が起こる。従って、Navier-Stokes 解析において、これら非平衡物理量については非保存形表示を使うことが考えられる。圧力や温度、速度は衝撃波で不連続に変化するため、保存形表示を用いて衝撃波捕獲法によって解く。本研究では、このような保存形-非保存形ハイブリッド定式化を提案し、計算コードを開発した。

4. 研究成果

(1) 極超音速風洞実験による氷天体の崩壊現象の解明：

①氷天体のアブレーション現象の解明

図 2 に、気流中の氷球の変形について典型的な写真を示す。空力加熱により淀み点領域で氷表面は後退する一方、肩近傍の気流膨張領域では温度が急減し霜柱状の再凝結氷が積み重なって帽子のつば状の構造を造っていく。供試体前方側にある全ての氷が融け、アクリル球の核が露出した後も、氷塊は崩壊することなく、アクリル球の後半部およびベークライト棒に付着する形で存在し続ける。これは、核がアクリルできており、核の淀み点が受ける空力加熱をその周辺部に伝え

にくい構造となっているためである。実際、表面温度画像では、アブレーションの潜熱により表面温度がほぼ0°Cに保たれることが明らかになった。しかし、コアが露出するとその分のみ表面温度は急上昇する。このことは、氷天体の大気圏突入に際し、核の有無とその材質が天体の損耗や形状変形、地表への到達可能性に大きな影響を与えることを示唆している。気流は安定しており、水の再凝結でできた柱状突起群がそれなりの強度をもって安定に存在していることがわかる。氷塊の肩部でつば状の氷構造ができることは、気流中で氷の空気抵抗が時間とともに増加していることを示している。内挿天秤による力計測では空気抵抗が3倍に増加する結果が得られている。空気抵抗の増加とアブレーションによる重量減は、大気圏突入中に弾道係数が減少していくことを意味し、その突入軌道や地表到達確率等に大きな影響を及ぼす。なお、当初は、流れ解析とアブレーション解析の連成により、図2のような形状を再現することを試みたが、実際の現象は非常に複雑であり、現状の技術では困難と判断し、実験で得られた氷形状に対する流れの数値解析を行うことにした。

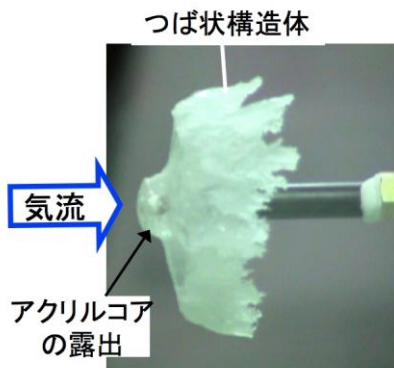


図2 氷の形状変化例

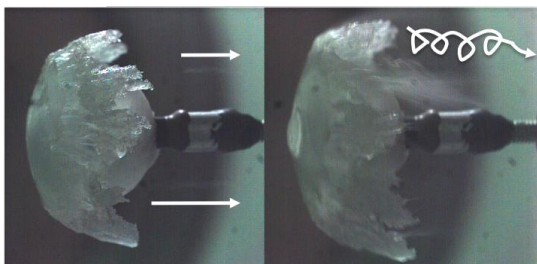


図3 氷のスポレーション

高速ビデオによる観察により、上記に加え、霜柱状氷の先端付近が壊れて微小な固体水が下流に向けて放出されるスポレーションが観測された。図3にスポレーションを捉えた高速ビデオのスナップショットを示す。氷

微粒子は放出される位置によって、左のように直線上の軌跡を描くものと、右のようにカーブ（または螺旋）を描くものが見られた。氷の場合、微粒子は放出後、熱で短時間に消滅すると思われるが、鉄隕石のように耐熱性のある物質の場合では、その後流に微小粒子状のダストがまき散らされている可能性をこの結果は示唆している。また、スポレーションとは異なり、霜柱構造が根元から分離破壊する現象も観察された。これは、氷塊の崩壊に先立つ現象として特徴的なものである。

帽子のつば状の構造体の形成、空気抵抗増大、霜柱構造の先端からのスポレーションなど、いずれも本研究で明らかにされた新しい発見である。

②成果のインパクトと今後の展望

氷塊を極超音速風洞に入れ、空気力測定を含めた総合的な実験を行った例は、過去になく、風洞を使った新しい実験法として画期的なものと言える。本研究結果を日本地球惑星科学連合大会の惑星科学セッションで発表したところ、極超音速風洞が理学系の実験装置としてあまり認知されていないこともあり、大きな反響をよぶことができた。既に隕石関係の研究者から実験の提案があり、予備実験も実施している。氷天体に関する成果だけではなく、大気圏を飛行する天体の科学全体について理工学連携による新しい研究展開のきっかけになるものと期待される。

(2) 氷天体の大気圏突入軌道と地表到達可能生の解析：

氷天体の大気圏突入の軌道解析では、地球周回軌道から8km/sで突入する場合、初期直径0.01mや0.1mの微小天体は地表に到達する前にアブレーションにより消滅するが、1m以上の氷天体は成層圏以下まで達することがわかった。氷天体は大気に突入する際の直径が大きいほど減速されにくく、またアブレーションによる直径減少の効果も小さいため、地表との衝突エネルギーが大きくなる。風洞実験との比較により、この解析モデルでは、形状変化は考慮されていないものの、その損耗量に関する初期予測としては使えることがわかった。ただし、(1)で述べたように、アブレーションを起こして大気圏を飛行する氷天体の形状および空気力の変化は複雑であり、これらを実験式で表すことは困難である。流体、損耗、軌道を連成させた大規模シミュレーション法の開発が必要になると思われる。

(3) 大気圏突入氷天体まわりの極超音速化学反応流数値解析：

①保存形-非保存形ハイブリッド定式化による熱化学非平衡流数値解析コードの開発

本研究では、保存形-非保存形ハイブリッ

ド定式化を提案し、その数値解析コードの開発に成功した。非保存形式の式は、いずれも、ソース項がついた移流-拡散方程式であり、移流に風上差分法を用いることで、簡単かつ安定に解くことができる。なお、ここでは移流にはロバストな対称型 TVD 差分法を、時間積分には MFGS 陰解法を用いている。さらに、ソース項を陰的に扱うことで計算の安定性を向上させている。これらの工夫の結果、化学反応高速流解析でクラン数 5~20 と大きな時間刻みをとって、計算時間を短縮できるようになった。本研究で開発したハイブリッド定式化による数値計算法では、振動温度を振動エネルギーから逆算する必要がないなど、非保存形式を入れることで、計算が簡単になり、かつ安定化されるなどの利点があることが明らかになった。

②生命前駆物質生成メカニズムの解明

ここでは結果の代表例について述べる。飛行速度は 8km/s、飛行高度は現在の地球相当で 60km とした。この高度で一様流密度と温度を与え、組成のみ $\text{CO}_2:\text{N}_2=0.93:0.07$ (現在の火星とほぼ同じ) に設定した。物体表面からは気流に対し正面側のみ一様に $0.05\text{kg/m}^2\text{s}$ で H_2O のアブレーション噴出しがあるものと設定した。球の半径は 0.2m である。図 4 は計算で得られた HCN の質量分率の分布である。HCN は淀み点領域の壁近傍を主な生成場所とし、背面の凍結流によって後流に運ばれていく様子が分かる。図 4 には HCN の生成効率 η (図の破線で定義した流出面での HCN 質量流束をその面上流における H_2O のアブレーション噴出し総量で割ったもので定義) が書き込まれている。気流正面側で算出した効率が高く、後流で効率がほぼ一定になっていることは、淀み点領域での生成と背後での凍結流の組み合わせで説明することができる。これは、惑星科学においてクエンチと呼ばれる現象を説明している結果になっている。なお、ここで得られた効率は 0.0001 のオーダーであるが、このことは仮に直径 10m の氷天体が大気圏突入で消滅すると約 50kg の HCN が大気中に放出されることを意味し、原始地球において大気圏突入氷天体まわりの高温衝撃層内化学反応が生命前駆物質の生成機構として無視できないことを示している。

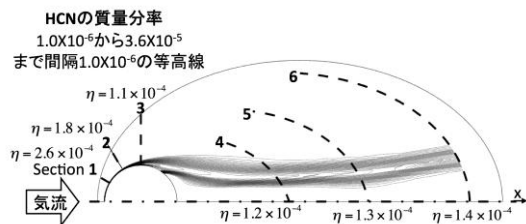


図 4 数値解析で得られた HCN 生成

③成果のインパクトと今後の展望

本研究で開発した保存形-非保存形ハイブリッド定式化計算コードは、複雑な反応システムを比較的容易にプログラム可能とし、かつ計算負荷の上昇も化学種数の増分程度に押さえている。この特長は生命前駆物質の生成を含む複雑な化学反応経路を扱う惑星科学での用途に適している。このような、極超音速熱化学非平衡数値流体力学コードは主に航空宇宙工学で発展をしてきたものであるが、惑星科学の研究者が本コードを利用できるよう、展開していきたいと考えている。

ここで得られた結果は既存の化学反応モデルをベースにしており、実験による結果の検証やモデルの改良が今後、必要となる。(1)で述べた極超音速風洞実験は、衝撃波流れや、損耗による氷塊形状変化などの力学的様相の研究には有効であるが、全温度が最高でも 1000K 程度のため、化学的な現象解明には使うことができない。その問題を解決するため、プラズマ放電を利用して局所的に気流に熱を投入し、化学反応を励起させることが考えられる。図 5 はこの手法に関し、実験と数値解析の結果を比較したものである。本研究成果を実験流体と数値流体の融合研究に応用することで、モデルが改良され、さらなる展開が期待できる。

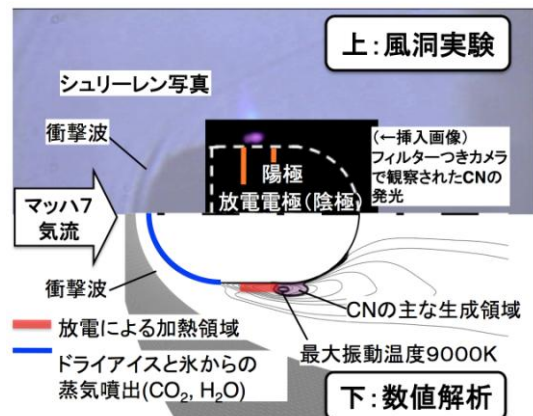


図 5 放電による化学反応励起実験

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 2 件)

① K. Suzuki, O. Imamura and T. Okunuki, Visualization of Ablation and Spallation of Icy Object in Hypersonic Flow at Mach Number 7, Visualization of Mechanical Processes, 査読有, Vol. 1, Issue 3, 2011, DOI: 10.1615/VisMechProc.v1.i3.100 (オンラインジャーナル)

② K. Suzuki and O. Imamura, Hypersonic

Wind Tunnel Experiments on Icy Body and Their Potential Contribution to Astrobiology, International Review of Aerospace Engineering, 査読無 (Invited), Vol. 3, No. 2, 2010, pp. 115-124

〔学会発表〕 (計 15 件)

- ①鈴木宏二郎, 大気圏突入氷天体アブレーションガスの化学反応に関する放電を利用した極超音速風洞実験, 日本地球惑星科学連合 2012 年度連合大会, 2012 年 5 月 22 日, 千葉市, 幕張メッセ
- ②鈴木宏二郎, 回収カプセル用アブレーション CFD コードを利用した氷天体大気圏突入化学反応流の解析, 平成 23 年度衝撃波シンポジウム, 2012 年 3 月 7 日, 柏市, 東京大学柏キャンパス
- ③ K. Suzuki, Thermochemical Nonequilibrium Flow Analysis for Atmospheric Entry of Icy Objects, 42nd AIAA Thermophysics Conference, 2011 年 6 月 29 日, アメリカ, ホノルル
- ④K. Suzuki, O. Imamura and T. Okunuki, Visualization of Ablation and Spallation of Icy Object in Hypersonic Flow at Mach Number 7, The 11th Asian Symposium on Visualization, 2011 年 6 月 6 日, 新潟市, 朱鷺メッセ
- ⑤鈴木宏二郎, 今村 宰, 奥抜竹雄, 氷天体大気圏突入を模擬した極超音速風洞実験でのスプレー観測, 日本地球惑星科学連合 2011 年度連合大会, 2011 年 5 月 24 日, 千葉市, 幕張メッセ
- ⑥Suzuki, K., Y. Izumi, T. Okunuki and O. Imamura, Study on Hypersonic Flow around Extraterrestrial Atmospheric Entry Objects, Tri-University Engineering Symposium on Aerospace Technology 2010, 2010 年 10 月 25 日, 韓国, ソウル, ソウル国立大学
- ⑦鈴木宏二郎, 大気圏に突入する氷天体まわりのアブレーションを伴う極超音速化学非平衡流解析, 日本流体力学会 年会 2010, 2010 年 9 月 9 日, 札幌市, 北海道大学
- ⑧O. Imamura, T. Okunuki and K. Suzuki, A Study on Ablation Behavior of Spherical Ice Piece in Hypersonic Flow, 10th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, 2010 年 6 月 28 日, アメリカ, シカゴ
- ⑨今村 宰, 奥抜竹雄, 鈴木宏二郎, 極超音速風洞気流中におけるワイヤー支持模型の挙動観測, 第 42 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 2010, 2010 年 6 月 24 日, 米子市, 米子コンベンションセンター
- ⑩鈴木宏二郎, 原始地球大気に突入する氷

天体まわりの化学反応流数値解析, 第 42 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 2010, 2010 年 6 月 24 日, 米子市, 米子コンベンションセンター

- ⑪ K. Suzuki, Chemical Nonequilibrium Viscous Shock-Layer Analysis over Icy Body Entering Planetary Proto Atmosphere, 6th Asia Workshop on Computational Fluid Dynamics, 2010 年 3 月 16 日, 柏市, 東京大学柏キャンパス
- ⑫O. Imamura and K. Suzuki, Observation of Ablation Behavior of an Ice Piece in a Hypersonic Flow, 10th Asian Symposium on Visualization, 2010 年 3 月 2 日, インド, チェンナイ, SRM University
- ⑬K. Suzuki, and O. Imamura, Hypersonic Aerothermodynamics on Atmospheric Entry of Icy Body and Its Potential Contribution to Astrobiology, 10th Asian Symposium on Visualization, 2010 年 3 月 1 日, インド, チェンナイ, SRM University (基調講演)
- ⑭鈴木宏二郎, 氷天体の大気圏突入に関する熱空力的研究と惑星科学への応用, 第 53 回宇宙科学技術連合講演会, 2009 年 9 月 11 日, 京都市, 京都大学吉田南キャンパス
- ⑮今村宰, 鈴木宏二郎, 極超音速気流中における氷アブレーションの実験的研究, 第 41 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 2009, 2009 年 6 月 18 日, 調布市, 宇宙航空研究開発機構調布航空宇宙センター

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 宏二郎 (SUZUKI KOJIRO)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授
研究者番号: 10226508

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

今村 宰 (IMAMURA OSAMU)
東京大学・大学院工学系研究科・助教
研究者番号: 50436515
(2009 年度、2010 年度)

矢野 良輔 (YANO RYOSUKE)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・特任助教
研究者番号: 10549596
(2009 年度、2010 年度)