

## 稠密地震観測網記録による火球経路の決定

石原吉明<sup>1)</sup>・東田進也<sup>2)\*</sup>・酒井慎一<sup>3)</sup>・平松良浩<sup>1)</sup>・古本宗充<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 金沢大学大学院自然科学研究科, <sup>2)</sup> 気象庁, <sup>3)</sup> 東京大学地震研究所, \* 現在は財団法人鉄道総合技術研究所

## Determination of the fireball trajectory using dense seismic arrays

Yoshiaki Ishihara<sup>1)</sup>, Shin'ya Tsukada<sup>2)\*</sup>, Shin'ichi Sakai<sup>3)</sup>, Yoshihiro Hiramatsu<sup>1)</sup>  
and Muneyoshi Furumoto<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University

<sup>2)</sup> Japan Meteorological Agency

<sup>3)</sup> Earthquake Research Institute, University of Tokyo

\* Present, Railway Technical Research Institute

### Abstract

Fireballs, which are caused by high-velocity passages of meteorites through the atmosphere, generate shock waves. It has been known that such shock waves are often recorded on seismograms. It is possible to determine the trajectories and the sizes of a fireball using seismological records.

We have searched shock wave signals from many bright fireballs observed in the period from September 1996 to November 1998, and the 1999 Kobe meteorite. The shock waves from one large fireball, which is called the Miyako fireball, and the Kobe meteorite are clearly recorded on many seismograms. In particular, the shock waves from the former fireball are widely recorded by the dense seismic array of 1997-98 joint seismic observations in the Tohoku Backbone Range. We determine their trajectories. Amplitudes of the shock waves are found to be possibly correlated with the masses of the meteorites. It is also indicated that the shock waves from fireballs, which are darker than brightness magnitude  $-10$ , are too weak to be recognized on the seismograms of ordinary seismic stations in Japan.

**Key words:** Shock Wave, Fireball, Meteorite

### 1. はじめに

火球とは隕石などにみられるような微小天体（以下メテオロイドと呼ぶ）落下に伴ってみられる発光現象である。火球は、大気圏に進入し飛行する際、超音速（小惑星帯からの場合で約 20 km/sec）で運動するため、衝撃波を励起することが知られている。衝撃波が十分なエネルギーをもって励起されると、地表まで達し、地震計にパルス状のシグナルとして記録される。過去、長沢（1978）、長沢・三浦（1987）、東田・他（1995）、石原・他（2000）など数例の火球について衝撃波記録からの経路決定がなされている。火球以外ではスペースシャトル帰還時に衝撃波が励起された例があり、衝撃波の到着時

間からスペースシャトルの帰還経路などを解析している（Kanamori *et al.*, 1991, 1992 や Mori and Kanamori, 1991）。

隕石の母天体であると考えられている小惑星は、太陽系の始源物質を保存していると考えられており、隕石が回収された場合、岩石学的な研究と合わせ、その隕石の太陽系内の起源を知ることが重要である。火球の経路パラメータから、メテオロイドの太陽系内での軌道を推定することが可能になるため、火球の経路決定は非常に重要である。

火球の落下経路は従来、主としてアマチュア天文家によるパトロールカメラの画像、目撃証言により求められ

ている。しかし、この方法では、天候および時間帯による制約が大きく、火球の検出率が低いという問題がある。また、目撃証言は一般的に時刻精度の点で大きな問題がある。地震の観測を目的とした地震観測網は時間帯や天候に関わらず運用されており、現在、全国で火球を24時間モニターできる唯一のシステムである。地震観測点の位置は数10メートルの精度で測定されている。また、GPS時計を用いているため、非常に時刻精度の良いデータが得られる。地震計により記録された衝撃波データを用いれば、正確な位置情報と時間情報を持つデータから24時間いつの火球であっても精度の良い経路決定が可能である。また、特に集中観測時の非常に稠密な地震計配置は、衝撃波の面的な検出を可能とし、経路決定のみならず、振幅を用いた衝撃波の強度推定等に非常に有効である。衝撃波強度とメテオロイドの質量には何らかの関係があると考えられる。衝撃波の振幅などから衝撃波の強度を見積もることができれば、将来、隕石落下を伴わない火球についても、メテオロイドの質量を見積もることが可能になる。

そこで本研究では、地震観測網、1997-98 東北脊梁山地合同地震観測（長谷川・平田，1999）における稠密アレーによる地震波形データを用い、火球落下経路解析を行うとともに、記録された衝撃波の振幅についての検討を行った。

2. データ

1996年9月から1998年11月までに出現した大火球と1996年1月7日のつくば隕石、1999年9月26日の神戸隕石の計19の火球（Table 1）について解析を試みた。

火球のリストは、日本火球ネットワーク（以下JFNとする）のホームページ（<http://user.cnet.ne.jp/c/cshimo/Jnindex.html>）で報告された火球から、観測点密度の高い地域に出現した-5等級より明るい大火球をリストアップした。1996年9月から1997年8月については、JFNで報告されていない火球が存在するため、天文年鑑1998年度版 p. 196-197 火球、により補完した。つくば隕石の光度については、天文年鑑1997年度版 p. 190-191 によった。このリストに基づき、火球出現地域、出現時刻近傍の地震波形を切り出した。地震波形は、衛星通信地震観測テレメータシステムによって収録された全国の短周期速度型地震計の連続波形記録を利用した。

火球により励起される衝撃波は、固体中を伝播する地震波と異なり、空気中を伝播するため、粗密波パルスのみであり、また、伝播速度が地球内部の地震波速度に比

Table 1. List of fireballs and magnitude of brightness. +: shock waves were detected. -: shock waves were not detected. ?: shock waves were uncertain.

Arrival time (yy.mm.dd.hh.mm JST)	Magnitude of brightness	Shock wave
96.01.07.16.20 Tsukuba Meteorite	-15>	+
96.09.12.21.56	-6	-
96.10.20.04.42	-6	-
96.10.24.21.50	-10	?
96.11.04.00.20	-8	-
96.11.14.22.01	-6	-
96.11.17.01.36	-6	-
96.11.17.04.07	-7	-
96.11.17.05.10	-5	-
96.11.30.16.57	-10	-
96.12.03.20.20	-7	-
97.01.29.21.52	-6	-
97.03.19.00.36	-5	-
97.03.24.18.58	-7	-
97.03.28.19.00	-5	-
97.08.29.23.55	-6	-
98.03.30.03.20 Miyako Fireball	-10	+
98.10.28.17.30	-14>	-
99.09.26.20.20 Kobe Meteorite	-14>	+

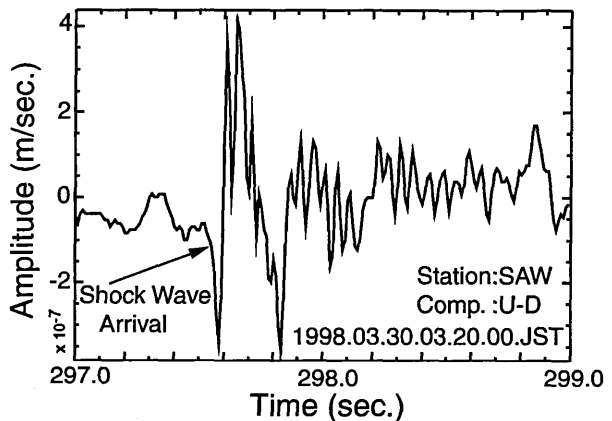


Fig. 1. Characteristic waveform of the shock wave. It was recorded at SAW (Sawauchi, 39.40300°N, 140.77200°E, 280 m) seismic station for the Miyako fireball. Origin time of this graph is 1998.03.30.03.20.00.JST.

べて非常に遅いといった特徴をもつ。また、パルス部を拡大するとNまたは逆N字と見なせる特異な形状（Fig. 1）をしており、N波とも呼ばれる（e.g. Kanamori et al., 1992）。

19の火球、隕石について地震波検出支援システム（ト部・束田，1991）を用い地震波形から衝撃波の検出および到着時の読み取りを行った。-10等級より暗い火球については衝撃波は検出されず、衝撃波が検出されたのは、宮古火球、神戸隕石、つくば隕石の3例のみであっ

た. つくば隕石については, 酒井 (1996) (<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/coco/comet.gif>) において落下経路を公開しており, 振幅の議論のみおこなった.

### 3. 落下経路解析

本研究では, 大気圏突入後の火球の運動を等速直線運動と仮定した, また, 大気は等温大気と仮定し, 音速を 0.32 km/sec で一定とした. 等速直線運動の場合, メテオロイドにより励起される衝撃波面の形状は円錐面である. 従って, 地表面の曲率を無視できると仮定すると, 衝撃波の等時線の形状は, 円錐曲線になる. また, 火球は超音速で運動するのに対し, 衝撃波は音速で伝わり, 一般的に衝撃波面の半頂角と比較すると経路の入射角の方が大きいことから, 地表近くで後から励起された衝撃波の方が地表に先に到達する. したがって, 等時線は隕石の予想落下地点から逆に広がる半楕円形となる.

衝撃波記録から経路決定するには, 任意の観測点での衝撃波到着時間を, 火球の経路パラメータを含む式で記述する必要がある. 長沢・三浦 (1987) と同様に, 地球をベッセル回転楕円体であるとし, 回転楕円体上の任意の点における接平面を  $xy$  平面,  $x$  軸正を南向き,  $y$  軸正を東向き,  $z$  軸正を鉛直上方とする  $xyz$  直交座標系を定義する (Fig. 2). 定義した座標系に対して, 火球が Fig. 2 のような経路をもって飛行し, 時間  $t_0$  において  $xy$  平面上の点  $(x_0, y_0, 0)$  に到達したとすると, 任意の点における衝撃波到着時は

$$\frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\tan \beta} - Z = v(t - t_0) \quad (1)$$

$$\sin \beta = c/v \quad (2)$$

ただし,

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma \sin \theta & \sin \gamma \sin \theta & -\cos \theta \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ \cos \gamma \cos \theta & \sin \gamma \cos \theta & \sin \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z \end{pmatrix} \quad (3)$$

と表わすことができる. ここで  $\beta$  は円錐衝撃波面の半頂角,  $c$  は音速,  $\gamma$  は経路の方位角,  $\theta$  は経路の  $xy$  平面に対する入射角,  $v$  は火球の速度,  $t$  は時間である. これは, 6つの未知数を持つ非線形の式である. したがって, この式のみから未知数を陽の形に表わすことは出来ない. そこで, 各パラメータをそれぞれ速度  $v$  は 1 km/sec, 距離  $x$  は 1 km, 距離  $y$  は 1 km, 経路の方位角  $\gamma$  は  $1^\circ$ , 経路の  $xy$  平面への入射角  $\theta$  は  $1^\circ$ , 時間  $t$  は 1 sec の刻み幅で変化させ, グリッドサーチにより, 残差の 2 乗平均が最小となるパラメータの組み合わせを求め

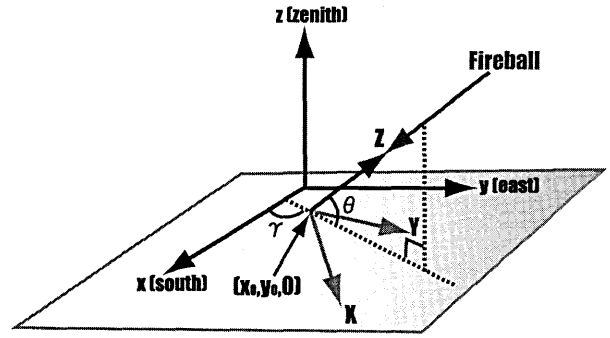


Fig. 2. Expression of a fireball path with respect to a Cartesian coordinates system.

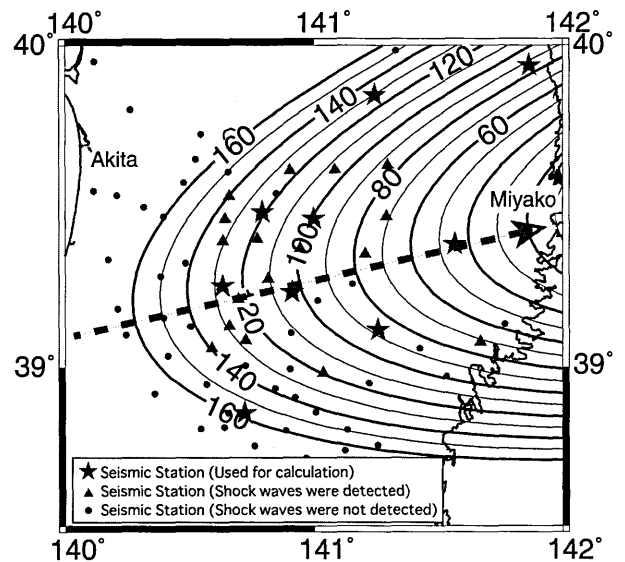


Fig. 3. Isochronal lines of the shock wave front arrival and the distribution of seismic stations for the Miyako fireball.

た. 誤差の推定には  $\chi^2$  推定法を用いた.

### 4. 宮古火球

1998年3月30日3時20分(JST)頃, 東北地方上空を西から東に飛ぶ明るい火球が目撃, および写真撮影された. この火球に関係した隕石は回収されておらず, 太平洋上に落下したと考えられる. この地域では1997-98東北脊梁山地合同地震観測に伴い, 非常に稠密な臨時地震観測網が展開されていた. この稠密アレーの186点の地震観測点中28点 (Fig. 3) で火球による衝撃波と見られる波形が記録されていた. 全ての観測点を用いてグリッドサーチを行っても, 観測点配置や読み取り精度の問題から決定精度は向上しない. そこで, 衝撃波到達時間の読み取り精度0.1秒以内, 写真観測による推定経路から観測点配置に偏りが無いよう10の観測点を選び出

Table 2. Trajectory parameters of the Miyako fireball Path. The origins are (39°N, 141°E, 0) and 1998.03.30.03.23.00.JST.

Parameter	Value	68.3% confidence interval
$v$	20 km/sec	14~29 km/sec
$x_0$	-85 km	-87~-82 km
$y_0$	230 km	227~233 km
$\gamma$	103 °	102~104 °
$\theta$	18 °	17.5~18.5 °
$t_0$	-145 sec	-148~-142 sec

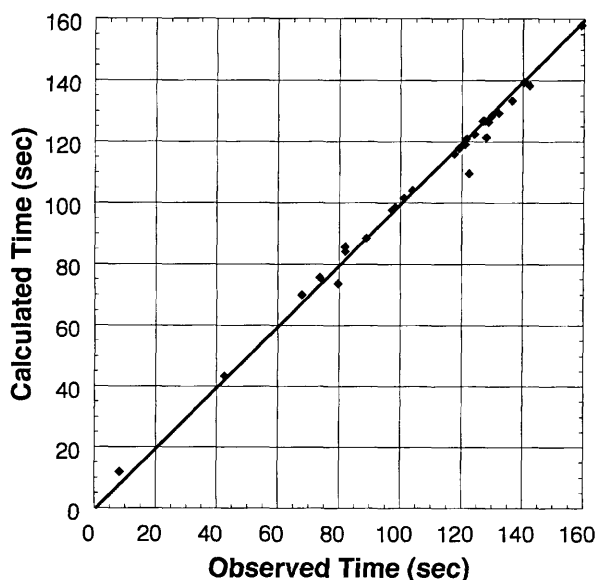


Fig. 4. Comparison of calculated arrival time with observed arrival time of the Miyako fireball's shock wave. Origin of this graph is 1998.03.30.03.23.00.JST.

し経路決定を試みた。各パラメータのサーチ範囲は、北緯 39° 東経 141° 高度 0 m, 1998 年 3 月 30 日 3 時 23 分 00 秒を基準として、 $v$  については 10~60 km/sec,  $x_0$  については -120~-70 km,  $y_0$  については 180~280 km,  $\gamma$  については 95~120°,  $\theta$  については 10~20°,  $t_0$  については -300~-50 sec である。その結果、Table 2 のような経路パラメータおよび  $\chi^2$  推定法による 68.3 パーセントの信頼区間が求められた。また、求められたパラメータによる理論衝撃波到着時と観測衝撃波到着時の関係は、計算に用いていない観測点を含めて良く一致している (Fig. 4)。

### 5. 神戸隕石

1999 年 9 月 26 日 20 時 20 分 (JST) 過ぎ、兵庫県神戸市北区の住宅の屋根を突き破り、隕石が落下した。日本ではつくば隕石以来の隕石であり、回収された隕石の質量は合計約 136 グラムである。日本では初めて落下が確

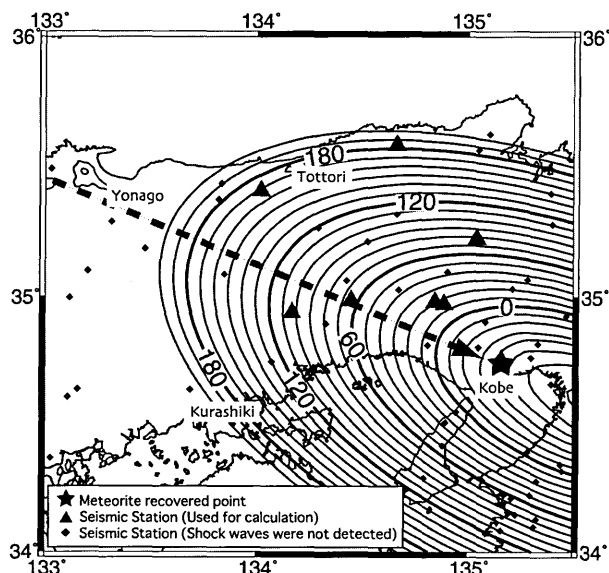


Fig. 5. Isochronal lines of the shock wave front arrival and the distribution of seismic stations for the Kobe meteorite.

Table 3. Trajectory parameters of the Kobe meteorite. The origins are (35°N, 135°E, 0) and 1999.09.26.20.21.00.JST.

Parameter	Value	68.3% confidence interval
$v$	18 km/sec	10~40 km/sec
$x_0$	42 km	42~44 km
$y_0$	46 km	43.5~49 km
$\gamma$	69 °	69~71 °
$\theta$	30 °	29.5~30.5 °
$t_0$	-105 sec	-107.5~-101.5 sec

認された炭素質コンドライトであった (国立天文台・天文ニュース No. 301 <http://member.nifty.ne.jp/nao-hito/naoj-news/301.html>). 京都大学防災研究所および気象庁の地震観測点の連続地震波形データを調べた結果、近畿から中国地方にかけての、7 点の観測点 (Fig. 5) において衝撃波と見られる波形が記録されていた。そこで、衝撃波記録からの経路決定を試みた。各パラメータのサーチ範囲は各パラメータのサーチ範囲は、北緯 35° 東経 135° 高度 0 m, 1999 年 9 月 26 日 20 時 21 分 00 秒を基準として、 $v$  については 10~60 km/sec,  $x_0$  については 30~50 km,  $y_0$  については 40~60 km,  $\gamma$  については 50~80°,  $\theta$  については 20~40°,  $t_0$  については -180~-60 sec である。その結果、Table 3 のような経路パラメータおよび  $\chi^2$  推定法による 68.3 パーセントの信頼区間が求められた。理論衝撃波到着時と観測衝撃波到着時は極めて良く一致し (Fig. 6), また経路は実際の落下点に対し水平方向で 1 km 以内の範囲を通過する。本

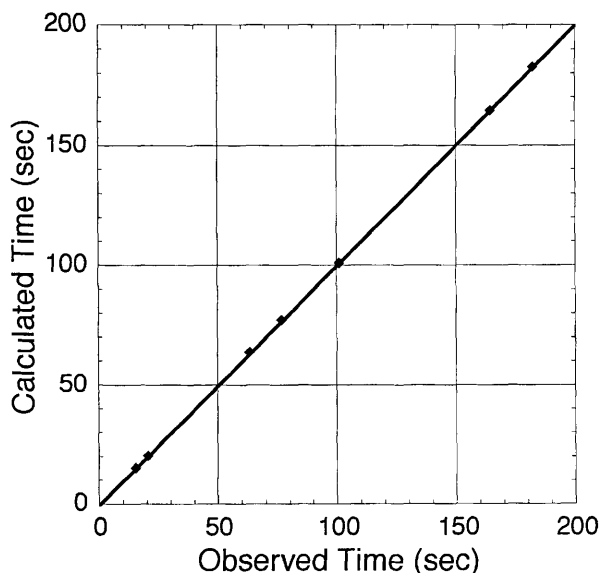


Fig. 6. Comparison of calculated arrival time with observed arrival time of the Kobe meteorite's shock wave. Origin of this graph is 1999.09.26.20.21.00. JST.

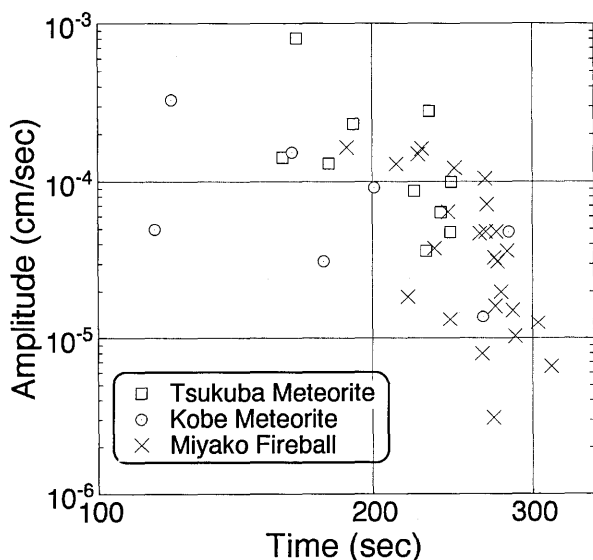


Fig. 7. Observed amplitudes of the shock waves for three fireballs. The abscissa is the time in seconds from  $t_0$ .

研究では等速直線運動を仮定しているが、実際には大気による摩擦抵抗の影響を受け、落下速度は次第に小さくなる。その結果、実際の落下点と今回求められた基準平面との交点  $(x_0, y_0, 0)$  に差が生じたと考えられる。

### 6. 衝撃波の振幅

今回調査した 19 の大火球において、 $-10$  等級以下のものでも衝撃波記録を残している火球は存在しなかった。

これは  $-10$  等級が地震計に記録される十分なエネルギーをもった衝撃波が励起されるかの境界である可能性を示唆している。

衝撃波が検出された宮古火球、神戸隕石、さらに、つくば隕石について衝撃波の振幅を検討した。振幅として、それぞれ上下動成分において衝撃波シグナル部の最大振幅を読み取った。衝撃波の振幅は火球落下中、励起される衝撃波強度が一定で、大気による減衰は無いと仮定し、落下経路からの距離を  $r$  とすれば、 $\sqrt{1/r}$  で減少すると考えられる。しかし、Fig. 7 を見る限りそのような傾向は見られない。これは落下中に速度変化や質量の減少などにより、励起される衝撃波強度が変化していることを示している。また、観測された振幅はかなりのばらつきが見られるが、これは観測点固有の環境、例えば、地盤、埋設か露天、等の影響であると考えられる。特に神戸隕石においては、都市部にある気象庁の観測点と静かな山奥にある京都大学による観測点で系統的な差がみられる。気象庁の観測点が露天なのに対し、京都大学の点は埋設されており、地震計の設置状況が衝撃波の振幅に大きく影響を与えていると考えられる。3つの火球による振幅を比較すると、 $r$  が短くなるにつれ、振幅が大きくなるという傾向が見られるものの、つくば隕石と神戸隕石および宮古火球とで約一桁振幅が違っている。宮古火球は隕石が回収されていないが、つくば隕石の質量は約 800 グラム (奥山・他, 1996) であり、神戸隕石で回収された質量と比較すると、約一桁異なっている。両者の落下速度はほぼ同一であり、この振幅の差は質量差に依存していることが示唆される。

### 7. 考察および結論

地震計に記録された衝撃波を用いる隕石の落下経路決定には、天候、時間などの制約が無い。また、隕石の落下地点、落下時刻などは、全国の衛星通信地震観測テレメータシステムのリアルタイムでのデータが利用できる。合同観測などの臨時観測による稠密観測網では、経路決定のみならず、詳細な衝撃波強度など、他の手法では得られないデータを得ることができる。現在、24 時間リアルタイムで火球をモニターできるシステムはこの種の地震観測システム以外なく、非常に有効な観測システムである。

地震観測アレーのデータを用いて、宮古火球、神戸隕石について衝撃波データから経路決定することができた。 $\chi^2$  推定法を用いて推定したパラメータ各々の 68.3 パーセントの信頼区間は、落下速度については比較的大きく、衝撃波からの経路決定における落下速度決定の困

難さを示しているものの、その他のパラメータについては非常に精度よく求まっている。それぞれの火球の起源は、宮古火球の推定された落下速度  $v$  は 20 km/sec, また入射角  $\theta$  は  $18^\circ$  であり、この速度から、火球の起源は小惑星帯であると推定される。また、神戸隕石の推定された落下速度  $v$  は 18 km/sec, 入射角  $\theta$  は  $30^\circ$  であり、この火球も起源は宮古火球同様、小惑星帯であると推定される。振幅については質量との関係が示唆されるものの、データが不足しており、今後のデータ蓄積が待たれる。また、振幅のばらつきの原因として地震計設置環境の違いなどが考えられ、その補正も考慮する必要がある。

#### 謝 辞

本研究は、東京大学地震研究所共同研究プログラム(1999-S-01)の援助を受けました。東京大学地震研究所、京都大学防災研究所、気象庁による連続地震波形データを使用させて頂きました。また、宮古火球については、1997-98 東北脊梁山地合同地震観測のデータを使用させて頂きました。データ取得に当たり、京都大学防災研究所の片尾浩博士、大見士朗博士には非常にお世話になりました。また匿名の査読者2名によるコメントは本稿を改善する上で非常に役立ちました。記して感謝いたします。最後に、本研究は平成11年度東京大学地震研究所共同利用、研究集会として実施された「大陸形成と地球のダイナミクス—島弧地殻の形成・変形仮定—」において発表されたものである。

#### 参考文献

- 長谷川昭・平田 直, 1999, 「総論: 東北日本トランセクト, 島弧変形と地殻活動」, 月刊地球, 号外 27, 5-11.
- 石原吉明・東田進也・酒井慎一・平松良浩・古本宗充, 2000, 衝撃波データによる隕石および火球の経路決定, 第21回太陽系科学シンポジウム講演集, 12-15.
- Kanamori, H., Mori, J., Anderson, D.L. and Heaton, T., 1991, Seismic excitation by the space shuttle Columbia, *Nature*, 349, 781-782.
- Kanamori, H., Mori, J., Anderson, D.L. and Heaton, 1992, Seismic excitation by space shuttles, *Shock Waves*, 2, 89-96.
- Mori, J. and Kanamori, H., 1991, Estimation of trajectories of supersonic objects using arrival time of sonic booms, *U. S. Geo. Survey Open File Rept.*, 91-48.
- 長沢 工, 1978, 1978年5月10日の火球による空震の解析, 地震研究所彙報, 53, 271-280.
- 長沢 工・三浦勝美, 1987, 地震記録から決定した1987年9月11日の大火球の経路, 地震研究所彙報, 62, 579-588.
- 奥山(楠瀬)康子・豊 遙秋・富樫茂子・木田紀子・佐藤岱生・米田誠一・島 正子・岡田昭彦・吹雪貞代・村山定男, 1996, つくば隕石の組織的特徴とその記載, 地質調査所月報, 47 (7), 245-254.
- 天文年鑑編集委員会, 1996, 天文年鑑 1997 年度版.
- 天文年鑑編集委員会, 1997, 天文年鑑 1998 年度版.
- 東田進也・酒井慎一・深尾良夫, 1995, 1995年4月30日に観測された火球通過に伴う衝撃波と見られる波形について, 第17回太陽系科学シンポジウム講演集, 36-39.
- 卜部 卓・東田進也, 1991, ワークステーションによる微小地震観測網波形検測支援システム, 地震学会講演予稿集, 1, 70.

(Received September 2, 2000)

(Accepted January 29, 2001)