

特集／シューメーカー＝レビー第9彗星の木星衝突

衝突の数値シミュレーションと核サイズの見積もり

高田 淑子¹

1. 衝突の予測

太陽系内における天体間の衝突現象は、太陽系進化を考える上で重要なプロセスである。しかし、衝突現象を観測した例は数少なく、現在までは、主に、クレーターといった衝突の‘痕跡’や、小惑星や数少ない衛星など、衝突の‘生き残り’の研究が中心であった。そこで、今回のシューメーカー＝レビー9彗星（以後、SL9）の木星への衝突は、私達人類が、史上初めて事前に予測された太陽系内の天体どおしの衝突を観測する機会を得たという深い意義がある。また、木星大気は厚いアンモニアの雲に覆われており、その内部の大気の化学組成、物性はいまだに謎に包まれている。そこで、衝突による大気の擾乱により木星内部に存在する大気が新たに観測され、木星の内部構造の解明につながる可能性がある。一方、SL9の衝突エネルギーは、 10^{28} – 10^{31} エルグ（地球上で実施された最大の核爆発の約1億倍以上）と見積もられ、今まで数値実験や室内実験に頼っていた衝突・爆発現象を実際の惑星表層でテストする絶好のチャンスともなったわけである。

1994年7月下旬、世界中の天体観測機器は木星に向けられ、衝突直後の木星をとらえた。現在、徐々に世界中から観測結果が報告され始めている。

衝突に先立ち、私を含むカリフォルニア工科大学の地球物理衝撃波グループでは、1993年の夏より、当時予測されていた彗星核の大きさ、衝突速

度をもとに、衝突現象の観測の可能性について検討を重ねてきた。特に、衝突のエネルギーが一瞬の内に放出される衝突直後の約10分間に焦点を当てて、(1) 彗星が木星大気に直撃する時に何が起こるか、(2) またその直後、衝突地点はどのような変化をたどるか、といった予測を開始した [1, 2, 3]。今回は、衝突前に私たちが予測した現象を紹介するとともに、プレリミナリーな観測結果と比較しSL9の木星への衝突をあらためて考えてみたい。

2. 予測に際する仮定・計算手法

彗星衝突に伴う木星大気に生じる諸現象を予測するため、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) という手法 [4] を利用した数値シミュレーションを実施した。この数値計算手法は、ラグランジアン粒子法であり格子を必要としないため、様々な物質の大きな変形に柔軟に対応できる。計算上では、彗星も大気もそれぞれの物質の熱的、物理的情報をもった粒子の集合体として表現されている。今回のシミュレーションは、完全な三次元モデルのため、ジオメトリックな効果を正確に表現できている。木星大気においては、ボイジャー1号の観測結果に基づいた大気の構造を初期条件として利用し、 $\gamma=1.4$ の理想気体の状態方程式を適用した。彗星は水の氷（密度 1g/cm^3 ）を仮定し、Tillotson の状態方程式を利用した。

彗星の突入の速度は 60km/s 、彗星核の直径は、

¹地質調査所

10., 2., 0.4 km の 3 つの場合についてシミュレーションを実施した。もともと分裂前の彗星核の最大サイズは、HST の観測により 4 km [5], あるいは、潮汐力による各核の分裂の計算から 1 km 以下 [6] と見積もられ、エネルギーの大きさで 2 桁以上の違いがあった。そのため、広い範囲のサイズにおけるテストを必要とした。

3. 彗星突入の現象

図 1 は直径 2 km の彗星が木星大気に突入する過程を数値シミュレーションした結果である。この図は、成層圏突入約数秒後の彗星物質と彗星の軌道面の大気の様子を表している。彗星は大気抵抗をうけ変形し、彗星の進行方向の面より質量を失っていく。特に、これは彗星と大気間の速度境界層において発生するケルビンヘルムホルツ不安定によるものであると考えられる。

この場合、最大エネルギーを放出するのは、圧力レベル 35 bar の高度で、彗星の残骸は、約 10 秒後、約 200 bar の深さまで到達する。また、この間の初期衝突エネルギーの約 90 % 以上が、大

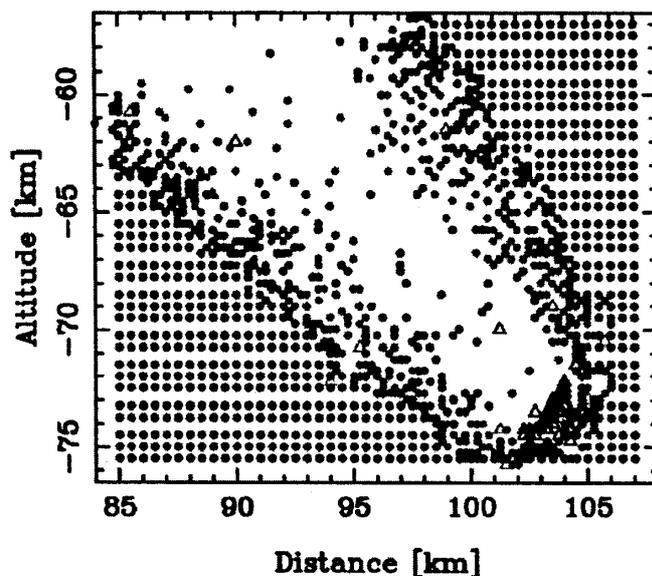


図 1. 直径 2 km の彗星核が木星大気に突入する SPH シミュレーション。△は、彗星核の物質、●は、木星大気の SPH 粒子を表す。彗星軌道面の SPH 粒子のみを示す。

気の内部エネルギーと運動エネルギーに変換される。このエネルギーが約半径 5 km の彗星の通過した円柱状の大気に放出されたとすると、単位質量あたりの大気が受けるエネルギーは 10^8 erg/g となる。これは、大気を構成する水素分子が全て解離し、さらに約 10 % の大気中の水素がイオン化するエネルギー量である。大気平均温度は、約 2 万度、また、彗星核の物質を水と仮定すると、彗星核は 100 % イオン化する。この強度な熱放射は、唯一衝突を直接観測できる位置にいるガリレオ衛星によって観測が可能であると考えられた。ガリレオ衛星は数秒間にわたる強い放射光を観測している [7]。そして、数分後に一端強度が減少するといった観測結果が報告されている。ガリレオ衛星が観測した強い放射光は、この突入時に放射されたものと考えられる。

さてこのような、彗星突入のシミュレーションは、昨年来より、いくつかのグループによって実施されている。それぞれのシミュレーションの実施段階での、仮定、方法がまちまちであるにもかかわらず (例えば、彗星の直径や、大気の構造など)、結果のみを比較する傾向があった。そこで、隕石磨耗の方程式 [8] を利用し、彗星進入高度のスケリングを実施した。到達する圧力レベルは、大気のスケール高、 H 、密度、 ρ_{atm} 、彗星の衝突速度、 V 、直径、 D 、ならびに、密度、 ρ 、の関数で表され、

$$P \propto \frac{\rho}{\rho_{\text{atm}}} \cdot \frac{D}{H} \cdot \frac{\cos \theta}{C_D} \quad (1)$$

ここで、 C_D は、抵抗係数、 θ は、彗星の入射角である。

図 2 では、いくつかのモデルの彗星核の到達する圧力レベル (a) と彗星核のエネルギーの放出量が最大となる圧力レベ

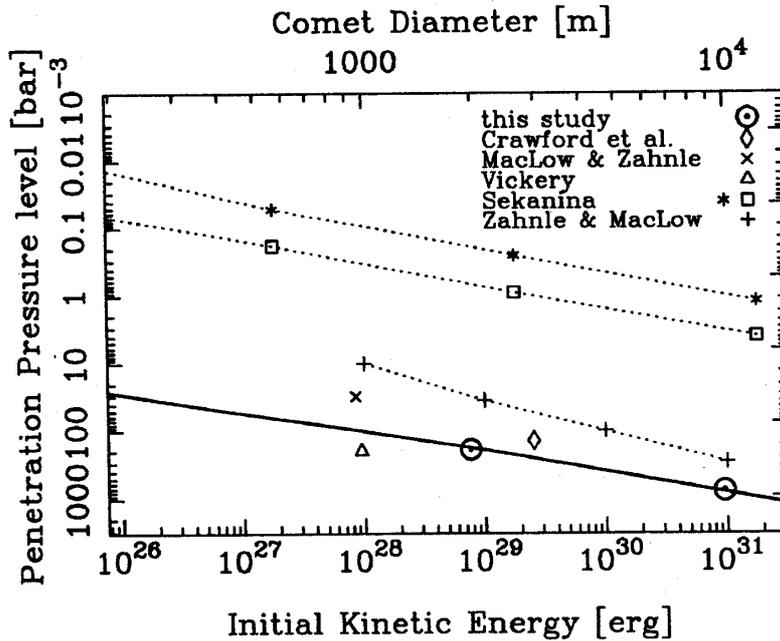


図2. (a) 様々のモデルの、彗星核の到達する深さ（圧力レベル）と、彗星核の初期運動エネルギーとの関係。上部の横軸は、彗星核の密度を 1 g/cm^3 と換算した時の彗星の直径を示す。

○, ◇, ×, △は、数値シミュレーションの結果、その他は、摩擦方程式を解いている。実線は、式 (1) より、SPHの結果を他の衝突エネルギーにスケールしたものである。

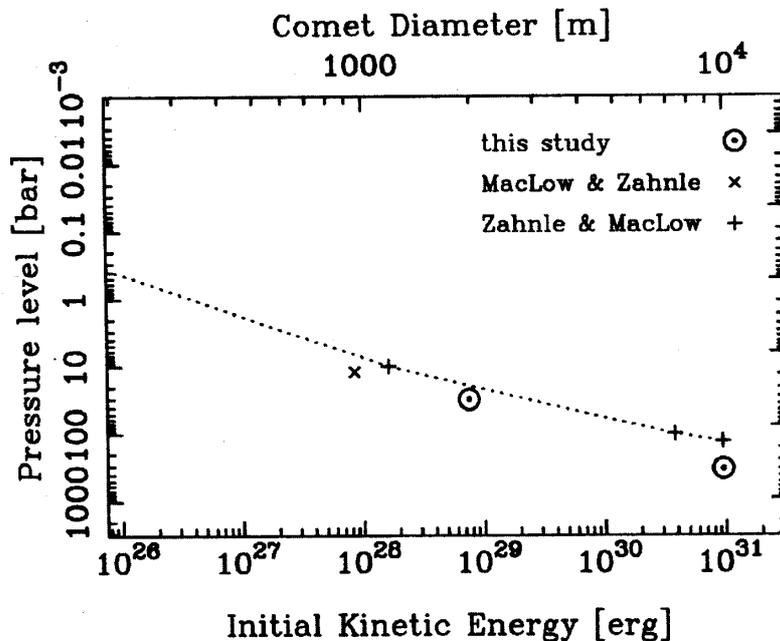


図2. (b) 彗星の運動エネルギーの木星大気への放出が最大となる大気の圧力レベル。

ルを、比較した。(1)式から得た傾きは、図2中で実線にて示してある。この結果、大部分の数値シミュレーションは、消失する高度、特に、最大エネルギーを放出する高度が一致している。我々のSPHコード以外は、すべて2次元軸対象による数値シミュレーションである。そのため、対称軸に沿った中心部から彗星の物質が失われていく形(例えば、[9])と、前方から圧縮された彗星物質が彗星の前面曲率に沿って、外側へと物質が流れて失われていく形(SPHや[10])とに分かれる。前者の方が、浅い高度で消滅する結果が得られている。これは、音速と彗星サイズ、衝突速度とスケール高とのバランスの問題、あるいは、数値シミュレーションの方法の違いにもよると考えられる[1]。しかし、ここから言えることは、どの数値シミュレーションも球状の彗星の直径が、1 km、密度が、 1 g/cm^3 であれば、木星大気のアンモニアの雲(約500 mbar)を突入し、3 bar以深に存在すると考えられている水の雲の層にまで、到達するということである。

4. プルームの成長

さて、地球上、あるいは、地球軌道の多くの観測機器が実際に衝突直後に捉えたものは、衝突地点の大気が上昇・拡大した‘プルーム’と考えられる。前述したように、突入による衝突エネルギーは、約10秒という短期間に、狭い領域の周辺大気中に放出されることから、衝撃波が核爆発と同じように大気中を走るようになる。

直径2 kmの彗星が大気突入後に形成するプルームの発展を、SPHにて数値シミュレーションしたものを、図3に示す。これは、彗星衝突後約2分経過後の状況である。特に鉛直方向に対しては、ポテンシャルエネルギーの許す範囲内において、プルームの大気は加速される。彗星核の質量の約40倍の対流圏の大気が、プルームとして、成層圏に上昇する。従って、大部分のプルームの構成物質は、木星大気を起源とする。

プルームの横方向の半径を木星大気の高さごと(圧力レベル: 1 bar (0 km), 15 mbar (200 km), そして、4 μ bar (300 km)) に時間の関数として示

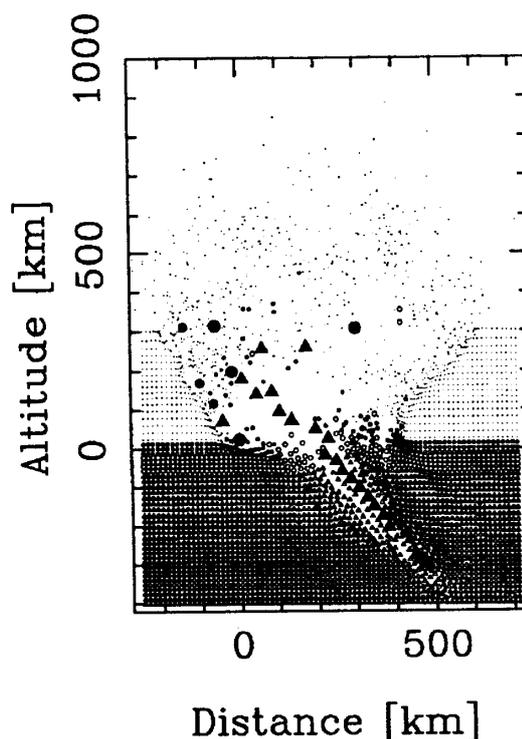
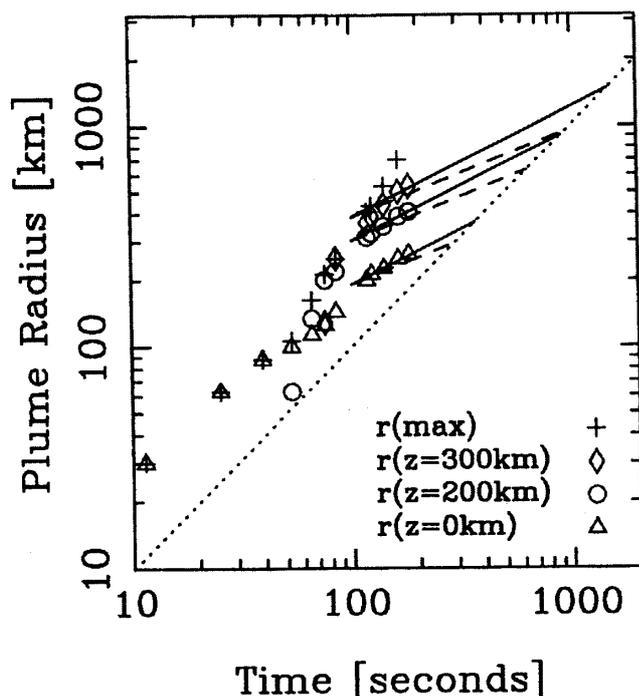


図3. 彗星核衝突後のプルームの成長過程のSPHシミュレーション。直径2 kmの彗星核が木星大気に衝突し約2分経過後の大気の分布。

△は、衝突による大気の擾乱前に、圧力レベル約4 bar ($Z < -60$ km) 以深に存在した木星大気のSPH粒子を表す。この領域には、太陽存在度と同程度の量の水が含まれていると考えられている。また、○は、4 bar から1.3 barの領域の、主に硫黄の雲の層、そして、○は、1.3 bar から、400 mbarのアンモニアの雲の層を示している。アンモニアの雲より上層では、メタンが主なマイナー分子である。彗星の軌道上の大気の粒子は、それぞれ、▲、●、●、で表す。これらは、彗星物質を含んでいる。

図4. プルームの半径の拡大率。半径2 kmの彗星核の衝突によって引き起こされたプルームの成長のSPHシミュレーションの結果による。

◇、○、△は、それぞれ、高度、0 km, 200 km, 300 km, のプルーム半径の時間変化を表し、+はプルームの最大半径を示す。実線と破線は、それぞれ、衝撃波が、円筒状(距離は $t^{0.5}$ に比例)と球状(距離は $t^{0.4}$ に比例)に拡大した場合の半径の時間発展を示す。点線は、衝撃波速度が音速以下に変化する地点であり、その半径以遠は、エネルギーは衝撃波として伝播しない。

したのが、図4である。衝突後、100秒後、深部より徐々に、衝撃波の横への広がりが、円筒系の衝撃波の伝播則（時間の0.5乗に比例）に従っていることが理解される。衝撃波速度が、音速以下に変化する地点より内側が、急激な温度上昇が起こりうる範囲と考えられる。これによると、彗星核の直径が2 kmの場合、1気圧の圧力レベルでは、約400 km、15 mbarにおいては、1000 km、4 μ barにおいては、1500 kmの半径領域が衝撃加熱され、成層圏の変化が、十分、地上の解像度の良い観測機器で観測可能となる。これは実際の観測で、主に、メタンバンドや可視光を使った成層圏の観測が衝突直後の一番明瞭な結果を得ていたと言う事実と一致する。

さて、図3からもわかるように、約2分後には、プルームが約1000 kmの高度に到達する。この上昇するプルームの運動エネルギー、あるいは、運動エネルギーと内部エネルギーが、ポテンシャルエネルギーに変換されると考えると、プルームは突入後、約10分後に、約3300 \pm 700 kmの高さにまで到達すると見積もられる（図5）。ハッブル宇宙天体望遠鏡により観測されたG核のプルームの高さは、約3300 kmである[11]。SPHの結果と比

較すると、衝突前のG核の直径は、約2 km（彗星核の密度; 1 g/cm³）、衝突の力学的エネルギーは、約10²⁹エルグと見積もられる。これは、衝突前に光学的に予測されていたサイズ（3.8 km [5]）と、核分裂の軌道計算から解析的に予測されていたサイズ（0.7 km [6]）の間にあたり、衝突のエネルギーが、以前から予測されていたほぼ中間であることを示唆している。その他、A、W核のプルームの最大の高さは、それぞれ、3400、2300 kmと観測され[11]、SPHの結果との比較から、A核の直径、約2 km、W核の直径、約1.5 kmと見積もられる。

5. プルームからの熱輻射

SPHの結果、約2分後のプルームの温度は、直径が2 kmの彗星核の衝突の場合、約2000 K、また、400 mの場合、500 Kと予測された。そこで、プルームのサイズ並びに、熱輻射の強度から、彗星核が直径2 kmあれば、紫外線・可視光・赤外線で観測でき、また、直径が、約500 mあれば、可視光・赤外線で観測されると予測していた。SPHのプルームのシミュレーション結果から見積もった、プルームの放射照度を図6に示した[3]。また、NASA赤外線天体望遠鏡（IRTF）による、R核の

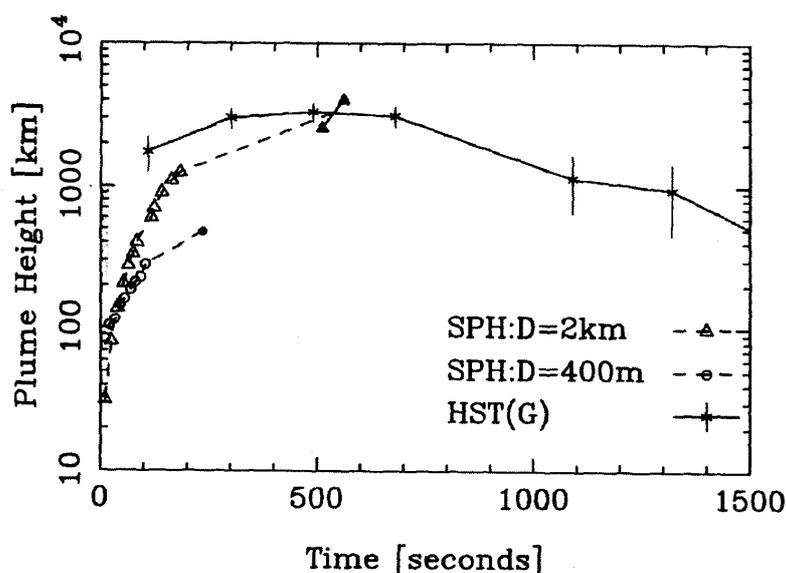


図5. SPHシミュレーションで得たプルームの高さと、ハッブル宇宙望遠鏡で観測されたG核のプルームの高さの時間変化[11]。SPHシミュレーションは、直径2 kmと0.4 kmのプルームの高さの時間変化の結果をそれぞれ、 Δ と \circ で示している。直径2 kmと0.4 kmのそれぞれの場合において、SPHシミュレーションから見積もられたプルームの最大の高さを \blacktriangle と \bullet で示している。 \blacktriangle は、運動エネルギーが位置エネルギーに変換された場合と（高度：2600 km）、運動エネルギーと内部エネルギーが位置エネルギーに変換された場合と（高度：4000 km）、範囲として示している。

8-12 μm の波長領域の観測結果も示されている [12]. R核の放射照度は、直径 400 m と 2 km の核の衝突の中間にあたる。黒体放射を仮定すると、プルームの温度は、約 1600 K となる。衝突のエネルギーとプルームの放射照度が比例すると考えると、R核は、約 1.6 km の直径を持つと考えられる。これは、衝突前に、光学的に予測されていたR核のサイズ (3.4 km [5]) と、核分裂後の軌道計算から解析的に予測されていたサイズ (0.5 km [6]) の間に位置する。

6. 母天体のサイズの推定

4,5 章から、A核、G核は、直径約 2 km、W核は約 1.5 km、そして、R核は、約 1.6 km と推定された。ここでは、これらのサイズに、衝突以前に各核ごとのサイズを光学的に決定した Weaver et al. [5] のサイズ比率をあてはめ、母天体の大きさを推定する。実際には、衝突以前に観測されたサイズ分布と衝突の規模との間にわずかな違いはあったが、今回は考慮にいれていない。そうすると、母天体の直径は、約 4.0 ± 0.5 km と推定される。これは、Jewett et al. [13] の衝突前の観測値、約 4 km に一致する。そして最大と最小のサイズ見積

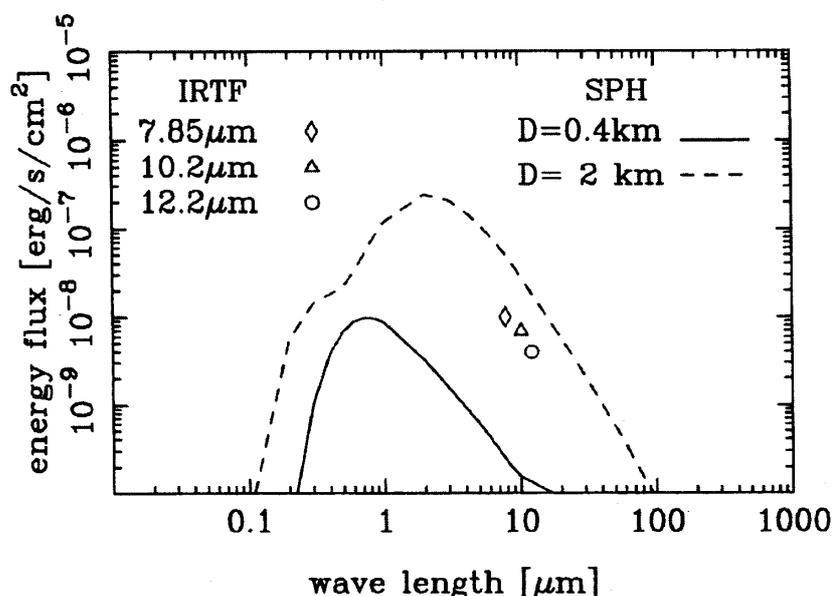
り [5, 6] の中間の値となる。この値は、衝突のエネルギーにして、 $4-6 \cdot 10^{29}$ エルグに相当する。

7. 木星大気の化学組成と彗星の起源について

今回の衝突は、惑星内部の化学組成を知る絶好の機会でもある。それは、3章で示されたように、彗星核の直径が 1 km 以上あれば、彗星核は、アンモニアの雲の層を通り抜け、木星内部大気、特に、存在していると考えられている水の雲の層にまで、到達すると考えられたからだ。カイパー航空天文台は、高温 (500 K 以上) 状態で表われる水の輝線を衝突後約 30 分間観測した [14]. 彼らは、 $\text{H}_2\text{O} / \text{CH}_4$ モル比率が、 10^3 となることから、彗星起源の水であると主張している。しかし、大量の一酸化炭素が検出されたことから [15], 衝突加熱の非平衡反応により、木星内部大気中のメタンと水が反応し、一酸化炭素を生成し、メタンを使い尽くしたとも考えられる。

彗星が、小惑星起源であるのか、彗星起源であるのかは、今までの観測結果からでは、判断材料にかけける。Noll et al. [16] は、HSTにより、Mg、 Mg^+ 、 Mg^{++} 、Fe を発見したが、岩石の重要な元素で

図6. SPHシミュレーションで得られた放射照度と IRTF の R 核の放射照度 [12] との比較。黒体放射を仮定すると、SPHシミュレーションでは、衝突核の直径が 2 km の場合、約 2000 K、直径が 400 m の場合、約 500 K である R 核は、約 1600 K と推定されている [12].



あるシリケート物質は、確認されていない。彗星も、小惑星も水を含めてそれらの成分を含んでいることから、今後のデータが期待される。

8. おわりに

観測結果が完全に出そろっている時期ではないため、今後違った見解が得られるかも知れない。特に、今後いつそう期待されることは、各波長域のエネルギー放射率を時間の関数として集められ、全エネルギー放射から各核の衝突のエネルギーを推定することであろう。これは、衝突のあらゆる物理現象を理解する根底となっているためである。

参考文献

- [1] Takata, T., J. D. O'Keefe, T. J. Ahrens, and G. S. Orton, 1994: Comet Shoemaker-Levy 9: Impact on Jupiter and plume evolution, *Icarus*, 109, 3-19.
- [2] Ahrens, T. J., T. Takata, J. D. O'Keefe, and G. S. Orton, 1994: Impact of comet Shoemaker-Levy 9 on Jupiter, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 1087-1090.
- [3] Ahrens, T. J., T. Takata, J. D. O'Keefe, and G. S. Orton, 1994: Radiative signatures from impact of comet Shoemaker-Levy 9 on Jupiter, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 1551-1553.
- [4] Monaghan, J. J., 1992: Smoothed Particle Hydrodynamics, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 30, 543-574.
- [5] Weaver, H. A., P. D. Feldman, M. F. A'Hearn, and C. Arpigny, 1994: Hubble-Space Telescope observations of Comet-P/Shoemaker-Levy 9 (1993e), *Science*, 263, 787-791.
- [6] Scotti, J. V. and H. J. Melosh, 1993: Tidal breakup and dispersion of P/Shoemaker-Levy 9: Estimate of progenitor size, *Nature*, 365, 7333.
- [7] Belton M. J. S., C. R. Chapman, T. V. Johnson, C.M. Heffernan, and K. P. Klaasen, 1994: Galileo imaging of the Shoemaker-Levy 9 impact sites, 26th DPS meeting SL9 abstract, Maryland, 2.
- [8] Bronshten, V. A., 1983: Physics of Meteoric Phenomena, Reidel Pub. co., Boston.
- [9] Mac Low, M. and K. Zahne, 1994: Explosion of comet Shoemaker-Levy9 on entry into the Jovian atmosphere, *Ap. J. Lett.*, 434, L33-36
- [10] Crawford, D. A., T. G. Trucano, M. B. Boslough, and M. E. Kipp, 1994: The influence of body shape on the deformation and breakup of comet Shoemaker-Levy 9 fragments as they enter the jovian atmosphere. *Lunar Planet. Sci. Conf. XXV*, 295-296.
- [11] Hammel, H. B. and 16 authors, 1994: Hubble Space Telescope imaging of Jupiter: Atmospheric phenomena created by the impact of Comet Shoemaker-Levy 9. *Science* に投稿中.
- [12] Friedson A. J., and 9 other authors, 1994: Thermal infrared observations of the impact of fragment R at the IRTF, 26th DPS meeting SL9 abstract, Maryland, 13.
- [13] Jewitt, D., J. Luu, and J. Chen, 1994: Physical properties of split comet Shoemaker-Levy 9, *Bull. Am. astron. Soc.*, 25, 1042.
- [14] Bjoraker G. L., T. Herter, G. Gull, S. Stolvy, and B. Pirger, 1994: Detection of water in the fireball of fragment G and K of Comet Shoemaker-Levy 9, 26th DPS meeting SL9 abstract, Maryland, 6.
- [15] Meadow, V., D. Crisp, G. S. Orton, T. Brooke, and J. Spencer, 1994: AAT observations of

Shoemaker Levy-9 collision with Jupiter, 26th
DPS meeting SL9 abstract, Maryland, 8.

- [16] Noll, K. S., M. McGrath, H. A. Weaver, S.
Atreya, J. J. Caldwell, L. Trafton, and R. Yelle,
1994: Hubble Space Telescope spectroscopic
observations of the Jupiter after the impact of
Comet SL9, 26th DPS meeting SL9 abstract,
Maryland, 5.