

特集/シューメーカー=レビー第9彗星の木星衝突

彗星衝突現象の近赤外観測

長谷川 均¹

1. はじめに

1994年7月16日から22日(UT)にかけて、分裂した彗星核(シューメーカー・レビー第9彗星, 以下SL9と略す)が木星に次々と衝突するという予報が発表された。このような衝突現象が予測されたことは初めてであり、各国の観測機関で準備が進められてきた。我々のグループも国立天文台岡山天体物理観測所での観測を計画してきた。例年ならばこの時期は梅雨末期であり、観測条件は極めて悪いのであるが、梅雨明けが早く連日の晴天に恵まれ、予定されていた日程全部を消化することができた。観測は開発段階のOASIS(岡山天体物理観測所近赤外多目的カメラ)を用いた近赤外撮像観測を中心に行った。当初は、衝突直後に形成される木星上層大気にできるエアロゾルからの散乱光をキャッチするのが主な目的であった。うまく行けば衝突によるplume(fireballと呼ばれたり、debris cloudなどとも呼ばれている)の観測もできるかもしれないというものだった。実際に行った観測では衝突直後の発光の時間変化を見事にとらえることができた。光度曲線から衝突現象を解明すること、その後形成された痕跡の観測からその空間構造、組成、サイズ、寿命についてこれまで得られた結果から報告したい。ただし原稿執筆時点でまだ一部データを解析しただけなので、この時点での暫定的な結果とさせていただきたい。

2. 観測体制

近赤外波長領域には木星大気に含まれる水素、メタン、アンモニアなどの分子による吸収帯が存在する。これらの波長では木星対流圏の雲頂レベルからの散乱光が極端に減光される。特に $2.35\mu\text{m}$ 付近のメタン吸収帯では反射能が 10^{-4} 程度までになる。したがって木星本体からの散乱光に邪魔されず、上層大気で起こる現象を観測するには最適である。海外の多くの天文台においてもこの波長が彗星衝突現象を狙うのに採用されていた。表1は岡山で用いたフィルターである。

中心波長(micron)	半値幅	備考
1.496	0.05	アンモニア吸収
1.580	0.01	連続光
1.698	0.05	メタン吸収
2.165	0.022	水素とメタン吸収
2.352	0.05	メタン吸収

表1 観測に用いたフィルターセット。

これらのフィルターセット用いて188cm反射望遠鏡のカセグレン焦点に装着されたOASISを用いて観測を行った。OASISの画素数は 256×256 で、広視野を狙うために縮小光学系により1画素のサイズは、角度の1秒に相当する。1994年7月頃の木星は赤道方向で約40画素に相当する。惑星用であればもう少し拡大率がほしいところであるが同

¹(株)アステック

一視野に入るガリレオ衛星のイオやエウロパは後で整約する際に比較星として使用することができた。OASISは岡山観測所の共同利用のために開発中の観測設備であり、観測期間中にもいくつかの機能が追加されるという状況であった。OASISには撮像モードの他に分光モードもあるが、今回の衝突の観測では試験的にJバンドでの分光観測を行っただけである。連続観測の際の時間分解能は約10秒である。

3. 衝突plumeの観測

我々の観測できた衝突plumeは、C, D, K核である。特に日本では最初の7月17日のC核の衝突は日本時間の午後4時台の観測であり、完全に昼間の観測であった。C核の衝突は直前にいくつかのフィルターでテストした結果、 $2.35\mu\text{m}$ が最も青空の中での観測に適していた。C核衝突で昼間の観測が可能ことがわかり、その後もいくつかの衝突の観測を試みたが、全て雲に邪魔されて観測はできなかった。図1がC核衝突の光度曲線である。

衝突による発光のトータルフラックスを衛星エウロパとの比で示したものである。C核は、木星の1自転前に最初の衝突があったA核の痕跡の近くに衝突した。このA核の痕跡と合わせた光度となっている。ピークのころは、検出器が飽和してしまい正しい値となっていないことに注意していただきたい。観測中には気がつかなかったが大きなピークの前に小さな第1ピークが見られる。

D核の衝突はC核と同じ日であり、C核の経験から予めNDフィルターをセットして観測に望んだ。しかし、D核の衝突による発光は弱く、わずか数分で我々の視界から消えてしまった。

日本で見られた最大規模の衝突は7月19日のK核であった。海外からネットワークを通して入ってきたK核と同規模のG核の衝突が大きかったことと、C, D核衝突時の経験から全光度曲線をとるためにNDフィルターを必要に応じて交換する体制で挑んだ。図2はK核衝突の光度曲線で、衛星イオとの比になっている。観測の現場でも大きなピークの前の10h25m(UT)ごろに小さなピーク

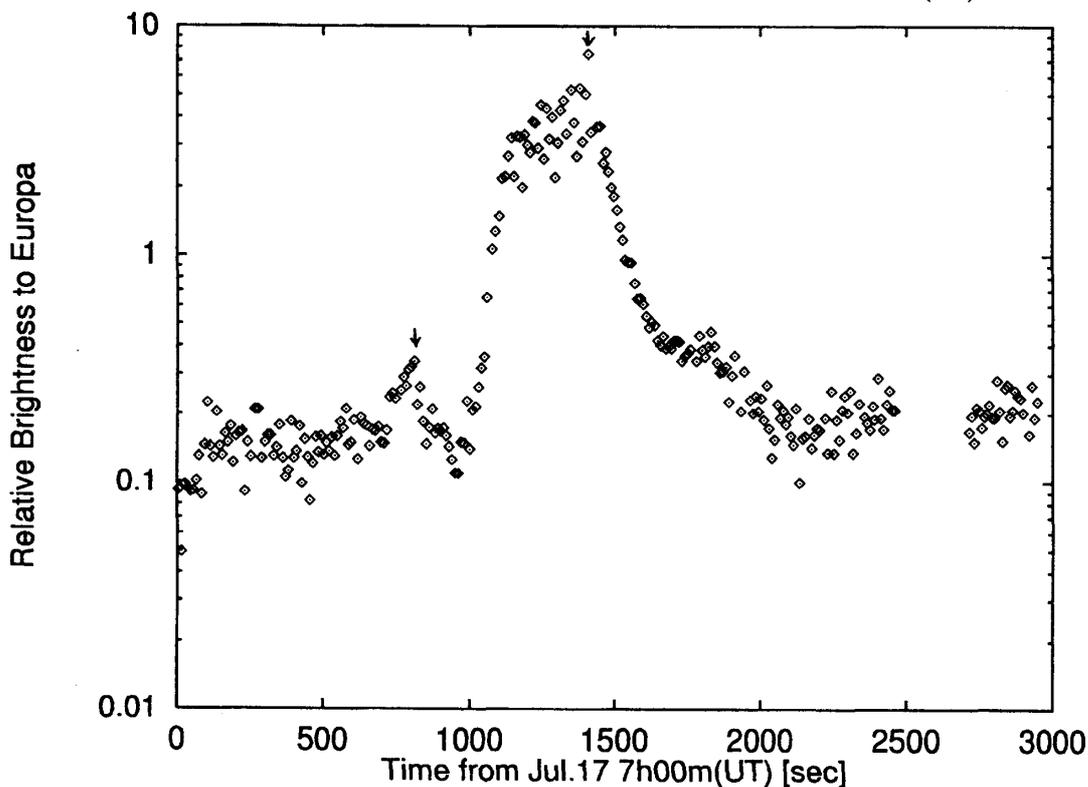


図1 C核衝突の光度曲線($2.35\mu\text{m}$). エウロパとの相対

があることに気がついた。データの処理を進めていくと、さらに10h24mごろにも小さいピークが検出された。この最初の発光がガリレオ探査機のグループが公開したK核衝突の発光とほぼ一致した時刻であるのが興味深い。裏側で起こった突入時の発光が大気中の屈折等で表側にも漏れてきたのか、詳しいことはわからない。最後に大きな発光が10分程度継続し、K核の場合は、 $2.35 \mu\text{m}$ でイオの32倍の輝きであった。IAUC等に報告された他の核についての観測でも2-6分前に小さな発光が認められているものが多い。表2にK核衝突の3つの発光ピークをまとめておいた。

	Time (19 Jul. UT)	Relative Flux
1st peak	10h24m12s	0.037
2nd peak	10h25m26s	0.24
3rd peak	10h38m37s	32

表2 K核衝突の相対フラックス

ここで以上の観測結果についてのおよその解釈を試みよう。最後の大きな発光については、ハッブル宇宙望遠鏡がとらえたplumeの発達過程とほぼ継続時間が一致することなどから、plumeからの発光(熱放射、太陽光の散乱を含んだもの)と考えられる。その前の小さな発光の原因についてはまだ原因がよくわかっていない。Boslough *et al.*[1]のモデル計算によると、衝撃波(shock front)とそれに続くdebris frontの時間差は数秒であり、我々の観測の時間分解能では分離することはできない。Boslough *et al.*やTakata *et al.*によるモデル計算([1],[2])でもplumeが観測可能なレベルまで上昇するまでに1-2分程度であり、5分も遅れてplumeが発達しはじめるというのは予想外の現象であった。

この光度曲線の解釈であるが、最初の1-2分後に見られた発光はモデル計算どおりのおそらく5000K-10000Kもの高温ガスからのものだろう。しかし、冷却し拡散することによって光学的に薄く

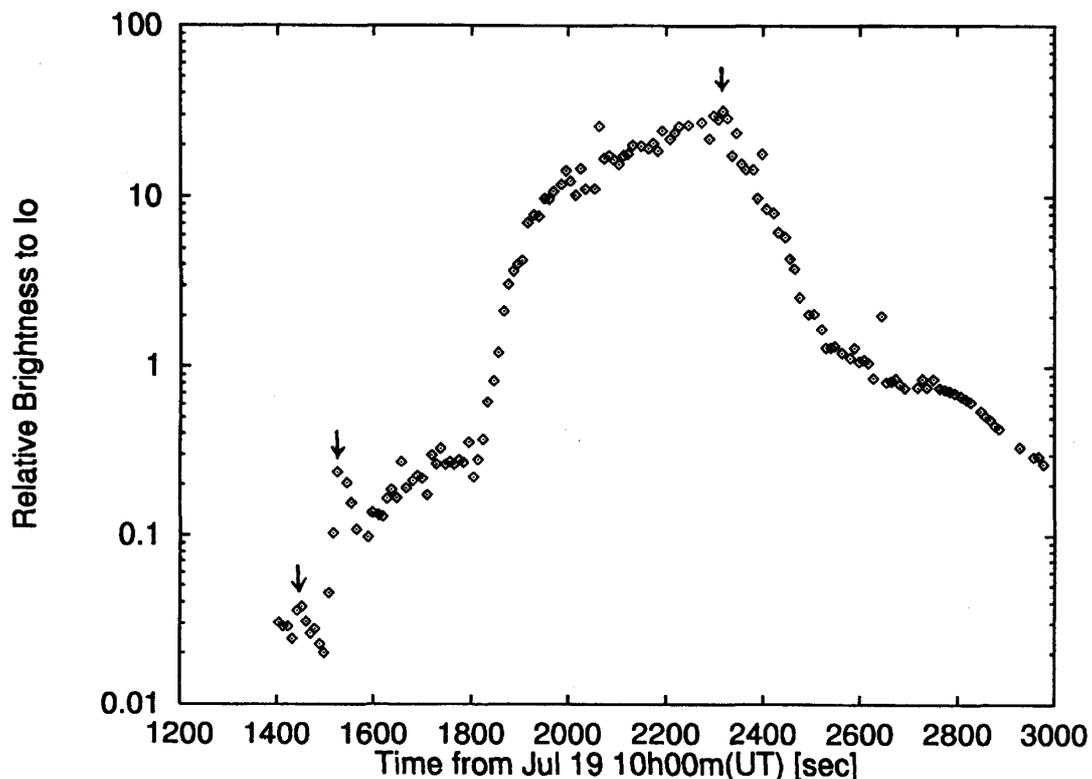


図2 K核衝突の光度曲線($2.35 \mu\text{m}$). イオとの相対

なり一旦は見えなくなった。さらに1000K程度まで冷却すると固体粒子が凝縮し、再び光学的に厚くなりその粒子からの熱放射と太陽光散乱として見えてきたと考えられる。この粒子は弾道軌道を描き20分後ぐらいまでには落下し減光していったと解釈することができる。衝突現象のさらに詳しい解釈は、今後様々な波長で行われた観測の結果を総合するとともにモデルとの摺合わせによって解明されることだろう。

4. 衝突痕跡の観測

衝突の痕跡は、衝突地点が自転によって我々の視界に入って来ると同時に見え始めた。可視光では木星面のどの模様よりも暗く見え、近赤外の分子吸収帯の波長では明るい斑点として見えた。G, K, L核などの大型の衝突痕跡は大赤斑にも匹敵する大きさであった。公開されたハッブル宇宙望遠鏡の画像では、飛散した物質が核の突入方向に吹き返すように広がっている。分光観測などから、これら衝突痕は太陽光のスペクトルを反映していて、粒子による散乱光であると考えられている。イオのアルベドを基準にしてOASISの観測によって得られた衝突痕の $2.35\mu\text{m}$ におけるアルベドは、 $2\sim 8 \times 10^{-3}$ 程度である。粒子層のアルベドを1とした場合で、このアルベドをメタンによる吸収を考慮して太陽光の散乱として説明するためには痕跡の雲頂は10mbar程度となる。実際の粒子層はこのような高いアルベドとは考え難いので、おそらく雲頂はもっと高く、1-3mbar程度が現実的は高度となるだろう。この高度は木星大気の成層圏である。痕跡が衝突地点から、5000-10000km以上も広がっていることから、弾道軌道的に広がったとすると10 km/s以上の放出速度が必要となる。これはAhrens *et al.*[3]の推定した、2kmの核が衝突した場合のガスの広がる速度に一致する。これはplumeの光度変化から、衝突後20分程度で粒子が

落下したという時間にも一致する。

観測されたアルベドから粒子のサイズの下限はたとえば、彗星のダストのような光学定数を仮定すると、半径 $0.1\mu\text{m}$ 程度となる。これより小さい粒子では衝突痕からの反射光を説明することができない。また、粒子の落下時間スケールを推定することによってサイズの上限を決めることができる。ここでは詳細は省略するが、木星大気の10mbarレベルでは、 $1\mu\text{m}$ 以上の程度の粒子は10日のオーダーで落下してしまう。衝突後、2ヵ月以上も痕跡が見えていたことから粒子サイズはサブミクロンサイズと推定できる。

粒子の組成として筆者らは衝突前に彗星の主成分であろう氷を予測をしていたが[4]、その予想は外れ、氷よりももっと反射能の低い粒子の雲が形成された。ただし、氷の場合でも粒子サイズが非常に小さい場合や、不純物が混ざることによって反射能が低くなることも有り得る。ここで粒子の材料となる物質を考えよう。衝突直後の痕跡の分光観測からは、鉄やマグネシウム、ナトリウム、珪素などの元素の輝線が確認されている。これらは彗星核に含まれた塵が起源である。また同時にアンモニア、メタンなどの輝線も検出されている。これらはおそらく大気下部から巻き上げられた木星大気起源のものだろう。また硫化水素を始めとする硫黄の化合物も検出された。硫黄は木星大気で存在が予測されていてこれまで見つかっていなかった元素である。木星形成論から木星と太陽は元素組成比が近いと考えられている。そうだとすると太陽と同じくらい硫黄も存在しなければならない。見つからなかった理由は、2barレベルでアンモニア分子と化学反応して雲を作ってしまうために、分光的に検出できる高さにはほとんど存在しないために見つからなかったと考えられている。今回、彗星の衝突によって下層の大気が上層まで巻き上げられたために初めて検出された。彗星核が

大気上部で爆発せずに、大気深部まで達したという事は、可視光による衛星からの反射光が見えなかったという事実[5]からも支持される。また、水も当然ながら検出された[6]。この水をめぐっては、彗星起源か木星起源かで議論が分かれるところだろう。Takata et al.[2]によれば、衝突によって彗星核の約40倍もの質量が上層大気に放出されるという。木星の大気深部での水の存在度も議論が分かれるところであるが、仮に太陽組成と同程度だとしても、木星大気での存在比(モル比)は 10^{-3} のオーダーであり、上層で検出された水は彗星起源の割合が多くなるだろう。しかし、彗星の揮発性成分の割合が少なければ木星起源とも考えることもできる。この問題についてはこれ以上立ち入れないので、ここでは材料物質として列挙するにとどめておく。

衝突の痕跡を形成する固体粒子は上記の分光的に見つかった彗星起源、木星起源の元素、分子を含む物質から構成されるはずである。plumeの観測から衝突直後は解放されたエネルギーで高温のガスの塊となったものが上空で広がるにつれて、断熱冷却、放射冷却によって温度が下がり、凝結し塵を形成すると解釈できる現象が観測された。衝突直後数分の高温(1000Kのオーダー)で凝縮したことから、彗星起源の高温凝縮物質、たとえば鉄やマグネシウムを含んだシリケートダストのようなものではないだろうか。少なくとも、木星大気起源のメタン、アンモニア、水などの低温凝縮物質ではこの温度では凝縮することはできない。硫化水素もしばらくはガスとして観測されていたので、すぐには固体にはならなかっただろう。これら低温凝縮物質はさらに冷却した後に高温凝縮物質のダストをコアとしてそのまわりに凝結することはあり得るだろう。

複数の波長で得られた撮像データから、衝突痕の位置による輝度プロファイルを描くことができ

る。これらは観測波長や粒子の光学的性質、サイズ、鉛直分布、存在量などによって異なったパターンが得られることが知られている。比較的吸収の弱い波長は、粒子のサイズや光学的厚さに敏感であり、吸収の強い波長では、雲頂高度に敏感であることを利用して多重散乱を考慮した放射伝達モデルを用いて現在解析中である。光領域のデータも多数得られているので、両者を矛盾なく再現できるモデルを作ることによって粒子の情報を制限できるものと考えている

衝突によって形成された痕跡が成層圏に浮遊する微粒子であることは間違いないことはわかった。これがどのように拡散していくかを追跡することもとても興味深いことである。粒子は供給がなければ次第に落下してその密度は減少していく。衝突痕の水平方向の広がり、木星のその緯度における東西流ジェットの南北スケールと同程度かそれ以上である。このため、衝突痕は東西方向に引き裂かれるように振る舞うだろう。また鉛直シアがあれば、やはり東西方向に広がるだろう。我々の近赤外観測では、衝突週間を含む9夜の間には目立った東西方向への広がりには検出されなかった。しかし、その後の可視光で見られる黒い痕跡は明かに東西方向に広がっている。可視光で黒く見える模様と、近赤外分子吸収バンドで明るく見える模様が一致することから、分解能の高い可視光の観測から成層圏エアロゾルの追跡が可能になるだろう。木星成層圏循環を調べる絶好のトレーサーとなっている。また、黒っぽい塵による太陽光の吸収によって、成層圏の循環そのものを変えてしまう可能性もある。事実、極上空のヘイズ層が木星成層圏大気力学に重大な影響を与えているかもしれないという示唆もある[7]。

ところで、上記の力学的な拡散効果や粒子の落下により、雲の頂上の高度が下がり、光学的にも薄くなり、散乱光強度は次第に弱くなっていくだ

ろう。先ほど粒子の落下時間スケールを見積もったが、 $0.1\mu\text{m}$ 程度の粒子では3-4ヶ月が寿命となる。1-5mbar付近の観測に適した $2.35\mu\text{m}$ のメタンバンドでは次第に見えなくなるだろうが、もう少し吸収の弱い、 $1.70\mu\text{m}$, $2.17\mu\text{m}$ ではもう少し落下したダストにも感度があるので、拡散の効果が弱ければまだもう少ししばらく観測され続けるのではないだろうか。

5. まとめ

まだまだまとめらるほどの成果とはなっていないが、彗星衝突現象についておよそ次のようなストーリーを展開できる。K核衝突時に最初に見えたガリレオ探査機の観測した発光とほぼ同時の発光は直接突入によるものだった。次に1分後に見えた小さな発光はplumeによるもので、衝撃波によるものも含まれている。これらは急激に拡散、冷却して光学的に薄くなり一旦は視界から消える。数分後にさらに冷却したガスは塵の凝縮によって再び光学的に厚くなり観測された。この塵は10-15km/sの速度で弾道軌道を描き、20分ぐらいで再び木星大気成層圏に落下し、1-10mbarを頂上とする塵の雲を形成した。これは可視光では黒く見え、近赤外分子バンドでは相対的に明るく見えた。粒子はおそらく彗星起源のシリケートダストのような高温凝縮物質であり、サイズは $0.1-1\mu\text{m}$ の間。衝突後数カ月で上部成層圏からは落下するが、下部成層圏にはしばらく残留し、成層圏大気のトレーサーとして見えるだろう。いつまで成層圏に滞留するかを見届けることは、こうした天体の衝突が過去の地球大気に与えた影響を知る上で重要だろう。

参考文献

- [1] Boslough, M.B., Crawford, D.A., Robinson, A.C., and Trucano, T.G., 1994: Mass and Penetration Depth of Shoemaker-Levy 9 Fragments from Time-resolved photometry. *Geophys. Res. Let.*, 21, 1555-1558.
- [2] Takata, T., O'Keefe, J.D., Ahrens, T.J., and Orton, G.S., 1994: Comet Shoemaker-Levy 9: Impact on Jupiter and Plume Evolution, *Icarus*, 109, 3-19.
- [3] Ahrens, T.J., Takata, T., and O'Keefe, J.D., 1994: Radiative Signatures from Impact of Comet Shoemaker-Levy 9 on Jupiter, *Geophys. Res. Let.*, 21, 1551-1553.
- [4] Hasegawa, H., Takeuchi, S., and Watanabe, J., 1994: Detectability of Water-Ice Clouds Expected after the P/Shoemaker-Levy 9 impact with Jupiter at Near-Infrared Molecular Bands, *Planet. Space Sci.*, 41, 791-795.
- [5] Yanagisawa, M., 1994: Upper Limits of Europa Brightness at K-Nucleus Impact, *Earth, Moon and Planets*, submitted.
- [6] Bjoraker, G., Herter, T., Stolovy, S. Gull, G. Pirger, B., 1994: *IAU Circ.*, 6053
- [7] West, R.A., Friedson, A.J., and Appleby, J.F., 1992: Jovian Large-Scale Stratospheric Circulation, *Icarus*, 100, 245-259.