

地球大気を考慮した極超音速飛行隕石のソニックブーム解析 Sonic Boom Analysis of Meteorite at Hypersonic Speeds in Earth Atmosphere

山下 礼^{1*}; 鈴木 宏二郎¹
YAMASHITA, Rei^{1*}; SUZUKI, Kojiro¹

¹ 東京大学大学院新領域創成科学研究科

¹ Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

隕石落下時の問題点として、高速飛行することにより発生する衝撃波、すなわちソニックブームがあげられる。2013年2月にロシアのチェリャビンスクで観測された事象では、隕石から発生したソニックブームにより窓ガラスや建物が損壊し、多くの人的被害を被った。このことから、隕石がもたらすソニックブームの影響を検証する事は重要と考えられる。本研究では、航空宇宙工学で培われたソニックブーム予測手法を適用することで、極超音速飛行する隕石から発生したソニックブーム強度を予測する。具体的には、数値流体力学 (CFD) に基づいた予測手法 (R. Yamashita and K. Suzuki, APISAT2013, No. 02-05-3) を適用することで、衝撃波が地球大気内を地上まで伝播する様子を明らかにする。解析対象は、高度 10 km をマッハ 10 (約 3 km/s) で水平定常飛行する隕石を想定し、直径 20 m の球体まわりの流れ場とした。地球大気モデルは国際標準大気 (ISO 2533:1975) を用いた。国際標準大気では、温度が高度の関数で与えられ、圧力、密度は理想気体の状態方程式及び静水圧平衡の式から導出される。支配方程式は、重力項を付加した 3 次元 Navier-Stokes 方程式である。計算格子は、2 次元格子を物体軸周りに 180 度回転させた格子であり、格子数は約 554 万点である。地球大気の場合、高度に応じて大気の状態が変化するため、衝撃波角も変化する。そのため、予備計算を行った後、物体前方から発生する bow shock wave に沿った適合格子を形成し、再度計算を行った。なお、計算負荷を軽減するため、計算領域をセクターに分割し、物体近傍のみ 2 次元軸対称解析を実施した。対流項の離散化は AUSM 系のスキームである SHUS (E. Shima and T. Jounouchi, 第 14 回航空機計算空気力学シンポジウム論文集, pp.7-12, 1997) を 3 次精度 MUSCL 法により高次精度化したものを用いた。粘性項は 2 次精度中心差分で評価し、重力項は生成項として扱った。また、時間積分は MFGS 陰解法 (嶋英志, 第 29 回流体力学講演会論文集, pp.325-328, 1997) で行った。

数値解析結果より、球体から発生する衝撃波は、物体前方の bow shock wave と物体後流の trailing shock wave である事が分かる。そして、bow shock wave と trailing shock wave は地上にかけて近づき、高度 8 km までに統合する。そのため、極超音速飛行する隕石の場合、急峻な圧力上昇 (爆発音) が生じるのは 1 回のみとなり、bow shock wave より弱い trailing shock wave の寄与は小さくなる (超音速機の場合、N 型の波形を形成し、爆発音の回数は 2 回となる)。チェリャビンスクの事象では、隕石が爆発により 3 個に分裂し、地上で 3 度の爆発音が発生したと報告されている (NHK COSMIC FRONT: ロシア隕石の全貌)。つまり、隕石の破片の数と爆発音の回数が一致し、本解析結果から得られる特徴とも一致する。一様大気を伝播する衝撃波は、遠方にかけて円錐状に広がるため、地上にかけて常に減衰し続ける。一方、地球大気の場合、地上にかけて大気圧及び大気温度が上昇するため、圧力上昇値を増幅させる効果も働く。特に、国際標準大気では高度 11 km から地上にかけて、温度が 6.5 K/km の割合で上昇し、増幅効果の影響が顕著に表れる。その結果、物体近傍では最大圧力上昇値が急激に減少するが、高度 5 km から地上にかけてはほとんど変化が見られない。また、地球大気では衝撃波の伝播方向によって圧力上昇値の減衰傾向が異なり、ソニックブーム強度は鉛直下方で最も強くなる。本解析結果では、地上での反射係数が 1.9 の場合、隕石直下で圧力上昇値が約 1.5 kPa となり、次世代超音速機の開発で求められている基準値 (24Pa) の約 63 倍に相当する。チェリャビンスクの隕石では、窓ガラスの損傷から圧力上昇値を導出した結果、 3.2 ± 0.6 kPa であったと報告されている (NATURE 12741)。従って、計算条件と実際の飛行条件は異なるが、圧力上昇値は共に 1 kPa のオーダーであり、ソニックブームの伝播傾向を検証する上では有用な結果と考えられる。そして、1 kPa オーダーの圧力上昇がもたらす影響は甚大であり、チェリャビンスクで起きた事象はその影響を顕著に表した事例である。

本研究では、航空宇宙工学で培ったソニックブーム予測手法を適用することで、隕石から発生したソニックブーム強度を評価した。今後はパラメトリックスタディを行うことにより、実際の隕石のサイズや飛行条件を推算できると考えられる。

キーワード: ソニックブーム, 隕石, 極超音速流, CFD, 衝撃波
Keywords: Sonic Boom, Meteorite, Hypersonic Flow, CFD, Shock Wave

チェリャビンスク火球の明るさと色の時間変化 The brightness and the color temperature of the Chelyabinsk bolide

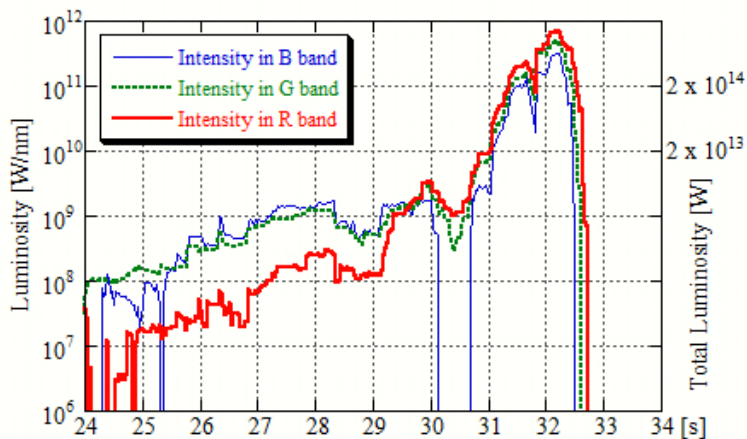
柳澤 正久^{1*}
YANAGISAWA, Masahisa^{1*}

¹ 電気通信大学
¹ Univ. Electro-Communications

2013 年 2 月 15 日 3 時 20 分 (世界時) のロシア・チェリャビンスク市近郊で起きた火球は、車載カメラを含む多くのモニターカメラによって撮影され、その画像がインターネット上に公開されている。我々はその中の一つを解析し、明るさと色の時間変化を調べた (明るさの時間変化を図に示す)。結果は次の通りである。(1) 光エネルギーのほとんどは 1~2 秒間のフレア (光度が急激に増大する現象) で放射された;(2) フレア以前の放射は黒体放射ではない;(3) フレア時のスペクトルは 3500 K の黒体放射と矛盾しない;(4) 3500 K の黒体放射を仮定すると全波長にわたって単位時間に放射されるエネルギーは最大で 1.0×10^{15} W であった;(5) 全放射エネルギーから推定される衝突エネルギーは 1.9×10^{15} J (TNT 爆薬 450 kton のエネルギーに相当) であった。また、3500 K の黒体放射をする黒体の面積は 120 km^2 であり、火球の軌跡に沿った半径 1 km、長さ 20 km の円柱の表面からの放射が考えられる。

図の説明：単位波長当たりの光度 (左側の目盛: RGB 各バンドについて太線, 破線, 細線で示す)。光度は単位時間当たり全方向に放射されるエネルギーと定義する。右側の目盛は 3500 K の黒体放射を仮定した場合の G バンドの値 (破線) から算出される全波長での光度である。横軸の時刻は 2013 年 2 月 15 日 3 時 20 分の秒 (世界時)。

キーワード: 火球, 天体衝突, 太陽系小天体, チェリャビンスク, スペースガード, 隕石
Keywords: bolide, meteoroid impact, small solar system objects, Chelyabinsk, Space guard, meteorites



大型レーダー流星ヘッドエコー観測による太陽系ダスト軌道の統計的分布 Statistical distribution of the solar system dusts by meteor head echo observations with the large-aperture radar

阿部 新助^{1*}; Kero Johan²; 中村 卓司³; 藤原 康徳⁴; 渡部 潤一⁵
ABE, Shinsuke^{1*}; KERO, Johan²; NAKAMURA, Takuji³; FUJIWARA, Yasunori⁴; WATANABE, Jun-ichi⁵

¹ 日本大学理工学部航空宇宙工学科, ² スウェーデン宇宙物理研究所, ³ 国立極地研究所, ⁴ 日本流星研究会, ⁵ 国立天文台
¹Department of Aerospace Engineering, College of Science and Technology, Nihon University, ²Swedish Institute of Space Physics (IRF), ³National Institute of Polar Research (NIPR), ⁴Nippon Meteor Society, ⁵National Astronomical Observatory of Japan

メテオロイド(流星)が超高速で大気突入すると、高度約70-130kmにおいて流星物質のアブレーションによりプラズマが形成さる。特に、流星ヘッドプラズマから反射される電波を流星ヘッドエコーという。我々は、京都大学生存圏研究所・信楽MUレーダー(東経136.10度、北緯34.85度)を用いた、流星ヘッドエコー観測を実施した。MUレーダーにより、2009年以降、流星の経路と惑星間軌道が継続的に導出されてきた。2014年1月現在、約12万個の流星軌道が高精度で求まっている。典型的な軌道決定誤差は、速度で0.3 km/s、軌道長半径で0.1 AUと非常に小さな誤差である。これまで、このような高精度で膨大な数の流星軌道が通年を通して観測されたことはない。我々は、このデータベースの統計解析から得られた軌道分布、母天体彗星・小惑星との関連などについて報告する。

キーワード: 流星, ダスト, メテオロイド, 彗星, 小惑星, MUレーダー
Keywords: meteors, dusts, meteoroids, comets, asteroids, MU radar

火星表面のサブミリ波偏波放射観測の室内実験による検討 Laboratory experiment simulating Martian surface observation with submillimeter-wave polarimetric radiometry

有村 健斗^{1*}; 落合 啓²; 菊池 健一²; 北 和之³; 笠井 康子²

ARIMURA, Taketo^{1*}; OCHIAI, Satoshi²; KIKUCHI, Kenichi²; KITA, Kazuyuki³; KASAI, Yasuko²

¹ 茨城大学大学院理工学研究科, ² 情報通信研究機構, ³ 茨城大学理学部

¹Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University, ²National Institute of Information and Communications Technology, ³Faculty of Science, Ibaraki University

背景・目的:

海洋の存在しない火星大気の大循環において、大気と地表面下の間で昇華・凝結過程を通して生じる物質、エネルギー交換サイクルが大きな影響を持つと考えられ、その理解のために火星の地表面状態の広域な変動を捉えることが重要となる。このような変動を捉える上で周回衛星を用いた地表面観測が重要であるが、火星大気中に存在するダストが観測の妨げとなっているため継続的な光学観測が困難とされている。そこで、波長がダスト粒径よりも大きいサブミリ波偏波を利用した放射観測を行うことで火星ダストの影響を受けず、地表面の継続観測が可能となり、ごく浅い火星表面下の温度や物質組成などの情報を得ることができる。しかし、今までの惑星探査において周回衛星を用いた惑星表面のサブミリ波偏波放射観測が行われた例はなく、観測を提案するためには表面観測におけるこの観測手法の有効性を十分に検討する必要がある。本研究では火星周回衛星による観測を模擬した室内実験を行うことによって観測の有効性を議論することを目的とする。

測定原理:

地表面をある入射角で観測する衛星で受信される放射強度は、地中の温度に応じた放射が地表面へ伝搬し大気中へ射出した成分と、大気からの放射が地表面で散乱された成分の和がさらに大気中を伝搬してきたものとなる。地表面の射出率および反射率は衛星の入射角、地表物質の誘電率や表面粗度、偏波によって決定する。複数の入射角、偏波、周波数で火星表面を観測することで火星表面の温度、誘電率、表面粗度を推定することが可能となる。

室内実験:

衛星によって観測される放射強度から地表面の温度や誘電率、表面粗度などの地表面状態を知るためには衛星の入射角および偏波方向ごとに得られる射出率、反射率と地表面状態を表すパラメータとの関係性を理解しておく必要がある。そこで、衛星観測を模擬した測定を行うことが出来る実験システムを構築した。実験システムは散乱測定部、光学系部、送受信機から構成される。散乱測定部は火星平均気圧と表面温度を再現できるように真空容器で作られ、冷却装置で測定資料を火星表面温度に冷却することが可能になっている。また、光学系部で測定する入射角と偏波を制御することができ、送受信機を併用することで測定試料の反射率が、受信機のみを用いることで放射強度および射出率が測定可能となっている。本研究ではサブミリ波放射強度測定から火星表層を模擬した測定試料から温度、誘電率、表面粗度などを導出できるか検討することを目的としているが、そのためには地表面状態のパラメータひとつひとつが放射強度と放射率、反射率に与える影響について調べる必要がある。今回は比較的組成や粒径が単一であると考えられるアクリル平板、アルミナボールのサブミリ波偏波反射率を測定し、単一組成の誘電体をもつ誘電率や表面粗度が反射率に与える影響について調べた結果を報告する。この結果を踏まえることで、火星表面のような混合した物質組成をもつ誘電体とその反射率の関係性の検討を行うことができ、さらに放射強度、放射率との関係性について検討を行うことが期待される。

キーワード: 火星, 表面観測, サブミリ波

Keywords: Mars, surface observation, submillimeter-wave

ALMA 望遠鏡によるエンセラダス・プルーム内の HCN 観測可能性とその科学的意義

Scientific importance and possibility of HCN detection in Enceladus plumes by ALMA

兒玉 賢哉^{1*}; 関根 康人¹; 飯野 孝浩²; 西合 一矢⁶; 笠井 康子³; 佐川 英夫⁴; 前澤 裕之⁵
KODAMA, Kenya^{1*}; SEKINE, Yasuhito¹; IINO, Takahiro²; SAIGO, Kazuya⁶; KASAI, Yasuko³; SAGAWA, Hideo⁴; MAEZAWA, Hiroyuki⁵

¹ 東京大学大学院新領域創成科学研究科, ² 名古屋大学理学研究科太陽地球環境研究所, ³ 独立行政法人通信総合研究所電磁波計測研究センター, ⁴ 情報通信研究機構, ⁵ 大阪府立大学大学院理学系研究科物理科学科, ⁶ 自然科学研究機構国立天文台
¹Dept. Complexity Sci. and Engr. Univ. of Tokyo, ²Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Graduate school of science, Nagoya University, ³Senior Researcher Global Environment Division National Institute of Information and Communications, ⁴National Institute of Information and Communications Technology, ⁵Department of Physical Science Osaka Prefecture University, ⁶National Astronomical Observatory of Japan

Saturn's icy moon, Enceladus, exhibits ongoing geological activities, including eruption of water-rich plumes from warm fractures near the south-pole region. These geological activities together with the findings of Na-rich salts in the plumes suggest the presence of an interior liquid ocean beneath the icy crust. This demonstrates that Enceladus' plumes provide a unique opportunity to investigate the chemical composition of oceanic water, possible geochemical reactions, and habitability of the icy moon. However, due to limitations of in-situ measurements of the plumes by the Cassini spacecraft, it is not able to identify or quantify some key molecules, which could probe physical and chemical conditions of the ocean.

Here we discuss scientific importance and possibility of detection of HCN in the plumes by large ground-based, sub-millimeter telescope, ALMA. Because HCN is one of the fundamental materials contained in icy planetesimals in the outer solar system, and because it readily hydrolyzes in warm water (>50 °C), a lack of HCN suggests that Enceladus' interior would have experienced relatively high temperatures, i.e., a presence of hydrothermal activity. On the other hand, if HCN were present in the plumes, this in turn means that Enceladus would have been cold throughout its history. Given the results of thermal evolution model, the latter case suggests late formation of the Saturnian system (>5Myr) after CAI formation, which would result in a depletion of short-lived radiogenic heat source in Enceladus.

To evaluate the possibility to detect HCN in the plumes by ALMA, we first estimate a special distribution of H₂O gas density based on results from Cassini's observations and plume eruption modeling. Then, we calculate radiative temperatures of HCN in the field of view of ALMA as a function of HCN concentration. Finally, the upper limit of HCN as a function of observation time will be obtained. For instance, if HCN were not detected within 4-6 hours of observation time, an upper limit of the HCN concentration in the plumes becomes 0.2% relative to water, which is comparable to a typical concentration of HCN in comets. Thus, the ALMA telescope is capable of detecting HCN in Enceladus' plumes within a reasonable observation time, if it were present in an amount comparable to that of comets. In either case whether HCN were present or not, we would be able to constrain geochemical reactions and thermal history of Enceladus as well as the timing of formation of Saturnian system.

円盤内縁近傍の惑星が円盤に与える影響の解析に向けて Development of SPH: Toward Understanding of Disk-planet Interaction Near the Disk Inner Edge

藤井 悠里^{1*}; 岩崎 一成¹; 塚本 祐介¹; 犬塚 修一郎¹

FUJII, Yuri^{1*}; IWASAKI, Kazunari¹; TSUKAMOTO, Yusuke¹; INUTSUKA, Shu-ichiro¹

¹名古屋大学

¹Nagoya University

系外惑星の多数発見に伴い、中心星のごく近傍を回転する惑星が数多く存在することが明らかにされてきた。これらの惑星の多くは円盤の外側で形成され、円盤と惑星との相互作用で角運動量を失い、内側へと移動してきたと考えられている。惑星が円盤内縁まで移動してくると、円盤ガスとの相互作用がなくなるのでそれ以上落下せずに、円盤近傍にとどまることができる。この惑星は円盤の進化に大きな影響を与える。よって、本研究では円盤内縁の近傍の惑星が円盤に与える影響を解明するためのコード開発を行う。中心に空隙がある場合や、惑星が楕円率の大きい軌道を持っている場合には従来用いられてきた格子法を用いた手法では計算が困難である。しかし、SPH法を用いることでこれらを取り扱うことができると期待される。この問題の解決には、SPH法の精度を上げることが本質的である。本講演では、コード開発の詳細と性能評価について発表する。

キーワード: 系外惑星, 原始惑星系円盤, SPH法

Keywords: exoplanet, protoplanetary disk, smoothed particle hydrodynamics

原始惑星系円盤進化にともなう微惑星組成進化 Evolution of a protoplanetary disk and chemical composition of planetesimals

永原 裕子^{1*}; 小澤 一仁¹
NAGAHARA, Hiroko^{1*}; OZAWA, Kazuhito¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科

¹Dept. Earth Planet. Sci., The Univ. Tokyo

We investigate physico-chemical evolution of the proto-solar disk at the early stage by developing a new model that combines physics and chemistry with special interest to temporal and spatial evolution of the disk. Then, we discuss how the composition of planetesimals varies depending on the time and space for their formation including refractory or volatile rich ones.

The basic of the model is a radial advection-diffusion equation, which includes drift and dispersion by turbulence with stochastic diffusion term calculated by the Monte Carlo method and which shows the diffusivity by the viscosity of the disk. The difference from conventional disk models is that the present method stands on the Lagrangean differentiation, and it is able to trace the movement of individual particles.

A considerable amount of materials in the inner regions are transported outward at the early stage ($t < 10^5$ yrs), which is because the surface density is much larger in the inner region at the early stage of the disk evolution. Although the outward flux is large at the early stage, there comes a larger amount of materials from the outer region even within $\sim 10^5$ yrs. The mixing ratio of materials from the inner regions to outer regions is almost unity within several AU all through the disk evolution, suggesting that thermally processed materials and unprocessed materials were mixed in the inner region of the disk. It is important that the relative abundance of materials from outer regions becomes larger with time, which implies that planetesimals formed within several AU at the early stage of the disk evolution consists partly of materials initially located at the inner regions and partly from outer regions, but those formed at the later stage contain more abundant low materials transported from the outer regions.

The mixing ratio of materials from the inner and outer regions is almost unity at the early stage but the fraction of materials from the outer regions increases with time. Combining the information about the maximum temperature that the particles experienced, we can constrain that early differentiated planetesimals such as the parent body of angrites and planetesimals with refractory-rich compositions such as CV chondrites were formed at the inner region of the disk in $\sim 10^5$ yrs. On the other hand, planetesimals for other carbonaceous chondrites or ordinary chondrites that are depleted in sulfur were formed later, possibly at $\sim 10^6$ yrs.

キーワード: 原始惑星系円盤, 化学進化, ダスト移動

Keywords: protoplanetary disk, chemical evolution, dust movement

静電反発を考慮したダスト合体成長の大局的数値計算法 Simulating global dust coagulation with grain charging

奥住 聡^{1*}; 田中 秀和²
OKUZUMI, Satoshi^{1*}; TANAKA, Hidekazu²

¹ 東京工業大学大学院理工学研究科, ² 北海道大学低温科学研究所

¹Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, ²Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

Growth of dust particles by collisions is the initial step of planet formation. Conventionally, the theory of dust coagulation in protoplanetary disks assumed electrically neutral dust particles, but in reality dust in the disks is likely to be charged given that the disks are ionized by cosmic rays and stellar X-rays. In our previous work (Okuzumi 2009; Okuzumi et al. 2011a,b), we extensively studied the role of grain charging in protoplanetary dust growth, and concluded that dust growth stalls at its early stage because of the excessively large (negative) charges carried by small dust aggregates. We also predicted that this "charge barrier" could be overcome (albeit on a very long timescale) if dust in the disks is globally transported by radial drift and turbulent diffusion.

The purpose of the present work is to demonstrate the breakthrough of the charge barrier in a global setup. In order to do this, we have developed a new simulation code for global dust coagulation including the effect of grain charging. The new code is based on a previous code for planetesimal formation (Brauer et al. 2008; Okuzumi et al. 2012) but now calculates charging and Coulomb repulsion of dust particles at each location in a disk consistently with the particle size distribution at the same location. To verify the code, we perform some test simulations and compare them with the prediction from our previous theory.

キーワード: ダスト, 帯電, 惑星形成, 原始惑星系円盤

Keywords: dust, charging, planet formation, protoplanetary disk

潮汐場におけるラブルパイル天体の衝突 N 体シミュレーション N-body simulations of Rubble pile Collisions in Tidal fields

兵頭 龍樹^{1*}; 大槻 圭史¹

HYODO, Ryuki^{1*}; OHTSUKI, Keiji¹

¹ 神戸大学理学研究科

¹Kobe University, Graduate School of Science

土星の F リングなどは中心惑星のロッシュ半径の外側ではあるが、中心惑星に比較的近い領域であるため中心惑星の潮汐力の効果が無視できない領域に位置している。一方、カッシーニによる観測結果から F リングにはリング粒子が自己重力で集積したアグリゲイトが多数存在していると示唆されている。さらに形成されたアグリゲイトは潮汐力で中心惑星方向に引き延ばされて、球体ではなく楕円体として存在していると考えられる。潮汐場を無視した自由空間における天体同士の衝突については小惑星や微惑星の破壊プロセスとして多くの先行研究で扱われてきた。一般的にこれらの衝突では head-on 衝突において破壊は衝突エネルギーによって構成物質が重力的に散乱されることでおこる。つまり、衝突エネルギーの増加に伴って最大破片サイズは小さくなる傾向にある。しかし、中心惑星に近く潮汐力が強く効いてくる領域ではアグリゲイト自身の体積と重力ポテンシャルの大きさが同等のものとなってくる。このような状況におけるアグリゲイト同士の衝突は自由空間のものとは異なったものとなりうると予想される。

本研究では粒子間の相互重力と衝突を考慮して潮汐場を再現する系における局所 N 体計算を用いて楕円体アグリゲイト同士の衝突シミュレーションを行ない、破壊条件が中心惑星からの距離にどのように依存するかを調べた。衝突方向としては動径方向と軌道運動方向の二通りを考慮し、衝突速度をパラメーターとした。

本研究によってロッシュ半径のすぐ外側の潮汐力が強く作用する領域では、動径方向の衝突よりも軌道運動方向の衝突の方がはるかに壊れやすいことが分かった。さらに動径方向の衝突においては自由空間の場合のように衝突エネルギーの増加によって最大破片サイズが律せられる結果にはならず、より複雑な速度依存性がみられた。そして、これらの領域では、自由空間において従来合体するだろうと考えられていた脱出速度よりもはるかに小さい速度で衝突した場合でも破壊につながるということが分かった。このことから潮汐力が卓越する領域におけるアグリゲイト同士の衝突において、その破壊プロセスを議論する際に衝突エネルギーだけでなく、衝突直後のアグリゲイトの形状も重要となることが分かった。また、中心惑星からより遠ざかるにつれて潮汐場の効果は小さくなることで、衝突結果は自由空間で得られるものに近づいていくことを確認した。

以上の結果は、the Astrophysical Journal に投稿済みである。

キーワード: リング, 衛星, アグリゲイト

Keywords: rings, satellites, aggregates

微惑星衝突における衝突破壊モデルの再検討 An improved fragmentation model on outcome of planetesimal collisions

藤田 智明¹; 玄田 英典^{2*}; 小林 浩³; 田中 秀和⁴; 阿部 豊¹

FUJITA, Tomoaki¹; GENDA, Hidenori^{2*}; KOBAYASHI, Hiroshi³; TANAKA, Hidekazu⁴; ABE, Yutaka¹

¹ 東京大学 理学系研究科, ² 東京工業大学 地球生命研究所, ³ 名古屋大学 理学研究科, ⁴ 北海道大学 低温科学研究所

¹Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo, ²Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology,

³Department of Physics, Nagoya University, ⁴Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

惑星形成過程において、微惑星同士または微惑星と原始惑星の衝突は頻繁に起こり、そのような衝突を経て天体は成長する。ところが、そのような衝突には破壊的な衝突も含まれており、それらは成長を促すどころか天体を粉々にしてしまう。すなわち、そのような衝突がどの程度破壊的であったかを知ることは、微惑星の成長過程を正しく理解する上で重要である。

これまでに、衝突前の質量の半が飛び散ってしまうような破壊的な衝突を引き起こす衝突エネルギー Q_D^* は様々な条件で調べられており (Holsapple et al., 2002; Benz & Asphaug, 1999; Leinhardt & Stewart, 2009)、惑星形成を論じる際にはそのような破壊的な衝突のみが重要視されてきた。 Q_D^* の値で現在広く引用されているのが、Benz & Asphaug 1999 によって計算されたものである。彼らは非常に多くの衝突シミュレーションにより Q_D^* を決定しているが、彼らの数値シミュレーションにおける解像度は極めて低く、 Q_D^* の値が収束する解像度も調べていない。また、最近の研究によると、衝突エネルギーが Q_D^* よりも小さいような小規模な衝突も、そのような衝突は頻度が多いため、惑星の成長を考える上で重要であることが示唆された。ところが、そのような小規模な衝突から大規模衝突をつなぐ信頼できるモデルも存在していない。

惑星の成長をより正確に議論するためには、正しい Q_D^* の値と、小規模衝突における、衝突エネルギーとその際に飛び散るイジェクタ質量との関係が必要となる。本研究では、衝突シミュレーションにより、 Q_D^* の解像度依存性を調べ、微惑星衝突における Q_D^* の値を再調査した。また、小規模衝突における衝突エネルギーとイジェクタ質量の関係性を定式化した。本研究では、SPH 法 (自己重力入り、物質強度抜き) と呼ばれる流体計算コードにより、岩石微惑星同士の衝突シミュレーションを系統的に行った。衝突条件としては、100km、10km サイズのターゲット天体と様々なサイズの天体の衝突を考え、衝突速度、衝突角度、解像度を様々に変えて計算した。

その結果、 Q_D^* の値は解像度に依存することがわかった。これは衝突後の衝撃波、希薄波伝播及び破片放出過程で発生するシア一流により、初期エネルギーの、ターゲット天体の運動エネルギーと内部エネルギーへのエネルギー分配率が解像度依存性を持つことに由来する。このエネルギー分配率は 7.5×10^7 粒子数を費やしたところで収束する。Benz & Asphaug 1999 で使われていた粒子数は 5×10^4 であり、正しい Q_D^* の値を求めるには不十分であることがわかった。本研究では、可能な限り高解像度で Q_D^* を求めたのだが、その値は彼らの値よりも半桁ほど小さくなった。これは微惑星同士の衝突がこれまで考えられてきたよりも破壊的であったことを意味する。実際に本研究と彼らの Q_D^* の値を使って、Kobayashi et al. 2010 で提案された解析解により原始惑星の成長を見積もったところ、最終的に形成される原始惑星質量は、先行研究の値を用いた場合よりも半分ほど小さくなった。

また、小規模な衝突を含めた様々な規模の衝突に対する衝突エネルギーと破片質量の関係性をスケーリング則として定式化した。このスケーリング則は、ターゲットサイズ、 Q_D^* で規格化した衝突エネルギー、衝突速度でスケーリングできることもわかった。しかし、衝突角度には依存し、異なる式が得られた。今回得られた Q_D^* とスケーリング則を Kobayashi et al. 2010 で提案された解析解に与えたところ、最終原始惑星質量は 1 AU で 0.058 地球質量、5 AU で 0.17 地球質量、という結果が得られた。

iSALE shock physics code を用いた衝突計算 Numerical modeling of impact phenomena using iSALE shock physics code

黒澤 耕介^{1*}; 千秋 博紀¹; 和田 浩二¹; 三上 峻²; 平田 成³; 鎌田 俊一²; 石原 吉明⁴; 玄田 英典⁵; 中村 昭子⁶; 高田 淑子⁷

KUROSAWA, Kosuke^{1*}; SENSU, Hiroki¹; WADA, Koji¹; MIKAMI, Takashi²; HIRATA, Naru³; KAMATA, Shunichi²; ISHIHARA, Yoshiaki⁴; GENDA, Hidenori⁵; NAKAMURA, Akiko⁶; TAKATA, Toshiko⁷

¹ 千葉工業大学 惑星探査研究センター, ² 北海道大学 大学院 理学院 宇宙理学専攻, ³ 会津大学 コンピュータ理工学部, ⁴ 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ⁵ 東京工業大学 地球生命研究所, ⁶ 神戸大学 大学院理学研究科, ⁷ 宮城教育大学 理科教育講座

¹PERC, Chitech, ²Dept. of CosmoSciences, Hokkaido Univ., ³Dept. of Computer Sci. & Eng., The University of Aizu, ⁴ISAS, JAXA, ⁵ELSI, Titech, ⁶Dept. of Earth and Planetary Sciences, Kobe University, ⁷Division of Science Education, Miyagi University of Education

iSALE [impact-SALE (Simplified Arbitrary Lagrangian Eulerian)] は惑星科学研究者に対して公開されている衝突流体計算コードである。特に惑星科学研究用に特化したオプション、初心者でも解析が可能な描画ソフトがパッケージとして配布されており、すでに多くの欧米の研究者が使いはじめている。これまで日本の惑星科学衝突コミュニティでは扱えるものが皆無であった ANEOS や物質強度の効果を取り入れた衝突計算を手軽に走らせることができることは大きな利点である。我々は日本の惑星科学コミュニティでも iSALE を自由に扱える環境を作るために「iSALE users group in Japan」という活動を開始した。まだまだ整備途中であるが、情報をまとめた wiki ページとメーリングリストを立ち上げている。発表では様々なテスト計算の例を紹介する。

iSALE users group in Japan のウィキページ
<https://www.wakusei.jp/~impact/wiki/iSALE/>

Mailing list
isale-users-jp@perc.it-chiba.ac.jp

謝辞

iSALE の開発者である Gareth Collins 博士, Kai Wünnemann 博士, Boris Ivanov 博士, Jay Melosh 博士, Dirk Elbeshausen 博士に感謝致します。

キーワード: 高速衝突, 数値流体計算, 状態方程式, 強度モデル, iSALE

Keywords: Hypervelocity impacts, Shock physics code, Hydrocode calculation, Equations of state, strength model, iSALE

氷天体用ペネトレータ貫入ダイナミクスの基礎特性に関する研究 Study on fundamental characteristics of penetration dynamics into icy target

難波 和也^{1*}; 鈴木 宏二郎²

NAMBA, Kazuya^{1*}; SUZUKI, Kojiro²

¹ 東京大学大学院工学系研究科, ² 東京大学大学院新領域創成科学研究科

¹ Grad. Sch. Eng., The University of Tokyo, ² GSFS, The University of Tokyo

天体の固体表面に高速でハードランディングし、天体の内部を直接観測することを目的としたペネトレータと呼ばれる探査機は、将来の惑星探査において重要な役割を果たすと考えられる。通常のランダーに比べて着陸用燃料が少なく、低質量ゆえに一度に複数の機体の打ち上げが可能である点などで優位性を持つが、機体にかかる衝撃が大きく、現在までミッションを達成した例は存在しない。一方、彗星核やエウロパに代表される氷天体には、生命の前駆物質となる有機物が存在する可能性が高く、将来的な探査対象として重要である。ここで、氷天体に貫入し、宇宙線による汚染を受けていない地下のサンプルを直接観測する「氷ペネトレータ」の有用性は非常に高いといえる。ペネトレータの先行例としては、実機が製作された LUNAR-A などがあるが、氷ペネトレータに限ると NASA の CRAF 構想 (Adams et al., NASA CR-177393, 1986) のみに限られ、貫入のダイナミクスに関する工学的研究は少ない。そのため、本研究ではバリスティックレンジを用いた針状物体の H₂O 氷への貫入実験を行い、基礎特性に関する研究を行った。

実験には、本研究室が所有するバリスティックレンジを使用した。飛翔体は加速用サボと共に圧縮空気により重力方向に水平に加速され、測定室内でサボから分離し、速度方向に垂直になるよう設置されたターゲットに衝突する。衝突速度は 100-300[m/s] の間で変化させた。飛翔体として、針状飛翔体 (鉄製、寸法 $\phi 2.45 \times 45$ [mm], 重量 1.71[g]) と鈍頭円錐状飛翔体 (真鍮製、寸法 $\phi 8.4 \times 15$ [mm], 重量 2.33[g]) を使用した。ターゲットには、純氷 (寸法 270x175x130[mm], 質量 5.5[kg], 密度 0.90[g/cm³], 空隙率 3[%]) と水道水を凍らせて作った低純度氷 (寸法 155x120x100[mm], 質量 1.5[kg], 密度 0.75[g/cm³], 空隙率 19[%])、また比較のために油粘土 (寸法 155x120x70[mm], 質量 2.2[kg], 密度 1.7[g/cm³]) を使用した。衝突の様子はハイスピードカメラ (フレームレート 2200-8800[fps], 露光時間 15[μ s]) を用いて記録し、飛翔体の姿勢と衝突時の貫入・クレータ形成の様子を観測した。

H₂O 氷に飛翔体が衝突したとき、衝突直後においてコーン状のイジェクタ噴出が発生した後、ターゲットからほぼ垂直方向に集中したジェット状イジェクタ噴出が発生することがわかった。この噴出は 100[ms] 以上にわたる長期間のもので、粘土への貫入における数ミリ秒程度の短いコーン状の噴出とは対照的な結果となった。また、貫入により破壊された氷の大部分が噴出されるため、粘土への貫入の際に発生するような、飛翔体が周りの物質に締め付けられて固定される現象が起らず、イジェクタと一緒に押し出されてしまう傾向があることが確認できた。飛翔体がターゲットから完全に離脱した後も衝撃波のもたらす破壊によるイジェクタ噴出は続いていた。この傾向は体積に対する衝突断面積が大きい機体において強く見られた。迎角がついた場合での貫入においても、細長形状の方が貫入を保つケースが多く見られた。そのため、貫入ミッション達成には細長形状の方が有利に働く可能性が高いことが考えられる。貫入後のクレータ形状は、中央の貫入部近傍のピット領域、その周辺の浅くなだらかなスポール領域、ターゲットの広範囲に延びるクラックからなり、氷への弾丸形状の衝突における先行研究 (e.g. Kato et al., Icarus 113(2) 423-441, 1995., Arakawa, Low Temperature Science 66 113-121, 2008) と定性的に一致している。衝突点で発生する圧力を一次元的近似である平板衝突近似 (Wada, JSIAM 16(4) 19-31, 2006) により見積もった結果、H₂O 氷のユゴニオ弾性限界圧力を大きく超えており、衝突点近傍で氷は剪断強度を喪失し、流体として振る舞うことが推測できる。

本研究は、科学研究費補助金 (基盤研究 (B)No.25289301) の支援を受けて行われた。ここに感謝の意を表す。

キーワード: 氷天体, ペネトレータ, クレータ, バリスティックレンジ

Keywords: icy object, penetrator, crater, ballistic range

遠心加速装置を用いた粉体層圧密過程の実験的研究 Experimental study of compaction process of powder bed by centrifuge experiment

大村 知美^{1*}; 木内 真人¹; Guettler Carsten²; 中村 昭子¹
OMURA, Tomomi^{1*}; KIUCHI, Masato¹; GUETTLER, Carsten²; NAKAMURA, Akiko¹

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ²Max-Planck-Institute for Solar System Research

¹Graduate School of Science, Kobe University, ²Max-Planck-Institute for Solar System Research

微惑星の集積においては、衝突時の圧力、周辺のガスによる圧力、自己重力によって空隙率が変化する (Kataoka et al., 2013)。小惑星などの再集積過程においても、衝突時の圧力や自己重力によってラブルパイル天体やレゴリス層の空隙率が支配されると考えられる。

地上で粉粒体を降り積もらせたときの空隙率と粒子半径の関係は、次のように書かれる (Yu et al., 2003; Kiuchi and Nakamura, 2014)。

$$p = p_0 + (1 - p_0) \exp\{-mR_F^{-n}\} \quad (1)$$

ここで R_F は粒子間に働く固着力と粒子にかかる重力の比で、粒子半径の関数である。 p_0 、 m 、 n は定数で、 p_0 は粒子間力が存在しない場合の空隙率である。

(1) 式が異なる重力下でも成り立つかどうかは確かめられていない。また、(1) 式は表面粒子の空隙率についてのもので、天体内部にどの程度適用可能かはわかっていない。すなわち、すでに積もっている粒子の空隙率が新しく粒子が降り積もることによりどのように変化するかはわかっていない。仮に (1) 式がすでに積もっている粒子にも適用できるとすれば、かける重力を大きくしていくことで R_F を小さくしたときの空隙率も (1) 式から得られる値に一致すると考えられる。そこで本研究では、重力加速度を変化させる実験を行い、その結果と (1) 式の比較を行う。

実験試料には全体の 60% が粒子直径 7.5-80 μm の粒子からなる海砂と、全体の 60% が 1-8 μm の粒子からなるフライアッシュを用いた。これらを直径 5.8 cm、深さ 3 cm のプラスチック製円筒形容器にふり入れ、カップからはみでた表面を水平にすり切り、それぞれ空隙率およそ 60%、70% にしたものを用いた。これに遠心加速装置を用いて 1-18 G の模擬重力をかけ、その時の圧縮の様子を装置に取り付けたカメラで観察した。一方向からピストンで圧縮する場合はかかる圧力に偏りが出てしまうが、遠心加速器を用いた場合、容器内にかかる圧力を一様にするという利点がある (Mizuno et al., 1991)。模擬重力を印加した後に表面高さ変化を測定し、実験前後での空隙率の変化を調べた。表面高さの測定にはレーザー測距計を用いた。

実験の結果空隙率は、粉体の粒子直径がそれぞれ累積分布の中央値である 24 μm (海砂)、4.5 μm (フライアッシュ) であると仮定した場合の (1) 式とは、それぞれ空隙率 6% 以内、5% 以内で一致し、経験式と大きな矛盾はないことが分かった。海砂に注目すると、この粒子直径 24 μm というのは、海砂の大きな粒の周りに付着している小さな粒の大きさに近い。

キーワード: 微惑星, 小惑星, 空隙率, 高重力, 粉粒体

Keywords: planetesimal, asteroid, porosity, high gravity, powder and granular material

氷衛星表面を模擬した氷・砂混合物に対するクレーター形成実験 High velocity impact cratering experiments on ice-sand mixture simulating the surface of icy satellites

高野 翔太^{1*}; 荒川 政彦¹; 保井 みなみ²
TAKANO, Shota^{1*}; ARAKAWA, Masahiko¹; YASUI, Minami²

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 神戸大学自然科学系先端融合研究環

¹ Graduate School of Science, Kobe University, ² Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University

はじめに：氷衛星、火星凍土、小惑星ケレスの地殻などは氷と岩石粒子の混合物からなると言われており、特に小惑星ケレスは、NASAの小惑星探査機 Dawn が 2015 年に到着して観測が行われる予定である。このケレスは、小惑星帯のメインベルトにあるので、その氷地殻には、様々なタイプの小惑星が衝突してクレーターを作る。衝突クレーターのサイズや形状は、衝突物質や地殻の種類、さらに衝突速度や地殻の内部構造により大きく変化する。そこで、ケレス表面のクレーターを調査することにより、衝突した小惑星の種類やその頻度、または、ケレス地殻の岩石含有率や内部構造などに関する情報を得ることができる。このような調査を実現するには、室内実験での十分な準備が必要である。すなわち、氷や氷・岩石粒子混合物、さらには内部構造を持つ表面に形成されるクレーターの特徴を明らかにする必要がある。加えて、それらの特徴が衝突物質の種類によりどのような影響を受けるかを詳細に調べる必要がある。

これまでクレーター形成効率に関する系統的な実験は主に純氷標的でのみ行われてきた。純氷に関しては 0.1km/s から 7km/s までの広い範囲で、数種類の弾丸を用いたクレーター形成実験が行われている。しかしながら、氷・岩石粒子混合物試料に対しては限られた条件でしか実験は行われてきていない。特に小惑星帯におけるケレスの氷地殻への衝突を考えると衝突速度 4km/s 以上での高速衝突実験を実現する必要があるが、その例は少ない。そこで本研究では 1km/s を超える高速度領域で、広い密度と強度範囲を持つ数種類の弾丸を用いて氷・岩石粒子混合物試料へのクレーター形成実験を行った。そして、クレーター形状やクレーター形成効率が純氷と比べてどのように変化するのかを調べることにした。

実験方法：実験は 2013 年度から新しく稼働し始めた神戸大学の二段式水素ガス銃を用いて行った。ケレス地殻を模擬した氷・岩石粒子標的試料は、粒径 500 μ m の石英砂と水を質量比 80~83wt% になるように混ぜて準備した。その混合物を直径 15cm・高さ 5~10cm の円筒金属容器に入れ、-23 から -15 $^{\circ}$ C の冷凍庫で凍らせて作製した。弾丸には、直径 2mm のアルミ球、ジルコニア球、チタン球を用いた。それぞれの密度は、2.7g/cm³, 5g/cm³, 5.7g/cm³ である。これらの弾丸をナイロン製のサポに装填して速度 1.6~5.1km/s で発射した。標的試料は、衝突直前に衝突チャンバー内に設置し、真空引きを行い周囲と断熱する。実験時のチャンバー内の圧力は 200~230Pa の範囲内である。クレーター形成過程はイメージコンバーターカメラにより 5 μ s 毎に 18 回撮影した。この撮影画像から、衝突時のイジェクタ形状やその成長速度を調べて純氷との比較を行った。実験後は、試料に残されたクレーターの形状をノギスにより計測した。

実験結果：今回の実験から氷・岩石粒子混合試料では純氷試料と比べて Spallation が、どの弾丸、速度においても起きにくいことがわかった。この Spall に関する特徴から、深さ直径比の速度依存性・弾丸密度依存性も純氷試料とは異なる。クレーター直径は衝突エネルギーが同じ場合、氷・岩石粒子混合試料では純氷試料の約半分となることがわかった。Hiraoka et al (2004) では、氷・岩石混合物の岩石含有率を変えながら、ほぼ一定の弾丸エネルギーでクレーター形成実験を行った。この衝突実験と我々の実験結果と比較し、クレーター直径に関する特徴を調べることにする。結果、Hiraoka たちが行っていない高い含有率 80wt% のデータは、彼らの含有率 50% のデータとほぼ一致し、50% までの直径減少傾向が、80wt% までには続かないことを明らかにした。その結果、80~100wt% の間で急激にクレーターが小さくなることが予想される。これは、0~80wt% においては氷が強度を支配しているのに対して 80~100wt% では岩石自身が強度を支配するようになるからだと考えられる。また、Housen and Holsapple (2012) で提案されたクレータースケール則を用いて氷・岩石粒子混合試料に対する無次元パラメーター π_R と π_Y の関係を求めた。80wt% 岩石粒子試料の動的引っ張り強度は測定されていないので、30wt% の混合物試料の強度の値を用いた。この場合、 π_R と π_Y の関係は氷の場合と大きく異なった。そこで 80wt% 岩石粒子混合試料の強度を、例えば 100MPa にして、再度関係を求めてみると純氷の関係とほぼ一致するようになった。もしこれが正しいとすると 80wt% の岩石粒子混合試料の動的引っ張り強度は純氷の強度の 6 倍近くになることがわかった。

キーワード: 氷衛星, 氷・砂混合物, 衝突クレーター, 高速度衝突実験

Keywords: icy satellites, ice-sand mixture, impact crater, high velocity impact experiments

砂を伝播する衝突励起応力の減衰過程に関する実験的研究 Experimental study on the decay process of impact-induced stress propagating through granular materials

松榮 一真^{1*}; 荒川 政彦¹; 保井 みなみ²
MATSUE, Kazuma^{1*}; ARAKAWA, Masahiko¹; YASUI, Minami²

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 神戸大学自然科学系先端融合研究環

¹ Graduate School of Science, Kobe University, ² Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University

はじめに: 衝突現象は惑星形成において最も重要な物理過程の一つであり, 太陽系内の固体天体にはその証拠として衝突クレーターが数多く存在する. 衝突クレーターのサイズは, 衝突天体のサイズ・物性・衝突条件, それに天体表面の構造や物性により変化する. 従って, クレーターの調査から衝突天体の物性や衝突条件に関する情報が得られる. km サイズを超えるクレーターでは, その形成過程は重力により支配されていると言われており, そのため粉粒体へのクレーター形成実験が今までに多く行われている. その結果, 重力支配域でも粉粒体の種類によってクレーターサイズが異なることが知られている. 一方, 最近の惑星探査では微小惑星の表面もレゴリス層で覆われていることがわかってきた. はやぶさ2の小型搭載型衝突装置(SCI)による衝突のような重力の小さな微小惑星のレゴリス層へのクレーター形成過程を予測するには, 粉粒体の物性がクレーター形成過程にどのように影響を与えているのかを解明する必要がある. 特に重力支配域においてはクレーターの掘削流がクレーターサイズを決める物理過程と考えられているので, 粉粒体の物性と掘削流の関係を明らかにする必要がある. そこで本研究では, 衝突時の掘削流の特徴を定量化するため, 粉粒体中を伝播する応力波を計測することにした. そして, この応力波の伝播・減衰が, クレーターサイズや粉粒体の物性とのような関係にあるかを調べることにした.

実験方法: クレーター形成時の応力波を測定できるように試料容器を準備した. 容器は, 大きさが10cm×10cm×10cmのアルミ製で, 粉粒体の厚みを1-10cmと変化させた. 計測に用いた圧力計は, 定格容量20kPa, 固有振動数約2kHzの歪ゲージ式センサーで, このセンサーを衝突点直下の底面に取り付けた. 実験は自由落下・神戸大学の縦型一段式軽ガス銃を用いて行った. それぞれ実験では, 応力波形状とクレーターサイズの弾丸サイズ依存性・衝突速度依存性を調べた. 縦型銃の実験は大気圧下で行ったが, 加速用のガスが試料に直接当たらないようにサボと風除けを用いた. 標的試料には形状や表面荒さが異なる4種類の試料を準備した. それらは, ガラスビーズと石英砂であり, それぞれ粒径100,500 μ mを実験に用いた. 弾丸は自由落下の実験ではガラス球(直径7.75,10,15mm), ガス銃の実験はナイロン・アルミナ(直径3mm)を用いた. 衝突速度は自由落下では2-5.5m/s, ガス銃では60-70m/sと変化させた. それぞれの衝突実験において, クレーターサイズと圧力波形を観測した.

結果: クレーターサイズと弾丸運動エネルギーの関係は標的の種類により異なることがわかった. 特に, 100 μ mの石英砂では, 相対的に小さなクレーターしかできなかった. この理由を調べるため圧力波形の特徴を調べた. 自由落下実験による圧力波形は, 急激に圧力が増加し, 最大圧力に達した後に減少するが, ガラスビーズでは緩やかに減少し, 石英砂の場合は急激に減少した. 特に, 100 μ m石英砂では圧力計の固有振動が見られ, その圧力波形の持続時間が0.5ms以下であることを示唆している.

縦型銃の実験による圧力波形は, 石英砂の場合は自由落下の場合とほぼ同じ波形であったが, ガラスビーズの場合は砂の深さによって波形が異なった. 深さが深い場合は(5-10cm), 自由落下の場合と同じ形状だが, 浅くなると(-5cm)石英砂の波形の様に固有振動を示す波形となった. また, 速度が大きくなるとすべての波形に圧力計の固有振動が見られた. これらの圧力波形を最大圧力に達して以降 $P(t)-P(\infty)=A \exp(-t/\tau)$ (τ :緩和時間, A :定数)と指数関数的に減衰すると仮定して緩和時間を求めた. その結果, τ はガラスビーズでは 10^{-3} s, 石英砂では 10^{-4} sとなり, τ は砂の種類毎に変化する値であることがわかった. また, 圧力 P と伝播距離 r の関係は次のような式で表すことができる: $P(r)=P_0(r/L)^{-b}$ (P_0 :初期発生圧力, L :弾丸半径, b :減衰パラメータ). 減衰率 b は, 自由落下の実験では, -0.79(ガラスビーズ), -0.94(石英砂), ガス銃の実験では, -1.61(ガラスビーズ), -1.71(石英砂)となり衝突速度によって距離の減衰率が異なる結果となった.

自由落下の実験におけるクレーターサイズと深さ4cmで計測した最大圧力 P の関係を調べると砂の種類毎に大きく関係が異なることがわかった. 一方, この圧力とその緩和時間 τ の積から算出した力積 I との関係を調べると, 砂の種類によらず一つの直線でフィッティングすることができた. これは, 緩和時間 τ がクレーター形成効率の物性依存性を表す物理量であることを示唆している. 今後, この緩和時間が砂のどのような物性値と関係し, 物理状態により変化するか調べたい.

キーワード: 掘削流, 粉粒体, クレーター形成過程

PPS21-P15

会場:3 階ポスター会場

時間:4 月 29 日 18:15-19:30

Keywords: Excavation flow, Granular material, Cratering process

氷・岩石微惑星の衝突破壊に関する実験的研究：同サイズ天体の衝突破壊に対する衝突角度の影響 Effects of impact angles on the impact strength of icy and rocky planetesimals for the collision among equal size bodies

河本 泰成¹; 荒川 政彦¹; 保井 みなみ^{2*}
KOMOTO, Yasunari¹; ARAKAWA, Masahiko¹; YASUI, Minami^{2*}

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 神戸大学自然科学系先端融合研究環重点研究部

¹Graduate School of Science, Kobe University, ²Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University

はじめに：これまで数多く微惑星に関する衝突破壊実験が行われてきたが、そのほとんどは弾丸と標的の質量差が大きなものばかりであった。天体の衝突破壊強度は、おおまに言えばエネルギー密度（弾丸の運動エネルギー/弾丸と標的の質量）で表すことができるので、弾丸が標的に比べて小さい場合、一般には非常に早い速度でなくては衝突破壊は生じない。一方、微惑星の初期集積過程では、その相対衝突速度は数10 m程度であったと考えられているので、そのような低速では衝突破壊はほとんど起こらないことになる。しかしながら、初期集積過程では、微惑星間に大きなサイズ差がない状態で成長が起きたと考えられているので、同サイズ衝突での衝突破壊強度が重要となる。特に同サイズ衝突では、衝突破壊に必要な最低衝突速度を求めることができる。逆に言えば、この最低速度以下での衝突では、弾丸・質量比によらず微惑星の破壊は絶対に起こらないため、集積過程を議論する上で非常に重要な速度といえる。これまでは数10倍以上の質量差を持った弾丸・標的系での実験結果を同サイズ標的に外挿して用いてきたが、同サイズ衝突では衝突破壊のスケール則で良く用いられる衝撃波伝播の点源近似や終段階等価性が成り立つのは難しい。従って、同サイズ試料を用いた衝突実験により、実際の衝突破壊強度を求める必要がある。本研究では、氷、石膏、ガラスビーズ混合石膏を用いて同サイズ試料を用いた衝突実験を行った。これらの試料は、氷微惑星、コンドライト隕石母天体の微惑星を模擬している。さらに、正面衝突だけでなく衝突破壊に対する衝突角度依存性も調べた。

実験方法：氷、ガラスビーズ混合石膏、そして石膏を用いて直径25mmと30mmの球形試料を作成した。それぞれの試料は型に溶液を流し込むことにより作成した。衝突実験には、その速度に応じて3種類の装置を用いた。それらは、バネ銃（低速用）、縦型ガス銃（氷用）、横型ガス銃（石膏用）である。なお、衝突速度は4~160m/sとした。また、衝突点を試料の中心からずらすことにより斜め衝突実験も行った。この時の角度は0（正面衝突）から80°（ほぼすれ違い衝突）とした。実験の様子は高速ビデオカメラで観測し、実験後の衝突破片はすべて回収して質量分布を計測した。さらに、回収破片とビデオ上で確認できる破片をできるだけ同定することにより、速度・破片質量分布も調べた。

結果：同サイズ試料衝突の場合のエネルギー密度は、換算質量を用いた系の運動エネルギーにより定義することにした。この重心系での運動エネルギーを用いたエネルギー密度を用いて衝突破壊強度 Q^* を求めると氷、石膏試料では、質量比が10倍以上異なる衝突実験で得られた値とほぼ同じ値を示した。一方、ビーズ入り石膏試料では質量差10倍以上の衝突実験より小さい値となった。これは、破壊様式が同サイズ試料衝突では点源近似が成り立つ衝突とは大きく異なるからだと思われる。斜め衝突では、角度が大きくなるにつれて最大破片は小さくなっていった。そこで、衝突速度の法線方向の速度成分だけを使ったエネルギー密度を用いてデータを整理するとほぼすべてのデータは、それぞれの試料で一つの直線に乗ることがわかった。また、計測した破片速度から再集積条件を見積もった。その結果、氷微惑星は直径20kmより大きな天体ならば破片は再集積し、普通コンドライト母天体を形成した微惑星は直径5.2kmより大きな天体ならば再集積することがわかった。そして、コンドリュールを含まない多孔質岩石微惑星は直径6.7kmより大きければ再集積することがわかった。

キーワード: 微惑星, 斜め衝突, 衝突破壊強度, エネルギー分配, 再集積

Keywords: Planetesimals, Oblique impact, Impact strength, Energy partition, Re-accretion

多孔質物質の動的圧密実験：微惑星前駆天体の衝突圧密への応用 Dynamic compaction experiments of porous materials: Implications for impact compaction of pre-planetesimals

保井 みなみ^{1*}; 横田 みずき²; 坂本 花菜²; 荒川 政彦³

YASUI, Minami^{1*}; YOKOTA, Mizuki²; SAKAMOTO, Kana²; ARAKAWA, Masahiko³

¹ 神戸大学自然科学系先端融合研究環, ² 神戸大学理学部地球惑星科学科, ³ 神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻
¹Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University, ²Faculty of Science, Kobe University, ³Graduate School of Science, Kobe University

はじめに：微惑星形成過程において、cm サイズから km サイズ（微惑星前駆天体と呼ぶ）への成長メカニズムは、2つの説が提唱されている。1つは、赤道面に沈殿、濃縮したダストアグリゲイトが自己重力によって分裂・収縮し、微惑星を形成すると唱えた重力不安定説、もう1つは、衝突合体を繰り返してダストアグリゲイトから微惑星へと成長すると唱えた直接合体成長説である。本研究では、直接合体成長説に着目する。この説では、微惑星前駆天体同士が衝突を繰り返すことで内部密度が上昇し、その後の衝突で反発や衝突破壊が起こり、合体成長が妨害されるという問題点がある。そこで、衝突によって変化する微惑星前駆天体の最終密度分布を調べたのが坂本（2013、卒論）である。坂本は高空隙の雪にステンレス円柱を自由落下させる衝突圧密実験を行い、衝突時の衝突応力と圧密分布、圧密領域の大きさの関係を明らかにした。しかし、坂本の研究では衝突速度が0.7~3.5m/sと微惑星前駆天体の比較的小さい平均衝突速度範囲で実験を行っている。そこで本研究では、微惑星前駆天体の圧密メカニズム、衝突応力、圧密分布を調べるため、5m/s以上の速度範囲での多孔質物質の衝突圧密実験を行った。

実験方法：標的には、岩石および氷微惑星前駆天体を模擬したパーライトと雪を用いた。雪の初期空隙率は70、80%、パーライトの初期密度は85kg/m³である。雪の衝突実験は北大低温研の低温室(-10℃)、パーライトの実験は神戸大で行い、横型一段式軽ガス銃及び縦型一段式軽ガス銃を使用した。雪の実験は縦型銃のみを使用した。アクリル筒内に液体窒素内に噴霧して作成した氷粒子(40~200μm)、または市販のパーライト粒子(2.2~3.4mm)を深さ12cmになるように入れ、2cm間隔で染色した氷粒子またはパーライトで境界を5層作り、深さに伴う密度変化を観察出来るようにした。このアクリル筒内の標的の上にピストンを設置し、弾丸でピストンを加速させて標的を圧密した。弾丸は、横型銃では直径25mmの弾性ボールを用い、縦型銃では直径30mmの円筒サボを取り付けた弾性ボールを用いた。ピストンは、直径30mm、高さ10~30mmのポリカーボネイト、アルミ、ポリアセタール円盤を用いて、ピストンによる圧密の違いを調べた。弾丸の衝突速度は2~118m/sである。衝突の様子は高速度ビデオカメラで撮影し、撮影速度は6000~10000fps、露出時間は20~100μsとした。

実験結果：まず、ピストンの加速度から求める衝突応力 σ_p と、エネルギーの保存式から求める木下式高度 Y を比較した。その結果、 σ_p と Y はパーライト、雪、共に1対1の関係にあることがわかった。

次に、標的の平均最終密度 ρ_f を決める物理量を求め、 ρ_f を求めるモデル式を決定した。パーライトは粒子の破碎による圧縮によって圧密が進行する。衝突により破壊された破片質量 Δm を運動量と運動エネルギー E_k と比較した結果、運動エネルギーと相関があり $\Delta m = 10^{-3} E_k^{0.4}$ という経験式が得られた。また、破碎した破片が未破壊のパーライト粒子間の隙間を埋めると仮定して圧密前後の標的質量保存式を用いると、モデル式 $\rho_f = \rho_i / (1 - \Delta m / m_t)$ (ρ_i : 標的の平均初期密度、 m_t : 標的質量) が得られた。またこのモデル式は実験値とよく一致した。

一方、雪の場合、氷粒子間の隙間が小さくなることによって圧密が進行する。このことから、パーライト同様圧密前後の標的質量保存式を用いて、モデル式 $\rho_f = m_t / (L_0 - \Delta L) S$ (L_0 : 標的の初期深さ、 S : 標的の底面積、 ΔL : 標的の圧密前後の長さ変化量) が得られた。ここで、 ΔL は衝突応力と歪速度の関係から得られた圧縮粘性係数 η を用いて $\Delta L = E_k / A \eta v_p S$ (v_p はピストン速度、 A は定数) となる。このことから、雪の平均最終密度は運動量によって決まり、実験値ともよく一致した。

最後に、標的最上層の最終密度 ρ_{f1} と衝突応力 σ_p の関係を調べた。その結果、パーライトでは $\rho_{f1} = 3.0 \sigma_p^{0.8}$ (kPa)、雪では $\rho_{f1} = 127 \sigma_p^{0.3}$ (kPa) という関係が得られた。しかし雪は、 $\sigma_p > 100$ kPaになると ρ_{f1} にばらつきが見られる。これは、圧密メカニズムの違いが原因と考えられる。100kPa以下では雪の初期空隙率で圧密メカニズムは変化しないが、100kPa以上の場合、初期空隙率70%では衝撃波の伝搬による圧密が起こり、初期空隙率80%では衝突直後に上層部が最終密度まで圧密し、その後下層部が時間と共に同時に圧密されることがわかった。一方、パーライトは全ての応力範囲で破碎圧密が起こっているため、データのばらつきはほとんどみられなかった。

キーワード: 微惑星前駆天体, 動的圧密, 衝突実験, 最終密度, 木下式硬度, 圧縮粘性係数

Keywords: pre-planetesimal, dynamic compaction, impact experiment, final density, Kinoshita strength, compression viscosity

粒径分布が粉体の熱伝導率に与える影響の実験的調査 Effect of particle size distribution on thermal conductivity of powdered materials

坂谷 尚哉^{1*}; 小川 和律²; 本田 理恵³; 荒川 政彦⁴; 田中 智²
SAKATANI, Naoya^{1*}; OGAWA, Kazunori²; HONDA, Rie³; ARAKAWA, Masahiko⁴; TANAKA, Satoshi²

¹ 総合研究大学院大学, ² 宇宙科学研究所, ³ 高知大学, ⁴ 神戸大学

¹The Graduate University for Advanced Studies, ²Institute of Space and Astronautical Science, ³Kochi University, ⁴Kobe University

月表層レゴリスのような粉体の熱輸送メカニズムを理解することは、惑星の熱進化と現在の熱的状態を推定する上で重要である。粉体物質の熱伝導率は粒径やその分布、温度、圧縮応力など様々なパラメータに依存し、その程度によっては 1 桁以上変化するものである。実験的な研究が少ないため、熱輸送メカニズムの理解は不十分であり、実際の天体上の粉体熱伝導率を制約することは困難である。

本研究の目的は、熱伝導率のパラメータ依存性の系統的な調査によって、熱輸送メカニズムを理解することである。それによって熱伝導率をモデル化し、天体上の熱伝導率推定に応用する。これまでの粉体の熱伝導率に関する実験的研究の多くは、粒径が揃った粉体サンプルを用いたものであった。しかし、月レゴリスは μm サイズから mm サイズまでの粒子の混合物である。また、コンドライト隕石の母天体の構成粒子は、マトリックスサイズとコンドリュールサイズの粒子の混合物だと考えられる。このような粒径分布を持った粉体の熱伝導率に関する研究は、これまでに二例のみしか行われていない (Woodside and Messmer, 1961; Huetter et al., 2008)。本発表では、真空下において粉体の熱伝導率測定実験を行い、粒径分布の影響を調査した結果を報告する。

用いたサンプルはガラスビーズであり、粒径 $100 \mu\text{m}$ と $200 \mu\text{m}$ の混合物である。調製したサンプルは全 5 種類であり、それぞれの粒径の質量混合比は 1:0, 2:1, 1:1, 1:2, 0:1 である。それぞれのサンプルの空隙率は 0.38, 0.35, 0.32, 0.35, 0.38 であった。これらのサンプルの熱伝導率は line heat source 法で測定した。

実験の結果、単一粒径サンプルの場合、 $100 \mu\text{m}$ と $200 \mu\text{m}$ のガラスビーズの熱伝導率はそれぞれ 0.0023 W/mK と 0.0035 W/mK であった。この熱伝導率の増加は、主に熱輻射の寄与の増加が原因である。一方、粒径混合物については、混合比 2:1, 1:1, 1:2 のサンプルの熱伝導率はそれぞれ $0.0039, 0.0029, 0.0039 \text{ W/mK}$ であり、粒径混合物の熱伝導率は空隙率と良い相関を持っていた。また、測定された熱伝導率と混合率の間には直線関係は見られず、M 字型の変化を示すことが明らかになった。

測定した熱伝導率は、粒子間の接触面を通った熱伝導の寄与である固体伝導率と粒子表面間の熱輻射の寄与である輻射伝導率の和で表される。本実験で得られた結果は、固体伝導率と輻射伝導率の粒径分布変化による増減の程度によって説明されると考えられる。したがって、実験結果の解釈のためには、測定された値を固体伝導率と輻射伝導率に分離する必要がある。これは、輻射伝導率の強い温度依存性を利用し、熱伝導率の温度依存性を調査することによって可能となる (坂谷 他, 2013)。本発表では、各調製サンプルに対して熱伝導率の温度依存性の測定結果を合わせて、固体伝導率と輻射伝導率の粒径分布依存性についての結果を報告する。

焼結ガラスビーズの熱伝導率と音速の測定実験 Measurement experiments of thermal conductivity and sound velocity in sintered glass beads

津田 彰子¹; 小川 和律^{1*}; 坂谷 尚哉²; 荒川 政彦³; 保井 みなみ³
TSUDA, Shoko¹; OGAWA, Kazunori^{1*}; SAKATANI, Naoya²; ARAKAWA, Masahiko³; YASUI, Minami³

¹ 東京大学, ² 総合研究大学院大学, ³ 神戸大学

¹The University of Tokyo, ²The Graduate University for Advanced Studies, ³Kobe University

The thermal conductivity and sound velocity of sintered particle materials (glass beads) were experimentally measured, and a correlation between them was investigated. Particles have often played important roles in the solar system history. Especially dust particles condensed in the early solar nebula formed planetesimals, and they remained as the main structure material of the bodies. The particles were then gradually sintered as temperature increased by disintegrations of radioactive isotopes. Finally, a part of planetesimals might be completely sintered and began to melt. Currently the sintered materials may also exist on the lunar and asteroid subsurface for example. Mechanical and thermal properties of such sintered materials are essential information for investigating the history of these bodies.

In the thermal issues, particles are known as a strong thermal insulator in vacuum. Although the thermal conductivity of sintered materials has never been measured, it is considered to be a value between the unsintered and a continuous rock, depending on degree of the sintering process. Concerning the sound velocity, characteristic feature depending on the sintering degree is expected to be similar to the thermal conductivity, because basically the phonon conduction is a common mechanism for both the thermal and sound phenomena in electrical insulation materials.

In this presentation, we report results of the first experiments of the thermal conductivity and sound velocity measurements in sintered particle materials. For measurement samples, 9 different blocks of sintered soda-lime glass beads were prepared: three bead diameters of 180-255, 355-500, and 710-1000 μm , and three degrees of sintering that have nearly the same porosity 40%. The cross section of sintering contact sites (neck) was evaluated for each sample. The thermal conductivity was measured by the line heat source method by a line heater and temperature sensors given in the sample in advance. The sound velocity was directly measured by a transmitter and receiver put at both ends of the block samples.

As results of the experiments, both the thermal conductivity and the sound velocity had an apparent correlation with each other, and with degree of sintering. They appeared almost in proportion to the neck diameter, which feature obviously indicates that the neck or contact size controls the bulk thermal and sound conductions, in weakly-sintered particle systems at least. These results can be directly applied to estimation of thermal and mechanical property of the ancient planetesimals. These results also suggest that the thermal conductivity of sintered materials, and also of unsintered particles probably, can be evaluated by measurements of the sound velocity.

キーワード: 粉体, レゴリス, 熱伝導率, 音速, ガラスビーズ

Keywords: Particle material, Regolith, Thermal Conductivity, Sound velocity, Glass beads

土星を模した磁場中で磁軸対称の石が相互に干渉しあうことを証明するための実験 ～土星の環を生成し維持する力～ Experiment to know the power to pull mutually between things that are axisymmetric for the Saturn's-like magnetic axis

間瀬 博文^{1*}
MASE, Hirofumi^{1*}

¹ 所属なし

¹ none

土星の磁場は巨大な双極子磁場と言えるほど整っており、さらにこの磁軸は自転軸と一致している(1)。この観測事実は奇跡的である。さらに土星の環は土星の赤道面を公転している(2)。これが自明であるとの説明はいまだなされていないと思われる。故にこの観測事実も奇跡的である。

美しい環の奇跡的な存在理由を、これまでに確認されている上述の奇跡的な特徴に結び付けて考えたい。双極子磁場の中心を通り磁軸に垂直に交差する面(磁場赤道面という)上では磁軸対称にあるもの間で相互に引き合う力(割増引力)が発生する。つまり環を構成する物質は割増引力によって180度反対側の物質と繋がれるために土星の環は生成され維持されている。この理論を証明する実験に取り組んでいるので成果を紹介する。

理論を簡単に説明したい。磁石では電子のスピンが一方(磁軸に平行)に揃うとされる。電子には周囲から常時エネルギーが流入する(私は電子はエネルギー補給なしで万年運動できるほど目出度いものとは考えない)。磁場赤道面に沿う方向ではスピンのためのエネルギー消費が多いからそれを補給するため流入量も多い状態(逆に磁軸方向は少ない状態)になる。磁石の磁場赤道面上に磁軸対称になるよう2個の普通の石を配置する。「衛星(石)A - 天体(磁石)B - 衛星(石)C」の並びで、A,B,C(の電子1個あたり)に流入する磁場赤道面上のエネルギーの大きさでは「A普通 - B多い - C普通」の並びである。これは私が提唱してきた2温度回転円盤そのものなのでAとCが割増引力で引き合う(3)。

****実験の構成(図面を参照)**

A,C:天然砥石(砂岩)を切断したもの(34L × 25W × 25H)

B:永久磁石(異方性フェライト,40L × 40W × 10H,表面磁束密度 B=79mT,吸引力 F=2.746kgf)を4~8個を重ねたもの(40L × 40W × 40~80H)

装置箱:市販の二段ボックス(木質)を横に寝かせた状態(280L × 580W × 410H)で利用する。中板を境に左室、右室と呼ぶ。中板に150 × 150程度の穴を、左室の天板に50 × 50程度の穴を開ける(中板に近い位置)。天板の穴の上にはφ65 × 1,000Lの塩ビパイプを取り付ける。左室の前面はベニヤ板を枠としたガラスを張る。右室は前面がそのまま開放である。150 × 150 × 3tのベニヤ板に穴を開けBをはめ込んだ状態で穴とBの隙間をコーキングする。そのベニヤ板を中板に中板の穴を塞ぐように貼り付ける。左室は塩ビパイプ上端以外は気密状態となる。

Aは天井から2本の糸(1,700L)で吊り下げられ左室内で自由揺動できるが静止点ではBとの間隙が20mm程度であるとする。Cは右室内天板から糸で吊るされ、Cの右側面には別の糸の端が接着されている。装置箱の右側から糸を引けばBからCを離す(状態C1)ことができ、緩めればCをBに間隙が20mm程度に接近させる(状態C2)ことができる。

****変化させる条件** Bの構成と向きを変化させ次の3通りとした。条件1:縦8個重ね(磁軸鉛直)、条件2:縦4個重ね(磁軸鉛直)、条件3:横4個重ね(磁軸左右水平)

****毎回の手順** 1.Aを極力静止させる(状態C1)。2.ビデオカメラでAの撮影を開始する(状態C1)。3.開始2分後C1からC2へ(状態C2)。4.開始4分後C2からC1へ(状態C1)。5.開始6分後C1からC2へ(状態C2)。6.開始8分後撮影を終了する。

****結果** 完全静止は困難で撮影開始時、Aは微小に揺動していた。1.条件1及び条件2の場合、最初の(状態C2)の時間帯に揺動が抑制され、2回目の(状態C2)の時間帯に揺動が増幅された。2.条件3の場合、全時間中にAの特別な変化は認められなかった。

****考察** 条件2と条件3の比較により静電気や磁気の悪影響はないと考えてよさそうである。予想した力が検出されている可能性がある。

参考文献

(1)堀安範(2013)/「第13回森羅万象学校」/国立天文台

http://th.nao.ac.jp/MEMBER/hori/pdf/HORI_2013Mar26_part1.pdf P23

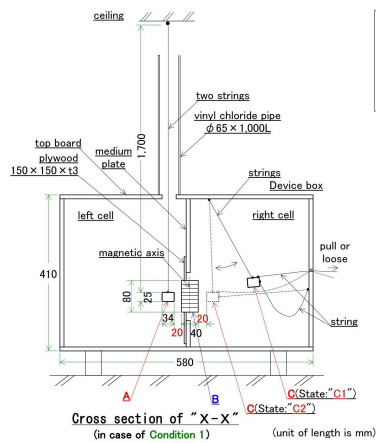
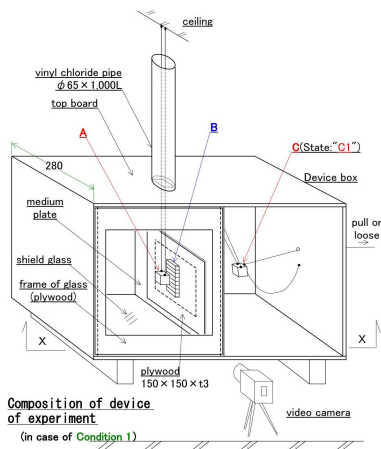
(2)平塚市博物館/「土星の耳 リングの消失」http://www.hirahaku.jp/hakubutsukan_archive/tenmon/00000050/59.html

(3)間瀬博文(2008)/『ひので』(SOLAR-B)の観測成果により得られた、巨大フレアの典型事例の解法/地球惑星科学連合2008年合同大会/E108-P007

PPS21-P20

会場:3 階ポスター会場

時間:4 月 29 日 18:15-19:30



A, C: natural whetstone(sandstone)
 34L x 23W x 23H
 B: permanent magnet(anisotropic ferrite, 40L x 40W x 10H,
 B=79mT, F=2.746kgf) piled up 4~8 pieces
 40L x 40W x 40~80H

