550.343 (727.2)

地震空白域にもとづく地震予知 -1978年メキシコ地震の予知を例として-

大 竹 政 和* 国立防災科学技術センター

Earthquake Prediction Based on the Seismic Gap with Special Reference to the 1978 Oaxaca, Mexico Earthquake

By

Masakazu Ohtake

National Research Center for Disaster Prevention, Japan

Abstract

Location and magnitude of the Oaxaca, southern Mexico earthquake of November 29, 1978 were successfully predicted based on intensive studies of the seismic gap phenomenon. The parameters of the Oaxaca earthquake are $\varphi = 16.072^{\circ}$ N, $\lambda = 96.487^{\circ}$ W for the epicenter location, and $M_s = 7.8$ for the magnitude according to the Preliminary Determination of Epicenters while our estimates were $\varphi = 16.5^{\circ} \pm 0.5^{\circ}$ M, $\lambda = 96.5^{\circ} \pm 0.5^{\circ}$ W, and $M_s = 7\frac{1}{2}\pm\frac{1}{4}$. The Oaxaca seismic gap, covering a 270km segment of the seismic belt along the Pacific coast, was initiated in June 1973, and lasted until five months prior to the main shock. The seismic vacancy in the Oaxaca gap was so abnormal that it could have occurred at a probability of only 7.4×10^{-5} by chance.

Although prediction of the time-of-occurrence was not made, we pointed out that occurrence of the large earthquake would be signaled in advance by a renewal of seismic activity in the seismic gap. Such a premonitory phenomenon was actually observed five months prior to the Oaxaca earthquake.

Research works on seismic gap phenomena so far reported were compiled and statistically analyzed. Main results of the analysis are as follows:

(1) Linear dimension of a seismic gap, L km ranges between length of longer axis of the rupture zone, and ten times the longer axis.

(2) Precursor time, T year of a seismic gap is statistically correlated to magnitude of the main shock, M by

 $\log T = 0.39M - 2.10$

(3) A high correlation between M and $L{\boldsymbol{\cdot}}T$ is found as $\log(L{\boldsymbol{\cdot}}T)\!=\!0.64M\!-\!1.63$

^{*} 第2研究部地震活動研究室

(4) A renewal of seismic activity prior to the main shock is recognized for 35% of the seismic gaps so far reported.

As a result of the detailed case study on the Oaxaca gap and the comprehensive review of the past studies, it was proved that the seismic gap is quite a promising premonitory phenomenon for long term prediction of an earthquake.

1. はじめに

地震活動パターンの時間的変化,とりわけ大地震前に中小地震活動が異常に静穏化する 現象が,地震予知にとくに有効な前兆現象として注目されている(例えば,茂木,1976; Hamada, 1979).大地震の発生前数年~数十年にわたって付近の中小地震の発生が著しく抑 制され、いわゆる「地震空白域」を形成することは、井上(1965)、宇津(1968)、Mogi (1968d) らによって発見され、その後数多くの観測例が報告されている.

地震空白域がもっとも典型的に現われるのは、海溝沿いに発生する巨大地震の場合であ る. Mogi (1969a) は、1930年以後日本周辺に起こった最大級の地震または地震のグループ (いずれも太平洋側の海溝沿い) 4 個すべてに、例外なく地震空白現象が先行したと指摘し ている。海溝部だけでなく、トランスフォーム断層地帯(例えば、Kelleher and Savino, 1975)、大陸内部(例えば、Borovik *et al.*, 1971;魏・他、1978) などテクトニクスを異に するいろいろな地域においても、地震空白現象の観測事例が多数知られている。さらに、地 震観測網の充実に伴って、中・小規模の地震に対しても同様の現象が見出されるようになっ てきた。現在までに前兆的な地震空白現象が報告されている最小の地震は、マグニチュード 3.7 (尾池、1977) である。

地震空白域の圧倒的多数は、すでに起こってしまった地震に関して過去のデータを調べ直 した結果明らかにされたものである.しかし、あらかじめ地震空白域の存在が確認され、そ の中に予期されていた地震が実際に発生した事例がすでにいくつかある.1973年の根室半島 沖地震(*M*=7.7)は、その意味で、わが国で初めて長期的な予知に成功した大地震である. この地震の発生予測にあたっては、北海道南東部の異常地殻変動、巨大地震のギャップとな らんで、地震空白域の存在(宇津、1970、1972)が決定的に重要な判断材料となった、1978 年のメキシュ南部 Oaxaca 地震(*M*=7.8)においては、専ら地震空白域に関する観測事実 とその注意深い分析 (Ohtake *et al.*, 1977a)にもとづいて、ほぼ完璧な長期予知に成功を収 めた.

今日までの研究の諸成果から見る限り,地震空白現象は,種々の地震前兆現象の中でもも っとも普遍的かつ確実なものではないかと思われる.現在の地震観測は,世界的な規模で, 他のいかなる地球物理的観測と比べても遜色のない状態にあり,観測にもとづく地震空白域 の研究は,今後ますます発展する可能性を秘めている.しかし,今日までのところ,多数の 論文が発表されているとは言え,基本的には,まだ散発的研究の域を出ていない.大地震多

地震空白域にもとづく地震予知一大竹

発地域の中でも、フィリピン、インドネシア、南太平洋などの研究にはまったく手がつけら れていない.また空白域の同定は一般にかなり主観的で、有意性の高いものから低いものま でいろいろのレベルのものが混在している.地震空白域の有無を系統的に捜索するために は、Ohtake *et al.* (1977b) や田中・他(1979)が試みたような機械的なサイスミシティ表 示方法が有効であろう.一方,地震空白現象をもたらす物理的メカニズムに関しては、ほと んど何もわかっていないのが現状である.岩盤のディラタンシー硬化に帰する考え(例え ば、Kelleher and Savino, 1975)、応力分布の平準化による説明(茂木, 1976)などが提出 されているが、いずれもまだ試論の段階である。今後の研究の発展のためには、観測事実に もとづいて、地震空白現象の諸性質をできる限り整理・分析しておくことがまず必要と思わ れる.

本論文のおもな目的は、これまでの研究の成果を総括して地震空白域の諸性質を整理し、 今後の研究と実際の地震予知への応用の指針を得ることにある。そのために、第一に、世界 の主要地域における地震空白域研究の成果を概観し、あわせて地域ごとの特徴点を摘出する ことを試みる。第二に、過去の研究成果が凝集される結果となった1978年 Oaxaca 地震(*M* =7.8)の予知に関して詳細なケーススタディを行なう。第三に、これまでに報告されてい る事例を収集・整理して、地震空白域の大きさ、先行時間などの諸元の特性を分析する。地 震予知研究において、地震空白域の一般的諸性質のみならず、同時に、その地域的な特徴を 把握することがいかに重要であるか、以下の各章を通じて自ずと明らかにされるであろう。 この「地域的な特徴」を支配する要因を究明することは、地震空白現象を含む地震活動パタ ーン変化の物理的メカニズムを解明する上でも、特別の重要性を担っているはずである。

2. 地震究白域に関するこれまでの研究

2.1 地震空白域の概念

わが国の近代地震学を開拓した大森房吉(1868~1923年)は、1915年イタリア中部の Avezzano 付近を襲った地震を予報し、その名を高からしめたという. 松沢(1964)によれ ば、予報の根拠は次のようなものであった.「大地震は、地震帯と言う細長い帯状の区域の 中に起こる.一度大地震の起った所には再び大地震の起こることはなく、まだ起こったこと のない所へ次の大地震が起こる. このようにして、イタリヤの地震帯を調べた所、たまたま Avezzano のあたりが空白になっていたのであった.」大森のこの思想は、「一度大地震が起 こった所には再び大地震の起こることはない」という一点を別にすれば、われわれが現在言 うところの「(巨)大地震のギャップ」の考えそのものである.

Fedotov (1965) と Mogi (1968c) は、環太平洋地震帯北西部における巨大地震の発生系 列について、著しい規則性を見出した。すなわち、地震帯は数十年の間に相次ぐ巨大地震の 破壊域によって順次過不足なく埋め尽くされる。巨大地震の発生が一巡すると、静穏期がお

- 67 -



Fig. 1 Aftershock zone of the recent great earthquakes near Hokkaido (after Utsu, 1972). Zone C is the gap for a great earthquake.

とずれ,その後地震帯の次の活動 サイクルが始まる.従って,最近 の活動サイクルにおいてまだ巨大 地震の発生をみていない「巨大地 震のギャップ」は,近年中に巨大 地震に見舞われる最有力候補地と いうことになる.

巨大地震(great earthquake)の 定義は研究者によって異なるが, ここでは, Sykes (1971) に従っ て,およそマグニチュード734程 度以上の地震を指すものとしてお く.ただ「巨大地震」には,単に 規模が大きいことだけでなく,プ

レート境界の相対運動を代表する基本的な地震という意味が含まれていることが多い. な お,本論文で引用するマグ=チュードは表3に記載する値によっており,引用した原論文で 用いている値とは必ずしも一致しない. 詳しくは表3の注記を参照されたい. 図1に巨大地 震のギャップの一例を示す. このギャップの中には,1973年6月17日根室半島沖地震(M= 7.7)が発生した.

環太平洋地震帯北西部などでは、地震帯の活動期の平均くり返し間隔は数十〜数百年程度 のものである.しかし、内陸部のプレート内大地震の場合には、間隔が1000年を超えること もめずらしくない(例えば、松田、1976).これは地形学や地質学の方法によって最近得ら れた知見であって、歴史的な地震資料しか活用できなかった時代に、同じ場所にくり返し大 地震は起こらない、と考えられていたとしても何の不思議もない.むしろ、地震帯の中にあ りながら大地震の抜けている場所に注意を喚起した大森の先見性は、改めて高く評価される べきであろう.

Mogi (1968d), 宇津 (1968) は, いくつかの 巨大地震のギャップの中で,数十年にわた って中小地震の発生頻度が著しく低下し,「地震空白域」が形成されることを発見した.類 似の現象は,井上 (1965) によって十勝沖地震 (1952年,M=8.1),新潟地震 (1964年,M=7.4) などについて見出されており,また,Allen *et al.* (1965), Brune and Allen (1967) によっても指摘されている.彼らは,1857年に大地震をひき起こしたカリフォルニアのサン ・アンドレアス断層南部 Fort Tejon 付近で微小地震活動が著しく低いことを見出したが, これは断層活動が一時的に "lock" (Brune and Allen, 1967) されているためで,将来大地 震が再来するだろうと考えた. Mogi (1968d) 以後,地震空白域の研究は,環太平洋地震帯

- 68 -

の他の地域やプレート内の地震多発地帯へ、また、より規模の小さい地震へと急速に発展を とげてきた.これらの成果の上に立って、1978年のメキショ南部地震の震央と規模を的確に 予知する (Ohtake *et al.*, 1977a) までに至ったわけである.

(巨)大地震のギャップとより小さい地震の活動低下域とがいずれも"seismic gap"又 は、"seismicity gap"と呼ばれることが多いので、両者の混同を避けるために、茂木(1976) は、前者を「第1種地震空白域」、後者を「第2種地震空白域」と名付けている。本論文で 研究対象とするのは、主に後者の第2種地震空白域であるが、とくに誤解のおそれがない限 り、以後簡単に「地震空白域」と呼ぶことにする。地震空白域は、平常時にはかなりの地震 が起こっているにもかかわらず、ある特定の時期だけ地震活動が著しく低下した区域を指す のであって、いつでも地震活動が不活発な地域——先天的無地震区域(浅田、1972;高木、 1978) ——とは区別される。

2.2 日本およびその付近

周囲の地震活動に比較して地震がほとんど発生しない静穏な地域が相当長い期間存続し, その中にやがて大地震が発生する事例は,井上(1965)によって初めて明確に示された.地 震空白域の中に発生した大地震として指摘されたのは,十勝沖地震(1952年,*M*=8.1),福 島県沖地震(1938年,*M*=7.7 ほか),新潟地震(1964年,*M*=7.4)の三つである.これら の地震が発生する8~16年前から,震央を含む半径約50kmの地震空白域が始まった,と報 告されている.もっとも典型的なのは十勝沖地震の場合で,1934~1947年の14年間には,空 白域の中に*M*4以上の地震がまったく起こっていない.空白現象が始まってから地震が発生 するまでの時間(以下地震空白現象の「先行時間」と呼ぶ)は、宇津(1968),Mogi(1969a) によればそれぞれ、20年以上、9年とされており、地域のとり方や調査に用いた地震の下限 などで2倍程度のひらきが生ずることがわかる.井上(1965)はさらに、上記三つの大地震 について、地震発生直前の数年間は空白域の中で中小地震の活動がいくぶん盛んになるとい う興味深い事実を見出している.

日本付近の巨大地震と地震空白域との関係は, Mogi (1968d, 1969a) によって精力的に研 究され, 1930 年以後の 最大級の 地震である 十勝沖地震 (1952 年, *M*=8.1; 1968 年, *M*= 8.2),東南海地震 (1944年, *M*=8.1),南海道地震 (1946年, *M*=8.1),三陸沖地震 (1933 年,*M*=8.4) はすべて地震空白現象を伴ったことが明らかになった. Mogi (1969a) は,ま た,空白域の周縁部では逆に地震活動が高まることに注目し,これを地震活動のドーナッ現 象と呼んでいる. 巨大地震の場合には,その余震域がかつての空白域をほぼ完全に埋め尽く すのが通例とされている.余震域,とくに主震直後の余震域は主震の破断領域を示すものと 考えられる (Mogi, 1968b) から,このことは地震空白域イコール近い将来の破断域であるこ とを意味していることになる.

1973年根室半島沖地震(M=7.7)は、地殻変動や地震空白域の知識から長期的な予知にか

- 69 -



図 2 1973年根室半島沖地震に 先行した 地震空白域. (字津, 1972による)

Fig. 2 Seismic gap preceding the 1973 Nemuro-Hanto-oki earthquake (after Utsu, 1972).



図3 北海道周辺における巨大地震の発生時系列.(茂木, 1976による) Fig. 3 Sequential occurrence of great earthquakes near Hokkaido (after Mogi, 1976).

なりの成功を収めた地 震である. 宇津(1968, 1970, 1972) 12, 1894 年に根室半島沖地震 (M=7.9) が発生した あたりは巨大地震のギ ャップになっており, かつ気象庁により震源 が決められる程度の地 震はほとんど起こって いない(図2), として 警戒を呼びかけた、実 際に起こった大地震は 宇津(1972)が,予想 したM=8~8¼より 規模が小さく,また余 震域が完全に空白域を 埋め尽くしてはいない ように見えたので,再 び大地震が起こるので はないかと 心 配 さ れ た. しかし, 精度のよ い震源再決定の結果,

余震域と空白域とのほぼ完全な一致が確認された(関谷・他,1974). 地震の規模が小さか った点に関して Abe (1977) は、今回解放され尽くさなかった歪は次回の大地震までもち越 されるだろうと予測している. 北海道付近の巨大地震は、図3に示すように、きわめて系統 的な時系列に従って発生している. これが事前にわかっていれば、根室半島沖地震の発生時 期予測に大きく貢献したことであろう.

巨大地震のギャップ,地震空白域,震源の移動(例えば Mogi, 1968a) など,地震活動の 時間的・空間的パターンの変化にもとづいて,将来の海溝部巨大地震の危険度評価が行なわ れている(Mogi, 1968a; 宇津, 1972; 南雲, 1973; Utsu, 1977).現在大地震の発生がとく に心配されている東海地域(関谷・徳永, 1974, 1975; 市川, 1976; Utsu, 1977), 房総半 鳥南東沖(関谷・湧井, 1971; 気象庁, 1975; 市川, 1976) ともに,地震活動空白域の存在 が指摘されているところである.



図 4 1974年伊豆半島沖地震に先行した地震空白域. (a)は空白域出現以前 6 年間の震央分布, (b)は空白期間の震央分布(破線で囲んだ楕円部分が 空白域)を示す. 斜線部分は主震の震源域. (Ohtake, 1976 による)

Fig. 4 Seismic gap preceding the 1974 Izu-Hanto-oki earthquake (after Ohtake, 1976). Compare the epicentral distribution in the ellipse region for the 6 years prior to development of the seismic gap (a), and 7.3 years of the seismic gap period (b). Shaded zone is focal area of the main shock.

海溝部の巨大地震のみならずより規模の小さい地震についても、地震空白現象の存在が報告されている。Ohtake (1976) は、1974年伊豆半島沖地震(M=6.5)の7.5~9.5年前から地震空白域が形成されていたことを指摘した(図4).この地震は、規模が小さいだけでなく、断層運動が水平ずれである点でも海溝部の逆断層型巨大地震とは性質を異にしている。空白域と主震の余震域とが一致するというこれまでの常識に反して、空白域(長径90km)が余震域(長径30km)よりはるかに大きいことは注目すべきことである。その後、三浪・久保寺(1977)、尾池(1977)、Mizoue et al.(1978)によって、M=3.7~5.8の地震に前駆する地震空白現象が報告されている。とくに最後の2例は微小地震観測データに基づいて事前に空白域の存在を認め、それぞれM=3.7、M=4.7の地震の実験的予測に成功したものである。Arakawa and Suyehiro(1970)によれば、松代群発地震(1965年~、最大M=5.4)以前8年間にわたって、初期群発域内の微小地震活動度が低かった。またOhtake (1970)は、松代群発地震のひとつであるM=4.3の地震の前2~3ヵ月は付近の地震活動が低下し、直前の微小前震の発生を経て主震に至ったことを明らかにした。

わが国とその周辺海域は、いろいろな規模、タイプの地震について、地震空白域の研究が もっとも多面的に行なわれている地域である.

2.3 千島・カムチャッカ

Fedotov (1965) は、東北日本からこの地域にかけてくり返し発生する巨大地震の時空間 系列に著しい規則性を見出し、巨大地震のギャップは数十年以内に巨大地震によって埋めら れることを明らかにした.さらに、1958年のエトロフ島南方沖地震 (*M*=8.3) 前後の地震活

- 71 -



- 図5 千島・カムチャッカ地域の巨大地震,楕円は近年の巨大地震 の震源域,二重斜線部は巨大地震発生の可能性がもっとも高い場所を示す.(Fedotov, 1965 による)
- Fig. 5 Focal areas of recent great earthquakes (ellipse), and the zones of high seismic risk (double shade) in the Kurile-Kamchatka region (after Fedotov, 1965).

動の調査から,巨大地震前の付近の地震活動が特徴ある変化を 示すことが明らかにされた(Fedotov, 1969). すなわち,エト ロフ島南方沖地震の震源域(長径約 160km)内では,約35年前 から中小地震の発生頻度が低下して地震空白域が出現し,約5 年前からは再び活発な地震活動が見られるようになった. とく に10ヵ月前からは,直接の前震とみられるものが頻発し始めて 巨大地震の発生に至っている.この地域では,1958年以来高感 度の地震観測が行なわれており,震源域とその周辺ではM3以 上の地震の震源決定が可能になっていた.

1952年のカムチャッカ南方沖地震 (M=9.0) においても同様 の地震活動変化が認められた. Kelleher and Savino (1975) に よれば、同地震の35年前から長径 400~500km の地震空白域が

現われ,約3年前から地震活動の復活が始まった。彼らは,復活した地震活動が将来の巨大 地震の震央付近に集中していることを強調している。

ッ連の Fedotov らのグループは、地震活動変化の研究成果をふまえて、千鳥・カムチャッ カ地域の長期的地震予知を試みている。図5の二重斜線部が、Fedotov (1965)によって将来 $M \ge 7 34$ の巨大地震発生の可能性がもっとも高い所と指摘された部分である。エトロフ島南 方沖、千島北部のシンシル島ーパラムシル島間の海溝側、カムチャッカ半島南東沖の3カ 所にそのような巨大地震危険区域が見られる。これらのうち、エトロフ島南方沖は、宇津 (1968)によって、また千島北部は Kelleher (1970)、Kelleher *et al.* (1973) によって、 とくに注意すべき巨大地震のギャップとして指摘された。現在までに実際に地震が発生した のは、1969年のエトロフ島南方沖地震 (M=8.2)のみである。Fedotov *et al.* (1972) によ れば、この地震は、1965~1970年の間に、巨大地震の発生が"most probable" と考えられ ていた3地区のうちのひとつに起こった。彼らは最新の地震活動データを加えて長期予知の 改訂を行ない、1971~1975年の新らたな長期予知を作成したという。

2.4 アリューシャン・アラスカ・カナダ

アリューシャン列島からアラスカに至る地域は、1957年のアリューシャン地震(M=9.1)、1964年のアラスカ地震(M=9.2)など世界でも最大級の地震が発生する場所として知られている。両地震は、破断域の長さがそれぞれ1200km、800kmにも及ぶ、真にプレート境界の

巨大地震と称すべきものである.

アリューシャン列島に関しては、巨大地震のギャップや震源の移動についての研究が Mogi (1968a, c, 1974), Kelleher (1970), Kelleher *et al.* (1973) など多数あるのに比べ て、地震空白域独自の調査はむしろ少ない.しかし、Engdahl and Kisslinger (1977) の最 近の研究によれば、アリューシャン中部のM=5.0という小さな地震の4½月前からさしわ たし 50km の範囲内で地震活動の低下が認められた.この空白域の中では、主震の5週間前 から前震が発生し始めたと報告されている.Tobin and Sykes (1966), Kelleher and Savino (1975) は、1964年アラスカ地震前の 10 年間、将来の破断域の大部分が低サイスミシティ域 になっていたことを示した.これと対照的に、破断域の南西端付近には多数の中小地震が発 生し、あたかも来るべきアラスカ地震による破断の終端を予告しているかのようであった. この場所がアラスカ半島を横切る構造帯 (Burk, 1965)の延長部に当っていることは興味深 い.

Kelleher and Savino (1975) は、アラスカから Queen Charlotte 島に至るトランスフォ ーム断層地域に発生した三つの地震 ($M=7.6\sim8.2$) について、いずれも10年又はそれ以上 の地震空白期間が先行したことを明らかにした. これらのうち Sitka 地震 (1972年、M=7.6) の場合には、数十年にわたって地震空白現象が継続したが、主震直前18ヵ月間のサイ スミシティを精査した結果、 $M\geq3.5$ の地震に関する限り空白域内での地震活動の復活は全 く見られなかったと報告されている.

近年の地震活動のパターンに基づいて、アリューシャン・アラスカ・カナダ地域で将来巨 大ないし大地震の危険がある場所が、少なくとも4カ所指摘されている(Tobin and Sykes, 1968; Kelleher, 1970; Sykes, 1971; Kelleher *et al.*, 1973). そのうち3カ所が図6に "gap" と示されている部分で、いずれも、周囲と比べて地震活動の低い場所になっている. 1972年 のSitka地震は、まさにこのギャップのひとつに起こったものであった。西端のCommander 諸島付近のギャップには歴史上巨大地震が知られていないので、ここはプレート境界がクリ

ープしている場所かもしれない(Kelleher, 1970)とい ***
 う考えもある.図6に示したほかに,Kelleher(1970) ***
 は、アラスカ地震の西隣りが現在空白域になってお ***
 り、震源移動の規則性から見ても1974~80年の間に巨大地震に襲われる可能性が高いと主張している.Sykes



図 6 アリュニシャン・アラスカ・カテタ地域の巨人地震のキャップ、斜線部は近年の巨大地震の環源域を示す. (Kelleher *et al.*, 1973 による)

Fig. 6 Gap for great earthquakes in the Aleutian-Alaska-Canada region (after Kelleher *et al.*, 1973). Shaded zones are focal areas of recent great earthquakes.

(1971) は、この主張を一部認めながらも、1938年の地震(M=8.2)ですでに破断した場所 なので、次の活動はまだずっと先になるだろうとしている.

2.5 カリフォルニア

南部カリフォルニアは、世界でももっとも早い時期から地震観測網が整備されてきた地域 である. Allen *et al.* (1965) は、1934~63年の地震データに基づいて震央分布と地質構造と の相互関係を研究し、活断層地帯では一般に地震活動が高いことを確認した. 同時に、活断 層地帯であるにもかかわらず、この期間周囲と比べて地震活動の低い地域があることを指摘 し、次のように述べている:

"We suspect that seismic quiescence in large areas may be temporary and that they represent likely candidates for future large earthquakes."

Brune and Allen (1967) による極微小地震移動観測からも同様の結果が得られた.彼らは, 1857年の大地震で破断したサンアンドレアス断層の Cholame—Valyermo 間 300km の区間 で,微小地震もほとんど観測されなかったことに注目している.

地震空白現象のより定量的な研究は、Ohtake *et al.* (1978) によって行なわれた.彼らは National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)の震源データファイルに基づ き、最近カリフォルニアに起こった四つの主要な地震($M=5.2\sim6.5$) について、それに先 立つ地震活動の変化を調べた.いずれの場合も、地震の数十〜数百日前から空白域が形成さ れ、これが一定期間継続した後、空白域内での地震活動の復活を経て主震の発生に至る、と いう特異なパターンを示すことが明らかにされた、図7はその一例である.用いた震源デー タはおよそ $M \ge 4$ の地震をもれなく含んでいる.このうち San Fernando 地震(1971, M=



 図7 1968年 Borrego Mountain 地震に先行した地震空白現象 (左)と、地震活動復活(右)を示す震央分布. ①は主震の 震央. (Ohtake *et al.*, 1978 による)

Fig. 7 Seismic gap preceding the 1968 Borrego Mountain, California earthquake (after Ohtake *et al.*, 1978). Location of the main shock is given by a circle with cross. Note the remarkable seismic quiescence near the main shock (left), and the following renewal of seismic activity (right), both for about one year. 6.5) については, Ishida and Kanamori (1977) が より詳細な調査を行な い, $M \ge 2.5$ の地震を完 全に含むデータによって も, 地震空白域と地震活 動の復活の現象が明瞭に 示された. ただし空白域 のさしわたしは Ohtake et al. (1978) の数分の1 にすぎず, データの質に よって空白域の認定に差 異が生ずることがうかが える. Ishida and Kanamori (1978) は、震源の再計算を行なって、San Fernando 地震の2年前から主震の極近傍 で微小地震の活動が復活したこと、この活動は発震機構や地震波形の特徴から見て他と区別 される前震的な活動であること、を明らかにした。

Wesson and Ellsworth (1973) は, Kern County 地震(1952年, M=7.7)をはじめカリフォルニアの9個の大中地震について、われわれとは異なった結論を得ている. すなわち、

"Prior to each of the earthquakes included in this study, the region containing the epicenter could not be considered quiescent over a period of years. Prior to most of the earthquakes, the area immediately surrounding the epicenter had a high level of activity relative to other segments of the same fault zone or other nearby fault zones."

地震活動の活発化は、主震の20年(1952年 Kern County 地震, M=7.7) ~7.5月(1966年 Parkfield 地震, M=5.6)前から始まったという. しかし、この結論には疑問がある. 小地 震の活動が高まってから主震発生まで高サイスミシティの状態が持続するのかどうか、論文 では、この間の地震活動の時間的推移が明らかにされていない. 震央分布図からは、むしろ 将来の震源域の大部分は地震空白域になっていたのではないかと推測される. いくつかの地 震については、彼らの言う小地震活動の活発化は地震活動のドーナッ現象(Mogi, 1969a) に対応した空白域周縁部での活動のようである. 実際、彼らが調べた 9 個の大中地震うち、 Kern County 地震, Parkfield 地震, Borrego Mountain 地震(1968年, M=6.4), San Fernando 地震の 4 個は、Kelleher and Savino (1975), Evison (1977), Ishida and Kana⁻ mori (1977), Ohtake *et al.* (1978) らによって地震空白域の存在が指摘されている地震で ある. 残りの 5 個はいずれもM 5 級の小さい地震で、一般には詳細な議論は困難である.

Kelleher and Savino (1975) によれば、1906年の San Fransisco 地震 (M=7.9)の前 も、震源域内で数十年にわたって大中規模の地震活動が比較的に静穏であった。

2.6 メキシコ・中米

Ohtake *et al.* (1977b) は、1964~74年の間にメキショ・中米地域に発生した浅発地震 (H < 60km)に関して、地震空白域の系統的な研究を行なった。調べた地震は、 $M_s \ge 7.0$ の ものすべて(5個)と、ニカラグア・コスタリカ地域で $M_s \ge 6.0$ のものすべて(6個)の計 11個である。いずれの場合も、主震の300~810日前から地震空白現象が認められた。また、 ただひとつの例外を除いて、空白域内での地震活動の復活が見られた。従って、少なくとも この地域の $M_s \ge 6$ の浅発地震に関する限り、主震付近の地震活動は、①地震空白域の形成 (α stage)、②活動の復活(β stage)、という二つの段階を経て主震発生に至るのが基本的な パターンであると言ってよい。

空白域の大きさはさしわたし 200~400km にも及び, 主震の震源域より有意に大きい, し かし, α stage が短かくて小地震の頻度が十分にない場合には, 空白域の外周を正確に指定



図8 1960年チリ地震前の震央分布. 白丸は1918~1949年,黒丸は1950年以後. 斜線部は主震の震源域,三角印は主震の震火を示す. (Kelleher and Savino, 1975 による)

Fig. 8 Seismicity preceding the 1960 Chile earthquake(after Kelleher and Savino, 1975). Open and solid circles are earthquakes for the period of 1918-1949, and from 1950 to the occurrence of the main shock, respectively. Epicenter and focal area of the main shock are shown by a triangle and a shaded zone. するのは困難である.そのため、M6級の地震の中に は、見かけ上空白域が大きく現われているものもあるか もしれない.この地域で震源データが完全なのは、ほぼ $m_b>4.5$ の範囲と推定される.

メキショ南部の Oaxaca 地震 (1978年, M=7.8) に おいては、上に述べた特徴あるパターンがもっとも典型 的に再現された. すなわち、主震発生の 5.5 年前から明 瞭な地震空白現象が始まり、0.4 年前からは β stage に はいった. また、空白域のひろがりは、主震破断域(余 震域)の約3倍であった. この地震の発生予測とその結 果については第3章で詳論する.

2.7 南米

1960年のチリ地震 (M=9.5) は、南アメリカで今世紀 最大の地震で,海・陸プレートの境界が南北 1000km 以上 にわたって破断したものであった(例えば、Plafker and Savage, 1970). Kelleher and Savino (1975) は、チリ 地震の約10年前からこの長大な震源域全域で地震活動が 低下していたことを見出した. 図8に見るように、チリ 地震の震源域中には、1918~1949年の間にM7以上の地 震が4個起こっているが、その後10年余にわたって震源 が決められる程度の地震はまったく発生していない. Kelleher and Savino (1975) によれば、M53以上の地 震はもれなく図に示されている. この顕著な地震空白現

象は、主震の33時間前に前震活動が始まるまで継続した.

南アメリカ地域の巨大地震の長期的予知に関する研究は、Sykes (1972), Kelleher (1972), Kelleher *et al.* (1973) などによってすすめられた. しかし,これらの研究は専ら巨大地震 のギャップと震源の移動に依拠したサイスモテクトニクス的な研究であって,地震空白域の ような長期の地震前兆現象に基づくものではない. この地域の地震空白域に関する研究は, 上述のチリ地震のほか, Habermann and Wyss (1977) によるペルー・エクアドル境地震 (1970年, M=7.6) のものがあるにすぎない.

2.8 中国

海城地震 (1975年, M=7.4) の予知にあたって, 地震空白域の大きさから地震規模の推定 が行なわれた (許, 1976). 推定に用いたのは, 空白域の長径 L (km) および面積 Q (km²) と主震のマグニチュードMとを結ぶ経験式:

- 76 -

$$M=3 \log L - 0.07$$
(1)
$$M=1.55 \log Q + 0.31$$
(2)

で、海城地震の規模は、両式からそれぞれ、 M=7.5、7.6 と予測された(図9参照).海 城地震の震央を含む長径約360km(許論文の 第15図から推算)の区域内では、少なくとも 1958年以来 $M \ge 4$ の地震がまったく発生して いない、1964年以後になると、空白域をとり 囲むように小地震が起こり始め、地震活動の ドーナッ現象(Mogi, 1969a)を呈した.主震 の震源域がおよそ70km×30km(許、1976) であるのに比べて、地震空白域ははるかに大 きい.

雲南省竜陵地震(1976年, M=6.9, 7.0) の前にも,長径約200kmの区域が地震空白と なった(唐, 1976).

魏・他(1978)は、華北地区に発生した9 個の大地震($M=7\sim8.5$)について地震空白 現象の有無を調べ、空白域が明瞭に認められ るもの6、あまりはっきりしないもの1、認 められないもの2だったと報告している。空 白域なしの2例のうちのひとつが1976年の河 北省唐山地震(M=7.8)であった。空白域 が認められた7例は、その長径 $L=400\sim800$



図 9 地震空白域の長径 L (km), 血積 Q (km²)と主震のマグニチュードMとの 関係. 三角印は1975年海城地震.(許, 1976 による)

Ffg. 9 Magnitude of a main shock as a function of linear dimension, L km (top), and area, Q km² (bottom) of the premonitory seismic gap in China (after Su-Shaosien, 1976). A triangle indicates the 1975 Haicheng earthquake.

km, 面積 $S=1\sim3\times10^{5}$ km², 先行時間(空白域出現から地震発生までの時間) $T=4\sim13$ 年であった(これらの数字は論文中の図から推算したもの).彼らは, $M=2\sim5$ の小規模地震についてのデータを追加して,およそ次のような関係式が成り立つとしている:

- $M = 5.88 \log L 8.98$ (3)
- $M = 2.80 \log S 7.18$ (4)
- $M = 1.84 \log(ST) 3.78$ (5)

ただし、小規模地震に関する空白域データの出典は不明である.

これら一連の論文からみる限り、中国の地震に伴う地震空白域は米たるべき主震の震源域 よりはるかに大きく、さしわたしにして数倍から10倍にも及ぶ。

2.9 ソ連の内陸部

- 表1 バイカル湖地方における地震の"preparation region" (Borovik *et al.*, 1971 による)
- Table 1
 "Preparation Region" of Earthquakes in Pribaykalia, USSR (after Borovik et al., 1971)

Energy Class <i>K</i>	Magnitude <i>M</i>	Approximate of Preparation	Dimension on Region km	Preparation Time year
12	4.8	order of	1000]
13	5.5		2000	up to 2
14	6.1		3000	8
15	6.8	more than	4000	more than 8

Mは、K=4.8+1.5Mによって換算したもの.



図10 ソ連Garm地方の三つの地区(Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ)における 小地震発生頻度(回数/yr・km²)の変化. 曲線は年別頻 度の3年間移動平均. 矢印は顕著な地震の発生を示す. (Sadovsky *et al.*, 1972 による) Kはソ連で用いられ ている地震規模のスケールで, K=12, 13, 14 はおよ そM=4.8, 5.5, 6.1 に相当する.

Fig.10 Change in frequency of earthquakes for the three seismic zones I, II and III in the Garm region, US-SR (after Sadovsky *et al.*, 1972). The bold curves are 3 year running mean of the annual frequency. Major earthquakes are shown by arrows.

バイカル湖地方の地震空白 域の研究が, Borovik et al. (1971)によって行なわれてい る. 1959年に中部バイカルに K=15(M=6.8)の地震が発 生したが,これに先立つ少な くとも7.7年の間,バイカル 湖北半の長径約450kmの区域 (論文の fig.1 から推算)内 に M=3.5 以上の地震が起こ っていない. M=4¾~6の四 つの地震についても同様の事 例が図示されているが,図に 距離や時間のスケールが与え られていないので,詳細はわ からない.以上5例に共通し て見られる特徴は次の通りで ある:①空白域は来るべき主 震の震源域より大さく,長径 で1.5~2.5倍,面積で2.5~5 倍程度である. ②主震の震源 域は空白域の縁近くに位置す る. 彼らは, 空白域(彼らは "preparation region" と呼ん でいる)の面積,先行時間と もに主震の規模と正の相関 関係にあることを見出し, 表1に示す概略値を与えた.

Borovik *et al.*, (1971) によれば, バイカル湖南部, 北部などにK=14~15 (M=6.1~6.8) の地震に対応する preparation region が見られる.

中央アジア,とくにタジク共和国の Garm 地方では、1950年代の後半から地震予知研究 が精力的に行われている.しかし、この地方からは地震空白現象の報告はなく、むしろ、地 震活動の増大が、大地震接近の指標になるという考えが示されている (Keylis-Borok and Malinovskaya, 1964; Lukk and Ponomarev, 1972; Sadovsky *et al.*, 1972). すなわち過

— 78 —

地震空白域にもとづく地震予知一大竹

去5~10年間地震頻度が減少または安定していれば,過去5年間の最大地震より大きいもの は起こらない.逆に地震頻度が増加すれば,向こう10年間により大きな地震が発生する可能 性がある (Sadovsky et al., 1972;なお図10参照).図の3年間移動平均曲線を見る限り,上 記の所論は地震活動推移の大局を言い当てているようである.しかし,階段で示された年別 の地震頻度を注意深く検討すると,このデータは必ずしも地震空白域の存在を否定するもの ではないように思われる.とくに,1969年のK=14の地震(区域II)前年の地震頻度の減少 が印象的である.小地震の空間分布も考慮に入れた,地震活動変化のより総合的な検討が望 まれる.

2.10 その他の地域

アッサム地域は、ヒマラヤ山脈に 沿う地震帯の 東端付近に 位置する 地震多発域である. Khattri and Wyss (1978) は、1825年以後の地震データ(おもに地震回数)にもとづいて、 この地域の M > 6.6 の地震はすべて、地震活動が目立って静穏な期間の後に発生したと報告 している. 図11は、図中に Zone I と記した地区に発生した地震の累積回数を示したもので ある. 1963年以後は M = 4.8 程度の小さい地震まで数えられている一方、1909年以前はM =7.0 未満 のものは含まれていないなどデータの質は時代とともに大きく変っているが、累積 カーブの急な折れ曲りは実際の地震活動変化に対応するものと思われる. 1950年の地震(M = 6.7)のように、主震の前だけでなく、主震後にも地震活動の低下が見られるものもある.

同様の現象は、日本付近の地震について、勝又 (1978, 1979)によっても指摘されている.ま た1869年の地震(*M*=7.8)の場合は、地震活動 静穏期の後、数年間の活動復活の期間を経て主 震発生を迎えたように見える.

Zone I, Zone III には、それぞれ1897年、 1950 年に M=8.6~8.7 の地震が起こっている が、中間の Zone II にはそのような巨大な地震 はまだ知られていない、最近25年間の震央分布 図からは、長径約350kmの地震空白域も認めら れる。Khattri and Wyss (1978), Gupta *et al.* (1979) らはこれに "Assam gap" という名を与 えて、巨大地震の候補地として注目している。

Evison (1977) は、ニュージーランドで1968 年以来最大の地震であった Milford Sound 地 震 (1976年、M=6.6) について、異常な群発活 動とそれに続く約 7.4 年の地震空白現象を報告



図11 アッサム地域における地震回数の変化 (Khattri and Wyss, 1978 による) データについては本文を参照のこと。



- 79 -

している. 空白域の長径は 70km (論文の fig.1 から推算) であった.

Mârza (1979) によれば、1977年のルーマニアの地震 (H=94km、 m_b =6.4、 M_L =7.2) の前8年余にわたって地震空白現象が認められた。深い大地震に先行する地震空白現象が報告された珍らしい例である。

3. 1978年11月29日メキシコ地震の予知

3.1 メキシコ・中米地域のテクトニクス

この地域のテクトニクスは、基本的に、北アメリカプレート、カリブ海プレート、ココス プレートと呼ばれる、三つのプレートの相対運動によって規定されている. ココスプレート は、その西、南、東の縁をそれぞれ East Pacific Rise, Galapagos Rift Zone, Panama Fracture Zone によって画され、北東側の Middle America Trench で北アメリカ、カリブ 海両プレートの下に沈み込んでいる(図 12 参照). そのため、メキシコ中部からパナマに至 る太平洋岸は、海洋プレートの沈み込みに伴う大地震がくり返し発生する、島弧一海溝系型 の活発な地震活動帯となっている. 図13に示すように、Middle America Trench 沿いに発 生する地震のほとんどが、北東向きのスリップベクトルを持つ低角逆断層型の地震である. 深発地震面はほぼ250kmどまり(Molnar and Sykes, 1969; Stoiber and Carr, 1973)で、



 図12 メキシコ・中米地域のプレートおよびサイスミシティ、丸印,三角印はそれぞれ,Duda (1965)の表による浅発(H ≤65km),深発(H>65km)大地震の震央を示す.(Ohtake et al., 1977aによる)

Fig.12 Plate boundaries and general seismicity in the Mexico-Middle America region (after Ohtake *et al.*, 1977a). Plate boundaries are after Molnar and Sykes (1969). Circles and triangles are shallow ($H \leq 65$ km) and deep (H > 65km) large earthquakes respectively, compiled by Duda (1965). 東北日本や,南アメリカに 比べて島弧の活動度はやや 低い.なお,北アメリカ, カリブ海の両プレートは, Cayman Trough を境とす る左水平ずれの相対運動を している.1976年のグアテ マラ地震(*M*=7.5)は,同 トラフの陸上延長部にあた る Motagua 断層の活動に よるものであった.

ココスプレートの沈み込 み速度は推定方法によって 3.2~20cm/yr のいろいろ な値が得られているが,い ずれの推定方法を用いて も,メキシコ南東部—グア テマラ地域が相対的にもっ 図13 メキシコ・中米地域の地震の発震 機構. 白丸を貫く矢印は逆断層の underthrust 方向, 白丸両側の反 平行矢印は水平ずれ断層運動の方 向を示す. 黒丸は正断層型の地震. 深さ100km以上の地震は丸のかわ りに三角で示されている. (Molnar and Sykes, 1969による)

Fig.13 Focal mechanisms of earthquakes in the Mexico-Middle America region (after Molnar



and Sykes, 1969). An arrow and a set of antiparallel arrows attached to an open circle indicate direction of underthrusting and strike-slip motion, respectively. An open circle is replaced by an triangle for the deep earthquakes ($H \ge 100$ km). A solid circle shows normal fault.

とも大きな運動速度を示す (Molnar and Sykes, 1969). 従って, われわれがとりあげよう とするメキシコ南部の Oaxaca 付近は, メキシコ・中米でもとりわけ活動の活発な地域であ る. 最近, Minster and Jordan (1978) は, 世界中の多数のデータ(海洋底拡大速度110, トランスフォーム断層の走向78, 地震のスリップベクトル142)を用いて, プレートの相対 運動を再計算した. その結果によれば, 北アメリカプレートに対するココスプレートの運動 の極は30°N, 121°W で, 回転速度は1.5×10⁻⁶deg/yr である. 両ブレート間の相対速度は, Oaxaca 付近で 7.2cm/yr となる.

他の島弧一海溝系と同様に、メキシコ・中米地域においても、火山列、地震帯が海溝軸と ほぼ平行して走っている.しかし、注意深く見ると、一見ひとつながりの火山列がところど ころで急激に折れ曲がり、いくつかのブロックに分割されていることがわかる.ブロックの 境界では、深発地震面の傾斜角や最大傾斜方向が変化し、海底地形にも等深度線の屈曲が認 められる. Stoiber and Carr (1973)は、これらの事実にもとづいて、同地域では海洋プレ ートが巾100~300kmの "segment"に引き裂かれた形で沈み込んでいる、との考えを提唱し た.彼らの考えによれば、隣り合うsegmentの境界では、海溝軸に直交する構造上の弱線が 生ずることになる.浅い中・小地震の活動がsegmentの境界付近で相対的に高くなっている (Stoiber and Carr, 1973)のは大変興味深い.

3.2 データおよび解析方法

震源データは、NOAA の Environmental Data Service から発売されている磁気テープ ファイル (1900~1974年),および U.S. Geological Survey の Preliminary Determination of Epicenters (1975年~) によった。両者とも、1960年代以後については、世界標準地震 観測網 (WWSSN)の観測にもとづく震源時、震央座標、深さ、マグニチュードの各データ を収録している。しかし、1962年以前の期間は、観測点の数が少なく震源決定されている地 震の数も不十分なので、本研究では1963年以後のデータのみを用いている。この期間、メキ ショ・中米地域では、 $m_b \ge 4.5$ の地震はほぼもれなく震源決定されているものと推定される



図14 メキシコ・中米地域における浅発地震のマグニチ ュードー頻度分布. データは PDE の1973~77年 分を用いた.

Fig.14 Frequency distribution of body wave magnitude of shallow earthquakes in the Mexico-Middle America region. Data are taken from the Preliminary Determination of Epicenters, 1973-1977. (図14のマグニチュード頻度分布参照).

メキシコ・中米の太平洋岸全域に わたって地震空白域の有無を探索す るために,以下の三つの表示方法を 用いて地震活動の時間的変化を系統 的に調べた.

(1) *S*-*T* ダイアグラム

ある一定期間T内に,定点から震 央距離 400km 以内に発生した地震 の回数を震央距離 4km 刻みで計数 し,時間ウィンドウTを順次移動さ せて,震央距離別地震発生密度の時 間的変化を示す図(S-Tダイアグラ ム)を作成した.Tが長すぎると解 像精度が悪くなり短かすぎると時間 的変化の大局を見ることが困難にな

る. 今回の場合には $T = 180 \sim 240$ 日が適当であった. 定点を 0.5° 刻みで順次移動させ, 98枚 の S-T ダイアグラムを作成した. S-T ダイアグラムの詳細は Ohtake *et al.* (1977b) を 参照されたい.

(2) 震央プロット

S-Tダイアグラムから、顕著な地震活動低下が認められた地区について震央分布図を作成 し、これによって、活動低下域の範囲を確定した.

(3) 地震発生時系列図

確定された地震活動低下域内に発生した地震を,過去にさかのぼって摘出し,時間軸上に プロットした.この時糸列図は「地震活動低下域」が本当に意味のあるものかどうかを判定 する材料となる.すなわち,同様の活動低下現象が過去に何回も見られたり,活動低下の継 続時間が地震発生の平均間隔より十分長くなかったりした場合には,この活動低下は統計的 なゆらぎによる見かけ上のものと判断される.以上三つの段階をすべて経て,最終的に有意 と判断されたものが「地震空白域」である.

3.3 Oaxaca 付近の地震空白域

前節の解析方法で、メキシコ・中米地域の地震活動パターンの時間的変化を調べた結果、 メキシュ南部の Oaxaca 付近に顕著な地震空白域が形成されていることが明らか に な っ た (Ohtake *et al.*, 1977a, b). 1975年末までの地震データにもとづいて、有意な地震空白現象 が認められ、かつその中でまだ大地震が発生していないのは、メキシコ南部の Oaxaca 付近のみであった.

この地震空白域は、1973年後半から現われ始めた。図15に、空白域を含む 15°×10°の地 域の震央分布を二つの期間に分けて示す。(a)は空白域形成直前の 2 年間,(b)は空白域出現後 の 2 年間の状態を示したもので、比較の便のため期間の長さは両者とも等しくとってある。 ここにブロットされているのは、深さ 60km 未満の浅発地震すべてである。メキシコ・中米 地域の他の大・中地震の場合(Ohtake *et al.*, 1977b)がそうだったように、今回も震源深 度の下限を 60km とするのが空白域を弁別するのにもっとも有効であった。

(a)期間の震央図から、メキシコの太平洋岸に沿って浅発地震がほぼまんべんなく帯状に分

布していることがわかる. 問題の Oaxaca 付 近にも中・小規模の地震が発生しており,こ の地区が決して「先天的無地震区域」(浅田, 1972;高木,1978)ではないことは明らかで ある.

(b)期間の震央図は、それ以前の期間と比較 してきわめて対照的である. すなわち,太平 洋岸に沿った浅発地震帯のうち西経 95.5°~ 98°の区間にはただのひとつも地震が見られ ず,完全な地震空白域となっている.空白域 の範囲は、東は Tehuantepec 湾西部から、西 は Caxaca—Guerrero 州境に至る東西約 270 kmで、Oaxaca州のほぼ全域を含んでいる. 南北方向の範囲はあまり明瞭ではないが、お よそ地震帯の巾に相当するものと 判断 され る. この地震空白域を以下 "Oaxaca gap" と 呼ぶことにする、小さい地震は実際に発生し ても検知されないものがあるが、前述のよう に、 $m_b \ge 4.5$ の地震についてはそのようなと りこぼしはないものと推定される。図中の二 つの楕円は,最近この空白域内で起こった大 地震の余震域を示す。

図16は、図15(b)に長方形で示した地震空白 域内に発生した浅発地震の1975年末までの発 生時系列図である.1本の縦棒が1個の地震





Fig.15 Sallow seismicity ($H \leq 60$ km) in and near southern Mexico for the periods of (a) normal and (b) abnormal seismicity (after Ohtake *et al.*, 1977a). Rectangle in (b) is the abnormal seismic gap (Oaxaca gap). The ellipses show aftershock areas of the 1965 and 1968 Oaxaca earthquakes.



 図16 Oaxaca gap (図15に破線で示した長方形 領域)内の浅発地震(H<60km)の発生時 系列. 各々の縦棒が1個の地震に対応する. (Ohtake et al., 1977a による)

Fig.16 Time sequence of shallow earthquakes $(H \leq 60 \text{km})$ that occurred in the Oaxaca gap (after Ohtake *et al.*, 1977a). Each

vertical segment indicates occurrence of an earthquake with m_b proportional to the lenght of the segment.

に対応し、その実体波マグニチュード m_b が縦棒の長さで示されている。1973年6月以後の 地震活動の消滅はきわめて画然としており、それ以前10年間の時系列とはまったく異なる異 常なものである。簡単な確率的検討を行なっておこう。いま、地震は互いに独立に時間的に はまったくランダムに発生するものと仮定する。単位時間あたりの平均地震発生個数をkと すれば、t時間に地震がx 個発生する確率は、Poisson 分布:

$$p(x) = \exp(-kt) \cdot (kt)^x / x! \tag{6}$$

で与えられる.従って、 t 時間に地震が1個も起こらない確率は、

$$p(0) = \exp(-kt) \tag{7}$$

である. $m_b \ge 4.5$ の地震に限れば、1963年から1975年末までの13年間に36個の地震が起こっているから、平均地震発生個数の最確値はk = 2.77個/年となる. t = 2.6年(1973年6月 ~1975年末)とすれば、上式から $p(0) = 7.5 \times 10^{-4}$ を得る. ランダムモデルに基づく限り、2.6年の長期間にわたる無地震現象は、単なる偶然ではほとんど起こりえない現象である、と結論される.

3.4 1965年および1968年の Oaxaca 地震

Oaxaca gap の中には,近年に二つの大地震が発生している. Bulletin of the International Seismological Centre によれば,それらの発生日,震央,深さ,表面波マグニチュードは次の通りである:

1965–08–23 $\varphi = 16.33^{\circ}$ N, $\lambda = 95.80^{\circ}$ W H = 29km $M_s = 7\frac{1}{2} \sim 7\frac{3}{4}$

1968–08–02 $\varphi = 16.56^{\circ}$ N, $\lambda = 97.79^{\circ}$ W H = 36km $M_s = 7.5$

ともに典型的な低角逆断層型の地震で、断層面の伏角はそれぞれ 14° (Molnar and Sykes, 1969), 6° (Ohtake *et al.*, 1977a) であった. 図15(b)に楕円で示したように, これらの余震 域は Oaxaca gap の東部および西部を占め、その中間に未破壊域が残っている.

地震活動の時間的変化の解析から、両者ともに、大地震発生前に地震空白現象が先行した ことが明らかになった. 図17は、1965年の地震に対する地震空白域を示す震央図(上)、およ び長方形で示した空白域内の地震発生時系列図(下)である.ここで特徴的なのは、1963年 10月から翌年7月まで10ヵ月間地震空白現象が続いた後、空白域内で中小地震の活動が復活 し、その約1年後に、大地震の発生に至ったことである. Ohtake *et al.* (1977b, 1978) は、

— 84 —

- 図17 (上) 1965年 Oaxaca 地震に先行した地 震空白域(破線で囲んだ長方形)と主震 (×印)の余震域(斜線部). 黒丸,白丸は それぞれ,α stage,β stage(本文参照) 期間に発生した 浅 発 地 震(H<60km) を示す.(下)地震空白域内の浅発地震発 生時系列.(Ohtake et al. 1977a による)
- Fig.17 Top: Seismic gap preceding the 1965 Oaxaca earthquake (rectangle) with the epicenter (cross mark) and aftershock area (shaded ellipse) of the main shock. Solid and open circles are shallow earthquakes ($H \le 60$ km) for the α stage and the β stage (see the text for definition of those stages). Bottom: Time sequence of earthquakes that occurred in the seismic gap (after Ohtake *et al.*, 1977a).
 - 図18 1968年 Oaxaca 地震に先行した地震空白 現象. 図の見方は図17に同じ. (Ohtake *et al.*, 1977a による)
- Fig.18 Seismic gap preceding the 1968 Oaxaca earthquake (after Ohtake *et al.*, 1977a). See the legend for Fig. 17.

メキシコ、中米、カリフォルニアの他の多数 の大中地震の前にも、同様のバターンが見ら れることを指摘し、地震活動が低下する期 間を前兆的地震活動変化の α stage,空白域 内で活動が復活する期間を β stage と名付け た、震央図の黒丸および白丸は、それぞれ、



 α stage, β stage に発生した地震の震央を示している。図中の×印は主震の震央,斜線を施 した楕円は余震域である。空白域内の白丸 (β stage)の半数以上が,将来の主震の震央付近 に集中していることが注目される。

1968年の Oaxaca 地震について,同様の図を図18に示す.この場合も1.7年間 α stage が継続した後地震活動の復活が認められるが,空白域内に震源が決められたものは主震直前の1 個のみであった.

図17、図18とも、地震発生時系列図の1963年前半部分にはまったく地震が見られない.これは、実際に地震が起こらなかったのではなくて、観測網がまだ十分に整備されておらず、 震源決定能力が低かったためと思われる.

1965年および1968年の Oaxaca 地震を通じて共通して見られるいくつかの特徴をまとめて

- 85 -

1

おく:

(1) 地震のタイプは低角逆断層型である.

(2) 震央は余震域の北端(陸側)付近に位置している.従って,破壊は陸側から海側へ向 って進行した.

(3) 主震の発生に先駆して、地震空白域の形成(α stage)とその中での地震活動の復活(β stage)が見られた.

(4) β stage の活動は、将来の震央付近で顕著であった.

(5) 地震空白域は,将来の主震による破壊域(余震域)より有意に大きかった.主に環太 平洋地震帯北西部の研究にもとづいて,余震が地震空白域全体を埋め尽くすものと考えられ てきていた(例えば,宇津,1972)が,少なくともメキシコ南部地域に関する限り,この従 来の考え方は修正されねばならない.

以上の諸点の中には、大地震一般に共通する性質だけでなく、地域的な特徴を強く反映し たものも含まれているはずである。特定の地域の地震を成功裡に予知するためには、その地 域のくせを把握しておくことが是非とも必要である。

3.5 Oaxaca 地震の予知とその根拠

われわれは、Oaxaca gap の中に大地震が発生する可能性がきわめて高いと判断した. そ の理由は次の3点に要約される. 第一に, この地震空白現象がきわめて顕著であって, これ が単に統計的偶然である確率はわずか1万分の8(3.3参照)にすぎないことである. Oaxaca gap は, おそらく, 今までに報告されている地震空白域の中でもっとも顕著な事例である. 第二に, 地震空白現象は, 地震のいろいろな長期的前兆現象の中でも, とくに有力かつ確実 性の高いものと考えられていることである(例えば, 茂木, 1976; Hamada, 1979). 地震前 兆としての地震空白現象(その多くは地震が起こった後の研究で明らかにされたものである が)の事例が世界各地でいかに多数見出されているかは, 第2章で見てきた通りである. 第 三に, メキショ地域の最近の地震活動の系統的な研究(Ohtake *et al.*, 1977b)から, 同地域 における大地震前兆現象としての, 地震空白現象の普遍性が確かめられていることである. メキショ地域で1965年~1975年の間に発生した浅い大地震($M_i \ge 7$)は, 例外なく前駆的な 地震空白現象を伴ない, その大部分は地震空白域の形成—→地震活動の復活—→大地震の発 生という経過をたどっている. このうち, Oaxaca 付近の二つの大地震(1965年, 1968年) については, 前節で詳論した.

それでは、やがて Oaxaca付近を襲おうとしている大地震とはどのようなものであろうか. Ohtake et al. (1977a) にもとづいて、われわれの予測内容とその根拠を以下に述べること にする. この予測は、1975年末までのデータにもとづいて行なわれたものであるが、大地震 発生直前までのデータを追加しても、基本的な変更・修正は生じない.

(1) 地震の発生場所

やがて大地震が発生すべき場所は、地震空白域の中のどこかである。地震空白域に関する 一般的な知見から導びかれる結論はこれだけである。しかし、この地域の過去の地震活動の 研究によって、発生場所の予測巾をさらに限定することが可能となった。

図15(b)に示したように、Oaxaca gap の中にはごく最近二つの地震が発生している、1965 年の地震 (M_s =7½~7¾) は Oaxaca gap の東部を、1968年の地震 (M_s =7.5) は西部を、 それぞれ破断したものである。断層面積 $S \text{ km}^2$ と断層変位量 D cm との間の関係式(阿部、 1978):

$$D=2.46 S^{1/2}$$
 (8)

を用いて、これちの地震の断層変位量は 2~3m 程度と推定される. ココスプレートの沈み 込み速度は、大地震のデータから 3.2cm/yr (Molnar and Sykes, 1969) とされているから 1965年、1968年のOaxaca地震が再来するまでには、数十~100年の間隔があることになる。 従って、近い将来破断すべきプレート境界は、Oaxaca gap 全域ではなくて、両地震で割れ 残った部分、すなわち 空白域の 中央部分であると 結論される。第2章で 述べた定義に従え ば、Oaxaca gap の中央部分は、(巨)大地震のギャップ(第1種地震空白域)となってい る、Minster and Jordan (1978) の結果から得られる沈み込み速度 7.2cm/yr を用いれば、 大地震の平均再来間隔は25~35年と短かくなる。しかし、1965年、1968年の地震の再来は当 面の問題ではない、という結論に変更は生じない。

1965年,1968年の地震とも典型的な低角逆断層型の地震で、いずれも、破壊が深部で始ま り主に海側に進行するという特徴を示した。両者の中間で発生する次の地震も、同様の破壊 様式となる可能性がもっとも高い、すなわち、破壊が始まる場所は、破断面の内陸側末端付 近と推定される。以上の推論に基づいて、来るべき地震の震央位置を、北緯 16.5°±0.5°, 西経 96.5°±0.5° と予測した。

(2)地震の規模

従来の考え方(例えば、宇津、1972)に従って、空白域の大きさから単純に地震の規模を 推定すると次のようになる.地震空白域の大きさは、面積にして約7×10⁴km²、さしわたし にして約270kmである.もし将来の大地震の余震域がこの空白域を完全に満たすものとすれ ば、大地震のマグニチュード*M*は、宇津・関(1955)および Utsu (1961)の経験式:

$$\log A = 1.02M - 4.0$$
 (9)

$\log l = 0.5M - 1.8$ (10)

から推定することができる.ここで、A、 l は余震域の面積およびさしわたし(長径)である.上式から得られるMの推定値は8.5~8.7となる.

しかし,前節で例示したように、少なくともこの地域では,将来の大地震の余震域は空白 域より有意に小さいことが明らかにされている(図17,図18参照).さらに前項で論じたよ うに,来たるべき大地震の破断域は Oaxaca gap 全体ではなくて中央部分だけと考える根拠

-87 -

がある.これらの論拠から、上記のマグニチュード推定値は過大であると推断される.

地震の規模は、1965年、1968年の地震と直接比較して推定するのがよい. 両地震で破断したのは、Oaxaca gap のうち、海溝軸に沿ってそれぞれ東部の3%、西部の3%で、中央部の3%が「割れ残った」部分である. 従って、来たるべき地震の規模は上記の地震と同程度と考えるのがもっとも妥当である. Anderson and Whitcomb (1975) によれば、余震域のさしわたし *l* km と前兆現象出現域のさしわたし *L* km との間に、統計的に、

$$\log l/L^2 = -3 \tag{11}$$

の関係が成り立つ.(10),(11)式を組み合わせると,Oaxaca gap の大きさを $L^2=7 \times 10^4 \text{km}^2$ と して,M=7.3 が得られる.(10)式は日本付近の地震データにもとづいて求められたものであ るが,Mogi (1968b)は、環太平洋地震帯北部、チリなどの巨大地震は(10)式から期待される 数倍の余震域を有するとコメントしている.しかし、このくいちがいは主として、従来のマ グニチュードスケール (M_L , M_s など)が巨大地震の領域で飽和してしまうことに起因する もので、必ずしも地域差によるものではなさそうである。実際1965年、1968年の両 Oaxaca 地震とも、その余震域とマグニチュード(M_s)との関係はほぼ(10)式を満足している.

以上の根拠に基づいて,来たるべき大地震のマグニチュードをMs=7½±¼と予測した.

(3) 地震の発生時期

何人かの研究者によって、地震のマグニチュードMと前兆現象先行期間(前兆現象が始まってから地震が発生するまでの期間)T日との関係が与えられている:

log	T=0	80M - 3	1.92	(Whitcomb	et	al.,	1973)	(12	2)
-----	-----	---------	------	-----------	----	------	-------	-----	----

 $\log T = 0.65M - 1.2$ (Scholz *et al.*, 1973) (13)

log T=0.76M-1.83 (Rikitake, 1976) (14)

 $\log T = 0.60M - 1.01$ (力武, 1978) (15)

これらの式から、マグニチュード7½±¼の地震に対応する前兆現象先行期間として、6~ 52年のさまざまな値が得られる. もっとも豊富なデータにもとづいて求められた頃式を用い れば、 $T = 6 \sim 12$ 年となる. 従って(四~(頃式で表わされた $M \sim T$ 関係からは、地震の発生時 期として、数年から十数年後、もしかしたら数十年後というきわめて粗い目安が得られるだ けである.

再び、1965年、1968年の Oaxaca 地震に立ちもどって検討しよう. すでに図17、図18で見 たように、これら両地震に先行する地震空白現象が始まったのは、それぞれの地震のわずか 1.9年前、1.8年前であった. 式(2)~(2)はあくまでも世界各地域のデータを平均化した「標準 カーブ」であって、地域ごと、地震ごとの特徴は単なる統計的なばらつきとして取扱われて いる. われわれが今問題にしている地震の予知にあたっては、最近隣接地区で起こった両大 地震とも、地震空白現象の前兆期間が2年足らずであったことを重視すべきである. 1975年 末現在 Oaxaca gap が形成されてから2.5年を経過しているので、大地震の発生は切迫して いると判断した.

地震空白域は、大地震の前に期待されるさまざまな地震前兆現象のうちのひとつにすぎな い、より確度の高い発生時期予知を行なうために、ただちに微小地震、地殻変動などの観測 を始めるべきである、というのがわれわれの主張であった.少なくともこの地域では、大地 震発生前に地震空白域の中で小さい地震の活動復活 (β stage) が期待されるので、高感度地 震計による地震活動の監視はとくに重視すべきものであった. Ohtake et al. (1977a) は, 次のように述べている:

"If possible, the program should include monitoring of microearthquake activity, seismic wave velocity, and crustal deformation. Among these, systematic monitoring of microearthquakes may be the most effective and simplest method since a renewal of activity (β stage) preceding the main event is expected. Detection of a significant increase in seismic activity in the region would not pinpoint the timeof-occurrence, but it would serve as a warning that the time remaining before the earthquake might be quite short."

3.6 予知の評価

1978年11月29日、かねてから予測していた大地震が実際に発生した。地震空白現象が始ま ってから 5.5 年後である. 震源地から北西約500kmのメキショ市では,中心部でいくつかの ビルが倒壊し、電話線の切断などの被害が出た。しかし震源地付近からは著しい被害は報告 されていない、人口がまばらなこと、地震が昼間(現地時間14時52分)であったことなどが 幸いしたものとみられる. この地震による人的損害は,合計死者8人,負傷者約500人と報 じられており、M_s=7.8という大地震の割合には被害は軽少であった.

表2は、この Oaxaca 地震の震源要素をわれわれの予測値 (Ohtake et al., 1977a) と比較 したものである. 震源要素は、全世界の 141 観測点のデータに基づく、Preliminary Determination of Epicenters (PDE) のものが示してある. 実際の震央は, 予測中心点16.5°N, 96.5°W よりやや南寄りではあったが、完全に予測幅の中に収まっている. 規模(表面波マ グニチュード, M_s) は、予測された値の上限にきわめて近く、誤差の範囲内で予測通りだっ

たと言ってよい.発生場所 ・規模ともにこのように的 確な事前予知が行なわれた 大地震は,筆者の知る限り ほかにない.

地震の発生時期に関して は、有効な予測を行なうこ とができなかった。しか

表 2 1978年 Table 2 Predict Mexico	Oaxaca 地震の子知と ion and Result of th Earthquake	: 夫际 ne 1978 Oaxaca,
Parameter	Prediction	Reality*
Origin Time (UT)		Nov. 29, 1978
		19h 52m 53.2s
Epicenter {Lat. Lon.	$16.5^{\circ} \pm 0.5^{\circ} N$ $96.5^{\circ} \pm 0.5^{\circ} W$	16.072°N 96.487°W
Depth	shallow	49km
M_s	$7 \ 1/2 \pm 1/4$	7.8

Preliminary Determination of



し、この長期予知は、 大地震発生の約3年前 までのデータにもとづ いて、短期的な前兆現 象を捕えるための観測 機器を展開するのに十. 分の時間的余裕をもっ て公表されたものであ る.また、予知内容が 客観的かつ具体的に記 述されていたが故に、 事前予知の成功・不成 功の評価もまた客観的

に行なえたことを強調しておきたい.

supplemented to Fig. 16.

1975年以後の地震活動のパターンは、われわれが予測した通りの様式で推移した. このことは、予知研究にとって、たまたまひとつの予知が当ったかどうかということ以上に重要な意味を持つと思われるので、やや詳しく述べておきたい. 図19は、Oaxaca gap、すなわち φ = 15.0°~17.5°N、 λ =95.5°~98.0°Wの区域内(図15参照)に1963~78年の間に発生した浅

国立防災科学技術センター研究報告 第23号 1980年3月



図20 Oaxaca gap の α stage (図19参照) におけるメキシコ南 部付近の震央分布. 地震帯の 95.5~98°W の部分がほとん ど完全に地震空白となっている. 空白域を示す中央付近の 長方形は図15のものと同じ.

Fig.20 Shallow seismicity ($H \le 60$ km) in and near southern Mexico for the α stage (see Fig.19) showing the Oaxaca gap (rectangle). The seismic belt along the Pacific coast is almost completely quiescent in the portion between 95.5°W and 98°W. い地震 (H<60km)をプロー ットした地震時系列図であ る. 1975年末までは図16と まったく同じで,1976~78 年の間のデータは PDE に 拠って追加されている. ま ず第一にこの図から読み取 れるのは、1973年6月~19 78年6月の5.1年間にわた ってこの区域内では地震活 動が異常に静穏で,ほぼ完 全な地震空白現象が保持さ れたことである. 1976年7 月にm_b=4.5の小地震が1 個起こっているが, 震央は $\varphi = 16.302^{\circ}$ N, $\lambda = 97.706^{\circ}$

地震空白域にもとづく地震予知一大竹

W (*PDE*) で、空白域の西縁に近い. この約 5.1 年間の震央分布図を図 20 に示す、3.3節 において、1975年末までのデータに基づいて、Oaxaca gap が偶然に生ずる確率を示した. 同様の考察から、最終的に5.1年間にわたる地震空白現象の偶発確率は、 $p(0) + p(1) = 7.4 \times 10^{-5}$ となる、ここで、k=37個/15.6年=2.37個/年、t=5.1年とした、

図19からもうひとつ明らかなのは、1978年7月(大地震発生の0.4年前)から、空白域内 で小地震の活動が始まったことである。地震活動の異常低下(α stage)——復活(β stage) ——主震の発生、という地震活動パターン変化の予測は、まったく正しいものであった。 β stage に属する地震としては $m_b=4.1\sim4.6$ の3個が揃えられたにすぎないが、これは常設 地震観測網の地震検知能力の限界によるものであって、より小さい地震は多数発生したにち がいない。実際、California Institute of Technology の K. McNally らは Oaxaca 地域に 微小地震の臨時観測網を展開し、多数の前震を記録したと報じられている(EOS, Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 60, No. 1, 1979).

図21は、1978年 Oaxaca 地震の余震分布を示す. 余震域は Oaxaca gap の中部を占め、ま たおもに主震震央の南方に拡がっている. 従って,破断するのは Oaxaca gap の中央部分で あり,破壊は陸側から海側へ進行するという予測通りの破壊様式で、今回の地震が起こった ことになる.

1978年 Oaxaca 地震の予知は, 種々の前兆現象の総合的判断に基づくものではなく, 地震 空白域というたったひとつの前兆現象に依存して行なわれたものであった.利用しえた情報 の貧弱さから言えば, できすぎた成功というべきかもしれない. しかし, 重要なのは, 前兆 的地震活動のパターンの変化, および主破壊の様式がまったく予測通りであったことで, 震 央位置・マグニチュードが正しく予知されたのは, 基本予測の正しさの必然的帰結にすぎな い. この基本予測は, 前節で予知の根拠として論じたように, 地震空白現象の一般論にとど まらず, (巨)大地震のギャップを含む過去のサイスミシティの地域的特徴を究明することに

- 図21 1978年 Oaxaca 地震後約1月間 の余震震央分布.×印は主震の 震央,破線で囲んだ楕円は1965 年,1968年の Oaxaca 地震の余 震域、本図の範囲は、図20に示 した地震空白域と同じである。
- Fig.21 The 1978 Oaxaca earthquake (cross mark), and the aftershocks (circles) during the following one month. The ellipses show aftershock area of the 1965 and 1968 Oaxaca earthquakes. This map covers the area of the Oaxaca gap defined in Figs. 15 and 20.



よってもたらされたものであった. 地震予知研究において, 一般法則の発見・解 明 と 同 時 に, 地域的特性の考究が重要な鍵を握っていることが改めて明らかにされた, と言ってよい だろう.

4. 地震空白域の諸性質

4.1 地震空白域研究の現段階

表3は、地震空白現象が報告されている論文を収集・整理して、地域ごと地震ごとにまと めたものである、地震(地震群を含む)の数にして合計81個、そのうち日本およびその付近 のものが17個、中国のものが22個を占めている。これらの中には、マグニチュード3級の小 地震から9級の巨大地震まで、また発生場所では、海溝部、トランスフォーム断層地帯、プ レート内地域など多種多様な地震が含まれている。この表は、諸論文に公表されている結果 (図などから推算したものを含む)を一覧しやすいようにまとめたもので、空白域の有意性 等に関する筆者の評価は一切加えられていない。マグニチュードは、できる限り斉一性を保 つために、1964年までは Duda (1965)の表、それ以後は Preliminary Determination of Epicenters (PDE) の $m_b(m_b < 6.0 \text{ orb} = 6.0 \text{ orb} = 6.0 \text{ orb} = 6.0 \text{ orb} = 7.5 \text{ orbox} =$

地震空白域は、種々の地震前兆現象の中でも、とびぬけて多数の事例が知られているもの である.「理科年表」(昭和53年版)の「世界大地震年代表」に記載されている地震のうち、 *M*7以上で深さ70km以浅の大地震は、1960~1975年の16年間に合計219個あり、明らかな前 震・余震や地下核爆発を除くと 186 個となる.地震空白域の報告があるものは、このうち23 個で、割合にして約12%である.表3からも明らかなように、地震空白域の研究は、世界の 主要な地震帯すべてに及んでいるわけではない.上記 186 個の浅発大地震のうち約40%は、 フィリピン、インドネシア、南太平洋のソロモン、ニューヘブリデス、ケルマデック各諸島 付近、イラン、トルコなど研究未着手の地域で発生している.今後これらの地域の研究が進 めば、現在の地震観測水準でも、地震空白域の報告率12%という数字はさらに向上するもの と思われる.

しかし、報告されている地震空白域の圧倒的多数は、主震が起こってしまってから事後の 研究で明らかにされたもので、地震前にわかっていて地震発生が予測されたものはわずか7 例にすぎない、但し、この中には、1971年チリ中部地震(*M*=7.5; Kelleher, 1972)のよう

-92 -

2	Reference		48)	23)		(12	48)	21)	23)	85)	48)	(09)	27)	(09)	23)	5)	43)	80)	48)	(09	80)	28)	54)	87)	(09	55)	67) 68)
	M_m		6.0	ູ		4-5	6.0		4-5	5.5	6.0		5.0		4-5		2.5	4-5	6.0	4.0	4-5	5.0	1.2	5.0		4^{-5}	4–5
	$T_{eta}^{}$ yr			4.8				4-5	4.2				2.2		2.5		0.5					4.5	0.0002				
Reported	T_a yr			8				$\geq \!\! 14$	14				13		16		2.7					16	0.3				
ismic Gap Is	T yr		13	13		19	21-23	$\geq 18-20$	18	≥ 20	6	13.2	15	3.4	18	8√	3.2	5.5	7	4.7	5.5	20	0.3	13	3.7	7.5-9.5	9.5
る地震 r Which Sei	$L_{ m km}$		220	100		200	390		100	120	240		100		100	9	10	70-300	360		60 - 400	120		160		60	50
告されてい nquakes fo	М		8.4	7.7	7.6)	8.1	8.1)	8.1	8.1					7.0	7.4	(6.3)	4.7	7.5	8.2				4.3	7.7		6.5	-
空白現象が報 of the Earth	λ deg		144.5E	141.8E	h M = 7.7,	136.0E	136.0 E	134.5E	143.0E					143.5E	139.1E		135.1E	132.2E	143.2E				138.2E	145.8E		138.7E	
表3 地震/ able3 List	ϕ deg		39.3N	36.8N	(この存	33.8N	33.8N	32.5N	42.5N					40.0N	38.3N		34.1N	32.5N	40.8N				36.5N	43.2N		34.5N	
F	Location	びその付近)	三陸洋	福島県沖		東南海	東南海	南海道	小勝沖					三陸が	新潟	長野県(松代群発)	和歌山県	日回離	十勝沖				長野県松代	根室半島沖		伊瓦半島沖	
	Date (UT)	(日本およ	1933 - 03 - 02	1938 - 11 - 05		1944 - 12 - 07	1944 - 12 - 07	1946 - 12 - 20	1952 - 03 - 04					1960 - 03 - 20	1964 - 06 - 16	1965 -	1968-03-29	1968 - 04 - 01	1968 - 05 - 16				1970 - 04 - 08	**1973-06-17		1974 - 05 - 08	

地震空白域にもとづく地震予知一大竹

continued)	Reference	42)	43)	59)	90)	31)	31)	31)	16)	80)	82)	31)	19)	19)	83)	(22	31)	19)	13)		31)	31)	31)	58)	14)	58)	25)	58)	58)
5	M_m	3.5	2.5	1.0		5	2	വ	6	4^{-5}		ы С	4-5	4-5			5	4-5	2				2	4	4.1	4	2.5	4	4
	$T_{ m s} _{ m yr}$	0.0033	0.6			several	ŝ		ſŎ										0.10					0.02		1.1	2.1	0.6 - 2.0	0.07
	T_{a} yr	0.0006	3.0				29		30								~		0.28					0.77		2.1	4.0	$1.6\ 3.6$	0.27
	T yr	0.0039	3.6			23	32	10	35	8	≥ 10		7.8	11.9			veral decades	8.1	0.38		veral decades	≥ 20	≥ 0.5	0.79	2.6	3.1	6.1	2.2 - 5.5	0.33
	$L_{ m km}$	2	11	2		290	400 - 500	350	160	40 - 500	500	800			300	170-330	80 se		50		S			290	80	280	26	240	300
	Μ	5.8	4.7	3.7		8.1	0.0	8.2	8.3	8.5	9.2		8.2	7.8	7.6			7.0	5.0		7.9	7.7	5.6		6.4		6.5		5.2
	λ deg	131.1E	135.2E	134.6E		133.3W	159.5 E	137.1W	148.5E	149.5 E	147.6W		147.4E	$163.3\mathrm{E}$	135.7W			149.1E	176.9W		123.0W	119.0W	120.5W		116.1W		118.4W		119.0W
	φ deg	33.0N	34.1N	35.0N		53.8N	52.8N	58.6N	44.5N	44.8N	61.1N		43.5N	56.0N	56.8N			44.9N	51.7N		38.0N	35.0N	35.9N		33.1N		34.4N		34.1N
	Location	阿蘇山北部	和歌山県	兵庫県安富町	地震带北部)	Queen Charlotte Is.	Kamchatka	Southeast Alaska	Itrup	ltrup	Alaska		Itrup	Kamchatka	Sitka			Kurile	Central Aleutian	ルニア)	San Fransisco	Kern County	Parkfield		Borrego Mountain		San Fernando		Uxnard
	Date (UT)	1975 - 01 - 23	*1977-08-06	*1977-09-30	(環太平洋	1949 - 08 - 22	1952-11-04	1958 07-10	1958-11-06	1963 - 10 - 13	1964 - 03 - 28		**1969-08-11	1971-12-15	**1972-07-30			1976 - 01 - 21	1976-02-22	$(\mathcal{H} \cup \mathcal{H})$	1906 - 04 - 18	1952-07-21	1966 - 06 - 28		1968 - 04 - 09		1971 - 02 - 09		1973-02-21

										(continued)	
Date (UT)	Location	ω deg	λ deg	М	$_{\mathrm{km}}^{L}$	T yr	T_a yr	${T_{eta}\over{ m yr}}$	M_m	Reference	s ~~
(メキシ:	コ・中米)										
1964 07 30	Nicaragua	11.1N	86.2W	6.0	380	0.8	0.6	0.2	4.5	57)	
1965-08-23	Oaxaca, Mexico	16.3N	95.8W	7.3	270	1.9	0.9	1.0	4.5	57)	
1965-12-06	Off coast of Mexico	19.0N	107.1W	6.8	290	1.9	0.6	1.3	4.5	57)	
1967 - 10 - 03	Costa Rica	10.9N	85.9W	6.5	280	2.2	1.2	1.0	4.5	57)	
1968-08-02	Oaxaca, Mexico	16.6N	97.7W	7.1	190	1.8	1.7	0.04	4.5	57)	
1970 - 04 - 29	Chiapas, Mexico	14.5N	92.6W	7.3	220	1.6	1.1	0.4	4.5	57)	
						7.3			4^{-5}	(61	
1970 - 08 - 12	Nicaragua	12.0N	86.5W	6.3	360	1.3	0.7	0.6	4.5	57)	
1972-12-23	Nicaragua	12.4N	86.1W	6.2	220	0.9	0.6	0.2	4.5	57)	
1973 01 30	Michoacan, Mexico	18.5N	103.0W	7.5	420	2.0	1.9	0.1	4.5	57)	
$1973 04^{-}14$	Costa Rica	10.7N	84.8W	6.5	250	1.2	1.2		4.5	57)	
1974-02-28	Costa Rica	9.3N	84.1W	6.2	380	2.1	0.9	1.2	4.5	57)	
**1978-11-29	Oaxaca, Mexico	16.1N	96.5W	7.8	270	5.5	5.1	0.4	4.5	present paper	
(南	*)										
1960 - 05 - 22	Chile	39.5 S	74.5W	9.5		\geq 55	≥ 55	0.004		(19	
					1000	10	10	0.004	5.8	31)	
1970 - 12 - 10	Peru-Ecuador border	4.0S	80.7W	7.6		5.5			4-5	19)	
(1)	国)										
1668 07 25	山東省郯城一宮県	35.3N	118.6E	8.5	800	13			4.7	93)	
1830-06-12	河北省磁県	36.4N	114.2E	7.5	650	80			5.0	93)	
1888-06-13	渤海	38.5N	119.0E	7.5	700	6			5.0	93)	
1937-08-01	山東省荷沢	35.2N	115.3E	7	400	11			4.7	93)	
1944 - 09 - 27	新彊烏恰	39.0N	73.5E	7.0	210				4.0	75)	
1949-02-23	/ 幹台	41.0N	83.5E	7.3	300				4.0	75)	
1955 - 04 - 15	/ 急拾	39.5N	74.3E	7)	020				0	76)	
		39.9N	74.7E	7 5	007				4.0	(61	
1966-03 22	河北省邢台	37.6N	115.2E	7.2	600	4.4			4.7	93)	

地震空白域にもとづく地震予知一大竹

									(nonininan)
Location	φ deg	λ deg	М	$L_{ m km}$	Tyr	T_a yr	$T_{_{m g}}$ yr	M_m	Reference
南省中 甸	27.5N	100.1E	6.4	160				3.0	75)
湾省	22.7N	121.5E	6.8	100				4.0	75)
范	38.3N	119.4E	7.3	600	8			4.7	93)
南省通統	24.1N	102.5 E	7.5	105				5.0	75)
加制 "	23.1N	100.8E	6.1	140				3.0	75)
印川省大邑	30.6N	103.0E	6.0	115				3.0	75)
言南省普洱			(7.2)	184				4.0	75)
這边			(0.9)	140				4.0	75)
强何坪	40.3N	79.0E	5.9	180				3.0	75)
/ 精河	44.1N	83.6E	5.6	150					75)
引川省南坪	33.0N	104.0E	6.1	134				3.0	75)
言南省普洱	23.1N	101.1E	6.4	148				3.0	75)
該寧省海城	40.6N	122.6E	7.4	360	17			4	75)
				450	ŋ			4.7	93)
闫 南省竜陵	24.6N	99.0E	le.9	000				7	(10
	24.5N	98.7E	7.0∫	2002				4	(10
ssam			7.8		23			7.0	34)
ssam	26.0N	91.0E	8.7		28			7.0	34)
ssam	24.5N	91.0E	7.6		19			6.8	34)
ssam			7.1		D D			6.8	34)
rssam	28.5N	94.0E	7.9		17			6.2	34)
ssam	28.5N	96.5E	8.6		≥ 30			6.2	34)
ssam			6.7		8			6.2	34)
ssam			6.7		5-6			4.8	34)
或)									
entral Baykal	52.6N	107.1 E	6.8	450	≥ 7.7			3.5	(2
ew Zealand	44.6S	167.6E	9.9	02	7.4			4.6	14)
umania	45.8N	26.8E	6.4		8.3			4-5	38)

(表3注記)

- *印を付した地震は、地震発生前に空白域の存在が確認されていたと報告されているもの、そのうち、地震の発生を予測した事前の論文があるものを**印で示す。
- (2) 震央位置は、原則として、1896年までは原論文、1897~1964年は Duda (1965)の表、1965~1978 年は U.S. Geological Survey の "Preliminary Determination of Epicenters" (PDE) による、こ れらに無い地震は、気象庁の「地震月報」、中国科学院地球物理研究所(1974)の「中国大地震簡略日 録」などの資料によって補った。
- 3) マグニチュードMの出典は上記 2) に準拠するが、1904年以後の巨大地震については米倉(1978)の「世界の巨大地震カタログ(1904—1976)」の Mw, PDE による場合は M*を優先して採用している、括弧内の数値は、群発地震の総放出エネルギーに相当するマグニチュードとして原論文に示されているものである。
- 4) Lは空白域の長径(km)で、原論文中の図から筆者が読み出したものが多い.空白域の時間的拡大 を主張する田中・他(1979)の場合は、拡大前・後の値が共に示されている.
- 5) **T**は地震空白現象が始まってから主震が発生するまでの期間(年)で、原論文中の図や記述から筆 者が算出したものが多い、地震空白期間(α stage)と地震活動復活期間(β stage)とが報告されて いる場合にはそれらの年数を T_n, T_n として示した。
- 6) Mmは、地震空白域の同定に用いられた地震の最小マグニチェード、またはその概略推定値を示す。但し、Mmが用いられた地震のうち最も小さいものを指すのか、完全に網羅されている地震の最低レベルを指すのか不明な場合が少くない。市川(1976)は地震放出エネルギー、岡田(1978)はおもに有感地震回数のデータによっている。

7) 出典番号は巻末の参考文献に対応する.

に,(巨)大地震のギャップ,震源移動など他の考察によって事前予測されたものは含んでいない.

地震空白域の認定基準は、一般にあいまいかつ主観的である.表3に見るように、同一の 地震に対して、別個の研究者が相当に異なるL(空白域の長径)やT(先行時間)の値を与 えていることが多い.ただ、これが必ずしも主観の相違だけに起因するのではないことは次 節で述べる.

4.2 地震空白現象の統計的検討

現在までの研究成果から、地震空白域のひろがり、先行時間などに何らかの規則性ないし 特徴が見出されるだろうか.表3に記載されているデータにもとづいて検討を行なってみよ う.以下の議論において、同一の地震に対して複数の研究結果が示されている場合には、そ れぞれ独立のデータとして取扱う.また、地震群のマグニチュードは、log *E*=1.5*M*+11.8 (Richter, 1958; 但し原著に11.4とあるのは11.8のミスプリント)に従って1個の地震の相 当マグニチュードに換算した値を用いることにする.

(1) 地震空白域の長径L

地震マグニチュードMに対して空白域の長径 L (km) をプロットしたものを図22に示す. 各データ点は、プレート境界地震、プレート境界付近(島弧内陸部など)地震、プレート内 地震の3種に区別して表示してある.図中の直線Uは、余震域の長径 l (km) とMとの関係



- 図22 主震のマグニチュードと地震空白域の長 径との関係.○:ブレート境界地震,⊕ :ブレート境界付近地震,●:ブレート 内地震. 直線 AW, U については木文参 照.
- Fig.22 Plot of linear dimension of seismic gap against magnitude of a main shock. Open circle: Inter-plate earthquake. Circle with cross: Earthquake near plate boundary. Solid circle: Intra-plate earthquake. See the text for AW and U.

を示す(0)式,直線AWは,Kondratenko and Nersesov (1962)のデータにもとづいて, Anderson and Whitcomb (1975)が作った 地震前兆出現域長径 $L(\text{km}) \ge M \ge 0$ 関係式:

 $\log L = 0.26M + 0.46$

(16)

を示したものである.

データ点のばらつきは非常に大きく、 $M \ge L$ の間にわずかに正の相関が認められるだけである。 直線 AW は、地震空白域のLについてもおよその目安(±1桁ぐらいの精度で) となるように見える。しかし、このように大きくばらついたデータからM、L間の定量的な関係を議論することは実際上無意味である。従って、Lから来たるべき地震のMを予測することは、一般には困難である。しかし、データのばらつきの中には、地震発生場の性質のちがいがかなり反映されているように見える。例えば、 $M \ge 7$ の大地震についてみると、プレート内地震のLはプレート境界地震に比べて数倍大きい。世界中のデータを一括解析するのではなく、範囲を特定の地域に限定すれば、データの集積を待って統計的に有意な $M \sim L$ 関係を見出すことが可能かもしれない。

図22で特に注意したいのは、ほとんどすべてのデータ点が、直線Uの付近またはその上方 に広く分布していることである。地震空白域の大きさは、かつて考えられていたようにいつ でも主震の破断域に一致するわけではなく、linear dimension にして主震破断域の数倍から 10倍に及ぶこともめずらしくない。1978年Oaxca地震に先行した空白域は、そのもっとも確 実な事例である。空白域が大きく現われるのは、何も中国の地震だけに限った現象ではない (例えば表1を見よ)。興味深いことに、空白域と主震破断域との大きさのひらきは、Mが増 大するにつれて小さくなり、世界最大級の地震に当る $M \sim 9.5$ あたりで両者がほぼ一致する 傾向が見られる。なお、直線Uよりずっと下方にブロットされているM = 5.8、6.3の両地震 は、1975年阿蘇山北部地震および1965年に始まった松代群発地震であって、空白現象又は地 震白体がやや特殊なものである。 (2) 地震空白現象の先行時間T

図23は、Mと地震空白現象の先行時間(空白現象が始まってから主震が発生するまでの時間) T(単位:年)との関係を示したものである。Mと log T との間にはかなりはっきりした正の相関関係が見られる。Mと地震前兆現象先行時間との間には、いろいろな研究者によって式22~650のような回帰式が見出されている。このうち、もっとも豊富なデータにもとづく傾式は、図に直線Rで示したように、地震空白域のM8以下の部分のデータと大変良く調和している。式(15)の導出に当っては、従来のマグニチュードスケールがM8あたりで飽和し始めることを考慮していないので、M8以上の領域でデータと系統的なずれを生じているのはやむをえない。地震空白現象の先行時間が、多種多様の地震前兆現象を代表する65歳としていることを強く示唆する。

図23のデータに機械的に直線を当てはめてM上の log T の回帰係数を求めると,

 $\log T = 0.39M - 2.10 \ (T: year) \tag{17}$

又は

 $\log T = 0.39M + 0.46 \ (T: day) \tag{18}$

を得る.これを図23に直線 SG で示す.計算には、Tの下限しかわからないデータ(図の矢印付きの点)は含めていない.(時式と傾式を比べると係数がかなり異なっているが、図23から明らかなように、両者はデータのもっとも多い $M=6\sim 8$ あたりでよい一致を示している.後者の方が緩勾配になっているのは、巨大地震領域まで拡張されたマグニチュードスケールを用いていること、M=4.7の二つのデータ点(T=3.2, 3.6年)に回帰直線が引き寄せら

- 図23 主震のマグニチュードと地震空白現象の先行時間との関係.地震種別の記号は図22に同じ. Rは力武(1978)による(15)式に対応する直線である. SGは地震空白域のデータによって新らたに求められた回帰直線(17)式で,マグニチュードの標準偏差(1.06)の範囲を破線で示す.
- **Fig.23** Plot of precursor time of seismic gap against magnitude of a main shock. R: Rikitake's (1978) curve for magnitude versus precursor time relation; formula (15). SG: Least square fitting to the plotted data; formula (17). Broken lines bound the range of the standard deviation in magnitude, ± 1.06 . See the legend of Fig. 22 for the symbols.



- 99 -



1.1

図24 主震のマグニチュードとβ stage の先 行時間との関係.地震種別の記号は図 22に同じ.

Fig.24 Plot of precursor time of β stage against magnitude of a main shock. See the legend of Fig.22 for the symbols.

れていることが影響している. これらの事情 を考慮に入れれば、データ点のばらつきの大 きさからみて、SG が本質的にRと異なるも のとは考えられない. なお、SG を用いてTから主震のマグニチュードを推定する場合に は、通常、±1程度の不確かさは免れない.

M~T関係においても、プレート内地震の Tがやや長い方に偏るなど若干の地域差が認 められる.しかし、前項のM~L関係の場合 ほど顕著ではない.回帰直線から大きく離れ た二つの小地震は、1968年および1977年の和 歌山付近の地震(いずれもM=4.7)である.

(3) β stage について

空白域内での地震活動の復活(β stage)が 報告されている地震について、 $M \ge \beta$ stage の先行時間(地震活動の復活が始まってから 主震発生までの時間) T_{β} (単位:年)との関 係を示したのが図24である. T_{β} は、約1日 から5年の広範囲に分布しており、Mとの相 関はほとんど認められない. β stage の活動 としたものの一部は、明らかに直接の前震活

動とみなせるものである.しかし. T[®] の分布範囲は,前震活動の先行時間が数時間~数カ 月に集中している(Rikitake, 1976)のとは様相を異にしている.一般の前震活動以外に, より長期的な地震活動の復活現象が存在することは疑いない.

地震空白域を伴った81個の地震のうち、 β stage の活動が報告されているものは28個(35%)である. そのほかにも、原論文の図から β stage が認められるものが若干ある. 他方、 β stage の存在がはっきりと否定されている地震は、1972年の Sitka 地震 (Kelleher and Savino, 1975) など少数のものに限られている. 今後、 β stage の有無およびその性質につ いて、より綿密な調査研究が望まれる.

(4) LとTの関係

今までは、L、T それぞれ独立にM との統計関係を検討してきたが、LとTの適当な combination を作ったらどうなるだろうか。もっとも簡単な $T \cdot L^p$ の場合について調べて みよう。図25は、p = 6 - 60範囲で変化させて、 $\log(T \cdot L^p)$ とMとの相関係数の変動 を見たものである。計算に使用したのは、L、T共に与えられているデータセット49組であ

る.図に矢印で示すように、相関係数は p=1.0のところで明瞭な極大値を示す.すなわ ち、Mとの相関は、 $\log(L \cdot T)$ がもっとも高 い.因みに、Mと $\log T(p=0)$ 、Mと $\log(L \cdot T)$ (p=1)の相関係数は、それぞれ、0.664、 0.735である.

 $P = L \cdot T$ を、地震空白域の特性を表わす新 らたなパラメターとして、Mに対してプロッ トすると図26のようになる。最小二乗法によ ってM上の log P の回帰直線を求めると、

log(*L*·*T*)=0.64*M*-1.63 (19) を得る.

同一の地震に対して,別々の研究者が異なるL,T値を与えているものが6例ある.T









図25 りをパラメターとする, Mと log(T・L^P) との相関係数の変化.両者の相関は p= 1.0の時にもっとも高い.

Fig.25 Correlation coefficient between M and log $(T \cdot L^p)$ as a function of p. The highest value is found at p=1.0.



図27 同一の地震に対して異る先行時間(T), 空白域長径(L)が与えられている6個の 地震.線分で結ばれたデータ点は同じ地 震に属するものであることを示す.



~L面上にこれらの値をプロットしたのが図27である.線分で結ばれているデータ点は,同 一の地震のものであることを示す.この図から、LとTとは逆相関の関係にあって、Tを短 かくとればLが大きく、Tを長くとればLが小さく現われる傾向があることがわかる.各線 分の勾配は、平均すると-1に近い.従って、同一の地震に対して相当に異なるL、T値が 与えられている場合でも、P=L·Tは比較的に安定している.

 $P=L\cdot T$ が地震空白域の安定したパラメターとなることは、空白域の時間的拡大を仮定すれば無理なく説明できる.いま、Lは終始一定の値ではなくて、時間tの経過とともに

$$L(t) = P/(t_e - t) \tag{20}$$

で拡大するものとする.ここで、 t_a は主震発生の時刻である.地震空白現象がある時刻 t_a に始まったと判断されたならば、空白域の linear dimension は $L(t_a)$, 先行時間は t_a-t_a と認定されるであろう. 図式が成り立つならば、 t_a をどこに選んでも、両者の積は一定値Pとなる.

田中・他(1979)は、いくつかの大地震について、Lが時間とともに拡大した実例を示した。例えば、1968年十勝沖地震の場合には、はじめ数十kmだった空白域が主震 500日ぐらい前から急速に拡大し、最後は数百kmにも達したという。われわれの結果は、少なくとも定性的には、彼らが見出した地震空白域拡大現象と調和的である。中国の地震に関しては、空白域面積と先行時間との積がMと良い相関を示す(式(5))ことが報告されている。しかし、地震空白域の拡大がどの程度普遍的な現象なのか、まだ十分確かめられているわけではない。今後の研究が待たれる。

4.3 地震空白域の定性的特性と関連現象

Kelleher and Savino (1975) は、地震空白現象が単に前回の大地震の余震が終熄したこと を示す「消極的な」現象にすぎないのか、それとも次回の大地震の接近に伴う地殻の状態の 変化を告げ知らせる「積極的な」地震前兆現象なのか、将来に残された研究課題である、と して問題を提起した。今日までの研究結果は、後者こそが地震空白域の本質であることを 指し示している。1978年の Oaxaca 地震に典型的に見られたように、地震空白域はある時期 から突然に現われる。余震終熄に伴う地震活動の低下であれば、空白域は、余震の減衰と歩 調を合わせて徐々に(大地震の余震ならば数カ月から数年かかって)その姿を現わすはずで ある。余震終熄に伴う地震活動の低下という現象はたしかに存在するが、これはやがて常時 地震活動の再開によって解消される。勝又(1978、1979)が1952年、1968年両十勝沖地震の 前後数十年のサイスミシティ変化から明らかにしたように、この常時地震活動を中断して、 新らたに前兆的な地震空白現象が始まるのである。従って、地震空白域は、前回の地震の名 残りではなく、将来の地震を準備する過程で何らかの必然性をもって出現するものと考えね ばならない。

図2,図20で見たように、地震空白域の縁はかなり画然としている。これは、近年良質か

つ多量の地震データが活用できるようになってわかってきたことである. 海溝部の大地震に よく見られることであるが,空白域が活発な地震活動に縁どられて,いわゆる地震活動のド ーナツ化現象(Mogi, 1969a)を呈する場合すらある. 1964年アラスカ地震においては,空白 域の南西端が海溝軸に直交する構造帯で画され,この付近で中小地震の著しい活動が発生し た (Kelleher and Savino, 1975). これらの事実は,大地震の準備・発生が基本的には周囲 から独立したあるブロックの中だけで行なわれることをうらづけている. Mogi (1969b)が 「大規模破壊は,既存の構造上の不連続線で境された単一もしくは複合ブロックで起こる」 と定式化して以来,この地震ブロックの概念は,Sykes (1971),南雲 (1973) など多くの研 究者によって発展させられている.

図28の「半連結ブロックモデ ルーは、地震ブロックの考え方 に立って, 海溝部大地震の準備 過程におけるサイスミシティの 変化を模式的に示したものであ る. (a)段階では,海側からの圧 縮力に対応して大陸リソスフェ ア内に常時地震活動が引き起こ される。(b)段階では,地震空白 域が形成されるとともに, 隣接 ブロックとの間の「切り離し」 が進行し、ブロック境界付近の 地震活動が高まる. これに対応 する発震機構は strike-slip 型と なるはずである。(c)段階は,空 白城内での地震活動の復活(8 stage) を示す. β stage の地震 が将来の主震震央付近に集中す る事実から見て,この活動は, プレート境界の破断が部分的に 始まったことを示すものではな いかと考えられる、もしそうな らば,発震機構は主震と同じ thrust type となるはずである. 今後の地震空白域の研究では,



図28 大陸・海洋プレート境界における巨大地震発生の半連結ブロックモデル.●印は大陸プレート内,×印はプレート境界での中小地震の発生を示す.発震機構は, 黒が押し,白が引きで,下半球投影で示されている.

Fig.28 The weakly linked block model for the purpose to interpret premonitory seismicity change prior to a great earthquake in the subduction zone. A dot is an earthquake in the continental plate, and a cross is that on the plate interface. Large circles schematically show the focal mechanism predicted from the model (projection to the lower hemisphere; black and white portions indicate compression and dilatation, respectively).

-103 -

発震機構の変化も重視して行く必要がある. Stauder (1968) は、1965年 Rat Island 地震 (M_w =8.7)の余震の発震機構を詳しく研究し、余震域の東端付近に、ブロック境界の切り 離しを示すとみられる strike-slip 型の余震が発生したことを報告している. ブロック境界に おいては、水平ずれ断層運動の往復くり返しのために、Mogi (1969b), Stoiber and Carr (1973), Carr *et al.* (1973) らが明らかにしたように、地形的・地質的な弱線が刻まれるこ とになる.

図28に示した地震ブロックが単一のものではなく、いくつかの副ブロックに分かれていれば、一つの副ブロックだけが破断することもありうる.その場合には、主震破断域よりも広い範囲に地震空白域が現われたことになる.

以上の考察においては、応力レベルがある閾値を越えると、地震発生が抑制され地震空白 となることを暗々裡に前提としている.しかし、地震発生抑制のメカニズムは依然として未 解決のままである. Scholz *et al.* (1973), Kelleher and Savino (1975) など岩石のディラ タンシー硬化による解釈があるが、地震発生のディラタンシー・ディフュージョン仮説その ものの再検討が追まられている現在、より慎重な検討が必要とされよう. 茂木 (1976)は、 地域的な応力が増大する過程で、局地的な応力集中が中小地震の発生で次々に解消され、応 力状態の平準化が進むという興味深い考え方を提唱している. 応力が平準化された段階では もはや中小の地震は起こることができず、あとはその地震ブロック全体が関与する大地震の 発生を待つばかり、ということになる.しかし、応力状態が一応平準化された後も、主震の 発生まで地域的な応力はさらに増大し続けるはずである.これが新らたに局地的な応力集中 を生み出すことにならないのか、疑問が残るところである.

地震空白域はたしかに普遍性の高い地震前兆現象であるが、1923年関東地震 (M_w =7.9) のように、逆に地震活動が活発化する中で発生した大地震 (Suyehiro and Sekiya, 1972) も ある. Utsu (1974) は、日本の太平洋側のサイスミシティパターン ($M \ge 6$)の研究から、 地震空白域が現われにくい地域があることを指摘 している、また、関谷 (1976)、Sekiya (1977)、Evison (1977) らが報告している主震発生はるか前の異常地震活動は地震空白現象 とどのように関係しているのだろうか.

地震空白現象のメカニズム解明にあたっては,前節で整理・分析した統計的な性質のみな らず,本節で論じた諸点にも注意を払わねばならない.

5. 結 論

これまでに前兆的な地震空白域(第2種地震空白域)が報告されている地震又は地震群は 合計81個,論文にして約40篇にのぼる.これらの研究成果を分析した結果次のことが明らか になった.

(1) 地震空白域の長径 L(km) は主震破壊域と同程度から10倍程度で、地域による差異が

著しい。

- (2) 地震空白現象の先行時間*T*(年)と来たるべき主震のマグニチュード*M*との間には,統計的に(加式の関係が成り立つ.
- (3) Mは log(L·T) との間に高い相関を示し、両者は統計的に(19式で結ばれる.このこと は、地震空白域が時間の経過とともに拡大することを示唆する.
- (4) 地震空白現象が報告されている81個の地震(群)のうち、少なくとも28個(35%)に 空白域内での地震活動の復活(β stage)が認められる。

地震空白域,および(巨)大地震のギャップの研究にもとづいて,1978年のメキショ南部 Oaxaca 地震(M=7.8)を予測することに成功した.長期予知の内容は,表2に実際の地震 の震源要素と比較して示したように,震央位置,規模ともにかつてない正確なものであっ た.この成果はメキシコ・中米地域の地震空白域の特性を深く究明することによってもたら されたものである.地震予知研究においては,地震発生の一般法則を解明する研究と同時 に,場所ごとの地域的特徴を明らかにする研究が欠くべからざるものであることが改めて明 確に示された.「地域的特徴」という現象論的概念にはっきりした物理的な像を与える作業 ——石橋(1978)の言う「サイスモテクトニクスの研究」——は,現在の地震予知研究でと くに重視されるべき研究方向である.

最近15年間に発生した浅発大地震(M≥7)のうち,前兆としての地震空白域が報告されて いるものが約12%にも達する.さまざまな地震前兆現象の中でも,地震空白域がとくに予知 に有効と考えられるゆえんである.しかし,地震空白域の同定方法は研究者によって異な り,かつかなり任意的である.また,浅発大地震のうち約40%は,まだまったく研究対象と なっていない地域で発生している.全世界的に,より系統的な手法で調査研究を進めること が望まれる.

地震空白現象は、地震前兆としてのサイスミシティ変化の重要な側面を代表しているとは いえ、やはりひとつの側面を把えているにすぎない.図28に示したサイスミシティ変化の半 連結ブロックモデルは、他の関連現象、とくに発震機構のパターンの変化を研究するための 作業仮説として有益であろう、観測・理論の両面から地震空白現象の解明が進み、地震予知 にさらに大きく貢献することを期待したい.

謝 辞

本研究を進めるにあたって、University of Texas のMarine Science Institute 滞在中に G.V. Latham 教授, T. Matumoto 教授と行なった討論および研究がきわめて有益であっ た. 両教授は, 共同研究の成果を本論文に採り入れることを快諾して下さった. 国立防災科 学技術センターの浜田和郎・石田瑞穂両博士は研究上有益な議論をして下さった. 計算およ

-105-

び図面ブロットは一部同センターの笠原敬司・立川真理子両氏の手をわずらせた. これらの 方々に深く感謝中上げる.

本研究において格別のご指導ご助言を下さった萩原尊礼東京大学名誉教授,浅田敏東京大 学教授,茂木清夫東京大学教授に衷心より感謝を捧げる.

参考文献

- Abe, K. (1977): Some problems in the prediction of the Nemuro-oki earthquake. J. Phys. Earth, 25, S261-271.
- 阿部勝征(1978): 近代的地震学, 岩波講座地球科学8, 地震の物理(金森博維編), 岩波書店, 275pp, 89-167.
- Allen, C. R., P. St. Amand, C. F. Richter and J. M. Nordquist (1965): Relationship between seismicity and geologic structure in the southern California region. Bull. Seism. Soc. Amer., 55, 753-797.
- Anderson, D. L. and J. H. Whitcomb (1975): Time-dependent seismology. J. Geophys. Res., 80, 1497-1503.
- Arakawa, Y. and S. Suyehiro (1970): Regional seismicity before the Matsushiro earthquake swarm. *Paper. Meteor. Geophys.*, 21, 33-44.
- 6) 浅田敏(1972): 地震——発生・災害・予知——, 東京大学出版会, 242pp.
- Borovik, N. S., L. A. Misharina and A. A. Treskov (1971): On the possibility of strong earthquakes in Pribaykalia in the future. *Izv. Earth Phys.* (Engl. transl.), 1971, no. 1, 13-16.
- Brune, J. N. and C. R. Allen (1967): A micro-earthquake survey of the San Andreas fault system in southern California. Bull. Seism. Soc. Amer., 57, 277-296.
- Burk, C. A. (1965): Geology of the Alaska Peninsula: Island arc and continental margin. Geol. Soc. Amer. Mem., 99, 147.
- Carr, M. J., R. E. Stoiber and C. L. Drake (1973): Discontinuities in the deep seismic zones under the Japanese arcs. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 84, 2917-2930.
- 11) 中国科学院地球物理研究听(編)(1974): 中国大地设簡略日録. 中国地震考察団講演論文集,地 震学会, 67-83.
- Duda, S. J. (1965): Secular scismic energy release in the eircum-Pacific belt. *Tectonophys.*, 2, 409-452.
- Engdahl, E. R. and C. Kisslinger (1977): Seismological precursors to a magnitude 5 earthquake in the central Aleutian Islands. J. Phys. Earth, 25, S243-250.
- Evison, F. F. (1977): Fluctuations of seismicity before major earthquakes. Nature, 266, 710-712.
- 15) Fedotov, S. A. (1965): On regularities in distribution of strong carthquakes in Kamchatka, Kurile Islands and northeastern Japan. *Trudy Inst. Fiz. Zemli*, **36** (203), 66–93 (in Russian).
- Fedotov, S. A. (1969): Seismicity of the focal region of the catastrophic Itrup earthquake of November 6, 1958, and seismic forecasting. *Izv. Earth phys.* (Engl. transl.), 1969, no. 12, 1-6.
- Fedotov, S. A., A. A. Gusev and S. A, Boldyrev (1972): Progress of earthquake prediction in Kamchatka. *Tectonophys.*, 14, 279-286.

地震空白域にもとづく地震予知一大竹

- 18) Gupta, H. K., V. P. Singh and I. Mohan (1979): Earthquake prediction research in Assam, North East India. Abstract, Internat. Symp. Earthq. Prediction, Paris, 2-6 April 1979, 13.
- Habermann, R. E. and M. Wyss (1977): Seismicity patterns before five major earthquakes. EOS, 58, 1194.
- 20) Hamada, K. (1979): Prediction-oriented seismology. Current Research in Earthquake Prediction (ed. T. Rikitake), Center for Academic Publications Japan, Tokyo (in press).
- 21) 市川政治 (1976): Seismicity gap と巨大地震, 地震予知研究シンポジウム, 地震学会, 91-96.
- 22) 伊神煇・安久勉・青木治三(1972):阿寺断層付近の低い地震活動. 地震2, 25, 232-242.
- 23) 井上字胤(1965): 新潟地震前における震央付近および隣接地域の地震活動について、験震時報, 29, 139-144.
- 24) 石橋克彦(1978): 地震予知の実際的戦略と東海地震予知. 科学, 48, 529-536.
- 25) Ishida, M. and H. Kanamori (1977): The spatio-temporal variation of seismicity before the 1971 San Fernando earthquake, California. *Geophys. Res. Let.*, 4, 345-346.
- 26) Ishida, M. and H. Kanamori (1978): The foreshock activity of the 1971 San Fernando earthquake, California. Bull. Seism. Soc. Amer., 68, 1265-1279.
- 27) 勝又護(1978):大地震前・後の地震活動の空白域について(1)-1952年十勝沖地震一.地震2, 31,469-470.
- 28) 勝又護(1979):大地震前・後の地震活動の空白域について(I)-1968年十勝沖地震一,地震2, 32, 103-104.
- Kelleher, J. (1970): Space-time seismicity of the Alaska-Aleutian seismic zone. J. Geophys' Res., 75, 5745-5756.
- Kelleher, J. (1972): Rupture zones of large South American earthquakes and some predictions. J. Geophys. Res., 77, 2087-2103.
- Kelleher, J. and J. Savino (1975): Distribution of seismicity before large strike slip and thrust-type earthquakes. J. Geophys. Res., 80, 260-271.
- 32) Kelleher, J., L. Sykes and J. Oliver (1973): Possible criteria for predicting earthquake locations and their application to major plate boundaries of the Pacific and Caribbean. J. Geophys. Res., 78, 2547-2585.
- Keylis-Borok, V. I. and L. N. Malinovskaya (1964): One regularity in the occurrence of strong earthquakes. J. Geophys. Res., 69, 3019-3024.
- 34) Khattri, K. and M. Wyss (1978): Precursory variation of seismicity in Assam area, India. Geology, 6, 685-688.
- 35) 気象庁地震課・地震活動検測センター(1975): 房総南東沖の地震活動, 地震予知連絡会会報, 13, 23-25.
- 36) Kondratenko, A. M. and I. L. Nersesov (1962): Some results of the study on change in the velocity of longitudinal wave and relation between the velocity of longitudinal and transverse waves in a focal zone. *Trudy Inst. Fiz. Zemli*, **25** (192), 130-150 (in Russian).
- 37) Lukk, A. A. and V. S. Ponomarev (1972): Trends in the variation of the seismic background in the course of time. *Izv. Earth Phys.* (Engl. transl.), 1972, no. 5, 3-11.
- 38) Mârza, V. I. (1979): The March 4, 1977 Vrancea earthquake seismic gap. Bull. Seism. Soc. Amer., 69, 289-291.
- 39) 松田時彦(1976):活断層と地震予知. 地震予知研究シンポジウム, 地震学会, 194-202.
- 40) 松沢武雄(1964):長年にわたる地震発生の変化について、東京家政学院大学紀要, 4, 115-117.
- 41) Minster, J. B. and T. H. Jordan (1978): Present-day plate motions. J. Geophys. Res., 83,

5331-5354.

- 42) 三浪俊夫・久保寺章(1977):阿蘇カルデラ北部地震(1975年)の活動形式――震源移動とその解 釈――. 地震2,30,73-90.
- 43) Mizoue, M., M. Nakamura, Y. Ishiketa and N. Seto (1978): Earthquake prediction from micro-earthquake observation in the vicinity of Wakayama City, northwestern part of the Kii Peninsula, central Japan. J. Phys. Earth, 26, 397-416.
- 44) Mogi, K. (1968a): Migration of seismic activity. Bull. Earthq. Res. Inst., 46, 53-74.
- Mogi, K. (1968b): Development of aftershock areas of great earthquakes. Bull. Earthq. Res. Inst., 46, 175-203.
- Mogi, K. (1968c): Sequential occurrence of recent great earthquakes. J. Phys. Earth, 16, 30-36.
- Mogi, K. (1968d): Some features of recent seismic activity in and near Japan (1). Bull. Earthq. Res. Inst., 46, 1225-1236.
- Mogi, K. (1969a): Some features of recent seismic activity in and near Japan (2). Bull. Earthq. Res. Inst., 47, 395-417.
- Mogi, K. (1969b): Relationship between the occurrence of great earthquakes and tectonic structures. Bull. Earthq. Res. Inst., 47, 429-451.
- Mogi, K. (1974): Active periods in the world's chief seismic belts. *Tectonophys.*, 22, 265–282.
- 51) 茂木清夫(1976):地震活動と地震予知. 地震予知研究シンポジウム, 地震学会, 203-214.
- 52) Molnar, P. and L. R. Sykes (1969): Tectonics of the Caribbean and Middle America regions from focal mechanisms and seismicity. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **80**, 1639–1684.
- 53) 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,地震研究 所, 273-291.
- 54) Ohtake, M. (1970): Micro-structure of the seismic sequence related to a moderate earthquake. Bull. Earthq. Res. Inst., 48, 1053-1067.
- 55) Ohtake, M. (1976): Search for precursors of the 1974 Izu-hanto-oki earthquake, Japan. Pure Appl. Geophys., 114, 1083-1093.
- 56) Ohtake, M., T. Matumoto and G. V. Latham (1977a): Seismicity gap near Oaxaca, southern Mexico as a probable precursor to a large earthquake. *Pure Appl. Geophys.*, **115**, 375-385.
- 57) Ohtake, M., T. Matumoto and G. V. Latham (1977b): Temporal changes in seismicity preceding some shallow earthquakes in Mexico and Central America. *Bull. Internat. Inst. Seism. Earthq. Eng.*, 15, 105-123.
- 58) Ohtake, M., T. Matumoto and G. V. Latham (1978): Patterns of seismicity preceding earthquakes in Central America, Mexico, and California. Proc. Conference, Methodology for Identifying Seismic Gaps and Soon-to-Break Gaps, U. S. Geological Survey Open-file Report, 78-943, 585-610.
- 59) 尾池和夫(1977):山崎断層における地震活動の予測結果について、地震学会講演予稿集,昭和52 年度, no.2, 88.
- 60) 岡田弘 (1978): 巨大地震発生に先立つ定常地震活動の低下――離れた大地震でトリガーされた例 ――. 北海道大学地球物理学研究報告, 37, 43-51.
- Plafker, G. and J. C. Savage (1970): Mechanism of the Chilean earthquake of May 21 and 22, 1960. Geol. Soc. Amer. Bull., 81, 1001-1030.
- 62) Richter, C. F. (1958): Elementary Seismology. Freeman, San Fransisco, 768 pp.

- 63) Rikitake, T (1976): Earthquake Prediction. Elsevier, Amsterdam, 357pp.
- 64) 力武常次(1978):地震予知. 岩波講座地球科学8, 地震の物理(金森博雄編), 岩波書店, 275pp, 169-210.
- 65) Sadovsky, M. A., I. L. Nersesov, S. K. Nigmatullaev, L. A. Latynina, A. A. Lukk, A. N. Semenov, I. G. Simbireva and V. I. Ulomov (1972): The processes preceding strong earth-quakes in some regions of middle Asia. *Tectonopys.*, 14, 295-307.
- Scholz, C. H., L. R. Sykes and Y. P. Aggarwal (1973): Earthquake prediction: A physical basis. Science, 181, 803-810.
- 67) 関谷溥(1976): 地震発生前の地震活動と地震予知. 地震2, 29, 299-311.
- Sekiya, H. (1977): Anomalous seismic activity and earthquake prediction. J. Phys. Earth, 25, S85-93.
- 69) 関谷薄・久本壮一・望月英志・小林悦夫・栗原隆治・徳永規一・岸尾政弘(1974):1973年根室半 島沖地震と北海道南方海域の巨大地震, 験震時報, 39, 33-39.
- 70) 関谷博・徳永規一(1974): 遠州灘周辺の地震活動について. 地震予知連絡会会報, 11, 96-101.
- 71) 関谷薄・徳永規一(1975): 遠州灘周辺の seismicity gap について. 験震時報, 39, 83-88.
- 72) 関谷薄・涌井仙一郎(1971): 関東南部の地震活動について. 地震予知連絡会会報, 6, 37-43.
- 73) Stauder, W. (1968): Mechanism of the Rat Island earthquake sequence of February 4, 1965, with relation to island arcs and sea-floor spreading. J. Geophys. Res., 73, 3847-3858.
- 74) Stoiber, R. E. and M. J. Carr (1973): Quaternary volcanic and tectonic segmentation of Central America. Bull. Volcanologique, 37, 304-325.
- 75) 許紹燮(1976):海城地震の地震活動の特徴.中国地震考察団講演論文集,地震学会, 27-41.
- 76) Suyehiro, S. and H. Sekiya (1972): Foreshocks and earthquake prediction. *Tectonophys.*, 14, 219–225.
- 77) Sykes, L. R. (1971): Aftershock zones of great earthquakes, seismicity gaps, and earthquake prediction for Alaska and Aleutians. J. Geophys. Res., 76, 8021-8041.
- Sykes, L. R. (1972): Seismicity as a guide to global tectonics and earthquake prediction. *Tectonophys.*, 13, 393-414.
- 79) 高木章雄(1978):小地震のおこり方.地震予知の方法(浅田敏編),東京大学出版会,264pp,57 -77.
- 80) 田中賢治・大内徹・三東哲夫(1979): 浅発大地震発生の前後における地震活動の空白域の形成パターン. 地震学会講演予稿集, 1979, no. 1, 24.
- 81) 唐吉陽(1978): 竜陵地震予報の根拠と前兆現象の時空特性について、1977年地震学会訪中代表団 報告集, 地震学会, 13-32.
- Tobin, D. and L. Sykes (1966): Relationship of hypocenters of earthquakes to the geology of Alaska. J. Geophys. Res., 71, 1659–1667.
- Tobin, D. and L. Sykes (1968): Seismicity and tectonics of the northeast Pacific Ocean. J. Geophys. Res., 73, 3821-3845.
- Utsu, T. (1961): A statistical study on the occurrence of aftershocks. *Geophys. Mag.*, 30, 521-605.
- 85) 字津徳治(1968): 北海道およびその周辺の地震活動.北海道大学地球物理学研究報告, 20, 51-75.
- 86) 宇津徳治(1970):北海道における最近の地震活動と観測状況.地震予知連絡会会報, 2, 1-2.
- 87) 宇津徳治(1972):北海道周辺における大地震の活動と根室南方沖地震について.地震予知連絡会 会報,7,7-13.

- 88) Utsu, T. (1974): Space-time pattern of large earthquakes occurring off the Pacific coast of the Japanese Islands. J. Phys. Earth, 22, 325-342.
- 89) Utsu, T. (1977): Possibility of a great earthquake in the Tokai district, central Japan. J. Phys. Earth, 25, S219-230.
- 90) 宇津徳治・関彰(1955): 余震区域の面積と本震のエネルギーとの関係. 地震2,7,233-240.
- 91) 和田博夫・岸本兆方(1974):跡津川断層附近における微小地震活動.地震2,27,1-9.
- 92) 渡辺史郎・飯田汲事(1970): 阿寺断層付近の地震活動. 地震 2, 22, 348-349.
- 93) 魏光興·林趾祥·朱宣久·赵玉海·赵興兰·侯海峰(1978): 華北地区大地震前地震的 围空区 特征. 地球物理学報, 21, 213-217.
- Wesson, R. L. and W. L. Ellsworth (1973): Seismicity preceding moderate earthquakes in California. J. Geophys. Res., 78, 8527-8546.
- 95) Whitcomb, J. H., J. D. Garmany and D. L. Anderson (1973): Earthquake prediction: Variation of seismic velocities before the San Fernando earthquake. *Science*, **180**, 632-635.
- 96) 米倉伸之(1978):世界の巨大地震カタログ(1904~1976).岩波講座地球科学8,地震の物理(金森博雄編), 263-270.

(1979年12月17日 原稿受理)