寄 書

花火によって励起された 衝撃波による地震動

金沢大学大学院自然科学研究科*

高橋雪江・石原吉明・諸田智克・
平松良浩・古本宗充

Ground Motions Generated by Shock Waves
from Fireworks

Yukie TAKAHASHI, Yoshiaki ISHIHARA,
Tomokatsu MOROTA, Yoshihiro HIRAMATU,
and Muneyoshi FURUMOTO

Graduate School of Natural Science and Technology,
Kanazawa University Kakuma-machi,
Kanazawa, Ishikawa 920-1192, Japan

(Received December 19, 2003;
Accepted July 7, 2004)

§ 1. はじめに

大気圏に突入した小天体の大気中における超音速飛行や、その小天体の大気中での爆発などによって衝撃波が励起される。大気中で励起された強い衝撃波が地上に到達すると地面が振動し、それが地震計に記録される [Brown *et al.* (2002), Ishihara *et al.* (2003), 長沢・三浦 (1987)]. このような衝撃波の地震計記録は、不連続的に上昇する最初の圧縮波とそれに引き続く希薄波とにより特徴的な波形を示す。観測点周辺の環境による影響が少ない場合、N 字型の波形になることがあり、N 波と呼ばれることもある。近年、日本において地震観測網がより一層整備されたことにより、地震計記録は大気中へ的小天体突入の様子の解析に有効な手段となることが期待される。

Ishihara *et al.* (2003) では、衝撃波の到着時から小天体の軌跡を求めたが、その振幅の情報も利用できるはずである。しかし、衝撃波によって叩かれた地面がどのような挙動を示すのかは、あまりよくわかっていない。衝撃波の圧力と地動の関係が明らかになれば、地震計の衝撃波記録からそのサイズや質量の変化を求めることが可能となる。そこで、本研究では花火によって励起された衝撃波と、それにより励起された地動の観測を行い、そ

れぞれの振幅の関係を調べた。

§ 2. 観測と解析法

観測は 2002 年 7 月 27 日に金沢市内で行われた花火大会を利用して行った。観測場所は河川敷であり、速度型地震計 L22D (固有周波数 2 Hz, 感度 0.62 V/cm/s) をほぼ花火直下の地下 0.4 m に埋設した。なお、地震計の感度は観測後に振動台を利用した検定を行って求めた。一方、爆圧計 PMS5 (感度 2.032 V/kPa) を地震計から 50 m 離れた地上 0.8 m に設置した。地震計と爆圧計からの信号はアンプで増幅した後、A/D 変換器 (分解能 12 bit) に接続し、ノート型のコンピュータを使って収録した。爆圧計には、1 kHz のローパスフィルターをかけ、サンプリング周波数は共に 1 kHz である。観測した花火の号数は、3 号玉、4 号玉、5 号玉の 3 種類である。収録した花火の号数ごとの薬量、開発高度、開発直径を Table 1 に示す。ただし、これらの値は花火の種類によって差があり、個々の正確な値は不明である。関係者への聞き取りなどにより、概数として与えてある。

爆圧計で得られた花火の衝撃波波形と、それにより励起された地動波形の例を Fig. 1 に示す。地動振幅は、地

Table 1. Characteristics of fireworks.

Size	Explosion diameter [m]	Explosion height [m]	Powder charge [kg]
3	100	120	0.06
4	120	150	0.18
5	180	180	0.32

Fig. 1. Example of shock wave and ground motion. a) The waveform of the shock wave from a firework where size is 5. b) The waveform of the ground motion.

* 〒920-1192 金沢市角間町

震計記録から得られた速度波形を積分して求めた。爆圧計で得られた波形には、衝撃波の到着による不連続的な圧力上昇、その直後に希薄波や地面での反射波が見られる。地震計で得られた波形は、衝撃波の到着により地面が叩かれて下向きに変位し、その後希薄波が到着し、徐々に減衰している。このような衝撃波波形の初動両側振幅を振幅として読み取った。また、その最小値から最大値までにかかった時間の2倍を周期とした。同様に、衝撃波によって励起された地動波形から、振幅と周期を読み取った。

地震計の感度の検定を行ったところ、周波数 100 Hz 以上になると感度が一定ではないことがわかった。よって、振幅の解析には地震計が安定した応答をする 100 Hz 以下のデータを選別し、使用した。

観測地点の弾性的性質を知るために、花火の衝撃波の観測を行った地点で、小規模の地震波探査を行った。震源としては、人力によりハンマーで地面を叩くことを行った。震源間近に置いた地震計と各測線上の地震計の記録を花火と同様の方式で記録し、P 波速度と S 波速度を求めた。その結果、P 波速度 200~250 m/s、S 波速度 160~180 m/s という値が得られた。これらの値の幅は、得られたデータを解析する際の読み取り誤差の範囲を示す。

§ 3. 観測結果

観測により得られた波形記録から読み取った圧力振幅と地動振幅の関係を Fig. 2 に示す。おおよそ 1 hPa の圧力が地面に入射すると地面は $1 \mu\text{m}$ 変位し、圧力振幅と地動の振幅はほぼ傾き 1、つまり比例関係にあるように見られる。データがばらつく要因としては、上空で花火が爆発する位置の違いが考えられる。

周期的な圧力波が地面に入射した時の地動を与える理論式は Ben-Menahem and Singh (1981) によって議論されている。それによれば、圧力波が高角度で入射する場合、圧力振幅と地動振幅の関係は

$$U_z = -P_0 \frac{m_2 \cos e}{\omega \rho \alpha m_1} \quad (1)$$

となる。ここで、 U_z は地動振幅 [m]、 P_0 は圧力振幅 [Pa]、 ω は角周波数 [rad/s]、 ρ は大気密度 (≈ 1.2) [kg/m³]、 α は大気中の音速 (≈ 340 m/s)、 e は入射角、 m_1 と m_2 は、

$$m_1 = \cos e \left[\left(\frac{\alpha'}{\beta'} \right)^2 \sin 2e' \sin 2f' + \cos^2 2f' \right] \quad (2)$$

$$m_2 = \left(\frac{\rho \alpha}{\rho' \alpha'} \right) \cos e' \quad (3)$$

である。ここで、 α' 、 β' は地面の P 波速度と SV 波速度

Fig. 2. Relation between the amplitudes of the shock waves and the ground motions. The deep shadow zone indicates a relation expected from equation (1). The light shadow zone indicates a relation expected from equation (4). The width represents a range of seismic wave velocities at the observation point. (Right limit is P-wave velocity: 200 m/s, S-wave velocity: 180 m/s. Left limit is P-wave velocity: 250 m/s, S-wave velocity: 160 m/s.)

[m/s], e' , f' は P 波と SV 波の屈折角、 ρ' は地表直下の密度 [kg/cm³] である。

この式を適応する際、密度が必要であるが、観測地点表層の密度は不明である。そこで、地表直下の密度を概数として、観測から得られた P 波速度と S 波速度に対応した値を平均的な岩石の場合と比較し、2000 kg/m と与えた [物理探査学会 (1989)]。一方、圧力波の入射角は以下のような手順で調べた。まず、花火の主な打ち上げ場所と地震計、圧力計を通過する鉛直面で爆発したと仮定した。得られた地震計と圧力計データの平均到着時間差は 0.085 s であり、衝撃波の速度を大気中の音速と仮定すると到達距離の差が 29 m となる。この値とデータ中一番多かった 4 号玉の開発高度 150 m より、地面への入射角はおおよそ 30° となる。入射角を 30° と仮定すると $m_1 = 0.79 \sim 0.84$ 、 $m_2 = 7.5 \times 10^{-4} \sim 9.8 \times 10^{-4}$ となる。入射角が前後する場合については後で議論する。角周波数 ω は圧力計で観測された衝撃波の平均周期を使用した。想定した上空での花火の爆発地点から、地震計と圧力計に入射する衝撃波の波面の模式図を Fig. 3 に示す。

Fig. 3. Schematic illustration of the configuration of the experiment.

以上の値を(1)式にあてはめ、観測された衝撃波の圧力9~140Paを代入し求めた地動はFig. 2で濃く塗られた範囲になる。図の示す範囲は、P波速度とS波速度の読み取りの誤差を反映したものである。右側の境界は $v_p=200$ m/s, $v_s=180$ m/s, 左側の境界は $v_p=250$ m/s, $v_s=160$ m/sの場合である。その結果、式(1)から求めた理論値の地動は観測値と比較すると約1桁小さくなり、両者は合わないことがわかった。

次に、圧力波が低角度で入射する場合について考えてみる。大気中における波線速度と地面における波線速度のコントラストが大きい場合、圧力振幅と地震動振幅の関係は

$$u_z = \frac{cP}{2\omega(\lambda + \mu)} \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\mu} \right) \quad (4)$$

となる[Ben-Menahem and Singh (1981)]。ここで、 λ と μ はラメパラメーター、 $c=\alpha/\sin e$ は水平方向の波面の速度である。測定したP波速度とS波速度、そして、仮定した地表直下の密度よりラメパラメーター $\lambda(-5.0 \times 10^7 \sim 2.3 \times 10^7$ Pa)と $\mu(5.1 \times 10^7 \sim 6.5 \times 10^7$ Pa)を求めた。

その結果、予想される圧力振幅と地動振幅の関係はFig. 2で薄く塗られた範囲になる。図の示す範囲は、P波速度とS波速度の読み取りの誤差を反映したものである。右側の境界は $v_p=200$ m/s, $v_s=180$ m/s, 左側の境界は $v_p=250$ m/s, $v_s=160$ m/sの場合である。観測値と理論値は非常に近い値を示した。

ここで、入射角が前後する場合について考えてみる。地面への入射角が 30° より大きい場合、地面に垂直にかかる衝撃波の圧力は減少し、地動が小さくなるので、Fig. 2で黒く塗られた領域は左に移動する。逆に、 30° よりも小さい場合は右に移動する。

Fig. 1で示したように圧力波と地動の周期は異なり、それぞれの周期を読み取り、圧力周期に対する地動周期を全衝撃波で求め、平均すると1.6となった。これは、衝撃波が地面に入射する際、地面がローパスフィルターのような役割を果たし、衝撃波の高周波成分に対して地面が応答しきれていないことを示していると考えられる。

§ 4. ま と め

大気中の衝撃波振幅とそれにより励起される地動の振幅との関係を調べるため、花火によって励起された衝撃波の圧力とそれによる地動の同時観測を行った。その結果、両者には比例関係が認められた。そして、圧力波が地面に高角で入射したときの理論式[Ben-Menahem and Singh (1981)]を適用すると約1/10倍地動が小さく予想されることがわかった。圧力波が低角で入射した場合の理論式[Ben-Menahem and Singh (1981)]は観測値と非常に良く合うことがわかった。しかし、観測していた花火は地震計のほぼ真上で爆発しているように見られ、圧力波が低角で入射しているとは考えにくい。高角入射の場合の理論値が観測値より小さくなった原因はわからないが、今後、より高周波数でサンプリングを行うなど、さらに研究を進める必要がある。

謝 辞

本研究を行うにあたり、北國新聞社、北陸中日新聞社、核燃料サイクル開発機構の國友孝洋博士、宇宙航空研究開発機構の水谷仁教授、名古屋大学の地震火山センター、能登煙火、金沢大学理学部地球物理学研究室の皆様にご協力頂きました。記して感謝致します。

文 献

- Ben-Menahem, A. and S. J. Singh, 1981, *Seismic Waves and Sources*. Springer-Verlag New York Heidelberg Berlin.
- Brown, P. G., D. O. ReVelle, E. Tagliaferri and A. R. Hildebrand, 2002, An entry model for the Tagish Lake fireball using seismic, satellite and infrasound records, *Meteorit. Planet. Sci.*, **37**, 661-675.
- 物理探査学会, 1989, 図解「物理探査」, 物理探査学会
- Ishihara, Y., S. Takeda, S. Sakai, Y. Hiramatsu and M. Furumoto, 2003, The 1998 Miyako fireball's trajectory determined from shock wave records of a dense seismic array, *Earth Planets Space*, **55**, e9-e12.
- 長沢 工・三浦勝美, 1987, 地震計から決定した1987年9月11日の大火球の経路, *地震研究所彙報*, **62**, 579-588.