

巨大津波の空中前駆音のモデル*

中 村 重 久**

A modelling for atmospheric precursor of a big tsunami*

Shigehisa NAKAMURA**

Abstract: A possible model is proposed for an atmospheric precursor of a big tsunami which appeared after the occurrence of big offshore earthquake as found in the Japanese historical descriptions, documents and records. The author's interest is to show that stratifications in the sea and in the atmosphere cause to form an acoustic caustic in each media if a source is assumed to be located on a fault line including the epicenter of an earthquake on the sea floor. Sound on the sea surface just above the epicenter is the strongest to propagate through the atmosphere to form an acoustic caustic in the sky. A sound from the caustic can be taken as if it were a cannon boom or a thunder-roll for those who are on the earth in a range of several tens kilometers from the source. Sound can be directly detected by people in the ground-surface layer of 10 m thick above the sea surface within a range of about 80 km from the source.

1. 緒 言

これまでに、著者は日本の太平洋沿岸における巨大津波の歴史的資料をさぐり、大地震後、津波来襲までの間に、沖合あるいは空中で大砲のような爆音がしたという記述を多数例見出した（たとえば、中村、1986a）。この記述の物理的妥当性を明らかにするために、そのような例のみられた海域の海水の水温・塩分・圧力を考慮にいられて、海洋物理学的な立場から仮説をおき、検討を重ねてきた（たとえば、中村、1986a, 1986b; NAKAMURA, 1988）。ところで、最近の資料によれば、日本の歴史的記述にある津波前駆音に類似の記録は、1977年にインドネシアにおいても報告されている（Pusat Meteorologi dan Geofisika, 1977）。これに対しても中村（1988）は、上記の仮説（たとえば、中村、1986a）を適用して説明できそうだと考えている。

ところで、上に述べた仮説は海中の音波の問題に限られていて、海中の音源から沿岸や船上の人々になぜ聞こ

えるのかを説明していない。

これまでの検討例では、海底地震がリヒタースケールで $M=6.6$ 以上の巨大地震である場合に津波が発生し、その津波が沿岸域に災害をもたらすとされていたようである。その点で、地震発生後、津波来襲までにとらえられた異常音を、自然における津波短期警報とみることができる。地震発生や津波来襲の予測が十分でない段階では、たとえ地震発生後であっても、短期的に、津波が来るか否かを判断することができれば、これは津波災害防止軽減の立場からも非常に有効である。この見地から、上記の仮説については、さらに検討をすすめて、その実用性を明らかにしなくてはならない。

ここでは、海底の震央から出た異常音（正確には、海底の震央を含む地震断層から出た異常音）が、海面を経て、大気中を伝わり、沿岸や船上の人々にどのような音としてとらえられるかをさぐるために、巨大津波が過去にみられた日本南海道沖の水温・塩分の鉛直分布をよりどころとした。その特徴をとらえるため、モデル化した簡単な水温・塩分の鉛直分布が与えられた場合に、震央から出た音はどのように海中を伝わるか、さらに、海面に達した音が、海面から大気中へどのように伝わるかを検討してみたい。このために、海面上の大気中の音速の鉛直分布も簡単なモデル化したものを利用する。

* 1988年1月13日受理 Received January 13, 1988

** 京都大学防災研究所附属白浜海象観測所、〒649-22 和歌山県西牟婁郡白浜町堅田畑崎 Shirahama Oceanographic Observatory, Disaster Prevention Research Institute, Katada-Hatasaki, Shirahama, Wakayama, 649-22 Japan

このような検討によって、海底地震発生後、巨大津波が来襲する前に、空中で大砲のような音あるいは雷のような音がする可能性の高いことを明らかにする。

2. 音速の鉛直分布のモデル化

ここでは、海中の音波の伝わり方は、すでに中村（たとえば、中村 1986a; NAKAMURA, 1988）が考えたようなものを考える。その理論的基礎は、たとえば CLAY and MEDWIN (1977) に記されているものと同じであり、また、海面を通過した後の空中における音波の伝わり方についても、基本的には海中音波に対して用いたものと同じ線型の音波伝播の式を利用できるものとする。

2.1. 海中音速場

ここでは、典型的な例によって検討することとし、日本南海道沖の水温・塩分・圧力を考えにいたした水中音速鉛直分布を対象とすることとし、これを単純化したモデルにおきかえて利用する。すなわち、海底地震の震央から地震時に出た音波の条件として、中村 (1986a, 1986c), や NAKAMURA (1988) を参考にして、つぎのようなものを考える。すなわち、

- 海面直下 $z=0$ m で音速は $C=1,560$ m/s,
- 音速極小層 $z=1,000$ m で $C=1,480$ m/s,
- 海底 $z=3,000$ m で $C=1,520$ m/s.

また、簡単のため、水平方向には、水中音速分布は一樣なものとし、水深は一定であるものとする。海面から音速極小層まで音速は線型に変化するものとし、また、音速極小層から海底までの音速も線型に変化するものとする。このため、形式的に、音速極小層で音速は不連続な変化をすることになるが、ここではとくに重要な問題としては考えない。特徴をとらえることに重点をおくこととする。

2.2. 大気中音速場

大気中の音速は、主として温度によって定まる（たとえば、東京天文台編の理科年表）。ところで、地球上の大気の鉛直分布は、たとえば KATO (1980) が図示しているように複雑である。その特徴に着目して、地球上の大気温度の鉛直分布を Fig. 1 に示した。本文で検討の対象とするのは、Fig. 1 に示された大気温度鉛直分布のうち、地表から 200 km までの範囲（図中破線で示した曲線）である。図中の点 X および点 Y における温度を参考にして、本文においては、

- 地表上 $z=0$ km で温度は $T=275^\circ\text{K}$;
- 地表上 $z=80$ km で温度は $T=180^\circ\text{K}$ (点 Y)
- 地表上 $z=200$ km で温度は $T=800^\circ\text{K}$ (点 X);

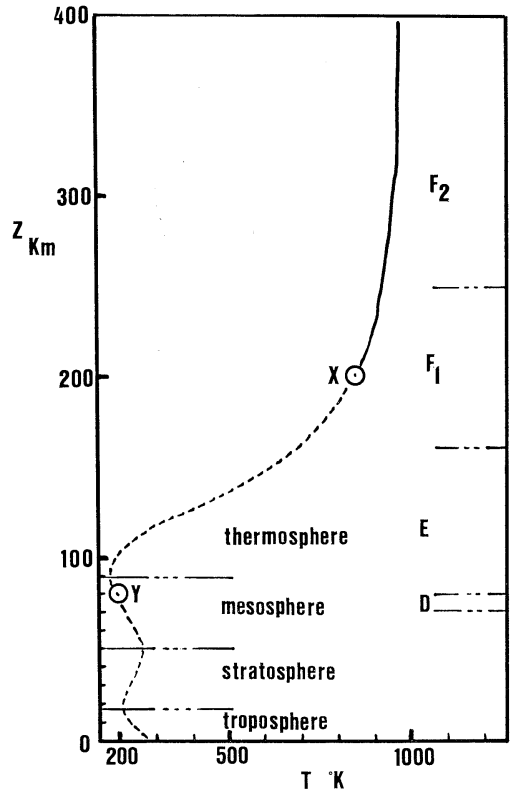


Fig. 1. Vertical temperature distribution of the earth's atmosphere. Meteorological layers are classified as troposphere, stratosphere, mesosphere and thermosphere. Aeronomical layers are classified as D, E, F₁ and F₂ layers.

とする。気体中の音速は気体の絶対温度の平方根に比例する（たとえば、東京天文台編の理科年表）ことを考慮に入れて、大気中の音速の推定をすることができる。たとえば、地表上 $z=0$ km における温度 T_0 が与えられれば、地表上高度 z_i km については、音速は

$$C(z_i) = \alpha \sqrt{T_i}; \quad \alpha: \text{比例定数}$$

であり、この α は地表の音速 C_0 と地表の温度 T_0 とから定まる値

$$\alpha = C_0 / \sqrt{T_0}$$

である。

このようなことから、大気中の音速場の特徴を示す簡単な例として、つぎのようなものを考えることができるであろう。すなわち、

- 地表上 $z=0$ km で音速は $C=330$ m/s;
- 地表上 $z=80$ km で音速は $C=275$ m/s (点 Y);
- 地表上 $z=200$ km で音速は $C=562.5$ m/s (点 X).

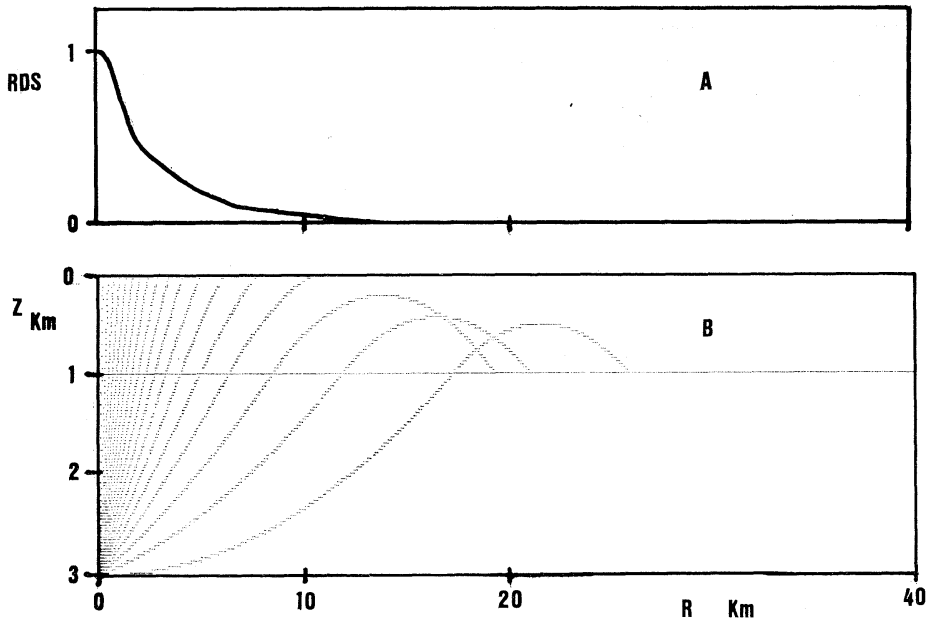


Fig. 2. Acoustic rays in the sea radiated out of a source on the sea floor. (a) Sound speed is 1,560 m/s on the sea surface ($z=0$ km). (b) Sound speed is 1,480 m/s at the level of sound channel which is assumed to be located at 1 km below the sea surface. (c) Sound speed is 1,520 m/s on the sea floor ($z=3$ km). (A) Relative acoustic ray density (RDS) as a function of horizontal distance R (in km) from the source. (B) Acoustic rays' pattern in the sea which gives RDS distribution with a variable R as shown in (A) for the sea surface. Rays in (B) are in five-degree angle step from the vertical (0°) to the horizontal (90°).

そして、音速は、地表と点 X との間では線型的に変化するものとし、また、点 X と点 Y との間でも音速は線型的に変化するものとする。

3. 海中での音波

さきに 2.1 に示した海中音速鉛直分布モデルに対して、震央を含む地震断層に沿った音源を想定すると、たとえば中村 (1986c) や NAKAMURA (1988) のようにして海中音波の音源からの伝わり方は Fig. 2 のようになる。ここで、説明の都合上、音源からの音線の数値計算にあたって、音線が鉛直線に対して角 0° で鉛直上方に向かうものから、角 90° で水平方向に向かうものまでを対象とし、その 2 つの角の間を 5° きざみとし、角の変化に対する音線の変化を Fig. 2 の下段 (Fig. 2B) に示した。

本文では、海面に達し、海面を通過し、さらに、大気中を伝わる音に焦点をおいて検討したい。したがって、海面下に形成されるような caustics については、これ以上立ち入って議論をしない (cf. 中村, 1986c; NAKA-

MURA, 1988)。

さて、Fig. 2B に示された計算結果にもとづいて、海面 $z=0$ における音線の相対的密度 (RDS) がわかる。すなわち、音線の海面における幅は、海面での RDS に逆比例するものとすれば、音源からの水平距離 R に対する音の強さを知る目安を得ることができる。このような考え方で海面における音の強さの目安として RDS の R に対する分布をもとめ図示したのが Fig. 2 上段 (Fig. 2A) である。ここで、中村 (1986c) の Fig. 10 を参考にすると、音源を角 78° 以上で出た音線は $R=13$ km 以遠で海面下の caustics を形成する問題につながるが、大気中を伝わる音波には直接つながらない。したがって、本文の Fig. 2A の RDS は X が 0 からおよそ 13 km までの範囲で考えれば十分である。

この Fig. 2A の RDS の R に対する分布をみると、震央 (音源) の直上の RDS が最も大きい値を示し、 R が大きいと RDS の値は小さくなるのがわかる。これは、音源の直上が最も海底からの音の集中度が高いことを示している。

4. 海面を通して大気中へ向かう音波

ここで、海中から海面を通して大気中へ伝わる音波は物理的にどのようなものかを検討しておく必要がある。便宜上、Fig. 3 のような模式図を利用し、海面付近の音の伝わり方の説明に利用する。ここで、図中 $P-P'$ を海面とし、海面をはさんで、下方に海水(媒質 I)があり、上方に空気(媒質 II)があるものとし、それぞれの媒質はそれぞれ均質一様なものとする。媒質の密度 ρ および媒質中を伝わる音速 C について、それぞれにサフィクス(下付記号) 1 および 2 を付けてそれぞれの媒質の特性を区別する。そして、ひとつの音線 R_I が海中下方から海面の点 0 に入射し、透過したものは音線 R_T の経路をたどり、反射したものは音線 R_R の経路をたどるものとする。鉛直線に対して R_T のなす角は屈折角として与えられ、反射角は鉛直線と R_R との間の角で定まって、その角度は入射角に等しい。

このとき、海面での音線 R_I, R_R, R_T のエネルギー E に対して

$$E_I = E_T + E_R \quad (1)$$

である。ここでは、音のエネルギーの逸散などは考えないことにする。さらに、海面での音のエネルギーのフラックスについて考えるとき、すべての周波数 f を考えにいと、

$$\int C_1 E_I df = \int C_1 E_R df + \int C_2 E_T df. \quad (2)$$

いま、ここで、便宜上、海中から海面に到達した音波は、そのまま大気中へ通りぬけるものとする。これは、ここで E_R を考えないことにするのと同じである。すなわち、

$$\int C_1 E_I df = \int C_2 E_T df. \quad (3)$$

線型の問題を考えるかぎり、ある周波数 f について着目するとき、(3) は、さらに簡単に、着目した周波数 f に対して

$$C_1 E_I = C_2 E_T. \quad (4)$$

一方、音波の海中でのエネルギーが空気中におきかわったとすれば、どの程度であろうか。音波のエネルギーが音波の振幅 A の平方に比例するとして、

$$E_I = E_T; \rho_1 A_1^2 = \rho_2 A^2 \quad (5)$$

あるいは、(5) より

$$\frac{A_T}{A_I} = \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{1/2} = \left(\frac{1.03}{0.00129} \right)^{1/2} \approx 28.3. \quad (6)$$

すなわち、振幅は空中で海中の約28倍となる。

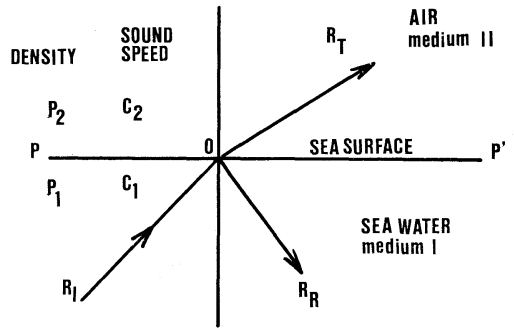


Fig. 3. Acoustic transmission and reflection at a plane sea surface. Assume that the media I and II respectively for sea water and air are separated by a line $P-P'$ as a sea surface. Density and sound speed are denoted as ρ and C , respectively. Suffices 1 and 2 are to notify the properties of the media I and II, respectively. Incident ray is notified as R_I , transmitted ray as R_T , and reflected ray as R_R .

このとき、海中音波のエネルギー・フラックスは、海面を通過して、そのまま空中音波のエネルギー・フラックスとなるとみてよいであろうか。ここで (5) をもとにして、

$$\frac{C_2 E_T}{C_1 E_I} = \frac{C_2}{C_1} \cdot \frac{\rho_1 A_1^2}{\rho_2 A^2} = \frac{330}{1500} \times \frac{1.03}{0.00129} \times \left(\frac{1}{28.3} \right)^2 = 0.22 \quad (7)$$

ということになる。ただし、

$$C_1 = 1500 \text{ m/s}, C_2 = 330 \text{ m/s}$$

とした。したがって、海面から空中へ伝えられる音波のエネルギー・フラックスは海中の音波のエネルギー・フラックスの約0.22倍である。これは、 E_R を考えないことにして (4) を正しいとする立場からは説明できない。上に得た (7) の結果からみて、海中音波のエネルギー・フラックスの約78%は海面で反射され E_R となると解釈するのが物理的に妥当のようである。

ここで、海底地表の震央を音源として、音のエネルギーが 10^{10} erg であったとすれば、その22%を与えたとして、音源から海面を通して大気中に伝えられる音波のエネルギーは単位時間あたり 22×10^8 erg である。一般に、海底地震の放出するエネルギーは 10^{20} - 10^{23} erg と考えられるので、これに比較すれば、音源の音波のエネルギーでさえも、地震の放出するエネルギーの 10^{-11} - 10^{-14} 倍の程度である。

以上に検討した以外に、現在のところ、海底地震時に

放出される地震エネルギー全体からみて、その何パーセントが音波のエネルギーにおきかわるかはっきりしていない。ちなみに、海中音などの船上計測や海洋トモグラフィの例では、毎秒単位面積を伝わる方向のエネルギーは 10^7 erg 程度である(中村, 1987)。この場合、音の強さを watt 単位で換算した。

なお、少し条件は異なるが、無限に広い媒質内を伝播する平面波における音圧と粒子速度との比、すなわち、音響インピーダンスを考える。この音響インピーダンスは密度 ρ と音速 C との積に等しい(たとえば、東京天文台編の理科年表)。平面で相接する2つの媒質の境界面に垂直に入射する波の反射波 R および透過率は次式で与えられる。すなわち、

$$R = (I_1 - I_2) / (I_1 + I_2), \quad T = 1 - R. \quad (8)$$

ここで、境界面を海面とし、 I_1 および I_2 は海水および空気に対する音響インピーダンスとする。ここで、便宜上次のような値をとる。

海水 (30‰, 20°C) について、

$$I_1 = 1.54 \times 10^{-5} \text{ dyne} \cdot \text{s} / \text{cm}^3,$$

$$\rho_1 = 1.021 \text{ g} / \text{cm}^3,$$

$$C_1 = 1513 \text{ m} / \text{s}.$$

空気 (0°C, 1 気圧) について、

$$I_2 = 42.86 \text{ dyne} \cdot \text{s} / \text{cm}^3,$$

$$\rho_2 = 1.2929 \text{ g} / \text{l},$$

$$C_2 = 331.45 \text{ m} / \text{s}.$$

ここで、 $I_1 \ll I_2$ ということになり、(8) は近似的に

$$R = 0.999985, \quad T = 0.000015.$$

したがって、海面付近の音波に関するかぎりほとんど完全反射に近く、光に対する鏡面のようなものと考えられる。この場合、海中の音波のエネルギー 10^{10} erg が海面を通過して、大気中に伝わった音波のエネルギーは 1.5×10^5 erg 程度である。

参考までに、次のことを書き加えておきたい (NAKAMURA 1988)。耳が痛くなる限界の音の強さ (120 phon) を音圧レベル 120 dB (デシベル) とよみかえることにする (cf. 東京天文台編の理科年表)。このとき、音圧レベルと音圧 P との関係は

$$120 \text{ (dB)} = 20 \log_{10} (P/P_0)$$

であり、ここに、

$$P_0 = 0.0002 \mu\text{b} \text{ (マイクロバル)}.$$

ただし、 $1 \mu\text{b} = 1 \text{ dyne} / \text{cm}^2$ である。したがって、音圧 P の値は、

$$P = 0.0002 \times 10^6 \text{ (dyne} / \text{cm}^2).$$

ここで、エネルギーの量は仕事をもってはかることから、上の P の力が作用して作用点が単位距離 1 cm 動いたときの仕事は $200 \text{ dyne} \cdot \text{cm} = 200 \text{ erg}$ である。このようにみえてみると、計算上、この 200 erg は、さき海底の音波から海面を通過して大気中に伝えられる単位時間あたりの音波のエネルギー $22 \times 10^8 \text{ erg}$ に比較して、はるかに小さい。このような音波は人の聴覚にどのような感じを与えるのであろうか。ただ、この場合、海中音波の透過や反射について、問題を線型として考えることができるという前提に立脚して検討したことに注意しておく必要がある。

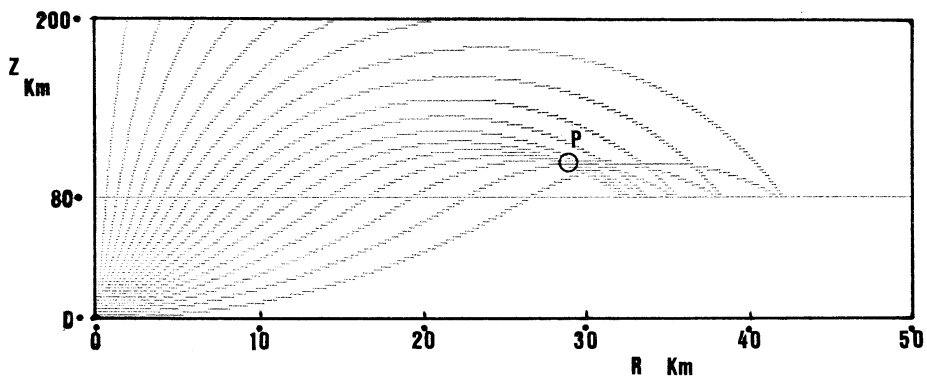


Fig. 4. Acoustic rays in the earth's atmosphere radiated out of a source on the sea surface which is assumed to be located just above a fault line including an epicenter of an earthquake. Sound speed is 330 m/s on the earth's surface ($z=0$ km). It is 270 m/s at the height of 80 km above the earth's surface. It is 562.6 m/s at the height of 200 km above the earth's surface. Circle (P) indicates the place where acoustic rays concentrated well to form an acoustic caustic in the atmosphere.

5. 大気中の異常音

ここで、海面から大気中へ出た音の伝わり方について考えなくてはならない。前節と関連づけ、海底の音源から海面を通して大気中へ伝わる音を検討すべきであるが、ここでは、海面の1点から大気中に音がどのように伝わるかという問題として、以下において検討する。さきにみた Fig. 2A からみて、震央の直上の海面に達した音が、その後、大気中でどのように伝わるかを考えるとしてもよい。

このような大気中の音波の伝わり方は、大気の物理的特性に左右される。そのひとつは、さきに Fig. 1 にみた大気中の温度の鉛直分布を考慮すべき問題である。また、別に、鉛直混合のよく発達している接地気層内を伝わる音波の問題である。

5.1. 上層大気中の異常音

まず、さきに Fig. 1 に示したように大気中の温度の鉛直分布をもとにして、大気中の音波の伝わり方を検討する。すでに2.2で述べたように地表上 200 km までの範囲について考える。震央の直上 $z=0$ km の海面を地表上とした場合の計算結果は Fig. 4 に示す。この計算にあたって、海面の波源において、角 0° (鉛直上方) から角 90° (水平方向) までの範囲で、 5° ごとに音線のパターンをもとめた。

この Fig. 4 をみると、海面上約 100 km、海面の波源から水平距離約 30 km の位置に音線の集中がみられ、ひとつの caustic の形成と認められる。この caustic は、空間的にみると Fig. 4 の中の小円中心付近に集中している。

この caustic 形成に寄与している音線は、Fig. 4 を見ればわかるように、音源から角 60° – 85° で放射されたものである。この caustic の状態は、ほとんど焦点 (focus) に対応するものとみなすことのできる程度の集中度を示しており、そこで音波の位相が一致すれば、そこでの音の強さは、海面の音源での音の強さに比較して $(85-60)/90=25/90 \div 0.28$ 倍程度ということになる。

実際には、音源から caustic までの間での音波のエネルギー逸散や吸収などによる音の強さの減衰がみられるものと考えられるので、上に得られた0.28倍という倍率より小さい値を考えるのが現実的にみて妥当であろう。

計算結果からみると、Fig. 4 で、海面の音源から caustic まで音波が伝わるに要する時間は約15分とみられる。この caustic では、よく知られているように、衝撃音が形成されることになる。この衝撃音は、約5分で地表に到達する。そして、地上にあって、人々は、これを

空中における何かの爆発音あるいは遠雷として感知することになるものと考えられる。

すでに、中村 (1986b) が海中音の減衰について述べたところを考えると、空中の衝撃音にもいろいろの周波数の成分があるとみられ、その音が周囲に伝わるとともに高周波成分の減衰は顕著となり、感知される音は主として低周波帯を主成分とするものとなるにちがいない。これは、遠距離の位置で衝撃音をとらえた場合、その音質を、大砲の音あるいは遠雷と表現される場合があっても不思議ではない。したがって、日本列島太平洋沿岸の歴史津波のなかには (中村, 1986a), 上述のようにしてとらえられた現象が、地震後で津波来襲前に沖合あるいは空中で大砲の音または雷のような音が聞こえたこととつじつまがあう。

5.2. 接地気層内を伝わる異常音

地表から約 10 m 程度までの大気層は、鉛直混合がよく行なわれ、均質で一様とみなすことができるとされており、気象力学的には“接地気層” (たとえば、小倉, 1980) として取扱われている。

この場合、地球の半径を 6,400 km とみなせば、沿岸の海面上 10 m の高さにいる観測者は、地球表面の曲率を考えにいったとしても、およそ 8×10^4 m ($=80$ km) 以下の水平距離の範囲では、震央直上海面からまっすぐ接地気層内を伝わってきた音をとらえることができる。音源での音が衝撃波的なものであれば、観測者はその音が大砲のような音あるいは遠雷として聞くこともあるであろう。

6. 結 言

本文では、単純化した音速鉛直分布を海中および大気中について考え、震央 (震央を含む断層) を音源とした場合、音源からの音は海面上では震央直上が最も強いことを示した。さらに、震央直上の海面から大気中へ伝わるまでに、海面を通過する音波について物理的検討を加えた。震央直上の海面から大気中へ伝わる例として、地表上約 100 km の上空に音源を形成する可能性を示し、また、震央から約 80 km 以内の観測者が地表上 10 m 以下の接地気層内にいる場合も震央直上の海面からの音を直接とらえることも指摘した。

文 献

- CLAY, C.S. and H. MEDWIN (1977): *Acoustic Oceanography*. Wiley-Intersci. Pub., N.Y. 544 pp.
 KATO, S. (1980): *Dynamics of the Upper Atmosphere*. Center for Academic Pub., Japan, Tokyo.

233 pp.

中村重久 (1986a): 巨大津波の前駆異常音について.
La mer, **24**, 48-52.

中村重久 (1986b): 能代沖の海洋音速場と1983年日本
海中部地震津波. La mer, **24**, 166-192.

中村重久 (1986c): 海中音の減衰について. La mer,
24, 198-201.

中村重久 (1987): 古典的海洋観測からみた海洋トモグ
ラフィについて. La mer, **25**, 8-89.

NAKAMURA, S. (1988): Possible subsurface source
of an acoustic tsunami precursor. J. Oceanogr.
Soc. Japan, **43**, 228-236.

中村重久 (1988): 1977スンバワ地震時の津波前駆音の
音源推定モデル. 東南アジア研究, **26**(3), 74-85.

小倉義光 (1980): 気象力学入門. 東大出版会. 278 pp.

Pusat Meteorologi dan Geofisica (1977): Laporan
gempa bumi Sumbawa tanggal 19 Agustus 1977.
Departemen Perhubungan, Jakarta. 19 pp.