1968 年十勝沖地震前後における V_p/V_s の時間的变化

東海大学海洋学部海洋資源学教室 飯 塚 進

(昭和 51 年 7 月 15 日受理)

Temporal Variations in V_p/V_s and Some Related Phenomena before
the 1968 Tokachi-oki Earthquake, off Northeast Japan

Susumu IIZUKA

Department of Marine Resources, Faculty of Marine Science and
Technology, Tokai University

(Received July 15, 1976)

Long-term premonitory change in V_p/V_s prior to the 1968 Tokachi-oki earthquake ($M=7.9$) was detected. However, only the latter half of the presumed precursory time interval may be identified because of the lack of the data before 1950. This V_p/V_s anomaly was disturbed by the 1952 earthquake swarm and the 1960 Sanriku-oki earthquake ($M=7.5$) which occurred in almost the same region of the aftershock area of the 1968 Tokachi-oki earthquake. The decreases found amounted to 6~18% of V_p/V_s during the period, assuming a normal value of V_p/V_s as 1.75. Utilizing the temporal variations of seismic activity and released seismic energy through the anomalous region as supplementation, the precursory time interval of the 1968 Tokachi-oki earthquake is estimated about 30 years.

In a region such as off Sanriku, Northeast Japan, where great submarine earthquakes have occurred frequently, the V_p/V_s ratio changes incessantly and successive cycle of V_p/V_s variations will start soon after the occurrence of an earthquake.

The anomalous region spreads out with time, consequently it brings considerable regional differences on V_p/V_s variations. "Volcanic Front" seems to act as a barrier to stop the expansion of anomalous region.

A new model will be necessary to explain the mechanism of V_p/V_s variations related with great submarine earthquakes in stead of the dilatancy diffusion model.

§1. ま え が き

地震の前兆現象として、地震波速度または速度比 V_p/V_s の時間的变化が検出された例が多数報告されている [飯塚 (1976b)]. しかし、これらの例は大部分、内陸に起つたマグニチュード 7 未満、深さ 20 km 以下の極浅い地震に限られている。海域に震源をもつ地震の場合としては、筆者の知る限り、1968 年日向灘地震 ($M=7.5$, $H=30$ km) [TERASHIMA (1974)], 1964 年新潟地震 ($M=7.5$, $H=40$ km) [東北大学微小地震研究グループ (1974)], 外国の例ではアリ

ューションのアムチトカ島の地震 ($M=3.8$, $H=20$ km) [KISSLINGER and ENGDAHL (1974)] のわずか 3 例しかない。

IIZUKA (1976) および飯塚 (1976a) は、海溝沿いにかかる $M=8$ クラスの巨大海底地震について、はじめて速度変化が検出されたことを報告した。

一方、精度の高い人工地震を用いて海域に起る地震の震源域における V_p の時間的変化を検出する試みも行なわれており [飯塚・他 (1975); MYACHKIN *et al.*, (1975) など], カムチャッカでは 1971 年に起つた $M=7.2$, $H=100$ km の地震に伴う V_p の変化を検出したといわれている [MYACHKIN (1975); MYACHKIN *et al.*, (1975)].

1968 年 5 月 16 日, 日本海溝と千島海溝の接合部付近を震源とする十勝沖地震 ($M=7.9$, $H=0$ km, JMA による) が発生し, 北海道, 東北地方に大きな被害をもたらした. この地震に伴う地震波速度変化について, OHTAKE (1973) は 2 点法により, 山田・他 (1973) は 2 点 2 地震法により, また, 勝又・神林 (1973) は和達ダイアグラムの方法を用いて, それぞれ V_p/V_s の時間的変化を調べた. いずれの場合も, この地震に伴う V_p/V_s の前兆的变化は検出されなかった. IIZUKA (1976) は, 気象庁の資料を用いて, 帯広—浦河, 青森—八戸, 秋田—宮古を組合せた 2 点法により, 多量のデータを統計的に処理して, 10 数%におよぶ V_p/V_s の時間的変化を検出することに成功した. 本論文では, 上記 3 つの組合せ以外に余震域周辺の観測点のいくつかの組合せを追加してさらにくわしく V_p/V_s の時間的変化を追求し, 地震波速度異常域の拡がり, エネルギー放出量やサイズシニティとの関係について調べた結果を報告する.

§ 2. 資料および方法

解析に用いた資料は, すべて気象庁発行の地震月報 (1951~1974年) による.

V_p/V_s の計算方法は, (i) 震源域に起る地震を用いる方法 (Method I), (ii) 震源域外で起りその地震波が問題の震源域を通過する地震を用いる方法 (Method II), の 2 通りである. いま問題にしている地震の場合, 余震域内に観測点がないので, 余震域周辺の適当な 2 観測点を組合せ, 次式により V_p/V_s を計算した.

$$V_p/V_s = \{t_s(A) - t_s(B)\} / \{t_p(A) - t_p(B)\} \quad (2.1)$$

ただし, t_p , t_s は観測点 A, B における P 波および S 波の到達時刻である. 観測点の組合せ方は, Method I では, 余震域からみてなるべく 2 点が放射状にならぶように, また, Method II では 2 点ができるだけ余震域をはさむようにとつた.

気象庁の発表によれば, 本震の深さは 0 km であるが地殻内の地震であり余震も大部分が深

さ 50~60 km 以内に起つているので, $H \leq 40$ km の地震の V_p/V_s のみを採用した. また統計的处理をおこなう際に, $1.00 < V_p/V_s \leq 2.00$ なる制限を設けて, この範囲外の不適当なデータが混入しないように心がけた. これは, 明らかに読みとり誤差に起因すると考えられるバラツキの大きな値を除去するためである.

Fig. 1 に, 1968 年十勝沖地震の余震域と観測点の位置を示す. この地震の余震域の南部は, 1952 年 10 月の三陸沖群発地震 (最大 $M=6.6$, $H=50 \sim 60$ km) および 1960 年 3 月 21 日の三陸沖地震 ($M=7.5$, $H=20$ km) の余震域とほとんど重なり合っている. Fig. 1 には, これらの地震の本震の位置と余震域も記されている.

1968 年 5 月 16 日の本震以後は多数の余震が発生しているので, Method I による V_p/V_s の計算には, 本震後その年内は $M \geq 5.5$, 1969-1974 年の間は $M \geq 5.0$ の地震のみを用いた.

§ 3. Method I による結果

地震波速度が異常を示す領域の linear dimension は, 通常その地震の震源領域あるいは破壊域 (平面的には余震域) の linear dimension の 2 倍から 10 倍にも達するといわれている [ANDERSON and WHITCOMB (1975); AGGARWAL *et al.*, (1975)].

そこで, いま問題にしている地震の速度異常域の linear dimension は, 余震域の linear dimension の 2~3 倍には達するものと仮定して, 次の 9 つの組合せを考えた:

釧路 (KUS)・帯広 (OBI)・札幌 (SAP)―浦河 (URA); 函館 (HAK)・青森 (AOM)・秋田 (AKI)―八戸 (HAC); 秋田 (AKI)・盛岡 (MRK)・石巻 (ISN)―宮古 (MIY).

これらの観測点は, Fig. 1 に示すようにいずれも linear dimension が余震域の 2~3 倍の範囲内の点である.

Fig. 1. Location of the 1968 Tokachi-oki earthquake (ref. 4 in Region C) and Seismograph stations (cross mark) used for the V_p/V_s analysis. Region A and B; area of the swarm earthquakes in October 1952 with the two largest events of magnitude 6.5 and 6.6 (refs. 1, 2), and aftershock area of the Sanriku-oki earthquake of March 21, 1960, with magnitude 7.5 (ref. 3), respectively.

Fig. 2. Original V_p/V_s plots as a function of time for three typical station combinations before the statistical analysis. Horizontal bars are the same as in Fig. 3(a).

Fig. 2 に、統計的処理をほどこす前の個々の値を全部プロットした例を示す。組合せは、OBI-URA, AOM-HAC, AKI-MIY の 3 通りの場合である。個々の点はバラツキがかなり大きいので、このままでは全体の傾向がよくつかめない。そこで以下に述べるような統計的処理をおこなった。その結果を Fig. 3(a), (b), (c) に示す。これらの図で、横棒は 10 個のデータを含む time window を 2 個ずつづらしながら移動平均したもので、その長さは各 window がカバーする期間を示している。(Fig. 2 の横棒の場合も同じである)。また縦棒の長さは、いくつかの代表的な平均値の 90% 信頼限界を示す。

Fig. 3(a) は、URA を中心とする北海道側の V_p/V_s の変化を示したものである。OBI-URA の組合せには、1968 年十勝沖地震に関連すると思われる変化が明瞭に現われている。他の 2 つの組合せでは、この点が不明である。 V_p/V_s の変化は、 $V_p/V_s=1.75$ を基準にとれば(図の波線)調べた期間中には最大約 15% の減少を示し、これが 1963 年頃正常値に回復して

Fig. 3(a). Temporal variations of V_p/V_s before and after the 1968 Tokachi-oki earthquake for three station combinations (reference station: URA). Horizontal bars show the means for a running time window of ten events stepped by two with its length indicating the time period covered by each window. Vertical bars indicate the 90% confidence limits of the means of some representative windows.

約5年後に本震が発生した。3つの組合せに共通している1952年前後の急激な変化は、北海道側の場合、1952年群発地震によるものではなく、主として1952年十勝沖地震 ($M=8.1$, $H=45$ km) に伴う変化と考えられる。後に述べるような1960年三陸沖地震による V_p/V_s 変化の乱れもみられず、この地震はほとんど北海道まで影響を与えていないことがわかる。KUS-URA と SAP-URA をくらべると、後者の方が相対的に安定しており、これは両地域の地震活動の差を反映しているものであろう。KUS-URA では、1970年以降最近の V_p/V_s の減少傾向の推移が注目される。

Fig. 3(b). Temporal variations of V_p/V_s before and after the 1968 Tokachi-oki earthquake for three station combinations (reference station: HAC). Horizontal and vertical bars are the same as in Fig. 3(a).

Fig. 3(b) は, HAC を中心とする 3 つの組合せの場合である. HAK-HAC と AOM-HAC の変化のパターンはよく似ており, 前述の OBI-URA の場合と同様, 本震に伴う長期にわたる V_p/V_s の変化がみられる. $V_p/V_s=1.75$ を基準にすれば, 最大約 15~17% の低下を示したことになる. 1963 年頃に正常にもどり, 約 5 年後に本震が発生したことがわかる. 特に AOM-HAC では, 1952 年群発, 1960 年三陸沖両地震に伴う V_p/V_s の乱れが顕著である. 長期にわたる変動が, これらの地震により一度中断されたことがわかる. AKI-HAC では, Fig. 3(c) の AKI-MIY ときわめてよく似た変化を示し, 1960 年頃までは比較的安定していた V_p/V_s の値が, それ以後急激に減少し, 1965 年頃には正常値に回復して 3~4 年後に本震

Fig. 3(c). Temporal variations of V_p/V_s before and after the 1968 Tokachi-oki earthquake for three station combinations (reference station: MIY). Horizontal and vertical bars are the same as in Fig. 3(a).

発生となった。この場合の V_p/V_s 低下率は約 12% である。

Fig. 3(c) は、MIY を中心とする V_p/V_s の変化を示したものである。AKI-MIY については前述の通りで、 V_p/V_s の平常値は約 1.80 で安定しており、この値を基準にとれば V_p/V_s の減少率は約 13% となる。MRK-MIY と ISN-MIY は、 V_p/V_s の減少率が他の場合にくらべて比較的小さく、特に後者の場合著しい。 $V_p/V_s=1.75$ を基準にして、前者で最大 11%、後者は 6% である。1952 年群発、1960 年三陸沖両地震の際一時的回復がみられる点は、他のいくつかの場合と同じである。MRK-MIY では 1965 年頃 V_p/V_s が正常値に回復したが、ISN-MIY では本震直前になるまで回復しなかった。

Fig. 4. Δt_s versus Δt_p plots for three typical periods of time in AOM—HAC combination, each interval including ten events. A: Anomalous low stage, Oct. 1, 1955~Aug. 22, 1957, mean and 90% confidence limits $V_p/V_s = 1.45 \pm 0.13$. B: Normal stage, May 17, 1963~Mar. 31, 1965, $V_p/V_s = 1.72 \pm 0.13$. C: Anomalous high stage, June 26, 1968~May 3, 1969, $V_p/V_s = 1.85 \pm 0.06$.

Fig. 5. Geographical distribution of epicenters used for V_p/V_s calculations in AOM—HAC combination. Large solid circle: 1951~1962, provided that aftershocks of the 1960 San-riku-oki earthquake are shown with small open circles. Large open circle: 1963~May 15, 1968. Small solid circle: May 16, 1968~1974.

Fig. 6. Geographical distribution of epicenters during two typical periods in AOM—HAC combination. Solid and open circles indicate epicenters in the anomalous stage (1953~57) and the normal stage (1963~67), respectively.

Fig. 4 は、AOM—HAC について典型的な 3 つの時期、すなわち、A: 1956 年前後の V_p/V_s が異常に低下した時期、B: 1964 年前後の正常な時期、C: 本震後の V_p/V_s が異常に高かった時期、を選び、P 波の到達時間差 Δt_p と S 波の到達時間差 Δt_s の関係を図示したものである。この図は、 V_p/V_s に異常があったこと、いいかえれば、 V_p/V_s が時間的に変化したことを明瞭に支持している。

Fig. 5 は、Fig. 2 にプロットした AOM—HAC の V_p/V_s の計算に用いた地震の分布図である。この図から、 V_p/V_s 異常期の地震と正常期の地震に地理的な偏りはないことがわかる。他の 8 つの組合せ全部についても同様の図をかいてみたが、いずれも V_p/V_s の異常が地域性に起因するものではないことが

確かめられた。Fig. 6 は、AOM—HAC について上記のことがらをさらにくわしく調べてみたものである。黒丸は典型的な V_p/V_s 異常期 (1953~57 年) に起つた地震、白丸は典型的な正常期 (1963~67 年) に起つた地震を示す。これら 2 つの期間の震央分布の間には、地理的分布の差はないことは明瞭である。

用いた地震の深さは、いずれも $H \leq 40$ km であるから、以上により V_p/V_s の異常が用いた地震の空間的な偏りによつて生じたものではないことは確かである。

以上の結果から、1968 年十勝沖地震の前兆現象の一つとして V_p/V_s の変化があつたことは確実と思われる。しかし、この異常がいつから始まつたものであるかは、1950 年以前のデータがないのでわからない。

§ 4. Method II による結果

Fig. 7 に V_p/V_s の計算に用いた地震の震央分布を示す。いずれも 1968 年十勝沖地震の余震域の南側で起つた $H \leq 40$ km の浅い地震である。観測点の組合せは、地震波の径路が震源域をできるだけ長く切る北海道側の URA, HOO (広尾), OBI の 3 点と、径路が震源域の影響をできるだけ受けない MIY, MRK, MIZ (水沢), OFU (大船渡) の 4 点の組合せを採用した (Fig. 7)。ただし、これらの観測点のうち、HOO と OFU はそれぞれ 1958 年および 1964 年に設置された観測点なのでそれ以降のデータしかない。また、MIZ は 1968 年に観測が打切られたのでそれ以降のデータはない。北海道に至る径路は、震央距離が最短でも 300 km 以上に達するので、1960 年以前には $M > 5.0$ の地震でなければ P, S 時刻が月報に記載されていない場合が多い。したがつて、Method I と同様の統計的处理にたえるだけのデータ数が得られる組合せは、結局、URA にたいする MIY, MRK, MIZ の 3 点の組合せのみであつた。

Fig. 8 にその結果を示す。表示の方法は

Fig. 7. Distribution of epicenters and seismographic stations used for the V_p/V_s analysis in method II. Large solid circles indicate epicenters which occurred in the anomalous stage (1951~1962) and open circles in the normal stage (1963~May 15, 1968). Small solid circles show events after the 1968 main shock (May 16, 1968~1974).

Fig. 8. Temporal variations of V_p/V_s before and after the 1968 Tokachi-oki earthquake analysed by method II. Horizontal and vertical bars are the same as in Fig. 3(a).

Fig. 3 の場合と全く同じである。1968 年十勝沖地震に伴う長期的変動が、いずれの組合せにも明瞭に現われている。 V_p/V_s の異常は 1962 年頃には平常値まで回復し、本震の直前にはむしろ $V_p/V_s=1.80$ をこえる異常に高い値に達していたように見える。1960 年三陸沖地震による乱れは、Method I の場合ほど明瞭ではない。いま $V_p/V_s=1.80$ を基準とすると、変化率は 10~18% に達する。

Fig. 7 において、大きな黒丸は V_p/V_s の異常期間の地震、白丸は異常回復後本震までの地震の震央分布を示している。両者の間に地理的分布の偏りはみられない。

§5. エネルギー放出量と V_p/V_s の時間的変化との関係

前節までの結果から、1968 年十勝沖地震前に V_p/V_s が異常変化を示したことがわかったが、

Method I, II いずれの場合も異常の開始は 1950 年以前にさかのぼり、それ以前のデータがないため開始時期を決定することはできなかった。

そこで、 V_p/V_s の異常が起り始める時期を推定する一つの試みとして、地震活動（地震発生数）とエネルギー放出量の時間的变化を調べてみた。Fig. 9 には、1968 年十勝沖地震の余震域と、linear dimension がその約 2 倍の領域（この論文ではこれを推定異常域とよぶことにする）がかいてある。この領域内に、1926~1974 年間に起つた $M \geq 5.5$ の地震がすべてプロットされている。この図で海溝付近の地震については、 $M \geq 6.0$ をとらないと分布にひずみを生じる可能性があるので

Fig. 9. Distribution of epicenters with magnitude 5.5 and larger for the years 1926~1974. The events occurred in the presumed anomalous region (focal depth ≤ 60 km)

注意が必要である。Fig. 9 から、 $M \geq 6.0$ の地震をえらび、その数 N の年変化を Fig. 10 の上段に示す。黒くぬりつぶしてあるのが余震域内の地震である。Fig. 10 の中段には、推定異常域から $M \geq 5.5$ の地震によつて放出されたエネルギーの年変化が、 $\log E$ で示してある。点線は $M=7.5$ の地震一個分のエネルギーに相当する。 V_p/V_s の時間的变化を上記 2 つの年変化と対比してみるため、下段には代表的な 3 例をならべてかいてある。この場合、Fig. 3 では一本の横棒で表現されていた 10 個の値の平均値を点で表わし、時間軸については、その中央値が占める位置にプロットしてある。 N と $\log E$ の経年変化で特徴的なことは、1933 年、1952 年および 1968 年の 3 つのピークが存在である。このうち 1952 年のピークは前後の 2 つとは性質が異なつていて、 N に関しては余震域内に比較的小さな地震が群発したために増加したものであり（1952 年三陸沖群発地震）、 $\log E$ については余震域外で $M=8.1$ の 1952 年十勝沖地震が発生したために形成されたものである。このような観点からみると、 N , $\log E$ とも 1933 年三陸沖地震直後の 1935 年頃から低下し始め、1950 年前後に極小状態に達したとみなすことが可能であろう。 V_p/V_s の変化が同様のパターンを示すかどうかは、今後なお検討すべき問題ではあるが、いまここでは同じパターンで変化すると仮定すれば、異常期間は 30 数年間続いたことになる。

RIKITAKE (1975) は、前兆現象の継続時間 T （単位は日）と地震のマグニチュード M と

Fig. 10. Time variations in the frequency of earthquakes (top), released seismic energy through the anomalous region (middle) and temporal variations in V_p/V_s for three typical combinations (bottom). Black parts in the top figure indicate the number of events which occurred within the 1968 aftershock area.

の関係について、諸種の前兆現象に関する多量のデータを整理して次式を得ている。

$$\log_{10} T = 0.76 M - 1.83 \quad (5.1)$$

この他にも T と M の関係式として次の諸式が発表されている [RIKITAKE (1975) 参照]。

$$\log_{10} T = 0.685 M - 1.57 \quad [\text{SCHOLZ } et al. (1973)], \quad (5.2)$$

$$\log_{10} T = 0.80 M - 1.92 \quad [\text{WHITCOMB } et al. (1973)], \quad (5.3)$$

$$\log_{10} T = 0.68 M - 1.31 \quad [\quad " \quad], \quad (5.3')$$

(5.2) および (5.3) 式は、(5.1) と同様種々の前兆現象についてまとめたものであるが、データ数において (5.1) 式にはるかにおよびない。また、(5.3') 式は V_p/V_s の前駆的变化のみから導かれた式である。この他にも、地殻変動の資料から導かれた式もある [坪川 (1969), (1973 a・b)]。データ数が多い場合には、前兆現象の要因別に関係式をつくつた方がよいと考えられるが、現段階でこれらの式のうちどれが最も妥当であるかをきめることはむづかしい。

しかし、いずれにしても $M=7.9$ の地震では、20~40 年の長期にわたって前兆現象が継続することだけは確実のように思われる。さきに推定した 30 数年という異常期間は、上記の値

と調和的であり、特に (5・3') 式から求まる $T=32$ 年とよい一致を示す。

§ 6. 考 察

1968 年十勝沖地震は、5 月 16 日 09^h49^m 本震発生後約 10 時間経過してから、本震の北西方で最大余震 ($M_1=7.5$, $H=40$ km) が発生し余震域が北方へ拡大した。その後 6 月 12 日には、2 番目に大きい余震 ($M_2=7.2$, $H=0$ km) が本震の南方で発生し、今度は南方へ余震域が拡大していった (M, H の値はいずれも JMA による)。以上の経過からもわかるように、この地震のエネルギーの大部分は余震域の中心から北部へかけて蓄積されていたと推定される。このことが、 V_p/V_s の変化に反映していると考えられる。その一つは、 V_p/V_s の減少率で OBI—URA, HAK—HAC, AOM—HAC など北部の観測点にくらべて、MRK—MIY, ISN—MIY など南部では減少率が小さいことである。もう一つは、北部と南部で V_p/V_s の正常値への回復時期に時間的なずれがあることである。このことは、 V_p/V_s の異常の回復が異常域全域にわたり一様に進行するのではなくて、時間的なずれをもっていることを示すものであり、さらに V_p/V_s 異常域の発達にも一つの示唆を与える。すなわち、大竹 (1976) が九州地方において指摘したように、異常域が時間的に拡大していったと考えることができる。異常域の拡大と関連してもう一つ興味ある事実は、AKI—HAC または AKI—MIY の V_p/V_s 変化と、AOM—HAC などその他の点の V_p/V_s 変化とのちがいである。前者では 1960 年まで正常状態が続き、その後急激に V_p/V_s が減少し短時間で回復している。いいかえれば、異常域が 1960 年以後急激に西方へ拡大したと考えなければならない。いわゆる “Volcanic Front” が異常域拡大の障壁の役割りをはたし、1960 年以前には AKI まで異常がおよんでいなかったと考えれば都合がよい。

“Volcanic Front” の内側は、第四紀の新らしい火山が存在し地質構造が複雑であるばかりでなく、他の地域にくらべると温度も高く、部分的にはマグマ溜りの存在も推定される。したがってこのような地域では、同じように stress が作用しても stain が蓄積しにくいであろう。すなわち stress の緩衝地帯をなしていると考えられる。異常域が “Volcanic Front” を越えてさらに奥深く拡大していくためには、ある一定限度以上の stress が Front の前面に蓄積される必要があり、そのため拡大に時間がかかるのであろう。そして一度障壁が突破されると、急激に異常域が拡大していくものと推定される。

1952 年群発地震、1960 年の地震などは HAC, MIY, AOM, MRK など比較的余震域に近い点には影響を与えたが、それ以遠には両地震に伴う V_p/V_s 異常域は拡大しなかつたと考えられる。推定異常域はせまく、北海道側にはほとんど影響を与えていないし “Volcanic Front”

を越えて拡大することもなかった。

そこで、次に推定異常域の linear dimension を考えてみる。すでに §3 でものべたように、これまでに知られているデータによれば、いわゆる dilatant region (V_p/V_s の異常域) の linear dimension は、断層あるいは破壊領域など震源領域の linear dimension の 2 倍から 10 倍にも達する [ANDERSON and WHITCOMB (1975); AGGARWAL *et al.* (1975) など]。地震のタイプによつても異なり、たとえばカリフォルニアの strike-slip 型の地震の場合は 2~3 倍と小さい。前述の考察から、1968 年十勝沖地震の推定異常域の linear dimension は、余震域のその約 2 倍ぐらいと推論される。このように考えれば、 V_p/V_s の異常が報告されている 1962 年宮城県北部地震 ($M=6.5$, $H=0$ km) [OHTAKE (1973)], 1970 年秋田県南東部地震 ($M=6.2$, $H=0$ km) [HASEGAWA *et al.* (1975)] などは、問題の地震の推定異常域内に起つた前震および余震の一つと考えてよい。OHTAKE (1973) は、1968 年十勝沖地震の V_p/V_s を調べた際に、上記 1962 年の地震の前年 (1961 年) に V_p/V_s が減少したことを指摘している。

次に V_p/V_s の異常域と余震域の形や位置関係を考えてみよう。観測点の密度が粗い上に、一方的に位置が偏よつているため定量的な議論は無理であるが、少なくとも余震域と異常域は相似形ではなく、また余震域が異常域の中心を占めているとは思われない。これは、本震が必ずしも余震域の中心を占めるとは限らないことと似ていて興味深い。一般に大地震の余震域は、一つまたは数個の複合ブロック構造をなしていると考えられている (たとえば [MOGI (1969)]; [南雲 (1973)] など)。そして余震域の境界、すなわちブロックの境界は、海底地形などからも地体構造的な境界と一致すると考えられている [MOGI (1969)]。

ところで、この余震域よりもはるかに大きい面積を持つ異常域は、どのようなメカニズムで

Fig. 11. Time variations of the earthquakes accompanied by damage in Sanriku-oki region. Upper: Cumulative sum of released energy, Lower: Magnitude versus time diagram.

形成され、またその境界は何によつて条件づけられているのであろうか。現在まだこの問題に回答を与えるだけの十分なデータがない。1968 年十勝沖地震の場合、余震域の東側境界はすでに海溝を越えていた可能性があり [NAGUMO *et al.* (1970 a·b); 南雲 (1972)], したがって異常域も海溝を横切つて拡大していたにちがいない。異常域の北西側境界は、一つには “Volcanic Front” だつた可能性が強く、ある場所ではすでに述べたように

これを趣いて異常域が拡大したと考えられる。これらの事実から、異常域の境界は構造的な不連続によつて明瞭に境されるといつたものではなく、ある場合には、はつきりした境界線をなしていないのではなからうか。

最後に、いま問題にしている地域における過去の地震活動を調べてみることにする。Fig. 11 は、1600 年以降この地域に被害をもたらした地震の時間的分布とそのエネルギー積算曲線を示す。この図から明らかなように、この地域ではほぼ 20~40 年の周期でエネルギーが放出され、被害をもたらすような大地震が発生していることがわかる。特に、最近の 100 年間では、1900 年前後の $M=7.4-7.8$ の大地震が頻発した時期（放出エネルギーはほぼ $M=8.3$ の地震一個分に相当）、1933 年三陸沖地震 ($M=8.3$) から 1937 年頃、および今回の 1968 年十勝沖地震と、3 つの時期によつて特徴づけられ、その間隔は 30 数年である [岡田・本谷 (1970)]。一方、§5. で述べたように、 $M 8$ 前後の大地震の前兆現象継続時間は 20~40 年あるいはそれ以上にもわたる。したがつて三陸沖、北海道南東沖など海溝沿いのサイスミシティの高い地域では、いわゆる V_p/V_s の正常期がほとんどない可能性が強い [IIZUKA (1976); 飯塚 (1976 a)]。すなわち、大地震発生直後から次のサイクルが始まり V_p/V_s は減少期にはいるものと推定される。

上述のような V_p/V_s に間断のない異常をひき起こすメカニズムは、浅い内陸性の地震の場合に成功をおさめた Dilatancy-diffusion Model では、とうてい説明できないものと思われる [早川・飯塚 (1974, 1976); HAYAKAWA and IIZUKA (1976); HAYAKAWA (1976)]。

§7. 結 論

1968 年十勝沖地震に先だつて V_p/V_s の長期にわたる異常が検出された。今回の解析では、この異常の回復期しかわからないので、余震域とその周辺のサイスミシティや放出エネルギーの時間的変動から、異常継続時間を約 30 数年間と推定した。この推定値は、過去におけるこの地域の被害地震の起り方からも支持される。そしてこの地域のように大地震が繰返し起るような場所では、 V_p/V_s の正常期はほとんど存在することがなく、大地震直後から次のサイクルが開始するものと推定される。

V_p/V_s の異常開始および回復時期には、地域的なずれがあり、異常域が時間的に拡大したと考えられる。また、推定異常域の大きさは、linear dimension で余震域の約 2 倍と推定され、その形は余震域と相似であるとは限らず、しかも余震域が異常域の中心にあるとは限らない。“Volcanic Front” は、異常域の拡大を阻止する障壁の役割りを果たしているものと思われる。上記のような諸現象をひき起こすメカニズムは、いわゆる Dilatancy-diffusion Model では説明

できないであろう。

謝 辞

原稿を読んで有益な助言とご批判をいただいた東海大学海洋学部早川正巳教授に深く感謝する。

文 献

- AGGARWAL, Y.P., L.R. SYKES, D.W. SIMPSON and P.G. RICHARDS, 1975, Spatial and Temporal Variations in t_s/t_p and in P Wave Residuals at Blue Mountain Lake, New York: Application to Earthquake Prediction, *J. Geophys. Res.*, **80**, 718-732.
- ANDERSON, D.L. and J.H. WHITCOMB, 1975, Time-dependent Seismology, *J. Geophys. Res.*, **80**, 1497-1503.
- HASEGAWA, A., T. HASEGAWA and S. HORI, 1975, Premonitory Variation in Seismic Velocity Related to the Southeastern Akita Earthquake of 1970, *J. Phys. Earth*, **23**, 189-203.
- 早川正巳・飯塚 進, 1974, ショルト理論に関する一考察, 地震学会講演予稿集, No. 1, 48.
- 早川正巳・飯塚 進, 1976, 地震波速度の時間的変化を起こす機構, 地震 **2**, **29**, 投稿中.
- HAYAKAWA, M. and S. IIZUKA, 1976, Precise Measurement of Changes in Seismic Wave Velocities, In: H. AOKI and S. IIZUKA (Editors), *Volcanoes and Tectonosphere*, Tokai Univ. Press, 157-172.
- HAYAKAWA, M. 1976, A New Mechanism to Explain the Changes in V_p/V_s with Particular Reference to Earthquakes around Japan, (in preparation).
- IIZUKA, S., 1976, Changes in V_p/V_s before the Tokachi-oki Earthquake of May 16, 1968 off NE Japan, *Nature*, **260**, 415-417.
- 飯塚 進, 1976a, 北海道東方沖海底大地震に伴う V_p/V_s の時間的変化, 地震 **2**, **29**, 265-275.
- 飯塚 進, 1976b, 前兆現象としての地震波速度変化について (Review), 東海大学海洋学部紀要, **10**, 投稿中.
- 飯塚 進・長谷川功・伊藤公介・市川金徳・鈴木宏芳・幾志新吉・浅野周三・松本英照・高橋正義, 1975, 爆破地震による地震波速度の時間的変化に関する研究, 第 2 部: 走時の解析結果, 地質調査所報告, No. 254, 37-74.
- 勝又 護・神林幸夫, 1973, 地震波速度の異常の検出について, 地震学会講演予稿集, No. 2, 4.
- KISSLINGER, C. and E. R. ENGBAHL, 1974, A Test of the Semenov Prediction Technique in the Central Aleutian Islands, *Tectonophysics*, **23**, 237-246.
- MOGI, K., 1969, Relationship between the Occurrence of Great Earthquakes and Tectonic Structures, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **47**, 429-451.
- MYACHKIN, V.I., 1975, Seismicheskoe Prosvechivanie Ochagovihu Zon i Protsesui Podgotofki Zemletryaseni, Abstract of Ph. D. Thesis.
- MYACHKIN, V.I., N. A. DOLBILKINA, G. S. KUSHNIR, V. T. LEVSHENKO, O. A. MAKSIMOV, A. M. PALONOV, V. B. PREOBRAJENSKY and R. P. SOLOVIEVA, 1975, Otzenka Tochinoschi i Neko-torie Rezulitaty Nablyudgenii po Prosvechivaniyu Ochagovif Zon na Kamchatke, *Sbornik: Physica Ochaga Zemletryasenia*, Nauka, Moscow, 164-176.
- 南雲昭三郎, 1972, 海底地震の研究, 海洋科学基礎講座第 9 卷, 海底物理, 東海大学出版会, 187-329.
- 南雲昭三郎, 1973, 日本近海における海底大地震の起り方, 関東大地震 50 周年論文集, 東大地震研究所, 273-291.
- NAGUMO, S., S. HASEGAWA, S. KORESAWA and H. KOBAYASHI, 1970a, Ocean-bottom Seismographic Observation at the offside of Japan Trench near the Erimo Seamount—Seismic Activity of the Oceanic Lithosphere and Velocity Structure around the Geophysical "Ocean-Continent Boundary", *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **48**, 769-792.
- NAGUMO, S., S. HASEGAWA, S. KORESAWA and H. KOBAYASHI, 1970b, Ocean-bottom Seismo-

- graphic Observation off Sanriku—Aftershock Activity of the 1968 Tokachi-Oki Earthquake and Its Relation to the Ocean-Continent Boundary Fault, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **48**, 793-809.
- 岡田 弘・本谷義信, 1970, 1968 年十勝沖地震の余震活動, 北大地球物理学研究報告, **24**, 141-165.
- OHTAKE, M., 1973, Change in the V_p/V_s Ratio Related with Occurrence of Some Shallow Earthquakes in Japan, *J. Phys. Earth*, **21**, 173-184.
- 大竹政和, 1976, 九州地方の地震波速度変化—とくに異常域の拡大について, 地震学会講演予稿集, No. 1, 90.
- RIKITAKE, T. 1975, Earthquake Precursors, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **65**, 1133-1162.
- SCHOLZ, C. H., L. R. SYKES and Y. P. AGGARWAL, 1973, Earthquake Prediction: A Physical Basis, *Science*, **181**, 803-810.
- TERASHIMA, T., 1974, Change of V_p/V_s before the Large Earthquake of April 1, 1968 in Hyuganada, Japan, *Bull. Intern. Inst. Seismol. Earthq. Eng.*, **12**, 17-29.
- 東北大学微小地震研究グループ, 1974, 1970 年秋田県南東部地震および 1964 年新潟地震前後の地震波速度の変化について, 地震予知連絡会会報, **11**, 56-59.
- 坪川家恒, 1969, 地殻変動の継続時間と地震の規模との関係について, 測地学会誌, **15**, 75-88.
- 坪川家恒, 1973a, 地殻変動の規模および継続時間と発生すべき地震の等級との関係・地震の予知について, 関東大地震 50 周年論文集, 東大地震研究所, 293-310.
- 坪川家恒, 1973b, ダイラタンシーによる地震前現象の継続期間と地殻変動継続期間との関係について, 測地学会誌, **19**, 116-119.
- WHITCOMB, J.H., J.D. GARMAN and D.L. ANDERSON, 1973, Earthquake Prediction: Variation of Seismic Velocities before the San Fernando Earthquake, *Science*, **180**, 632-635.
- 山田敏彦・伊藤純一・古屋逸夫, 1973, 十勝沖地震前後の V_p/V_s , 地震学会講演予稿集, No. 2, 1.