

## 特集「チェリャビンスクイベントと天体衝突リスク」

## チェリャビンスク隕石の現地調査報告

高橋 典嗣<sup>1,2</sup>, 吉川 真<sup>1,3</sup>

(要旨) ロシア, ウラル地域チェリャビンスク州に隕石が落下し, 天体衝突による自然災害が発生した. 隕石落下から43日後の3月30日に出発し, 現地に向いた. チェバルクリ湖の氷上には隕石落下の傷跡が, 市街地には被害状況が残されていた. 現地では, 隕石爆発地点の計測, 隕石落下地域の推定と隕石が採集された場所の確認, 市街地の被害状況等を視察した. 調査の過程で隕石を含む貴重な関連資料を収集することができた. 本稿では調査全般について, 及び調査で得られた知見について報告する.

## 1. はじめに

2013年2月15日9時20分26秒(YEKT), NASAの推定によると直径17 m, 1万トンの小惑星が秒速18 kmの速度で地球大気圏に突入し, ロシア南部のウラル地域, チェリャビンスク州に落下した[1][2].

隕石は, チェリャビンスク市街地の南南東約60 kmから約40 km, 上空約45 kmから28 kmで爆発し, 28.89 kmで最大光輝となった. 落下速度をカメラレス・ウラルスキーで撮影された車載カメラの映像から求めると, 最大光輝の前は18.9 km/sであったが, 大爆発後には14.3 km/sに減速したことがわかった. チェバルクリ湖の手前5 km地点では4.8 km/sで落下していき, 湖面には約2 km/sで衝突したと推測される. また落下経路に沿った直下の広範囲で多数の隕石が収集されている. 隕石の最終到達地点と考えられるチェバルクリ湖では, 湖上の氷に直径6 mの穴が空いた. 現地調査の時には, 穴は氷で閉ざされていた. その後10月16日には水深12 mの湖底から570 kgの隕石が収集された.

爆発地点から40 kmから50 km離れたチェリャビンスク市内の全域では, 隕石の落下に伴う大爆発で生じた衝撃波によって, 約3300棟の窓ガラスが割れ,

約1500人が怪我をするという天体衝突による大きな自然災害となった.

この天体衝突による自然災害をもたらしたチェリャビンスク隕石落下の実体を把握することを目的とし, 3月31日から4月3日までの4日間, 現地調査を行った.

現地調査では, 隕石爆発地点の計測, 隕石落下地域の推定と隕石が採集された場所の確認, 市街地の被害状況等を視察した. 調査の過程では, チェリャビンスク隕石や被災の様子を映したビデオ画像などの資料を収集することができた.

## 2. 調査範囲

チェリャビンスク市は, ロシアのチェリャビンスク州の州都で, ヨーロッパとアジアの境界となるウラル山脈の南東部に位置し, 鉱山資源を背景に18世紀から栄えた[3][4]. 市内のチェリャビンスク駅はシベリア鉄道の起点となっている.

調査は表に示した日程で行った. 図1には調査地域を示した. チェリャビンスク市内のホテルを起点とし, 20 km北に位置する鉄鋼の町クルチャトフスキー, 西南西70 kmに位置するチェバルクリ湖, 西南西180 kmに位置する鉱山の町サトカ, 南に30 kmに位置する石炭鉱山の町コルキノ, エマンジェリシカ, デプタツキーなどの広範囲の地域を調査した.

1. 日本スペースガード協会

2. 明星大学教育学部

3. 宇宙航空研究開発機構

takahasn@ge.meisei-u.ac.jp

表： 調査日程(出国：3月30日，帰国4月4日)

月 日	時刻	調査地	調査内容	
3月31日	05:55	ホテル到着	調査計画の確認	
	13:00	ホテルロビー	調査計画の打ち合わせ	
	16:00	チェバルクリ湖	落下穴、市街地視察	
	18:00	クルチャトフスキー	計測、被害状況視察	
4月1日	09:30	テクノパーク	被害状況視察	
	09:55	亜鉛工場・ベンキ工場	被害状況視察	
	10:30	スケート場	被害状況視察	
	12:00	歴史博物館	資料収集	
	14:00	チェリャビンスク大学	資料収集、被害状況視察	
	15:00	南ウラル大学	資料収集、被害状況視察	
	16:30	キチキノ	計測、被害状況視察	
	17:00	デブタツキー	隕石分布調査	
	17:30	エマンジェリンカ	隕石分布調査	
	18:00	コルキノ	計測、被害状況視察	
	4月2日	18:00	ウラル山脈	プレート境界視察
		18:00	サトカ	計測、資料収集
18:00		自然史博物館	資料収集	
18:00		クルチャトフスキー	計測(再調査)	
4月3日	09:00	チェリャビンスク市街地	資料収集、被害状況視察	
	12:00	チェリャビンスク空港	資料収集	

### 3. 調査のあらまし

#### 3.1 爆発地点の算出

ロシア国内の交通事情で、事故後の顛末の証拠として記録を残すために車載カメラを装備する車が多い。これが幸いし、隕石落下の様子が各地を走行していた車の車載カメラによりとらえられた。また隕石雲も多数撮影されている。

爆発地点は、最終落下地点のチェバルクリ湖(54°58'00"N, 60°18'18.9"E)と車載カメラで撮影された場所が確定できた2箇所、隕石雲が撮影されたサトカの4地点(図2)から爆発の最大光輝の位置の方位と地平高度を計測して求めた。

現地調査により撮影地点を確定することができた場所は、クルチャトフスキー(55°13'21.5"N, 61°17'37.6"E)、爆発地点直下のコルキノ町のマーケット(54°53'27.9"N, 61°23'58.2"E)、西に120 km離れたサトカのアパート4階の部屋(55°02'1.7"N, 58°58'37.1"E)の3地点であった。

この結果、爆発により最大光輝となった位置は、チ



図1：調査位置図。



図2：計測地

①②の枠内の写真は車載カメラから、③の枠内はチェリャビンスク州警察提供、④はアレクシ・パブリック氏撮影。

ェリャビンスク市の南南東41 km地点、上空28.89 km (54°46'56.9"N, 61°31'33.4"E)となった。

最大光輝に達した後も、隕石は小爆発による分裂を繰り返し、破片を経路の直下に落としながら落下していった。最終到達地点のチェバルクリ湖から最大光輝の位置のなす地平角は19.5度で、大気圏に低角度で突入して落下したことがわかった。

#### 3.2 隕石の落下範囲の推測

爆発地点から北に180 km離れたカメリンスク・ウラリスキー(Kamensk Uraian, 56°23'53.8"N, 61°55'56.1"E)の車載カメラで撮影された画像には、最大光輝に達した後、隕石が小爆発を繰り返して落下して

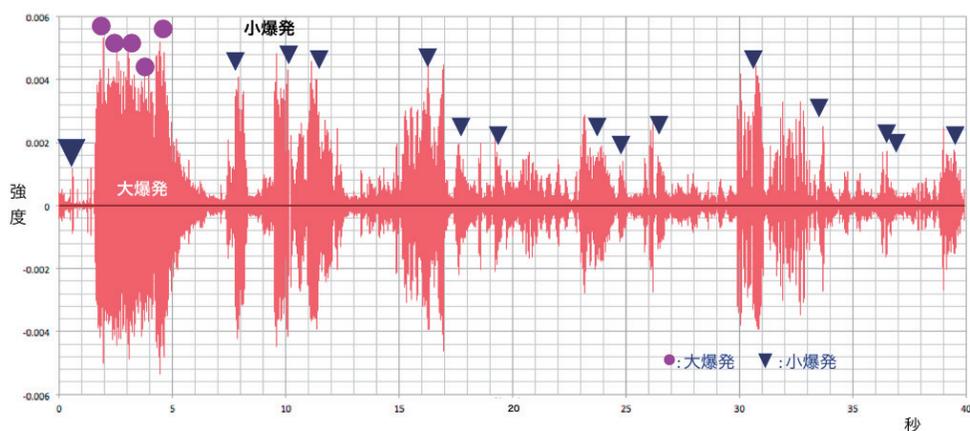


図3：爆発音のスペクトル。

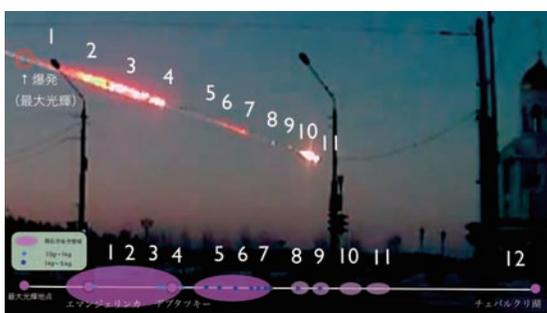


図4：隕石落下の飛跡と隕石の分布推定。

カメルインスク・ウラリスキーで撮影された車載カメラの画像に爆発箇所を記載。最大光輝の位置からチェバルクリ湖までの水平距離84kmの線上に推定した隕石分布と採集された隕石の位置を線上に記載した。

いく様子が明瞭に記録されていた。また、チェリャビンスク市内の南ウラル大学の学生が撮影したビデオカメラには、衝撃波の爆発音が録音されていた。

爆発音を解析すると図3のスペクトルが得られ、これより爆発の状況を読み取ることができる。大爆発の直前に小爆発が起きていた。その直後に最大光輝となる大爆発が起こる。大爆発は、4回の爆発が重なって一つになっていることがわかった。その後、隕石は小爆発を繰り返しながら落下していった。他の3地点で録音された音声の解析からも同様の結果が得られた。

南ウラル大学での爆発音は、約2分23秒遅れて到達している。この遅れを考慮すると、カメルインスク・ウラリスキーでの画像に記録されている大爆発、小爆発は、相対的に一致していた。

これらの爆発によって本体の隕石から分裂または剥離した隕石は、それぞれダークフライトして図4に示

した経路の真下の地域に落下していると推察することができる。

現地調査では、大爆発に対応(直前と4回の大爆発)する経路上の直下に位置するエマンジェリンカ、デプタツキーで大量の小さな隕石が採集されていたことを確認した。しかし、ここで採集された隕石は、約15 kgのものもあったが、ほとんどの隕石は20 gから数gの小片であった。

隕石は、爆発地点の南北5 kmとチェバルクリ湖の衝突穴を結ぶ84 kmの範囲に点在しているものと推察され、分布密度は最大光輝の直下から離れると小さくなる。しかし、落下経路の先端ほど大きな隕石が分布すると考えられる。

雪解け後のロシアの調査では、予想した分布に対応する場所から多くの隕石が発見されていて、隕石の分布の地図も作製されている。10月16日には、チェバルクリ湖の湖底から570 kgの隕石が回収された。

しかし、チェバルクリ湖の手前とチェバルクリ湖の先、西側に最大の隕石がある可能性も残されているが、まだ発見の報告はない。

### 3.3 被害状況と現地の様子

#### (1) 概況

チェリャビンスク隕石の落下に伴う被害範囲、被害状況を把握することは、今後の天体衝突における被害域を予測し、衝突地域のハザードマップの作成につながる。また衝突する天体が実際に発見された際に、ハザードマップに基づいて衝突地域の防災計画、避難計画を策定する上でも重要な資料が得られると考えられ



図5：チェリャビンスク市の被害状況。



図6：衝撃波による被害状況(南ウラル大学)。

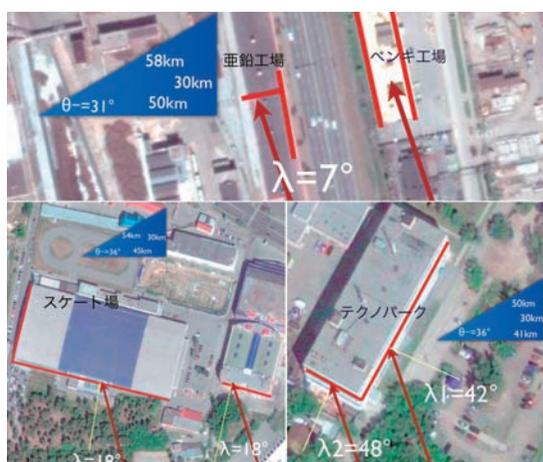


図7：建物被害と衝撃波の入射角。

る。そこで、チェリャビンスク市街地および落下経路に沿った地域において被害状況の視察を行った。

チェリャビンスク市の市街地は、隕石が爆発し最大光輝になった地点から北北東に約40 kmから50 km離れている。隕石は上空で分裂したため、大きさを維持したまま地上に衝突することは避けられた。しかし、上空での爆発による衝撃波が広範な地域を襲い、甚大な被害と多くの負傷者を出した。死者が出なかったことは不幸中の幸いであった。

市街地の被害状況を図5に、衝撃波による被害の瞬間の様子を図6に示した。特に大きな被害を受けた亜鉛工場、スケート場、テクノパークの3箇所、建物の被害状況を精査した。衝撃波の飛来方向を爆発で最大光輝となった位置とすると、その方向を向いた構造物の面に被害が集中していた。損壊率や被害状況を図7のように衝撃波の侵入方向と入射角度で推測することができる。

衝撃波は、図8のようにチェリャビンスク市の市街地のほぼ全体を襲い、最大光輝の位置から半径50 kmの広範囲に及んでいたことがわかった。

次に、チェリャビンスク市街と州内の地域で調査した被害状況などを示す。

(2) チェリャビンスク市街地の状況

① チェリャビンスク大学

大学の校舎に被害はなかった。

② 亜鉛工場

亜鉛工場の崩落した煉瓦の壁は、現在修復中で、修復の完了は間近であった。報道された壁の大規模な倒

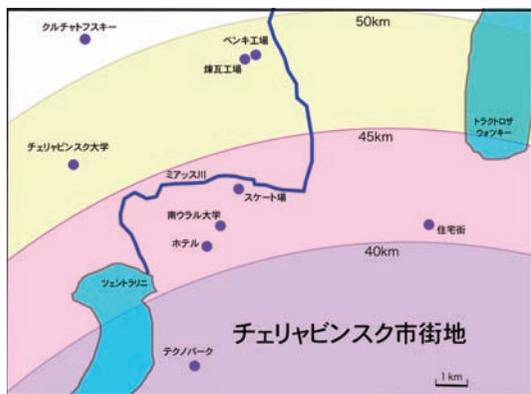


図8：チェリャビンスク市街地の調査位置と衝撃波の範囲。

壊は、まず衝撃波が垂直に当たった2階の壁が重鉛工場の内面に落下した。このため工場内で起きた爆発により、道路に面した東側の壁が外側に崩落し、惨事となった。

### ③ ペンキ工場

重鉛工場から道路を渡った建物で、屋上の看板がすべて落下し、窓枠や窓ガラスも壊れた。落下した看板が空き地に重ねて片付けられた。割れかけた窓ガラスには、ビニールや板を貼って補修されていた。

### ④ スケート場

スケート場の南側に面した2面の大きな壁面の壁が折れ曲げられ、天井のパネルのほとんどが壊れ、宙づりになっていた。そのままの状態が残されていたので、衝撃波の破壊力の威力を想像することができた。

### ⑤ 歴史博物館

チェリャビンスク市の歴史、自然史、州内で採集された鉱物が展示されている。州最大の博物館で、庭には岩石園がある。衝撃波による大きな被害はなかった。

### ⑥ ホテル

滞在したホテルは、被害がなかったが、周囲の建物の窓ガラスは割れた。また道路に沿った多くの建物に、窓ガラスが割れるなどの被害が出ていた。

### ⑦ 南ウラル大学

一瞬太陽より明るい閃光に包まれて真っ白くなった。閃光から2分23秒経過して衝撃波がキャンパスに到達。校舎内では窓ガラスや学生が飛ばされ、飛散したガラス片に当たり怪我をする学生が続出した(図6)。大学校舎の南を向いた面の窓ガラスのほとんど(約1690枚)が割れ、壁が折れているところもあった。衝撃波

の音と隕石雲を学生が撮影した画像、校舎内の防犯カメラ、駐車場の監視カメラの映像を収集することができた。

### ⑧ テクノパーク

南面の窓ガラスのほとんどが壊れ、建物に大きな被害が出た。その傷跡と倒壊した窓枠やガラスの残骸が建物の下に残されていた。被害は、上層階ほど大きく、最上階は窓枠と壁まで折れ曲がっていた。

### (3) チェリャビンスク州内の状況

#### ① クルチャトフスキー (Kurutyatofusky)

周辺のビルに被害は出ていない。

#### ② チェバルクリ湖(Lake Chebarkul)

隕石落下直後に直径6 mあったチェバルクリ湖の水上の落下穴は、視察した3月31日には氷で塞がっていた。周囲には隕石の採集を試みた試掘穴が数個あり、採集の際に湖底から汲み出された泥で汚れていた。視察に訪れた時にも朝から隕石を採集していたグループに遭遇した。湖畔の町と隕石落下経路となった直下の民家に、窓ガラスが割れた痕跡は見当たらなかった。

#### ③ コルキノ (Korkino)

この町は、閃光に包まれたマーケットの屋根の雪が、その後に到達した衝撃波で落ちる映像で知られている。1階建て家屋に大きな被害がないが、4階建てのアパート等の窓ガラスの多くが壊れた。道路の路肩には、窓枠とガラス片がまだ積まれていた。

#### ④ デプタツキー (Deputatskoye)

デプタツキーでは、落下直後の雪原に無数の小さな黒い隕石が散布されていて、雪上に穴の空いた場所を見つけると、雪を60 cm掘った雪床に3 cmほどの隕石が取り出せたという。また、チェリャビンスク市から西に約100 kmに位置するミアス(Mias)市の自然史博物館が、ここで大規模な隕石の採集を行っていて、大量の隕石が採集されている。

村のお店のタチアナ(Tatyana)氏は、採集した隕石を訪れた人に頒布していた。村に大きな建物はなく、衝撃波による被害は出ていない。

#### ⑤ エマンジェリンカ (Emanzhelinka)

エマンジェリンカでは、現地調査に訪れる直前までロシア科学アカデミーとチェリャビンスク大学のチームが大規模な隕石採集と調査を行っていた。

車で通過、車窓から見るかぎり、小さな家屋に被害はないが、ビル窓枠には、黒い古い窓枠と最近付け替

えられた新しいアルミサッシ窓枠が混在していた。建物の向きによって大きな被害が出ていることが確認できた。

#### ⑥ キチキノ (Kichikino)

学校の鉄筋校舎に被害はない。ドライブインにも被害はないが、閃光後の大きな爆風(衝撃波)と窓が振動する音に驚いたとの証言を得た。

#### ⑦ ミアス (Miacc) 自然史博物館

自然史博物館の開館時刻に間に合わなかったため、展示を見学できなかったが、売店と収蔵庫を見ることができた。博物館には、鉱物、隕石に詳しい学芸員がいて、落下後にデプタツキーで採集した隕石を販売していた。

#### ⑧ サトカ (Satoka)

4階建てのアパートの4階に住むバブリック (Alexeypavlyk) 氏の部屋を訪問した。被害は無いが、隕石雲と隕石雲の影が伸びているのが印象的であったとの説明を受け、隕石雲の画像をいただいた。

## 4. 収集した隕石

調査の過程で、チェバルクリ湖(2個)、エマンジェリンカ(2個)、デプタツキー(19個)の3地点で合計23個の隕石を収集することができた。これら収集した隕石は普通コンドライト(LL5)で、表面は黒色の熔融被膜に覆われ、割れた断面は明るい白と濃い灰色のコンドラジュールが見られる。また一部に酸化したような変質が見られた(図9)。チェリャビンスク大学でドウドロフ (Alexandr Dudorov) 氏よりエマンジェリンカで採集した隕石をいただいた。その際に、南ウラル連邦大学のグロフォスキー氏の分析結果によると、カンラン石(27.9 ± 0.35 mol%)、輝石(22.8 ± 0.8 mol%)、鉄・ニッケル・イルメナイトなどの金属(10 w%)からなり、形成年代は原始微惑星起源で45億7000万年、数千万年前に形成された衝撃変成があったとの説明を受けた。

## 5. 今後の対応

調査により天体衝突に伴う衝撃波の甚大な被害状況が明らかになった。これまででは、小惑星衝突時のクレーター形成[5]に伴う被害[6]について検討してきたが、今回のような衝撃波による被害を想定していなかった。

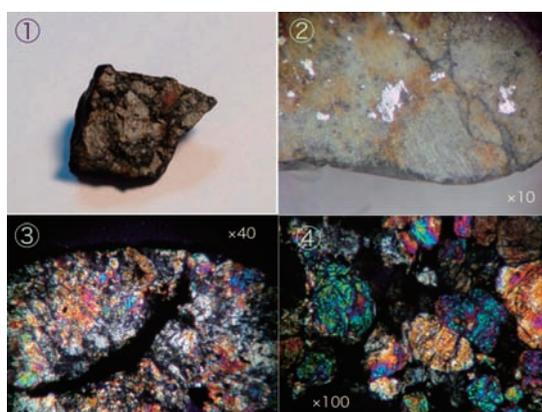


図9：収集したチェリャビンスク隕石。  
② 実体顕微鏡、③④ 偏光顕微鏡。

チェリャビンスク隕石クラスの天体衝突に伴う衝撃波による自然災害も未然に察知する必要がある。そのためには、10 m以上の地球接近小惑星を衝突の2日前までに軌道上で検出することが重要となるが、現状の観測体制では対応できていない。新たなスペースガード専用の大型観測設備の必要性を訴えるため、2月24日に緊急声明[7]を発表した。

今後は、調査で得られた知見についての詳細な精査を行っていく予定である。また既存の観測施設を活用したネットワークによる観測体制の強化やスペースガード専用の次期大型観測設備の構築に向けての構想の策定に取り組んでいきたい。

## 参考文献

- [1] 下田力, 高橋典嗣, 吉川真, 2013, ニュートン 33(5), 14.
- [2] 中島林彦他, 2013, 日経サイエンス 43(5), 48.
- [3] Chelyabinsk City., 2008, in 1999-2000 CHELYABINSK REGION in PHOTOS.
- [4] Natalia Denisova, in The CHELYABINSK REGION (GuidBook).
- [5] 高橋典嗣, 2013, 隕石と宇宙の謎(宝島社).
- [6] 日本スペースガード協会, 2013, 大隕石衝突の現実(ニュートンプレス).
- [7] 高橋典嗣, 2013, 緊急声明「ロシアの隕石落下に伴う日本スペースガード協会の対応と方針」(日本スペースガード協会). (<http://www.spaceguard.or.jp/ja/index.html>)