

8. 1977年5月10日の火球による空震の解析

地震研究所 長 沢 工

(昭和53年1月31日受理)

1. はじめに

1977年5月10日21時36分ごろ、非常に明るい火球が東関東から東北地方南部に向けて出現した。この火球は会津若松市の上空付近からいくつかの分裂をしながら飛行し、福島県を中心とした約15,000 km²の地域に「ドーン」という衝撃音をもひびかせた。それによって、この火球は隕石として落下したのではないかと想像された。この火球の衝撃音による震動は、吾妻山、安達太良山、磐梯山および那須岳において、火山監視用に設置した高感度地震計に記録されていたことが少しあとになってわかった。また多数の目撃者の証言から、隕石が地表に到達したとすれば、落下地点は山形県小国町西部の新潟県との県境付近と推定され、この火球は「小国火球」と呼ばれた。隕石の搜索も行なわれたが、まだ発見はされていない模様である。

一方この火球の径路写真が、栃木県茂木町および千葉県柏市において天体写真撮影中の中学、高校生によって撮影されていたこともわかり、その写真をもとに径路計算もおこなわれた。このような2点からの写真観測のデータによって火球の径路計算をすることで落下地点を推定し、それによって隕石を発見したという事例は過去に3回あり (CEPLECHA 1960, McCROSKY, POSEN, SCHWARTZ and SHAO 1971, Sky and Telescope 1977) 小国火球に対しても落下地点を計算することが期待された。しかし、小国火球の場合には写真撮影されたところが高さ60 km以上の部分であって末端付近のデータがないこと、火球の速度、減速度についての情報が得られなかったことなどの理由で、落下地点を高精度に計算することはできなかった。この火球観測の概略状況は、福島天文同好会の大野裕明氏その他の方がたによってまとめられた。これはFig. 1に示すとおりである (藤井, 1978)。

ここでは、上記の火山観測所で得られた、小国火球の衝撃波による空震のデータの解析を行なった。その結果、それまではっきりしていなかった火球出現の時刻および火球の速度を求めることができた。このことは、火球にともなう大音響が衝撃波によるものであるという確実な証拠を与えるものであり、また、火球の径路計算に新しい展望を開くものであった。本論文では、この解析の手続きおよび結果を述べる。

2. 衝撃波の発生と伝播

超音速 v_0 で物体が一樣な空気中を直線に進行する場合、衝撃波面は Fig. 2 に示すように、その物体を頂点とする直円錐面となる。この円錐面はマッハ円錐と呼ばれる。

この円錐は物体が前進するにつれて同じ形のままで前進し、波面は音速 c で周囲にひろ

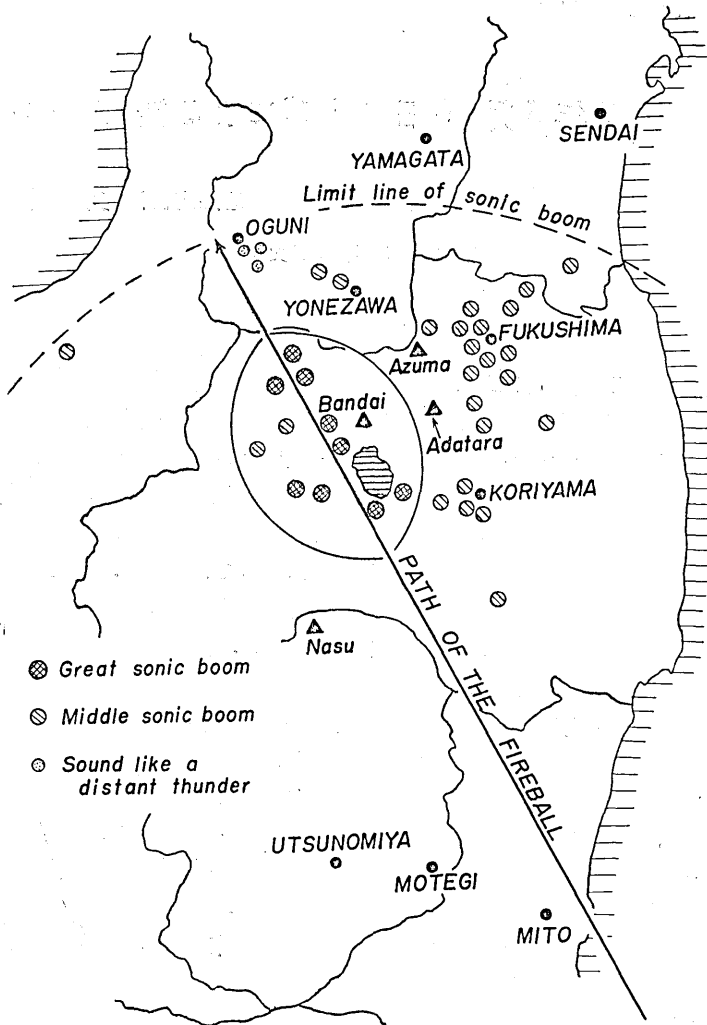
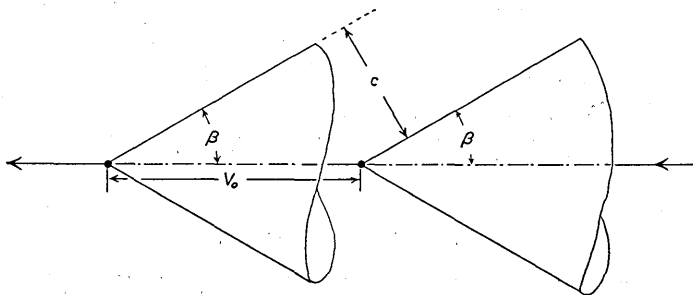


Fig. 1. Path of the fireball and the distribution of sonic boom.
(by the courtesy of Mr. Ono)



$$\sin \beta = \frac{c}{v_0}$$

Fig. 2. Propagation of a shock front in a uniform medium.

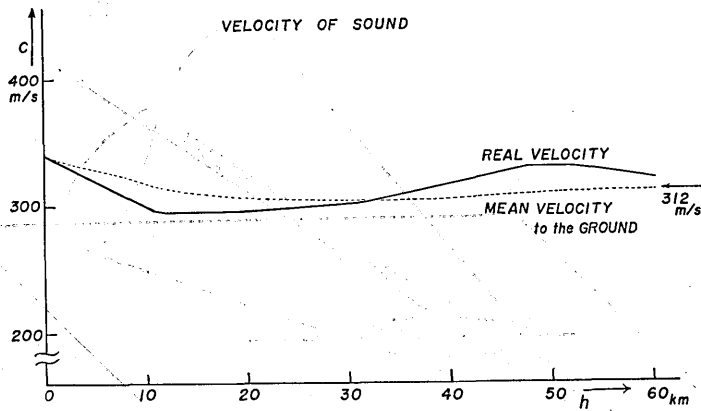


Fig. 3. Velocity of sound versus height.

がっていく。マッハ円錐の半頂角（マッハ角という）を β とすると

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

であらわされる。

物体の速度が次第に変化したり、音速 c が場所によって違ったりする場合には円錐の頂角も変化していき、形も円錐から崩れたものになる。しかし、高さ 30 km 以上の大気中では、火球の速度は近似的にはほぼ一定とみなすことができるし、Fig. 3 に示すように、この範囲の音速も近似的にはほぼ一定としてとりあつかうことができる。したがって、以下の議論では、火球の速度 v_0 および音速 c は、すべて一定であるという近似で考えていくことにする。

大気中に突入してくる火球の速度は、 $10 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ を下まわることはないし、一方音速は $300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ を少し上まわる程度であるから、ここで生ずる衝撃波のマッハ角は最大で 2° ぐらいであり、マッハ円錐はかなり細いものになる。火球の高さが 30 km 以下になると、その速度は大気抵抗のため急激に減少して衝撃波を発生しなくなり、径路も直線から大きく外れていく。しかし、ここでは等速で進行していたときに発生した強い衝撃波面だけを考えるため、火球はいつまでも等速であるとし、地表面に達したあともそのままの速度で進行を続けるものと仮に考えることにする。

地表面を平面で近似すると、Fig. 4 で火球が P の位置に到達した時刻の衝撃波面は、図に示した P を頂点とする円錐で、その時刻に衝撃波が地表に達した場所は、円錐が地平面で切られて生ずる $ABCD$ の楕円上にならぶ筈である。

このうち、実際に衝撃波が到達するのは、火球が 30 km 以上の高空にあるとき発生した波面の部分だけで、Fig. 4 の C に近いところだけであり、 A の付近には現実の衝撃波はやってこない。

火球の突入角 θ が $\theta \leq \beta$ であれば、衝撃波の同時到達線は放物線あるいは双曲線になるのであるが、 $\beta \leq 2^\circ$ であるため、ほとんどすべての場合 $\theta > \beta$ の条件がなりたち、同時到達線は楕円になる。

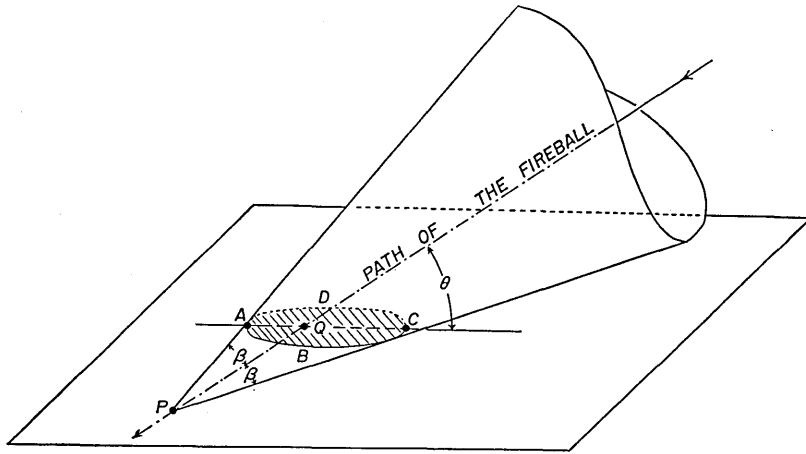


Fig. 4. Relation between a Mach cone and an isochronal line.

火球の直線径路が地表を切る点を Q とし, $QP=s$ とすると

$$AQ = s \cdot \sin \beta / \sin (\theta + \beta), \quad (2)$$

$$QC = s \cdot \sin \beta / \sin (\theta - \beta). \quad (3)$$

の関係で AQ , QC が与えられ, また楕円の離心率 e は

$$e = \cos \theta / \cos \beta. \quad (4)$$

で定まる。前に述べたように音速は一定と考えているので, 火球の径路と速度が既知の場合は s をパラメータとして地図上にこの楕円を描くことができる。これは地震の場合の等発震時線にあたるものである。

3. 解析方法

精密に解析をする場合には, 地表を平面で近似する方法では不十分であり, 各観測点の高さも考慮して衝撃波面の到達する時刻を考えなければならない。

計算の便宜上, ここでは火球の径路直線を直交座標の z 軸にとり, 径路上の任意の1点を座標原点にとる。このように座標をとるためには, 既知の座標系から座標変換をしなければならない。

まず, 緯度 φ , 経度 λ , 高さ h で与えられた点を, 地心を原点とする直交座標系 (u, v, w) であらわすと

$$\left. \begin{aligned} u &= (N+h) \cos \varphi \cos \lambda, \\ v &= (N+h) \cos \varphi \sin \lambda, \\ w &= [N(1-e^2) + h] \sin \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ただし

$$N = a(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{-1/2}. \quad (6)$$

となる。 a は地球楕円体の長半径, e はその楕円体の離心率, N は卯酉線曲率半径といわれる量である。ここでは地球の赤道面を wv 面に, 経度 0° 方向を u 軸の正の向きにとっている。

次にこの (u, v, w) の点を, 別の点 (u', v', w') を原点とし, 方向余弦 l_0, m_0, n_0 の向きを z 軸とする直交座標系 (x, y, z) へ変換する。この変換は一意的ではなく, いろいろの結果があり得るが, ここではひとつの例として, 次の変換をあげておく。

$$\left. \begin{aligned} x &= l_1(u-u') + m_1(v-v') + n_1(w-w'), \\ y &= l_2(u-u') + m_2(v-v') + n_2(w-w'), \\ z &= l_3(u-u') + m_3(v-v') + n_3(w-w'). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} l_1 &= l_0 n_0 (l_0^2 + m_0^2)^{-1/2}, \\ m_1 &= m_0 n_0 (l_0^2 + m_0^2)^{-1/2}, \\ n_1 &= -(l_0^2 + m_0^2)^{1/2}, \\ l_2 &= -m_0 (l_0^2 + m_0^2)^{-1/2}, \\ m_2 &= l_0 (l_0^2 + m_0^2)^{-1/2}, \\ n_2 &= 0, \\ l_3 &= l_0, \\ m_3 &= m_0, \\ n_3 &= n_0. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

こうして座標変換がなされ, 火球径路を z 軸にとって, すべての観測点の座標が $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots$ とあらわされたものとする。

火球が座標原点 O を通過した時刻を t_0 とし, 点 (x_i, y_i, z_i) に衝撃波面が到達した時刻を t_i とすると, Fig. 5 により, 次の関係がなりたつことがわかる。

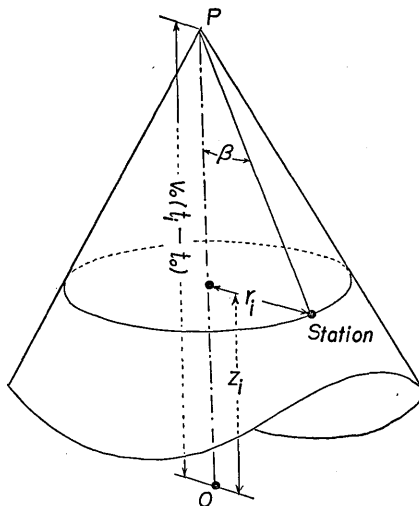


Fig. 5. Relation between the arrival time of shock front and the position of station.

$$r_i = (x_i^2 + y_i^2)^{1/2} \quad (9)$$

とおき直して

$$r_i = \tan \beta [v_0(t_i - t_0) - z_i]. \quad (10)$$

ここで未知の量はマッハ角 β , 火球速度 v_0 , 原点通過時刻 t_0 の3つである。したがって3つの観測点で衝撃波の到達時刻がわかれば, このすべてを求めることができる。 β を決めることは, 式 (1) の関係によって音速 c を決めることに相当する。

現実の計算では, 上記の (10) 式3組から $\tan \beta$ を消去して

$$v_0 \frac{t_1}{r_1} - \frac{v_0 t_0}{r_1} - \frac{z_1}{r_1} = v_0 \frac{t_2}{r_2} - \frac{v_0 t_0}{r_2} - \frac{z_2}{r_2} = v_0 \frac{t_3}{r_3} - \frac{v_0 t_0}{r_3} - \frac{z_3}{r_3} \quad (11)$$

の関係を作り, v_0 および $v_0 t_0$ を未知数として求めるのが簡単である。あとは (10) によって, すぐに $\tan \beta$ が求められる。観測点が4ヶ所以上ある場合は, 適当な3ヶ所のデータからこの手法で, v_0, t_0, β を求め, それを近似値として最小二乗法によりもっとも確からしい値を求めることができる。

4. データおよび解析

1977年5月10日の火球により, 衝撃波のため震動を記録した火山観測所の位置および初動の到着時刻は Table 1 に示す通りである。また, 地震計による震動の記録例を Fig. 6 に示した。一方, 火球径路写真の解析から得られた火球の対地軌道は Table 2 に示した。

この Table 2 に示した点を座標原点とし, 火球の進行方向を z 軸にとって (5), (6), (7), (8) 式によって座標変換をすると, 各観測所の位置は Table 3 に示したようになる。この計算で, 地球楕円体は日本測地系にもとづくベッセル楕円体を使用している。

この位置をもとに, 最小二乗法を適用して計算を行った結果, 火球速度 v_0 , マッハ角 β , 音速 c および火球の原点通過時刻 t_0 に対して次の結果が得られた。

$$v_0 = 21.71 \pm 3.45 \text{ km/s,} \quad (\text{p.e.})$$

$$\beta = 49^\circ 49' \pm 7' 67, \quad (\text{p.e.})$$

$$c = 313 \pm 69 \text{ m/s,} \quad (\text{p.e.})$$

$$t_0 = 21^{\text{h}} 36^{\text{m}} 4.6.$$

Table 1. Geographical position of the seismic stations and arrival time of the shock wave.

Station	Latitude φ	Longitude λ	Height h	Arrival time t
Nasu	37°06'8	139°59'1	1270 ^m	21 ^h 39 ^m 10 ^s
Bandai	37°34'9	140°04'9	1000	21 38 25
Adatara	37°38'6	140°20'2	900	21 39 02.6
Azuma	37°45'4	140°18'2	890	21 39 00

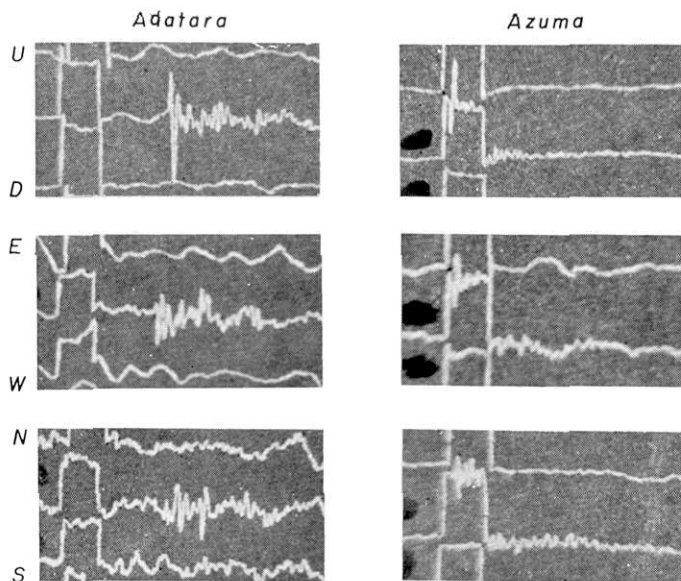


Fig. 6. Examples of seismograph records.

Table 2. Aerial path of the fireball.

A Point on the Fireball Path

- { Latitude : $\varphi = 36^{\circ}57'58''N$
- { Longitude: $\lambda = 140^{\circ}17'42''E$
- { Height : $h = 68.21 \text{ km}$

The Forward Direction

- { Azimuth: $A = 155^{\circ}22'3$ (from the south)
- { Declination: $D = 18^{\circ}13'4$

Table 3. Transformed co-ordinates of the seismic stations.

Station	u	v	w	x	y	z
Nasu	-3900.467 ^{km}	3274.621 ^{km}	3827.816 ^{km}	54.477 ^{km}	18.668 ^{km}	46.120 ^{km}
Bandai	-3881.636	3247.663	3869.008	45.516	-10.976	87.731
Adatara	-3892.775	3227.639	3874.337	42.794	-34.275	84.737
Azuma	-3884.972	3224.984	3884.230	39.044	-36.846	96.793

Table 4. Observed and computed shock front arrival time.

Station	Observed Time	Computed Time	O-C
Nasu	21 ^h 39 ^m 10 ^s	21 ^h 39 ^m 9.932 ^s	0.068 ^s
Bandai	38 25	38 25.002	-0.002
Adatara	39 2.6	39 2.884	-0.284
Azuma	39 0	38 59.782	0.218

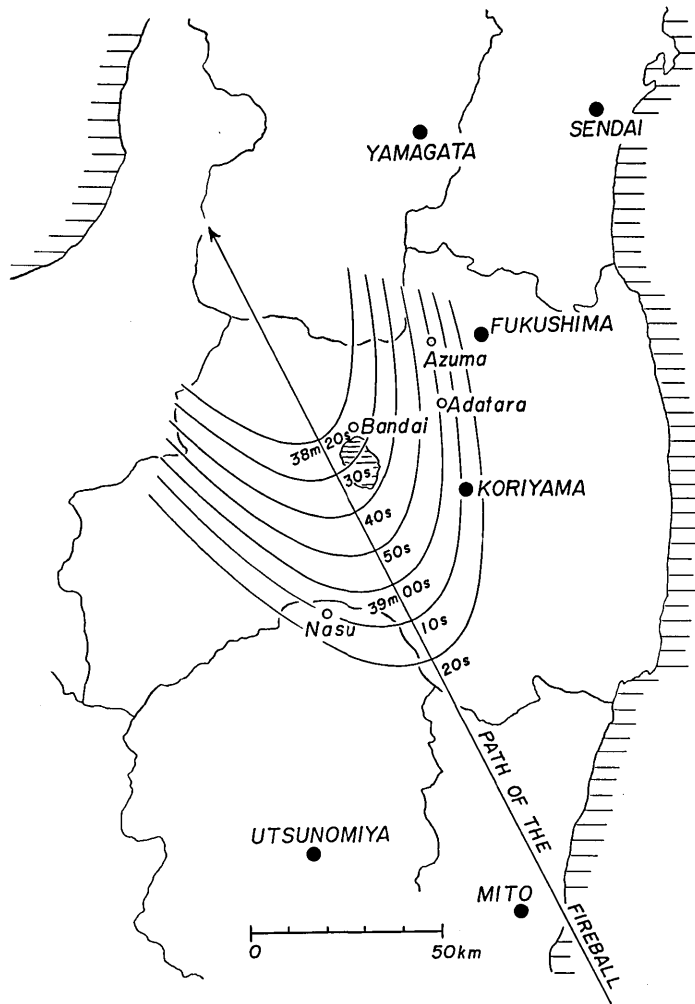


Fig. 7. Isochronal line of the shock front arrival.

得られた音速が Fig. 3 に示した平均音速と非常によい一致を示していることから、火球にともなう音響が衝撃波によるものであることが確実であると結論づけられる。

試みに、ここで得られた値をもとに、各観測所へ衝撃波到達時刻を再計算すると、Table 4 に示した値となり、観測所の位置の精度を考えれば、観測値と計算値は十分よい一致を示しているものといえよう。この結果にもとづいて描いた衝撃波の同時到達線は Fig. 7 のようになる。

5. 結論および謝辞

火球にともなう音響が衝撃波によるものと仮定し、2節で示したような伝播をす
るとして計算した結果、妥当な音速が得られた上に、計算による衝撃波の到達時刻が観測

と非常によい一致を示した。このことは、衝撃波がほとんど理論通りの伝播をしていることを裏付けしているものといえる。一方、このように衝撃波の到達時刻から火球の速度が得られたということは過去にその例がない。今回の結果から考えると更にたくさんの衝撃波到達時刻の観測があれば、そのデータだけから火球の概略軌道を算出することも可能と思われる。この事実は、大火球の研究や隕石の捜索にかなりの手がかりを与えるものと思われる。

今回の火球についていえば、その速度が求められたことは、径路計算、落下地点推定に大きな資料をつけ加えることになったといえる。ただ、ここで求められた 21.7 km/s という速度は、隕石落下を期待するには速すぎるものである。この速度では大気中の摩擦が大きすぎ、更にこの火球が18度という小さな突入角であることを考えあわせると、初期質量が相当に大きなものでない限り、隕石として落下している可能性は小さいと考えられる。仮に隕石落下があったとしても、質量 1 kg 以上といった大きな隕石を期待することは無理であろう。

なお、今回の研究解析にあたって、火球による衝撃波の震動が地震計に記録されていることに気づき、データ収集に骨を折っていただいた、日立市天気相談所、富岡啓行氏に、ここで深く感謝するものである。また、衝撃音の聞きこみ、収集に非常に努力され、貴重なデータの提供をいただいた、福島天文同好会の 大野裕明氏、藤井旭氏、その他の方がたに心から御礼を申し述べるものである。

参 考 文 献

- CEPLECHA, Z., 1961, Multiple fall of Přeboram meteorites photographed. *Bull. Astr. Inst. Csl.* **12**, 21-47.
- 藤井 旭, 1978, 1977年5月10日の大火球, 天文月報, **71**, 45-47.
- McCROSKY, R. E., POSEN, A., SCHWARTZ, G. and SHAO, C. -Y., 1971, Lost city meteorite—its recovery and a comparison with other fireballs. *J. Geophys. Res.* **76**, 4090-4108.
- The Innisfree Meteorite, 1977, *Sky and Telescope*, **46**, 339.

8. *An Analysis of Sonic Boom from a Great Fireball on May 10, 1977, Recorded on Seismographs of Volcano Observatories.*

By Ko NAGASAWA,
Earthquake Research Institute.

On the night of May 10, 1977, a great fireball appeared in the sky east of the Plains of Kanto in Japan and flew away to the north. It was witnessed by a lot of people in Kanto and Tohoku districts.

After some time, a big sonic boom attacked Fukushima Prefecture and its adjacent areas. This was considered to be generated by the fireball and a meteorite fall was expected.

A few days later, it was discovered that the ground vibration caused by the sonic boom was recorded on high gain seismographs installed in volcano observatories near Mt. Nasu, Mt. Bandai, Mt. Adatara and Mt. Azuma. From these records, precise arrival times of the sonic boom were obtained.

As the fireball was fortunately photographed at two distant places by amateur astronomers, its precise aerial path could be computed. Then, the state of propagation of the sonic boom could be calculated by assuming the speed of the fireball and the Mach angle of shock wave to be constants. By applying the least squares method, the above values were determined as follows:

$$\begin{array}{ll} 21.71 \pm 3.45 \text{ km s}^{-1} & \text{for the speed of the fireball,} \\ 49:49 \pm 7:67 & \text{for the Mach angle.} \end{array}$$

From the above values, $313 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ was obtained for the sound velocity which agrees well with the mean velocity of sound in the corresponding height range. This supports the reliability of the results together with the fact that the calculated arrival times agree with observed times within the observational errors. The obtained speed of the fireball seems too fast to leave a meteorite of considerable weight.
