

## 201401-03再び隕石落下

### 再び隕石落下

#### 隕石落下の分析論文

2013年2月15日にロシアのチャリアピンスクでメテオロイドの落下があり、これを「web201304-06隕石落下」でとりあげた。11月にこの落下を詳しく分析した論文がSCIENCE(サイエンス)誌11月29日号に一編、NATURE(ネイチャー)誌11月18日号に二編、発表された。個々の研究者がばらばらに発表するのではなく、関係者が整理して一緒に発表したのだから読みやすい。サイエンスの論文著者数が59名、落下地地元の人もおるが、大半は日本や欧米の所属機関である。ネイチャーの一編はチェコが主の6名共著のものだが、他の一編はサイエンス論文同様に世界中の32名共著である。どの論文も本文は短い、ネットでは長い付属資料が付いておりすごい情報量である。

読むと伝わるのはこれほど観測データがある隕石落下は史上初だという興奮である。今回の落下地点が百万人の大都会周辺であり、街の監視カメラ、車載カメラ(ダッシュボードカメラ)がよく普及した地なので、400カ所以上の映像記録がある。また昼だったので多くの人間が目撃した。冷戦時代のソ連では、チャリアピンスクは原子力関係の秘密都市で、事故などもあったようだ。その後、工業都市として国策で開発された都市である。理工系の専門家が住民に多い街である。

#### 四種類のデータ

メテオロイドという用語に触れておくと、メテオライトは隕石、アステロイドは小惑星というが、それらの中間の小さい小惑星の意味である。望遠鏡で地上から見える小惑星はサイズが数km以下で、今度の落下天体は数十mのサイズである。

「落下」の事前予測には他の目的で設置して常時運用されているインフラを利用せねばならない。

大気突入が引き起こす爆発現象の定量化に役立つデータには地震、超低周期振動、スペースからの爆発光の測定、地上でのビデオ撮影、の四つがある。落下天体の大きさや速度はこれらから推定される。また、多くのビデオ映像、衝撃波によるガラス窓の破壊地域、落下物などは、飛来方向、ひいては小惑星帯の何処にいた天体かの推定に役立つ情報である。

地震計はその目的で測定ネットワークが密にある。次の二つは核爆発実験監視のインフラとしては整備されてきた経緯がある。米国は人工衛星から地上発光現象を監視している。超低周期空気振動(20Hz以下)とは人間に聞こえない低周期の空気振動であり、インフラ・サウンドとも言う。包括的核実験監視機構(CTBTO)という国際組織が世界45カ所の観測所で常時測定している。長周期振動は減衰せずに遠くまで伝搬するので、今度の落下は17カ所で確認された。

図1に示したのは落下地点から1500km離れたモスクワでの記録である。1Hz～0.01Hzで変動する気圧の測定である。気圧の絶対値は1000hパスカルもあるから、

変動幅は十万分の一である。これには、世界中の火山や地震や雪崩などの自然現象も受かるらしい。近年、インフラ・サウンドの人体への影響が話題になっている。風力発電の聞こえない騒音影響などに関係した課題である。

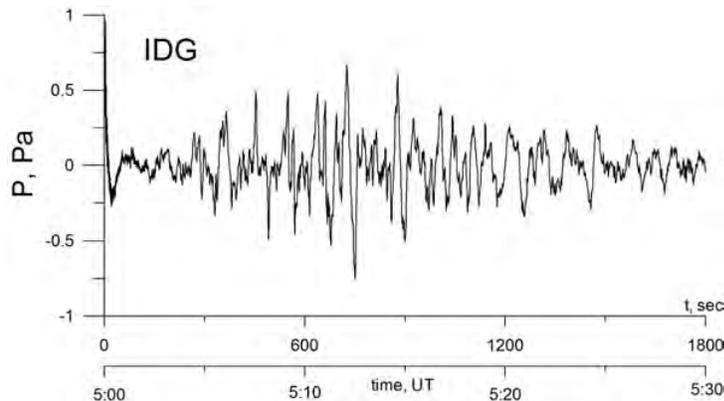


図1：大気圧力の変動：変動の単位はパスカル。O. P. Popova, et al, SCIENCE, Vol 342, 1069-73 (Nov. 8, 2013), Supplement

落下頻度は大きいのかも

メテオロイドの運動エネルギーが大気中で衝撃波、高熱化、蒸発、放射、破壊にどう転化していくかを考えてみた。そして災害という観点からすると、水平に近い入射だと、上空の広範囲にエネルギーが拡散するので被害が少ないのではないかと述べた。今回の場合は大半の運動エネルギーは20-30km上空で他のエネルギーに変換された。

市民生活への被害は衝撃波によるガラス窓の破損が広範囲で起きた。水平に近い(17度, 18.5度)とサイズが数十メートルの固体は蒸発と破壊で気体と小さい隕石となり、固体の落下物は数十センチと小さく被害にならない。今回、50cm(600kg)ぐらいの固体が最大である。これも含めて固体落下物は大気入射前のたった一万分の一である。大半は気体か大気中のチリに消滅した。今回も住民は落下後暫くして硫黄、その他の臭いが立ち込めたと証言している。また数秒間、太陽の数倍明るくなったことで日焼け(低度のやけど)や、目の障害を相当の住民が受けたという。

今回のもの(600kt)より20-30倍も規模が大きいツングースク落下(10-15Mt)でも落下物がない。ただ1908年の落下は深夜だったので、ブリストル、ロンドン、ベルリン、プラハの夜空に発光が見られたという。相当に入射角度が小さく、発光しながらヨーロッパの上空を通過し、気圧変化も地震変動も観測された。だが1927年にシベリアで森林が広範囲になぎ倒されている落下地点が偶然発見された。もっと時間が経てば無人地帯だと自然に痕跡は消される。そうなると落下頻度の推

定は従来のよりも大きいかもしれない。今後は空中からの探索やインフラ・サウンドの観測網に必ず検知される可能性は高い。

### 初のビデオ撮影

今回の落下観測の特徴は多くのビデオカメラによる記録があることである。街の監視カメラ、車載カメラがよく普及した土地であった。このために、大気突入による火の玉の生成・消滅について詳細なデータが得られた。もちろんこれらのカメラの用途は別目的であり、また不意の来襲であるから、データの補正には様々な工夫が必要であった。例えば絶対光度を推定することは想定されていない。また時間データも道路に監視カメラのように中央コントロールの場合は正確だが、ネットに繋がっていない自動車カメラではズレている場合もある。こうした校正は論文のサプplementには詳細に記述されている。カメラはロシアでも NikonD5100や Canon EOS 40Dである。露出時間はコマ送りの25fps (frame per second) で決まっている。

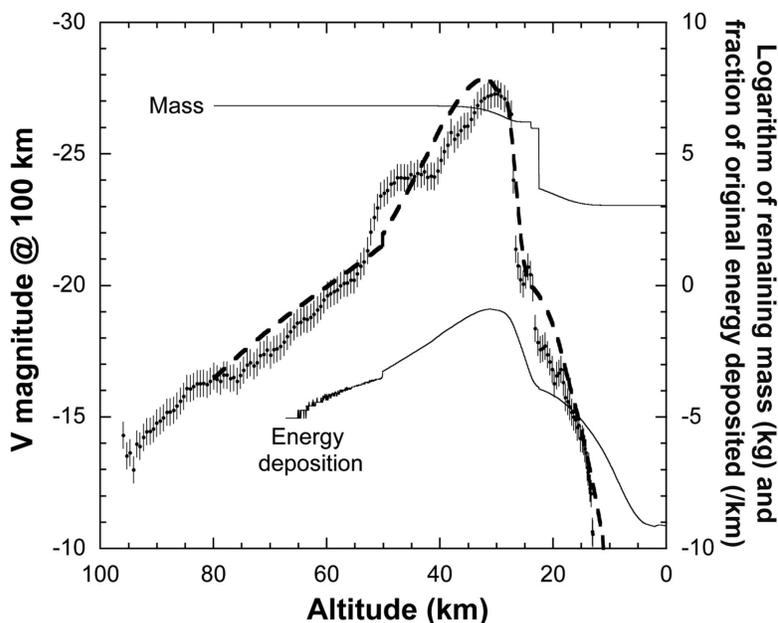


図 2 : 隕石高度の減少に伴う光度の変化。時間は左から右に経過し、この範囲で約16秒である。

### 光度の変化

図 2 に見るように、最初に火の玉が検出されたのは国際標準時で UT3:20:20.8、高度は 97.1 km である。そして光度がじょじょに増光、9 秒後の UT3:20:29.8 (高度 43.9 km) に急に増光、そして主ピーク UT3:20:32.2 での高度は 29.7 km、そこから急に暗くなり UT3:20:36.8 (高度 13.6 km) ぐらいで消滅した (誤差は時間については

0.1秒、高度は0.7km)。この間、約16秒間である。色は初めに黄色、続いてオレンジ色、そして赤になって消滅した。

図2は光度の時間変化を示したものだが、横軸は高度であり時間ではないが、時間は左から右にすすむ。地表面に対して18.3度という斜めの角度で横に走りながら、落下しているの。97kmから約30kmまでの降下時間が約16秒である。

### 「太陽よりも明るく」

斜めに落下する火の玉の航跡をいろいろな位置から観測しているのだから、高度と距離（観測地点と火の玉の距離）は異なる。縦軸左側の光度は観測地点から100kmの距離に置いたとした際の光度（明るさ）を記してある。光度を表す数字は一等星、二等星などと星の明るさを表す等級単位を用いている。明るさは単位面積当たり、単位時間当たりのエネルギーの流れである。エネルギーの流量が10倍増加すると等級は2.5下がる。

例えば一等星より10倍明るい星の等級は $1 - 2.5 = -1.5$ 等級となる。この図2での縦軸は-20等級とか-30等級とかであるから、星の明るさと比べるよりは太陽の明るさである約-26等級と比較すべきものである。距離が数十kmの距離から火の玉を見た場合はちょうど太陽程度の明るさだったわけである。

落下軌道の直下ではピーク光度は-29.6等級であった。マイナス30等級とは太陽の約40倍の明るさである。「軽度の火傷」があったことも頷ける。また光で放出された全エネルギーの推定はTNT28-69kTであった。運動エネルギーは590kT、人工衛星から測定された光量は90kT、インフラサウンドからの推定は470kTであった。運動エネルギーの約一割が光のエネルギーになったといえる。インフラサウンドは人間に聞こえない超低周期空気振動(20Hz以下)の低周期の空気振動である。こうした分析から、入射したメテオロイドは速度19km/s、重量 $1.3 \times 10^7$ kg、サイズ19.8m、密度 $3.3 \text{g/cm}^3$ 、入射角18.3度と推定されている。

### 熱崩壊・分裂・冷却・雲

100km上空での大気の密度は地表よりも百万分の一であるが、それでも突入してきた物体（メテオロイド）の運動にブレーキをかけ始めるのである。物体が空気を衝撃波で加熱し、その熱で物体自体が加熱され、ある温度以上になると発光が始まる。さらに温度が上がると物体は小さな隕石に崩壊する。9秒後の急増光はこの破壊に伴うものである。同じ量の物質でも細かく砕かれると表面積が増すので同じ温度でも光度は増す。しかし小さい物体には急ブレーキが働き、減速して加熱率も弱まるので急激に減光する。大半のエネルギーは上層大気の熱膨張に消費されたと思われる。これが圧力の変動として何千キロの遠方まで広がるのである。また「崩壊」時に発生する気体が拡散して「臭い」を起こしたと思われる。

図2には光度の他にもう二つ曲線が描かれている。Massと記された曲線は約 $10^7$ kgの物体が $10^3$ kgの芯を残して大半のものは数kgの多数の隕石に分裂したことを表している。縦軸右側の数字は重さ(kg)の対数である。チリ（ミクロンサイズの微粒

子) や気体として大気に混じったものもあるが大半は隕石として地上に落下した。チリは航跡にそった飛行機雲のような雲を発生させている。雲の光度は29-26km上空である。

もう一つEnergy depositionと記された曲線は横軸の高度での1kmの飛行距離当たりのエネルギー開放率である。数字は全体に対する比率の対数であり、左の縦軸の目盛りで見る。高度が35kmぐらいで最高である。

天体ショーか、天体災害か

アイソン彗星は天体ショーとして歓迎されるが、チャリアピンスク隕石落下は恐怖の天体災害である。しかしこれらは共に太陽系の小天体(彗星、小惑星、流星群、隕石など)が地球に接近する現象である。彗星は太陽系規模の天体ショーともいえるが、地球がその近くを通過すればする程壮大な光景が見られるから、地球との接近が歓迎される。その一方、同じ地球に近づく小天体でも彗星に比べれば明るさも暗く見栄えもせず不意に現れては直ぐに見えなくなる小惑星は不気味な存在である。しかも接近し過ぎて衝突すれば天体ショーどころか天体災害であり、恐怖の目で見られる。

「歓迎される地球接近」と「歓迎されざる地球接近」がある。ハレー彗星の接近時には天体災害が語られた歴史は有名である。軌道は違うが彗星も小さめの小惑星並みの重さがある天体だからまともに衝突したら大災害である。だが彗星は華やかに輝いて公明正大に所在をハッキリさせているが、小惑星は隠れて近づいて襲ってくる舞いが薄気味悪いイメージを強くしている。このように彗星のイメージは天文ショーの善玉スターなのに、小惑星は地球攻撃の悪玉役に仕立てられてスペースガードによる取り締まりの対象にされている。

NEO

太陽系全体で言えば小惑星とは火星と木星の間の軌道上を公転しているものであり、それら全体の質量は地球の千分の1ぐらいにも達する。その意味では地球の近傍に出没する小惑星とはその本来おるべき所から逸脱した無法者たちなのであるから、別の名前と呼ぶ方が適当であるともいえる。そのような名前としてはNEO(near-earth objects)がある。これにはNEA(near earth asteroids)とNEC(near earth comet)があるが大半はNEAである。天体災害防止(スペースガード)のターゲットにされているのはこのNEO(NEA)である。

これまで発見されているNEAは約一万個である。これらのサイズによる分類は図3に示した様である。横軸の5分類はサイズが30m以下, 30m-100m, 100m-300m, 300m

—1000m, 1000m以上である。ここで1000m以下のものは殆どこの十年ほどの間に発見された天体である。例えばチャリアピンスク落下のは「30m以下」, ツングースク落下のは「30m—100m」のものである。

#### NEO探索サーベイ

ここ十年ほどの間に急に小さい小惑星(メテオロイド)の発見数が増えたのは1994年のシューメーカー・レビ第9彗星SL9の木星への衝突に刺激されて、地球に接近する小天体の探索が米国中心に始まったからである。LINEAR, CSS, NEAT, などの略称で呼ばれる地上からの系統的サーベイのほかにWISE(wide-field infrared survey explorer) という赤外線宇宙望遠鏡による探索もあった。WISEは冷却剤切れで運用を中止していたが、チャリアピンスク隕石落下事件をうけて、冷却剤なしでも出来る波長帯での観測を再開したという。

#### 災害要注意NEO

そしてこれら一万個のうち軌道から推定して地球への接近が0.05AU(1AUは太陽と地球間距離、0.05AUは地球と月の距離の約20倍)以下になるものを災害天体としてNASAは発表している。その数は1400個程度である。要注意NEOの基準の一つは軌道が地球に近づくことだが、もう一つはサイズがある程度大きいことである。小さければ衝突しても流星のように大気に吸収されるだけである。また大きいNEOの危険度は高いが、大きいと太陽光の反射が大きいので離れていても明るいので軌道は正確に監視出来る。このために無用な不安が高まることはない。チャリアピンスク落下の10mサイズのものは近くに来ないと発見されにくいが今回のように相当の被害をもたらすので厄介なサイズである。

NASAのHP(<http://neo.jpl.nasa.gov/ca>)にはこれら一万個のNEOが最接近した日付の記録とこれからの予測が掲示されている。例えば2014年1月28日には月距離の2.7倍の近くを半径が6-14mぐらいのメテオロイドが通過した。半径は明るさから推定するのであるが、反射率が5%から25%の間という不確定さがある。反射率は岩

石なら小さく彗星状なら大きい。毎日一個ぐらいの割で近づいては遠ざかっている。最接近距離は0.05を切り込むのが半分ぐらいある。

図3： 発見されている NEA の数

