

特集／シューメーカー＝レビー第9彗星の木星衝突

シューメーカー・レビー彗星と木星との衝突シミュレーション

矢部孝¹，青木尊之²，佐々木晶³，阿部豊³，小林直樹³，
寺沢敏夫³

7月17日から木星に衝突を始めたシューメーカー・レビー彗星だが，この衝突と引き続く爆発に対するシミュレーションの世界的な現状を概観した．これらのシミュレーション結果では予測できなかったほどの大爆発が観測され，長時間におよぶ巨大な爪痕，二度も起こった増光などの，観測結果との食い違い，問題点を交えながら解説した．

1. はじめに

7月17日は天文学者のみならず，一般の人にとっても非常に興味ある日であった．かく言う著者の二人(矢部，青木)も天文学者ではない．天文学者でない者が，専門家をさしおいて，ここでしゃり出てくるのを苦々しく思われる方もいらっしゃるかもしれないが，我々の印象では天文学者はこうした素人が気軽に仲間に加わることに寛容なようである．もともと，いわゆる天文ファンなどというアマチュアを相手にしてきたせいかもしれないし，そんな小さいことにこだわらないスケールのことにいつも携わってきたせいかもしれない．

でも，我々と今回の事件がどうして結び付いて，今日に至ったかを述べないと，この先話が進まないで，ちょっと述べさせてもらおう．矢部と青木は，元々レーザー核融合を専門とし，そのコンピュータシミュレーションを生業としていた．面

白いことに，レーザー核融合では物理のあらゆる分野の現象が起こる．たとえば，超強磁場生成，X線，超高密度，流体現象，核反応，原子過程，超高速電子，電磁波，非線形現象など数え上げればきりが無い．こう並べてみると，どんな分野にもどれか一つくらいは共通するものがありそうである．我々は，レーザー核融合に現われるこうした現象をシミュレーションするために，計算手法を新たに開発する必要があったわけである．そこで，開発してきた計算手法(CIP法)が現在，色々な分野で使われ始めている．この一例については，すでに物理学会誌の解説[1]で紹介した．

今回の彗星と木星との衝突も実を言えば，この計算手法の一例題なのである．シューメーカーレビー彗星は1993年3月24日にシューメーカー夫妻とレビーによって発見された[2]．発見後一年で，今回の衝突となったのは，皆さんご存じの通りである．ところが今回の衝突は，理論屋が予測したものとまったく違い，幸運にも予想を裏切って非常に爆発が大きく観測にも見事にかかり，観測屋さんを“これで死んでもいい”と言わしめるほどのエキサイティングなものであった．

2. 衝突のシナリオ

ここでは，衝突前の理論屋の予想がどんなものであったのかということと，どういう点が問題に

¹群馬大学，²東京工業大学，³東京大学

なっているのかという点を、我々の主観を大きく交えながら述べてみたいと思う。まず、衝突から爆発までの筋書をざっと辿ってみよう。21個に分裂した彗星は、それぞれ異なった時間に木星の裏側に衝突した。ボイジャーの観測から木星の大気は、大部分が水素で残り10%程度がヘリウムであると推測されている。大気の上層部にアンモニアなどを含む雲が漂っている。木星表面で爆発が起こってこの雲を突き破ってきたときに、地球から爆発が見えると考えられていた。この雲は、木星の大気の0.5~5気圧付近にある。

彗星の物質がどんなものからできているかは分かっていないが、多分、氷に近いものではないかと思われていた。これに多少の岩石などが含まれている可能性があり、しかも、衝突前にすでに分裂していることから、そんなに固いものではなく、まるで“汚れた雪ダルマ”と形容されるようなものだろうという推測が大勢を占めていた。

分からないから、何もしないでは理論屋の意味がないので、大多数は、彗星を固い氷と考えて計算を行った。この彗星が、秒速60kmで、木星の大気に突入してくる。これはマッハ数にして約100である。すると、木星の大気が吹き付ける動圧は巨大なもので、例えば、木星大気の10気圧(密度 $\sim 1\text{mg/cm}^3$)の動圧は36000気圧にもなる。この巨大な動圧を受けて、彗星は圧縮されたり引き千切られたりして消滅して行くだろう。こうして、彗星の持つ運動エネルギーは周囲の大気へと移動し、このエネルギーが大気中を伝播してゆく。もし、この時のエネルギーの解放が短時間で起これば、爆発的な現象となり、まるで原爆の爆発のようにきこ雲となって吹き上がる。これは、非常に短時間のうちに終わる。その後、吹き上がった雲は、重力のために地表に落ちてくる。この雲の中で凝縮した“塵”が木星に巨大な穴のような構造を見せたのではないかという意見が多い。これが、彗星

衝突の簡単なシナリオである。

3. シミュレーション同士の違い

それではまずは、彗星の消滅の計算から見てみよう。これについては、我々を含めていくつかのグループが計算を行っているが、全部の計算が異なった結果を出している。それでも、大きく分けて二つのグループになる。一つは、カリフォルニア工科大学のAhrensらとジェット推進研究所のOrtonによるもので[3]、彗星は途中で分裂せず、木星の奥深くまで突入し、エネルギーの解放は高さ方向に非常に広い範囲で起こるといふ、“軟着陸型”である(この言葉の意味は誤解を招くかもしれないが、比較的“軟”という意味だと理解してもらいたい)。サンディアの軍事研究所[4]もこれに近い結果を出している。もう一つのグループは、シカゴ大学のMac LowとNASA AmesのZahnleの計算[5]と、我々(群馬大、中国科学院、東大)のグループである[6]。これは、彗星が、途中で分裂し、そのときの衝撃が元で急激なエネルギーの解放が起こるといふ“激突型”である。Zahnleらは、彗星を比熱比 $\gamma = 1.2$ の高密度の理想気体として計算したために、途中で 20g/cm^3 という異常に高い密度となったり、振る舞いが気体的であったりすることが問題とされた。

我々は、彗星を理想気体、水、氷の三つの場合で計算を繰り返し、図1のような結果を得た。細かい違いは別にして、彗星はどの物性(固くても柔らかくても)の場合でも、ほとんど同じように分裂し、同程度の深さでエネルギーを解放するという結果を得た。しかも、Zahnleらよりももっと激しい激突型であった。Zahnleらは最初に投稿した論文がNatureに掲載拒否されたので、その後、彗星を水であるとした計算を行い、Ap. J. Lett.に受理されたようだ。その結果が、以前の $\gamma = 1.2$ よりも我々に近い結果を出すという電子メールを最近受

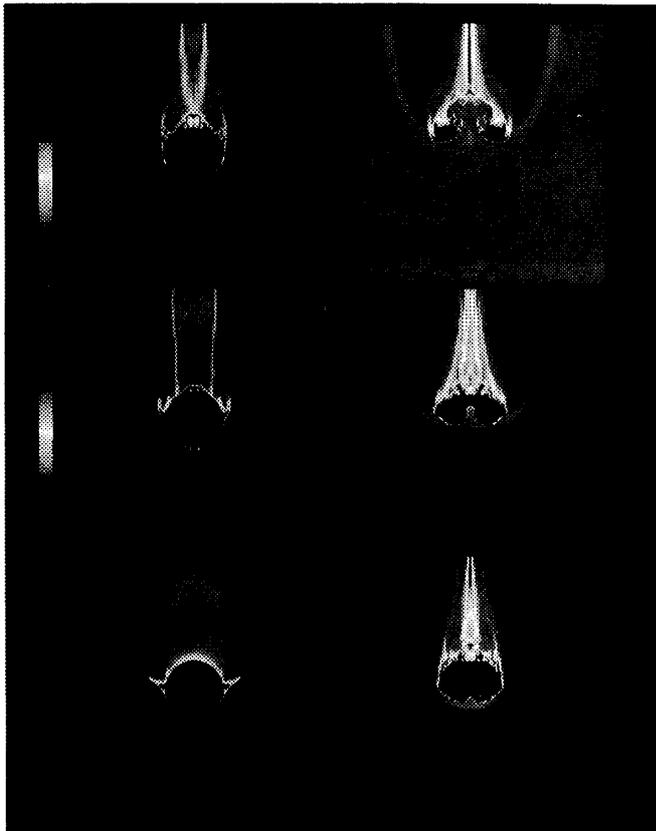


図1. 彗星に氷の状態方程式を用いた計算の密度の等高線、時刻は左下より右上へ0.48, 0.96, 1.44, 1.92, 2.4, 2.88秒後のプロファイルでそのときの木星の大気の圧力は0.49, 0.95, 1.86, 3.6, 7.1, 13.9気圧である。

けとった。

それでは、彗星を同じように固い物質であるとしたのに、どうして"軟着陸型"と"激突型"の違いが出てくるかに注目して、もう少し図1の説明をしておこう。図は、密度の等高線で、彗星(直径3km)は密度 $\sim 1\text{g/cm}^3$ で、秒速60kmで木星大気に突入する。大気の最初の密度は $\sim 10^{-5}\text{g/cm}^3$ であるが、木星の内部に侵入するにつれ気圧が上昇し、最後の図では、 10^{-3}g/cm^3 にも上昇している。木星大気の動圧によって力を受けた彗星は氷であるため縮むことができず、表面に波が立つことによってその影響を横に逃がしている。この波が引き千切られて表面が剥がれて行き、次第に彗星が痩せ細って行く。これは、水を平手でバシッと叩いてみると水飛沫が上がることから想像できる。

一方、Zahnleらのように、彗星を圧縮しやすい物質だとすると、スポンジを叩いたときのように、表面波が出ずに圧縮されるだけである。

次第に高い気圧の領域に行くと、動圧で彗星の先頭が凹んでくる。この凹みは円錐状をしているので、円錐の円の方から頂点の方へと大気が流れ込み、そこに集中する。こうして、凹みはますます増大し、そこから彗星に穴があく。この穴から流れ出る大気の噴流によって彗星の残りの部分が引き千切られ粉々になるために、急激なエネルギーの解放が起こるのである。

では、Ahrensらと我々の違いは何から来ているのだろうか。彼等も同様に氷の物性を使っているのに、凹みが現われず、彗星の物質はもっぱら縁の方から剥がれて行くだけであった。彼等は、SPH (Smoothed Particle

Hydrodynamics)という計算手法を用いている。これは、流体を粒子群に置き換えて行う計算法であるが、粒子が少ないと、一個の粒子が代表する流体の塊が大きすぎて、彗星の薄い表面が剥がれて行くような細かい現象が捕えられないことがあるということと、一個の粒子の慣性が大きすぎてなかなか止まらないということが指摘されている。また、彼等は三次元計算であり、我々は、軸対称二次元であることも違う。後者では、軸付近でのsingularityが悪さをするのではないかと疑われている。我々もメッシュを倍に増やしても結果が変わらないことをチェックしているのだが、こちらで三次元計算をしないかぎり、この点は問題にされるだろう。もう少し待てば色々わかってくるだろうが、今はこんな状況である。もう一つのサンディアの計算はどうなっているのだろうか。これは、軍事研究所の特性で、計算手法の中味は一切秘密、使っている物性も秘密で、彗星のダイナミ

ックスに関する記述がなく、エネルギーの散逸結果を出しているだけなので、違いを議論することができない。

ここで、もう一つ読者に注目してもらいたいのは、我々以外のすべての計算がスーパーコンピュータを用いたものであることだ。我々は、これのわずか100分の1のスピードしかないワークステーションで上記の結果を出した。それでも、スーパーコンピュータの結果とほとんど変わらないかそれより良い解像度を得ている。これこそ、計算手法の勝利と言えよう。核融合学会誌の解説でも述べているように[7]、二次元の計算だと x, y, t の三方向の計算量があるので、一方向に3倍少ない計算量で済む計算法を開発すれば、 $3^3=27$ 倍速く計算

できる。三次元では $3^4=81$ 倍にもなる。これからも、何故ワークステーションでスーパーコンピュータ並みの計算ができたのかがわかるであろう。

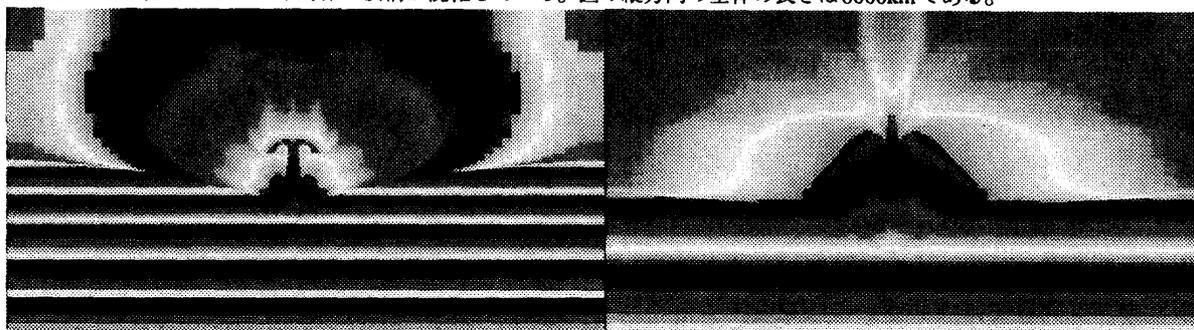
4.シミュレーションと観測のくい違い

それでは、この結果の違いが観測にどう現われてくるのだろうか。これについても、上記の各研究で行われている[3, 4, 8]。しかし、殆どの計算が、大体衝突後100秒程度までの話で終わっている。確かに、100秒まで行えば、爆発の噴煙は立ち上る。実は、問題はこれから先なのである。この後、次第に流体運動が遅くなり、今度は(密度勾配と重力とから引き起こされる)重力波が支配的となってくる。丁度、水の表面に石を投げ込んだ時のよう

図2. 10気圧付近で 10^{28} ergのエネルギー（小さいA核=直径1km位の彗星の衝突に相当）を解放した後の、火の玉の運動。59秒後、 10^4 秒後の温度の等高線である。人間の肺のような部分が約15000度、衝撃波（プリューム）付近は2000度となっている。図の縦方向の全体の長さは1000kmである。



図3. 図2をさらに長時間計算したときで、150秒、630秒後の密度プロファイル。温度はほとんど等温に近くなっているので、そのプロファイルでは構造が見えないので密度で示した。密度は木星表面から真空近くまで、数十桁も変化するので等高線の横縞が混雑している。図の縦方向の全体の長さは8000kmである。



な波紋が表面を広がってゆく。この波紋だけに注目して、津波の計算手法を用いて行ったのが Harrington らの仕事である[9]。彼等の論文を読む限りでは、この波が観測されるのはかなり難しいとの印象であった。彼等は、衝突直後の爆発を無視して計算を始めたので、観測で問題となっている時間スケールの現象は無視していたからである。

しかし、ご存じのように、数千キロメートルもの巨大な爪痕が数時間近くも観測されたのである。我々は、この現象を爆発から約 1000 秒まで追跡した(図2, 3参照)。用いたのは、図1で用いたものと全く同じ計算コードである。図は直径 1km の小さな彗星の場合だが、100 秒くらいの短い時間にファイヤーボール(火の玉:元の彗星が広がった部分)は、一気に 1000km 近くも噴き上がる。図の中で、黄色から赤色をした人間の肺を思わせる部分がこのファイヤーボールである。この部分の密度は周囲よりも低く、渦状の流れが内部で起きている。上空の弓状の部分がプリュームと呼ばれる衝撃波である。この部分はさらに時間が経つにつれ、上昇を続け、図3のようにプリューム部分のみが傘のように千切れて上空へと飛び去ってゆく。残りの部分は 2000-3000 度の温度を保ちつつ 1 万 km にも及ぶ構造を 800 秒以上の時間に亘って持続させる。これが、観測されたあの巨大な構造の前兆なのだろうか。

この他にも、不思議な現象が沢山起きている。爆発(正確には増光)が数分の間隔で二回起こったという観測もある。これについては、我々の図3のように、最初のきのこ傘の部分が千切れていったのが一回目で、大規模な残りの部分が少しずつ膨張して地球から見えるような位置にまで上昇してきたのが二回目ではないかとの議論もある。これからしばらくは、こうした観測結果を解釈する論文が続々と現われることだろう。我々も、負けず

に頑張るつもりである。

もっと困った問題は水のスペクトルが観測されなかったことである。彗星が水や氷からできているならばこのスペクトルが見えてもよさそうである。見えなくても、それでも氷だったのだろうと信じる人達と、彗星は岩石の塊だったのではないかという人達に意見が分かれている。でも、水よりもさらに固い岩石が、観測できるほどの浅いエネルギー散逸をどうして行ったのかという疑問も残る。

この件に関して計算を行っているのは、日本では今のところ我々だけであるが、それもこれも新しい計算手法のお陰である。この手法は、現在、固体から、液体、気体まで解くことのできる手法として、少しずつ浸透しつつあるが、これ以外にも、プラソフ・ボルツマン方程式、マクスウエル方程式、熱伝導方程式などにも応用できることがわかっている。これからも、地球物理や天文の多くの問題に適用してゆくつもりである。

参考文献

- [1] 矢部 孝 1992 : 日本物理学会誌 47, 18.
- [2] C.S.Shoemaker, E.M.Shoemaker, and D.H.Levy 1993: Comet Shoemaker-Levy, IAU Circ., 5725.
- [3] Ahrens, T. J., Takata, T., O'Keefe, J. D., and Orton, G. S. 1994: Impact of comet Shoemaker-Levy 9 on Jupiter, *Geophys. Res. Lett.* 21, 1087-1090.
- [4] 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.Lett.* 21, 1555-1558.
- [5] Mac Low, M.-M. and Zahnle, K. 1994: Explosion of comet Shoemaker-Levy 9 on entry into the Jovian atmosphere. *Ap. J.* 434, L33-

L36.

- [6] Yabe, T., Xiao, F., Zhang, D. L., Sasaki, S., Abe, Y., Kobayashi, N. and Terasawa, T. 1994: Effect of EOS on break-up of Shoemaker-Levy 9 entering Jovian atmosphere. *J. Geomag. Geoelectr.* 46, 657-662.
- [7] 矢部 孝 1994 : パソコンでもできるスーパーコンピューティング、プラズマ核融合学会誌 70, 640-648.
- [8] Zahnle, K. and Mac Low, M.-M. 1994: The collision of Jupiter and Comet Shoemaker-Levy 9, *Icarus* 108, 1-17.
- [9] Harrington, J., LeBeau, R. P. Jr., Backes, K. A. and Dowling, T. E. 1994: Dynamic response of Jupiter's atmosphere to the impact of comet Shoemaker-Levy 9, *Nature* 368, 525.