

小特集 大型レーザー装置を用いた科学研究の新展開

4. 高速レーザー銃がもたらす惑星間衝突物理学の進展

杉田精司, 黒澤耕介, 門野敏彦¹⁾

東京大学大学院新領域創成科学研究科, ¹⁾大阪大学エネルギー学研究センター

(原稿受付: 2010年9月20日)

惑星の起源と初期進化には小天体衝突が重要な役割を果たしたと考えられている。しかし、天体衝突に伴う超高温高圧条件下での岩石の蒸発やイオン化の過程は、未解明のままであり、惑星初期進化の理解にとって大きな障害となっている。近年に開発が進んでいるレーザー銃を用いた超高速衝突実験技術は、岩石の衝突蒸発・イオン化過程をその場観察することを可能にする。本章では、レーザー銃が拓く天体衝突物理学の展望を解説する。

Keywords:

laser gun, planetary evolution, meteoritic impacts, silicate vaporization, high-speed spectroscopy

4.1 はじめに

アポロ計画以来の各種惑星探査および地球上での詳細な地質調査の結果、太陽系内の惑星はその誕生の過程から現在に至るまで激しい小天体の衝突に見舞われてきたことがわかっている[1]。小天体の多くは、岩石（正確にはケイ酸塩岩）で構成されているが、地球や金星のように大型の惑星への衝突に際しては、高い沸点と蒸発エネルギーを持つケイ酸塩岩も蒸発およびイオン化することが理論的に予想されている[2]。しかし、その蒸発やイオン化の過程は、実験的困難のために詳しく調査されてこなかった。だが、この状況は、本章で述べる高強度レーザー照射を用いたレーザー銃を用いた実験を行えば、大きく変えることができる。そこで、我々は平成19年度より大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの共同利用研究制度を利用して、ケイ酸塩岩の衝突蒸発実験を開始した。本章では、ケイ酸塩岩の衝突蒸発現象が持つ地球・惑星科学的な意義と今後の展望を、最近の研究結果とともに紹介する。

4.2 実験研究の現状

4.2.1 超高温高圧状態発生技術の進展

超高温高圧状態を実験的に研究するためには、そのような状態を発生させる技術とそこで起こる現象の計測技術の両者の開発が必要である。動的な超高温高圧状態の発生のためには様々な装置が開発されてきており、主要なものには2, 3 段階軽ガス銃[3-5], レールガン[6], Zピンチ装置[7], 核爆発[8]など様々な手法がある。しかし、惑星間衝突の条件を達成するには衝撃圧力が低すぎたり、運転コストや環境負荷が極端に大きかったりなどの問題があり、惑星科学への応用が実用的な超高速衝突実験の手法は存在しないのが現状である。

こうした状況の中で登場してきたのがレーザー銃であ

る。同様の手法として高強度レーザー直接照射による衝撃圧縮実験があるが[9-11], レーザー銃は高強度レーザーの照射で弾丸を実際に自由空間に飛翔させてから標的物質に衝突させる点が異なる[12]。このレーザー銃の長所は、高強度レーザー照射位置と標的の間に自由空間を挟むことによって pre-heating の影響を低減できる可能性があることと、実際の衝突天体に近い形状の弾丸（平板やフィルムでなく、球状など）も加速できる可能性があること、弾丸と標的の間の最初の接触位置での発光スペクトルを観測できる可能性があることなどである。これらの特徴は、惑星科学への応用において非常に広い応用性を持っている。ただ、加速中の弾丸が破壊したり、自由空間を飛翔する間にも弾丸が変形したりする可能性があるなどの課題もある。総合的にどちらの方法が優れているかは、意図する物理計測内容に大きく依存する。また、どちらの方法も急速に開発が進んでいる段階であるため、今後の研究の進展によっては現状が大きく変わる可能性もあることを指摘しておきたい。

4.2.2 高速衝突現象計測技術の進展

高速衝突現象と一言に言っても様々なものがある。ここでは、惑星構成物質の衝撃加熱と蒸発現象の計測について述べる。これらの中で最も基礎的で重要な計測は、ユゴニオの速度関係式の計測と衝撃温度計測である。このユゴニオの速度関係式とは、研究対象の物質に衝撃波を走らせた際に、衝撃波速度 V_s と粒子速度 U_p が持つ関係式である。実効的には、衝撃波による圧縮率の計測をしていることに等しい。この関係式とランキン・ユゴニオ方程式を組み合わせることによって、衝突速度から衝撃波中の圧力、密度、内部エネルギー、衝撃波速度の全てが代数的に計算されるため、非常に重要な関係式である。この V_s と U_p の間の関係式は、多くの物質で経験的に線形になることが知られて

4. An Outlook for Progress in Hypervelocity Impact Physics Driven by Laser Gun Technology

SUGITA Seiji, KUROSAWA Kosuke, KADONO Toshihiko

corresponding author's e-mail: sugita@k.u-tokyo.ac.jp

いる。定圧相から高压相などへの相変化がある場合には、 V_s-U_p の間の関係に折れ曲がりが生じるが、折れ曲がりの両側では線形になっていることが多い。この計測は、高速の光電子増倍管ないしストリークカメラのみがあれば可能であるので、1960年代から盛んに計測がされており、豊富なデータが蓄積されている[3, 8]。ただし、上記のように地球惑星科学的に重要な物質の計測は未だに不十分であるのが現状である。

もう一方の衝撃温度計測は、高速分光法で計測される。非常に高い衝撃状態にある物質は一般に黒体に近い放射を行うが、この放射スペクトルの計測から衝撃温度を計測するものである[4]。上のユゴニオの速度関係式が実効的に圧縮率計測になっているのに対し、放射温度計測は物質の超高温高压状況での比熱計測に対応する。この二つが両方あって初めて衝撃条件下での物質の熱力学状態が一意に決まる。放射温度計測は、高速で複数の波長帯の輝度を正確に測る必要があるため、ユゴニオの速度関係式よりも計測が難しく、あまり多くのデータは得られてない。そのため、最近になって超高速衝突条件における様々な物質の放射スペクトル計測が盛んに行われはじめている。その重要な結果の1つは、石英(SiO_2)の衝撃圧縮実験で得られている。石英は、衝撃圧が100 GPaを超えた辺りから定積比熱 C_v がDulong-Petitの限界値 $3R$ (ただし R はガス定数)を大きく超え始め衝撃温度の上昇が鈍くなるとの実験結果が報告されている[9, 10]。これは、石英結晶内の構造が乱雑化して結晶の格子結合が切れて分解反応が起きることによるエネルギー損失が原因であると推定されている。しかし、このような結晶構造の分解反応は結晶構造によって大きく異なる可能性があるため、石英以外の鉱物での実験が望まれる状況である。

これまでに述べた V_s-U_p 関係式とユゴニオ条件下での C_v の計測がなされると、 $P-S$ 空間上にユゴニオ曲線を描くことができるようになる。 $P-S$ 図は、通常の熱力学ではあまり使われないが、衝撃蒸気現象を理解する上では非常に便利である。それは、衝撃状態から希薄波の到着によって減圧する過程は非常に複雑であり、 $P-T$ 曲線を描くことは非常に詳細なEOS情報が必要である。だが、この過程は断熱過程であるため、 $S = \text{一定}$ という条件がつく。したがって、 $P-S$ 平面や $T-S$ 平面では、減圧過程は S 軸に垂直な直線で表される。そのため、もしEOS情報がすべての $P-T$ 条件について得られていなくても、衝撃状態における S さえ分かれば、EOSが得られている低温低压状態へ計算をジャンプして減圧過程の終状態を求めることなどが可能になる。例えば、衝撃蒸気雲内での化学反応の反応速度論的效果を調べたい場合には、反応速度が高く化学熱力学平衡に到りやすい高温高密度状態での計算はあまり重要でない。反応速度が遅くなる蒸気雲膨張運動の後半における低温低压条件下(と言っても通常は室温などに比べたら圧倒的に高いが)での化学反応速度を正確に見積もったり実験で計測したりすれば十分な場合が多い[13]。

衝撃加熱された物質は、希薄波の到来によって断熱膨張する。衝撃加熱が非常に激しい場合には、断熱膨張の結果

として蒸発が起こる。これを衝撃蒸発と呼ぶが、非常に複雑な現象が絡むため、詳細な実験研究はなされていないのが現状である。当初は、主に高速度撮像計測[14, 15]や光ダイオードによる高速フィルタ分光計測[15]が行われ、衝突角度や衝突物質の組み合わせによって衝撃蒸気雲の形状は大きく変わることや斜め衝突に際しては非常に高速で大質量の衝撃蒸気雲が発生することなどが明らかにされた。斜め衝突に際して粘性加熱の効果で生じる大質量の衝撃蒸気雲は、中生代末期の生命の大絶滅(K/T境界事件)においても大きな役割を果たした可能性が指摘されており[16]、地球史的に非常に重要である。また並行して、静電プローブによる電子密度計測、ピックアップコイルによる磁場変動計測など、様々な電磁的な計測も行われ[17, 18]、秒速数km/s程度の高速衝突によっても大きな磁場が発生して地殻中に残留磁化を残しうる可能性が示されるなどの成果を挙げている。

しかし、超高速衝突によって発生するケイ酸塩蒸気が具体的にどのような状態にあるのかは、ほとんど解明が進んでこなかった。そのため、実験データが理論計算に直接反映されることもほとんどなく、研究の急速な進展はみられない状況が続いていた。これは、高速に変化する衝撃蒸気雲の熱力学状態(電離状態を含む)が計測されていなかったことが大きな原因である。また、実験室内で生じる衝撃蒸気雲が熱力学的に局所平衡状態にあるかどうかははっきりせず、断片的なデータが取得されただけでは、確固とした議論ができないという状況も実験的研究の進展を遅らせる原因となっていた。こうした中で提案されたのが、プラズマ物理学や天体観測で頻りに利用される発光分光計測法の応用である。基礎は、古典となっているGriem[19]などに記載されている通りであるが、高速衝突実験は、大量のダストやメルト粒子が電離を伴う高温ガスと同時に発生する非常に「汚い」系である。また、高速に時間変化するため、解析に耐えられるだけのきれいな分光データが取得できるかどうかは、非常に疑問であった。

だが、増倍型CCD検出器を用いた高速分光計を用いて行った可視光領域の観測から、炭酸塩岩や金属の高温蒸気雲が発する原子輝線の強度比がきれいなボルツマン分布を示すことが分かり、局所熱平衡仮定を使って議論できることが明らかとなった[20, 21]。この結果、衝撃蒸気雲の温度、柱状密度、原子組成、イオン化率などの主要な熱力学量が計測可能となった。また最近になって、圧力の計測法も開発されたため[22]、衝撃蒸気雲のエントロピーや熱力学関数の推定も可能な状況となった。ただし、これらの方法を用いたケイ酸塩の衝撃蒸発を実験室で詳細に分光分析する研究は最近までなされてこなかった。

4.3 最近の実験結果

一般に物質は、低温においては結晶格子の振動バンドの一部しか励起されないため、デバイの法則に従って低い比熱を持つことは良く知られているとおりである。しかし、衝撃条件下では温度は数千Kから1万K超の高温になるため、振動バンドは基本的に全て励起される。その際には、

定積比熱 C_v は $3R$ の値を取る (Dulong-Petit 則) . ただし, R はガス定数である. その一方で, 1 万 K という温度は, 結晶格子の結合が解離したり電離が起きたりし始める温度でもある. ただ, 密度が非常に高いため, 実際には電離が簡単に起こるとは限らない. 我々は, この問題に答えるため, 衝撃圧縮状態におけるケイ酸塩鉱物の比熱および断熱減圧段階におけるケイ酸塩蒸気のイオン化状態についての計測を行ってきた. 以下では, 一連の実験の結果について簡単に紹介し, その惑星科学的意義について解説する.

図 1 に, レーザー銃による高圧衝撃実験を増倍型 CCD 検出器で高速分光観測する実験システムの概念図を示す. 実験の結果得られた衝撃圧縮した石英の発光スペクトルには, Si^+ のイオン輝線が一本見られるが, 基本的には 1 温度のプランク関数できれいにフィットできる連続スペクトルが卓越している (図 2) . ブートストラップ法を用いた温度推定からは, $13000 \pm 1000 \text{ K}$ という値を得た [23]. この値と先行研究例や Dulong-Petit 則との比較を図 3 に示す. この比較からは, 240 GPa の衝撃圧において石英の C_v は $3R$ より増加し始めている可能性が示唆される [23]. これは, レーザー直接照射を用いた先行研究の実験結果や熱力学的な考察に基づいて構築された SESAME 状態方程式の予測値 [24] とも調和的であり, レーザー銃の実験が正確な値を与えていることを示唆している.

その一方で, 惑星地殻のもう一つの代表的鉱物である輝石の一種 diopside ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) の実験では, 石英で見られたような Dulong-Petit 則からの離脱は 320 GPa においても見られなかった (図 3) . この石英との違いは, ケイ酸塩鉱物の結晶構造の違いに起因していることが予想される. このような結晶構造により C_v の衝撃温度依存性が変化することは, 様々な惑星構成物質について C_v を丁寧に計測していく必要があることを示している.

また, diopside の発光スペクトルには, 断熱減圧段階で生じたと推測される多くの発光輝線が観察される (図 2) . Ca の原子輝線の相対強度比に基づいて温度推定をしたところ, 約 8000 K という値が得られた [23]. これは, 初期の

衝撃条件下での温度 12,000 K より若干低い値であり, 非常に調和的である. この断熱減圧段階の発光スペクトルを時間分解して計測した結果を図 4 に示す. 時間分解計測の結果は, 発光スペクトルが時間と共にその特徴を大きく変化させていく様子を示している [25]. 具体的には, (1) 初期の衝撃圧縮条件下では黒体放射が卓越し, (2) 黒体放射の強度が急速に減少するのに伴い, O^+ が支配的になる. (3) 引き続き, 発光スペクトルの主役は, O^+ から Si^+ へ, Si^+ から Mg^+ と Ca^+ , さらに Mg と Ca へとイオン化エネルギー

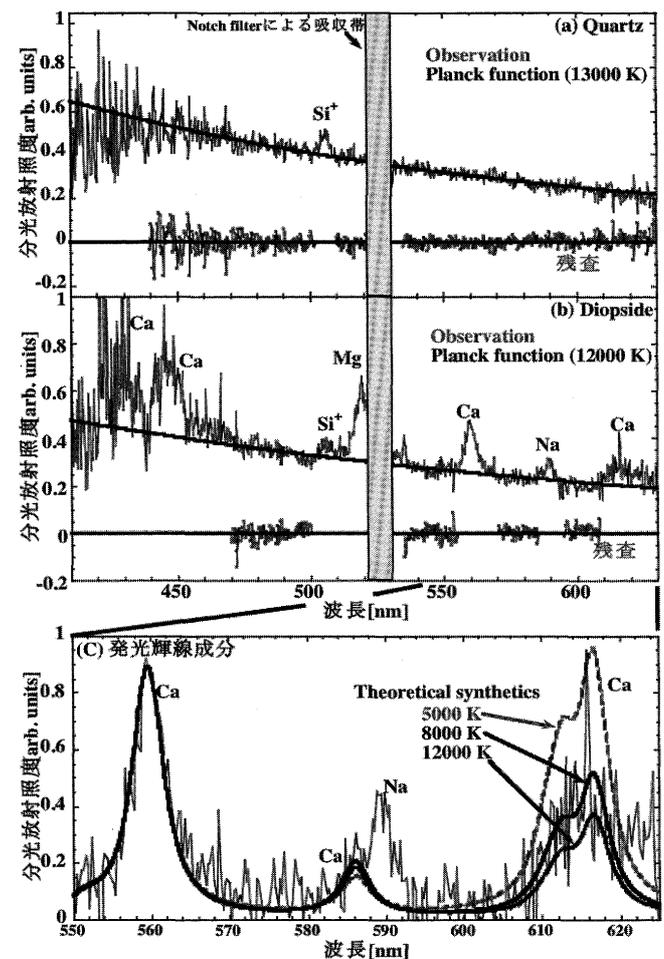


図 2 石英 (SiO_2) とダイオプサイド ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) の衝撃条件下における発光スペクトルの観測結果 [Kurosawa et al., 2010b を改変].

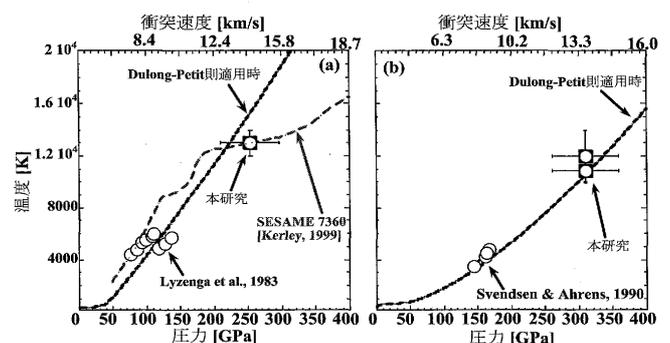


図 3 石英 (SiO_2) とダイオプサイド ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) の衝撃温度の計測結果 [Kurosawa et al., 2010b を改変].

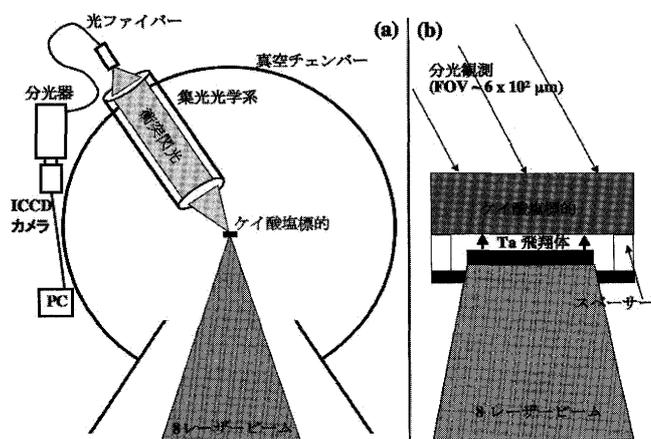


図 1 レーザー銃衝撃実験における装置配置概念図 [Kurosawa et al., 2010b を改変].

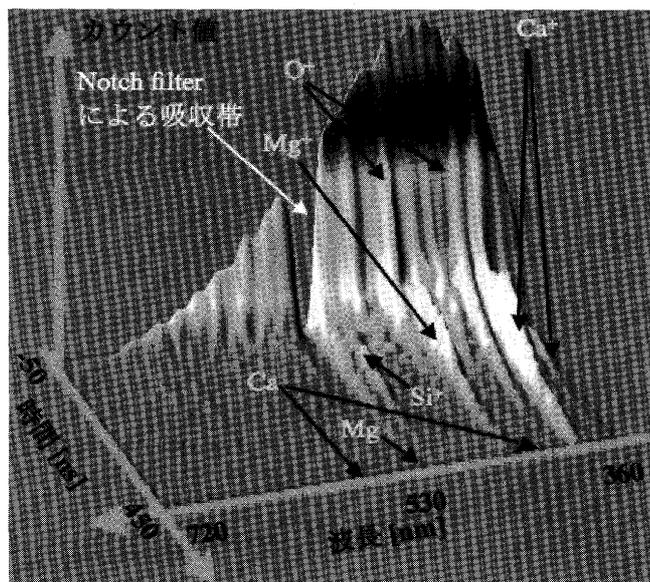


図4 ダイオプサイド ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) の衝突蒸気雲の時間分解光観測の結果 [Kurosawa et al., 2010a を改変]。

が高いイオンから低いイオン、さらに中性原子へ交代していく。ここで、 Mg^+ や Ca^+ の輝線は、 O^+ や Si^+ に対する相対強度が強くなっているだけではなく、絶対強度もいったん上昇している点は注目される。 O^+ や Si^+ が卓越している初期の高温状態において Mg^{2+} や Ca^{2+} として存在していた原子が、温度低下にともなって周囲の電子と再結合した結果 Mg^+ や Ca^+ が生成されて強い輝線を発するようになったという解釈と調和的である。この実験結果は、減圧過程開始直後に O^+ が観察される時間においては、 Mg^{2+} や Ca^{2+} が卓越している可能性が高いことを強く示唆している。

このように減圧過程開始直後において非常にイオン化エネルギーが高いイオンばかりが卓越するという観測事実は、衝撃圧縮による高温高压条件がケイ酸塩岩構成原子のイオン化に非常に適した条件であることを示唆している。その場合には、衝撃圧縮条件下における凝縮相において構成原子が既にイオン化しているのかもしれない。これは、超高压衝撃圧縮条件において、石英が電導性を持っているかもしれないという Hicksら [10] による示唆とも調和的であり、非常に興味深い。もしこのような推論が正しければ、超高压衝撃圧縮条件において diopside など石英以外のケイ酸塩鉱物もイオン流体となり、非常に高い比熱を持つことになる。高温高压状態における比熱の大きな増加は物性物理学的にも興味深い内容であるが、次節に述べるように惑星科学的にも重要な意義を持つ。

4.4 月の起源についての考察

月の起源として巨大衝突仮説が有力な説であることは、よく知られているが、この説が不動の地位を築いているわけでもないことは、あまり知られてない。巨大衝突説が当初強く支持された理由の1つに、モル数において惑星の約半分を占める酸素原子が地球と月では全く同じ同位体比を持っているという観測事実(火星や小惑星とは有意に異なる酸素同位対比)をうまく説明できるという点があった

[26, 27]. それは、原始惑星の地球への斜め衝突が地球のマントルを周地球軌道上に突き出して、月の源を生成するという力学進化が起こると予想されたからであった。しかし、その後の詳細な研究により、巨大な斜め衝突によって周地球軌道に打ち出される物質は、地球のマントルではなく衝突してきた天体の物質にならざるを得ないことが判明した[27]. これでは、地球と月の酸素同位体比の同一性が確保されず、観測事実に反してしまう。最近になって、周地球円盤中のケイ酸塩がある程度以上の比率で気相状態であれば(天体衝突が作る衝突蒸気雲は完全な気相でも完全な液相でもなく、両者の混合物である)、地球と周地球円盤の間で物質交換が効率的に進むために酸素同位体の同化が起きるという提案があり[28], 非常に注目を浴びた[29]. しかし、回転円盤においてこのような物質交換が起きる際には角運動量の交換も同時に起きてしまうため、円盤物質は地球に落下したり重力圏外に飛ばされたりしてしまう。このような状況になるまで月が形成しないとすると、月は永遠に形成できないことになってしまうので、この同位体同化仮説はあまり旗色が良くない[30].

このような状況において重要な制約条件になっているのが、現在の月が持つ質量と角運動量を与えるような衝突条件では月の構成物質は地球マントルではなく外部から飛来した原始惑星にならざるを得ないという数値計算の結果である。数値計算に組み込まれているケイ酸塩蒸気の比熱や潜熱に非常に大きな変更があった場合には、この数値計算の結果は大きく変化する可能性がある。例えば、比熱や潜熱が大きく変わっても衝突蒸気雲の最終的な膨張速度は大きく変化しないが、加速が起きるタイミングは大きく変化する。もし高温において比熱が非常に大きく、低温になるに従って比熱が減少するならば、この比熱が減少する温度帯において、衝突蒸気雲の加速は大きくなる。もしこのような中途での加速が大きくなると、原始惑星の形成で生じた巨大な衝突蒸気雲は上空に打ち上げられた後で、さらにもう一段の追加加速を受けることになる。後者の加速は、人工衛星の打ち上げ過程に例えれば、最初の垂直打上げ加速の後に水平方向に行うアポジーモーター加速に対応する。アポジーモーターを噴かなければ、衛星の近地点は必ず地球半径以下になってしまい、地上から打ち上げられた全ての物体は、その初速の大小に拘わらず地表に落下してしまうか重力圏外に飛散してしまう。しかし、アポジーモーターで軌道運動の進行方向に加速すると、軌道の近地点高度が高くなり、地表面との衝突が避けられて周地球軌道に入るようになる。衝突蒸気雲では、すべての質量が最適な水平加速を受けるわけではない。だが、衝突蒸気雲の大きな加速が起きるタイミングが遅い段階で起こってくれさえすれば、ある一定の割合の質量は好条件の水平方向の加速を受けて周地球軌道を回ることになる。

もしこのような遅延加速効果が大きく効けば、月を地球軌道上に作るために必要な原始惑星の衝突条件も現在考えられている条件よりもずっと広いものになるはずである。その場合には、地球マントルから直接月が生まれる解が見つかるかもしれない。しかし、高温高压状態におけるケイ

酸塩の比熱や潜熱は非常に不確定性が高く実験データもほとんど得られてこなかったため、このような効果は定量的に考慮されることがなかった。そのため、この面の実験データは、非常に大きな潜在的価値を持っているのである。

4.5 まとめ

以上見てきたように、比熱の値1つを取っても高温高压状態におけるケイ酸塩鉱物の物性値計測は、惑星科学的に非常に重要な波及効果を持つ。また、超高温高压条件下での比熱の挙動の解明は、お互いの電子雲が強く重なり合った相互作用という物性物理学的観点からも重要な研究テーマである。また、この電子相互作用が、比熱のDulong-Petit近似からのズレを作っている可能性が高く、それが衝突蒸気雲の力学運動に大きな影響を与えているという意味で、この両者は非常に密接な関係を持っている。大阪大学の超高強度レーザーを用いた実験は、まさにこの2つの分野の中心となる基礎データを取得できるという意味で非常に価値が高い。超高強度レーザーによる高速衝突実験の今後の進展が強く望まれる。

謝辞

本章で紹介した実験研究の多くは、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター共同研究で実施されたものである。大阪大学レーザーエネルギー学研究センターのターゲットグループおよびレーザーグループの皆様の協力に感謝の意を表したい。

参考文献

- [1] BVSP, *Basaltic volcanism on the terrestrial planets* (Pergamon, 1981).
- [2] H.J. Melosh, *Impact cratering: a geologic process* (Oxford Univ. Press, 1989).
- [3] S.P. Marsh, *LASL shock Hugoniot data* (Univ. of California Press, 1980).
- [4] K.G. Holland and T.J. Ahrens, *Science* **275**, 1623 (1997).
- [5] L.C. Chhabildas *et al.*, *Intl. J. Impact Eng.* **33**, 158 (2006).
- [6] N. Kawashima *et al.*, *Intl. J. Impact Eng.* **29**, 431 (1993).
- [7] J.R. Asay *et al.*, *Intl. J. Impact Eng.* **23**, 27 (1999).
- [8] R.F. Trunin, *Shock compression of condensed materials* (Cambridge Univ. Press, 1998).
- [9] D.G. Hicks *et al.*, *Phys. Plasma* **12**, 082702 (2005).
- [10] D.G. Hicks *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 025502 (2006).
- [11] N. Ozaki *et al.*, *Phys. Plasma* **12**, 124503 (2005).
- [12] T. Kadono *et al.*, *J. Geophys. Res.* **115**, doi:10.1029/2009JE003385 (2010).
- [13] R. Ishimaru *et al.*, *Icarus* **210**, 411 (2010).
- [14] P.H. Schultz, *J. Geophys. Res.* **101**, 21, 117-21, 136 (1996).
- [15] T. Kadono and A. Fujiwara, *J. Geophys. Res.* **101**, 26,097-26,109 (1996).
- [16] P.H. Schultz and S. D'Hondt, *Geology* **24**, 963 (1996).
- [17] D.A. Crawford and P.H. Schultz, *Nature* **336**, 50 (1988).
- [18] D.A. Crawford and P.H. Schultz, *Intl. J. Impact Eng.* **23**, 169 (1999).
- [19] H.R. Griem, *Plasma Spectroscopy* (McGraw-Hill, 1964).
- [20] S. Sugita *et al.*, *J. Geophys. Res.* **103**, 19, 427 (1998).
- [21] S. Sugita *et al.*, *J. Geophys. Res.* **108**, doi:10.1029/2003JE002156 (2003).
- [22] K. Kurosawa and S. Sugita, *J. Geophys. Res.* *in press* (2010).
- [23] K. Kurosawa *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* *submitted* (2010b).
- [24] G.I. Kerley, *Equations of State for Composite Materials, Kerley Publishing Services report KPS99-4* (1999).
- [25] K. Kurosawa *et al.*, *Lunar Planet. Sci. Conf. (abstract)* **41**, 1785 (2010a).
- [26] W.K. Hartmann and D.R. Davies, *Icarus* **24**, 504 (1975).
- [27] R.M. Canup, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **42**, 441 (2004).
- [28] K. Pahlevan and D.J. Stevenson, *Earth Planet. Sci. Lett.* **262**, 438 (2007).
- [29] A.N. Halliday, *Nature* **450**, 350 (2007).
- [30] H.J. Melosh, *Meteoritics Planet. Sci. Suppl.* **72**, 5104, (2009).