

201304-06

隕石落下

ロシアの隕石落下

2013年2月15日、ロシアのチェリアビンスク州で大きな隕石落下があった。地球が多くの未知の小物体の飛び交う惑星間空間を運動していることを改めて思い知らされた。NASAの推定では、破壊前の隕石のサイズは15メートル、重量七千トン、地球への入射速度は18km/sぐらいである。米国アリゾナ州にある大きなクレーター(サイズが数km,深さ数100m)をつくった巨大隕石の重量推定も数万トンぐらいであり、差は重量で数倍にすぎない。クレーターを作ったのは鉄質隕石であるが、今回は石質隕石とされている。また今回の特徴は落下方向が水平に近い(20度)ことである。



図1：ながく尾をひきほぼ水平に飛行する隕石

原爆30個のエネルギー

今回の隕石落下の報道にエネルギーは広島原爆30個分とあった。7000トンの物体が速度18km/sで運動している運動エネルギーは約 10^{15} J(ジュール)となる。1kt(キロトン)のTNT火薬の爆発エネルギーが大体 4×10^{12} Jである。一方、広島

原爆は18ktTNTとされているから、 $10^{15}/18 \times 4 \times 10^{12} = 16$ 、すなわち広島原爆16個分となる。(30と16の差は議論の大勢には関係ない)

確かに原爆数十個を地下爆発させればあのようなクレーターもできるような気がするが、今回の落下が「原爆30個分」といわれるとその物理的破壊力の小ささが気になる。人の住んでいる地域だったので窓や屋根が吹き飛ばす被害があったようだが、死者がでたり、コンクリート建物の破壊などは起こっていない。ましてや、クレーターといった地形の変動などは全くなく、竜巻の被害のようであった。広島原爆被害の甚大さを思い浮かべると、その10倍である程度の被害なのは何かしっくりこない。

エネルギーの変換

地球に飛び込んだ時の隕石の運動エネルギーは確かに膨大である。しかし、これがどう姿を変えながら、最終的に何に散っていったのか不思議である。エネルギーの源はサイズ15m程の物体がもつ運動エネルギーであり、これを止めなければエネルギーを取り出せない。自動車がコンクリートの壁に衝突する場合を想定すると、運動エネルギーは、自動車を変形させる仕事と壁を破壊する仕事に使われて、取り出せたわけである。今回の衝突の大きな特徴は隕石が地面に衝突するまでに殆ど消滅したことである。すなわち、空気の中の水平に近い長い飛行中に消滅したことである。また、物質もエネルギーも保存するから、消滅というよりは、空気の中にばらまかれたということである。大量の空気物質のわずかな変化という目立たないかたちに薄められたものと考えられる。

長いしっぽ

分かっていることは光り輝く火の玉が、図1の写真のように、もくもくとした尻尾を引いて落下したが、地上への落下物は確認されていないという。あの火の玉は一つの物体のようだが実はバラバラに砕けた小物体がまとまって集団的に運動しているのである。また、光に驚いてから、バーンという音と強い衝撃波が遅れてやってきたという。

空気が隕石にブレーキをかけるメカニズムには衝撃波の発生と摩擦による発熱の二つがある。衝撃波は超音速の物体運動で発生する。物体直前の空気は前に押されるが、空気中では作用が音速以上では進めない。そのために空気が圧縮されて温度が上がる。衝撃波の後方では動圧と釣り合う圧力に圧縮される。圧

力は物質密度と温度の積だが、密度は数倍にしか上がらず（運動量の保存のため）、動圧が大きいと温度が大きくなる。この温度がある臨界温度以上になると固体（隕石）は小物体に破壊されて、元の大きさの数倍に広がる。

衝撃波・破壊・摩擦

破壊のおこる臨界温度を臨界速度に焼き直すと、石質隕石では約5km/sである。この大きさは固体の剛性などで決まっている。18km/sはこの臨界速度を越えている。運動エネルギーの一部はまずこの破壊に使われる。これは爆発的に起こりその音が聞こえたと思われる。

この破壊で多数の小隕石に分裂すると、摩擦力でのブレーキの効率がよくなる。空気の抵抗はサイズの二乗、慣性力はサイズの三乗比例するので、減速率はサイズに逆比例し、小さいほど止まりやすい。それが後ろに尾を引くもくもくとした煙状のものであろう。小さいものは次々と取り残される。小粒子の温度は五千度ぐらいまで達し、激しく輝いたのであろう。エネルギーの行方は破壊、光の放射、それに摩擦による空気の加熱の三つであるが、破壊、放射は、両方とも百分の一ぐらいであり、主な消費先ではない。隕石重量のおよそ数十万倍の空気物質がこの摩擦熱をひきとって薄めたのではないかと推測される。

追記

ロシアへの隕石落下と小惑星 2012DA14 の地球近傍通過を合わせて『天文月報』2017年2月号が「スペースガード特集」を組んでいる。その中で柳澤正久「チャリアビンスク大火球からの熱線」が、隕石の破壊と加熱による熱線について詳しい分析をしている。私は「破壊」を加熱による熱膨張で内部からの爆発したと述べたが、柳澤は前面の衝撃波で決まる高圧量（動圧）と背面の圧力との差で押しつぶされる破壊と説明している、定量的にはその説明の方がいいと思う。

見えない小天体

この隕石落下は目に見えない物がいっぱい宇宙に存在する事実を我々に知らしめた。しかも、ダークエネルギーとかダークマターといった常時接しているのに何の痛痒も感じさせないものでなく、地上に災害をもたらす代物である。普通の物体だが、予め検知できないという意味での未知の物体である。小さいので太陽の反射光も弱く、また低温なので光や電波も放射せず、遠くにあると検出できな

いのである。

惑星・衛星・小惑星・隕石・チリ

惑星、各惑星の衛星、大型の小惑星などは太陽の反射光で見える存在である。彗星は太陽に近づくと観測できる華麗な姿になる。惑星は整然とした車の流れのようだが、地球軌道と交差する軌道を描く物体は衝突の可能性がある、大惨事となるのである。小惑星の大きさが数百 km から数十 m までサイズにばらつきがあるが、大部分は火星と木星の間の軌道を比較的整然と運動しているが、一部の小さいものは火星の内側にまで軌道がずれてきている。総個数は数十万個もある。

彗星・隕石

地球と衝突の可能性があるのは彗星と隕石である。太陽系全体を縦横に飛び回っており、サイズは数 km 以下であるが地球に近づく方向によって大きな相対速度となる。今回は小惑星というには小さ過ぎ、隕石というには大きい。ロシアでの隕石落下の翌日に静止衛星軌道の内側を小惑星 2012DA14 が通り過ぎたが、これも似たサイズの物体であるが、軌道は相当違っている（図参照）。地上に落下する普通の隕石は 100g 以下だと年間落下数 1900 程度、10kg 以上で年間落下数 830 程度。今回の 7000 トンは巨大である。

100g より小さいものは、大気との摩擦で蒸発して地上まで落ちてこず流星となって観測される。隕石同士の衝突で小さく分裂したが、ほぼ同じ軌道を集団で運動しており、大気上空を通過するのが、流星群である。落下する流星は地上 100km から数十 km の間で輝く。熱せられて粉状になり、ユックリと地上に降ってくる。こうした降下物質量は毎日 25 トンにも達するという。

流星の明るさとエネルギー

1g にも満たない数ミリの大きさチリの様な物体が上層大気との衝突で熱せられて輝いて見えるのが流星である。数ミリしかないものが夜空にあのような鮮やかな光景を演出できるのは意外である。今度のロシアの隕石落下が「広島型原爆 10 個分のエネルギー」なのに大した被害がないことの原因を考えたが、今回は数ミリのチリが 100km 四方の広範な地域から見える威力を持っていることを数字で当たってみよう。

まず、輝くのが数秒と短時間だから、気づく為にはある程度の明るがなければな

らない。星の明るさは等級で測られる。いま一等星の明るさに見える 100km 先の発光体の明るさを計算すると 10^3J/s となる。次に、速度 30km/s の 1g の運動エネルギーは $5 \times 10^5\text{J}$ ある。もしこのエネルギーが光に全部なるなら、一等星の明るさで 500 秒間輝くエネルギーとなる。勿論、全部が光になる訳ではないが、それでも、百分の 1 なるとしても 5 秒間輝くエネルギーがある。5 等星の暗い流星だと本体の光度は $(2.5)^4 = 39.0$ 分と 1 小さくなる。だから、前と同じ光になる割合を仮定すれば、たった 25mg の 100km 先のチリが 5 秒間見えるとなる。

突入速度がエネルギー源

「ちっぽけなチリ」がなぜ大きな存在感を示すのか？ この不思議の理由は速度の大きさにある。時速 200km の新幹線の秒速は 55m/s 、ジェット機の最高速度でも音速以下だから秒速 300m/s ぐらい、秒速 30km/s とはその百倍もある。流星の突入速度は 80km/s から 10km/s ぐらいで、 30km/s とは地球公転の速度である。この速度だと、地球との衝突のイメージは「落下」よりは「突入」である。「落下」は重力で引っ張られたイメージだが、速度が地球からの脱出速度 11km 以上なら、重力に引かれて衝突するのではない。例えば小惑星 2012DA14 が入射の方角が変わるだけで落下せずに通り返してしまふ。だから、衝突するのは、重力で引きずり落とされるというよりは、目掛けてやって来て「突入」したという表現が適当である。「落下」には速度が重力で得られたというイメージがある。何れにせよ、この非日常的は高速さがちっぽけなチリに巨大なエネルギーを与えているのである。

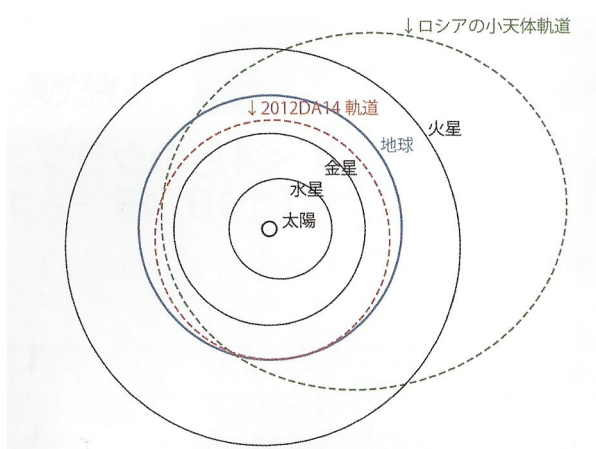


図2 隕石落下のロシアの小天体と翌日通過した 2012DA14 の軌道（「うちゅう」(大阪市立科学館発行)

隕石落下を宇宙から見る

ロシアの隕石落下と翌日の小惑星の地球接近通過が集中して起こってマスコミでも大きな話題になった。地上でのこういう事件は滅多にないが、実は1994年6月には木星への彗星群の落下が大きな話題になったことがある。シューメーカー・レビ-9 彗星群である。事前に予想されていたので待ち構えていて、地上から望遠鏡でくわしく撮影された。

当時、よその惑星への衝突であるにもかかわらずこの衝突は、米国などでは、地球でもあり得ることとして、世間的にも大きな恐怖の話題になった。『デーパーインパクト』という映画もこの話題に引っ掛けて企画されたのであろう。大きな彗星群の場合は相前から衝突の時間が予測されるから、こういったことになるわけである

シューメーカー・レビ-9 : SL-9

シューメーカー・レビ-9、SL-9、衝突の特徴は「衝突が外からどう見えるか？」という初めての課題である。この衝突はハッブル宇宙望遠鏡からも、地上からも観測された。実は今回のロシアの隕石落下も人工衛星から撮影されている。これはSL-9の様な巨大なものではないが、近くからなので撮影できたわけである。大気中に吸い込まれていく様子を上から見下ろした撮影をしている。「上から落ちてくる」ではなく「下に吸い込まれていった」といった感覚になる。

実はSL-9の木星突入の場合には様々なコンピュータ・シミュレーションがなされて観測と比較されている。また、それを使ってツングースク落下の場合を想定した地球への突入の場合のシミュレーション計算もされている。

ツングースク落下のシミュレーション

このツングースク落下を想定した計算モデルでは落下物体は直径58mの石質隕石(密度3G/cm³)である。速度は20km/s、入射角は45度とする。この衝突で放出される総エネルギー放出はTNT火薬15メガトン級の爆発現象になっている。ロシアの隕石落下が原爆20個分とかいうのに被害が少ない原因を考え、そこで「大半のエネルギーは上空で放出される」と述べたが、それはこのシミュレーションの結果を参考にしている。

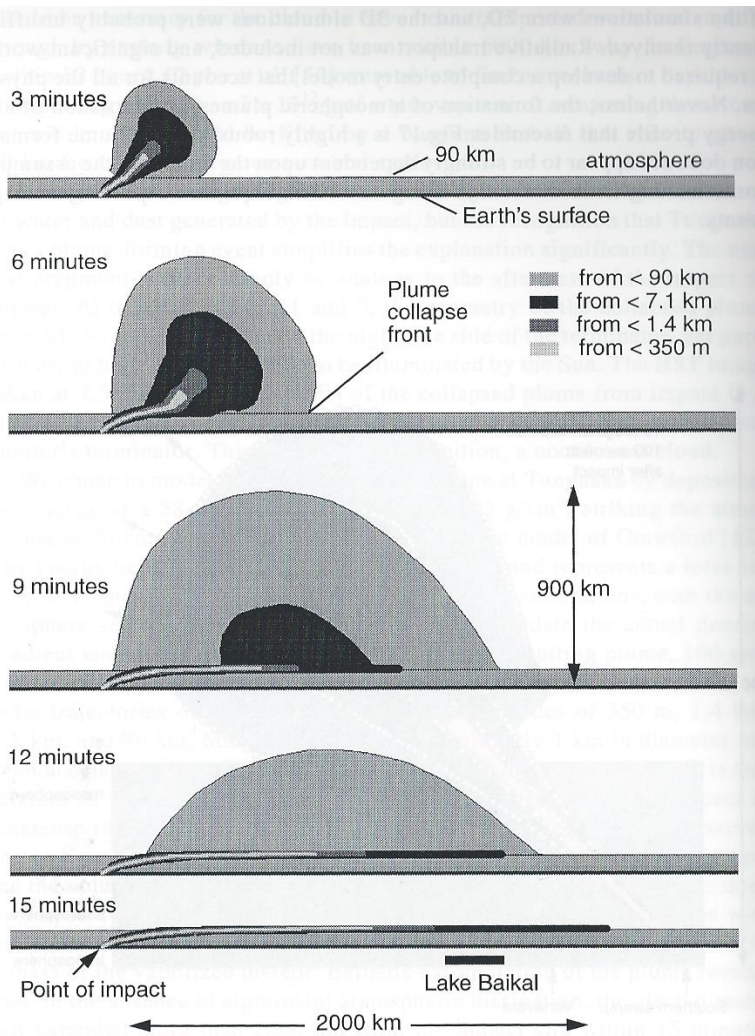


FIGURE 19. Growth and collapse of the 15 megaton plume over a period of 15 minutes, showing that tropospheric water and meteoritic debris can be distributed over distances of thousands of kilometers at mesospheric altitudes.

J.L.Remo editor, "Near-Earth Objects", Ann.N.Y.Acad.Sci. Vol. 822, 276p.

エネルギー解放率は高度は 20km 上空ぐらいから急に増えて 10km ぐらい上空で最高になり、それより下ではまた減る。エネルギーの大半は上空で放出されており、下層に達した時は相当に減衰しているのである。そしてまた上空で放出されたエネルギーは大量の大気物質をさらに上空に持ち上げるのに使われているのである。

下層の物質の舞い上がり

ツングースク落下を想定したモデルでの計算結果の一部を図3に示す。五つの図は上から3分後、5分後、9分後、12分後、15分後での、爆発での物質の広がりを表す。いったん大きく広がって、また落下する様子が描かれている。この図での濃淡の区別の「from <350m」といった記号は「高度が350以下の物質がどの高度まで拡大したか」を表している。例えば、9分後(9minutes)には、90km以下のものが爆発で高度が10倍の900kmまでも舞い上がるということを示している。

この図を見て驚くことは、大気の相当に高いところでブルームができることである。隕石落下は地上現象というよりは、大気上空での大規模な現象なのである。この地上の物質(土壌や水)や大気下層の物質が上空までいったん舞い上がって、2000kmまでもおよぶ広大な地域に横に拡大して行く様子を読み取れる。土壌や対流圏(高度20km以下)の水分を含んだ物質が上空で広域に拡大することは様々な長期的な気候変動を引き起こす可能性がある。ちょうど、火山灰の上空での拡大が寒冷化を起こす可能性と同じものである。水分が成層圏近くまで舞い上がると、氷晶となって薄曇りとなり、太陽光を反射して地上への入射を遮蔽する。

追記

「Web201401-03 再び隕石落下」でこの課題を新データで論じている。