

地震計記録から決定した1987年9月11日の 大火球の径路

地震研究所 { 長 沢 工
三 浦 勝 美

(昭和62年10月26日受理)

要 旨

1987年9月11日に西日本上空に出現した大火球は、進行中に強い衝撃波を発生させた。その衝撃波が地表に達したときの震動は、東京大学地震研究所、白木微小地震観測所の6ヶ所の地震計、高知大学地震観測点の2ヶ所の地震計に記録された。

これらの地震記録から計算した結果、火球は、東経 133°、北緯 34°28' の地点を 68.6 km の高さで通過し、北から 37°7' 西に向いた方向へ、水平と 34°3' の角をなして通過したことがわかった。したがってこの火球は四国を越えて広島県北部に達したと見られる。

地震計の記録だけから火球径路が決定できたのはこれが初めてのことである。これだけはっきりと径路を決めることができれば、隕石捜索の場合には非常に有力な資料となる。

1. はじめに

1987年9月11日22時9分ごろ、非常に明るい火球が西日本上空に出現した。このときは月が辛うじて見える程度の薄曇りのところが多かったが、それでもこの火球は神戸、和歌山、徳島、広島など多数の地点から目撃され、また、雲を通してその光を見た人もあった。出現後数分して、「ドドーン」という雷鳴のような大音響が広島県を中心とした地域に轟き、ところによってはかなりの地響きを感じた (Fig. 1)。これは火球が低空に達したときにひき起した衝撃波によるものと考えられ、火球が隕石として落下した可能性も考えられた。

筆者の一人 (三浦) は、この衝撃波の震動が地震計に記録されたのではないかと考え、東京大学地震研究所・白木微小地震観測所が設置している地震計の記録を点検したところ、まず三川観測点の記録にその震動を認め、さらに詳細な調査により、白木、北条、長浜、嘉納山、両子山の各観測所に (Fig. 2) また高知大学の地震観測点の土居、粟生に、この衝撃波による震動が記録されていることを見出した。

火球の衝撃波による震動が記録されているとの通報を受けた筆者の一人は、以前の火球による震動を解析した経験 (長沢, 1978) により、これらの記録から火球径路が決定できると考え、ただちにその計算を行った。その結果、ほぼ妥当と思われる径路を求めることができた。地震記録だけから火球径路を決定したのは、過去に例のない初めてのことである。本論文では、径路決定の手続きと得られた径路について述べる。

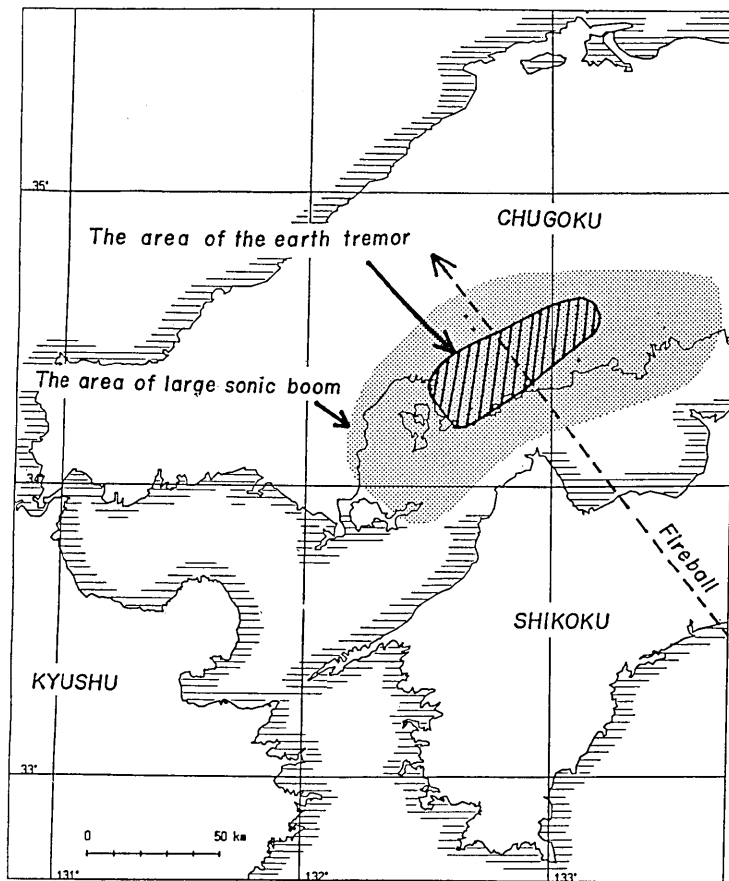


Fig. 1. The area of large sonic boom.

2. 衝撃波フロントの解析的表現

超音速で大気中を運動する物体が衝撃波を発生することはよく知られたことである。火球によって生じる衝撃波の伝播の状況は、過去の解析例(長沢, 1978)で述べられている。径路決定のために、今回の火球に対して、まず、つぎの仮定をおいた。

(1) 衝撃波を発生している間、火球は一定速度 v_0 で直線で進行した。

(2) 大気中の音速 c は、高さに無関係に一定とし、高層大気の平均音速をとって $c = 312 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ とした。

火球が等速直線運動をするという仮定は、強い衝撃波を発生する高さ(30 km 以上)ではほぼ妥当なものであろう。また、音速は高さによって $300 \sim 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ の範囲で変化するが、衝撃波が観測点に到達するまでの時間は通過してきた全径路の平均音速で決まるのであるから、上記の仮定から大きな誤差は生じないものと考えてよい。

これらの仮定をとると、衝撃波のフロントは、マッハ円錐と呼ばれる半頂角 β の直円

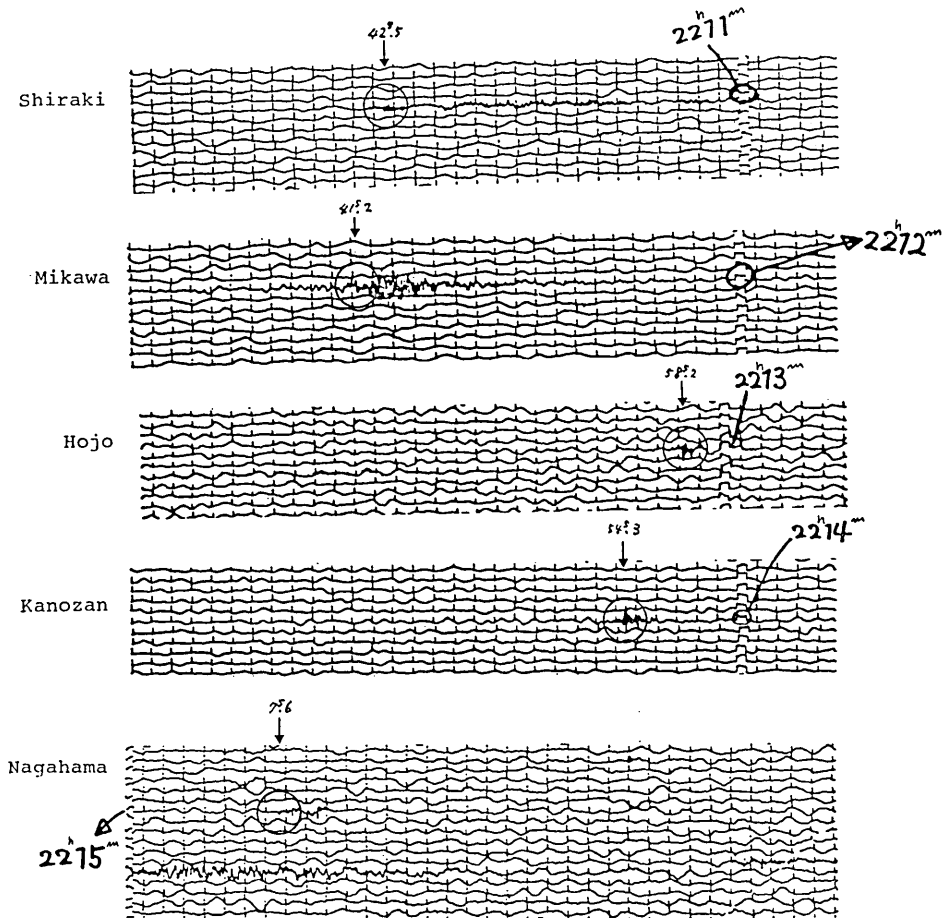


Fig. 2. Some examples of seismograph records.

錐面になる。ここで β は、

$$\sin \beta = c/v_0 \quad (1)$$

である。

ここで、このフロント面を表す方程式を考える。

いま、任意の直交座標系 (x, y, z) をとり、そこに等速で進行する火球の径路直線を考える。Fig. 3 に示したように、

γ : 径路直線の xy 面への投影が x 軸となす角、

θ : 径路直線が xy 面となす角、

$Q(x_0, y_0, 0)$: 径路直線と xy 面との交点、

t_0 : 火球が Q を通過する時刻、

P : 任意の時刻 t の火球の位置、

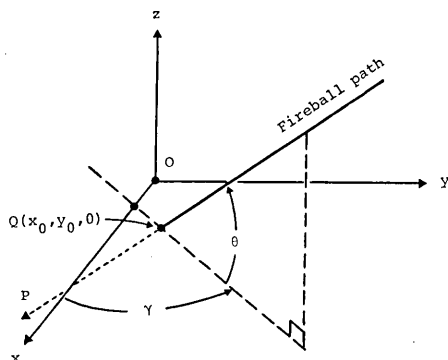


Fig. 3. Expression of a fireball path with respect to a Cartesian co-ordinates system.

とする。こうすると、衝撃波フロントは、 P を頂点とし、火球径路を軸とした半頂角 β の直円錐になり、その方程式は中間パラメーター (X, Y, Z) を使って、つぎのように書くことができる。

$$\cot \beta \sqrt{X^2 + Y^2} - Z = v_0 (t - t_0) \quad (2)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} X &= (x - x_0) \cos \gamma \sin \theta + (y - y_0) \sin \gamma \sin \theta - z \cos \theta \\ Y &= -(x - x_0) \sin \gamma + (y - y_0) \cos \gamma \\ Z &= (x - x_0) \cos \gamma \cos \theta + (y - y_0) \sin \gamma \cos \theta + z \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

である。

火球の径路を決めるのに必要な量はこれらの式の中で、 $x_0, y_0, \gamma, \theta, t_0, v_0$ の6個である。 β は(1)によって v_0 で表わすことができるから独立した未知量ではない。これらの関係式から、位置のわかった観測点で衝撃波の到達時刻を知ることができれば、その時刻をなるべく合わせるように未知量を決めることで、火球径路を決定できることがわかる。未知量が6個であるから、径路を決定するには、少なくとも6点の観測が必要であることは明らかである。

3. 計算上の問題点と観測方程式

ところで、前節の関係式から火球径路を決めようとするとき、ひとつの問題が生じる、それは、火球の速度を決めるのがたいへんむずかしいことである。

火球の速度は少なくとも音速の30倍はあるから、マッハ円錐の半頂角 β は $0^\circ \sim 2^\circ$ というごく小さい角になる。そのため、火球の速度が変化しても、衝撃波の到達時刻には相対的にあまり差が生じないのである。いい換えれば、火球の速度 v_0 をどのように与えても上記の方程式をほぼ満たす解が得られるのである。

観測点が多数あって、その配置が適当であれば火球の速度を決められる場合もないわけ

ではないが、一般的にいうと、速度を決めるのはかなりむずかしい。今回の火球では観測点の数が8個所で必要数を満たしてはいるが、配置があまりよくはなかつたので、信頼できる火球速度を求めることはできなかった。そこで、火球速度 v_0 はパラメーターとしてあらかじめ与え、それに対して他の5個の未知量を求めるという形式で問題を扱った。

前節(1), (2), (3)の関係式からは、未知量を陽の形に表現することができない。そこでこれを解くためには、それぞれの未知量に適当な近似値を与え、それに対する補正値を計算するというを繰返す、いわゆる逐次近似法を用いる必要がある。

$x_0, y_0, \gamma, \theta, t_0$ に対して与える近似値を $x', y', \gamma', \theta', t'$ とし、その補正値を $\Delta x, \Delta y, \Delta \gamma, \Delta \theta, \Delta t$ とする。このとき、観測点 I (座標: (x_i, y_i, z_i) , 衝撃波到達時刻: t_i) に対して、

$$\left. \begin{aligned} X_i &= (x_i - x') \cos \gamma' \sin \theta' + (y_i - y') \sin \gamma' \sin \theta' - z_i \cos \theta' \\ Y_i &= -(x_i - x') \sin \gamma' + (y_i - y') \cos \gamma' \\ Z_i &= (x_i - x') \cos \gamma' \cos \theta' + (y_i - y') \sin \gamma' \cos \theta' + z_i \sin \theta' \\ n_i &= \frac{Z_i}{\sqrt{X_i^2 + Y_i^2}} + \tan \beta \\ f &= (\cot \beta) / v_0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

とおくと、観測方程式は、

$$a_{i1} \Delta x + a_{i2} \Delta y + a_{i3} \Delta \gamma + a_{i4} \Delta \theta + a_{i5} \Delta t = t_i - t' - f(\sqrt{X_i^2 + Y_i^2} - Z_i \tan \beta) \quad (5)$$

となる。ただし、

$$\left. \begin{aligned} a_{i1} &= f \left\{ -\frac{(x_i - x')}{\sqrt{X_i^2 + Y_i^2}} + n_i \cos \gamma' \cos \theta' \right\} \\ a_{i2} &= f \left\{ -\frac{(y_i - y')}{\sqrt{X_i^2 + Y_i^2}} + n_i \sin \gamma' \cos \theta' \right\} \\ a_{i3} &= -f Y_i n_i \cos \theta' \\ a_{i4} &= f X_i n_i \\ a_{i5} &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

である。

火球の速度を与えてしまっているから、この場合にどうしても必要な観測点数は5点である。観測点の数がそれより多いときは最小二乗法を適用し、誤差(衝撃波到達の観測時刻と計算時刻の差)の二乗和が最小になるように火球径路を定めればよい。

4. データ解析

前節に述べた考え方によって行った計算は以下のとおりである。

まず、衝撃波による震動を記録した観測点の経緯度と衝撃波の到達時刻を Table 1 に示した。ここに示した経緯度はベツセル楕円体を準拋楕円体とした日本測地系に基づくものである。

計算に使用する直交座標系 (x, y, z) は、ここでは、

Table 1. Geodetic position of seismic stations and arrival time of the shock front.

Station	Latitude ϕ	Longitude λ	Height h	Arrival time t		
				h	m	s
Shiraki	34°5322	132°6775	285 ^m	22	10	42.5
Mikawa	34°6111	133°1071	320	11	41.2	
Hojo	33°9299	132°8153	360	12	58.2	
Doi	33°9608	133°3975	120	13	21.2	
Kanozan	33°9119	132°2486	598	13	54.3	
Aou	33°7923	133°7706	470	14	35.7	
Nagahama	33°5333	132°4685	750	15	7.6	
Futagoyama	33°5811	131°6020	685	17	13.5	

原点: 東経 133°, 北緯 34°, 標高 0 m の点

x 軸: 南を正の向き

y 軸: 東を正の向き

z 軸: 鉛直上方を正の向き

として定めた. この座標系に換算した各観測点の位置を Table 2 に示した.

Table 2. Transformed co-ordinates of the seismic stations.

Station	x	y	z
	km	km	km
Shiraki	-58.080	-29.605	-0.058
Mikawa	-67.789	9.826	-0.049
Hojo	7.764	-17.076	0.332
Doi	4.273	36.736	0.013
Kanozan	9.522	-69.482	0.213
Aou	22.768	71.363	0.030
Nagahama	51.634	-49.369	0.349
Futagoyama	45.580	-129.773	-0.797

ついで, 火球の速度を $10 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ から $70 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ まで $10 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ おきに変え, そのそれぞれに対して前節に示した方法で逐次近似を行ない, 未知量を求めた. 得られた解を Table 3 に, その解で計算した各観測点に対する衝撃波の到達時刻および観測時刻との差を Table 4 に示した. この差は平均二乗誤差で 0.8 秒程度である. 高知大学の観測点で誤差が大きい, これは信号がごく小さいため, 止むを得ないところであろう.

この結果を見ると, 火球の速度を大きく変えてもその径路の変化はごく僅かである. つまり, 速度は決まらなくても, 径路そのものはほとんど確定できることを示している.

この計算で採用した座標系は, 取り扱っている地域で, xy 面がほぼ地表に近い. しかし地表の湾曲のため, 原点から離れるにつれて地表から離れていく. 一方, 火球はしだいに減速して, ここで定めた径路直線から下向きにずれていく. したがって, Q は地表面で

Table 3. Obtained solutions for each assumed fireball velocity.

Assumed fireball velocity	x_0	y_0	r	θ	t_0
km/s	km	km			h m s
10	-107.73	-59.49	38°06	35°79	22 8 58.1
20	-109.42	-60.44	37°73	34°83	54.9
30	-110.00	-60.76	37°62	34°51	54.8
40	-110.29	-60.92	37°57	34°35	53.3
50	-110.47	-61.02	37°54	34°26	52.9
60	-110.58	-61.09	37°51	34°19	52.7
70	-110.67	-61.14	37°50	34°15	52.6

Table 4. Observed and computed shock front arrival time.

Station	Observed arrival time	Computed arrival time for assumed velocity 10-70 km/s	O-C
	h m s	h m s s	s s
Shiraki	22 10 42.5	22 10 42.0~42.1	0.4~ 0.5
Mikawa	11 41.2	11 41.1	0.1
Hojo	12 58.2	12 58.2~58.5	-0.3~ 0.0
Doi	13 21.2	13 19.3~23.3	-2.1~ 1.9
Kanozan	13 54.3	13 54.1	0.2
Aou	14 35.7	14 34.3~34.5	1.2~ 1.4
Nagahama	15 7.6	15 7.0~ 7.2	0.4~ 0.6
Futagoyama	17 13.5	17 13.9~14.0	-0.5~-0.4

Table 5. Aerial path of the fireball at longitude 133°E.

Assumed fireball velocity	Latitude ϕ	Height h	Forward direction		Passage time
			Azimuth r (N to W)	Declination	
km/s		km			h m s
10	34°283	69.65	38°06	35°50	22 8 46.2
20	34°279	68.80	37°73	34°55	48.9
30	34°278	68.52	37°62	34°24	49.8
40	34°277	68.38	37°57	34°08	50.2
50	34°277	68.29	37°54	33°98	50.5
60	34°277	68.24	37°51	33°92	50.7
70	34°276	68.20	37°50	33°87	50.8

はなく、また現実の火球が時刻 t_0 に Q を通過するわけでもない。これは火球が等速直線運動を続けると考えたときの仮想上の通過点なのである。そこで、もう少し具体的な通過点として、ここでは、火球が東経 133° の経線を通じた瞬間の点を取り上げることに

して、その点の位置、火球の進行方向を Table 5 に示した。これは火球が現実にも通過した点であると考えてよい。

得られた解から、衝撃波が同時に地表に到達した曲線を地図上に画くことができる。火球の経路とともにこの同時到達線を示したものが Fig. 4 である。これは火球の速度を $20 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ と仮定した場合の図であるが、火球の速度を変えてもこの図はあまり変化しない。

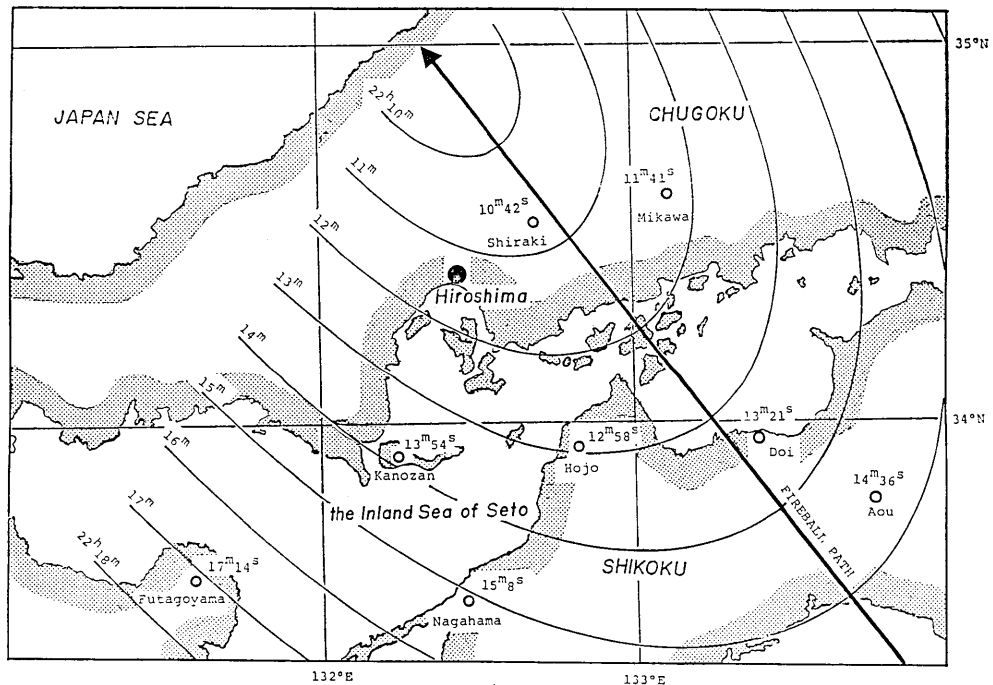


Fig. 4. The fireball path and isochronal lines of shock front arrival.

5. 火球経路

上記の計算結果を平均して、この火球の経路を東経 133 度の経線を通じた点に対して表現すると、つぎのようになる。

通過点	$\left\{ \begin{array}{l} \text{北緯 } 34^{\circ}.28 \pm 0^{\circ}.03 \\ \text{高さ } 68.6 \text{ km} \pm 2.2 \text{ km} \end{array} \right.$
進行方向	
通過時刻	$22 \text{ 時 } 8 \text{ 分 } 50 \text{ 秒} \pm 3 \text{ 秒}$

したがって、火球は四国を越えて広島県の中央を縦断し、県北部に達したものと見られる。火球は一般に高さ 100 km あたりで発光をはじめるので、おそらく四国の北部の新居浜上空付近で明るく輝きはじめ、瀬戸内海を照らして広島県に入り、島根県との県境付近まで光ったものと推定される。この状況は火球を目撃した人の話とよく一致している。

計算で得られた径路をそのまま延長すれば、島根県江津付近の北緯 35 度線あたりで地表に達するが、そこまで火球が直線で進行することはあり得ない。仮に隕石となったとすればその手前で落下したはずである。ただ、火球の質量に関するデータがまったくないので、この火球が隕石になったか、なったとすればどこに落下したかという疑問には、いまのところ答えることができない。しかし、直線として求めた径路から左右にずれる量は小さいので、ここで求めた結果は、隕石が落下した可能性のある地域を、巾の狭い直線上の範囲に限定したということ是可以である。

謝 辞

今回の火球径路の計算に当って、地震研究所の吉井敏尅助教授から地震計記録の存在をいち早く通報していただき、さらに関係資料の提供を受けた。また高知大学の木村昌三助教授からは快く地震計記録を提供していただいた。一方、広島市こども文化科学館専門員の佐藤健氏、滋賀県近江八幡市馬淵小学校教頭の藪保男氏からは、火球を目撃した人からの情報をたくさん教えていただいた。これらの方々の御協力に深く感謝をするものである。

参 考 文 献

長沢 工, 1978, 1977 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.

*Aerial Path Determination of a Great Fireball
from Sonic Boom Records on Seismographs*

Ko NAGASAWA and Katsumi MIURA

Earthquake Research Institute, University of Tokyo

On the night of September 11, 1987, a great fireball appeared over Western Japan. Although it was cloudy, the fireball was witnessed by many people between or through the clouds.

After a few minutes, Hiroshima Prefecture and its environs were hit by a large detonation like a thunderbolt. In its central area, some earth tremors were felt. They were believed to have been generated by a sonic boom from the fireball.

One of the authors soon found that the ground tremor was recorded on a seismograph at the Mikawa Station, Shiraki Micro-Earthquake Observatory, Earthquake Research Institute. Then, by detailed investigation, sonic boom records were also found at five stations of the Observatory and two stations of Kochi University. In all, precise arrival times of the shock front were obtained at eight stations.

Since the propagation of the shock wave is well known, we can determine the fireball path from the arrival times. The calculation was carried out assuming the fireball velocity to be constant and the mean speed of sound to be $312 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. These simplifications are reasonable when the sonic boom is strong. The fireball path was as given below.

At the instant when the fireball passed through the meridian of 133°E ,

Position	{Latitude	: $34^\circ 28 \pm 0^\circ 03$
	{Height	: $68.6 \text{ km} \pm 2.2 \text{ km}$
Forward direction	{Azimuth	: $37^\circ 7 \pm 0^\circ 9$ (from north to west)
	{Declination	: $34^\circ 3 \pm 0^\circ 7$
Passage time		: $13^{\text{h}} 8^{\text{m}} 50^{\text{s}} \pm 3^{\text{s}}$ (UT)

This was the first case that an aerial path of a fireball was precisely determined from seismograph records only. This will give a powerful clue for searching for meteorites.
