エポックメイキングな隕石たち(その2): Chelyabinsk隕石

杉浦 直治1

1. はじめに

Chelyabinsk 隕石は近年もっとも注目を集めた隕石である。本記事の第2回目としてこれを取り上げる。 Chelyabinsk火球は2013年2月15日に観測された,過去100年で最大の火球であり,たくさんの窓ガラスが割れて1500人余りが怪我をしたと報告されている。直径20mに近い天体が事前に検出されることなく落下したことは衝撃的であり,将来おきるかもしれない小天体の地球への衝突による被害を評価する上でも,重要な役割を果たすことになった。Chelyabinsk 隕石はLL5コンドライトに分類され,過去に衝撃による溶融・破壊を受けた痕跡が多く見られることが特徴であるが、宇宙化学的にはごく普通の隕石である[1]。

火球現象は大気に突入した小天体が細かく破壊されることによって起きるが、その破壊過程は良く解らないところがいろいろある。火球が詳細に観測され、それに伴って落下した隕石が回収された例はまだわずかしかない。ここでは回収されたChelyabinsk隕石について概観し、隕石破片の表面形態の特徴的なものを紹介し、流星(火球)現象との関係を解説する。この隕石の表面形態が他の隕石の形態と格段に違うわけでは(おそらく)ないが、火球現象との対応を考えるという観点からは、とても貴重な隕石といえる。

Chelyabinsk隕石破片の回収と 質量分布および破壊強度

地上で回収されたChelyabinsk 隕石破片は1000 個以上ある。最大の破片は凍結したチェバルクル湖の厚さ70 cmの氷に直径6 mの穴をあけた。この時の衝撃に

もかかわらず、この破片はほとんど破損せず、重さ約 600 kgの隕石として2013年10月に回収された. これ はChelyabinsk隕石の強度に関する重要なデータであ る. この破片は現在Chelyabinsk地方歴史博物館に展 示されている. ちなみに、大気圏突入時の大きさは 10000トンと言われている。小さな破片の量は全部で 3000~5000kg程度と考えられており、大気圏突入時 の天体の99.9%以上が大気中で熔融・蒸発したことに なる. 破片の質量の分布はほぼlog-normal分布になっ ていて、modeの大きさはおよそ2gである[2]. この Chelvabinsk隕石の質量分布は他の隕石シャワーの質 量分布に比べて小さいものが多いのが特徴である. こ れはChelvabinsk隕石の強度が弱いと解釈するのが自 然である. ただしChelyabinsk 隕石破片の場合, 積雪 の上に落下して、落下の跡に小さな穴が開いていると いうことが広く知られたため、小さな破片でも高い収 率で回収されたという解釈も成り立つかもしれない.

火球の明るさの変化、飛行速度の変化および衝撃波の到達時間から母岩の破壊した高度が解り、それに基づいて母岩の強度を推定できる[3].それによると、最初の破壊は高度45km程度で起き、その時の前面の圧力は0.7 MPaであった、([1]によればこれは0.2 MPaである。)多くの破壊は圧力5 MPa程度で起き、最後の破壊は圧力13 MPa程度で起きている。一方で、実験室での圧縮破壊強度は64 MPaと報告されている[4].これは他の隕石に比べて小さめの値である。

3. Chelyabinsk隕石破片の表面形態

これらの破片の形態は、それが大きな母岩から分離 した過程および大気中を高速で飛行した時の加熱によ る融解摩耗の程度を反映していると考えられる. たく



Chelyabinsk 0,8656 g 1170/2



図1: 小さな丸い隕石はChelyabinsk Peaと呼ばれる. 凸凹した 盛り上がった構造はロールオーバーリップと呼ばれ、飛 行の前面で熔融したものが後面に回り込んで固化して形 成 する. Encyclopedia of MeteoritesのMario Hoffmann collectionより.



Chondrite LL5 15/02/2013 55 g Collection Vincent Jacques www.meteorite.be

図2: 平らな、焦げた平面を持ち、わずかにロールオーバーリップを示す破片、全体として角張っていて、低い高度で母岩から分離したことを示唆する。Encyclopedia of Meteoritesの Vincent Jacques collectionより。

さんの破片を見ると、それ等はいくつかのグループに 分類できることが解り、それは破片が母岩から分離し た高度に依存していると思われる。以下、特徴的な形 態とその簡単な解釈を示す。

pea(豆,図1)と呼ばれる小さなspheroidalなものはもっとも高い高度で分離したものと思われる.この丸い形状は熔融摩耗が激しかったことを反映している.また図1に見られるロールオーバーリップと呼ばれる構造は、この破片の空気中の飛行の最終段階では定方位の飛行をしていたことを示唆する.これと似たもので半球状のものもあり、Chelyabinsk buttonと呼ばれる.これらの隕石は、サイズが小さく、回収された場所は隕石分布域の東側に偏っており、高い高度で母岩から分離したという解釈を支持する.

図2に示す隕石は3つの興味深い特徴がある。(1)後 面が平らである。(2)後面は少し焦げているが熔融物 でおおわれているわけではない。(3)後面のヘリにわ ずかにロールオーバーリップが見える。ここで見えて いる面が後面であることは空気力学的にその方が安定 であることと、熔融物でおおわれていないこと、ロー ルオーバーリップが見えることなどから判断できる。 わずかなロールオーバーリップの存在は、この隕石が この形になった直後に短時間、 定方位飛行をしていた ことを示唆する. 後面が熔融物でおおわれていないの に、焦げていることは高い温度のコントレイル(火球 の後ろにできる飛行機雲状のもの)の中にいたことに よって説明される. また面が平らであることは Chelyabinsk 隕石中に、過去の衝撃によってできたす べり面がたくさん存在することを考えると、既存のす べり面に沿って破壊したと解釈される. 全体として角 張った形をしていることと、ロールオーバーリップが わずかなことから、これは火球の主爆発の後期に母岩 から分離したと推定される.

過去の衝撃によってできたすべり面はChelyabinsk 隕石にはかなりの密度で存在し、しばしば、それらは 互いに平行になっていることが、隕石の切断面の観察 からわかっている、図3の様な平板状の隕石の存在は、 既存のすべり面は破壊しやすく、小天体の急速な破壊 に寄与していることを示唆している。2つの面の形状 は非対称であり、飛行が定方位だったことを示唆する。

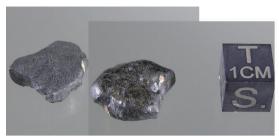


図3: 平板上の破片. 右の図に見えている面は角が丸く, この面 を前方にして飛行したことが示唆される.

3. まとめ

以上の様に、Chelyabinsk 隕石破片の大きさ分布・ 形態は火球現象中での母岩の破砕過程および大気中を 高速で飛行した時の加熱による融解摩耗に対応してい ると考えられる. ここで紹介した形態の解釈は定性的 なものであり、将来的には、流体力学や岩石力学を用 いたより定量的な吟味が必要となる。特に定方位飛行 は多くのChelyabinsk隕石破片にその痕跡が見られ、 破片の形成過程の解釈に重要な役割を果たしている. Chelyabinsk 隕石の場合、大気圏への進入角度が小さ かったことが知られている。進入角度が小さいと、大 気中の飛行距離が長くなり、定方位飛行に有利である ことは容易に推測できる. 一方で, 小天体が大気圏に 突入したときの初期回転速度も定方位飛行にかかわる 重要な要素であるが、個々の小天体の地球外での回転 についてはほとんどわかっていない. 従って. Chelyabinsk隕石から得られる結論をすぐに一般化す ることはできない、今後、たくさんの火球の観察を行 い、それに伴って回収される隕石の形態を調べること により、 小天体が大気中で細かく破砕される過程をよ り良く理解する必要がある。特に、火球現象が、天体 の大きさにどのように依存するかを知ることは重要な 課題である.

謝辞

木村眞氏,野口高明氏からこの原稿執筆の機会を与えて頂き,原稿を読んでいただきました。この場を借りて感謝いたします。また,Encyclopedia of Meteoritesから写真を転載させて頂きました。原本を掲載された

方々に感謝します.

参考文献

- [1] Popova, O.P. et al., 2013, Science Express. DOI:10.1126/science.1242642
- [2] Badyukov, D.D. and Dudorov A.E. 2013, Geochemical International 51, 643.
- [3] Borovička, J. et al., 2013, Nature doi:10.1038/12671.
- [4] Grokhovsky, V.I. et al., 2013, 76th Meteoritical Soc. Meeting, 5233.pdf.