

夜行急行 SL 9-1993e : 木星行き —1000年に1度の臨時列車—

渡部 潤 一

〈国立天文台 〒181 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail : owatana@c1.mtk.nao.ac.jp

長谷川 均

〈アステック〉

e-mail : hh@astec.co.jp

さあ、あの木星のあたりを眺めてごらん。ほら、見えないか？ 漆黒の闇を行く夜行列車のテールランプが、よく、耳を澄ましてごらん。聞こえないか？ 無限軌道を走りゆく SL の汽笛が、僕らの歓声も、いまごろは届いているかもしれないね。1000年に1度の臨時列車 SL 9。45億年の長い旅路の果てに到着駅：太陽系最大の惑星・木星へたどりつこうとしているんだよ。

1. JR カリスト駅にて

「おそいな。」

JR (ジュピター・レイルウェイ) のカリスト駅の駅長は腕時計をちらっとみると、ふたたび太陽の方向をじっと見つめた。やがて、太陽のやや右手にかすかな煙があがっているのがみえた。

「やっと来たな。」

まちがいない。一両編成の定期列車ハレーである。ほとんどの列車が太陽の左側から入線するのに対して、ハレーは右の軌道からカリスト駅へ入ってくるからだ(注1)。太陽光をうけて灰色に輝く煙は、形をかえながらみるみる大きくなり、どでかい図体を複雑に揺れ動かしながら(注2)、甲高い汽笛を鳴らすとカリスト駅へと滑り込んだ。

「いやー、すまんね。久しぶりに太陽に近づいたら、ちょっと煙の吹き方が変わってしまって、遅れてしまったよ(注3).」

「ハレーさんは今まではきっちりと時間を守っ

ていたはずだがね。」

駅長は時刻表をめくりながら、渋い顔をして言った。

「面目ない。それにしても私も歳を取ったよ。面の皮が熱く厚くなって太陽からの熱がうまくカマの中に伝わらないんだよ(注4).」

「そりゃ、気をつけるこったね。えーと、3時間遅れ、と。それで、これからもこの遅れのままでいいのかね？」

駅長は時刻表のハレー定期便の予定表に「3時間遅れ」と書き込むと、次回の予定を確認する。次のハレーのカリスト駅到着は2065年であった。

「ああ、そうだね。しばらく遅れはこのままじゃないかな。ところで、駅長さんは忙しいかい？」

「そうさな、予定ではすぐに特急プロルセン・メトカーフ号と急行ブラッドフィールド号の到着があるね。だが、なんといっても1000年に1度の臨時列車があるんだ。これの車両編成替えをここでやらなきゃならん。」

「ほう、そいつは久しぶりの大仕事だね。だれだい、そいつは？」

Junichi Watanabe, Hitoshi Hasegawa : Night Express SL9-1993e for Jupiter : Special Train once in a thousand years.

「夜行急行 SL9 さ。いまシノーベ駅で待機中だよ。もうすぐこっちへ向かって来るはずだ。」

2. SL9の発見

1993年3月24日、パロマー山天文台の口径46cm シュミット望遠鏡で、いつものように小惑星サーベイをしていたシューメーカー夫妻とレビーは、おとめ座に実に奇妙な天体を発見した。棒状の構造の中にいくつかの集光部が連なっている。塵の尾らしきものがある、確かに彗星らしいのだが、形はなんとなく横向き銀河のようでもあった。実際、発見前に写真撮影をし、ネガを検査していたのに、銀河だと思って発見の栄誉を逃した日本のアマチュアが複数いる。しかし、この天体が移動しているのは確実で、その姿(表紙)はまるで宇宙をいく夜行列車のようなものであった。その後キットピークで確認が行われ、シューメーカー・レビー第9彗星1993e、つまりSL9の誕生となる。

3. SL9, カリスト駅へ

1992年7月。カリスト駅では、駅員が1000年に1度の大事業に汗まみれになって準備に追われていた。SL9は旧型の列車で、45億年前に海王星車両製造株式会社で作られて以来、太陽駅には近づかない無限軌道(注5)を巡っていた夜行列車だった。そのため車両の編成替えはたいへんである。まず、木星へ一度近づける線路へ入れ、近木点の瞬間にうまく列車の連結器を切り放し、予定通り

の編成にしなくてはならない。その軌道へ投入するタイミングが難しい。駅長ほかJR職員の腕の見せどころだ。

やがて、シノーベ駅から静かにやってくるSL9の姿が見えてきた。表面にはほこりが厚く積もっていて、吐き出す煙の量も極端に少ない。動輪の数は5つのE型で、型番は1993eである。

「やあ。しかし、これはまた旧型だなあ。調子はどうかね？」

その古色蒼然たる姿に駅長は声をかける。

「よくないね。ここまでくるのもやっとなだよ。」

「あとすこしの辛抱。いま用意した軌道にそって進めばうまい具合に連結器が外れて、元気のいい煙を出せるさ。」

そう言って駅長は木星へ敷かれた軌道を指さした。

「そうかい、それはありがたい。最後くらいは、豪華なフィナーレを飾りたいからね。」

「それじゃあ、列車編成の確認をしよう。マニ202, ナロネ203, ナロネ225……。」

「オーケー。それじゃあ、お元気で。」

SL9は弱々しい煙を吐きながら木星の方向へ走りだし、やがて裏側へ隠れてしまった。しばらくすると、ドーンという大きな音が木星の後方から聞こえてきた。連結器切り放しの衝撃である。木星の裏から再び現れたSL9は派手に煙を吐き出しながら、予定通り20両編成の列車へと変身していた。

4. 潮汐力による分裂

SL9が木星のすぐそばで発見されたこと、核が並んでいる、つまり分裂したばかりであるらしいというので、もしかしたら木星に接近して分裂したのではないか、という憶測が飛び交った。その後、位置観測がすすんでくると、SL9は確かに木星のまわりをまわる軌道に入っていることが判明し、さらに初期の推測通り、発見の8カ月ほど前に木星にかなり近づいたこともわかったのである。そ

(注1) ハレー彗星は周期彗星には珍しく軌道傾斜角が162度の逆行軌道である。162彗星の内、他に逆行なのはテンペル・タツトル彗星、スイフト・タツトル彗星のふたつしかない。

(注2) ハレー彗星の自転運動は単純ではなく、自由歳差運動があると思われる。

(注3) 彗星は吹き出すジェットの影響で周期が変わる(非重力効果と呼ばれている)。

(注4) 彗星表面は揮発性の物質で覆われている。

の時の木星への最接近距離は約10万キロメートル。これは木星の半径のたった1.4倍で、木星の強い潮汐力によって分裂した、としても不思議ではない。彗星核はもともと分裂しやすいものだが、このように木星に近づいて分裂したのは1889年に5つに分裂したブルックス第2彗星以来、約100年ぶりの事である。

5. JRイオ駅にて

「久しぶりに見る連結列車だね。」
イオ駅では、目の前を轟進していくSL9の壮観さに歓声があがっていた。

「こんなのは100年ぶりかなあ。」

「そうだね。しかし、あの時よりも車両数は多くて、見応えはあるな。」

SL9がイオ駅を通過していった後、もくもくと吐き出される煙が、もともと太陽系で最もほこりっぽいイオ駅(注6)をさらに覆った。SL9は急行なので、ここには停車せず、車両間隔を徐々に広げながら遠ざかっていった。

「ところで、駅長さん。あの列車はどこへ行くんですか。」

「えーと、列車ダイヤによるとね……」

駅長はおもむろにダイヤを開くと、驚いて叫んだ。

「やあ、こりゃ珍しい！ 100年どころじゃないね。SL9は1000年に1度、重金属(注7)を運搬する臨時列車だよ。終着駅はすぐその木星だね。」

6. 木星への衝突

SL9発見後、時間が経つにつれ、驚くべき事実が判明してきた。SL9の軌道を未来に向かって数値積分してやると、1993年7月には木星中心から3万5千キロメートルを通過するのである⁴⁾。木星の半径は7万キロ余り。つまり、これはSL9が木星へ衝突することを意味する。発見されてから

(注5) 冥王星の外側に彗星の巣があり、カイパーベルトと呼ばれている²⁾。

3カ月後の7月までには軌道改良が繰り返され、ついに衝突が99%確実になった(図1)。

このような大きな彗星の木星への衝突の確率は1000年に1度と計算されている⁵⁾。もしかすると、このような彗星の衝突は人類にとって最初で最後の機会になるかも知れない。世界中の惑星科学者は騒然となった。

1993年5月28日、日本でも国立天文台岡山天体物理観測所の口径188cm望遠鏡がSL9へと向けられた。そして、ニュートン焦点につけられたCCDがその車両編成を捉えた(表紙)⁶⁾。

終着駅：木星で何が起こるのか。その鍵は突入する核の大きさにかかっている。岡山でのRバンドのCCD測光から、われわれはサイズの見積りを試みた。実は、彗星の質量ほど見積りの難しいものはない。核そのものが見えていても、表面の反射率や塵とガスの比、放出速度など、仮定するものが多すぎるからである。そこで、核の大きさの上限と下限とを推定してみた。各核の明るさを純粋な核からの反射光のみであると仮定して求めると、核のまわりからの塵が混入していることから上限値となる。一方、核の周りでの、やや大き

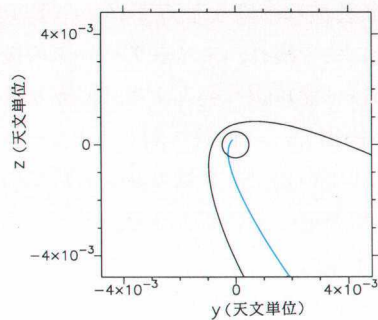


図1 木星へ衝突するSL9の軌道の様子(通信総合研究所, 吉川真氏 提供)。黒の軌道は1992年のもの。

(注6) 木星の衛星イオには活火山が存在する。そのエネルギー源は木星の潮汐力といわれている。

(注7) 彗星の衝突によって惑星大気には一部の重元素が過剰になっていると思われる³⁾。

めの円と小さめの円とのなす環状部分を、その核から放出された塵であるとすれば、その質量と放出速度から単位時間当りの塵の放出率が求まる。この塵は二酸化炭素ガスの蒸発によって吐き出されたものとする、その距離における純粋な二酸化炭素の氷の単位面積当り、単位時間当りの質量放出率が求められるが、これは実際に比べてかなり過大評価になっているはずである。したがって、塵の質量放出率をこの値で割ってやれば、表面積の下限値が出る。彗星の表面は不均一であり、全表面から蒸発が起こっていることは考えられないが、そう仮定をすれば大きさの下限値が求められる。核の直径は上限値が10 km~8.5 km, 下限値が1~0.7 km となった。HST などでは核の上限が5 km とされている。

さて、これらの核の大きさから、水の氷の密度 1 g/cm^3 を採用して推定した質量の上限下限も $10^{11} \sim 10^{15} \text{ kg}$ と計算できる。核の密度も実は人によって一桁くらいの差があるが、いずれにせよ木星との衝突時のエネルギーは平均 10^{29} エルグ程度、広島型原爆の1億倍である。

7. 再びカリスト駅にて

SL 9 は木星から一旦5千万キロメートル弱の遠木点付近にまで離れ、スイッチバックの後、再び勢いをつけて終着駅へ突入する。JR カリスト駅では職員が総出で、終着駅へ向かう SL 9 の姿を遠くから眺めていた。SL 9 はカリスト駅で引いた軌道をうまくたどっているようだ。

「あとは木星までノンストップだな。」

「駅長さん、到着予定はいつごろです？」

「そうさな、最初のマニ 20 2 が7月18日10時、最後のナハフ 20 6 が7月24日0時だね。」

「そんなにかかるんですか？」

「ああ、なんせ切り離れた後は、それぞれの車両が軌道上でどんどん離れて行くからね。2年も経つと先頭と最後尾で1000万キロメートル以上の差ができるんだ。」

カリスト駅の電灯が一瞬暗くなった。最初の車両が木星磁気圏へ突入し、電流を乱したらしい(注8)。

「いよいよだな。」

駅長が呟いた。各車両はスピードを上げて次々に木星へと向かって行く。

「やあ、これはきれいだ！」

駅員の一人が木星の極の明りを指さして叫ぶ。オーロラの乱舞である。SL 9 の吐き出す煙が飛び込んでいるに違いない(注9)。

やがて、最初の車両が木星の影に入り、見えなくなったかと思うと、大音響と共に太陽ほどの明るさの閃光が走った。目を覆うほどの明るさである。車両は雲をかき分けながら急ブレーキをかけ、ほんの数秒足らずで積荷を完全に降ろしたわけである。あとはJR 木星環状線の貨物列車がその積荷である重金属を全体に均等に配分するはずだ。

1時間ほどすると到着地点が木星の自転により昼の側にまわって、太陽の光に照らされた。

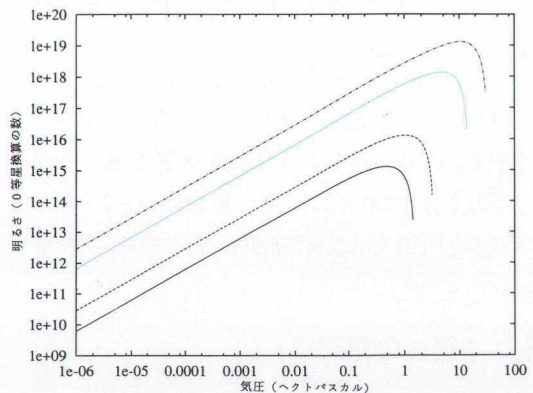


図2 彗星核衝突時の明るさの変化。横軸は木星大気の深さを気圧で表している。縦軸の明るさの単位は100キロメートルの距離から見た時の0等星の数。青が 10^{13} kg のもの。

(注8) 彗星から供給される大量のガスが木星磁気圏に影響し、シンクロトン放射などに影響すると思われる。

(注9) 電離したガスは磁力線にそって両極に降り注ぎ、木星オーロラに影響を与えていると思われる。

金色に輝く、きれいなきのこ雲があたかも SL 9 の墓標のようであった。

8. 衝突時に何が起こるか

このような 10^{29} エルグにもものぼるエネルギーが大気中に注入された場合に、いったい何が起こるのか、正確な予想はつかない。その理由は、この規模の現象の前例が無いこと、それに木星の大気構造、特に鉛直方向の構造がわかっていないからである。

しかし、規模は小さいながら大気に突入する天体の発光については、これまで地球で観測された火球の観測・研究などからある程度推測することが可能だ。長谷川と高田⁷⁾は、衝突天体の大気による減速を考慮した運動方程式と、衝突による摩擦の効果を表す質量減少の式を解くことで、大気突入時の発光の様子を推定している。木星大気を等温大気と仮定し、この減速と質量減少による運動エネルギーの損失の一部が発光に消費されるとして、質量損失率に地球上での火球の観測から得られた発光係数⁸⁾をかけることで明るさの変化も推定できる。

図 2 は分裂核の初期質量を観測から推定された 10^{11} kg から 10^{15} kg の範囲について、天頂角 0 度から秒速 60 キロメートルで突入した場合の火球の明るさの突入の深さによる変化を示したものである。ここで示した明るさは、地球での火球観測の標準スケールとなっていて、100 キロメートルの距離から見た明るさを写真光度 0 等級の恒星を単位として表したものである。突入した核は全て木星大気中で消滅してしまう。発光のピークは突入前の核質量が大きくなるにしたがって深いところで起こることが読み取れる。

実は、木星大気の 0.7 から 0.3 ヘクトパスカルにかけては、アンモニアの雲で覆われており、それより下層でも硫化水素アンモニウムや水の雲が形成されているといわれている。核質量見積りの最大の方を取ると発光のピークはこれらの雲より

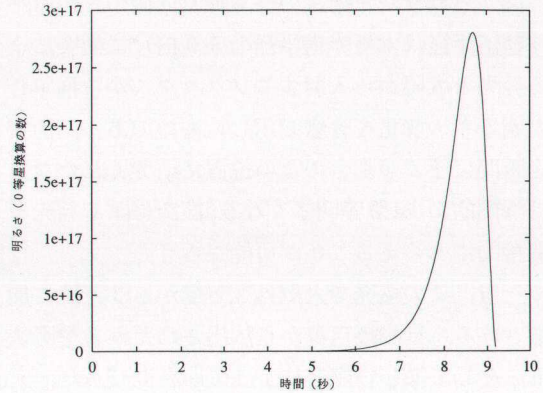


図 3 3×10^{13} kg の核の衝突時の明るさの時間変化。

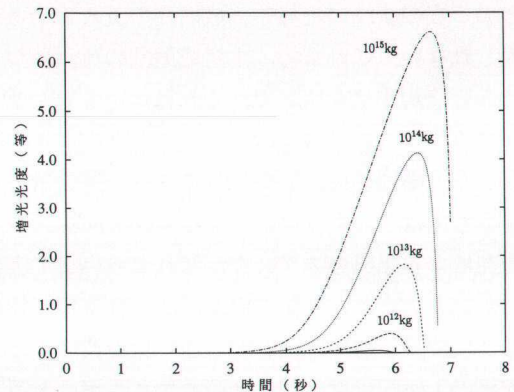


図 4 衛星イオを地球から見た場合の明るさの変化。

下になってしまうが、衝突時の加熱でこれらの雲粒子は蒸発してしまっ、発光を外から見ることを妨げるようなことはないだろう。

図 3 は図 2 と同じ計算を核の質量 3×10^{13} kg とし、その明るさの時間変化を表示したものだ。エネルギーの解放はほぼ 1 秒以内に集中している。もし衝突が木星の地球から見える側で起こったとして、閃光を地球から見ると約 - 8 等の明るさとなる。これならば昼間でも見えるが、残念ながら衝突の瞬間は木星の裏側なので、直接この発光を観測することはできない。しかし、これだけの明るさならばガリレオ衛星からの反射光を通して間接的に衝突の発光を観測することが可能だろう。

図4はガリレオ衛星のうち最も内側のイオ(平均軌道半径は木星赤道半径の5.9倍)に衝突による発光と太陽から入射するフラックスから推定した明るさの変化を等級で示したものである。衝突の瞬間にイオが都合のよい位置にいてくれたならば瞬間的に1-2等明るくなり、衝突による発光を間接的にとらえることが可能だろう。

一方、この爆発で大気は2万度から3万度に加熱される。彗星核自身から放出されたガスやダスト、そして激しい爆発によってかき混ぜられ、大気深部から巻き上げられたガスなどが上層大気に大量に漂うことになるだろう。加熱された大気はきこ雲のように上昇し、成層圏の流れに乗るかもしれない。これまで、木星成層圏の流れについての直接観測はないので、これはよいトレーサーとなる。

また、衝突の後、大気に与えられた運動量に対して大気はどのような応答を示すかも興味深い。衝突による爆風のスケールがどれぐらいまで広がるかにもよるが、大気の渦が形成される可能性がある。波長が短く位相速度の速い重力波によって木星の1自転程度の間余分なエネルギーが運び去られ、大スケールの構造はコリオリ力と釣り合って地衡風渦を形成するだろう。この渦がどの程度の大きさになるかは、木星対流圏大気の静的安定度と深く関わっている。逆に形成された渦のスケールから大気の安定度を推定することが可能だろう。形成された渦は、対流圏大気の帯状流に乗って流されていくだろう。

さらに、木星は衝突により強制的に振動させられる。この振動が観測可能であれば、太陽で行われている陽震学の応用で木星内部構造を解明できるかも知れない。

9. われわれは何をすべきか

この千載一偶のチャンスを狙って様々な観測が考えられる。

まず、可視光。衝突の瞬間を捕らえるには、ガ

リレオ衛星の高速測光観測である。衝突の時刻や発光の時間変化を捉えられるだろう。この彗星は前回の木星への接近時に一度潮汐力によって破壊の経験をもっている。サイズは小さくなったものの、この次の衝突ではさらに大きな潮汐力を受ける可能性があり、衝突前に再び細かい核に分裂するかもしれない。さらに、突入時には猛烈な圧力を受ける。果たして彗星核はそれに耐え得るだろうか。衝突時の光度変化はそういった疑問に答えることになるだろう。また、衝突の際に発光する元素はなんだろうか。地球で観測される火球では、鉄やマグネシウム、カルシウムといった鉱物のイオンが発光しているが、巨大な水の塊が大気と激しく衝突する場合は何が光るのだろうか。衝突のピークでは、こうした輝線よりも、高温ガスからの黒体放射が強く見られる可能性が高い。これも衛星を通した間接的な分光観測から解答が得られるかもしれない。

木星に衝突後の大気の応答については、可視光の高分解イメージングから対流圏上部のアンモニア雲に見られるパターンを調べることによって大気の静的安定度を推定することが可能だろう。ただし、可視光での高分解イメージングはハッブル宇宙望遠鏡の独壇場だろう。現在特別に観測時間を取るためのスケジュールの調整が行われている。また、高分散分光観測では固有振動が検出されるかも知れない。日本のお家芸である陽振学の研究を応用すれば、木星の内部構造に迫れるだろう。

次に近赤外領域。ここにはメタンや水素などの分子吸収帯がいくつかあり、アンモニア雲粒子による太陽散乱光を大幅に弱めて、成層圏にまき散らされたダストや水蒸気が凝結してできた雲を高いコントラストで見ることができると思われている。また、その雲には、衝突時の爆発によって下層大気から巻き上げられたガスの雲も含まれているかもしれない。これら高層の雲は、成層圏の風によって流されることになるが、これまで木星大

気の成層圏の風の測定例はなく、それらの雲をトレーサーとして、初めて木星大気の立体的な流れの場を知ることができる。国立天文台岡山天体物理観測所では折りよく近赤外分光撮像装置オアシス (OASIS) が立ち上がる時期であり、日本という地の利を生かした観測が世界中から期待されている。

さらに、衝突ポイント付近の分光観測からは放出された物質を推定することのできる情報が得られるだろう。また、日本では不可能だが、3ミクロンから4ミクロンにかけての木星オーロラの輝きにも変化が見られることが期待されている。木星オーロラは紫外線やX線でも観測できる。X線では日本の「あすか」の活躍が期待される。

さらに波長が長くなって中間赤外線になると、大気からの熱放射を観測することができる。衝突の衝撃によって温められた大気は熱模様となって見えるかもしれない。サブミリからミリ波領域も衝突による加熱を検出できるかもしれない。この領域においてもいくつかの分子ラインがあるので、何か見つかる可能性がある。これまで観測にかからなかった硫化水素などが巻き上げられて検出される可能性は充分にある。大気の熱的な応答もとても興味深い。

波長がセンチからメートル波になると磁場から放射されるシンクロトロン放射の方が強くなってくる。これらの波長では衝突の磁場に対する影響が検出できると惑星磁気圏の研究者たちは

考えてる。

これらは、われわれ著者が思いつく現象のほんの一部である。世界中の惑星科学者や天文学者がいま躍起になって、この衝突で何が起るかを検討している。そして、さまざまな観測計画も走り始め、電子メールが飛び交っている。アメリカ、NSFはこの現象研究のため75万ドルの緊急支出を決定した。メリーランド大学では、この現象のためだけのポスドク募集も始まっている。

ともかく、1000年に1度の臨時列車SL9の到着。何が起るかわからない。でも、わからないからおもしろい。さあ、あなたもじっくりと眺めて見ませんか。その先の宇宙へ。提供はJR(ジュピターレイルウェイ)。

参 考 文 献

- 1) Watanabe, J. 1989, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **41**, 897.
- 2) 渡部潤一&デーブ・ジュイット 1993, 天文月報, **86** (11), 21.
- 3) Owen, T., Bar-Nun, A., and Kleinfeld, I. 1991, in *Comets in the Post-Halley Era (IAU Colloq. 116)*, 429.
- 4) Chapman, C. R. 1993. *Nature*, **363**, 492.
- 5) 中村 士, 吉川 真 1993, 宇宙空間原子分子過程研究会集録 (印刷中).
- 6) Watanabe, J., Hirota, Y., and Abe, M. 1994, *Publ. Astron. Soc. Japan*, in press.
- 7) Hasegawa, H., and Takata, M. 1993, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **45**, L73.
- 8) Cook, A. F., and Duxbury, T. C. 1981, *J. Geophys. Res.*, **86**, 8815.

☆

☆

☆

☆