

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289301

研究課題名(和文) 氷ペネトレータのダイナミクス解明と生命前駆物質探査への展開に関する研究

研究課題名(英文) Study on Dynamics of Penetrator into Ice and its Application to Space Exploration  
In Relation to Prebiotic Materials

研究代表者

鈴木 宏二郎 (Suzuki, Kojiro)

東京大学・新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：10226508

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：太陽系天体表面の氷は、生命誕生と関連して重要な探査対象である。本研究は氷に衝突して内部を探査する槍型プローブ(ペネトレータ)のダイナミクス解明を目的とした。バリスティックレンジによる高速衝突実験(最大速度約400m/s)を行い、クレータ形成や破碎氷片の流動、貫入軌道や停止深さ、姿勢の特性を明らかにし、頭部から尾部へ通じるダクトを設けると衝撃荷重の緩和や氷サンプル捕獲に有用なこと、などを見出した。実験結果より、氷中で機体にかかる荷重と貫入軌道を計算する半経験的解析モデルを開発した。極超音速風洞実験では、激しく蒸発しながら大気中を飛行する氷片周りの流れは不安定で、軌道が分散する可能性が指摘された。

研究成果の概要(英文)：Ice over the surface of bodies in the solar system is an important target for exploration from a viewpoint of the origin of life. The main objective of the study is to clarify the dynamics of the penetrator, which is a spear-type impact probe for investigation of the interior, into ice. The high-speed impact experiment at the maximum velocity about 400 m/s using the ballistic range reveals the characteristic features of the crater forming, motion of fragmented ice pieces, penetration trajectory, distance, stop angle and so on. The flow-through duct is useful for relaxation of the impact force and the sampling device. Based on the experimental results, the semi-empirical analysis model to calculate the force acting on the penetrator and its trajectory was developed. In the hypersonic wind tunnel experiment, it is pointed out that the flow around an ice piece with significant surface sublimation becomes unstable, resulting in dispersion of its trajectory in the atmosphere.

研究分野：航空宇宙流体力学

キーワード：ペネトレータ 太陽系探査 氷 高速衝突 バリスティックレンジ ダイナミクス 流体力学

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 日本の探査機はやぶさによる小惑星サンプル搭載カプセルの地球帰還(2010)や、アメリカの火星探査大型ローバーCuriosityの着陸(2012)など、太陽系天体における表面探査技術は成熟しつつあり、今後、内部探査へとフロンティアが移行していくのは明らかである。ペネトレータと呼ばれる内部探査プローブは、天体表面に衝突する際の運動エネルギーを貫入に利用するものであり、着陸機からドリルを伸ばしてボーリングを行う方式に比べ、システムの簡易化、小型軽量化、低コスト化が可能である点で優れている。しかし、高速貫入のダイナミクスを解明した上で、その衝撃に耐える機体設計をする必要があることから、これまでに実際の探査ミッションで用いられたことはなかった。日本では月の内部探査を目的としたLUNAR-A計画において、ミッション自体は中止(2007)になったものの、月レゴリス(天体表面を覆う砂層)を対象としたペネトレータ開発に成功している。ペネトレータは日本が独自技術を有する探査方法であり、将来、大いに活用すべきものである。そのためには、LUNAR-A用に開発された月ペネトレータ貫入ダイナミクスモデルを発展させ、対象をレゴリスだけでなく、より広げていくことが重要である。

(2) 生命誕生の謎を解くことは科学における最大の課題のひとつであるが、近年、これを宇宙的規模の普遍的問題としてとらえることで解決を見出そうとするアストロバイオロジーが提唱され、研究分野として定着しつつある。水は生命と深く結びついた物質であり、彗星の核など、氷または水を表面に持つ天体の探査は、生命前駆物質生成機構解明の上で必須である。

(3) 本研究は、以上の背景を踏まえ、氷をターゲットとしたペネトレータのダイナミクスが宇宙探査の工学と科学の両方において緊急課題であると考え、提案されたものである。氷を対象としたペネトレータのダイナミクスは過去に研究の例がない未解決の課題である。氷はペネトレータの衝突と貫入に際して破碎され、それによってできた小～微小氷片が群として集団運動する。その挙動については、流体力学的な理解が可能であると予想され、このことが新たな流体力学モデルの創造につながると期待される。

(4) 本研究は、バリスティックレンジや、高速風洞、流体数値シミュレーションといった、航空宇宙工学における流体力学の研究ツールを利用して進められる。その成果が、惑星科学的観点からのミッション検討にも有用であるということがわかれば、サイエンスとエンジニアの交流が促進され、理工工学連携による新しい探査計画の創成が期待される。

## 2. 研究の目的

本研究は、氷に高速衝突する物体が貫入していくダイナミクスを高速流体力学の観点

から解明し、天体内部を探査するプローブ(ペネトレータ)を用いた深宇宙における水関与の生命前駆物質探査の実現に向けた先導となることを目的としている。大気のある天体において、衝突で飛び出した氷片の高速飛行を理解するのに流体力学が必要であるのは自明だが、衝突によってターゲットが破碎されてできた氷片群の運動も一種の流動とみなすことができ、その理解には流体力学的考えが有効である。本研究では、バリスティックレンジ、極超音速風洞、数値流体力学といった高速流体研究技術を用い、(1)氷ペネトレータにおける高速衝突現象の解明、(2)氷ペネトレータのダイナミクス数値解析モデルの構築と機体デザイン、(3)衝突で飛び出し、大気中を飛行する氷塊の熱的空力的特性、を明らかにする。

(1) 氷ペネトレータにおける高速衝突現象の解明：

バリスティックレンジ(高速射出装置)を用い、氷をターゲットとして小型模型(重さ5g以下)の衝突・貫入実験を、形状、速度、姿勢、等の各パラメータを変えて行う。衝突速度はLUNAR-A月ペネトレータを参考に最大400m/s程度とする。破碎された氷片の挙動およびペネトレータの運動を高速ビデオによって詳細に観測する。衝突後にできるクレータを詳細に観察することで、ペネトレータの貫入経路に関する知見を得る。

(2) 氷ペネトレータのダイナミクス数値解析モデルの構築と実機の検討：

探査機としてのペネトレータ設計に求められることは、観測に必要な深さや姿勢で停止すること、衝突および貫入中に過大な荷重がかからないこと、過大な荷重がかからないようにするための衝突条件(速度、姿勢)が明らかであり、かつ、その条件範囲が広いこと、である。ここでは、(1)の実験結果が再現できるようモデルをチューニングし、氷ペネトレータのダイナミクス数値解析法を開発する。さらに、それを用いて、実際の探査機スケールを想定した氷ペネトレータの解析を行い、その実現性を明らかにする。

(3) 衝突で飛び出し、大気中を飛行する氷塊の熱的空力的特性：

大気を有する天体では、衝突によって破片が高速で飛散するため、氷塊の空力特性を知ることが必要である。氷塊を極超音速風洞の気流中に設置し、そのまわりの流れ場について調べる。均一な氷だけでなく、内部に昇華しやすい物質を有する不均一な氷塊の場合についても実験を行い、特性の違いを明らかにする。

## 3. 研究の方法

(1) 氷ペネトレータにおける高速衝突現象の解明：

実験は研究室が所有する衝撃風洞改造のバリスティックレンジを用いた。装置の概要を図1に示す。装置は、高圧筒、衝撃波管、加速管、測定部から構成される。ペネトレータ模型はサボに装着され、加速管の後端から挿入される。高圧筒（最大 10 気圧ゲージ）の高速バルブを開放すると高圧ガスが衝撃波管を進行した後、模型を加速し、測定室内に射出する。射出口を出たところに模型のみを通す直径の穴が開いたサボ分離板があり、ここから先は飛行体だけの飛行となる。ペネトレータ模型の衝突速度は、高圧室の充填圧力により、130～420m/s の範囲で変化させた。衝突時の姿勢（迎角＝機体軸と進行方向のなす角）は実験条件として制御することができず、サボ分離板通過時の模型の姿勢乱れによって起こる 0 度～約 45 度の範囲のばらつきを利用している。ターゲットは、27cm×27cm×21cm の純氷ブロックで、測定部内の台に設置される。図2にペネトレータ模型を示す。直径 6mm、長さ 27mm で統一し、頭部形状は、円錐、LUNAR-A ペネトレータを模したオジャイブ、負の曲率を持つ逆オジャイブとし、それぞれ、衝撃力緩和を期待した貫通ダクトが有るものと無いもの（鈍頭）の合計 6 タイプ（真鍮製、重量 2～2.5g）を試験した。大気圧下と減圧下での比較実験で、貫入特性に大きな変化が見られなかったことから、実験は常温常圧下で行われた。

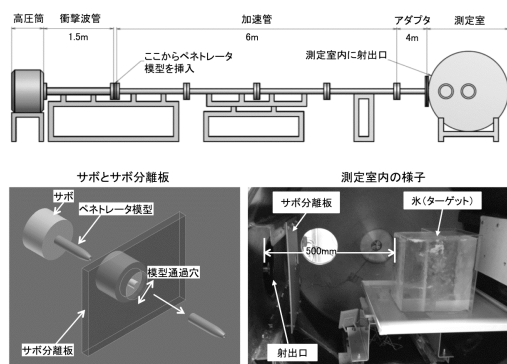


図1 バリスティックレンジ実験装置



図2 ペネトレータ模型

衝突の過程は高速ビデオ（最大 20,000 コマ/秒）で観察を行っている。衝突速度と姿

勢も、ビデオの画像解析から算出している。実験終了後に形成されたクレータを詳細に観察し、クレータ形状、ペネトレータ貫入距離、姿勢に関するデータを取得している。貫入実験直後にクレータへ石膏を流し込み、石膏が固化し、かつ、周辺の氷が融け去った後、石膏を取り出すと、それがペネトレータ貫入経路の型となっている。このようにして、貫入経路を可視化することができる。

(2) 氷ペネトレータのダイナミクス数値解析モデルの構築と実機の検討：

石膏注入法による可視化結果は、ペネトレータが氷の中であたかも流体中を運動するように貫入していくことを示唆していた。そこで、ペネトレータにかかる力のモデルを圧縮性流体の衝撃波理論にならって構築した。なお、結果として、LUNAR-A ペネトレータで作成したレゴリス対象のモデルが、パラメータを変えることで氷にも適用できることが分かった。

ペネトレータ表面はパネルに分割し、各パネルに作用する力を積分して機体全体に働く力を算出し、その運動方程式を解く。パネルにかかる力を計算する際に、(a)進行方向に対し幾何学的に面を向けているパネルのみが氷と接触して力を受ける、(b)各パネルに衝突する氷の速度ベクトルは機体の並進と重心周りの回転の重ね合わせとする、の仮定を置く。氷の表面は滑りやすいので、表面摩擦は無視し、垂直力のみを考える。垂直力は、氷の強度とパネルに垂直に当たる動的圧力で決まる力のどちらか卓越する方で決まる（前者は低速で卓越）と考える。動的な力の計算は、静止した氷を機体表面が衝撃波を作って圧縮していく 1 次元ピストン問題で置き換えることができ、機体表面の局所的進行速度と氷の有効音速を用いて記述される。このようにして、ペネトレータの荷重と運動を解析するモデルが構築された。このモデルには、氷の有効音速と機体の回転運動に対するダンピング効率の 2 つのパラメータが含まれており、これらは衝突条件と貫入距離、停止姿勢に関する実験結果を再現するように決められる。その結果、氷の有効音速は突入時の動圧の減少関数となることがわかった。このことは、衝突速度が上がるに従い、ペネトレータ周辺で氷の破砕が激しくなり、空隙率が増えていく事実からみて妥当である。

このモデルを用い、実際の探査ミッションで想定される機体サイズでの解析を行った。具体的には LUNAR-A と同規模の機体（全長 67.5cm、重量 15kg）に対する解析を行った。月ペネトレータの衝撃荷重に耐えられる機体の開発は LUNAR-A で成功しており、ここで推算された減速 G 等がそれと同程度であれば、現状の技術で、氷ペネトレータミッションは実現可能であると評



価できる。

(3) 大気を有する天体における衝突で飛び出す氷塊の熱的空力的特性：

大気のある天体の場合、衝突で飛び出す氷塊は、大気中を飛行することになる。衝突が高速で、氷片の飛行速度が極超音速である場合、空力加熱による表面損耗とアブレーションガスの強い噴出しを伴っているものと予想される。さらに、氷塊は均一なものであるとは限らず、内部に揮発性物質の核がある場合や、内部に空隙率の高い微細氷片が取り込まれた氷塊の場合、外殻の一部が空力加熱による表面損耗で失われた瞬間、内部の物質が大量に噴出することが考えられる。この現象を極超音速風洞で模擬するため、一様な氷球とドライアイスのコアとした氷球（初期直径30mm）を用いた実験を行い、その周りの流れ場を観察した。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の一樣流が直径約120mmの範囲で得られる。気流の全圧は最大950kPa、全温は最大約1000K、持続時間は最大60秒である。

#### 4. 研究成果

(1) 氷ペネトレータにおける高速衝突現象の解明：

図3に典型的な貫入時の高速ビデオ（10000コマ/秒）画像スナップショットを示す。形状はダクト付き逆オジャイブノーズで、衝突速度は286m/s、迎角は6度である。衝突直後（約1ms）にレゴリスへの衝突と同様なコーン状の噴出しが生じた後、50ms以上にわたって、破碎した氷のジェットが氷から垂直に噴出している。この垂直噴出しは、しばしば、一旦貫入したペネトレータをターゲットから放出してしまう効果がある。別の実験で、ペネトレータに貫通ダクトを設けると、頭部から取り込まれた破碎氷片が尾部から小ジェットとなって放出される映像が取得された。このことは、小ジェットの運動量だけ衝突時の衝撃力が緩和されることを示している。また、その一部をサンプルとして回収、分析するデバイスとしても有用である。

図4に石膏注入法による貫入軌道の可視化結果を示す。ペネトレータが迎角をもって貫入すると、氷の中での進行角は増加していき、最後は進行経路を大きく傾けて迎角ゼロでの直線減速運動になって停止することがわかる。本実験で氷にできたクレータは、いずれも、周辺の浅い穴であるスポール部と中央部での落ち込みであるピット部で構成されていたが、スポール部に比べ、ピット部では表面に細かい凹凸ができていく。このことは、貫入路に近い部分ほど破碎が繰り返されて氷片のサイズが小さくなっていくことを示唆している。スポール形成でできた氷片は粗く、レゴリスのクレータに見られるような外輪状の岡（リム）は形成されない。また、

機体表面近傍で破碎された細かい氷は、再圧縮されて固まった白い氷となっていた。

氷への衝突は天体衝突を想定したものがほとんどで、ここで明らかにしたような細長い物体の貫入過程やクレータの特徴を詳細に観察した例はなく、今後の研究を展開する上で貴重なデータとなる。また、破碎水の流動では、つぶされて、粒子間の間隔が狭まることによる圧縮は発生するが、真空や除荷にさらされても膨張は起こらない。研究を進める過程で、このような流動ダイナミクスを記述できる「圧縮されるが膨張しない流体 (Compressible and Non-Expanding Fluid)」モデルの着想に至り、有限体積法とリーマン解法による数値計算法を開発した。このモデルは氷片の流動だけでなく、凝集性のある粉体の流動一般に適用可能であり、新しい圧縮性流体力学の創成につながるものと期待される。

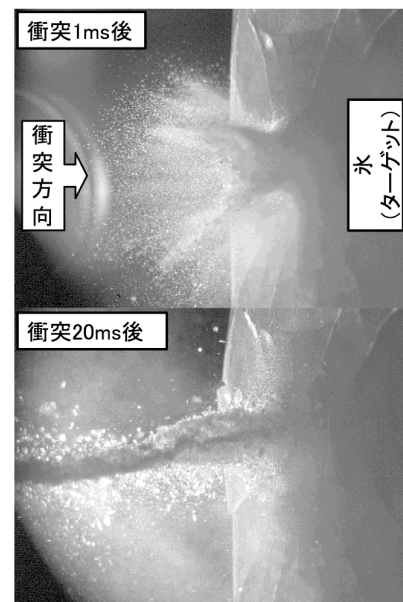


図3 ペネトレータ貫入時の高速ビデオ映像スナップショット

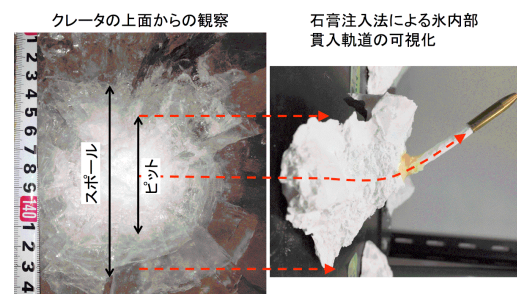


図4 石膏注入法で可視化された貫入軌道

(2) 氷ペネトレータのダイナミクス数値解析モデルの構築と実機の検討：

図5にダクト付きオジャイブ形状に対する小迎角と大迎角での貫入軌跡を示す。大迎角では、貫入軌道が大きく曲がり、氷の浅い部分で停止する計算結果が得られ

た。実際にはクレータができるので、貫入はせず、氷表面から弾き返されることになる。本モデルによる計算結果は、貫入深さと停止姿勢について実験結果を比較的良く再現していることがわかった。従来ある氷ペネトレータモデル（引用文献①）は、衝突速度と貫入深さの相関といった、大まかな傾向を与えるものでしかなく、機体設計に使えるような詳細な情報を与えることはできなかった。本研究で開発された解析モデルは、速度や姿勢、縦 G、横 G、機体への荷重分布などの時間履歴を推算できるため、実ミッションにむけた機体開発に有用なものとなっている。

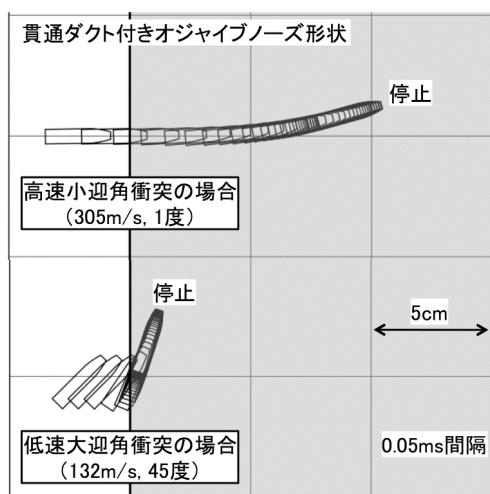


図5 氷ペネトレータ貫入解析結果例

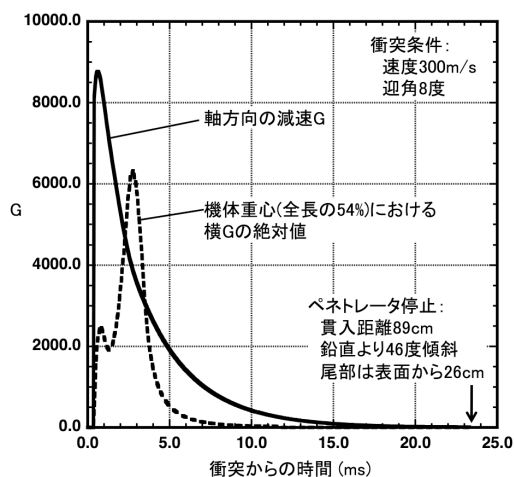


図6 LUNAR-A ペネトレータ実機相当機体への解析モデル適用結果

実験データでチューニングされた解析モデルを用いて、LUNAR-A 月ペネトレータ類似サイズの機体（全長 67.5cm、直径 15cm、重量 15kg、貫通ダクト付きオジャイブノーズ）を想定した解析を行った。図6に速度 300m/s、迎角 8 度（姿勢制御上想定される最大誤差）で衝突した際の機体軸方向減速 G と横 G の履歴を示す。この時、ペネトレータは深さ約 89cm、鉛直から約 46 度傾いた姿勢で停止し、観測に支障がない範囲に留まっている。機体

軸方向の最大減速 G は約 8500 で、月ペネトレータで想定した最大減速 G の約 5000 ~10000 と比べて過大なものとなっていない。以上から、既存の月ペネトレータ技術をベースに氷ペネトレータミッションを実施することは、技術的に十分可能なものであるとすることができる。

(3) 大気を有する天体における衝突で飛び出す氷塊の熱的空力的特性：

大気中を極超音速飛行する氷塊表面では、空力加熱によってアブレーションが起こり、前方の衝撃波を通過した高温空気と化学反応を起こす。極超音速熱化学非平衡流解析結果では、空気中を飛行する氷球の表面で H<sub>2</sub>O と CO<sub>2</sub> の噴き出しを与えると、その後流に生成物である HCN の尾ができていた。アブレーションを原料の供給、衝撃波背後の高温状態をエネルギーの供給、物体周りの流れを生成物の輸送メカニズムと考え、これらを極超音速流における化学工場と考える新しい解釈を提示した。

内部に表面と比べて揮発性の高い核を有する場合、空力加熱で外殻が損耗し、コアが露出した瞬間に、強いアブレーション噴出しが発生する。この噴出しは強いジェットとなり、物体まわりの流れ場を大きく変えてしまう。内部にドライアイスを含んでいる氷球の極超音速風洞実験を行ったところ、図7のシュリーレン写真に示す衝撃波が間欠的に大きく前方に突出する現象が観察された。その主要なメカニズムとして揮発性コア損失による物体正面側の凹面形状形成と強いアブレーション噴出しによる対向ジェットの存在が候補と考えられた。気流の不安定性は、不規則な横力を発生させるため、氷塊やそこからの生成物の分散が広がるメカニズムとなり得ることがわかった。

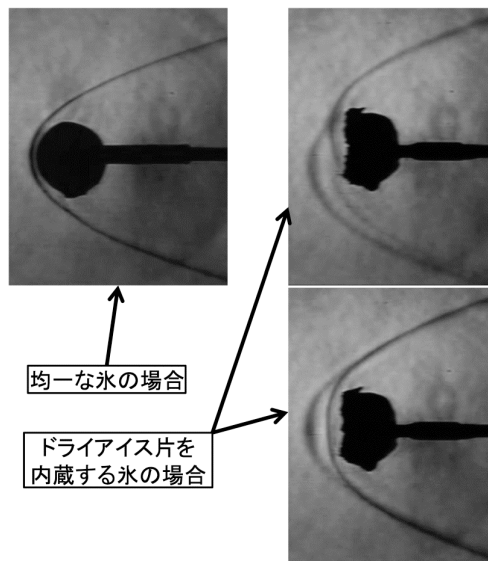


図7 ドライアイスのコアを持つ氷球周りの極超音速流れで観察された不安定性

<引用文献>

- ① C. W. Young, Penetration Equations, SAND97-2426, 1997.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① K. Suzuki, K. Namba and Y. Watanabe, Visualization of High-Speed Impact of Penetrator into Icy Target, Journal of Flow Control, Measurement & Visualization, 査読有, Vol. 4, 2016, 56-69, DOI:10.4236/jfcmv.2016.42006.

[学会発表] (計 16 件)

- ① K. Suzuki, K. Namba and Y. Watanabe, Visualization of High-speed Impact of Penetrator into Icy Target, The 13th International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization, 2015 年 11 月 17 日, ドーハ (カタール) .
- ② K. Suzuki, K. Namba and Y. Watanabe, Study on Dynamics of Penetrator into Ice, 30th International Symposium on Space Technology and Science, 2015 年 7 月 8 日, 神戸国際会議場 (兵庫県・神戸市) .
- ③ 鈴木宏二郎, 圧縮性非膨張性流体モデルのダイナミクスに関する考察, 第 47 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, 2015 年 7 月 2 日, 東京大学生産技術研究所 (東京都・目黒区) .
- ④ 鈴木宏二郎, 衝突貫入シミュレーションのための圧縮性非膨張性流体ソルバーの開発, 日本地球惑星科学連合 連合大会 2015 年大会, 2015 年 5 月 24 日, 幕張メッセ (千葉県・千葉市) .
- ⑤ 難波和也, 柴田寿一, 大道勇哉, 渡邊保真, 鈴木宏二郎, SPH 法による異種物質衝突解析での計算スキーム検討, 第 28 回数値流体力学シンポジウム, 2014 年 12 月 9 日, タワーホール船堀 (東京都・江戸川区) .
- ⑥ 難波和也, 大道勇哉, 渡邊保真, 鈴木宏二郎, 氷天体を目標としたペネトレータの衝突貫入における機体形状の効果, 第 58 回宇宙科学技術連合講演会, 2014 年 11 月 12 日, 長崎ブリックホール (長崎県・長崎市) . (筆頭著者が若手奨励賞 (優秀論文) 受賞)
- ⑦ 鈴木宏二郎, 渡邊保真, 強いアブレーション噴出しを伴う氷塊まわりの極超音速流れ, 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, 2014 年 7 月 3 日, 弘前文化センター (青森県・弘前市) .
- ⑧ 難波和也, 鈴木宏二郎, 氷天体用ペネトレータ衝突貫入ダイナミクスの基礎特性に関する研究, 日本地球惑星科学連合 連合大会 2014 年大会, 2014 年 4 月 29 日, パシフィコ横浜 (神奈川県・横浜市) .
- ⑨ 難波和也, 鈴木宏二郎, 氷へのペネトレ

ータ衝突・貫入に関するパリスティックレンジ実験, 平成 25 年度衝撃波シンポジウム, 2014 年 3 月 7 日, 青山学院大学相模原キャンパス (神奈川県・相模原市) .

- ⑩ 難波和也, 鈴木宏二郎, 氷天体用ペネトレータの貫入特性に関する基礎研究, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会, 2013 年 10 月 11 日, 米子コンベンションセンター (鳥取県・米子市) .

- ⑪ K. Suzuki and Y. Watanabe, Study on Chemical Factory in Hypersonic Wind Tunnel Flow Using Ablation and Electric Discharge, 44th AIAA Thermophysics Conference, 2013 年 6 月 25 日, サンディエゴ (アメリカ) .

[図書] (計 0 件)

[産業財産権] (計 0 件)

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

なし