

地震に伴う超低周波音*

田 平 誠**

要 旨

愛知県内に設置されているインフラソニック波観測装置は、地震に伴って周期1~10秒、振幅1 Pa程度の微気圧振動を頻繁に検出している。この研究ではこれらの中から代表的なものを選んで、その起時、波形、最大振幅等を浜松及び名古屋の地震記録と対照させることによりその発生機構を調べた。その結果、これらの微気圧振動は地震波がマイクロホンの設置場所まで伝播して来た時地表の上下運動によって大気中に放射される音波であって、過去に Montana 地震や Alaska 地震の際に米国内で観測されたものと同種のものであることが示された。

1. はじめに

愛知県内に設置されているインフラソニック波観測装置は、地震に伴ってしばしば周期1~10秒、振幅1 Pa程度の微気圧振動を記録している。この振動は名古屋及び浜松における震度が0の時でも明瞭に現れることがある。

地震に伴う気圧波としては、過去に3つのタイプのものが報告されている。その1つは Benioff et al. (1951) や Grover・Marshall (1968) が報告したもので、震央とマイクロホンの中間のどこかに Rayleigh 波の速度が音速とほぼ等しい部分があるとき、Rayleigh 波との resonant coupling によって音波が発生し、これが伝播して来るものである。これは通常地震波の通過から少し遅れて局所的な音速で伝わって来る。第2番目は、震央における急激な地表の上下運動によって発生するもので、1964年の Alaska 地震の際に California で観測されたもの (Bolt, 1964; Mikumo, 1968) が有名である。この気圧波は Krakatoa の噴火 (Symonds, 1888) やシベリア大いん石落下 (Whipple, 1930) や大気圏内の核爆発 (Yamamoto, 1954) によって発生したのと同種の重力音波に属する。第3のタイプは、地震波がマイクロホンの設置場所まで到達したときに、地表面の上下運動によ

て大気中に放射される音波で、1959年の Montana 地震 (Cook and Young, 1962) や 1964年の Alaska 地震 (Bolt, 1964; Donn and Posmentier, 1964) の際に観測された例がある。これらの3つのタイプの他に、奇妙な方向から到来するインフラソニック波が Alaska 地震に伴って米国内で観測されており、最近 Young・Greene (1982) は地震波が Rocky 山脈を通過する際にその山岳部分から放射された音波が大気中を伝播して来た可能性のあることを示唆している。

本稿では愛知県内で観測された地震に伴う微気圧波の中から比較的 SN 比の良いものを4例選んで紹介すると共に、その起時、波形、最大振幅等を、気象庁発行の地震月報から得た名古屋及び浜松の地震記録と対照して、その発生機構が上に述べた第3のタイプのものであることを示す。

2. 観測装置

愛知教育大学では、1976年9月から主として桜島の爆発によって発生するインフラソニック波 (Tahira, 1982) を観測する目的で、3台の低周波マイクロホンを順次愛知県内に設置して記録をとっている。その設備の詳細については Tahira (1981) に紹介されているのでここでは要点のみを述べる。センサーとしては、1980年12月までは Brüel & Kjaer 社の Type 4146、その後は米国 GUS 社の GLOBE 100C 型のコンデンサーマイクロホンを使用している。これらはいずれも 0.1~100 Hz の

* Infrasound associated with earthquakes.

** Makoto Tahira, 愛知教育大学地学教室。

—1984年8月17日受領—

—1985年2月25日受理—

第1表 インフラソニック・ステーションの位置及び設置年月.

| 略 称 | TOY | KAR | TOG |
|---------|------------------------|----------------------|------------------------------------|
| 設 置 場 所 | 豊明市沓掛町横井1 豊明市立豊明中学校 | 刈谷市井ヶ谷町広沢1 愛知教育大学 | 愛知郡東郷町大字諸輪字畑尻94-23 名古屋大学農学部附属農場 |
| 経 度 (E) | 137° 0.658' | 137° 3.247' | 137° 5.209' |
| 緯 度 (N) | 35° 3.492' | 35° 2.988' | 35° 6.745' |
| 設 置 年 月 | 1976.9 | 1976.9 | 1979.10 |

周波数域で0~-3 dBの応答を示す。観測に際しては高周波域のノイズを除去するために1 Hz以上の成分は電氣的フィルターによってカットしている。

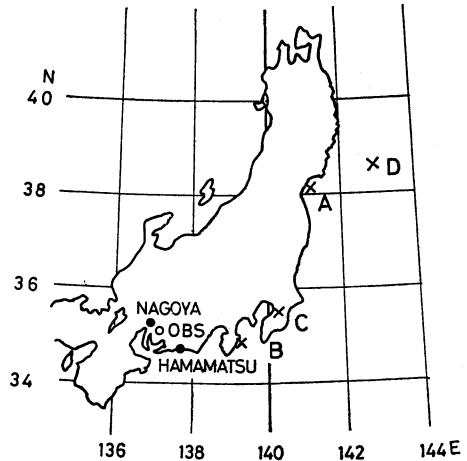
センサーは、不規則な風の変動に起因するノイズを軽減する為に、多数の硬質塩化ビニール製のパイプからなる「ラインマイクロホン」の中に設置されている。これは基本的には長さ100m程度の線上の気圧信号の空間的平均値をとる装置であり、不規則なノイズを相殺させて減少させる効果をもつものである。

検出部は愛知県内の3つの地点、豊明市、刈谷市、及び東郷町（以下それぞれ TOY, KAR, TOG と略記する）に設置されておりその出力は無線テレメーターによって1カ所に集められてペン書きレコーダーに常時記録される。各ステーションの位置と設置時期を第1表に示す。

本稿で扱う微気圧データはペン書きレコーダーにしか出力されていない為、スペクトル解析や相関法による伝播方向、速度の解析は行っていない。さらに3つのステーションのうちの1つが設置未完了であったり、測器が不調であったりして、2点の記録しか取れてない場合があるが、本稿での議論には特に支障はないと考えられる。

3. 地震に伴う微気圧振動

地震に伴って観測された微気圧振動のうち比較的 SN比の良いものを4例選んで以下に示す。第1図は関係する地震の震央の位置 (A-D) と愛知教育大学インフラソニック波観測装置 (OBS) の位置を示す。このインフラソニック・ステーションには地震計が設置されていないので、浜松及び名古屋に於ける地震記録を比較の対象とした。各地震の起時、発生場所、深さ、マグニチュードを、浜松、名古屋に於ける地震データと共に第2表にまとめて示す。



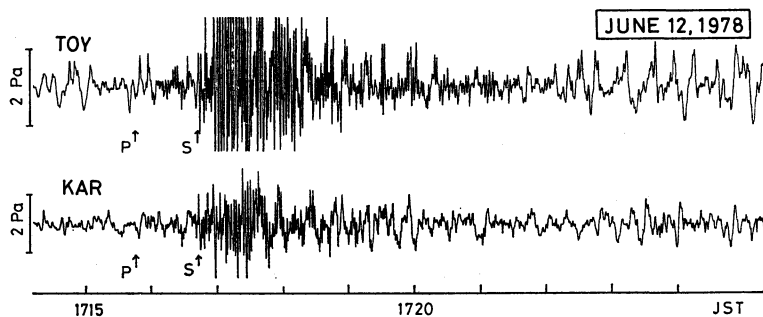
第1図 本論文で扱う地震の震央 (A-D) 及びインフラソニック観測点の位置 (OBS).

A. 1978年6月12日 宮城県沖地震

これは、宮城県沖の深さ40 kmで発生したM7.4の地震で、仙台市を中心として東北地方全域に大きな被害を与えた。震央距離570.5 kmの名古屋でも震度2を記録した。この時 TOY 及び KAR で検出した微気圧振動を第2図に示す。バックグラウンドノイズがやや大きいので振動の開始時刻があまり明瞭でないが、比較的長周期の風のノイズに混じって微弱ながら短周期の振動が矢印Pのあたりから始まっているのが認められる。この時刻は名古屋に於けるP相の発振時17時15分44.7秒とほぼ一致する。この短周期の振動は矢印Sのあたりで急に振幅を増す。これは名古屋に於けるS相の発振時17時16分42.8秒とほぼ同時刻である。この大振幅の振動は約1分30秒ほど続き、その後弱まりつつさらに3~4分間の継続が認められる。比較のため、名古屋地方気象台における強震計(変位地震計)の記録の一部を第3図に示す。

第2表 本論文で扱う4つの地震のデータ(気象庁発行・地震月報より)。

| 本文中の記号 | A | B | C | D |
|------------------|------------|------------|------------|------------|
| 発生場所 | 宮城県沖 | 伊豆半島東方沖 | 千葉県中部 | 宮城県沖 |
| 日付 | 1978. 6.12 | 1980. 6.29 | 1980. 9.25 | 1981. 1.19 |
| 時刻 (H,M,S, JST) | 17 14 25.4 | 16 20 07.5 | 02 54 23.1 | 03 17 23.9 |
| 経度 (E) | 140° 10' | 139° 14' | 140° 13' | 142° 58' |
| 緯度 (N) | 38° 09' | 34° 55' | 35° 31' | 38° 36' |
| 深さ (km) | 40 | 10 | 80 | 00 |
| M | 7.4 | 6.7 | 6.1 | 7.0 |
| 浜松の地震記録 | | | | |
| Δ (km) | 551.7 | 140.0 | 244.3 | 637.1 |
| 震度 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 相 | P | P | IP | EP |
| 発振時 (H,M,S) | 17 15 41.1 | 16 20 30.2 | 02 54 58.7 | 03 18 51.0 |
| 相 | S | IS | ES | IS |
| 発振時 (H,M,S) | 17 16 41.7 | 16 20 48.2 | 02 55 24.5 | 03 20 04.2 |
| 上下動最大振幅(μ) | 1300 | 1400 | 400 | 400 |
| 周期(sec) | 1.7 | 4.0 | 1.7 | 2.2 |
| 名古屋の地震記録 | | | | |
| Δ (km) | 570.5 | 208.4 | 297.8 | 656.4 |
| 震度 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| 相 | IP | IP | IP | EP |
| 発振時 (H,M,S) | 17 15 44.7 | 16 20 40.3 | 02 55 05.2 | 03 18 53 |
| 相 | S | S | ES | X |
| 発振時 (H,M,S) | 17 16 42.8 | 16 21 06.4 | 02 55 37 | 03 20 12 |
| 上下動最大振幅(μ) | 1500 | 300 | 100 | 200 |
| 周期(sec) | 2.4 | 7.0 | 2.3 | 4.0 |



第2図 1978年6月12日宮城県沖地震に伴う微気圧振動の記録。

ここでは3成分の記録のうちタイムマークの入っている東西動のみを示すが、TOY及びKARに於ける微気圧記録の時間的経緯との対応が極めて明瞭である。第2図

の大振幅の部分について山と谷の数を数えて卓越周期を推定してみると約2.2秒となる。これは名古屋に於ける上下動の卓越周期2.4秒(第2表)とよく一致する。

以上のことから、問題の振動は地震波が TOY 及び KAR を通過する際に地表面の上下運動によって大気中に引き起こされた圧力振動であり、Cook・Young (1962) 及び Donn・Posmentier (1964) が述べたものと同じタイプのものであると考えられる。但し、これらの過去の報告ではいずれも気圧波の最大振幅が Rayleigh 波の通過によって生じているのに対し、考察下の例では

S波が主要な役割を果たしている点が異なる。

地震波の通過によって生ずる地表の鉛直変位を

$$\zeta = a \cdot \exp(ikx - iot)$$

と表すと、これによって生ずるインフラサウンドの圧力振幅は

$$p = \rho c \left| \frac{d\zeta}{dt} \right| = \rho c a \sigma \quad (1)$$

と表現される (Cook and Young, 1962)。但し ρ は空気密度、 c は静止大気中の音速、 a は地表変位の振幅、 σ はその角周波数である。そこで ρ 、 c の値を適当にとれば、第2表に示した浜松と名古屋の上下動最大振幅及び周期から最大気圧振幅を見積ることができる。

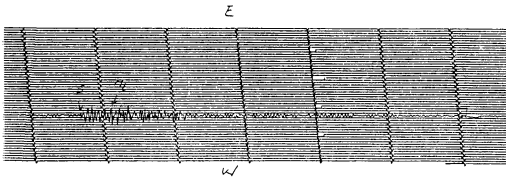
$$\rho = 1.2 \times 10^{-3} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}, \quad c = 3.4 \times 10^4 \text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$$

としてこれらを推定した結果を、実測値と共に第3表にまとめて示す。KAR に於ける実測値 2.1 Pa は名古屋の推定値 2.0 Pa とよく合っている。

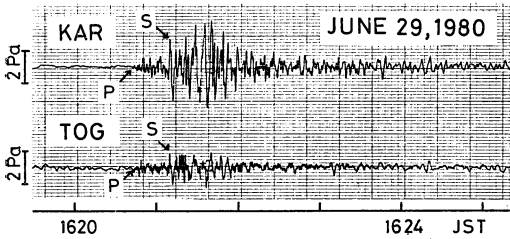
以下に示す3つの例B, C, Dについても、同様な考察からやはり地震波による局所的な地表の上下運動が原因となって発生したものであることが示される。

B. 1980年6月29日伊豆半島東方沖の地震

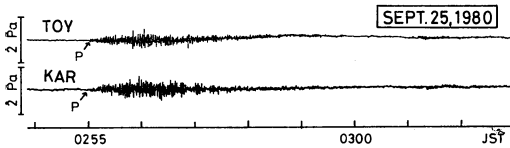
この地震もやはり名古屋で震度2を記録したものである。この時の KAR 及び TOG に於ける記録を第4図に示す。図中の矢印 P, S はそれぞれ名古屋に於ける P 相, S 相の発振時とよく一致している (第2表参照)。



第3図 1978年6月12日宮城県沖地震の際の名古屋地方気象台における強震計 (E-W) の記録。



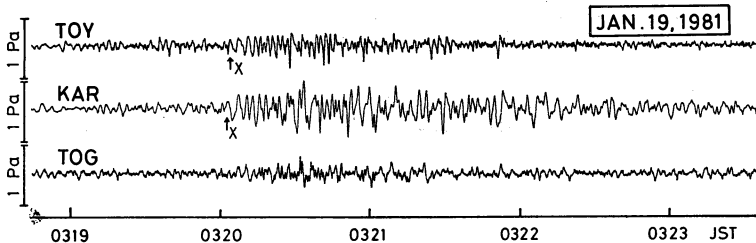
第4図 1980年6月29日伊豆半島沖の地震に伴う微気圧振動の記録。



第5図 1980年9月25日千葉県中部の地震に伴う微気圧振動の記録。

第3表 浜松・名古屋の地震記録から推定された最大気圧振幅と実測値。

| 記号 | A | B | C | D | |
|---------------|-------------------|------------------|-----------------|-----------------|---------------------|
| 推定最大気圧振幅 (Pa) | 浜松 名古屋 | 2.0 0.11 | 0.90 0.11 | 0.60 0.11 | 0.47 0.13 |
| 実測最大気圧振幅 (Pa) | TOY KAR TOG | >1.8 2.1 — | — 2.7 1.0 | 0.5 0.5 — | 0.4 0.45 0.25 |



第6図 1981年1月19日宮城県沖地震に伴う微気圧振動の記録。

(1) 式による最大気圧振幅の推定値は浜松 $0.9 P_a$, 名古屋 $0.11 P_a$ とかなり開きがある. 実測値の方は KAR $2.7 P_a$, TOG $1.0 P_a$ であり, TOG の値は浜松とほぼ等しい. KAR の値は推定値よりやや大きめである.

C. 1980年9月25日 千葉県中部の地震

この地震は M6.1 と, ここで扱う例の中では最も規模が小さい. しかし首都圏直下型であったため交通の混乱や多数の人的被害をもたらした. 浜松, 名古屋共に震度 0 で人体に感ずるほどの揺れはなかったが, 我々のインフラソニック波観測装置は第 5 図に示すような気圧振動を記録した. 名古屋に於ける P 相の発振時は 02 時 55 分 5.2 秒で, 図中の矢印 P の時刻と一致する. しかし, この記録では微気圧振動の振幅が徐々に増大しており, S 波の到着を示す不連続的な振幅の増大が認められない. このことは, 第 2 表に見るごとく浜松, 名古屋での相表示が ES となっていることと符合する. 推定最大気圧振幅は浜松 $0.6 P_a$, 名古屋 $0.11 P_a$, 実測値は TOY, KAR とともに $0.5 P_a$ で浜松の値にはほぼ等しい. なお, 第 5 図に於いて 3 時 01 分すぎにごく小さな振動が認められるが, これは 02 時 59 分に発生した M5.3 の余震に対応している.

D. 1981年1月19日 宮城県沖の地震

これは A と同様宮城県沖合で発生した地震で, M7.0 という大地震であるが, 浜松, 名古屋に於ける震度はいずれも 0 であった. このときの記録は第 6 図に示されている. 他の例と異なる点は P 波の開始がはっきりしないことで, 地震記録の方もやはり浜松, 名古屋ともに EP と報じている. 矢印 X の部分は明らかに別の相の到来を示しており, 浜松の S, 名古屋の X 相の報告と一致している. 推定最大気圧振幅は浜松 $0.47 P_a$, 名古屋 $0.13 P_a$ であり, これに対して実測値は TOY $0.4 P_a$, KAR $0.45 P_a$, TOG $0.25 P_a$ であって, TOG がやや小さめであるほかは浜松の推定値に近い値となっている.

4. まとめ

前章 A~D の微気圧振動の解析は, いずれもこれらが地震波がマイクロホンの設置されている地域を通過する際に地表面の上下運動によって発生したものであることを示している. Cook・Young (1961) によれば, これは地震波と等しい水平位相速度をもつインフラサウンドで, 鉛直に対してごく小さな角度—音速と地震波の速度の比で与えられる角度をなして上方に伝わるものである. この研究では水平位相速度の算出は行っていない

が, 第 2, 4~6 図に示した各ステーションの記録で, 互いに対応する部分の時間差を調べてみると, これらの信号の水平位相速度は音速よりはるかに大きいことが推定される.

A~D で示した微気圧振動はいずれも浜松, 名古屋で観測された地震波の各相に応じた振幅変化を示しており, 最大振幅も浜松または名古屋に於ける推定値と大体一致している. このことから地表付近に設置された低周波マイクロホンは地表の上下運動をかなり忠実に検出しているものとみられ, 一種の速度型地震計の働きをするものと考えられる. ただし, 地震計として実用化するためには風のノイズの問題等解決すべき問題が多い.

なお, 現在までのところ, 地震に伴う他の種類の気圧波, すなわち Rayleigh 波との resonant coupling による音波や, 震央から直接大気中に放射される音波は我々の装置ではまだ観測されていない.

謝 辞

この研究を行うにあたり, 京都大学理学部 山元龍三郎教授から暖かい御指導を頂いた. また愛知教育大学 成瀬聖慈教授からは地震波に関して有益なコメントを頂いた. 記して感謝の意を表す. さらに, 観測機器の設置に御協力頂いた豊明市と名古屋大学農学部, そして地震記録の提供を頂いた名古屋地方気象台にお礼を申し上げる.

文 献

- Benioff, H., M. Ewing and F. Press, 1951: Sound waves in the atmosphere generated by a small earthquake, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S., 37, 600-603.
- Bolt, B.A., 1964: Seismic air waves from the great 1964 Alaskan earthquake, Nature, 202, 1095-1096.
- Cook, R.K. and J.M. Young, 1962: Strange sound in the atmosphere 2, Sound, 1, 25-33.
- Donn, W.L. and E.S. Posmentier, 1964: Ground-coupled air waves from the great Alaskan earthquake, J. Geophys. Res., 69, 5357-5361.
- Grover, F.H. and P.D. Marshall, 1968: Ground to air coupled waves from a distant earthquake, Nature, 220, 688-687.
- Mikumo, T., 1968: Atmospheric pressure waves and tectonic deformation associated with the Alaskan earthquake of March 28, 1964, J. Geophys. Res., 73, 2009-2025.
- Symonds, G., 1888: The Erruption of Krakatoa and Subsequent phenomena. Trubner and Co.,

- London.
- Tahira, M., 1981: A study of the infrasonic wave in the atmosphere: Multi-pipe line microphone for infrasonic observation, J. Meteor. Soc. Japan, 59: 477-486.
- , 1982: A study of the infrasonic wave in the atmosphere, (11) Infrasonic waves generated by the explosions of the volcano Sakura-jima, J. Meteor. Soc. Japan, 60, 896-907.
- Whipple, F.J.W., 1930: The great Siberian meteor and the waves, seismic and aerial, which it produced. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 56, 287-304.
- Yamamoto, R., 1954: The microbarographic oscillations produced by the explosion of hydrogen bombs. Bull. Inst. Chem. Res. Kyoto Univ., Supplementary Issue, Nov. 1954. (Meteor. Notes of Meteor. Res. Inst. Kyoto Univ. Ser. 2, No. 1)
- Young, J.M. and G.E. Greene, 1982: Anomalous infrasound generated by the Alaskan earthquake of 28 March 1964, J. Acoust. Soc. Amer., 71, 334-339.

日本気象学会および関連学会行事予定

| 行 事 名 | 開 催 年 月 日 | 主 催 団 体 等 | 場 所 |
|--|-----------------|--------------|--------------|
| 第10回レーザ・レーダ(ライダー)シンポジウム | 昭和60年5月16日・17日 | レーザ・レーダ研究会 | 福井県芦原町 |
| 月例会「南極圏の気象」 | 昭和60年5月21日 | | 気象庁 |
| 日本気象学会春季大会 | 昭和60年5月22日～24日 | 日本気象学会 | 気象庁 |
| 月例会「第29回山の気象シンポジウム」 | 昭和60年6月15日 | | 気象庁 |
| 第22回理工学における同位元素研究発表会 | 昭和60年7月1日～2日 | 関係諸学協会共同主催 | 国立教育会館 |
| International Cloud Modelling Workshop /Conference | 1985年7月15日～19日 | WMO | Irsee (ドイツ) |
| First WMO Workshop on the Diagnosis and Prediction of Monthly and Seasonal Atmospheric Variations over the Globe | 1985年7月29日～8月2日 | WMO | メリーランド大学(米国) |
| IAMAP/IAPSO 1985年 ハワイ合同研究集会 | 1985年8月5日～16日 | | ハワイ州ホノルル |
| 第23回国際地震学・地球内部物理学協会(IASPEI)総会 | 昭和60年8月19日～30日 | 地震学会ほか | 京王プラザホテル |
| 第3回エアロゾル科学・技術研究討論会講演 | 昭和60年8月22日・23日 | エアロゾル研究協議会 | 東京理科大学 |
| 第3回アジア流体力学会議 | 昭和61年9月1日～5日 | アジア流体力学会議委員会 | 日本都市センター |