

地震 ジャーナル

26

1998年12月

- エッセイ 平田森三先生のこと ●有馬朗人
摩擦構成則に基づく地震発生サイクルシミュレーション ●平原和朗——1
東海地震のシミュレーションと予知への新たな取り組み ●吉田明夫——11
南極の巨大地震 ●神沼克伊——25
短期地震予知VAN法の評価 ●上田誠也
K. S. Al-Damegh/吉田 均——34
要石と大地の柱 ●大林太良——44
コラム 鹿島神宮の要（かなめ）石 ●編集部——51
電気を感覚する魚—ナマズ ●浅野昌充——52
地震と温泉 ●長瀬和雄——60
地震と建築物の安全性能 ●長能正武——70
連載：その8 地震・津波碑探訪 ●力武常次——80
地震予知連絡会情報 ●清水 洋/本谷義信——104
●書評——112
●執筆者紹介——117
●ADEP情報——120

地震予知総合研究振興会

ASSOCIATION FOR THE DEVELOPMENT OF EARTHQUAKE PREDICTION

平田森三先生のこと 有馬朗人

地震について体系的に学んだのは旧制東京大学の二年生のころ、「統計現象論」という講義においてであり、先生は寺田寅彦の愛弟子の平田森三先生であった。平田先生は有名な金米糖の角やガラスの割れ目の研究をされた方であった。又我々が学生であった1950年頃は、物理教室の中庭で時々「ドカン」と鉄砲のようなものを打っておられた。何の実験かと言うと鯨捕獲用の銚の効率を上げるためであった。当時の銚は尖端が鋭い方が鯨にささり易いと信じられていた。しかし実は鋭いとむしろささらず、鯨の表皮ではね返ってしまう。そこで銚の頭部をすぼと切って平にすると、鯨にささる可能性が高くなるというのである。こうして平頭銚が生れたのであった。

平田先生の「統計現象論」はまさに寺田寅彦の物の考え方の発展であった。すべての複雑な現象の中に何らかの法則性をみつけるにはどうしたらよいか、系統的に論じる面白い講義であった。勿論集めれば集める程どれも等確率で起こる現象が多い。平均してみれば何ら不思議でないことがしばしば起こる。実験の結果常識に反する現象が見つかったと大喜びで報告することがある。「面白い、大発見だ」と言う人々と、「いやおかしい、実験の誤差だ」と反論する人々が出る。そこで再実験が行われ、真偽が明らかになる、というのが科学の標準的な発展形態である。しかしその前に注意すべきことは、不思議な現象が測定回数が少な過ぎるためのばらつきではないかということである。実験回数を増加した結果、不思議な現象は消えてしまった、という場面に私自身も何回か直面したことがある。

平田先生は、さいころを振ってその目の出かたを記録すると、何か周期性があるように見えることがあることにも注意せよと教えて下さった。寺田寅彦も興味を持った疑似周期である。

平田先生の講義で初めて地震のことを学んだと冒頭に書いたが、その一つに地震波の周期をどうやって知るかということがあった。電子計算機が無かった頃の話である。その方法の根本的な仮定は、岩石の振動はばねのように調和振動であるということと、時々大きな外力が働き、この調和振動をこわすということであった。さらにこの外力は平田先生の口ぐせを借りれば「ばらんばらん」で時間平均をとればゼロになる、という仮定であった。

平田先生は講義の終りに試験ではなく、統計現象について何でもよいからレポートを出せと言われた。畏友阿部龍蔵（東大名誉教授）君は「パチンコ」について、私は「株価の変動」について論文らしきものを書いた。その論で地震波の分析法を株価の変動に応用したのであった。平田先生は丁寧に朱筆でなおして下さい、雑誌に投稿するようにと奨めて下さった。従っておれば私の第一論文になるところであったが、さぼっているうちに「高橋（浩一郎）さんが同じような論文を出していたよ」と平田先生が伝えてくださったので、わたしのレポートはついに机の中に眠ったままになってしまった。

摩擦構成則に基づく地震発生サイクルシミュレーション

コンピュータ地震ナマズの飼育法

平原和朗

はじめに

コンピュータ上で色々な生き物(疑似生物)を飼うのが、一時期流行していた。我が家でもパソコン上で熱帯魚を飼っていた(結構飼育に手間がかかり、いつの間にか見捨てられ、ハードディスクから削除される、という運命にはなったが)。かなり複雑そうに見える、こういった生物の成長過程は、様々にルール化されて、コンピュータ上でシミュレートされており、かなりうまくできていると感心したものである。

さて、地震を起こすコンピュータ地震ナマズを上手に飼育するには、どのようにすれば良いのだろうか? これが、本稿の中心課題である。

地震の発生を地殻内部に存在する既存のすべり面上での不安定すべりととらえ、実験室において岩石の急激なすべり過程を観測し、すべりの発生機構を解明するための摩擦実験が行われてきた(桑原, 1989)。これらの岩石実験から得られた摩擦の構成則に基づいて、プレート境界や活断層での地震断層運動をコンピュータ上で再現しようとする、地震サイクルの数値シミュレーションが、ここ数年盛んに行われるようになった(加藤, 1996)。

筆者は、すべり摩擦の実験や理論の専門家ではないが、実際に摩擦の構成則を適用して日本列島およびその周辺でのプレート境界や活断層で発生する地震の一生をコンピュータ上で再現しようとする試みを最近始めたところである。本稿では、実際にシミュレーションを実行しようとする立場に立って、摩擦の構成則に基づく地震サイクルシミュレーションについて見てみよう。

摩擦の構成則

地震発生シミュレーションの基礎になっている摩擦の構成則は、これまで幾つか提唱されているが、その代表的なものとして、すべり速度と状態に依存する構成則(Dieterich, 1979; Ruina, 1983)と、すべりに依存する構成則(Ohnaka et al., 1987; Matsu'ura et al., 1992)が挙げられる。

前者のすべり速度と状態に依存する構成則は、低速の安定すべりを対象とした摩擦すべり実験の結果に基づいていて、地震後の断層の強度回復過程を含んでいることから、地震発生の繰り返し、すなわち地震発生サイクルのシミュレーションに用いられてきた。これに対し、後者のすべりに依存する構成則は低速から高速まで加速される不安定すべりを対象とした固着すべり実験の結果に基づいていて、ゆっくりとした破壊の核の生成から動的高速破壊伝播に至る破壊核形成過程のシミュレーションに用いられている。このすべりに依存する構成則では、せん断破壊強度 τ_p 、残留摩擦強度 τ_r 、および強度が τ_p から τ_r まで低下するのに要する臨界すべり変位量 D_c で記述される。最近、これらの構成則の違いは低速域と高速域での摩擦特性の違いを表して、むしろ相補的な関係にあるとして、両者を統合したすべりと時間に依存する摩擦構成則が、理論的考察から提唱されている(青地・松浦, 1998)。

これらの摩擦の構成則を用いたシミュレーションのすべてについて触れる余裕はないので、本稿では、地震の繰り返しに重点を置いた地震サイクルのシミュレーションについて述べる。最後に述べた、統合されたすべりと時間に依存する構成則に基づく地震サイクルシミュレーションは魅力的

で発展が期待されるが、まだ提唱されて間もないので、ここでは、多くの適応例がある、すべり速度と状態に依存する摩擦構成則に基づく地震サイクルのシミュレーションについて述べる。

すべり速度と状態に依存する摩擦の構成則 (Rate- and state-dependent friction law)

摩擦すべり実験のまとめ

既存断層を持つ摩擦すべり実験から得られた、この摩擦構成則の特徴は、静摩擦の時間依存性と動摩擦のすべり速度依存性にある。すなわち、1) 静摩擦力は固着時間の対数に比例して増加し(強度の回復)、2) 定常的な動摩擦力はすべり速度の対数に依存する。また、3) すべり速度をステップ的に増加させると、瞬間的に摩擦が増加する瞬間的応答の後、ある特徴的な距離 (L) だけすべって

減少し、新たな動摩擦状態になる長期的応答を示す。

図1は、Marone (1998) によりまとめられた上記に対応する実験データを示している。図1aは、1) の結果を示すもので、花崗岩と模擬的な断層ガウジに対する静摩擦係数の実験結果であり、データは図1bのように、一定速度のすべりとある時間の静止 (hold time) の繰り返し実験 (slide-hold-slide test) を行って得られたものである。図から分かるように静止 (hold) とは言っても、わずかなすべりはあり、完全に静止 (固着) しているときの摩擦強度を意味する通常の静摩擦とは異なる。図1aから分かるように、静摩擦は静止時間の対数に比例して増加していき、その増加の割合は、ガウジに対する方が小さい。図1cは、2) のすべり速度と動摩擦力の関係を表わしたもの

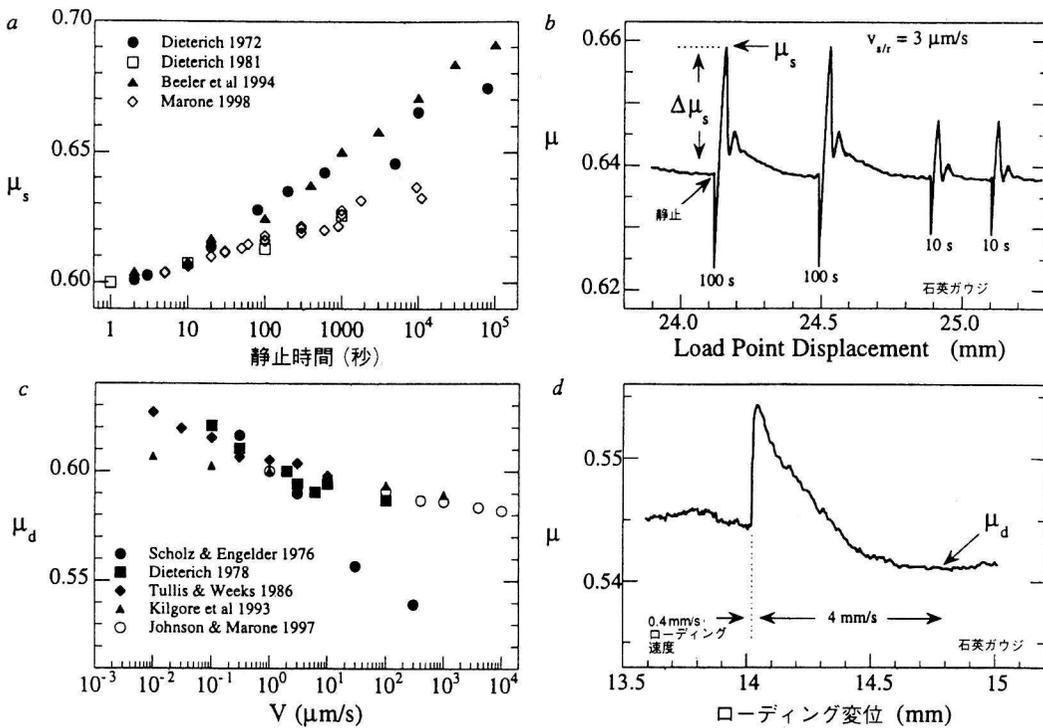


図1 Marone (1998) によるこれまでの摩擦実験のまとめ

(a) 静止-すべり実験における、静止時間 (hold time) に対する静摩擦係数 (μ_s) の相対的变化 (白抜き印はガウジを含んだもの). (b) 静止-すべり実験における、摩擦係数 (μ) とすべりの関係. 100 s, 10 s は、すべり速度 $3 \mu\text{m/s}$ (V_{slr}) ですべらし、100 秒, 10 秒の静止 (hold) 時間をおいて、またすべらしたことを表わす. (c) すべり速度 (V) に対する動摩擦係数 (μ_d) の相対的变化 (白抜き印はガウジを含んだもの). (d) すべり速度を 0.4 mm/s から 4 mm/s に上げたときの動摩擦係数 (μ_d) の変化.

で、すべり速度の対数に比例して動摩擦係数が減少していく、速度弱化を示している。初期の実験はこのように、速度弱化を示していたが、その後の実験により、ガウジを含むものや岩石でも高温になると、すべり速度の増加に伴い動摩擦が増加する、速度強化を示すものがあることが分かってきた。図1dは、3)のすべり速度をステップ的に増加させた時の動摩擦の変化を示している。このように、すべり速度を増加させると摩擦面の凹凸が噛み合っって瞬間的に摩擦は増すが(瞬間的応答)、すべり面の凹凸がつぶれるなどして特徴的距離(L)すべって新たな動摩擦状態に落ち着く(長期にわたる応答)ことが分かる。

摩擦の発展法則と状態変数

では、これらの実験結果はどのような形でまとめられ、シミュレーションに用いられているのであるか。Dieterich (1979)は、特徴的すべり量(L)とすべり速度(V)の比、L/Vで定義される平均接触時間を通して、静摩擦の時間依存と動摩擦のすべり速度依存性を理解しようとした。摩擦係数(μ)は、

$$\mu = \mu_0 + a \ln(V/V_0) + b \ln(V_0 \theta / L) \quad (1)$$

と書ける。ここで、 μ_0 は、定常すべり速度 V_0 に対する摩擦係数、 V はすべり速度、 θ は状態変数[Ruina (1983)では、第2項 $b \ln(V_0 \theta / L)$ を状態変数と置いている。また複数の状態変数を考えることができるが、これまでのシミュレーションでは式(1)のように1状態変数だけを考えたものが多い]、そして a 、 b は実験定数である。すべり面の状態を表す状態変数の実態は明らかでないが、すべり面の特徴的な接触時間だとすると、定数 a 、 b を含む式(1)の各項は、摩擦のすべり速度依存性と時間依存性を表わしていると考えられる。

すべり面の状態の発展を記述する式として、これまで以下の2つの構成則が提案されている。ひとつは、Dieterich-Ruina law (slowness law とか aging law と呼ばれるが、ここではDR則と呼ぶ)

$$d\theta/dt = 1 - V\theta/L \quad (2)$$

である。この式から、すべり速度がほぼゼロの固着状態でも摩擦は変化しうることが分かる。これに対し、Ruina (1983)は、Ruina-Dieterich law (slip law と呼ばれるが、ここではRD則と呼ぶ)

$$d\theta/dt = -(V\theta/L) \ln(V\theta/L) \quad (3)$$

を提案している。これらの構成則が、上記に挙げた摩擦特性を表していることを以下に見ていこう。

まず、両者とも、式(2)および(3)から、定常状態($d\theta/dt=0$)では、 $\theta_{ss}=L/V$ となり、式(1)に代入すると、

$$\mu_{ss}(V) = \mu_0 + (a-b) \ln(V/V_0) \quad (4)$$

となり、定常状態の摩擦力はすべり速度の対数に依存するという2)の実験結果が得られる。従って、

$$d\mu_{ss}/d \ln(V) = (a-b) \quad (5)$$

となり、図1cにおいて $\ln(V)$ に対する μ_a の勾配は、 $(a-b) \ln(10)$ で与えられる。また、長い間の静止状態では、すべり速度がほぼゼロに近くなり、DR則では、式(2)から $d\theta/dt \sim 1$ となり、静摩擦は、 $b \ln(t)$ の依存性を持ち、1)の実験結果が得られる。

次に、シミュレーションに比較的良好に用いられてきたRD則(式(1)と(3))に従って、すべり速度のステップ的な変化に対する摩擦応答を見てみる。摩擦係数の時間変化を考えると、式(1)(3)(4)より、

$$d\mu/dt = (a/V) dV/dt - (V/L) [\mu - \mu_{ss}(V)] \quad (6)$$

と書ける。従って、すべり速度の変化に対応する摩擦係数 μ の変化は

$$(\partial\mu/\partial V)_{inst} = a/V \quad (7)$$

となる。図2のようにすべり速度が V_1 から V_2 に増したときの摩擦係数 μ の変化を考えると、瞬間的な摩擦係数の増加は、式(7)より、

$$\begin{aligned} (\Delta\mu)_{inst} &= \int_{v_1}^{v_2} (\partial\mu/\partial V)_{inst} dV \\ &= a \ln(V_2/V_1) \end{aligned} \quad (8)$$

となる。また、 V_2 になった直後からの変動は、式(6)より、

$$d\mu/dt = -(V_2/L)[\mu - \mu_{ss}(V_2)] \quad (9)$$

に従い、 μ は $\exp(-(V_2/L)t)$ の形で減少していき、すべり距離 $\delta = V_2 t$ が L 程度になる距離すべって $\mu_{ss}(V_2)$ になる。従って、長期的な応答として、定常的な摩擦係数 $\mu_{ss}(V_1)$ から $\mu_{ss}(V_2)$ になり、その応力変化は、

$$\begin{aligned} (\Delta\mu)_{\text{long}} &= \mu_{ss}(V_2) - \mu_{ss}(V_1) \\ &= (a-b) \ln(V_2/V_1) \end{aligned} \quad (10)$$

となる。すなわち、図2に示したように、すべり速度が V_1 から V_2 に変化すると、摩擦係数は、 $\mu_{ss}(V_1)$ から瞬間的に $a \ln(V_2/V_1)$ だけ増加し、特徴的なすべり距離 (L) だけすべった後、 $b \ln(V_2/V_1)$ だけ減少し、 $\mu_{ss}(V_2)$ になる。これらの式に従うと、すべりを速度ジャンプの瞬間から測って $\delta = V_2 t$ とすると、摩擦係数 μ は新たな定常摩擦状態 $\mu_{ss}(V_2)$ に向かって以下の式で表せる。

$$\begin{aligned} \mu &= \mu_{ss}(V_2) + e^{-(\delta/L)} [\mu_{ss}(V_1) \\ &\quad + a \ln(V_2/V_1) - \mu_{ss}(V_2)] \end{aligned} \quad (11)$$

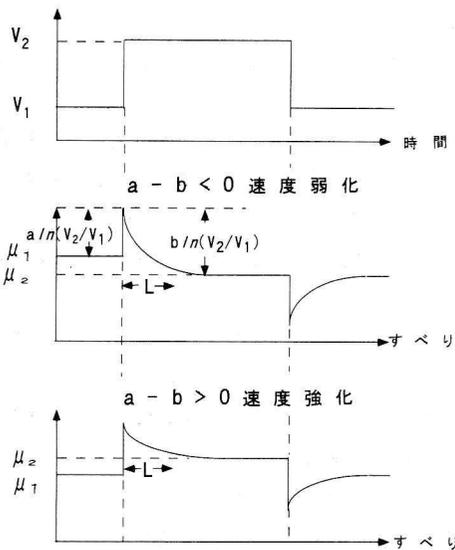


図2 摩擦係数 μ のすべり速度 V に対するステップ応答の模式図

すべり速度を V_1 から V_2 に増し、また V_2 から V_1 に減少させた時の摩擦係数の変化。

上図：すべり速度の変化 中図：すべり速度弱化的場合 ($a-b < 0$) の摩擦係数の変化

下図：すべり速度強化的場合 ($a-b > 0$) の摩擦係数の変化

つまり、すべり速度と状態に依存する構成則はすべり速度弱化的特徴だけでなく、すべり弱化的特徴も含んでいると言える。このように、すべり速度のステップ応答に対する3)の実験結果をうまく表している。

図2に示したようにRD則では、すべり速度の増加と減少について対称に摩擦は変化する。DR則でもよく似た変化をするが、摩擦変化は非対称になる (Marone, 1998)。これまでのシミュレーションではRD則が多く用いられてきた。実験 (Beeler et al., 1994) や余効変動のデータ解析 (Wennerberg and Sharp, 1997) からは、DR則の方が支持されているが、逆にDR則がよく実験値を説明するという説 (Blanpied et al., 1998) もあり、一長一短のようである。基本的には、定常的な安定すべり状態に近いときはRD則が実験結果をよく説明し、断層がほぼ固着している断層の強度回復過程ではDR則が実験結果とよくあう。

どちらの摩擦法則を用いても、地震間における非地震性すべり過程は顕著には違わないが、地震の繰り返し間隔をあわせるように L を決めるとDR則の方が大きくなり、従って後で述べる破壊核の臨界断層長が大きくなるため、地震直前の歪み変化はDR則の方が大きい (加藤, 1998)。大局的にはどちらの摩擦則も大差はないが、例えば、地震発生前のすべりを予測するにはどちらがより現実的であるかは重要で、なお実験的研究が必要である。

高速域での改良式

すべり速度が 10^{-4} m/s 程度を越えると、摩擦力はすべり速度に依存しなくなる (Dieterich, 1978)。このため、以下のように、すべり速度と状態に依存する摩擦構成則に適切なカットオフ速度を導入した改良式も提案されている。例えば、Tse and Rice (1986) は、

$$\mu_{ss}(V) = \mu_0 - (a-b) \ln(V_0/V + e^{-n}) \quad (12)$$

をシミュレーションに使用している。ここで、 n は V_0 の取り方に依存する定数で、例えば $V_0 = 35$ mm/年、 $n = 10$ とすると、 $V = 10^{-4}$ m/s 以上では μ_{ss} は V に依存しなくなる。

地震発生時のように大きなすべり速度では、改良したすべり速度と状態に依存する構成則はすべりに依存する構成則とほぼ一致し、不安定すべり発生時には、すべりに依存する構成則の臨界すべり変位量 D_c は、すべり速度と状態に依存する構成則における特徴的すべり量 L の 10 倍程度の大きさになる (Okubo, 1989).

不安定すべりの発生条件

Ruina (1983) は、摩擦すべり実験における装置剛性とすべり摩擦のカップリングを考慮するため、実験系に等価な 1 自由度系のバネ-ブロックモデル (図 3) で、不安定すべりの発生条件を調べた。不安定すべりが生じるためには、すべり速度の増大とともに摩擦強度は低下しなければならないので、式 (5) から分かるように、 $a-b < 0$ である必要がある (すべり速度弱化: 図 2 の中図)。 σ_n をすべり面に働く法線応力とすると、 $a-b < 0$ の条件下で、バネを引く速度 (du/dt) に小さな擾乱を与えると、装置剛性に対応するバネ定数 k が、すべりの際に生じる応力降下量 $(b-a)\sigma_n$ と特徴的すべり量 L との比、すなわち単位すべりに対する応力降下量で与えられる臨界値

$$k_c = (b-a)\sigma_n/L \quad (13)$$

よりも小さければ不安定すべりは発生する。ただし、バネを引く速度に大きな擾乱を与えれば、たとえ k が k_c より大きくても不安定すべりが発生する (Gu et al., 1984).

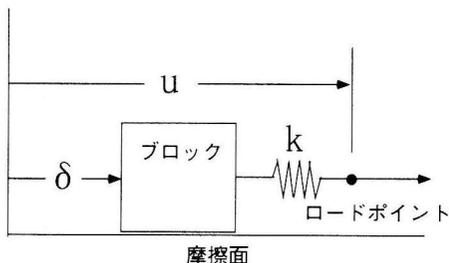


図 3 摩擦実験における装置の剛性とすべり摩擦のカップリングを考慮した安定解析のための 1 自由度系のブロック-バネモデル
バネ定数 k を持つバネを引っ張り、距離 u だけ変位させると、摩擦力を受けながらブロックが距離 δ すべる。

実際の断層にあてはめて考えると、バネ定数には断層での応力降下量 $\Delta\tau$ とすべり量 Δu の比 $\Delta\tau/\Delta u$ が対応し、クラックモデルによるとこれは断層の長さ l に反比例する。このように、Dieterich (1986) は不安定すべりが発生するには k_c に対応する臨界断層長

$$l_c = \eta GL / [(b-a)\sigma_n] \quad (14)$$

が必要であることを示した。ここで G は媒質の剛性率、 η は断層の形状による定数である。この長さは、不安定すべりに先行する前駆的準安定すべりが発生する領域であるすべり破壊核形成域の臨界長さにあたる。Kato and Hirasawa (1997) は、すべり速度と状態に依存する摩擦の構成則を使って、沈み込み帯でのサイズミックカップリングを調べた。地震発生層の長さが臨界断層長よりずっと大きければサイズミックカップリングは比較的高くなるが、臨界断層長に近い小さくなるとカップリングはゼロになり、スローアースクエイクやサイレントアースクエイクが発生すると報告している。

後で示すように実際のシミュレーションでは、断層領域を離散化したセルに分割して、差分法で運動方程式と摩擦の構成則をカップルさせて、断層運動をシミュレートしている。各セル内でのすべりや応力は一定として、セル同士の相互作用によるすべりの時間発展を追いかけることになる。この場合、臨界セルサイズ h^* が存在し、それより大きなセルサイズ h になると、連続体としてではなくお互いに独立にすべるような不連続モデルになる (Rice 1993)。セル内での単位すべりによる応力は、 $K = 2G/(\pi h)$ となり、セルサイズ h が効いてくる。セルサイズの効果で不安定すべりが発生しないようにするには、 $K > k_c$ である必要があり、この臨界サイズ h^* は、断層上での $[(b-a)\sigma_n]$ の最大値を $[(b-a)\sigma_n]_m$ とすると、 $K = k_c$ とおいて、

$$h^* = 2GL / (\pi [(b-a)\sigma_n]_m) \quad (15)$$

と表され、セルサイズの影響がでないようにするには、 $h \ll h^*$ である必要があり、実際のシミュレーションでは 1 km 程度以下にとられている。

すべり速度弱化 ($a-b < 0$) とすべり速度強化 ($a-b > 0$)

実験によると、脆性的岩石の場合、低温ではすべり速度弱化 ($a-b < 0$) を示す。逆に、すべり速度強化 ($a-b > 0$) は、温度が高いとき [Stesky (1978), Blanpied et al. (1991)], 常温でも高封圧下で延性を示す岩石 [Shimamoto (1986) 等], 断層ガウジの層が厚いとき [Marone et al. (1990); Marone and Kilgore (1993)] などに見られ、このときは不安定すべり (地震) は発生しない。このように、同じ岩石でも、環境条件 (温度によってまたガウジがあるなし) により、すべり速度弱化やすべり速度強化の性質を示す。

特徴的すべり量 (L) のスケーリング

実験室スケールから実際の断層へ構成則を適応する際に、スケール効果の問題が出てくる。Okubo and Dieterich (1984) は、すべりに依存する構成則における臨界すべり変位量 D_c は断層面の粗さが粗いほど大きくなり、実際の地震との比較から、地震の断層面の D_c は室内実験の D_c より 2~3 桁大きいことを示唆した。Shibazaki and Matsu'ura (1998) や大中 (1998) は、実験室スケールから実際の地震のスケールに至る D_c のスケール依存性を指摘している。すべり速度と状態に依存する構成則の特徴的長さ L も、同じようにすべり面の粗さとともに大きくなるのが実験から分かっている (Dieterich, 1979)。図 1d から分かるように実験では、 L は 0.1 mm のオーダーであるが、実際のシミュレーションでは cm オーダーの値が使われている。

間隙流体

断層破砕帯近傍には間隙流体が存在し、その際の摩擦係数 μ は、

$$\tau = \mu \sigma_{\text{eff}} \quad (16)$$

と書ける。ここで、 μ は摩擦係数であり、また σ_{eff} は有効法線応力で、法線応力 σ_n から間隙流体圧 p を引いたもの ($\sigma_{\text{eff}} = \sigma_n - p$) として定義される。Ben-Zion and Rice (1995) は間隙流体の空間的不均質性を導入してシミュレーションを行っている。

さらに、断層破砕帯は地震サイクルの間に、コンパクションやダイラレーションを受け、 p すなわち σ_{eff} が空間的だけでなく時間的にも変化する。こういった間隙流体圧の時空間変化まで考慮したシミュレーションも行われている [例えば、Sleep (1995); Segall and Rice (1995)] が、間隙流体の挙動まで考慮したシミュレーション研究は始まったばかりであり、今後ますます重要となってこよう。

すべり速度と状態に依存する摩擦構成則による地震サイクルのシミュレーション

横ずれ断層における地震サイクルのシミュレーション

カリフォルニア中央部でのサンアドレアス断層では、地震活動は上部地殻に限られている。Sibson (1982) は、浅部の脆性領域では式 (16) の Byerlee の摩擦則を、深部の延性領域には石英鉱物に見られるパワーロックリブ流動則を想定して、地震の下限が 10~15 km (その深さで温度は 300~350°C) である説明を与えた。

これらのモデルに代わり、Tse and Rice (1986) は、実験室で得られた摩擦パラメータ、 a 、 $a-b$ の温度依存性を、温度の深さ分布を仮定して、摩擦パラメータの深さ分布に焼き直し、2次元半無限弾性体媒質中の横ずれ断層でのすべり過程に関するシミュレーションを行った。ただし、特徴的すべり量 L の深さ分布を押さえるデータはあまりないので、 L は一様に与えている。この研究は、これ以降行われる地震発生サイクルのシミュレーション研究の方向付けを行ったと言える。断層の両側のブロックはプレート運動により相対速度 V_p で動いているため、断層面上ではすべり δ が生じる。彼らは、断層に沿って応力およびすべりは一様と仮定し、深さ方向のみの関数と考えた。深さ方向に N 個のセグメントに離散化して、各セグメントでは応力およびすべりは一定として、セグメント (深さ z_i) i について、慣性項を無視して準静的な力の釣り合いを考えると、

$$\tau_i(t) = \tau(z_i, t) = \sum_{j=1}^N K_{ij} (V_p t - \delta_i(t)) \quad (17)$$

となる。ここで、 K_{ij} はセグメント j の単位すべりによって生じるセグメント i での応力、 $V_p t - \delta_i(t)$ はセグメント i での定常プレート運動からのすべり遅れを表す。この式(17)と式(16(1)(3))を連立させて数値的にすべりの発展を追うことになる。

図4に例を示すように、 $a-b > 0$ の深い領域では定常的に安定すべりが生じ、浅い $a-b < 0$ の領域では地震間にはほぼ固着しており、地震発生時のみすべる。深さ5~7kmですべり破壊核が形成され、ここから不安定すべり(地震)が始まる。地震時のすべりはこの深さで最大で、深くなるにつれ小さくなり、深さ13~15km以深では地震性すべりは生じていない。また、顕著な余効的非地震すべりが地震性すべりの発生域の下限あたりで生じているのが分かる。彼らは、また、特徴的すべり量 L を5~160 mm の広い範囲で変えてシミュレートしているが、 L が160 mm 以上だと安定すべりしか生じない。80 mm 以下だと不安定すべりが必ず生じ、地震の繰り返し間隔とすべり量は L の大きさとともに減少していく。

彼らの計算では断層は1次元であったが、その後、Rice (1993) に始まる一連の研究があり、3次

元半無限弾性体中の横ずれ断層におけるシミュレーションを行っている。そこでは、式(17)の代わりに、動的断層運動により放射される地震波によるエネルギー散逸を表すダンピング項を含んだ、準動的力の釣り合い、

$$\tau_i(t) = \sum_{j=1}^N K_{ij} (V_p t - \delta_i(t)) - (G/2\beta)d \delta_i(t)/dt \quad (18)$$

が用いられている。最近、Ben-Zion and Rice (1997) は2次元ではあるが準静的計算でなく慣性項も含めた動的計算を行い、動的な破壊の伝播や地震波の放射までシミュレートしている。滑らかな断層モデル ($h \ll h^*$) では、最終変位は動的計算では大きくなるが、その他のすべりの履歴の特徴は、これまでの準静的な計算とあまり変わらないと報告している。Stuart and Tullis (1995) はパークフィールド地震に対し、地震間に観測されているクリープや測地データを説明するように摩擦パラメータを決めたモデルと、実験室データから構築したモデルを比較して、地震発生前に現れるであろう地殻変動について議論している。

沈み込み帯における地震サイクルシミュレーション

Stuart (1988) と Kato and Hirasawa (1997)

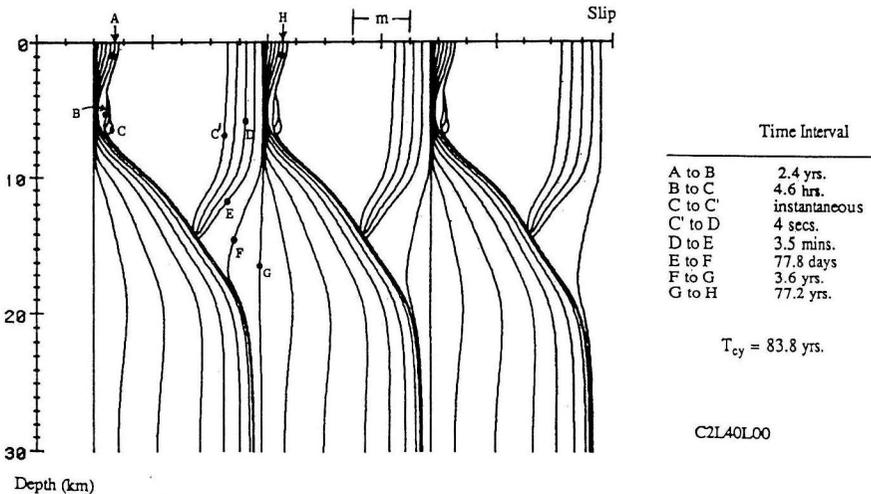


図4 横ずれ断層における、すべり速度と状態に依存する摩擦の構成則を用いた、地震の繰り返し発生シミュレーション例 (Tse and Rice, 1986)

各線はある時刻におけるすべりの深さ分布を示している。なお、各線の時間間隔は一樣ではなく、 $L=40 \text{ mm}$ を用いている。

は、Tse and Rice (1986) と同様の考え方で、沈み込み帯のプレート境界における地震サイクルのシミュレーションを、2次元弾性媒質中での縦ずれ断層について行った。図5に、モデルの概念図を示す。彼らは、沈み込むプレート境界での地震発生域に対応するカップリング領域(深さ $z_s \sim z_d$)にだけ摩擦パラメータ $a-b < 0$ とし、それより浅い部分と深い部分に $a-b > 0$ の深さ分布を与えている。浅い部分の安定すべりをしている深さ z_s は、5~10 km、カップリングの下限 z_d は、太平洋プレートが沈み込む東北地方では、60 km、フィリピン海プレートが沈み込む西南日本では30 km程度である。Stuart (1988) は南海トラフでの巨大地震の繰り返しをシミュレートし、地震間や巨大地震の発生に先行する準安定すべりによ

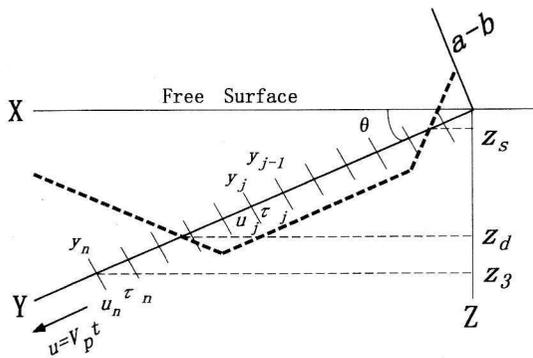


図5 沈み込み帯における地震サイクルシミュレーションの2次元弾性モデル
 $a-b$ の深さ分布とプレート境界におけるセルへの分割を示す。

る地殻変動を計算し、1946年南海地震に先行して験潮記録に現れた異常変動を議論している。不安定すべりの発生条件で述べたように、Kato and Hirasawa (1997) は、プレート境界でのサイクリックカップリングの多様性は、摩擦パラメータや地震発生域の長さの違いで説明できることを指摘している。図6に、彼らのシミュレーション結果の一例を示す。この例では、 z_d は40 km(図では $\zeta=115$ km)で、深部と浅部の $a-b > 0$ では安定すべりが生じ、地震間に固着している $a-b < 0$ の領域に徐々にすべりが進行し、深さ16 km($\zeta=50$ km)で顕著なプレスリップが生じ、不安定すべり(地震)へと至る過程が、107年で繰り返されている。この例では L は一様で5 cmであるが、彼らは L の不均質性を導入してシミュレーションを行っている。例えば、 L が大きい領域は不安定すべりが起こりにくくバリアーになるため、 L の不均質性があればプレート境界全体がすべるような巨大地震の他にも中小地震が発生する。

加藤・平澤(1996)は、駿河湾で将来発生する可能性がある東海地震に先行する準安定すべり(プレスリップ)とそれによる地殻変動の予測を行っている。

シミュレーションの問題点と今後の課題

ここで見てきたように、大地震の発生サイクルのシミュレーションにより、プレート間カップリングや、大地震に先行するプレスリップとそれによる地殻変動について、定量的に議論できるよう

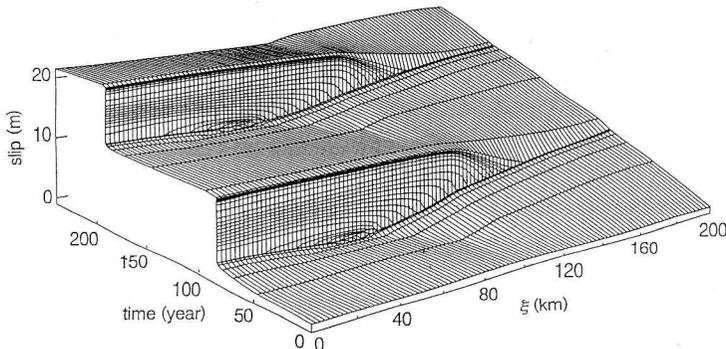


図6 沈み込みプレート境界におけるすべりの発展例 (Kato and Hirasawa, 1997)
 ξ は海溝からプレート境界に沿っての距離を表し、プレート境界でのすべりの時間発展を示している。

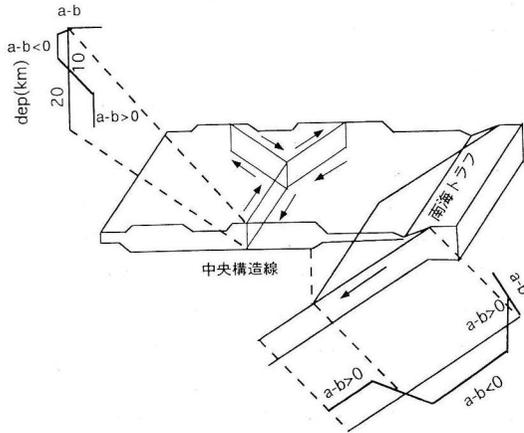


図7 すべり面としてのプレート境界・内陸活断層と摩擦パラメータ分布例

になってきた。がしかし、やっとおおざっぱなシミュレーションができるようになったといった段階で、プレート境界での摩擦パラメータ分布の推定などの多くの問題が残っている。最後に、問題点と今後の課題について簡単に触れる。

まず、摩擦構成則の問題がある。ここで用いたすべり速度と状態に依存する構成則は、定性的な説明はあるものの、実験から得られた経験式であり、その背後にある物理は必ずしも明らかでない。最初に述べたように、最近提唱されたすべりと時間に依存する構成則は、すべり依存の構成則とここで述べたすべり速度と状態に依存する構成則を統合して、実験事実を合理的に説明するようになる。こういった構成則も今後検討する必要がある。また、実験で調べられているすべり速度・温度・圧力の範囲は実際の地震発生環境に比べるとかなり狭い。摩擦パラメータ等は実験結果を大きく外挿して使っており、これらの検討も充分なされるべきであろう。

これまで行われたシミュレーションは、均質半無限弾性体中での1枚の平面断層におけるすべりを扱ったものであり、かなり単純化されている。一足飛びに複雑なモデルに取り組む必要は無いが、アセノスフィアの粘性効果や、プレートや断層の折れ曲がりや複数の断層の相互作用といった問題にも取り組む必要がある。実際的なシミュ

レーションとなるには、3次的に不均質な構造を持つ粘弾性構造中での、プレート境界や内陸活断層といった複数の断層でのすべりの発展を追うことになろう(例えば、図7)。これには、強力なコンピュータリソースが必要となるが、現在、次世代の超並列高速計算機の開発が「地球シミュレータ」プロジェクトで進行中であり、いずれかなり実用的な地震サイクルのシミュレーションが可能になろう。

参考文献

- 青地秀雄・松浦充宏, 1998, 地震発生過程の支配方程式としてのすべりと時間に依存する断層構成則, 月刊地球, 20, 528-533.
- Beeler, N.M., T.E. Tullis and J.D. Weeks, 1994, The role of time and displacement in the evolution effect in rock friction, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 1987-1990.
- Ben-Zion, Y. and J.R. Rice, 1995, Slip patterns and earthquake populations along different classes of faults in elastic solids, *J. Geophys. Res.*, 100, 12959-12983.
- Ben-Zion, Y. and J.R. Rice, 1997, Dynamic simulations of slip on a smooth fault in an elastic solid, *J. Geophys. Res.*, 102, 17771-17784.
- Blanpied, M.L., D.A. Locker and J.D. Byerlee, 1991, Fault stability inferred from granite sliding experiments at hydrothermal conditions, *Geophys. Res. Lett.*, 18, 609-612.
- Blanpied, M.L., C.J. Marone, D.A. Locker, J.D. Byerlee, and D.P. King, 1998, Quantitative measure of the variation in fault rheology due to fluid-rock interactions, *J. Geophys. Res.*, 103, 9691-9712.
- Dieterich, J.H., 1978, Time-dependent friction and mechanics of stick-slip, *Pure Appl. Geophys.*, 116, 790-806.
- Dieterich, J.H., 1979, Modeling of rock friction 1. Experimental results and constitutive equations, *J. Geophys. Res.*, 84, 2161-2168.
- Dieterich, J.H., 1986, A model for the nucleation of earthquake slip. In: Das, S., J. Boatwright, C.H. Scholz (Eds.) *Earthquake Source Mechanics*, *Geophys. Monogr.* 37, AGU, 37-47.
- Gu, J.C., J.R. Rice, A.L. Ruina and S.T. Tse, 1984, Slip motion and stability of a single degree of freedom

- elastic system with rate and state dependent friction, *J. Mech. Phys. Solids*, 32, 167-196.
- 加藤尚之, 1996, 非地震性すべりの発生機構, *地震* 2, 49, 257-275.
- 加藤尚之, 1998, Slowness law 及び slip law を用いた地震サイクルシミュレーション, *地球惑星科学関連学会合同大会 1998 年合同大会予稿集*, 289.
- 加藤尚之・平澤朋郎, 1996, 仮想東海地震に先行する非地震性すべりと地殻変動の予測, *月刊地球号外*, 14, 126-132.
- Kato, N. and T. Hirasawa, 1997, A numerical study on seismic coupling along subduction zones using a laboratory-derived friction law, *Phys. Earth Planet. Int.*, 102, 51-68.
- 桑原保人, 1989, 岩石の摩擦特性と地震断層運動論, *地震* 2, 42, 105-116.
- Matsu'ura, M., H. Kataoka and B. Shibazaki, 1992, Slip-dependent friction law and nucleation processes in earthquake rupture, *Tectonophysics*, 211, 135-148.
- Marone, C., 1998, Laboratory-derived friction laws and their application to seismic faulting, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 26, 643-696.
- Marone, C. and B. Kilgore, 1993, Scaling of the critical slip distance for seismic faulting with shear strain in fault zone, *Nature*, 362, 618-621.
- Marone, C., C.B. Raleigh and C.H. Scholtz, 1990, Frictional behavior and constitutive modeling of simulated fault gauge, *J. Geophys. Res.*, 95, 7007-7025.
- 大中康馨, 1998, 地震発生に至る過程と予測: その物理法則と地学的環境要因の重要性, *地震* 2, 50, 129-155.
- Ohnaka, M., Y. Kuwahara and K. Yamamoto, 1987, Constitutive relations between dynamic physical parameters near a tip of the propagating slip zone during stick-slip shear failure, *Tectonophysics*, 144, 109-125.
- Okubo, P.G., 1989, Dynamic rupture modeling with laboratory-derived constitutive relation, *J. Geophys. Res.*, 94, 12321-12335.
- Okubo, P.G. and J.H. Dieterich, 1984, Effects of physical fault properties on frictional instabilities produced on simulated faults, *J. Geophys. Res.*, 89, 5817-5827.
- Rice, J.R., 1993, Spatio-temporal complexity of slip on a fault, *J. Geophys. Res.*, 98, 9885-9907.
- Ruina, A.L., 1983, Slip instability and state variable friction laws, *J. Geophys. Res.*, 88, 10359-10370.
- Segall, P. and J.R. Rice, 1995, Dilatancy, compaction, and slip instability of a fluid-infiltrated fault, *J. Geophys. Res.*, 100, 22155-22171.
- Shimamoto, T., 1986, A transition between frictional slip and ductile flow undergoing large shear deformation at room temperature, *Science*, 231, 711-714.
- Shibazaki, B. and M. Matsu'ura, 1998, Transition process from nucleation to high-speed rupture propagation: scaling from stick-slip experiments to natural earthquakes, *Geophys. J. Int.*, 132, 14-30.
- Sibson, R.H., 1982, Fault zone models, heat flow, and the depth distribution of earthquakes in the continental crust of the United States, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 72, 151-163.
- Sleep, N.H., 1995, Ductile creep, compaction, and rate and state dependent friction, *J. Geophys. Res.*, 100, 13065-13080.
- Stesky, R.M., 1978, Mechanism of high-temperature frictional sliding in Westerly granite, *Can. J. Earth Sci.*, 15, 361-375.
- Stuart, W.D., 1988, Forecast model for great earthquakes at the Nankai trough subduction zone, *Pure Appl. Geophys.*, 126, 619-641.
- Stuart, W.D. and T.E. Tullis, 1995, Fault model for preseismic deformation at Parkfield, California, *J. Geophys. Res.*, 100, 24079-24099.
- Tse, S.T. and J.R. Rice, 1986, Crustal earthquake instability in relation to the depth variation of frictional slip properties, *J. Geophys. Res.*, 91, 9452-9472.
- Wennernberg, L. and R.V. Sharp, 1997, Bulk-friction modeling of afterslip and the modified Omori law, *Tectonophysics*, 227, 109-136.

東海地震のシミュレーションと予知への新たな取り組み

吉田明夫

1. はじめに

気象庁では今年4月に地震防災対策強化地域判定会（いわゆる東海地震判定会）の招集基準を改正し、体積歪計で3時間あたり 5×10^{-7} の変化が観測された場合という従来の基準を大幅に引き下げた新しい基準を定めた。現在、気象庁の現業業務においては、体積歪変化を1時間、3時間、1日の各階差で監視している。今回の招集基準の改正にあたっては、それに先だてこれらの階差それぞれについて体積歪計各観測点のノイズレベル調査を行い、その結果に基づいて、各観測点の検出可能レベルを新しい基準値とした。招集基準値を検出可能レベルにまで引き下げたのは、プレート境界で前兆すべりが発生した場合、加藤・平澤モデルによるシミュレーション結果や東南海地震直前に観測された傾斜変化の大きさ等から推定して、従来の基準では判定会を招集してから予知情報を報告するまでの時間的余裕が十分でないと考えられたためである。現行のシミュレーションモデルについては、2次元であることや、室内実験から得られた摩擦構成則が自然地震発生の時間・空間スケールの現象にまで適用できるのかどうか、摩擦特性に空間的な不均一性があった場合にそれは前兆現象の現れ方にどの程度影響するのかなど、検討すべき種々の重要な問題が残されており、その結果に全面的に依拠して監視システムを組み立てるのは、まだ尚早である。しかし、われわれとしては、地震準備過程に関するその時点その時点での最新の研究成果や解析手法を監視業務の中に取り入れていきたいと考えている。それと共に、また、観測能力を最大限に生かすべく最善の努力を払いたいとも思う。判定会招集基準の改

正は、気象庁のそうした努力の現れであり、この小文では、東海地震監視業務の高度化に向けた気象庁の最近の取り組みと、その作業の中で一つの柱になっているプレート沈み込み過程の数値シミュレーションについて、簡潔な紹介を試みたい。

2. プレート沈み込み過程のシミュレーション

東海地震は、フィリピン海プレートが南海・駿河トラフから沈み込んでいく際、プレート境界に働く摩擦力によって上盤のプレートを引きずり込んでいくことが原因で発生する、いわゆるプレート境界巨大地震である。大きな摩擦力が働くプレート間カップリングの強いところは固着域とも呼ばれる。地震の準備過程とは、大地震の発生によっていったん解消されたプレート間カップリングが、海洋プレートの沈み込みが進行する中で次第に回復し、成長していく過程であると言って良いだろう。その時、プレート境界のいろいろな場所における摩擦応力の増大は、その場の物理的、化学的状态によって規定されるが、一方また、そこに加わるテクトニック応力は他の場所におけるカップリングの進行具合によって決まってくる。摩擦力の大きなところは強く固着し最後まで持ちこたえるのに対して、比較的弱いところでは、加わる応力と摩擦力の兼ね合いで、最終的な破壊が始まる前に部分的なすべりが生じる。そして地震の断層運動がよいよ始まって、すべり量やすべり速度が増加していくにつれ摩擦係数が急速に減少すると、その場にかかる応力が摩擦力を上回ることになり、加速運動が誘発される。そうになると、強く固着している領域も耐えられなくなって、カップリング域全体にわたる大破壊に到ると想定される。これが現在、多くの研究者によって考え

られている巨大地震発生プロセスのあらすじである。

このように、東海地震の準備過程とその直前の状況の推移を明らかにするには摩擦についての理解が不可欠であり、非常に重要である。プレート境界面上での摩擦強度の空間的な分布とその時間的発展を知ることができれば、いま、準備過程のどの段階まで来ているのか見当もつけられ、監視能力も格段に向上すると期待される。残念ながら、私たちはプレート境界面上の摩擦強度や応力分布の詳細を観測的に直接知る手だてを持っていない。しかし、微小地震活動の変化や地震の波形・メカニズム解析、また、GPSデータを用いてのインバージョン解析等から、カップリング状態を間接的に推定する手法が開発されつつある。こうした研究は今後更に発展していくと期待されるが、それは本小文の主題ではないので、ここではこれ以上触れない。

さて、プレート境界面上の各点における摩擦のすべり量・すべり速度依存性とその時間的発展についてのモデルが与えられると、それを基に計算機上で地震の発生過程をシミュレートすることができる。先に少し触れたように、すべり運動が急激な断層破壊に移行するかどうかは、摩擦強度がすべりの進行とともにどのように変化するかということにかかっている。もし、すべり速度が増すにつれて摩擦係数が小さくなり（すべり速度弱化）、それによる摩擦力の減少が他の場所も合わせたすべり全体に伴う応力降下量よりも大きいと、その場のすべり運動は加速されることになる。

数値シミュレーションでは、この摩擦係数のすべり速度依存性を与えるパラメータが重要な役割を果たす。室内実験によれば、温度が高い時や高い封圧がかかった時、あるいは厚い断層粘土層がはさまっているような場合、すべり速度が増すにつれて摩擦係数はむしろ大きくなる（すべり速度強化）ことが示されている。プレート境界面上で実際にすべり速度依存性を与えるパラメータの値がどのように分布しているか直接知ることはできないが、温度や封圧が高くなる深部と、海洋プ

レート上面に堆積したやわらかい地層が入り込んでいるトラフに近い浅部では、すべり速度強化の状態になっていると推定される。現実的モデルに近づけるには、二次元的なプレート境界面上の各点におけるパラメータ値の分布を考える必要があるが、これまでに行われている数値シミュレーションではすべり速度依存性を決めるパラメータは深さの関数としてのみ与えられている。

ところで、全準備過程にわたるプレート境界カップリングの成長をシミュレートするためには、摩擦強度が時間とともにどう回復していくかについても評価する必要がある。これに関しては室内実験の結果に基づいて経過時間の対数に比例して増大する依存性が考慮されている。しかし、この依存性はすべり速度や経過時間に関して、限られた狭い範囲内の実験で得られた経験式を大幅に外挿して適用していることに留意する必要がある。同様に、すべり速度弱化的摩擦特性も、比較的低速度のすべり実験から得られた結果が基になっている。これに対して、高速すべり実験の方から、断層破壊運動への移行をより基本的に制御しているのは、むしろすべった量に関係して摩擦係数が小さくなっていく岩石の摩擦特性であるとする考え方が出されている（すべり弱化モデル）。このモデルでは、摩擦係数の減少の仕方を規定する量——臨界すべり変位量という——は断層運動の幾何学的なスケールへの依存性を持つと考えられており、大破壊は大きな臨界すべり変位量に関係した不安定すべりから引き起こされると見る。すなわち大地震と小地震とはその種からしてすでに違うというわけである。これに対してすべり速度の増加に伴う摩擦係数の減少を基本とするすべり速度弱化モデルの中の特徴的すべり長さには、断層スケールへの依存性は取り入れられていない。

以上のように、すべり速度及びすべりの時間的履歴依存性を基とした摩擦構成則には、まだ解明すべき多くの問題点が内在していて、この摩擦モデルによって自然地震の発生過程がどこまで詳細に記述できるか、なお検討の余地があると考えられる。しかし、このモデルの利点は、いったんプ

プレート境界面上で適当なパラメータ値を与えると、何サイクルにもわたって同一規模のプレート境界地震の発生を計算機上で再現できることである。次節では前兆現象に着目しながら、すべり速度及びすべりの時間的履歴依存性を持つ摩擦構成則を用いた数値シミュレーション結果の概要を述べる。

3. 予想される前兆的变化

すべり速度とすべりの履歴に依存する摩擦構成則に基づいた二次元数値シミュレーションでは、構成則の中のパラメータ値を深さの関数と見なす。その場合、室内実験で明らかにされた、摩擦係数の温度や圧力に対する依存性、断層粘土の影響、岩石の性質による違いなどは、パラメータ値の深さ変化を推定する上で参考になるが、その分布を詳細に限定するところまではいかない。ただ、東海地震を想定したシミュレーションでは、プレートの相対速度や沈み込み角度、大地震の繰り返し周期、平均カップリング効率等が、モデルへの重要な制約条件になる。将来、GPS 観測データから年々のバック・スリップ（プレート間がすべらず、固着して、上盤側プレートが引っ張り込まれる動き及びその量）の蓄積の様子が明らかになってくれば、シミュレーションに必要なパラメータの分布について、更に詳しい情報が得られることになる。今のところはパラメータの推定に相当な自由度があるが、ただし上述したような制約条件の下でパラメータの値を変化させていったシミュレーション結果では、非地震性すべりや地殻変動の現れ方に関して、おおよそ同じような傾向の変化が認められる。以下、前兆現象に焦点をあてながら、応力や歪の変化の様子を概述するが、この内容は地質調査所の加藤尚之博士の研究成果に大きく依っていることをあらかじめ付記しておく。

図1は地震発生の1.3年前における、水平圧縮応力の空間分布と、1日あたりの応力変化率の大きさの空間分布を色分けして示したものである。上の図で青い矢印で示した範囲が固着域を表して

いる。図1からはプレート境界面を境にして、上盤側地殻内と下盤側スラブ内で応力分布に著しい対照性の存在することが見てとれる。固着領域より深い側の陸のプレート内では強い水平圧縮応力が蓄積されているのに対して、その下のフィリピン海スラブ内では逆に応力は減少している。上盤側の応力の顕著な増加はトラフ軸から120 km以上内陸の長野・愛知県境付近にまで及んでいる。一方、下図の応力の変化率を見ると、固着領域の深い側の端付近の地殻内と、浅い側の端付近のスラブ内で、応力の低下が大きいことがわかる。これは固着が深い方と浅い方の両方から次第にはがれていっている、すなわち双方で非地震性すべりが発生していることを示していると考えられる。図2は固着領域下端付近の上盤側地殻内の点——図1下図中のプラス印の場所——における応力及び応力増加率の経年的な変化を示したものである。応力の増加は数年前から止まり、1~2年前からは減少に転じる様子が見られる。このことは水平圧縮応力場に関係した地殻内の地震活動が1~2年前から低下する可能性を示唆する。いわゆる静穏化現象の出現である。また、固着はがれの進行によって、それまで圧縮応力場だったところが伸張応力場に変わり、地震のメカニズムが変化するということも考えられる。逆にそうした現象が観測された時、それらをプレート間カップリング状況の変化と結びつけて解釈するうえで、数値シミュレーションの結果は大きなヒントを与えてくれることになる。

図3は地震発生前のいくつかの時期における応力の蓄積状態と応力変化の空間パターンを並べて示したもので、これから、応力の変化率は地震発生の数年前からその直前に向かうにつれて顕著に大きくなっていくことがわかる。それは、前述したように非地震性すべりが固着域の上端と下端付近で次第に拡大していくことに対応しているものと考えられる。図4はバック・スリップの年々の増加量の空間分布を表している。これを見ると、地震発生の70~80年前にはトラフからの水平距離が10 kmから60 kmまでの広い範囲でバック・スリップが蓄積されていくのに対して、5~

25年前には30-40 kmの狭い範囲でのみ大きな増加率となっている。これは強く固着しているところが次第に限定されてきて、それ以外の場所では非地震性すべりの割合が大きくなっていくことを示すものである。

さて、東海地方に展開されている様々な観測機

器の中で、直前の前兆現象を捉えるうえで大きな期待を寄せられているのは、体積歪計や傾斜計である。また、GPS観測や水準測量は、それよりも更に長い時間スケールの地殻変動の検出に有効と考えられる。そこで、次に数値シミュレーションから、そうした実際の観測データにどのような前

- 図1 応力状態及びその変化に関するシミュレーション結果の一例。図2、図3も同様で、いずれも加藤博士の計算結果をStefan Wiemer博士が図示化したものによる。
上：地震発生の1.3年前における、水平圧縮応力の空間分布。明るい色は応力が高いところ、暗い色は応力の低いところを表す。
下：1日あたりの応力の増減。赤は低下、青は増加を示す。
- 図2 固着領域下端付近の上盤側地殻内の点一図1の下図中のプラス印の場所一における応力及び応力増加率。地震直前に応力が顕著に低下している様子が見られる。
- 図4 地震発生前の各期間におけるバック・スリップの年々の蓄積量の空間分布。
この図から図7までは加藤(1998)による
- 図3 地震発生前のいくつかの時期における応力の蓄積状態と応力変化の空間パターン。応力の変化率は地震発生の数年前からその直前に向かうにつれて顕著に大きくなっていく様子が見られる。
- 図10 M6.5相当のすべりが図9に示した矩形領域内のどこかで生じた時に、地震発生前のいつの時点で新しい判定会招集基準に達するかを色分けして示す。上が北西側、下が南東側にあたる。東南海地震の際に観測された傾斜変化の時間的推移に準拠。
- 図11 M6.5相当のすべりが図9に示した矩形領域内のどこかで生じた時に、地震発生前のいつの時点で新しい判定会招集基準に達するかを色分けして示す。上が北西側、下が南東側にあたる。加藤・平澤による数値シミュレーションモデルから推定される歪変化の時間的推移に準拠。
- 図12 M6.5相当のすべりが静岡県北西部に生じた時の体積歪変化
- 図13 M6.5相当のすべりが静岡県北西部に生じた時の水平変位
- 図14 M6.5相当のすべりが図9に示した矩形領域内のどこかで生じた時に、地震発生前のいつの時点で旧判定会招集基準に達するかを色分けして示す。
- 図15 M6.5相当のすべりが図9に示した矩形領域内のどこかで生じた時に、GPS観測により10 mm以上の変位が3点以上で観測される時点の色分けして示す。
- 図16 M6.5相当のすべりが図9に示した矩形領域内のどこかで生じた時に、地震発生前のいつの時点で新しい判定会招集基準に達するかを色分けして示す。上が北西側、下が南東側にあたる。東南海地震の際に観測された傾斜変化を2倍遅らせた時間的推移に準拠。
- 図17 M6.5相当のすべりが図9に示した矩形領域内のどこかで生じた時に、GPS観測により10 mm以上の変位が3点以上で観測される時点の色分けして示す。東南海地震の際に観測された傾斜変化を3倍遅らせた時間的推移に準拠。
- 図20 清水観測点にごく近いところのプレート境界ですべりが生じた場合、静岡、富士の観測地点は伸びと縮みの境界付近となり、わずかな歪変化しか現れないことがありうる。すべりの大きさがM6相当まで成長すれば、藤枝、土肥の観測点で有意な変化が見られるようになると推定される。

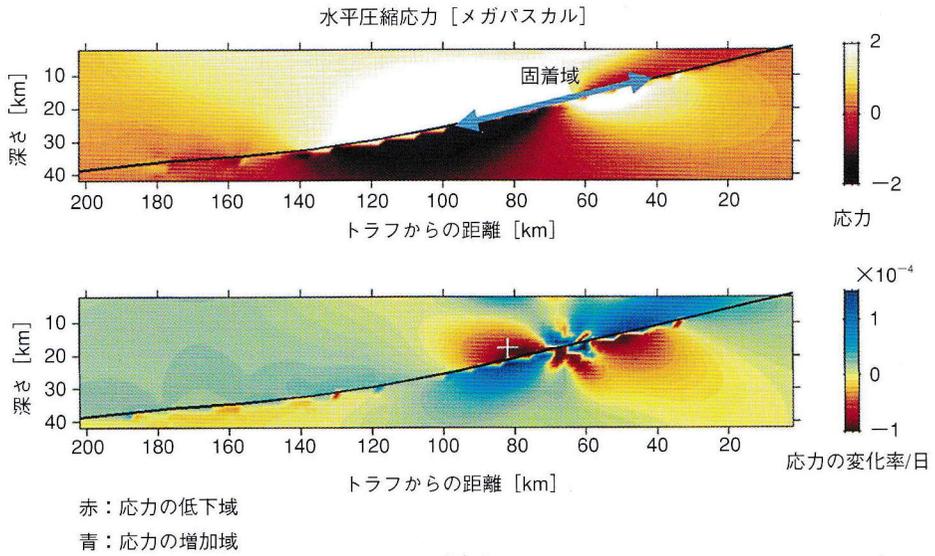


図 1

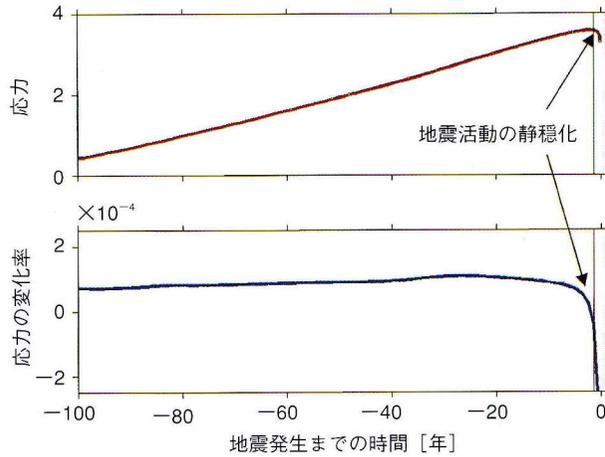


図 2

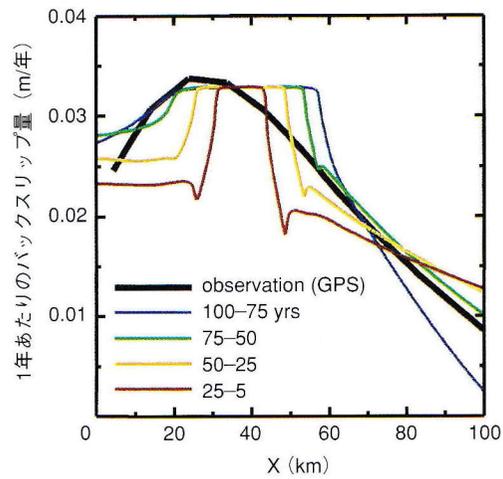


図 4

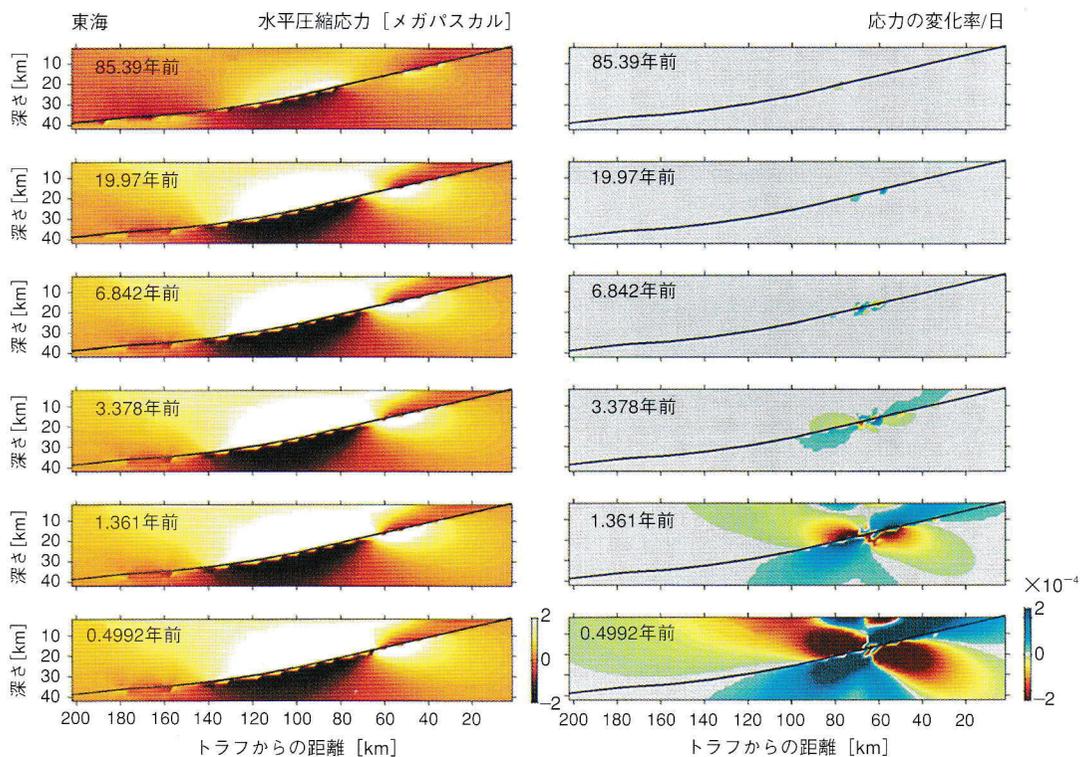
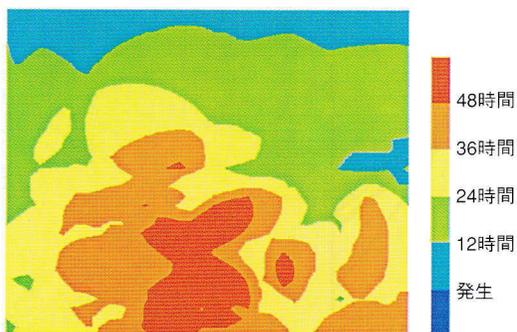


図 3

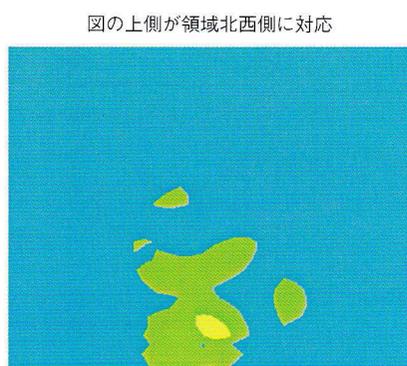


至3時間階差、新基準3点、規模M6.5、時間：東南海

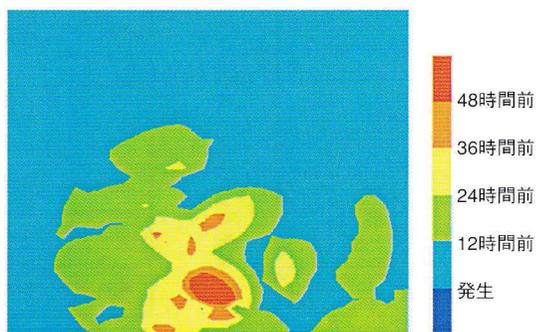


至24時間階差、新基準3点、規模M6.5、時間：東南海

図 10



至3時間階差、新基準3点、規模M6.5、時間：加藤モデル



至24時間階差、新基準3点、規模M6.5、時間：加藤モデル

図 11

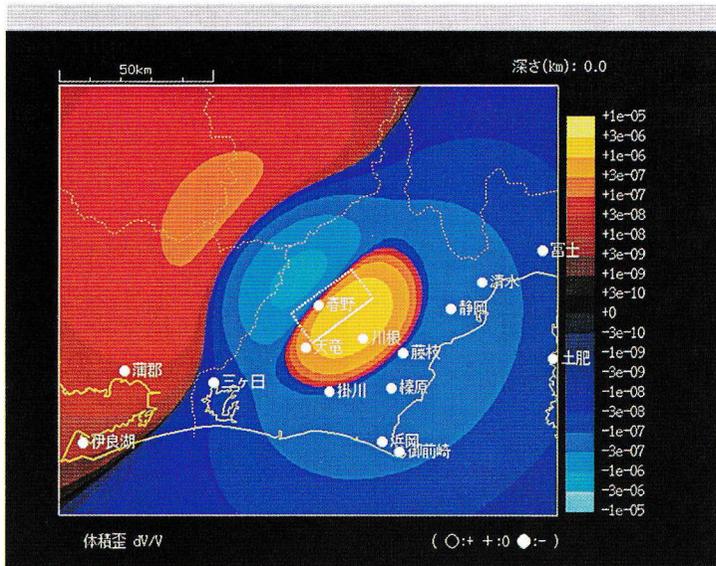


図 12

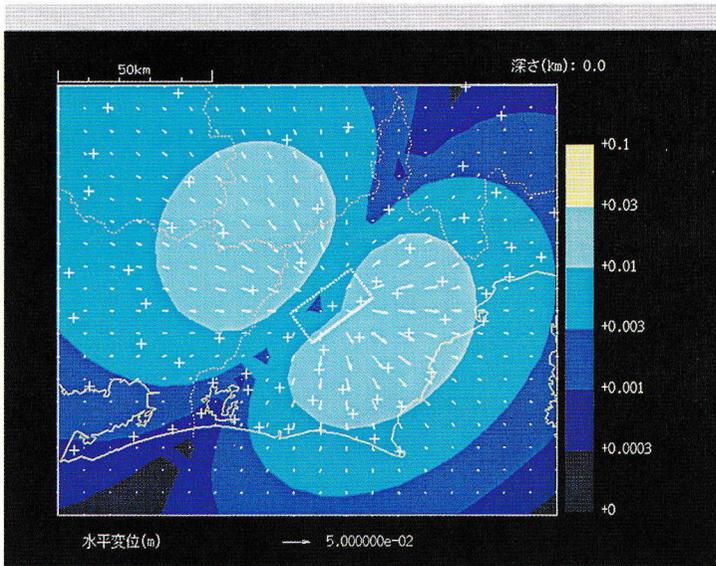
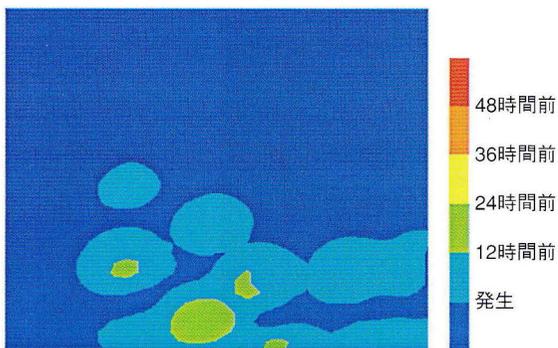


図 13

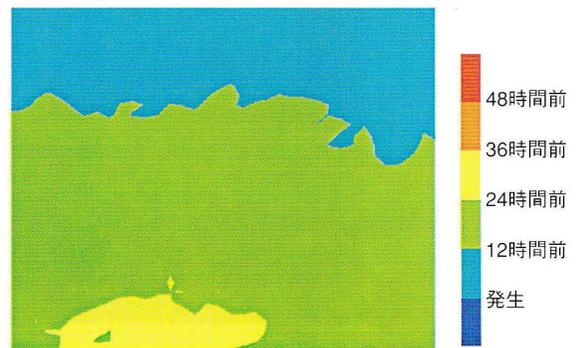
図の上側が領域北西側に対応



至3時間階差, 旧基準1点, 規模M6.5, 時間: 東南海

図 14

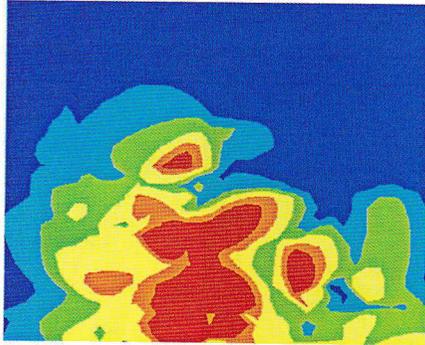
図の上側が領域北西側に対応



GPS, 10mm 3点, 規模M6.5, 時間: 東南海

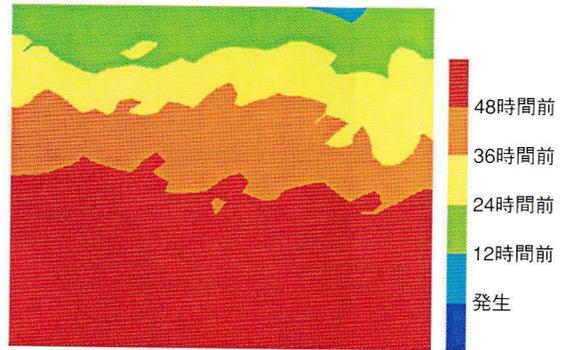
図 15

図の上側が領域北西側に対応



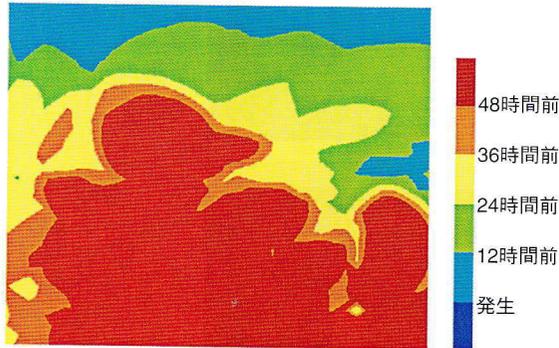
至3時間階差、新基準3点、規模M6.5、時間：東南海×2

図の上側が領域北西側に対応



GPS、10mm 3点、規模M6.5、時間：東南海×3

図 17



至24時間階差、新基準3点、規模M6.5、時間：東南海×2

図 16

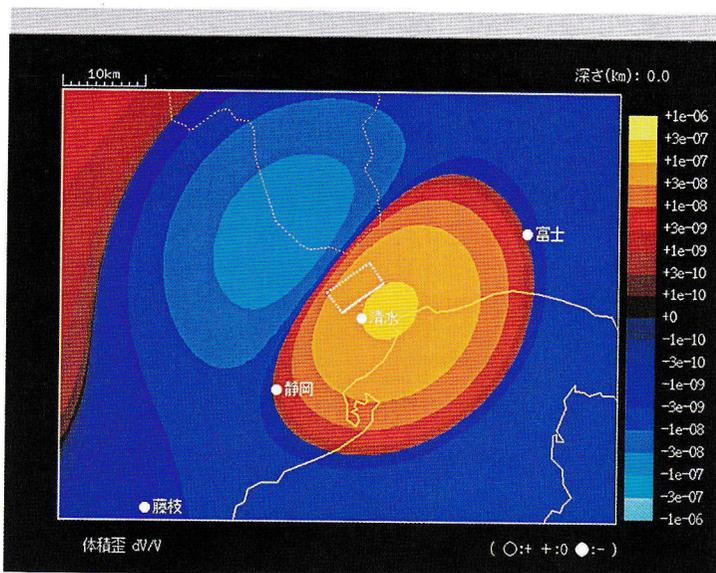


図 20

兆的变化が現れると期待されるか見てみよう。図5は掛川-御前崎間の相対的な水準の変化の様子を示すシミュレーション結果の一例である。地震発生の数年前から掛川に相対的な御前崎の沈降傾向が鈍り始め、直前には海側が急激に上昇に転じ

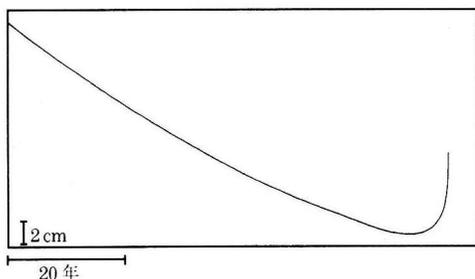


図5 掛川-御前崎間の相対的な水準の経年的な変化に関するシミュレーション結果の一例。御前崎側の沈降は数年前から停滞し、直前に上昇に転じている。

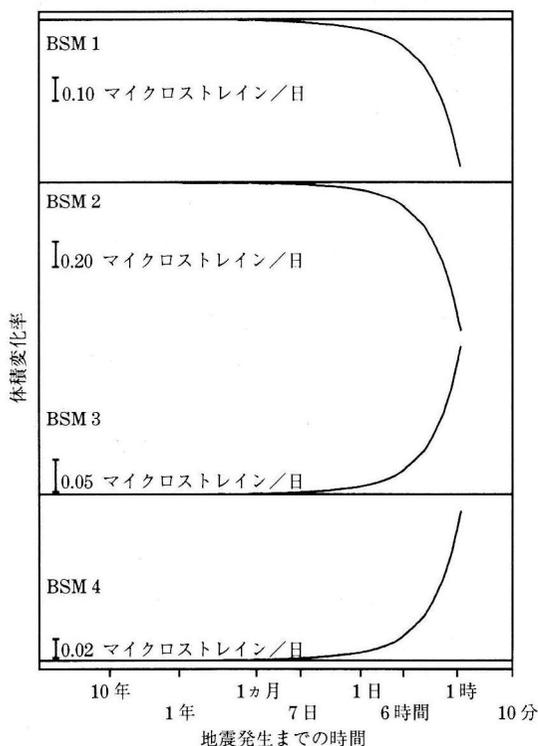


図6 地震発生の約10年前から直前までの体積歪変化に関するシミュレーション結果の一例。BSM 1, BSM 2, BSM 3, BSM 4は、それぞれ気象庁の体積歪計観測点の御前崎、浜岡、掛川、天竜に対応した地点。

ることがわかる。また、図6は地表付近における体積歪 (BSM1 から BSM4 まで順に、それぞれ気象庁の御前崎、浜岡、掛川、天竜の観測点に対応) の変化を示したもので、内陸側で縮み、海岸付近で伸びの違いはあるが、いずれも1日前ぐらいから加速的に変化が大きくなっていく様子が見てとれる。図7は地震発生前数日間の駿河湾西岸域各点の傾斜変化を示す。Kato and Hirasawa (1998)はこのシミュレーション結果から、現在の気象庁の体積歪計観測網によって直前の前兆現象が数時間前には検出できるだろうと推定している。

先にも述べたように、現行の数値シミュレーションの下敷きになっているモデルは現実の状況を非常に単純化したものであり、直前にどこですべりが始まり、それがどのように加速していった、地震発生直前にどこまでそのすべりが成長するか等に関して、モデルからはまだ決して確定的なことが言えないというのが現状だと思う。従っ

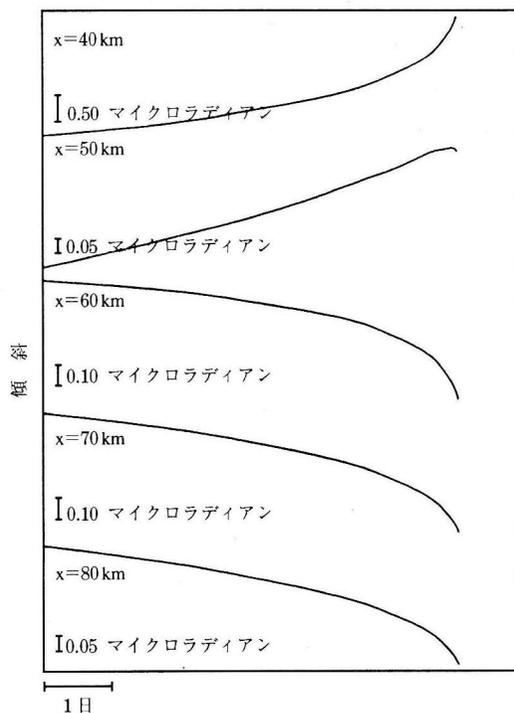


図7 トラフからの水平距離が40 km から80 kmの各地点における地震発生直前の傾斜変化に関するシミュレーション結果の一例

て、シミュレーション結果に依拠して監視基準を設定することはまだできない。しかし、破壊直前のゆっくりしたすべりは種々の条件下の室内実験で広く認められているものであり、それをターゲットにして地殻変動測器により直前の前兆現象捕捉を図るという方針は誤っていないと考える。次節では、気象庁の体積歪計観測網による、ゆっくりしたすべりに伴う体積歪変化の検知力について紹介する。

4. 前兆的すべりの検知力評価

すべりに伴う歪変化の検知可能性は、前兆的すべりがどのくらいの規模でどこで発生するか、その大きさと場所、及びその時間的な加速特性に加えて、体積歪計の分布と各観測点の歪変化検出可能レベルに依存する。図8は、東南海地震直前に掛川付近で実施されていた水準測量によって捉えられた傾斜変化の時間的推移をなめらかな関数表現したものと、シミュレーションモデルから推定される前兆すべりに伴う歪変化の時間的推移を並べて示したものである。どちらも最終的なすべり規模が同じになるように規格化してあるこれら両者を比べると、シミュレーションモデルの方が直前になって加速していく傾向がより顕著な様子が見える。ところで、気象庁では、現在、体積歪の

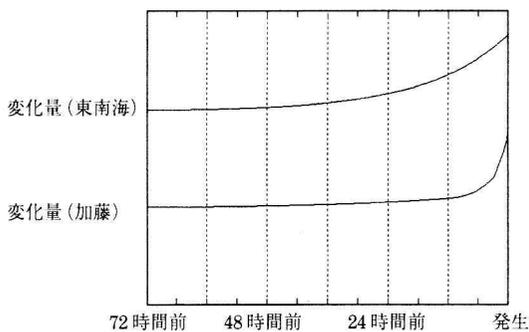


図8 上：東南海地震の直前に水準測量によって捉えられた傾斜変化の時間的推移をなめらかな関数で表現したもの。
下：数値シミュレーションから推定される前兆すべりに伴う歪変化の時間的推移。上図と最終的なすべりの規模が同じになるように規格化してある。

変化を1時間、3時間、1日の各階差についてそれぞれレベルを設定し、監視している。この基になったのは2年ほど前から作業を進めてきた、各体積歪計観測点のノイズレベルの調査である。本年4月には、この調査結果と前兆的体積歪変化の大きさに関する各種推定を基に、判定会招集基準を、従来の「体積歪計観測点のうち1箇所ですべて3時間以内に 0.5×10^{-6} 以上の変化が発生し、ほぼ同時時間帯において少なくとも他の3箇所以上で明瞭な変化が発生した場合」というものから、「歪計観測点のうち3箇所以上でそれぞれの地点の検出可能レベルの変化が観測された場合」ということに改めた。これはシミュレーションの結果や、東南海地震の際の傾斜変化の大きさ、断層すべりの室内実験等から鑑みて、従来の招集基準では判定会が招集されてから予知情報を報告するまでに十分な時間がとれないことがあると考えられたからである。その状況は以下の図からくみ取っていただけたかと思う。

図9は東海地域に設置されている気象庁の体積歪計観測点と国土地理院のGPS観測点の分布である。これらの図中の矩形領域は、微小地震の震源分布とそのメカニズム解から松村によって推定された固着域を周辺（特に北西領域）に拡大した領域を示す。以下の図の範囲はこの矩形領域を表している。上が北西側、下が南東側に対応している。先に述べたように、前兆すべりに伴う歪変化の検知可能性は、すべりの発生場所とその大きさ、観測点分布とそれぞれの地点の検出可能レベルに依存する。われわれは、今のところ、どのくらいの大きさのすべりがどこで発生するかあらかじめ決めてかかることはできない。図10、図11は、M6.5相当のすべりが図9に示した矩形領域内のどこかで生じた時に、地震発生前のいつの時点で新しい判定会招集基準に達するかを色分けして示したものである。図10は東南海地震の際の傾斜変化から推定されるすべりの拡大速度、また、図11は加藤・平澤による数値シミュレーションモデルから推定される時間変化を基にしている。数値モデルでは直前の加速傾向がより顕著なことから、検知時点は相対的に遅くなるが、東

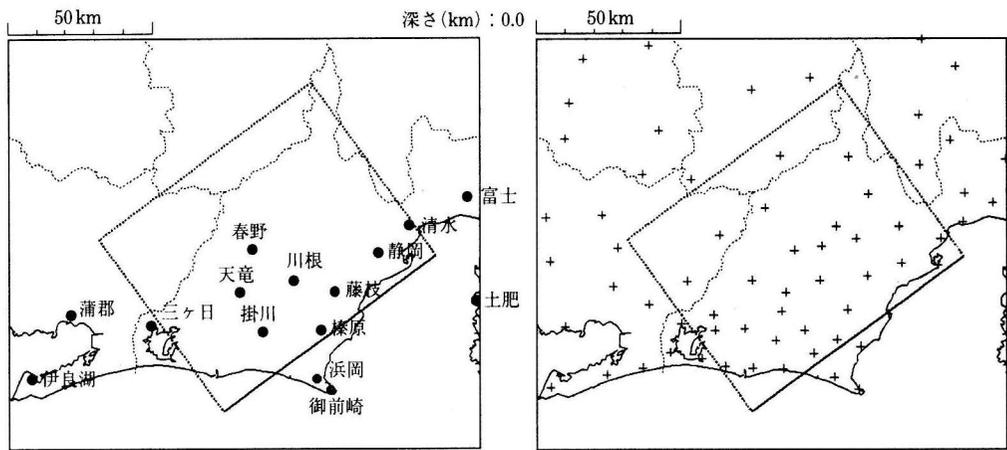


図 9 東海地域に設置されている気象庁及び静岡県の歪計観測点（左）と国土地理院の GPS 観測点（右）。両図中の矩形領域は、Matsumura (1997) によって推定されている固着域を周辺（特に北西側）に拡大した領域を表す。

南海地震の際のような時間経過をたどった場合には、矩形領域内のすべりに関してはほぼ半日以上前に招集基準レベルに達すると考えられる。ただし、すべりの規模がもっと小さかった場合には、検知がより厳しい状況になることは言うまでもない。M6.5 相当のすべりは M8 クラスの地震に対し、モーメントにして 1% 弱にあたる。これまでの観測結果や室内実験などから見て、もしかしてこれが前兆すべりの上限に近いという可能性も見ておかなければいけないかもしれない。なお、図 12, 13 に M6.5 相当のモーメント量のすべりが静岡県北西部で生じた場合の歪と水平変位の分布を示す。

図 14 は同じ M6.5 相当の規模の前兆すべりが生じた場合に、従来の判定会招集基準ではいつの時点でそれが満たされるかを、すべりの場所に応じて同様に色分けして示したもので、これから従来の基準ではほとんど予知情報の報告が間に合わなくなる心配があることを見ていただだけよう。図 15 は GPS 観測により 10 mm 以上の変位が 3 点以上で観測される時点の色分けである。これから、GPS 観測でも半日以上前にすべりを検知できる可能性のあることがわかる。

先にも述べたように、すべりの成長の早さについて、われわれは現時点では確定的なことは何もいえない。もし、もっとゆっくり成長してくる場

合には、図 16, 図 17 に示すように、より早い時点で検知できる可能性もあるが、逆にもっと急速に、そして最終的なすべりの大きさが予想よりも小さかった場合には、加速状況を見ながら間髪をおかず対応していかなければならなくなることも十分に考えておく必要がある。Kato and Hirasawa (1998) は、数値シミュレーションの結果に基づいて、気象庁の体積歪計の検出可能レベルを念頭におきつつ地震発生の数時間前に歪変化が捉えられるであろうと推定している。この余裕をもっと取りたいとしたら、新しい判定会招集基準の条件が満たされる前に、例えば 1 点でも検出可能レベルに達した時に、監視強化の立ち上げを行うということも考えて良いだろう。この時、問題は 1 点で検出可能レベルに達したという状況は、その原因がごく局所的なものによっても生じる場合があるということである。われわれはどこまで注意深く歪変化を見ていく必要があるか、更には、どの程度の変化まで、その観測結果を情報として発表すべきか。これらの問題については具体例を基にもう少し検討してみたい。

5. 今後の課題

気象庁は本年 10 月 12 日、清水の体積歪計が伸びの異常な変化を示しているという情報を発表し

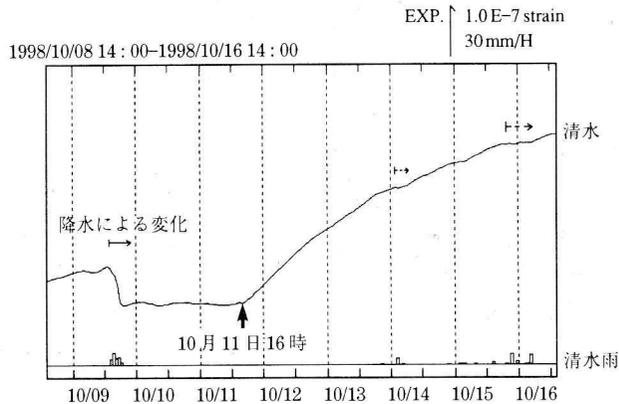


図 18 1998年10月11日から清水観測点で観測された体積歪変化

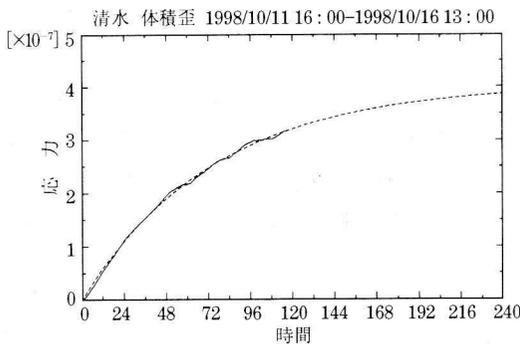


図 19 1998年10月11日から清水観測点で観測された体積歪変化(実線)と緩和過程としてフィットさせた時の曲線(破線)。緩和時定数は約3.2日

た。変化は11日の16時頃から始まり、3時間階差では検出可能レベルにまで達しなかったが、1日階差で翌日の昼前にレベル値を超えた。図18に数日間の変化の様子を示す。図19に見るように、16日の時点では緩和現象的に伸びがゆるんできていることがほぼ確認できるが、1日後にはまだそれが明瞭でなく、推移の見極めが難しかった。過去、例えば1992年と1986年に同様な変化が観測された時には、緩和時定数はそれぞれ1.6日と1.9日だった。それに対して今回は3.2日という長めの値が得られている。この変化は、結局、他のテレメータデータに何らの異常も観測されていないことと、過去にも似た事例があるということから、東海地震とは直接関係ないごく局所的な

応力変化であったと考えられるという判断で終わったが、1日階差で検出可能レベルを越えた時点ではまったく無視してよい現象とは見切れなかった。それは、図20に示すように、静岡や富士など近接の体積歪計観測点で異常が観測されなくても、プレート境界でのすべりが原因で変化が生じているという可能性を捨てきれなかったからである。気象庁があえて情報を発表したのは、なるべく早い時点で監視強化を行うとともに、その事実を広く国民に公開した方が良く考えたことによる。もし、当初から緩和的な、過去に見られたものと同様な現象とわかれば、今後は直ぐに情報発表する必要はないと考えている。

気象庁としてはプレート境界で生じるすべりをできる限り早い時点で捉えたいと思う。監視の基準をあえて検出可能レベルにまで下げたのは、われわれとしてはその分厳しいけれども、観測能力のベストを尽くして監視していこうという姿勢の現れである。しかし、その場合、どこまで見れば十分かが言えないというのがつらい。前兆すべりの規模が小さかった場合、検出可能レベルすれすれの変化しかでないかもしれないという可能性を否定しきれない。そこまで見なくてもよいと何らかの根拠を持って基準を示してくればありがたいが、それは今の研究レベルでは難しい。将来、もっと理解が進んでターゲットが鮮明になってくるまでは、はば広い視点から前兆を待っている必要があるだろうと思う。清水のように1点だけで

変化が現れた場合には、特に判断が難しいが、前兆すべりがMに換算して6程度になれば、1点でだけ変化が出るという状況は避けられると見ている。監視基準と情報発表について何らかの共通理解が得られるまで、今後も試行錯誤的に種々の対応をとっていくことになるだろうと思う。ただ、清水の一件の後、他の体積歪計観測点の過去の変化例を精査した結果では、一点だけの局所的な変化で情報をだすという可能性は少ないと見られる。

ところで、最近、サイレント地震が話題を呼んでいるが、プレート境界のカップリングのはがれが、地殻変動で見えてくる時間スケールで生じ、それが実際に観測でかかっても、直ちに東海地震には結びつかないということも十分に考えられる。その場合は空振りとなるが、もし変化が加速的で、例えば、前1日の変化量が12時間で達し、それを更に6時間で越えようとしているような場合、しかもそれが複数地点で観測された場合には、たとえ変化量は小さくてもかなり切迫性をもってその状況を受け止めなければならないと考える。

われわれは、気象庁の現業監視に最新の研究成果を組み入れて、解析手法の高度化を図っていきたくて考えている。数値シミュレーションの研究は前兆現象の現れ方について有用な情報を与えてくれるが、現在の数値シミュレーションに関しては、二次元であること、使っている摩擦構成則が実際の自然地震の時間空間スケールの現象にまでそのまま適用できるのかどうか、また、その中のパラメータ値の空間的な分布もかなり単純化されていることなど、今後なお検討すべき課題が残っている。従って、現行のシミュレーション結果に依って監視レベルや情報発表の基準を設定するのは尚早と考える。前兆すべりがどこでどのように始まるか、その大きさがいかほどのものになるか、現在の数値シミュレーションはまだ確定的な答えを与えてくれていない。その意味で、ターゲットは堅く絞られていないが、一方で、シミュレーション結果は直前にゆっくりしたすべりが生じ、それが次第に加速していった全面的な破壊に

到ることを示唆する結果を示している。また、現在の地殻変動の観測網によれば、マグニチュード換算でM6相当以上のすべりが生じれば、それを捕捉できる可能性があると考えられる。GPS観測や微小地震観測によって、カップリング状態の変化を追跡していきつつ、シミュレーション結果を参考に準備段階のどのステージにあるかを明らかにし、直前の前兆現象をキャッチすることに最善を尽くすというのが現在の気象庁の立場である。東海地震は必ず予知できるとはいえないけれども、予知に向けて最新の地震学の成果を投入し、観測体制を組んでいくことは、防災と科学の両面において大きな意義があると考えたい。

謝 辞

摩擦構成則とそれに基づくシミュレーションに関して、地質調査所の加藤尚之博士から多くのご教示を受けた。また加藤博士とStefan Wiemer博士は、未公刊の図の借用を許可して下さい。ここに記して厚く感謝する。なお、いうまでもないが、本文の内容に関しての責任はいっさい著者にある。

参考文献

- 本文では1篇の論文しか直接引用していないが、この小文を草すにあたっては多数の文献を参考にさせていただいた。その主なものを以下に記す。
- Dieterich, J.H., 1979, Modeling of rock friction 1. experimental results and constitutive equations, *J. Geophys. Res.*, 84, 2161-2175.
- Dieterich, J.H., 1978, Time-dependent friction and the mechanics of stick-slip, *Pure Appl. Geophys.*, 116, 790-806.
- Dieterich, J.H., 1992, Earthquake nucleations on faults with rate- and state-dependent strength, *Tectonophysics*, 211, 115-134.
- 加藤尚之, 1996a, 非地震性すべりの発生機構, *地震* 2, 49, 257-275.
- 加藤尚之, 1996b, プレート沈み込み速度のゆらぎと異常地殻変動—岩石実験から導かれた摩擦則を利用し

- た数値シミュレーション一, 月刊地球, 18, 793-797.
- 加藤尚之, 1998, Slowness law 及び slip law を用いた地震サイクルシミュレーション, 地球惑星科学関連学会 1998 年合同大会予稿集, 289.
- 加藤尚之・平澤朋郎, 1996, 仮想東海地震に先行する非地震性すべりと地殻変動の予測, 月刊地球号外 14「東海地震とその予知問題」, 126-132.
- Kato, N. and T. Hirasawa, 1997, A numerical study on seismic coupling along subduction zones using a laboratory-derived friction law, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 102, 51-68.
- Kato, N. and T. Hirasawa, 1998, A model for possible crustal deformation prior to a coming large interplate earthquake in the Tokai district, central Japan, in preparation.
- 榎原保人, 1989, 岩石の摩擦特性と地震断層運動論, 地震 2, 42, 105-116.
- Matsumura, S., 1997, Focal zone of a future Tokai earthquake inferred from the seismicity pattern around the plate interface, *Tectonophysics*, 273, 271-291.
- 松浦充宏, 1995, 地震の種の大きさ—地震予知は可能か—, 科学, 65, 273-278.
- 松浦充宏, 1998, 地震発生過程のモデリングと予測, 地震 2, 50, 別冊, 213-227.
- Mogi, K., 1985, Temporal variation of crustal deformation during the days preceding a thrust-type great earthquake — The 1944 Tonankai earthquake of magnitude 8.1, Japan, *Pure Appl. Geophys.*, 122, 765-780.
- 大中康馨, 1998, 地震発生に至る過程と予測: その物理法則と地学的環境要因の重要性, 地震 2, 50, 別冊, 129-155.
- Rice, J.R., 1993, Spatio-temporal complexity of slip on a fault, *J. Geophys. Res.*, 98, 9885-9907.
- Ruina, A.L., 1983, Slip instability and state variable friction laws, *J. Geophys. Res.*, 88, 10359-10370.
- Stuart, W.D., 1988, Forecast model for great earthquakes at the Nankai trough subduction zone, *Pure Appl. Geophys.*, 126, 619-641.
- Stuart, W.D. and T.E. Tullis, 1995, Fault model for preseismic deformation at Parkfield, California, *J. Geophys. Res.*, 100, 24079-24099.
- Tse, S.T. and J.R. Rice, 1986, Crustal earthquake instability in relation to the depth variation of friction slip properties, *J. Geophys. Res.*, 91, 9452-9472.
- Tullis, T.E., 1996, Rock friction and its implications for earthquake prediction examined via models of Parkfield earthquakes, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 93, 3803-3810.

南極の巨大地震

南極で初・M8級・有感地震

神沼克伊

はしがき

巨大地震発生

1998年3月25日、南極で初めての巨大地震が発生した。南極プレート内でマグニチュード(M)8クラスの地震の発生である。

世界初の地震学会である日本地震学会は1880年2月に横浜を中心に発生したM5.5~6の「横浜地震」を契機に、日本国内で当時の東京大学の外国人「お雇い教師」を中心に組織された。本地震はそれ以来、百数十年の地震学の歴史の中で、既存の地震帯の外側で起こった初めてのM8級の地震であった。

南極観測は1957年の国際地球観測年(IGY)の主要テーマとして、国際協力で始まり、今日に至っている。日本は昭和基地をリュツォ・ホルム湾のオングル諸島に建設し、地震、海洋潮汐、オーロラ、地磁気など多くの観測を継続している。昭和基地と同じく東南極盾状地の端に位置するフランスのデュモン・デュルビル基地で、基地にいた全員がこの地震を感じた。南極観測40年の歴史のなかで、初めての有感地震であった。

IGYが始まった頃の地震学の教科書には、「南極では火山地域以外で地震活動はない」とあった。その後、南極大陸の中にM5以下の小さな地震がときどき発生していることが明らかになってきた。南極大陸内に地震観測点が設けられた結果の成果である。

しかし、大地震はもちろん、巨大地震は起こらないと考えられていた南極大陸及びその周辺海域で、M8の地震が起こったのである。その概要について述べる。

アメリカ地質調査所(USGS)の地震情報センター(NEIC)は、世界中に分布する地震観測点から地震発生後ただちに報告される地震波到達時刻の結果をもとに、その震源や大きさを決定し、発表する。この速報に加え、その後に集まったデータも使ってより詳しい震源決定をした結果が、1週間後ぐらいに公表される。その報告による巨大地震の震源情報は次の通りである。

発生日時：1998年3月25日03時12分24.7秒

(UT：国際標準時)。

(06時12分24.7秒 昭和基地時間)。

(12時12分24.7秒 日本時間)。

緯度：南緯62.876度。

経度：東経149.712度。

深さ：10 km。

マグニチュード： $M_b=6.6$ 、 $M_s=8.0$ 、 $M_w=7.7$ 。

この地震について日本国内では、マスコミが騒ぎだしたらしい。地震発生が日本時間の12時13分過ぎで、マスコミから極地研究所や文部省南極観測推進本部への最初の問い合わせは16時30分頃であった。地震発生から震源決定、発表までの時間が3~4時間と極めて短い時間で、文明圏からはるかに離れた海洋域での地震発生が公表されたことになる。

問い合わせを受けた時、筆者は外国出張中で、地震の専門家は極地研究所にいなかった。しかし南極観測を担当する専門官がただちに昭和基地に、南極での地震発生を電話で問い合わせた。その結果、昭和基地(69°00'S, 39°35'E)の地震記録器上でも6時20分頃(昭和基地時間)から4時間以上も大地震の振動が継続していることが知ら

された。

国内のマスコミは昭和基地で被害がなかったことで興味を失ったらしく、その後の取材はほとんどなくなったが、地震研究者にとっては大きな問題を含んだ地震の発生である。

当日夕刻、ニュージーランドから成田に到着した筆者にも、ただちに地震発生が知らされた。筆者は地震は南極プレートの境界である既存の地震帯に発生した地震で、M8は何かの間違いではないかと考えた。しかし翌日、出勤した筆者の机の上に置かれたデータから、この予想は見事にくつがえされた。

南極の地震活動

国際地震センター（ISC）で決めた1964～1995年の南極大陸を中心とする南極プレート内の震央分布図を図1に示した。筆者は南極プレート内の地震活動を次の5区域に分けて考えることにしている（Kaminuma, 1994）。

(1) 南大洋 南極プレート境界と南極大陸の間の海洋域で、全体に地震活動度は低い。M6以上の地震は記録されていない。今回の巨大地震はこの海域で発生した。1996年9月25日、昭和基地の北東400 kmの地点でM4.6の地震が起こった。この地震も昭和基地が設けられて以来、40年目にして初めて昭和基地付近の南大洋に起こり、世界の地震観測網によって震源決定されたプレート内地震である。

(2) 南極半島先端付近 南極半島先端付近は南極大陸周辺でも特徴的な地域である。その第1はサウスシェトランド諸島が火山フロントであること、第2はサウスシェトランド諸島の北西側にサウスシェトランド海溝が存在すること、第3はサウスシェトランド諸島と南極半島間のブランスフィールド海峡は背弧であることなどである。南極大陸周辺ではテクトニクスの最も複雑な地域である。サウスシェトランド海溝は南極プレート内唯一の沈み込み帯である。ただし、その沈み込みは400万年前に停止したとの説が強く、現在過去

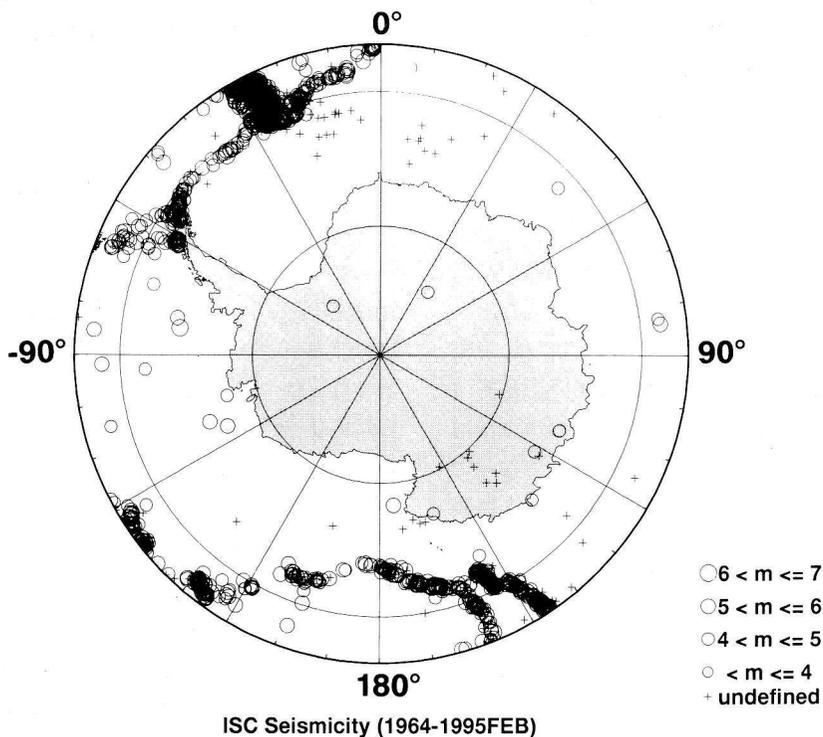


図1 1964～1995年のISCによって決められた南極大陸周辺及び南大洋の震史分布

40年間で100 kmより深い地震は起こっていない(Kaminuma, 1995).

1970年5月8日、 M_s 7.0の地震が活火山であるデセプション島の付近で起こっている。これは南極大陸周辺に起こった最大の地震である。火山に起因する地震が多いが南極プレート内でもっとも高い活動度の地域である。

(3) **南極大陸** 活動度は極めて低い。数年に1~2回程度M5以下の地震が起こっている。NEICやISCで震源決定されている地震で、Mが決まらない地震がウィルクスランドに集中している。30年間に10個の地震が大陸内で発生しているが、そのうち6個がウィルクスランドに震源決定されており、この地域が南極大陸内では相対的に最も地震活動が大きいのは確かである。ウィルクスランドは氷床下の基盤が海面下1,000 mの地域があり、氷床の厚さが4,000 mに達するので、あるいは氷震も含まれているかもしれない。また、大陸縁の張応力が原因の可能性もある。

(4) **沿岸地域** 大陸沿岸の露岩地帯から沖合いの大陸棚を含む地域を「沿岸地域」と定義する。

昭和基地、ニュージーランドのスコット基地(SBA: $77^{\circ}51'S$, $166^{\circ}45'E$)など2~3の基地からは局地的な地震活動が報告されている。M3以下の微小・極微小地震活動である。昭和基地の場合、氷床後退後の地殻の隆起に伴って起こっていると推定している。隆起がゆっくりなので、歪の蓄積も小さく大きな地震は起こらないと考えられる。ただし、この地域の歪の蓄積の原因として氷床後退後の地殻隆起ではなく、大陸縁に直角に働く張力の可能性を指摘する研究者もいる。

1993年、ロス海のテラ・ノバ湾沖合いでM5.1($72.46^{\circ}S$, $174.80^{\circ}E$, 深さ10 km)の地震が起こった。震央は水深が500 mより浅い海域で大陸棚である(南極大陸周辺の大陸棚は水深600 m程度)。この地震は沿岸地域最大の地震であるとともに、何十年か何百年に一回か分からないが、とにかくごくたまにM5クラスの地震が起こることが明らかになった。

(5) **火山性地震** 南極の火山噴火で確認されているのは、デセプション島($62^{\circ}57'S$, $60^{\circ}38'W$,

602 m , 1967, 1969-70年に噴火)とロス島のエレバス火山($77^{\circ}32'S$, $167^{\circ}09'E$, $3,794\text{ m}$, 1973年以来1998年まではほぼ連続的に活動)の二つである。しかし、南極半島、西南極、ロス島周辺のマクマード入江などで活動的火山の存在が認められている。特に人類が噴火を視認してはいないが、付近の氷の上に降灰が認められていることから、噴火があったと推定される例がいくつかある。

地震観測が行われたり、現在も行われているのはデセプション島、エレバス山、メルボルン山($74^{\circ}21'S$, $164^{\circ}42'E$, $2,590\text{ m}$)の三つである。それぞれ、かなり活発な地震活動が報告されている。メルボルン山は1988年以来、イタリアが地震観測網を設置し、人工衛星を介し、データを通年イタリアに送ることになっている。計画は必ずしも順調ではないが、多くの火山性地震の発生を確認している。

IGY以後、地球上の地震観測点の数は充実し、南極大陸及び周辺の地震観測点の数も10点を超し、現在に至っている。その結果、南極大陸及びその周辺の地震検知率が上がり、南極プレート内に震源決定される地震がでてきている。南極の地震活動像も大きく変化している。

南極地震観測網

筆者が南極研究科学委員会(SCAR)の求めにより調べた南極の地震観測網を図2に示す(Kaminuma, 1992)。広帯域デジタル地震計の観測が奨励され始めた頃のやや古い資料であるが、現在とほとんど変わっていない。図4に示した中国の中山基地にも、地震計が設置されたことが大陸内での唯一、地震観測点の増加になっている。デジタル地震計の数は当時の4点から、十数点に増えた。

アメリカが組織しているデジタル地震観測網(IRIS)の観測点として、南極点(SPA)とバンダ(VNDA)が稼働するようになった。フランスによるデジタル地震観測網(GEOSCOPE)の一つの点がデュモン・デュルビル基地(DRV)である。ともに各観測点のデータは、オンライン:リ

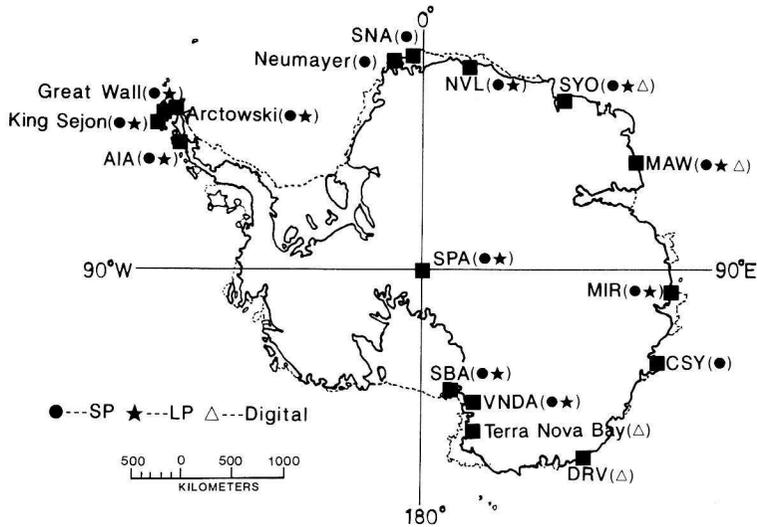


図2 南極大陸の地震観測点。△印のデジタル観測点は現在10点に増えている。

アルタイムに近い状態で、希望する研究者に届くのがタタマエではあるが、南極の場合、必ずしも理想的に動いていないようである。

かつて筆者は南極点の地震観測の実情を雑誌「地震」に紹介したが（神沼，1976），南極点の地震計室はその後，2回移動しており，1997/98年のシーズンに新しい地震計室に移設された。今回の巨大地震発生に際し，IRISのデータベースから南極点基地の波形を引き出そうと試みた人の話は聞いたが，成功したということはない。大陸内のドライバレーにあるVNDAはスコット基地を通じて，IRISネットワークへデータを送信することになっている。ところがVNDAからスコット基地へのデータ送信がうまくいかず，1980年代には夏の期間，毎年技術者が派遣されていた。結局信頼性が低いということで，スコット基地にSTS-2型地震計を設置し，VNDAの補助点としているはずである。

GEOSCOPEのDRVも同様である。今回の巨大地震のデータは船で持ち帰られ，2月頃フランス・ストラスブールに戻る予定という。

昭和基地のデジタルデータは，地震発生後2～3日後には，極地研究所に送られてきている。現地での観測に苦労している担当隊員のデータ使

用に関する優先権を認め，原則として2年間は非公開としているが，テーマにより必要に応じ，ただちに公開することも可能である。

9月になって得た情報であるが，韓国の世宗（King Sejon）基地では，これまでテレダイ社製の地震計でアナログ記録方式で観測しているのを，デジタル化しようと計画しているとのことである。新しく導入する器械の候補としてアカシ製を考えている。

南極の各基地とそれぞれの本国との通信手段，各基地間の連絡はずいぶん改善された。後述するように基地間ではファックスのやりとりもできる。昭和基地と日本とは電話，ファックス，E-mailとも使える。そんな時代になっても地震データを入手するのは大変だと改めて感じた。

有感地震

1998年3月25日，極地研究所から地震発生のお知らせを受けた昭和基地の渋谷和雄隊長はすぐ動き出した。隊長が地震研究者だったことが幸いした。渋谷隊長は震源に一番近いフランスのデュモン・デュルビル基地（DRV：66°40′S，140°01′E）に，情報提供をファックスで依頼した。その結果，

デュモン・デュルビル基地の隊長からは、基地にいた全員が揺れを感じ、棚から物が落ちたと、やはりファックスで回答があった。この報告から判断すれば、日本の気象庁震度階では3から4程度であろう。筆者は震度3としている。現在、イタリアなどで使っているのは改良メリカリ震度階であるが、この震度階では5となろう。

デュモン・デュルビル基地で地震を感じたニュースは当然、フランス国内にも知らされていると思っていた。事実、フランス基地に問い合わせをした渋谷隊長は、論文を前提にした問い合わせではなかったからという理由で、同地震の速報へ、自分の名を連ねることを遠慮していた。

ところが1998年7月、チリのコンセプションで開かれたSCARの固体地球物理学作業委員会(WG/SEG)で、筆者が、この地震の発生について述べたところ、インドのHarsh Gupta博士(アジア地震学会会長:インド地球物理学研究所長)以外は誰も、その事実を知らなかった。フランス代表のR. Schlich博士にいたっては、かつてGEOSCOPEの本部のストラズプールの地球物理研究所長であり、デュモン・デュルビル基地の地震観測の実質的な最高責任者である。そのSchlich博士も筆者の情報で初めてデュモン・デュルビル基地で有感であったことを知った。彼は日本流に言えば少しづつが悪そうに「何で私のところに情報がこなかったのだろうか」とつぶやいていた。いみじくも、地震国と非地震国の日常の地震観測に対する姿勢の違いがでたといえよう。

震央とDRVの距離は670 kmで、1923年の関東地震の時の岡山県付近の震央距離にほぼ等しい。関東地震では岡山県下の震度は2~3であるから、DRVで震度3ということは、この地震が関東地震と同程度かやや大きな地震であることは間違いなく、M8クラスの地震であったことは確かである。

南極の基地で地震を感じたことは少なくともこれまでに3回あった。

第1回は1967年12月4日、デセプション島で大噴火が起こった。19世紀の初頭から、デセプション島が火山島であることは分かっていたが、

その噴火が人類に視認されたのは、初めてであった。噴火に伴う二つの地震が世界の地震観測網で震源決定された。この地震は地震観測網で南極地域内に震源決定された最初の地震とされている。この爆発地震の振動をデセプション島にあったイギリス、チリ、アルゼンチンの基地で感じている。地震後、デセプション島の全ての基地は閉鎖された。

第2回は1970年2月8日、デセプション島付近に $M_b=6.6$, $M_s=7.0$ の地震が起こった。1969~70年にかけても、デセプション島は噴火を繰り返していたが、この地震は火山噴火とは直接関係ない構造的な地震であった。この地震はアルゼンチン島にあるイギリスのファラデー基地で有感であった。ISCのカタログには有感とだけあり、震度は報告されていない。

第3回目は1984年10月13日、エレバス火山の噴火に伴う振動を山麓のマクマード基地の何人かが感じたものである。エレバス山は1974年以来、ストロンボリ型の噴火を繰り返していたが、この時の噴火は規模が大きく、多量の火山噴出物が標高3,200 mより上の中央火口丘付近の斜面を黒く覆うほどの大爆発であった。

このようにこれまでの南極での有感地震は火山噴火に伴う火山性地震あるいは爆発地震、または火山地帯の構造的な地震であり、それを感じた基地も西南極の南極半島北西側に位置する島々とエレバス山の山麓に限られていた。

DRVは東南極盾状地の東南極の沿岸に位置する。東南極盾状地は超大陸ゴンドワナを構成していた地球上でも最も古い地質構造を有する陸塊である。このような地域の基地で地震動を感じたのは初めてである。南極観測史上初めてと記した理由である。

余震活動

NEICのQuick Earthquake Determination (QED)によると本震発生日から25日間で、約50個の余震が発生した。その震央分布と本震のメカニズム解を図3に示した。図から明らかなよう

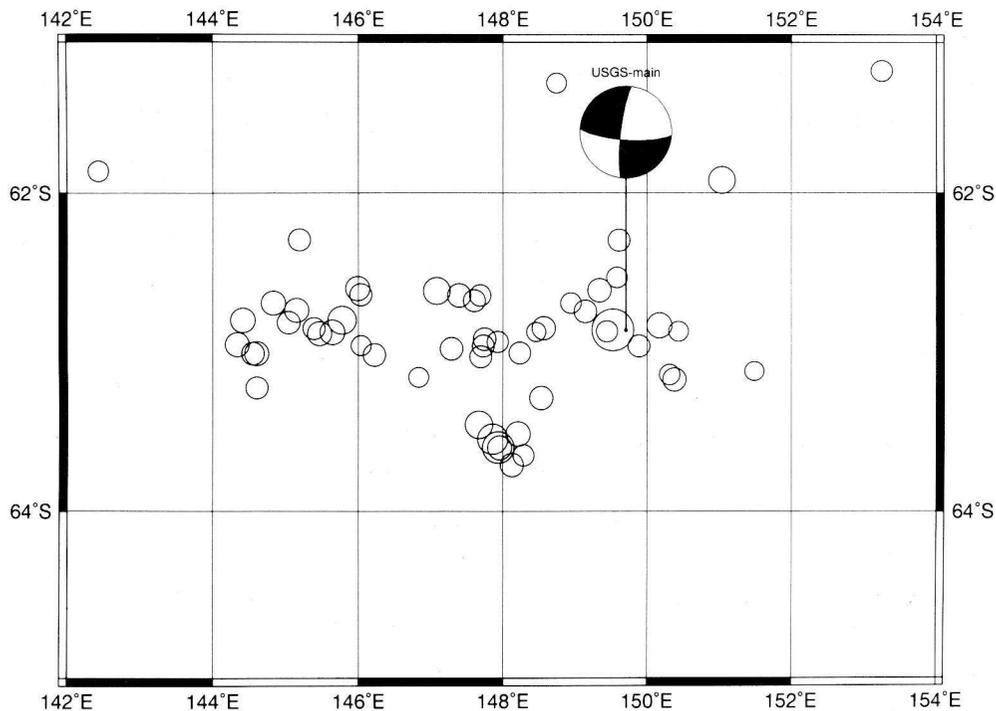


図 3 1998年3月25日に発生した巨大地震 ($M_s=8.0$) の震史, メカニズムと余震分布図.

に, 余震分布は本震震央から幅が 70 km で西側に 220 km, 東側に 60 km 延びている. また南側に 60 km 離れて 7 個の余震の集中がみられる. この南側の余震群のうち 4 個は, 本震発生後 24 時間で起こったため, 当初は本震の余震分布が北北東-南南西のようにみえた. ところが, 時間の経過とともに, 北側の東-西方向の余震分布がはっきりしてきた. この南側の余震グループに最大余震と二番目に大きな余震が含まれる.

最大余震は本震発生 9 時間後の 25 日 12 時 17 分に, 本震の南西 120 km の地点に発生し, $M_b=6.1$ である. この最大余震の発生する 6 時間前で, 本震発生から 3 時間後の 06 時 06 分に $M=4.3$ の余震が, 南側の最大余震域で起きている. さらに最大余震発生 1 時間後の 13 時 14 分に 2 番目に大きな余震 ($M_b=5.8$) が起こり, さらに 1 時間後にも $M_b=4.7$ の地震が発生し, 南側の余震群を形成した. したがって筆者はこの余震群を本震によって誘発された現象とみている. 本震発生により誘発されるように, 04 時 14 分に $M_b=4.5$ の地震がまず起こり, これが最大余震の前震で, 続い

表 1 日本の巨大地震の “ p ” 値と “ b ” 値

名 称	年	M	p	b
関 東	1923	7.9	1.3	
三 陸	1933	8.1	1.5	1.1
東 南 海	1944	7.9	1.1	0.7
南 海	1946	8.0	1.0	0.7
十 勝 沖	1952	8.2	1.1	0.8
十 勝 沖	1968	7.9	1.0	0.9
南 極	1998	8.0	0.9 ₀₇	1.0 ₄₂

て 5 時間後に, この余震群の本震となる最大余震, さらにその余震が起こったと考えている.

この余震群を除き, 東西方向に分布する余震の Gutenberg-Richter の “ b ” 値, 改良大森公式の “ p ” 値を求めた. “ b ” 値は宇津の方法 (Utsu, 1961), “ p ” 値は Ogata (1983) の方法を用いた. その結果, $b=1.04$, $p=0.90$ を得た.

表 1 に「図説・日本の地震」(神沼他・1973) に示されている日本の巨大地震の “ b ” と “ p ” を示した. 南極の地震の “ p ” の値は最小である. これは余震活動が長く続いたことを意味する.

“ b ” 値が1を超えているのも、本地震の特徴といえよう。一般に大きな“ b ” 値は地質年代が新しく、不均質な媒質で、破碎度が高い地域とされている。群発地震の“ b ” 値は大きいとされているが、松代地震（1965～67年）は $b=1.09$ （Ohtake, 1970）に対し、えびの地震（1968年）では時期により多少異なるが、 $b=0.7\sim 0.9$ （気象庁, 1969）の値であり、必ずしも大きいわけではない。したがって本地震の $b=1.09$ の解釈は他の $M=8$ クラスの地震に比べると M の小さな余震が数多く起こったと言えよう。

津 波

この地震の発生を聞いたとき、ただちに津波の発生が気になった。発生直後に得られていた地震のメカニズムからは、横ズレ断層の可能性が大きいので、津波が発生したとしても、それ程高い波ではないはずだ。昭和基地に問い合わせたところ、ただちに検潮儀のアナログ記録が送られてきた。しかし記録には津波らしい波形は見られな

かった。昭和基地の検潮記録を担当している海上保安庁水路部を通して得た気象庁地震火山部の情報でも、同庁が準リアルタイムでモニターしている南太平洋の検潮観測点でも津波波形は認められなかったという。

筆者はかねてから、南極大陸沿岸では周辺に発達する海水のため、大きな津波には襲われにくいと考えていた。これを確かめる良い機会と考え、アメリカ国立海水センター（NIC: National Ice Center）から提供された海水情報をもとに、海水の氷縁をトレースしたのが、図4である。南極大陸の東経40～150度付近の氷縁は、この時期南緯65～66度線に沿っており、陸地から200～400kmの沖合いにある。仮に振幅が数十cmの津波が起こっていたとしても、この海水によってそのエネルギーは減衰され、昭和基地では記録されなかった可能性もある。

メカニズム

地震発生直後から NEIC, ハーバード, 東京大

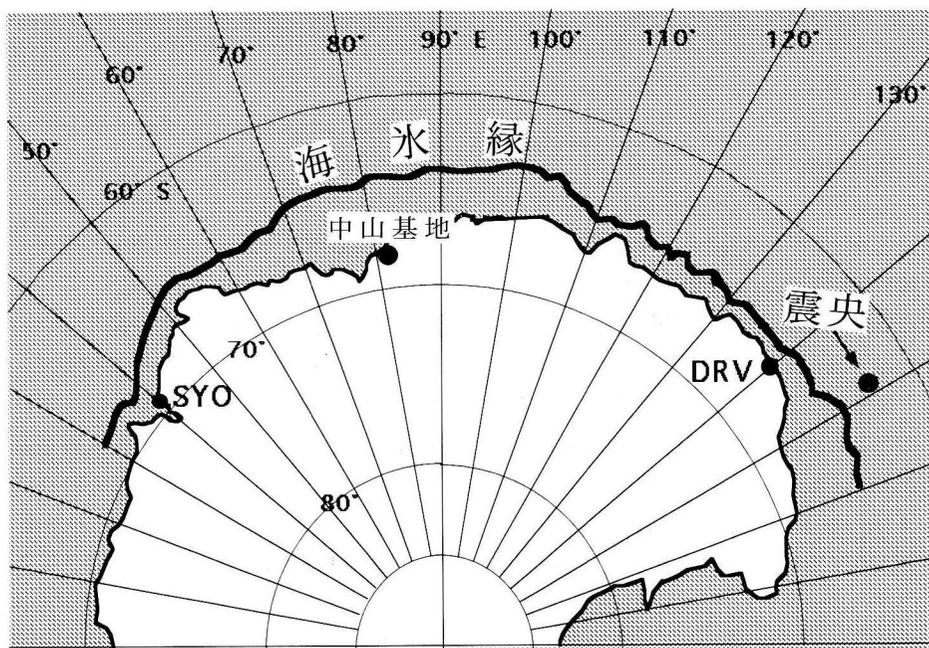


図4 1998年3月下旬、南極大陸東半球側の海水縁の分布。中央の中山基地にもデジタル地震計が設置された。

学地震研究所などからこの地震のメカニズム解が発表されている。地震発生直後に出された、いわゆるハーバード解が正断層の可能性を示したほかは、全てが横ズレ断層である。

NEIC の QED に報告されているハーバード解の二つの節面は以下の通りである。

本震 断層の方向： 94° ； 187°
断層の傾き： 76° ； 81°
滑り面の角度： -9° ； -65°
モーメント： $4.6 \times 10^{20} \text{ N}_m$

最大余震 断層の方向： 277° ； 179°
断層の傾き： 67° ； 71°
滑り面の角度： 21° ； 156°
モーメント： $5.4 \times 10^{18} \text{ N}_m$

本震及び最大余震とも二つの節面はほぼ東西と南北に走っていることが分かる。余震の分布からは本震の断層面の走行は東西方向と推定される。震央付近にある既存の海底断層帯の走行はほぼ南北である。この地震がプレート内で起こったことが確実になったとき、次に考えたのは断層帯上に起こったのではないかと推定した。しかし、余震分布をみても、断層帯とは関係なさそうである。詳しくみると震央も断層帯よりも離れていた。

人工衛星アルティメータによって求められている重力異常図をみると、北西-南東方向に異常の縞模様が並んでいる。

日本の南極観測船「しらせ」は1984年以来、昭和基地からの帰路、この海域を通過しており、地磁気3成分と海上重力の観測を継続している。現在詳しい解析を始めたところであるが、何か新しい事実の発見につながることを期待している。

これまで得られている本地震のメカニズム解には、南極の基地の地震データはほとんど入っていないはずである。デジタル地震計が設置されている基地からは、人工衛星を介してデジタルの地震データが、各基地に送られるはずであるが、前に述べたように実際にはなかなかうまくいっていない。

各国の研究者でこの地震に注目している人は少なくない。事実1998年12月6~9日、サンフランシスコで開かれるアメリカ地球物理連合 (AGU)

の1998年秋季大会では、地震学部門で「1998年3月25日南極地震 ($M_w=8.1$)」のセッションが設けられた。この地震のモデルの作成、テクトニクス、南極-オーストラリア-太平洋プレート三重会合の構造と進化などを検討することを目的にしている。

しかし、詳しい解析は南極大陸にある地震観測基地のデータが揃った時、初めて本格的になるであろう。

あとがき

南極の地震学は、地震学の中ではマイナーである。地震学界ばかりでなく「南極の科学」のなかでもマイナーである。南極といえばオーロラであり、巨大氷床である。動と静の両者の活動とともに、そのダイナミクスの解明が学問的に大変興味ある現象であることは、分野の異なる研究者にもすぐ理解される。

しかし、火山活動があり、大きな地震が起こっても不思議でない南極に、なぜ大地震は起きないのか。少なくとも南極大陸内で過去40年間にM5以上の地震は起きていない。南極プレートは本当に一枚のプレートなのか。沈み込み口がない南極プレートは拡大している。「拡大する南極プレート」はどんなメカニズムを有しているのだろうか。大陸上に存在する巨大氷床は固体地球に対し、どんな作用をしているのだろうか。等々、南極でも地震学や固体地球物理学の本質に迫る研究課題は少なくない。

筆者は南極で大きな地震が起きないメカニズムを明らかにすることは、将来の地震コントロールに役立つと考えている。予知もできない現状で、地震コントロールなどと笑われるかもしれない。かつて台風をコントロールするという話があったが最近では聞かなくなった。台風や地震のエネルギーは人間がコントロールするには大きすぎるのであろう。そうであっても、地震コントロールの可能性を考えるのは、夢物語であると同時に、地震現象をより深く理解することになると考えている。

本地震はプレート内地震としては史上最大である。そして、南極観測史上、初めての有感地震である。これまで考えられなかった二つの現象を同時に起こしたこの地震は、自然の奥深さを改めて示してくれた。筆者にとっては多くの地震研究者の目が少しの間だけでも、南極に向いたことでも意義があったと考えている。

近年の地震学の研究者の多くはコンピューターの前に座り、「何か」をする人がほとんどのようである。「何か」をするために使うデータの取得は全て他人まかせである。ブラックボックスを通して得られたデジタルデータを使うとき、その波の性質をどこまで理解して、コンピューターに向き合っているのだろうか。「インストルメントは自然への窓である」というレオナルド・ダ・ビンチの言葉に代表される（「地震予知と災害」、萩原尊禮著、丸善）ように、地球の息吹を直接感じる努力が、自然現象を理解し、解明するためには最も大切だと考えている。昭和基地で地震観測してくれる人には、いつもその大切さを説いてから現地に行ってもらっている。

なお、 p 値、 b 値の計算はこの地震を共同研究している極地研究所の COE 研究員・小林励司博士にいただいた。御礼申し上げます。

参考文献

- 神沼克伊, 1976, 南極点の地震, 地震 ii, 29, 200-202.
神沼克伊, 岩田孝行, 茅野一郎, 大竹政和, 1973, 図説日本の地震, 東京大学地震研究所・研究速報, 第9号, 136.
Kaminuma, K., 1992, Present status of seismic network in Antarctica, In Recent Progress in Antarctic Earth Science, ed. by Y. Yoshida et al., TERA-PUB, Tokyo, 475-481.
Kaminuma, K., 1994, Seismic activity in and around the Antarctic Continent, Terra Antarct., 1, 423-426.
Kaminuma, K., 1995, Seismicity around the Antarctic Peninsula, Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci., 8, 35-42.
気象庁, 1969, えびの地震調査報告, 気象庁技術報告, 第69号.
Ogata, Y., 1983, Estimation of the parameters in the modified Omori formula for aftershock frequencies by the maximum likelihood procedure, J. Phys., Earth, 31, 115-124.
Ohtake, M., 1970, Micro-structure of the seismic sequence related to a moderate earthquake, Bull. Earthq. Res. Inst., 48, 1053-1068.
Utsu, T., 1961, A statistical study on the occurrence of after shocks, Geophys. Mag., 30, 521-605.

短期地震予知VAN法の評価

上田誠也 K.S. Al-Damegh 吉田 均

はじめに

地電流異常シグナルに基づいて短期地震予知を行っているVAN法が最近話題になっている。しかし、その実績について詳しい検討がなされぬままに評価が大きく分かれている面がある。可能なかぎり実状に即した客観的評価を試みた。

VAN法の概要

よく知られているように地震予知、特に直前の短期予知は、社会の切実な要請にもかかわらず極めて困難である¹⁾。地震発生直前の前兆現象は古来数多く報告されているが²⁾、科学的情報としての信頼性に乏しいとされるからであろう。それらの中で、ギリシャのVAN法はその手法、実績、理論的基礎において、いまのところ群を抜いて科学的であるように思われる(VAN法の名称は3人の創始者Varotsos, Alexopoulos, Nomicosの頭文字に由来する)。本稿では、出来る限り客観的に情報を提供しつつ、実績面からVAN法の成功度やその限界を評価してみたい。

まず、VAN法の概要を説明しよう³⁻⁶⁾。VAN法では地中を流れる電流(地電流)を常時観測し、これに出現する異常には地震の前兆シグナルが含まれていると主張し、それらを地震電気信号(Seismic Electric Signals:以下SESと略称)と呼ぶ。実際に測定するのは2地点に埋められた電極(双極子)間の電位差(地電位差)である。周知のとおり、地電位(地電位差)は地磁気変動、人工的ノイズ、降雨、電極不安定などにより絶えず変動している。それらは皆、VANの目的から見るとノイズであり、SESを抽出するには除去し

なければならない。従来、地電流による地震予知の試みを妨げてきたこの問題を、VANはいくつかの判定基準を設けて解決したと主張する。この点については筆者らは客観テストを試み、肯定的な結論を得ている⁷⁾。

VANは、SESには次のような性質があることを発見したと主張する。

- 1) 典型的なSESの継続時間は1~20分程度(もっと長いこともある)であり、振幅はマグニチュード(M)5クラスの場合、震央から100km離れた地点で1mV/100m程度である。
- 2) SESは地表の限られた地点(SES敏感地点)でのみ観測され、その観測点で観測されるSESは特定の地域での地震にのみ対応する(選択規則, selectivityと呼ぶ)。ある観測点がSESを受けることができる震源域を示す地図(経験的に得られる)を、その観測点の選択地図(selectivity map)という。
- 3) SESは地震のMが大きければ強く、震央が遠ければ弱い。その関係は経験的に
$$\log(\Delta E \times r) = aM + b$$
と表される(ΔE : SESの振幅, r : 震央距離, a および b : 常数)。
- 4) 単独のSESが出現するときは、地震は約2週間以内に発生する。1日程度の短時間にSESが連発するとき(SES活動と呼ぶ)は、4週間程度で主震が起こるとき(ケース1)と、その時はM~5程度で収まり、更に2~3週間ほど後により大きな地震が追加発生すること(ケース2)がある。SES活動にともなうこのような時間経過パターンはそれが初めて認識された地震(ケーススタディのEQ 881016の項参照)にちなんで以下ではKillini-Vartholomio型時間経過と呼ぶ。

予知はこれらの経験則によって行われる。すなわち、ある観測点で SES が観測されると、まず 2) によって予想震源域が決まり、3) によって予想 M が決まる。予想発震時は 4) によって決まる。上記の経験的事実については VAN は一定の理論的モデル^{6),8)}を提示しているが、その詳細は他の機会にゆずり、本稿ではもっぱら予知実績の評価を行うことにしよう。

評価基準

評価は VAN 予知とギリシャ地域の地震を比較することによって行うわけだが、結論を先に言えば、まず、大規模地震 ($M \geq 5.5$) について個々のケースを検討し、ほぼ 70% の警告率が収められたことが確かめられた。次には、VAN の警告率が地震の M とともに劇的に向上することが検証された。警告率は $M \geq 4.0$ の地震については約 10% だが、 $M \geq 6.0$ の地震ではほぼ 100% であった。これは成功が偶然であった可能性が極めて乏しいことを意味する。ここに、成功率 S とは発信した予知情報のうち、何% が成功したか ($S = \text{予知に成功した地震数} / \text{予知情報の総数}$) であり、警告率 A とは地震総数のうち何% が予知されたか ($A = \text{予知に成功した地震数} / \text{地震総数}$) を示すものである。A においては、分母・分子には同一範囲の M を持つ地震数が用いられるのは当然である。かつての予備的調査 (4 中の上田, 1991) でも $M_s(\text{ATH}) \geq 5.3$ ($M_s(\text{ATH})$ とはアテネ観測所から発表されるマグニチュード) の地震についての成功率と警告率は両者とも約 60% になることが示されたが、今回は現時点までの個々のケースの事情をより詳しく検討したので、以下にその内容を報告する。

予知システムを評価するにあたっては、まず各々の予知が成功しているかどうかの評価を行う。VAN システムでは、震央のずれ (Δr) が約 100 km 以内、規模のずれ (ΔM) は約 0.7 以内、先行時間が単独 SES では約 2 週間以内、SES 活動では 6~8 週間以内の場合に予知は成功したと判断される。我々もおおむねこれらの基準を採用し

た。成功/失敗についての VAN グループ自身の判断は一連の出版物で見ることができるが、我々は VAN グループの判断は参考にとどめて、最終判断は我々自身の立場で行うようにした。その立場とは、あまりに厳密に数値基準を適用するよりはむしろ各々の事例の全体的状況を考慮することによって、「それらの予知のもとになった SES には、物理的に意義があったか」を判断基準としたということである。そもそも地震学的データそのもの、すなわち震央位置や M にもかなり曖昧さが存在するし、VAN の予知内容には時には一義的には解釈できない曖昧さがあるので、あまりに細かい議論は本質を見失う。予知の目標は数値的、定量的であるべきだが、現段階では SES が地震と本当に有意に関連しているのかどうかを最大問題だと考えるからである。それゆえ、本論文での「成功」という言葉は場合によっては「科学情報として注目に値する程度の成功」と解釈していただきたい。末尾に付したケーススタディによって、読者は我々の判断が妥当かどうかを判断できるだろう。

大規模地震の予知

我々はまず大規模地震すなわち $M \geq 5.5$ の地震に注目した。小規模地震は数が多すぎ、各機関から発表される地震カタログでは、しばしば M や震央位置にずれがあり、それに起因する 2 次的な問題が派生するので、数の少ない大規模地震を取り上げたのである。地震予知で本当に問題になるのは大規模地震に関してであることからしても、これに重点を置くことは適切であろう。

1984 年 1 月 1 日から 1997 年 11 月 30 日の期間中には、表 1 で示されているように $36.0^\circ \sim 41.5^\circ \text{ N}$, $20.0^\circ \sim 25.0^\circ \text{ E}$ の範囲内に USGS PDE mb ≥ 5.5 (これはアメリカ地質調査所の発表するマグニチュード。世界的に入手が容易なので採用: ギリシャの $M_s(\text{ATH})$ とはほぼ $M_s(\text{ATH}) = \text{mb} + 0.3$ の関係がある⁹⁾) の地震が 13 回発生した。以下では、年月日を用いて地震、観測された SES、予知情報をそれぞれ EQ 950513, SES 950413, PD

表 1 1984年1月1日～1997年11月30日の間にギリシャ地域で発生した $mb \geq 5.5$ の全地震

date	time	mb	M_s (ATH)	lat	long	depth [km]	station	M_s (ATH) (predicted)	Δt [days]	Δr [km]	ΔM
850430	18:14	5.5	5.8	39.3	22.8	26	ASS	5.0	5	50	0.8
860913	17:24	6.0	6.2	37.0	22.2	11	KER	* 1			
881016	12:34	5.5	6.0	37.9	20.9	25	IOA	5.3	13	10	0.5
900616	02:16	5.6	6.0	39.3	20.5	31	IOA	5.8	22	130	0.1
901221	06:57	5.8	5.9	41.0	22.3	13	ASS	* 2			
921118	21:10	5.9	5.7	38.3	22.5	14	PAT	≥ 5.0	10	≤ 40	
930318	15:47	5.7	5.4	38.3	22.2	59	IOA	* 3			
940901	16:12	5.8	6.4	41.2	21.2	19	IOA	* 4			
950513	08:47	6.2	6.6	40.1	21.7	13	IOA	6.0	24	80	0.5
950615	00:15	6.1	6.1	38.4	22.3	14	VOL	6.6	45	40	0.2
971013	13:40	6.3	5.8	36.3	22.1	10		* 5			
971105	21:10	5.6	5.4	38.4	22.4	10	IOA	5.5	32	~40	0.4
971118	13:07	5.9	6.6	37.6	20.6	33N	IOA	5.5	45	~20	0.7

全ての地震パラメーターは USGS PDE カタログによる。 $\Delta M = mb + 0.3 - M_s(ATH)_{pred}$ である。

- * 1: SES は観測されたが KER 観測点の selectivity map が不完全であったため震央を特定することができなかった。
- * 2: SES は観測されたが ASS 観測点の selectivity map が不完全であったため震央を特定することができず予知情報を発信しなかった。
- * 3: SES が多数観測されたが対応関係を特定できず予知に失敗した。
- * 4: 予想される震央がギリシャ国外であったため予知情報を発信しなかった。
- * 5: 対応する SES を認知できなかった。

950427 のように記す。短期予知にあたっては、それらの日時の前後関係が極めて重要なのでこの表記法が有用と思われるからである。

結果は図 1a に示されている (図 1b は関連する地理名称)。灰色の丸は我々の判断基準で予知に成功した地震である。北方の EQ 940901 はギリシャ国外で発生するものと推定されたので予知は発信されなかった (事実その通りとなったがここではノーカウントとする)。EQ 860913 (Kalamata 地震)、EQ 901221、EQ 930318 は失敗例である。前者二つの場合では、SES は観測されたが関係する観測点の selectivity map (上述) が不完全であったため震央を推定することができなかった。第 3 の場合 (EQ 930318) は形式上の基準ではかろうじて成功したとも言えるが、同時にギリシャ西部のピルゴス (図 1b) 地域で地震活動が始まっており、VAN の注意はその地震活動とそれ

に関係する SES に向けられていた。そのためこのギリシャ中部での地震についての明確な記述は彼らの予知には見られない。したがって、この場合は予知し損ねた地震であると考えたほうがよいと我々は判断した。国外地震 EQ 940901 を除くと警告率は $A = 8/12 = 67\%$ となる。EQ 921118 は VAN グループ以外のメンバーすなわち Patras 大学の研究者が増加傾向にあった微小地震活動と彼ら自身の SES データに基づいて予知した特別な場合である。各地震についての判断の根拠はケーススタディの項を参照されたい。

警告率 (A) と成功率 (S)

$A = 67\%$ という警告率は驚くべき値である。しかし、もし予知が非常に頻繁に出されていればその値にはそれほど意味はない。もし予知が毎日出

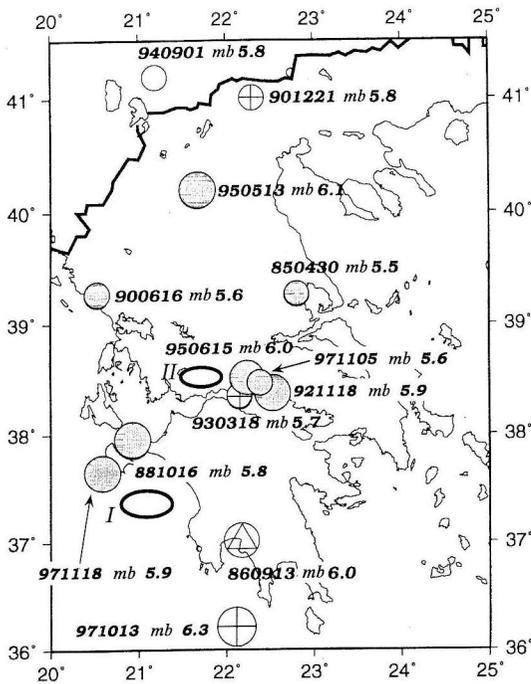
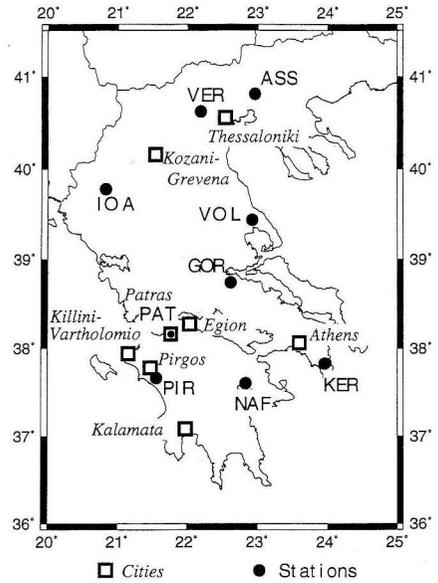


図 1 a) 1984年1月1日から1997年11月30日までのUSGS PDE mb \geq 5.5の全地震
 灰色の丸: 予知に成功, 三角付きの丸: 予知に不成功, 十字丸: 予知情報なし, 白丸: 予想震央がギリシャ国外. I, II と記した楕円は1997年11月の地震(EQ971118, EQ971105)に対する予想震央

されていたなら, A は100%となるからである。しかし, その場合には予知の成功率 S は非常に低くなるであろう。では実際の成功率はどうであったろうか? ここで問題とした予知の数は予想規模が $mb \geq 5.5$ (VAN 予知では $M_s(ATH) \geq 5.8$) のものの数である。残念ながら14年の研究期間の予知の全リストは手元にない。しかし, 1987~1995年の9年間に関しては, 全リストが集められたので^{6), 10-14)}, それによって成功率を調べた。上記の9年間にVANグループは $M_s(ATH) \geq 5.8$ (すなわち $mb \geq 5.5$) を予想した予知情報を20回発信している。これらのうち18回はVANによって成功したと考えられており, 成功率は $S = 18/20 = 90\%$ となる。VAN自身の査定が甘かった可能性を考慮してもこの成功率も実に驚異的であるが, ここで重要な点は先に得られた高い警告



b) 本文中の地理名称.

率 ($A \approx 67\%$) が単に予知情報を多く出すことにより達成されているのではないということである。もし予知情報を多く出せば成功率 S は必然的に低下するからである。

マグニチュード (M) と警告率の関係

浜田⁹⁾によって早くから指摘されていた一つの顕著な事実は警告率 A が M とともに劇的に増加するという事, そしてそれはグーテンベルグ・リヒター型の分布 (小さい地震の数が指数関数的に増大する) をする地震活動にランダムな予知情報を出した場合にはまず起こり得ない現象であるということである。われわれは1987年1月1日から1995年12月31日までの間, $19.0^\circ \sim 25.0^\circ E$, $36.0^\circ \sim 42.0^\circ N$ の地域のUSGS PDE $mb \geq 4.0$ の地震に対し同様な評価を行った。小地震を含むので地震数も予知数も膨大となり, 前述の大規模地震のようにはそれらを個々に詳しく評価はしなかった。しかし, 大規模地震の結果から見てVANの評価は概して納得できるものであり, 我々の評価との間にいくつかの不一致があっても, 以下の結論には影響を与えないであろうと判断された。 M とともに警告率が上昇する様子は図

地震予知学 新たな科学的挑戦

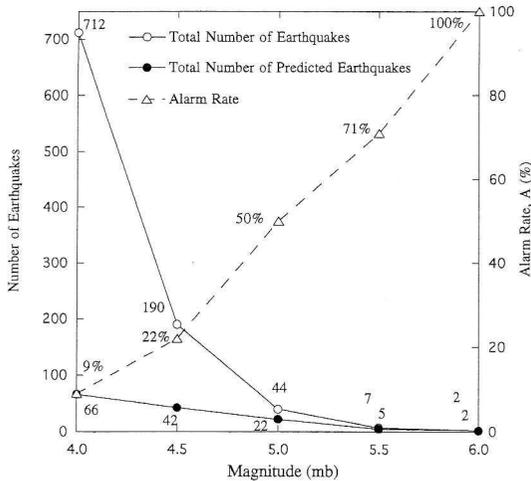


図2 警告率 A とマグニチュードの関係
白丸：横軸のマグニチュードより大きな地震の総数，黒丸：予知成功地震の総数，三角：それらの比，すなわち警告率（1987年1月1日から1995年12月31日； $19.0^{\circ} \sim 25.0^{\circ} \text{E}$ ， $36.0^{\circ} \sim 42.0^{\circ} \text{N}$ の範囲）。

2に見ることができる。縦軸は横軸に示された M より大きな地震についての地震総数，予知された地震総数，そしてそれらの比，すなわち警告率 A である。1987年1月1日から1995年12月31日という期間を図1の大規模地震の場合とは異なっている。この期間を選んだのは完全な予知リストが入手できるので，興味のある方は我々の結果を確認することができるからである。図に見られるように警告率 A は $mb \geq 4.0$ ではわずかに約10%であるが， M とともに増加し， $mb \geq 6.0$ の地震では100%に達している（100%という値は特定の研究期間を選択したために生じたものである。例えば，EQ 860913の失敗（Kalamata地震）は今回の調査期間にはいっていないので数えられなかった）。我々の成功/失敗の判断がVANとは異なる事例がいくつか存在するにせよ，図2の全体的な傾向は動かし難く思われる。VANシステムがために予知を発していたとしたら，大きい地震に選択的に成功するという可能性は極めて低だろう。

予知の批判者達は，過去の有名な地震学者や委員会などによって提案された「あるべき地震予知のための必要条件」をししばしば引用する（例えば文献15）。たしかに世にししばしば出現するまよかしの地震予知から民衆を守るためには何らかの基準は必要であろう。しかし，我々の考えでは引用される必要条件是現時点ではあまりに厳格すぎ，結果として大多数の地震学者は「地震予知は不可能」と結論付けてしまうように思われる。それはライト兄弟がはじめて飛んだときに，いきなり世界をつなぐ商業航空サービスを要求し，「それが出来ないからダメだ」と言うようなものではないだろうか？ 確かに社会のニーズに完全に答えるには，厳格な条件が必要だろうが，現在の科学はそこまで到達してはいない。しかしながら，「地震予知学の推進」は従来の地震学には含まれない新しい方法論に基づくエキサイティングな科学的挑戦である。「地震予知学」も他の新しい科学と同じく初歩的段階から始めなくてはならないのであって，不完全だからといって切り捨てる態度は正しいとは思えない。

ケーススタディ

EQ 850430 の場合：Volos 地震¹⁶⁾

ASS (Assiros) 観測点で観測された SES 850425 に基づいて，Thessaloniki から 90 km の位置を震央とする $M_s(\text{ATH}) = 5.0$ の地震を予想した PD 850425 が発信された。5日後，EQ 850430 ($mb = 5.5$) が Thessaloniki から 140 km の地点で発生した。先行時間は $\Delta t = 5$ 日，規模のずれは $\Delta M = mb + 0.3 - M_s(\text{ATH}) = 0.8$ であった。PD 850425 では Thessaloniki からの方位については述べられていなかったため Δr の推定は困難である。これは恐らく当時 ASS の selectivity map が不完全であったためと思われる。厳密な成功/失敗の基準を適用すればこの場合は失敗となる。しかし，このケースはギリシャ当局が VAN

グループに引きつづいての予知を要請をした特異な事例の一つであった。そのいきさつは以下の通りである。この地震の数年前、1980年7月9日にEQ 850430と同じVolos市近くで $M_s(ATH) = 6.5$ の地震が2回発生した。そして、これらの被害地震の1週間前から $M_s(ATH) = 5.8$ を含む地震活動が始まっていた。地震学者たちは今度もEQ 850430にひきつづいて、同じような大地震が発生するかもしれないと述べ、住民たちも前の記憶から恐怖をおぼえ、広範囲にパニックが発生した。この段階で、当局の要請に応じてVANは公に発表を行い、問題の地域ではVAN観測網は十分ではないが、より顕著な地震すなわち $M_s(ATH) > 5$ あるいは6の後続発生を予想させるような前兆は全く検出されていないので、人々に家に戻るように勧告したのである。確かにその後、大きな地震はなく、この否定的予知は正しかった。事件全体から判断して、われわれはこの事例におけるSESの役割は有意であったと判断した。

EQ 860913 の場合 : Kalamata 地震¹⁷⁾

弱いSESを多数伴い、かつ継続時間が数時間におよぶ強いSES 860908、SES 860910がアテネ南東30kmのKER (Keratea) 観測点で観測された。この後にKalamata市の北約15kmでEQ 860913 ($m_b = 6.0$) およびEQ 860915 ($m_b = 4.9$) が発生した。EQ 860913はそれ以前の約5年間で最も破壊的な地震であった。SESはKalamataに近い観測点、例えばNAF (Nafplio) 観測点では観測されなかった。当時KER観測点はわずか3か月しか稼働しておらずselectivity mapの情報が十分ではなかった。このためVANグループは大地震の切迫を確信はしたが、予想震央位置を特定することができなかった。ギリシャ政府に送ったVANの公式電報PD 860911では「アテネから $r = 100$ kmの場合は $M_s(ATH) = 4.5$ 、 $r = 200$ kmの場合は $M_s(ATH) = 5.5$ 」と書いてある。それにはアテネからの方位について述べておらず、このためVANも認めているように予知は不成功であった。Drakopoulos et al.¹⁸⁾はVANの予知電報には第二の選択肢すなわち $r = 200$ km

の場合は $M_s(ATH) = 5.5$ のことは示されていないと非難した。しかし、これはVarotsos et al.¹⁹⁾が指摘したようにDrakopoulos et al.の誤りである。すなわち、Drakopoulos et al.が電報として引用した文書は、第二の選択肢が含まれている電報を送る前に行われたVarotsosと国防当局との電話での会話の単なるメモであったからである。

EQ 881016 の場合 : Killini-Vartholomio 地震¹⁰⁻¹²⁾

これはいわゆるKillini-Vartholomio地震(1988年9~10月)の中での最大地震であった。予知も地震も全くなかった約3か月の後、四つの明瞭なピークを持つ強いSES 880831活動がIOAで観測され、PD 880901 (アテネの西240 kmで $M_s(ATH) = 5.8$ またはアテネの北西300 kmで $M_s(ATH) = 5.3$ が出された。この種の二重予知(double prediction)は現在のVAN法の限界である。約20日後、KilliniでEQ 880922 ($m_b = 5.0$)が発生した。上記の二つの予知内容のうち最初の方とは $\Delta r =$ 約20 km、 $\Delta M =$ 約0.5であった。このときは一般大衆は政府による警告ではなく、VAN電報を受け取ったフランスのH. Tazief教授からの警告を受けていた。その後更に、SES 880929活動が発生し、VANはPD 880930とPD 881003を発信した。PD 880930も二重予知であり、一つは新たな震央はEQ 880922の震央から数十km離れ、 $M_s(ATH) = 5.3$ であろうと述べた。PD 881003は、10月に入っても多数の信号が続いているので、この地域の地震活動がまだ終わっていないことを喚起するために発信されたものである。EQ 880922に続いて3週間一連の小規模地震が発生した後、 $\Delta r = 10 \sim 20$ kmのEQ 881016 ($M_s(ATH) = 6.0$)が発生し、Vartholomio村に大被害を発生させた。Killini-Vartholomio地震におけるVAN予知情報に対する市民の対応については文献20)に詳述されている。地震発生の時間経過はそれ以前のケース(SES発生後、約2週間で本震発生)とは異なったが、全体的な地震発生の経過から判断して、この事例は驚くべき成功であった。事実、この事例によって、SES活動(単独SESではなく)の場合には、“最大地震は通常

SES 発生後約 4 週間目に起こる (ケース 1). さもないときは, その週には M~5 程度の地震にとどまり, 最大地震がさらに 2~3 週間後に起こる (ケース 2).” という重要な新現象—Killini-Vartholomio 型時間経過—が認識されたのである⁶⁾. Geller¹⁵⁾ は PD 881003 では明確な予知はしていないからこの場合は失敗であると結論した. PD 881003 が, 明確な情報を含んでいる先の二つの予知情報に注意を喚起するためのものであったという事実を無視したため, Geller は誤った結論をしたのらしい.

EQ 900616 の場合 : ^{10), 13)}

Ms(ATH)=5.8 の地震が Killini-Vartholomio 地域近辺で発生するであろうとする PD 900528 が, IOA 観測点で観測された SES 900524 に基づいて発信された. その 18 日後, EQ 900616 がアテネの西北西 300 km で発生した. $\Delta t = 22$ 日, $\Delta r \sim 130$ km, $\Delta M = 0.1$ であった. Δt は Killini-Vartholomio 型時間経過の場合と一致していた. Δr は 100 km 以上なので厳密な基準によればこの予知は不成功ということになるであろう. しかし, 我々は以下の考えから不成功とはしなかった. 実は EQ 900616 は 1988 年の Killini-Vartholomio 地震の場合のように一連の地震活動の最終段階で発生したのである. すなわち, 最初は SES 900426 活動が IOA 観測点で観測された. この SES 活動のシグナルはベクトル方向を除いて波形, 振幅, 極性の点で EQ 880922 (Killini 地震) の前に出現した SES 880831 と酷似していた. そこで VAN グループはすぐに Tectonophysics 誌に PD 900427 を送った. 同誌は 1990 年 4 月 27 日 (すなわち EQ 900616 の発生はるか前) を投稿受付日として, これを出版した¹⁰⁾. 予知情報の中では新たな震央は Killini-Vartholomio から数十 km のところかもしれないとされていた. 実際, 小規模地震が通常の 2 週間以内に始まり, その後 1 回目と 2 回目の顕著な地震が約 3 週間後と 4 週間後に発生した. その後, ついに最大地震 EQ 900616 (Ms(ATH)=6.0) が発生した. Killini-Vartholomio 型の時間経過を辿ったのである.

したがって, 地震発生の流れから見れば SES と地震との物理的相互関係は意義があると見なされるべきであろう.

EQ 901221 の場合 : 予知に失敗した地震^{10), 13)}

1990 年 12 月 3 日に SES 活動が ASS 観測点で観測され始めたが, ASS の selectivity map が不完全で震央が推定できなかったため予知が行われなかった. 当時ギリシャ北部では他の観測点は稼働していなかった.

EQ 921118 の場合 : ¹⁴⁾

複数の SES が 1992 年 11 月 4 日と 8 日に Patras 大学 (A. Tselentis 教授, A. Ifantis 教授担当) によって稼働していた Patras (PAT) 観測点 (図 1 b) で観測された. 数百の小規模地震を伴った微小地震活動が Patras の北約 50 km の Nafpactos 地域で 11 月 11 日に始まった. Tselentis 教授は IOA を含め他の VAN 観測点では SES が記録されていないことを確認した後, PD 921113 で当局に Nafpactos 地域に地震観測網を早急に配置するように勧めた. 当時 Varotsos 教授は病いを得て入院中であった. PD 921113 は明確な震央やマグニチュードの予知情報を含んでいなかったが, 予想震央が Nafpactos の近くであることは自明だったし, かかる要請をするときの慣行により予想 M が 5 以上であったことも理解される. その数日後, EQ 921118 (mb=5.9) が発生した. 批判者の中には VAN 法の予知では微小地震の情報を利用するべきではないと主張する人がいるが, 我々はこの主張には賛成しない. 予知にはすべての情報が利用されてしかるべきであろう. しかも PAT 観測点の selectivity map が未知であり, また Tselentis 教授にとっては最初の経験であったことを考えれば, この事例で SES が重要な役割を果たしたことは明らかである. すなわち, 顕著な微小地震活動だけなら Patras では頻繁に観測されるが, 警告はこの場合以外には出されていないからである.

EQ 930318 の場合 :¹⁴⁾

1993年初頭にピルゴス地域で一連の地震活動があった。それは IOA 観測点で観測された SES 930127 活動と SES 930129 活動および、それに基づく PD 930130 に続いてはじまった。PD 930130 は Killini-Vartholomio地震(1988) に似た連続地震活動が予想されると述べている。その後、2月14日に始まった Pirgos 市近くの $M_s(ATH)=4.7$ の地震を含む地震活動や、2月16日にも起きた SES 活動を考慮して、VAN は付加的予知 PD 930226 を発信した。その予知情報では、より規模の大きい地震が予想されること、しかし予想震央は海域と判断されるので民衆は恐れるべきではないという重要な情報が述べられていた。事実、 $M_s(ATH)=5.9$ ($mb=5.2 \leq 5.5$ のため図2には示されていない) の EQ 930305 が Pirgos 南方数十 km の湾内で発生した。さらに3月20, 21, 24日には IOA 観測点で新たな SES が記録され、それに基づいて予想規模 $M_s(ATH)=5.5$ の地震が Pirgos 近くで発生するかもしれないという PD 930324 が発信された。3月24日、ギリシャの地震当局の責任者がこれに対する否定的見解を公表したにもかかわらず、翌3月25日に $M_s(ATH)=5.3$ の被害地震を含む一連の地震が発生した。しかし、VAN による予知のおかげで人命の損失はなかった。この事実を筆者の一人 (S.U.) は Pirgos 市長から直接にお聞きした。しかし、この項で問題とする地震 EQ 930318 については VAN の予知電報、例えば PD 930226 の中には明白な言及はなかった。EQ 930318 の実際の震央は PD 930226 が予想した Pirgos 西方の海域ではなく、Pirgos の東北東 110 km であった (図 1a)。形式的にはこの Δr は、成功基準の許容範囲に辛うじて入れることも出来ようが、Pirgos 沖の海域に震央を予想した PD 930226 は、ギリシャ中部で発生したこの地震を予知し損なったと判断した方がより適切と思われる。対応する SES は発生していたかもしれないが、同時進行中の Pirgos 地震活動関連の SES からこの地震に対応する SES を識別することは不可能だったろう。

EQ 940901 の場合 :

P. Varotsos (私信) によると 1994年8月13日に IOA 観測点で SES 活動が検出されたが、予想震央がギリシャ領土外とされたため予知電報は出されなかった。事実、震央はギリシャ国外であった (図 1a)。

EQ 950513 の場合 : Kozani-Grevena 地震⁵⁾

強い SES 950418 活動と SES 950419 活動が IOA 観測点で記録された。これらに基づいて PD 950427 が発信され、その後それを少し改訂した PD 950430 が発信された。最初の予知情報は一連の地震が、Killini-Vartholomio 型の時間経過で発生することを予想していた。それには二つの予想震央が含まれていた (二重予知)。一つは Vartholomio 地域近くで $M_s(ATH) \sim 6.0$ 、もう一つは IOA 観測点北西 50 km で $M_s(ATH) \sim 5.5$ であった。4月30日の改訂版 (PD 950430) では上記二つの選択肢のうち後者の方がより可能性が高いとされた。SES 情報が、震央が IOA に比較的近いことを示唆したからである (詳細省略)。EQ 950513 ($mb=6.2$) は予想通り SES 活動開始後第4週目に IOA の東約 80 km の Kozani-Grevena 地域で発生した。この地域では数世紀もの間大地震が発生していないことを考慮すれば、この予知は驚くべき「成功」であり、偶然とはほとんど言えないであろう。Gruszow et al.²¹⁾ は IOA 観測点近くの場所で VAN の SES と同じ地電位変化を観測することに独立に成功したが、この変化は未知の人工電源によるものであろうと結論付けた。VAN 批判者達はこれをさかんに喧伝したが (例えば文献 22)) Gruszow らはせっかくのデータを根本的に間違っ て解釈したため判断を誤ったようである²³⁾。

EQ 950615 の場合 : Egion 地震⁵⁾

明瞭な SES 950430 活動が VOL (Volos) 観測点で観測された。VOL 観測点は当時わずか6か月しか稼働していなかった。この SES に基づく PD 950519 では以下のようなことが述べられている。SES 950430 活動は先の EQ 950513 の Kozani

ni-Grevena 地震の前兆として IOA 観測点で観測された SES 活動と非常に似ている。SES 950430 は他の稼働中の観測点すなわち IOA, ASS, KER, PIR では記録されていなかった。設置されたばかりの VOL 観測点の selectivity map が不完全なため、通常的手段で震央の位置を定めることは不可能である。そこで、以下の二つの情報をもとに消去法によって震央推定を試みた。1) VOL 観測点の 2 本の長基線は同レベルの SES 振幅を示しており、震源が観測点近傍ではないことを示唆している。2) 他の観測点では SES 活動が記録されなかった。したがって、予想震央としては VOL 観測点付近および他の観測点の selectivity map の地域がすべて除外される。結局、EQ 950513 (Kozani-Grevena 地震) と規模・時間経過の似た地震がギリシャ内陸部で、当時稼働していなかった VER (Veria) や GOR 観測点付近で発生するであろうと予想された。当然この予知は他と比べて信頼性の劣るものであった。しかし、現実には EQ 950615 は GOR 観測点の南あるいは南南西約 40~50 km の Egion 地域で発生した (図 1 a)。我々の見解ではこの事例は間接的情報をもとにした推理が「成功」を収めたケースと見なされるべきである。震央は IOA の selectivity map の境界線に非常に近かった。Geller¹⁵⁾ は震央が IOA の selectivity map にわずかに入っているのに IOA で SES が観測されなかったのは矛盾であると指摘している。しかし、大規模地震では震源域が大きくなるので selectivity map の境界線はいかなる場合でも明確には成り得ないので、この種の議論にはあまり意味はない。ただし、後述のように 1997 年の活動はまたしてもこの近傍で起きており、selectivity map 境界での selectivity は興味深い問題を投げかけているとはいえよう。

EQ 971013, EQ 971105 および EQ 971118 の場合^{24), 25), 26)}

上述の 1995 年の活動以来、2 年半以上の長きにわたってギリシャでは $mb \geq 5.5$ の地震も、大きな SES も (したがって予知も) なかった。1997 年 10 月 3 日、5 日の両日、IOA において久方ぶりに

SES 活動、SES 971003、SES 971005 が観測された。直ちに検討の結果、 $M_s(\text{ATH}) \sim 5.5$ の地震が図 1 a の I、II で示された地域に起きるだろうとの推論がなされ、その予知情報は 10 月 14 日に筆者を含む諸外国の研究者に fax され、同時に学術誌に投稿された²⁴⁾。それは EQ 971013 ($M_s(\text{ATH}) = 5.8$) が南方海上 (図 1 a) で発生した翌日のことであった。上述の予知情報の中では、VAN は IOA の selectivity map⁵⁾ がそれほど南方まで広がっている可能性を認めつつも、この地震が予知地震であるとは断言できなるとした。

11 月 5 日になると EQ 971105 ($M_s(\text{ATH}) = 5.4$) が上述予想震央 II の近傍で発生した。それは IOA での SES 発生以来第 5 週目のことであり、EQ 971013 よりも Killini-Vartholomio 型時間経過に適合するものと判断されたので、11 月 9 日、彼らはそのことを記した小文を Nature 誌に投稿した²⁵⁾。南方の 10 月 13 日の地震はやはり IOA の selectivity map 外であったが、仮に IOA に SES を送ったとしても、その識別は不可能であったことになる。また、EQ 971105 の震央は前項で述べた EQ 950615 (Egion 地震) の震央のごく近傍であったが (図 1 a)、後者の SES は VOL では観測されたが、IOA では観測されなかった。このあたりの VOL と IOA の selectivity map はどうも境界がはっきりしないのは事実のようである。我々は、ほぼ同じ震央でも地震の発震機構の違いによって異なる地点へ SES を伝える可能性があるのではないかと考えている。ギリシャ西方の Kefallinia 島地域の地震がスラスト型の場合は IOA、水平ずれ型の場合は PIR で SES が観測されることを著者等は最近見出した²⁶⁾ が、それと似たような状況があるのではないかということである。ただし、今の場合は両地震ともほぼ南北を張力軸とする正断層型なので、断層面の向きの微妙な差異が関わっているのかもしれない。今後の研究テーマとなろう。そうこうするうちに、約 2 週間後、EQ 971118 ($M_s(\text{ATH}) = 6.6$) が、今度は予想震央 I の近傍で発生した。これらの事件は Killini-Vartholomio 型時間経過のケース 2 の典型例をなすように見えるので、VAN は 11 月 20 日、

さらにもう一つの小文を Nature 誌に投稿し、10月14日の予測があたったことを報じた²⁷⁾。これらの小文はいずれも Nature 誌には reject されたが、2年半の静穏期の後で SES が観測され、引き続き予知地震が発生したことは SES の有意性という見地からは注目すべきことと思われる。

参 考 文 献

- 1) 地震予知計画のレビュー, 1997, 文部省測地学審議会; 地震予知のための新たな研究計画の推進について(建議), 1998, 文部省測地学審議会。
- 2) 例えば, 力武常次, 地震予知論入門, 1976, 共立全書; 予知と前兆, 1998, 近未来社; 弘原海清, 1995, 前兆証言 1519!, 東京出版。
- 3) Varotsos, P. and K. Alexopoulos, 1984, *Tectonophysics*, 110, 73; *Tectonophysics*, 110, 99.
- 4) 上田誠也, 1985, *科学*, 55, 180; 木下正高, 上田誠也, 1986, *科学*, 56, 770; 上田誠也, 1991, *地震*, 44, 391; 上田誠也, 早川正士, 1996, *バリティ*, 11, 55.
- 5) Uyeda, S., 1996, p. 3, in Lighthill, J. (ed.), *A Critical Review on VAN*, 374 pp., World Scientific, Singapore.
- 6) Varotsos, P., M. Lazaridou, L. Eftaxias, G. Antonopoulos, J. Makris and J. Kopanas, 1996, p. 29, in Lighthill, J. (ed.), *A Critical Review on VAN*, 374 pp., World Scientific, Singapore.
- 7) Nagao, T., M. Uyeshima and S. Uyeda, 1996, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 1441.
- 8) Varotsos, P., N. Sarlis, M. Lazaridou and P. Kaporis, 1998, *J. Appl. Phys.*, 83, 60.
- 9) Hamada, K., 1993, *Tectonophysics*, 224, 203.
- 10) Varotsos, P. and M. Lazaridou, 1991, *Tectonophysics*, 188, 321.
- 11) Dologlou, E., 1993, *Tectonophysics*, 224, 189.
- 12) Varotsos, P., K. Alexopoulos and M. Lazaridou, 1993, *Tectonophysics*, 224, 1.
- 13) Varotsos, P., K. Alexopoulos, M. Lazaridou-Varotsou and T. Nagao, 1993, *Tectonophysics*, 224, 269.
- 14) Varotsos, P., S. Uyeda, K. Alexopoulos, T. Nagao and M. Lazaridou, 1994, p. 13, in Haya-kawa, M. and Y. Fujinawa (eds.), *Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction*, 677 pp., Terra Scientific, Tokyo.
- 15) Geller, R., 1996, p. 155, in Lighthill, J. (ed.), *A Critical Review on VAN*, 374 pp., World Scientific, Singapore.
- 16) Varotsos, P., 1986, *Bollettino di Geodesia e Scienze Affini*, Anno XLV, 191.
- 17) Varotsos, P. and K. Alexopoulos, 1987, *Tectonophysics*, 136, 335.
- 18) Drakopoulos, J., G.N. Stavrakakis and J. Latoussakis, 1993, *Tectonophysics*, 224, 223.
- 19) Varotsos, P., K. Alexopoulos and M. Lazaridou, 1993, *Tectonophysics*, 224, 237.
- 20) 吉井博明, 1989, *ギリシャにおける地震予知とその社会的影響*, 文教大学情報学部吉井研究室, 48 pp.; Yoshii, H., 1993, *Tectonophysics*, 224, 251.
- 21) Gruszow, S., J.C. Rossignol, A. Tzanis and J.L. Le-Mouel, 1996, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 2025.
- 22) Geller, R., 1997, *INCEDE newsletter*, No. 4, 5.
- 23) Varotsos, P., K. Eftaxias, M. Lazaridou, K. Nomikos, N. Sarlis, N. Bogris, J. Makris, A. Antonopoulos and J. Kopanas, 1996, *Acta Geophysica Polonica*, XLIV, 301.
- 24) Varotsos, P., K. Eftaxias, M. Lazaridou, N. Bogris and J. Makris, 1998, *Acta Geophysica Polonica*, XLVI, 55.
- 25) Varotsos, P., K. Eftaxias, M. Lazaridou, N. Bogris and J. Makris (submitted to *Nature* on Nov. 9, 1997)
- 26) Uyeda, S., K. AL-Damegh, E. Dologlou and T. Nagao (*Tectonophysics*; in press)
- 27) Varotsos, P., K. Eftaxias, M. Lazaridou, N. Bogris and J. Makris (submitted to *Nature* on Nov. 20, 1997)

要石と大地の柱

大林太良

1. 鹿島の要石

茨城県の鹿島神宮に要石がある。神殿からすこし奥に入って行ったところに、頭をちょっと出した石である。この石は中世から有名であったが、要石と称する石や同様なものは、これ以外にもあった。谷川士清の『和訓栞』後編の「かなめいし」の項によれば、

「常陸国鹿嶋の神石也。其の形円く柱の如く、徑り一尺五寸ばかり、頂少し窪めり。地を出づる事二尺余り。動かせばゆらぐといへども、其の根測り知るべからずといへり。箱崎八幡宮にも石柱ありて、国家の固めなるよし將軍義尚の縁起にもみえたり。出雲国楯縫郡にもあり」。

鹿島の要石が有名なのは、地下の大鯰をこの石が押さえていて、地震を起こさないようにしているという伝承である。たとえば水戸光圀のころ編纂された『常陸国誌』に

「土人（さとひと）相伝ふ、大魚有りて日本を圍繞（かこみめぐ）り、首尾（おかしら）この地（ところ）に合ふ。鹿島明神その首尾に釘して、以てこれを貫き動揺（うごか）すことを得ず。譬へば扇の柄の釘を得て堅固なるが如し。この石すなはち釘なりと、荒唐笑ふべし」。

ところで、この要石については、いままであまり注目されて来なかったが、それが大地の一番下の底、つまり金輪際（きんりんざい）にまで達する石柱だと考えられていたことである。すでに鎌倉時代の月江撰かといわれる、宴曲の異説を記した『撰要両曲巻』の「鹿島下」の条に

「かの石は金輪際に融通せるところと聞け。〔鹿島明神が〕此所に跡を垂れそめしに、御身をやすめ給ひしかば、御座石（ござせき）とは名付

くなり」

と出ているし（乾、1986:260）、また14世紀の『詞林采葉抄』にも

「鹿島明神、金輪際より生ひ出でたる御座石（みましのいし）を柱として、藤の根にて日本国をつなぎたまふ」

とある。つまり、この大地の底まで達する石柱の上に、鹿島明神が降臨したとも、または明神がこの石柱に藤の根で日本国をつなぎ止めたのだともいう。国家の固めの石柱である。『和訓栞』には、このような石柱がもう2本も挙げられていた。つまり京の都からみて、東の海の際にあたる鹿島、北の海に面する出雲、そして西海道の対馬海峡に向かう筑前筥崎八幡宮に石柱があったという。日本本土の言わば三方向の端の海岸に石柱があった、国土、国家の固めとなっていたことになる。

2. 大地の柱と地震

ここで面白いことは、大地の中に柱があるという宇宙論の特徴は日本以外にもあちこちに見られるし、それが地震の伝承に出てくることがしばしばあることである。

図1は世界柱の全世界における分布状態を示している。これは私が作った分布図で、まだ不完全なものであるが、一応分布の大勢を窺うことはできよう。それによれば、オーストラリアにはなく、アフリカ、南米には少ない。またその他の点では宇宙論の発達している中米にはないらしく、インドでも不振である。これに反して、世界柱の観念が発達しているのは、スカンジナビアからグリーンランドに至る北方圏とその周辺であり、また東南アジアからポリネシアにかけての地域である。日本はいわば北と南の世界柱の分布圏の中間にあ

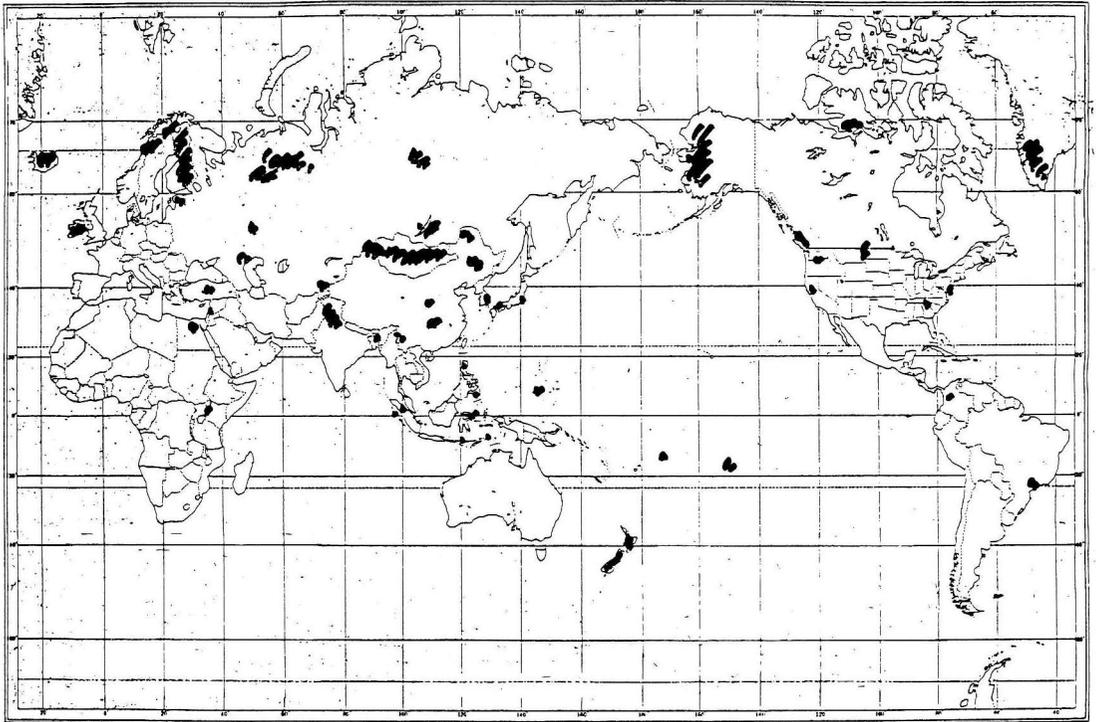


図1 世界柱

るといってよい。

世界柱と関係が深いと考えられる世界樹の分布は(図2)。世界柱の分布とすこし食い違っているが、シベリアや東南アジア、ポリネシアに多いことは同様である。世界樹のほうは、地震とはあまり関係がないから、これから世界柱についてだけ、述べることにしたい。

また地震の原因についての神話伝説や俗信の分布は、世界的にみてかなり片寄っている。早く言えば、地震の多い地域には地震の原因についての伝承が多く、地震の少ないところには、まったく、あるいはほとんどない。たとえば東南アジアから日本列島をへて北米北西海岸にかけての地帯には、地震伝承が多いが、地震のほとんどないオーストラリアからは、地震の神話伝説のたぐいはどうも報告がないようである。またアメリカ大陸を眺め渡すと、地震の伝承は、太平洋岸に集中する傾向がみられる。

このような大ざっぱな傾向を説明したので、これから具体例の紹介に進むことにしよう。

(1) 東南アジア、ポリネシア 日本の要石をひどく思い出させるのは、北タイのラオ人や西隣のミャンマーのシャン族のような、インドシナのタイ系諸民族の例である。

ラオ人のところでは、大地の中心であるチンナロ Zinnalo 山の、水面下にある部分をなしている岩があるという。この岩を取り巻いているプラ・アヌン Pla anun という大魚がいる。この魚が動くとき地震が起きる (Bock, 1885: 152)。この岩は要石にあたり、プラ・アヌンという大魚は鯰にあたることになる。地震の神話の比較研究の先駆者であったウィーンのリヒアルト・ラシュは、この表象は疑いもなくインドから借用したものであると考えた。チンナロ山は須弥山であり、魚はヴィシュヌ神の第一の権化、つまり魚への権化を想起させる。あるいはことによるとナーガ(竜蛇)神話の改悪にしか過ぎないかもしれないという考えである (Lasch, 1902: 254)。事実、仏教の宇宙論によれば、須弥山を支えるトリクタ Trikota 岩の下はロカ loka (世界)と、人間世界にナーガ

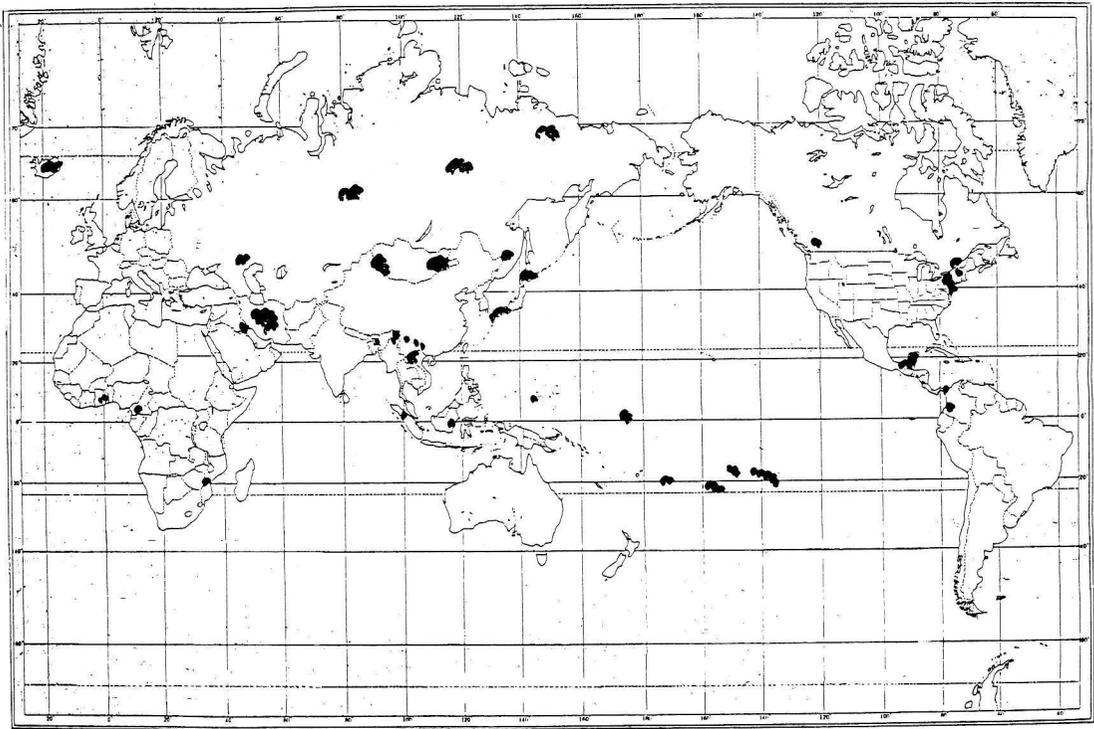


図 2 世界樹

Naga (竜蛇) が棲んでいるというから (Hardy, 1880: 44), このラオ人の観念は, 仏教の宇宙観を受容し, ナーガが魚に変わったものと解釈するのが適当であろう。

おなじくタイ語族に属するシャン族では, 昔は僧侶が子供を教育していたが, そのなかには神話的な地理学も含まれていた。それによると, 我々のこの世界は, 四つの大きな島の一つで, 平坦な島である。島の中央に大きな霊山があって, その基礎は巨大な魚の上におかれている。この魚はふだんは尾を口にくわえて眠っている。時々目を覚ますと, 尾をかみ, その痛みで体をゆする。これが霊山を震わせ, それで四つの大きな島も震える。ほとんど感じられないような小さい地震は, 我々の下の地殻の下に住んでいる小人たちが起こすものである。小人たちはその暗い家で, ひどく寂しくなり, 時には彼らの世界の屋根をコツコツ叩くので, そのノックがいわゆる微震を起こすのである。シャン人は, このような震動を感じると, 家の外に走り出てひざまづき, 「ここにいま

す, ここにいます」と小人たちにむかって叫ぶ (Milne, 1910: 54, 訳 75)。

タイ系諸民族のところでは, 世界樹の神話や, 国の柱の儀礼など, 世界柱と関係の深い現象がいろいろあるが (大林, 1989), 世界柱と地震の話はなく, せいぜい須弥山の下ので岩が出てくるだけである。その点, 仏教の宇宙論そのままである。

ところがフィリピンに行くと, 大地の柱と地震の関係語る伝承がいくつか現れる。

ルソン島北部のイスネグ族のところでは, 大勢の人は大地の下に海があると信じている。そこには大地の柱が一本ある。この柱で大地を支えて, 海中に落ちないようにしているのだ。そこには大きなウナギー一匹と大きな蟹が一匹いる。ウナギーが蟹と闘うと, 大地の柱はウナギーの尻尾で打たれ, 大地が震えるのである (Eugenio, 1993: 263)。

ミンダナオ島では, バゴボ族のところでは, 大地は一本の柱によって担われているという。蛇がこの柱を取り除こうとすると地震が起きる。このようなときには, バゴボ族は彼らの犬を叩いて吠

えさせる。犬の吠え声が、蛇を脅えさせ、柱を揺するのを止めさせるのである。だから地震の続く間中、バゴボ族の村では、どの家からも犬の吠え声が聞こえるのである (Schadenberg, 1885 : 32, 47)。近くのマノボ族の創世神話では、大地を創造したのは「最初の偉大なマノボ」であるマカリドゥン Makalidung であった。彼は、大地を数本の柱の上に載せた。その一本は中央に立っている。そこでマカリドゥンは一匹の錦蛇と一緒に住んでいる。彼は人間たちに不満があると、中央柱を揺すって地震を起こすといわれ (Garvan, 1931 : 190-192)、ここでは地下の柱を揺するのには蛇ではなくて、原祖である。

インドネシアでは、イスラム系の大地を支える牛が動くとき地震になるという俗信が多いが、そうでない観念もあちこちにみられる。スマトラのバタク族のところには、地下の蛇が動いて地震を起こす話が多いが、カロ・パタク族のところでは、柱がそれに加わっている。

天神バタラ・グル Batara Guru は、地下界の神の娘を妻とした。ところがバタラ・グル夫妻には子宝が恵まれず、二人は悲しみのあまり悔悟の行を行うために、海のほとりの小屋に引きこもった。ここに彼らは小さな菜園を作ったが、水中から出てきた一匹の大蛇によって破壊されてしまった。しかしバタラ・グルがこの蛇を追い払いに行くと、蛇は口の中に食物を入れてくれと要求した。バタラ・グルは自分の手が噛み切られはしないかと心配して、刀で口に楔を入れた。手を引くとき、指に如意の魔法の指輪がはまっているのに気づいた。

蛇はそれから海に帰った。そして時の経つうちに、この指輪の御利益で、バタラ・グルの妻は三人の息子と三人の娘を生んだ。息子の一人は上界と地下界の中間の空間に世界を創造した。父からもらった7握りの土で世界を作ったが、大地が完成すると、父は大地を七本の絹糸で空から吊るした。新たに創造された世界のために地下界は暗くなってしまった。息子のうちの一人は地下界に住んでいたが、彼は暗くなったことを大変怒った。そこで彼は世界を大変激しく揺すったので、世界

は破壊されてしまった。これは七回繰り返され、そのたびに大地は新たに作られた。しまいには世界創造者は父の助力を乞うた。バタラ・グルは一本の鉄柱を立て、その上に四本の横桁を載せ、その上に世界が置かれた。これ以後は、地下界の弟は、今日に至るまで、世界を揺することはできないものの、破壊させることはできなくなってしまった (Dixon, 1916 : 162-163)。

さらに東にいったらスラウェシの北端、ミナハッサのアルフル族は、全世界は一匹の豚が背負っているが、この豚は地下界に住むエンブン・マカワラン Empung Makawalang のものである。この豚が、なにかの木に身体を擦り付けると地震が起きる。別伝によると、大地は豚が担っているのではなくて、多数の柱の上に載っており、その一本に豚が身体を擦り付けると地震が起きるのだという (van Spreeuwenberg, 1845 : 171 ; Hickson, 1889 : 243 ; Wilken, 1912, III : 277)。

大地を支える柱と地震との関係を考える見方は、太平洋ではポリネシア西部まで広がっていた。

サモアではステアによると、地震は地下の火山地帯に住むマファイの気まぐれで起こる。大地は一本の柱で支えられた平たいものと考えられている。マファイが何かの理由で怒ると、この柱をつかみ、激しく揺すり、こうして地震を起こす (Stair, 1897 : 238—Williamson, 1933, II : 210)。

これがトンガになると柱が紐に変わってくる。カイヨによると、死の神ヒクレオはプロトゥ (楽園) に住んでいたが、邪悪な性格で、彼の死者の国の人口を増やすために、現世の人類を滅ぼそうと思った。そこで彼は一本の紐で大地の中心に縛り付けられてしまった。紐の一端は天のタンガロア神が持ち、他端はロロフォヌア (地下界) のマウイ神が持って、世界を破壊しないようにしている。しかしヒクレオは死者の魂をプロトゥに導くために、自分を解放しようと試み、こうして地震を起こす (Caillot, 1914 : 246—Williamson, 1933, II : 212)。

(2) 東アジア 中国には魚が地震を起こすという信仰が広く分布していた (図3)。たとえば、

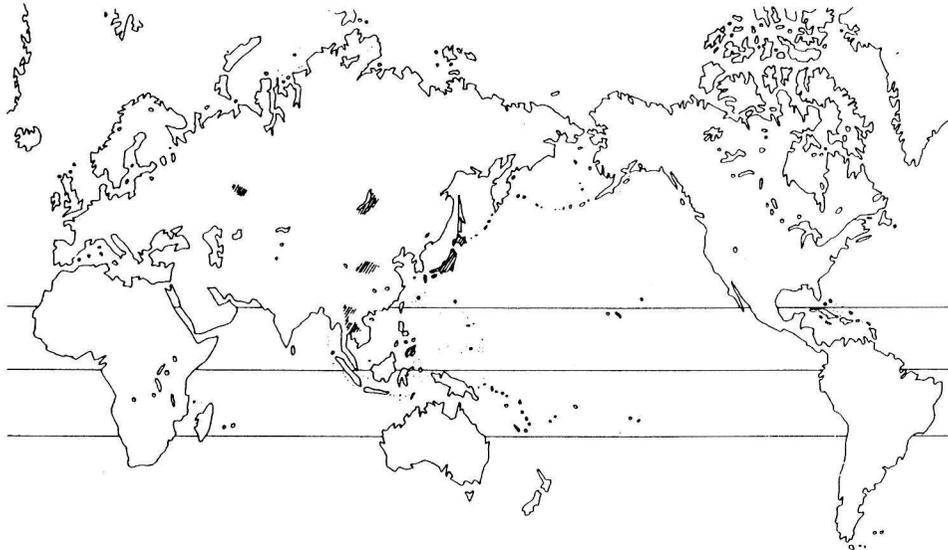


図 3 世界魚が地震を起こす

1891年4月17日に山西省汾州の大地震について、一匹の大きな魚が起こしたもので、数年の眠りから覚めて、寝返りを打ったのだと、人々は言ったという (Ball, 1903: 232)。そのほか、甘肅省蘭州付近や雲南省にも地震魚の伝承があるが (大林, 1979: 95)、私の知る限り中国の地震魚の伝承には要石のような世界柱の観念は結び付いていないらしい。もっとも中国の地震伝承については、まだ本格的な研究は行われていないから、将来、世界柱と地震の俗信が存在することが明らかになるかもしれない。

その可能性を考えさせる根拠は、魚は出て来ないが、世界柱と地震の神話が、朝鮮半島の近代の民間神話にもあるからだ。

大昔、天の一方が傾いたことがあった。天の神は大きな銅の柱で天の傾いた方を支えようとした。けれども大地は空間の中に懸かっているの、その柱の重さのため、ずんずん下へさがり、柱の根を地上に差し込むことができなかった。そこで天の神は、天下で一番大きくて一番強い將軍に命じて、地の下から肩で大地を支えさせた後、柱を建てた。

その將軍はいまでも肩で大地を支えているが、肩が痛くなると、ときどきその肩を換えることがある。そのとき大地が揺れ、地震になる。昔は大

変地震が多かったが、今は少ない。たとえば荷物を担ぐにしても、初めのうちは肩慣れしていないので、しょっちゅう肩を換えなければならない。しかし慣れるに従って、肩換えの度合いが遅くなる。それと同様に、將軍も大分肩が慣れてきたものらしい (孫, 1930: 22-23)。

北アジア、中央アジアには、魚が地震を起こすという信仰はかなり広く分布している。北海道のアイヌもその例である。更科源蔵によれば、

「天地創造以前は光りもない寂莫な泥土の世界であり、そこに大きな魚が一尾棲んでいたのに気付かず、国造神 (コタンカラカムイ) がその上に陸地をつくってしまった。それでときどきこの大魚が水を呑み込んだり吐き出したりするので、海に干満が起こったり、大魚の身体の調子が悪いとき津波が起こり、またあばれると地震が起きたりする。だから地震のとき小刀や火箸を炉の隅に突き立て「腰が切れるぞ」とおどす。この大魚とは鯨 (あめます) である。それでこの魚を大地の腰骨魚 (モシリ・エッケウ・チェプ) ともいう」 (更科, 1968: 59)。

この地震のとき炉の隅に突き立てる小刀や火箸は、あるいは要石の石柱に比すべきものかもしれない。しかしその規模からいって、とうていこれを世界柱と呼ぶわけにはいかないだろう。またア

ルタイ山地のタタール族や東ロシアのヴォチャーク族は地下に三匹の大きな魚がいて、これが動く地震が起きると考えている (Harva, 1938 : 29 ; 訳 23)。しかしここでは世界柱は出て来ないから、中国の例と同様である。

北アジアにも世界柱の観念はあるが、それは大地を支える柱ではなく、地上の柱であり、しばしば天を支える柱であり、あるいは天の柱である。たとえば、タタール族は、星座の大熊座の《七頭の動物》は天の柱につないでいると考えている。つないだ綱がひとたび切れれば、天には一大混乱が起きるといふ (Harva, 1938 : 40 ; 訳 33)。

こうしてみると、東アジアや北アジアにはどうも要石のような伝承はないらしい。

(3) **アメリカ** ところが、アメリカ大陸に行くと、世界柱と地震についての伝承がまた出てくる。その一つの中心は北米の北西海岸である。ヴェニアミノフが記録したトリンギット族の神話によると、むかし兄妹二人が暮らしていた。兄はヘトル (貝) といい、妹はアギシャナク (地下の存在) といった。何かの理由でこの二人が別れねばならなくなったとき、妹はシトカ付近にある山 (火山?) に登り、突然地中に下った。以来彼女はそこにいて、大地を載せた一本の大きな柱を支えているのである。さもなければ、柱はとっくに倒れて水中にいたことであろう。アギシャナクは人間が地上で火を焚くと、彼女自身も暖まるので、人間が好きである。彼女は不死で決して眠ることがない。また大変強いので、トリンギット族の英雄であり、祖先でもあるイェルヒによっても負かされなかった。イェルヒは時々人間の不服従と流血沙汰を怒り、怒りに任せて人間を絶滅させようと思ひ、アギシャナクを柱から引き離そうとすることができない。この二人の争いが地震の原因である (Krause, 1885 : 268-270 ; Lasch, 1902 : 250)。

その南のチムシアン族の神話では、大地を支える者はアマラと呼ばれる。世界は平たく円形であって、アマラがその胸の上で支えている一本の長い棒の先端の上で、たえず回転している。彼の前任者は広大な西南の海中の一つに島に住んでいた老首長だった。彼は年とって死にかかっていた

が、アマラの超自然的な力を聞いて、仕事を引き継いでもらうために、アマラを呼び寄せた。アマラはやって来て、老首長の隣に横たわった。老人は世界の棒をアマラの胸に移した。アマラはまだ世界を彼の胸の上に保持している。しかし彼が死ねば、世界は終わってしまう (Leach, 1972 : 41 ; Boas, 1895 : 278)。

南米ではコロンビアのボゴタ盆地にチブチャ王国を作っていたムイスカ族のところにも面白い例がある。ムイスカの大地神チブチャチュムは、農民、商人、金鍛冶の守護神だった。しかしある日のことチブチャチュムは人間のことを怒って、ボゴタ盆地を湖に変えてしまった。すると帯まで垂れる頭髪と髭を生やし、シャツと肩掛けを着ているが、靴をはいていないポチカ神が虹に乗って現れた。異伝によると、この文化英雄はネブテレケテバとかチミサガグアとも呼ばれている。彼は彼の黄金の杖を岩に向かって投げたところ、そこに口があき、水は流れ出た。このようにして有名なテケンダマの滝が発生した。チブチャチュムはポチカから罰として、それまで四本の木柱の上に載っていた大地を、背負うように命じられた。そして彼がこの重荷を一方の肩から他方の肩に移し換えるたびに地震が生じるのである (Trimborn, 1961 : 100)。

3. 結 論

以上に見て来たように、世界柱と地震との結び付きを考える伝承は、東南アジア、ポリネシア、朝鮮、北米北西海岸、南米コロンビアに分布している。そして日本の要石にもっとも似ているのは、地下の魚あるいは蛇が世界柱と地震との関係にからまっているものであって、東南アジアに多い。そしてそれは結局は仏教の宇宙論から派生したものであろう。ただ仏教では須弥山の下の岩といっていて、はっきりした世界柱の形をとっているのではないようである。東南アジアにおいて世界柱の観念に発達してから、日本に入ったものという印象を私はもっている。時代としては中世の可能性が大きそうである。これはまだ見通しの段

階である。もっと詰めて、きちんと論証するのは、今後の課題である。

引用文献

- Ball, J. Deyer, 1903, Things Chinese. Fourth edition, revised and enlarged. Hongkong, Shanghai : Kelly & Walsh.
- Boas, Franz, 1895, Indianische Sagen von der Nord-Pacifischen Küste Amerikas. Berlin : A. Asher & Co.
- Bock, Carl, 1885, Im Reich des weissen Elephanten. Leipzig : Ferdinand Hirt & Sohn.
- Caillot, A.-C. Eugene, 1914, Mythes, légendes et traditions des Polynésiens. Paris : Ernest Leroux.
- Dixon, Roland B., 1916, Oceanic. The Mythology of All Races, vol. 9. Boston : Marshall Jones.
- Eugenio, Damiana L., 1993, Philippine Folk Literature. The Myths. Diliman, Quezon City : University of the Philippines Press.
- Garvan, John M., 1931, The Manobos of Mindanao. National Academy of Science, Memoirs, 23. Washington, D.C.
- Hardy, R.S., 1880, Manual of Buddhism. 2nd ed. London.
- Harva, Uno, 1938, Die religiösen Vorstellungen der altaischen Völker. F.F. Communications. Nr. 125. Helsinki. (ハルヴァ著, 田中克彦訳, 1971, 『シャマニズム』, 三省堂.)
- Hickson, Sidney J., 1889, A Naturalist in North Celebes. London : John Murray.
- 乾 克己, 1986, 要石, 乾 克己ほか (編), 『日本伝奇伝説大事典』, 260, 角川書店.
- Krause, Aurel, 1885, Die Thlinkit-Indianer. Jena : Hermann Costenoble.
- Lasch, Richard, 1902, Die Ursache und Bedeutung der Erdbeben im Volksglauben und Volksbrauch, in : Archiv für Religionswissenschaft, 5 : 236-257, 369-383.
- Leach, Maria (ed.), 1972, Funk and Wagnalls Standard Dictionary of Folklore, Mythology and Legend. New York : Funk and Wagnalls.
- Milne, Leslie, 1910, Shans at Home. London : John Murray. (ミルン著, 牧野 巽, 佐藤利子訳, 1994, 『シャン民俗誌』, 生活社.)
- 大林太良, 1979, 『神話の話』(講談社学術文庫, 346), 講談社.
- 大林太良, 1989, 「王国の樹—タイ系諸族における神話と儀礼」君島久子 (編), 『東アジアの創世神話』, 7-27, 弘文堂.
- 更科源蔵, 1968, 『歴史と民俗 アイヌ』, 社会思想社.
- Schadenberg, A., 1885, Die Bewohner von Süd-Mindanao und der Insel Samal, in : Zeitschrift für Ethnologie, 17 : 8-37, 45-57.
- 孫 晋泰, 1930, 『朝鮮民譚集』, 郷土研究社.
- van Spreeuwenberg, A.F., 1845-1846, Een blik op de Minahassa, in : Tijdschrift voor Nederlandsch-Indië, 7 : 161-214, 301-333 ; 8 : 23-49.
- Stair, John B., 1897, Old Samoa. London : Religious Tract Society.
- Trimborn, Hermann, 1961, Die Religionen der Völkerschaften des südlichen Mittelamerika und des nördlichen und mittleren Andenraumes, in : W. Krickeberg et al., Die Religionen des alten Amerika (Die Religionen der Menschheit, 7) : 91-170. Stuttgart : W. Kohlhammer Verlag.
- Wilken, G.A., 1912, De verspreide geschriften. 4 vols. Semarang : G.C.T. van Dorp & Co.
- Williamson, Robert W., 1933, Religious and Cosmic Beliefs of Central Polynesia, 2 vols. Cambridge : Cambridge University Press.

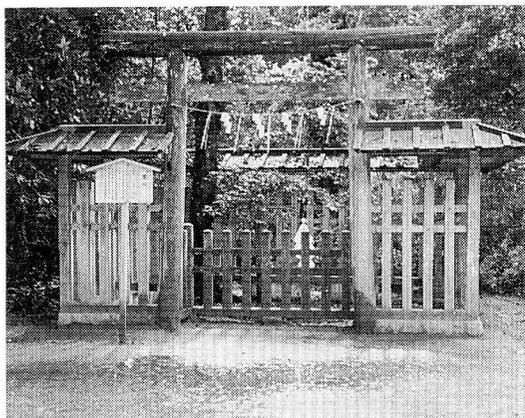


図1 要石を囲む木柵と鳥居

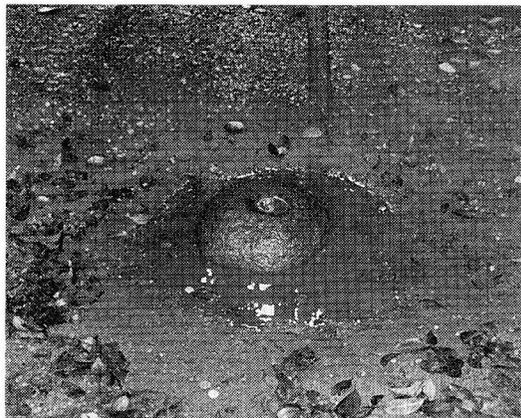


図2 要石頭部

鹿島神宮の要（かなめ）石

本号掲載の大林太良氏論説「要石と大地の柱」には、鹿島神宮の要石の話が出てくる。安政江戸地震（1855）の直後に出来たいわゆるナマズ絵（木版カラープリント）にも鹿島大明神が要石で地震を起こす大ナマズを押えつけている絵があり、本誌 No. 5、15 ページや No. 13、63 ページに引用されている。

本誌編集部では、かつて茨城県鹿島町の鹿島神宮に要石を探訪したことがある。この元官幣大社の祭神は武甕槌神（たけみかずちのかみ）という軍神である。問題の要石は神宮社殿から500メートルくらい東よりの林中にあり、図1のような神聖な木柵の囲いの中にあって、図2のようにその頭の部分だけが地上に見えてい

る。鹿島大明神が天降った折には、この石の上に坐られたとされている。図2の写真からは分かりにくいですが、実際の大きさは大林論説に述べてある通りである。この石の頭部は直径30センチメートルくらいであるが、根は深く広がって大地の底にまで達しているというのが伝承である。

かつて水戸黄門で知られる水戸光圀の命で、7日7晩この石の周りを掘ったが、不思議にも、掘った穴は1晩のうちに元の通りに埋ってしまい、また作業員に怪我人が続出したので作業が中止されたという話が、嘘か本当か分からないが伝えられている。

近頃では、サッカーの鹿島アントラーズで有名になった鹿島町だが、ナマズと要石は町起こしに一役買っているらしく、鹿島駅前などでは観光協会の「要石モデル」、手造り常陸鹿島焼「地震徐・鹿島のナマズ」、ナマズ絵模様の団扇などが土産品として売られている（図3）。



図3 鹿島町の要石・ナマズグッズ

◇ 揺るぐとも よもや抜けじの 要石
鹿島の神の あらん限りは
（17世紀寛永年間の地震歌）
＜地震ジャーナル編集部，K&R＞

電気を感覚する魚—ナマズ

浅野昌充

はじめに

2本の長いヒゲをもったオタマジャクシの親分のような姿形からか、ナマズは本誌裏表紙の広告イラストのような、ひょうきんもののイメージで親しまれている。しかしながら、そのようなイメージとはかなりかけ離れた、この魚の本性に関わる非常に特殊な、驚くべき能力については、一般にはあまり知られていないようである。このようにのべると、ナマズはこれが騒ぐと地震が起こるとの言い伝えでとみに有名を馳せているし、しかも本誌は『地震ジャーナル』であるから、その特殊な能力とは地震予知能力のことではないかと思われるかもしれない。しかし、そうではないのである。もっとも、この特殊な能力についての研究が取り上げられたきっかけは地震との関係そのものなので、地震とは無縁ではない。むしろ、ナマズと地震との関係を考える場合、この能力をしっかりと視野に入れなければならないといつてよいのである。

では、その特殊な能力とは何かというと、それは非常に微弱な電気を感覚する能力である。著者らの測定によれば、ナマズは乾電池の電圧1.5Vの数千万分の一の電位差を感知できる。単純計算では、琵琶湖のような広い湖に乾電池が1個投げ込まれたとすると、そのことを数キロメートル先で感知できる計算になる。ナマズは、一体、何故に、このような驚異的な感度の電気感覚を持っているのか？—このことを通して、知られざるナマズの姿を読者に描いてもらうことが、本稿のテーマである。

言い伝えが生んだナマズの研究

ナマズ類が電気に敏感であることが知られたのは今世紀のはじめ、ドイツでのことであった。しかし、この電気感受性はナマズの生活において意味のあることとは考えられなかった。ところが、この発見は関東大震災の記憶も生々しい我が国で、ある魚類研究者の知るところとなり、ナマズと地震との関わりについての研究を生んだ。この魚類研究者はそれまでに、地震との関係についての言い伝えを正面から取り上げ、地震の間際になるとナマズが振動刺激に対して過敏に反応するようになることを観察していた。そこで、ナマズがそのような興奮状態になるのは地震時の地電流を感知するからではないかとの示唆的な実験を行なったのである。この研究は当時としては画期的なものであった。それまで神秘的に考えられがちであった動物の予知的行動を、環境要因—感覚—行動という生物学において確立された一般法則に即するものとして取り上げ、また、私たち人間にはない感覚の世界がこれらの動物種に対して展開していることを示そうとしたからである。

しかしながら、この研究が、ナマズとその電気的環境とのより基本的な関係を解明しないままに終息したことは残念であった。動物の感覚系は、それぞれの動物種の個体維持に関わっている。動物はその生息環境のなかで日々、個体を維持して行くに必要な情報を感覚系によって得、それに基づいて適切に行動している。日々の生活での個体維持に根本的なものとは何かといえば、それは第一に食べることであり、第二に外敵から逃れることである。動物の行動が、捕食行動と逃避行動との複雑に絡み合ったものとして日々、現象してい

ることは動物行動学が指摘しているところである。

ナマズの電気感覚の意味を考える

ここで、ナマズの生態に目を向けてみると、この魚は通常、昼間は水草の陰などに潜んでおり、夜間あるいは増水などで水が濁ったときに泳ぎ回って小魚などの小動物を捕食する。もっとも、小魚などの小動物とはいうものの自分の身体の半分もある大きさのものまで丸呑みにするし、共喰いはするしであるから、かなり獰猛の部類に入る。したがって、ナマズが本当の意味での電気感覚をもっているのであれば、夜行性かつ肉食性という、この魚の本性に関わっているのではないかとの推測が成り立つ。この場合、視覚の働かないところで動く小魚などを口で捕えるのであるから、視覚を特別に発達させるか、視覚に代わる感覚を発達させているかである。

例えば、ミミズクは夜間、樹木の枝の上で身構えており、樹間の地上を動き回るネズミなどの小動物を正確無比に捕える。これはほんの僅かな月明りでも見える眼を発達させている上に、獲物の動き回る音が左右の耳に到達する時間差によってその位置を感知するように左右の耳が前後に少しずれていることによる。また、良く知られているように、コウモリは超音波を発し、その反射音によって周囲の状況を捉えている。これは「エコ・ロケーション」と呼ばれているが、「エレクトロ・ロケーション」と呼ばれるものが魚類に知られている。アフリカやアマゾンの濁った淡水系に生息するエレファントノーズ、ナイフフィッシュなどのいわゆる「弱電魚」と総称される魚類で、特定周波数の微弱な電気を発電器官から発信し、自体の周囲の水中に定常的な電場を形成している。この電場の中に水と導電性の異なる物体が侵入してくると、その電場が歪められるのでその歪みを感じることによって周囲の状況を捉えているのである。—もっとも、この例を挙げると、ナマズのエレクトロ・ロケーションということが考えられるのであるが、ナマズにはこの能力はない。

このように視覚の働かない生息環境では、視覚を特別に発達させているか、視覚に代わる感覚を発達させているのが動物である。ナマズの場合はどうかというと、その視覚は退化的であり、明暗には非常に敏感であるが、形態視は殆どできない。したがって、電気感覚が視覚に代わるものとの推測を強める。

ナマズは電気を追う

ここで簡単な実験を紹介しておこう。ナマズを市販のガラス水槽でしばらく飼育し、水槽に十分馴らす。餌はキンギョなどがよい。水槽の底に身を潜める場所を作ってやると、馴れるのも早い。水槽に馴れると、夜間、泳ぎ回るようになる。ここで、水槽の片面に黒いビニールなどでナマズから水槽の外が見えない面を作り、その面の水槽の外で髪をといたプラスチック製のくしなど、静電気を帯びたものを振る。極めて静粛な条件であれば、照明下ではナマズは背ビレをねかせて身を潜める場所にじっとしているが、その帯電体を振ると背ビレが立つのを観察できるはずである。もっとはっきりとした観察をしたい場合には、手術などによってナマズの視覚を遮断すると良い。こうすると、ナマズは固有のサーカディアンリズムで活動するが、水槽の周りが静粛であれば照明下でも活発に泳ぎ回る。この状態で、帯電体を水槽の外で振ると、その帯電体を追いかけるように泳ぎ回るのである。

このように、ナマズは電気に敏感に反応し、それを追うのである。したがって、先の推測とこの事実とを考え合わせると、ナマズの餌となる小魚などから微弱な電気が発生しており、ナマズはその電気の発生源を正確に捕えるのではないかとの推論が成り立つ。

ナマズの水槽を完全に遮光し、そこにキンギョを入れると、平均約10分後にはキンギョはナマズの腹の中におさまる。視覚がまったく働かない状態でも餌のキンギョをかなり正確に捕食するわけである。視覚を遮断したナマズなら、私たちの目の前で見事なパフォーマンスを見せてくれる。

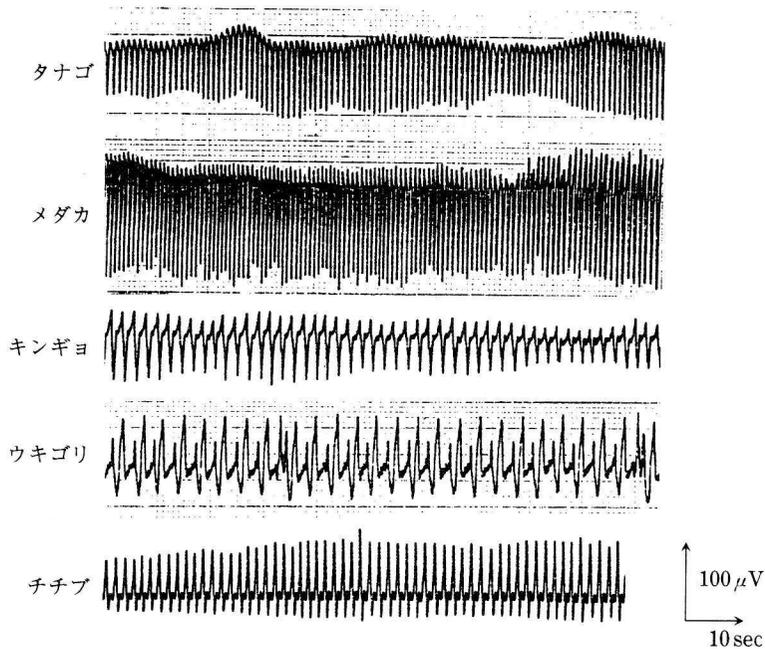


図1 魚体周囲の水中に生じている電位変動
電位変動分のみを描記。呼吸運動に同期している。

キンギョがナマズの身体から約5cmの範囲に入ると、次の瞬間にはキンギョはナマズの口の中に入ることになる。その早業は目を見張るものがある。

魚から電気が出ている

ここで、図1を見ていただこう。これらは何種類かの魚種で、その魚体周囲の水中に置いた電極から導出される電位変化である。先の予想通り、ナマズの餌となりうる小魚から電気が出ているのである。

どうして電気が出るのか。魚の電気発生は普通のことなのか、それとも特殊なことなのか。この辺りの事情については後で少し詳しく述べるとして、次の実験を見ていただこう。図2に描いてあるように、魚の肉片を2個吊るし、一方の肉片には電極対を装着してある。これを視覚を遮断したナマズの飼育水槽に静かに入れ、電極対を通じてキンギョの発生する電気を流してやる。つまり、一方の肉片の周りにキンギョの魚体周囲に形成されている電場と同等の電場を再現し、ナマズの出方を見るということである。図の実験装置は

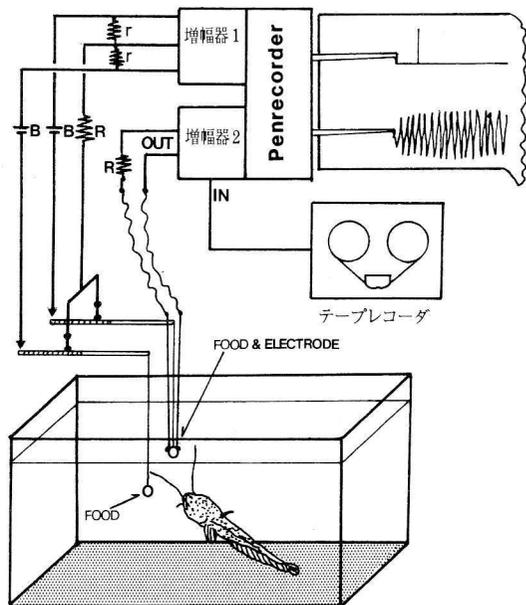


図2 餌の選択実験

電極付きの餌を引けば+方向、肉片のみの方を引けば-方向に記録される。磁気テープには餌魚の呼吸運動に伴う水中電位変動が収録しており、電極を通じて再生される。

実験者が横着をするために、ナマズがただの肉片か、それとも電極付きの肉片か、どちらをいつ、くわえたかが記録されるようになっていた。何回もこの、ナマズの餌選択実験を行なったところ、実質的にはほぼ95%以上の割合でナマズは電極付きの肉片をくわえる、という結果を得た。ナマズが餌の発生する電気を餌の情報として認識していることはまず明らかであろう。

実は、このことはサメでも強く示唆されている。サメも肉食性、夜行性であり、視覚はかなり弱い。サメ類は軟骨魚類と呼ばれ、ナマズ類が属する硬骨魚類とは同じ魚類ではあっても分類グループを大きく異にする魚である。これが電気に敏感であることで知られるようになったのは、軍事目的で敷設された海底ケーブルがサメの被害にあうということが頻発したので、よくよく調べてみると、ケーブルを通ずる電気信号がケーブル周りの海水中に誘導する電磁場に対してサメが攻撃することが判明したことによる。また、その実験中にサメに餌としてカレイを与えていたところ、カレイはサメに恐れをなして水底の砂の中に潜るのであるが、サメはこれを掘り出して捕食した。

そこで、カレイを電気以外は通さないラップで覆い、砂の中に埋めたのであるがそれでも、サメはカレイを掘り出して捕食してしまった。このことから、どういうことか分からないがカレイから電気が出ており、サメは臭いや音に加えて、その電気を餌の情報として認識しているらしいと結論されたことである。

ということは、ナマズは淡水系のサメというイメージであろうか。もっとも、ナマズには噛み切る口のつくりがない。細かな内向きの歯がヤスリのように並んでいて、くわえたものを逃がさない構造になっている。であるから、サメと違って自分より大きなものにかみつくことはない。掴まればほとんど「まな板の上のコイ」状態になる。

魚の電気は止められない

ナマズが餌魚の発生している電気を餌の情報としていることをおわかりいただけたのではないかと思う。しかしながら、この電気はどうして発生しているのだろうか。話が少し難しくなるかもしれないが、ちょっとガマンして読み進めていただ

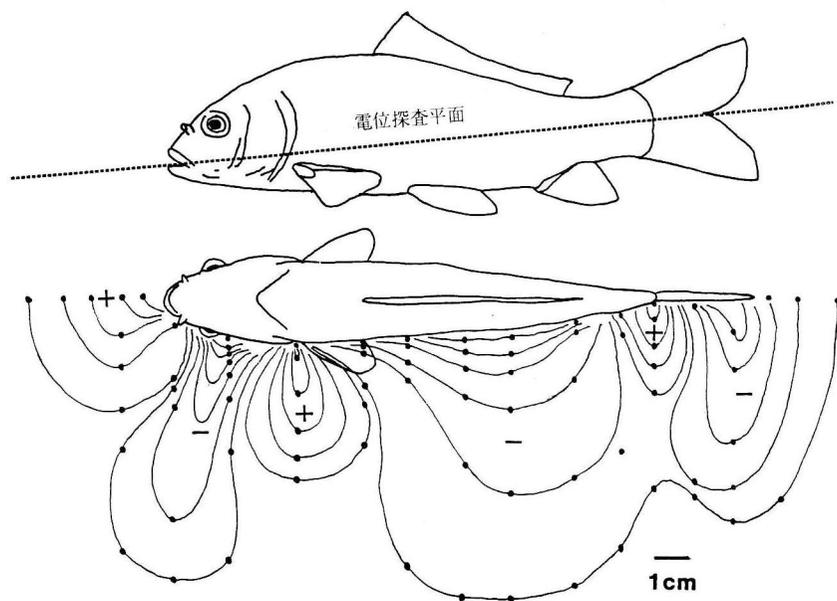


図3 魚体周囲の水中に形成されている電場
魚の体軸に水平な平面内の、無限遠0電位に対する等電位線で示した。最も外側の等電位線を $\pm 20\mu\text{V}$ とし、内側に向かって4倍ずつ高電位になる。

きたい。

図3はエラ蓋の呼吸運動を抑止した状態で、コイの魚体周囲に形成されている水中電場であり、等電位線で描いてある。見るように、魚の電気は主に口とエラ孔—これらは内部的にひと続きの口腔の開口部である—から出て、体表から体内に流れ込んでいる。先の図1は、魚が呼吸運動をしている状態で生じている電場の電位変動分のみを捉えたものであるが、要するに、電流は口腔内から流れ出しており、呼吸運動すなわち口及びエラ蓋の開閉によって体外に流れ出す電流量が増減しているということである。したがって、魚の呼吸が止まらない限り、この呼吸運動に同期した電位変動は止まらない。

では、この電気のそもそもの発生源は何かである。いろいろ調べてみると、魚の体液の塩分濃度、つまり「しょっぱさ」に関係していることが判明した。動物の体液の塩分濃度はそれぞれの動物で大体一定に保たれている。とくに、背骨のある動物（脊椎動物）では海水の約3分の1であり、これは私たちヒトでも、魚でも同じなのである。ここで魚の場合、淡水魚では、体液の塩分は塩分の少ない環境水中に拡散し、環境水は体内に侵入しようとする運動のなかにある。この事情は海水魚では逆である。淡水魚は体液の塩分が薄まって水ぶくれになってしまい、海水魚では体液の塩分が濃くなって干からびてしまう方向への物理化学的な溶液の分子運動があるということである。そして、この過程で電気が生ずる。しかし、定常的には、魚が活着している限り、体液の塩分濃度は一定に保たれており、これは塩分を積極的に取り込んだり、排出したりしている結果なのである。そしてこの過程でも電気が生ずるのである。

これら2種類の要因による電気発生は主にエラで起こっているのである。エラは呼吸における体内外のガス交換の場であり、その点で分子レベルの物質の出入りが行なわれる構造をもっている。その分、塩分が拡散しようとするときの電気発生と、塩分を積極的に取り込んだり、排出したりする際の電気発生とがここに集中しているのである。

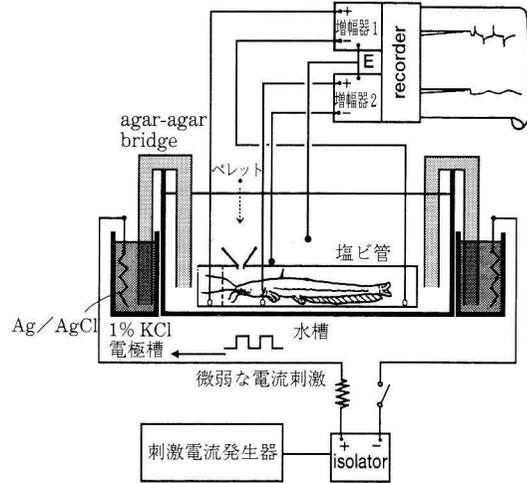


図4 電気感度の測定

微弱な電流を流し、10秒後に餌（ペレット）を与える。この操作で微弱な電流が餌の予兆であることを学習させ、反応が不明瞭になる刺激電圧を感度限界とした。

したがって、魚は活着している限り、電気発生を不可避に伴っている。ということは、ナマズは餌魚の、この隠しようのない電気発生をターゲットにしているということである。夜陰に乗じ、音もなく近づき、息をしている限り消すことのできない獲物の気配を捉え、正確に位置を掴んでゲットする。これがナマズのハンティング術である。

ナマズの電気感覚の感度はどのくらいか

図4は、ナマズの電気に対する感度を測定するために作成した装置である。一般に、感覚器の感度を測定するには、動物の刺激に対する反応を個体レベルの反応で見ることが必要である。その場合、感覚刺激と特定の個体反応とを結びつける学習訓練が最も適しており、その学習内容はその動物種の自然の生活の中で実際に意味のあることがらを設定するのがよい。いつものことであれば憶えるのも速い、ということである。

水槽の中に筒が固定してある。ナマズは狭いと

ころに入り込む習性があるので、それを利用して
いる。ナマズもそれで落ち着く。この筒にはナマ
ズの呼吸運動に伴う電位変化—ナマズも魚である
以上、今のべたようにこの電気発生から免れえな
い—と刺激として与える電気の強さをそれぞれ
捉える電極を取り付けてある。また、刺激の電気
を極力、ピュアにするために工夫した回路を組ん
である。微弱な振動電流を水槽に流して餌を与え
るという学習訓練を繰り返す。つまり、振動電流
が餌の予兆であることを憶えさせるのである。こ
の場合、ナマズはその習性から、餌の予兆に対
して身構える。それは呼吸運動の低下、あるいは停
止として現れる(図5)。この学習訓練は非常に容
易に成立するので、刺激の電圧を下げながらこの
訓練を繰り返して行くと、反応が不明確になる電
圧に到達する。その電圧がナマズが感知できる電
圧の限界である。刺激の振動周波数によってこの
限界値を整理してみると、ナマズは数ヘルツから
数十ヘルツの振動電流に感度が高く、振幅の電位
勾配として $0.05\mu\text{V}/\text{cm}$ のあたりまで感知でき
ることが明らかとなる。これは驚異的な感度であ
り、いわゆる「電子擾乱」に基づくホワイト・ノ

イズの世界である。したがって、言うまでもなく
電気に敏感な魚のなかでもナマズはそのトップに
君臨している。魚の発生している電気は図3で
見たように、10 cm 離れても数 μV の変動があるか
ら、ナマズはこれを感じするに十分な感度を持っ
ているわけである。

もっとも、高々10 cm が有効距離か、大したこ
とないではないかと思われるかもしれない。しか
し、手の届く範囲にあるものでも、目をつぶっ
て取ろうとしたらどうなるか、ましてや相手が動く
ものであったらどうなるかを考えてみれば、この
感覚がナマズの摂餌にとってどれほど強力な武器
であるかがわかるであろう。先に述べた、身体か
ら5 cm の範囲にキンギョが入ると一瞬に、これ
を丸呑みにしてしまうとの観察とよく一致するこ
とがわかるはずである。

どこで電気を感じるのか

電気にしびれた経験のある人は少なくないであ
ろう。電気はどのような神経に対しても有効な刺
激になるからである。このため、ナマズが電気を

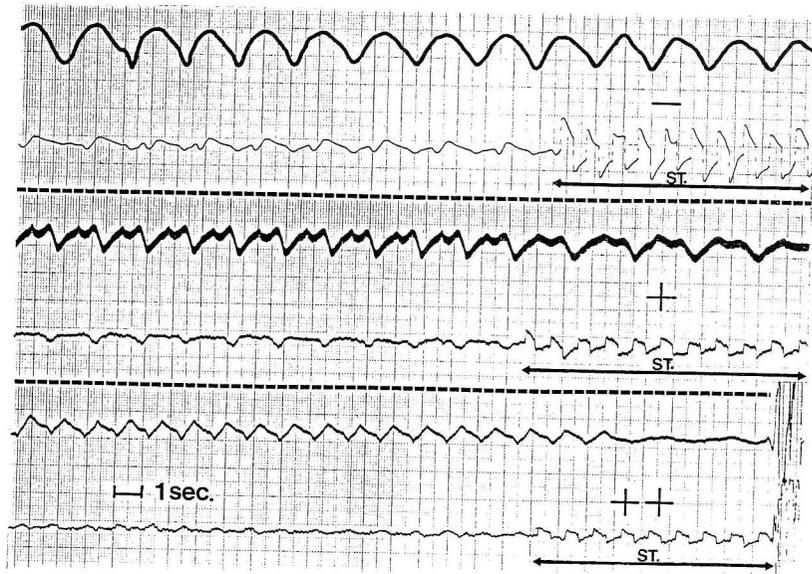


図5 電気刺激に対する反応(呼吸運動の変化)
各段上側の記録;呼吸運動, 下側の記録;電気刺激(STの部分で刺激), 基線の揺
れは呼吸運動に起因する。上段;無反応(-), 中段;標準的な反応, 呼吸運動が
緩やかになる。下段;明瞭な反応, 呼吸が中断する。

感ずるのもその類であり、ナマズの神経は通常より電気に敏感である以上のことではないと考えられたこともあった。しかし、今見たように、その感度は次元が異なっている。実際、ナマズと生息場所を共有する他の魚種、例えば、ウナギ、ハゼの仲間、コイやフナなどの電気に対する反応感度を調べてみると、数十 mV/cm のオーダーであるから、ナマズはこれらに比べて 100 万倍以上の感度を持っているのである。それゆえ、特別に発達した感覚器官の存在が予想されるのである。

ナマズはいわゆる「無鱗魚」であり、ぬめぬめした粘液で覆われた表皮をもっている。この表皮をよく観察すると毛穴のような窪みをほぼ全身にみることができる。実は、この窪み一つ一つが電気を感じ取る器官なのである。この器官をその形状から「小孔器」と呼ぶが、ひと頃、これらが何の器官か一もつとも、感覚器であることは予想されていた—よくわかっていなかった。

この毛穴みたいな窪みの上に少し特殊な、ごく細い電極の先端を当ててみると、神経の活動電位が観察できる。一つ一つのスパイク状のものが神経の自発的な活動に伴う電位変化—これを「活動電位」と呼んでいる—である。そこで、この窪みの微弱な電気を流し込んでみると、単純な規則性のある反応が現れる(図6)。電流を体外から体内の方向に流すとその瞬間、活動電位は休止し、休止の時間は電流の強さが強いほど長くなる。電流を逆方向に流すとその瞬間、活動電位は立て続けに現れ、その持続時間も電流の強さが強いほど長

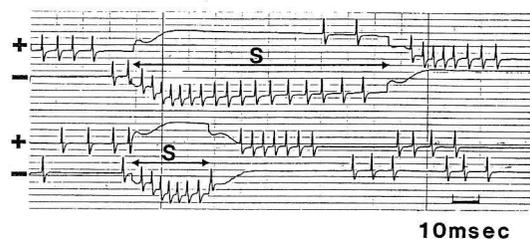


図6 通電刺激に対する小孔器の神経応答
+ ; 陽極刺激時の応答, - ; 陰極刺激時の応答。刺激はSで示した時間に与えた。応答はON-OFFのコンデンサー反応である。基線の振れは刺激電流の影響。

くなる。このように電気刺激に対して非常に定格的な応答を示す。さらに、振動電流に対する反応を調べてみると、低周波の場合はこの単純な規則性ある反応のあり方のままに応答を示すのであるが、周波数が100ヘルツを越えるあたりから活動電位が振動電流に追従できなくなって行き、反応がなくなる。この反応特性は図6の個体レベルでの反応特性とピタリ一致する。したがって、この小孔器が電気感覚器官であると結論できる。

この器官が全身に分布している。餌魚が身体の近くに来た場合、餌魚に近い体表部分に分布するものが強く刺激され、遠い部分のものは弱く刺激されることになる。それで、餌魚の位置が正確に捉えられるのである。

おわりに

少し専門的なことまでお話したが、ナマズがどのような魚なのか、ご理解いただけたのではないだろうか。暗闇の中で音もなく獲物に近づき、獲物が生きている限り不可避に生じている、ごく微弱な電気を探知してこれを捕える。最強の忍者というイメージであろう。

ところで、この最強の忍者が地震の間際になるとどうして騒ぎ出すのか。その前に、本当に騒ぐのか。この辺りの事情について、電気感覚の面から少し述べておくことでエピローグとしたい。ナマズが地震の間際に騒ぐという言い伝えは、この魚が水面から飛び跳ねているのを目撃したということであろう。地電流がどのような物理化学的過程で生ずるのかはわからないが、この地電流に100ヘルツ以下の周波数成分が含まれているのであれば、これはナマズの感知するところとなる。そしてこの場合、ナマズにとって異常な環境になることは想像に難くない。

ナマズの電氣的環境は通常、言ってみればポツリポツリと灯がともっている夜の田舎道のようなもので、ナマズはその灯を餌と認識してアタックをかけるわけである。ところが、その周波数成分と振幅にもよるが、地電流が流れた場合、事態は一変する。どこにいてもそこら中が灯だらけ、つ

まり無数の魚に周囲をびっしり囲まれたか、あるいは世の中が爆発でもして真赤に燃え上がったかのような状況になるのであろう。これでは逃げ出さないほうがおかしい。水中がこのような状況であれば逃げ出すところは水の外というわけで、水面からのジャンプとして目撃されることになると考えられる。実際、ランダムな振動電流を面積の広い電極板を通じて、ナマズの飼育水槽に広域に流すとナマズは水槽から飛び出す。電流の強さに関係し、傾向としては強くなれば飛び出すことが多くなる。

実験室レベルでは水面ジャンプを見せてくれるが、自然環境ではとなると事は単純ではないように思われる。私たちが電力を社会的に使用するようになる前であったなら実験室の観察とよく一致したと考えられるが、現在では状況が大きく異なっている。電灯線電源は50あるいは60ヘルツであるから今の自然水系にはナマズのよく感覚する周波数帯の電気が常在している。したがって、水系に漏れているか、誘導されている、人間生活にともなう雑電流の中で、ナマズは生活しているので、地電流に馴れてしまっている可能性が高

い。逆に、この現代においてナマズのジャンプが目撃されたなら、それはよほど強い振動電流が流れている証拠であろう。そのときはご用心。

参考文献

- Parker, G.H., van Heusen, A.P., 1917, The responses of the catfish, *Amiurus nebulosus*, to metallic and non-metallic rods, Amer. J. Physiol., 44, 405-420.
- Hatai, S., Kokubo, S. and Abe, N., 1932, The earth currents in relation to the responses of catfish, Proc. Imp. Acad. Japan, 8, 478-481.
- Asano, M., Hanyu, I., 1986, Biological significance of electroreception for a Japanese catfish. Bull. Jap. Soc. Sci. Fish., 52 (5), 795-800.
- Asano, M., Hanyu, I., 1987, Sensitivity to electricity in the catfish, *Parasilurus asotus*, Comp. Biochem. Physiol., 86 A, 3, 485-489.
- Asano, M., Hanyu, I., 1987, Electroreception in a Japanese eel, Bull. Tohoku Reg. Fish. Res. Lab., 49, 83-88.
- Asano, M., Hanyu, I., 1987, Certification of the small pit organ to be the electroreceptor in a Japanese catfish. Bull. Tohoku Reg. Fish. Res. Lab., 49, 73-82.

地震と温泉

長瀬和雄

はじめに

神奈川県温泉地学研究所は昭和36年に神奈川県の温泉行政を科学的に展開するための調査研究機関として発足した。その後、箱根火山の地震や神奈川県下の地下水へ研究分野を広げた。昭和50年代にナマズの会を創設して地震予知研究へ挑戦を開始した。現在は地震を調査研究する機関として神奈川県の地域防災計画にも位置づけられている。神奈川県西部地震の予知研究を最優先テーマとし、現在このマグニチュード(M)7クラスの地震のシナリオ作りに取り組んでいる。

1. 神奈川県西部地域のテクトニクス

神奈川県、静岡県、山梨県の県境付近一帯は地震の多いところとされている。この周辺には地質時代から現在に至るまで地震の巣であるプレート境界が存在し、構造地質学から見ると付加帯であった。第三紀中新世末(800~600万年頃)のプレート境界は丹沢山地と関東山地の間をとおり藤野木-愛川構造線から三浦半島中部~房総半島に抜ける構造線と言われている。第4紀更新世の初め~中後期(200~30万年頃)には神縄断層~国府津-松田断層(丹沢層群と足柄層群の境界部分)~相模トラフがプレート境界であった。この地域では海洋性の地層を付加させながらプレート境界は地質時代を通じて南に移ってきた。

現在、フィリピン海プレートは相模トラフを沈み込み口として2~3cm/年の速さで沈み込み、プレート境界で南関東地震として200~250年の周期でM8クラスの巨大地震を発生させ、また駿河トラフ~南海トラフを沈み込み口として4~5

cm/年で沈み込むフィリピン海プレートは、各セグメントごとに100~150年を周期としてやはりM8クラスの東海地震や南海道地震等を起こすとされている。

相模トラフと駿河トラフを結ぶプレート境界は国府津-松田断層、神縄断層、富士川沿いの活断層と言われていたが、神縄断層を切る小断層が駿河礫層に覆われていること、国府津-松田断層(丹沢層群と足柄層群の境界となっている部分)を曾我山礫層が覆うように分布すること等からこのプレート境界は50~30万年以降沈み込み口としてほとんど動いていないといえる。

関東大地震で国府津-松田断層の東側ほど顕著でないが西側の小田原市、箱根町、真鶴町あたりまで地震と同時に地盤が隆起し、南西に異動して、プレートの跳ね返りを示した(宮部, 1931; 武藤, 1932)。この事はプレート境界がここより南方であることを示す。神奈川県温泉地学研究所は神奈川県西部地域ではほぼ70年の周期で繰り返し発生しているといわれるM7クラスの“神奈川県西部地震”の予知研究として、神奈川県西部地域を中心に30の観測地点で各種の観測をテレメータ化し、24時間観測システムで観測している(図1)。温泉地学研究所の光波測量やGPS観測によっても国府津-松田断層や神縄断層等がプレート境界として動いている兆候は現在全く見られない。GPS観測の資料では真鶴海岸(図1真鶴観測点)から丹沢山(同三保観測点)にかけて、この地域の地盤が北西-南東方向、つまりフィリピン海プレートの進行方向に、年間ほぼ1cmずつ圧縮される傾向が見える(図2)。また微小地震の震源は見ると真鶴半島から箱根の東側の外輪山、足柄山地の地下、そして丹沢山地へ震源が10~30kmの深さで、帯状に分布する(図3)。以上の観

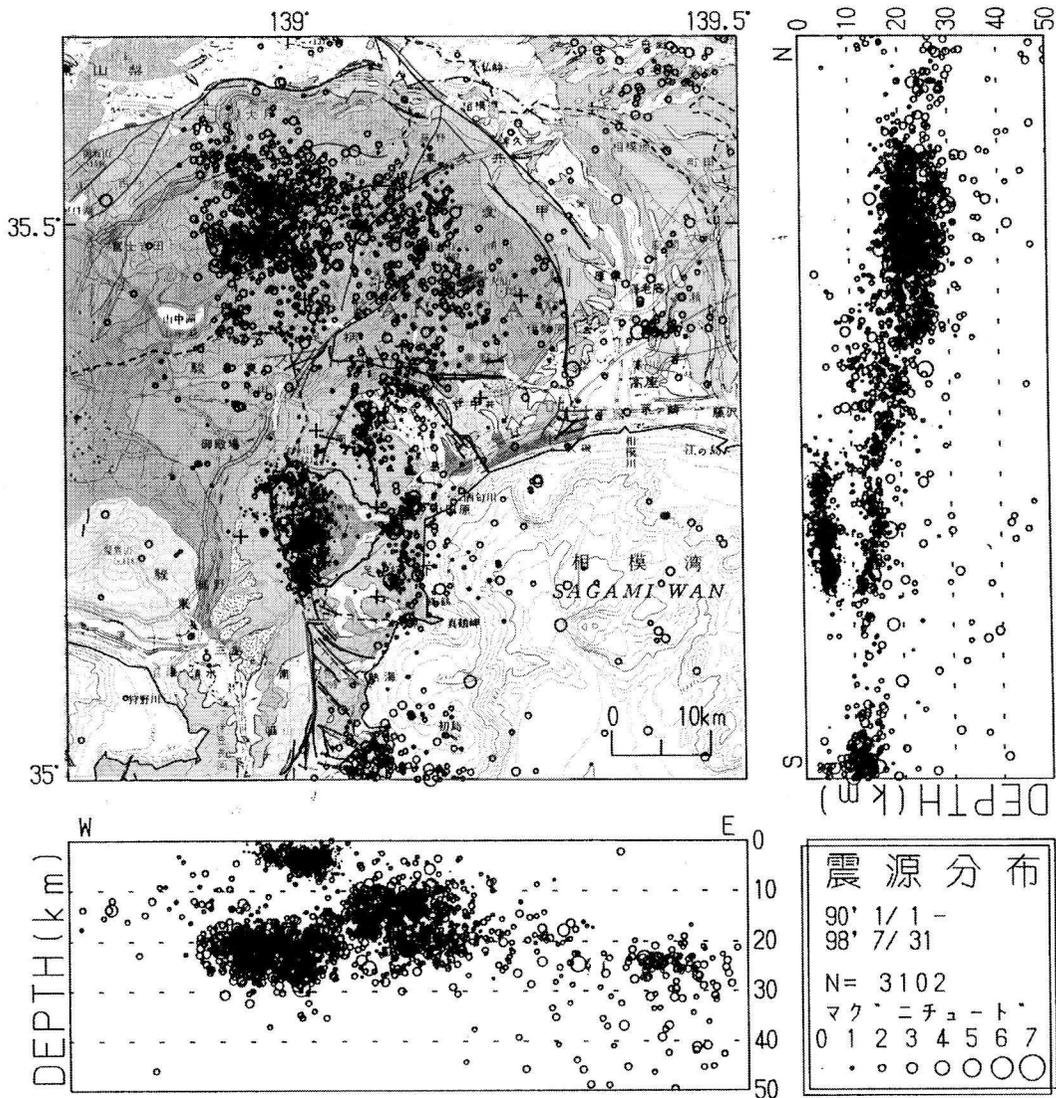


図3 神奈川県西部地域の震源分布
1990-1998

2. 地震と温泉

神奈川県西部、静岡県との県境一帯には箱根火山が広がり多くの温泉が分布する。ここでは地震と温泉にまつわる伝説や、たくさんの資料が残されている。

(1) 伝説 箱根芦ノ湖には九頭竜伝説がある。

芦ノ湖には九つの頭を持つ九頭竜が住んでいて、時々湖から飛びだして田畑を荒らし、人々を

殺傷し、この地方の人々を苦しめていた。九頭竜の暴れるのをなだめるために村人は毎年7月末(現芦ノ湖湖水まつり)に若い娘を人身御供として湖に沈めなければならなかった。その悲劇を見かね、都の朝廷は地震押さえの要石が祀られている常陸の国鹿島神宮から万巻上人をこの地に使わした。天平宝字元年(757年)朝廷の命により万巻上人は箱根山にのぼり、日本古来の山岳宗教(神道)と大陸から渡来した仏教とを融和した新しい宗教である権現を作り、箱根権現の祖となった。

いのること一七日にして立ちさりたまひぬ」。

これが熱海の大湯として後述するように大正年間まで世界的に有名であった間欠泉にまつわる伝説である。熱海では“山が鳴動し、海の波が逆巻き、雷のような音がして、山が崩れ、岩の間から熱湯が湧き出した”ことになり、後述の宇佐美温泉で1989年伊豆東方沖群発地震に見られた火山・地震・その他の諸現象と規模こそ異なるが良く一致する。万巻上人は地震の前兆を察知していたのではないかと想像される。現在は学校教育による科学知識の普及・浸透をもとに、テレビやラジオ、各種の出版物等により、情報提供されている。しかし、文字の普及率が低かった昔は“秘伝”や“極意”として修験者などの一部の選ばれた人々にのみ、このような経験や中国大陸等から伝来した知識（情報）が伝えられていたと思われる。現在の中国では1975年2月4日の遼寧省海城地震（M7.3）や1976年8月16日四川省松潘・平武地震（M7.2）等地震に対し避難警報などの短期予知情報を出し、被害を最小限に抑えて地震予知に成功したといわれる。そこでは、冬眠中の蛇が地表に這い出し、豚や鶏などの動物に異常行動が見られ、井戸で地下水が溢れ出すなど急激な水位の変化が現れ、井戸水が白濁したり、池で発泡がおこり、地鳴りや微小な地震などが発生したりして、地震の前兆現象が把握された。当時の時代を代表する万巻上人が何の根拠や自信もなく、温泉の湧出機構を変えるための祈禱にはいるとは考えられない。何らかの異常を察知して祠にはいったものと想像される。

(2) 関東大地震 大正12年（1923）9月1日M7.9の関東地震が発生し、死者・行方不明者142,525人、倒壊家屋110,198戸、焼失家屋350,902戸、流失家屋1,451戸の大災害を引き起こした。この関東地震の調査研究の中で最も権威のあるものの一つである震災予防調査会の関東大地震調査報告で中村（1925）は特別に「温泉の変化」の章をもうけ、その中で「大地震の後に於いて温泉及び地下水の変化せる事は往々これ耳にすれども地震前に於ける変化は従来多く閑却せられたり。然るに今回の地震に於ては断片的なれども前

兆と認むべき変化二三を確認し得たるは大に人意を強らするに足る。もし今後地震の予知を必要と考ふるならば必ずこの方面も有力なる調査事項の一ならむ」とあり、さらに先に記した熱海温泉の大間欠泉“大湯”の変化について「温泉に於ける変化中最も明瞭なるものは熱海温泉大湯の変化なり。大湯は有名なる間欠泉にして近来衰弱し、その復旧には静岡県当局を初めとして温泉組合等の苦心したる処なり。本田光太郎博士の考案によりて噴出口に加工し、或いは多数付近の温泉に制限を加え等して僅かにその噴出を継続せしめ居たるものなり。最近に於いても大正11年12月20日以来全く噴出せず、12年5月付近の諸温泉に厳しき制限を加へたり。その後1日1回5〜6分乃至20分位の噴出を続けしめ得たるが地震の前日即ち8月31日に至り、その噴湯40分に及び尚ほ多少噴出の模様を示したれば一同奇異の感を懐き居たりしに翌日大地震あり。震後数分にして人々戸外に逃れ居る際急に噴出し初め、従来の噴出孔の外に小亀裂、小噴出孔を生じ噴出止まざる事一週間に及びたり。その後も間欠性を帯びて噴出する事数ヶ月に及び次第に勢力を失ふといえども従来に比してその勢力甚だ大なり。」と記録されている。図5は「熱海大湯日記抄」（大湯の噴出時間を警官が立ち会って日記とした精確な記録）を図示したものである。関東大地震の前日（8月31日）の噴出時間40分は明瞭な前兆現象としてとらえることが出来る。5月2日から大湯付近の清左衛門湯などを制限したにも関わらず5月中の噴出は5月8日の19分、5月9日の17分の2回だけであった。6月28日から大地震当日の9月1日まで殆ど毎日1回噴出を繰り返した。噴出しなかったのは7月1日、23日、8月23日の3日だけであった。6月28日は梅雨の中程にあたり多量の降水が地下水として供給し噴出再開を引き起こしたとも考えられるが、関東大地震の前兆現象の始まりと見る方が妥当と考える。仮に6月28日から前兆異常現象が出現したとすると65日前からということになる。

同論文にはこの他に以下の前兆現象が記されている（図6）。

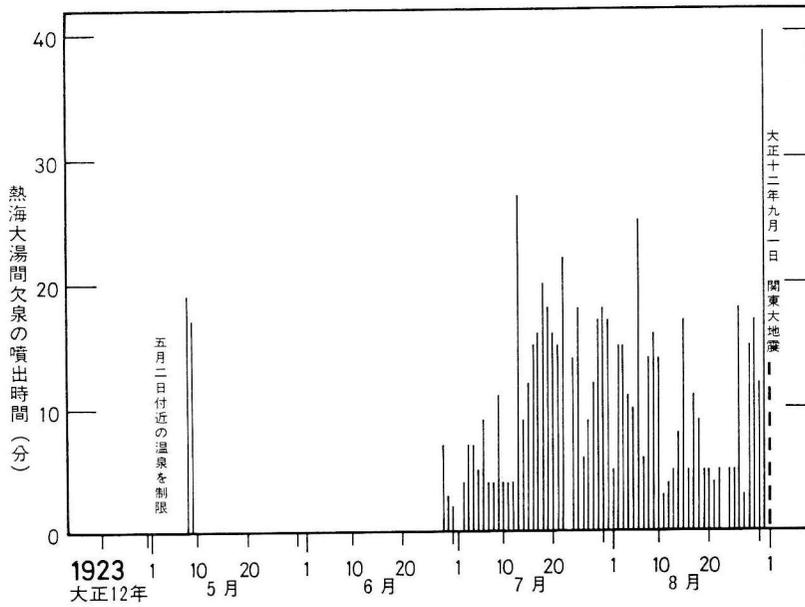


図 5 関東大地震前の熱海温泉の大湯間欠泉の噴出状況

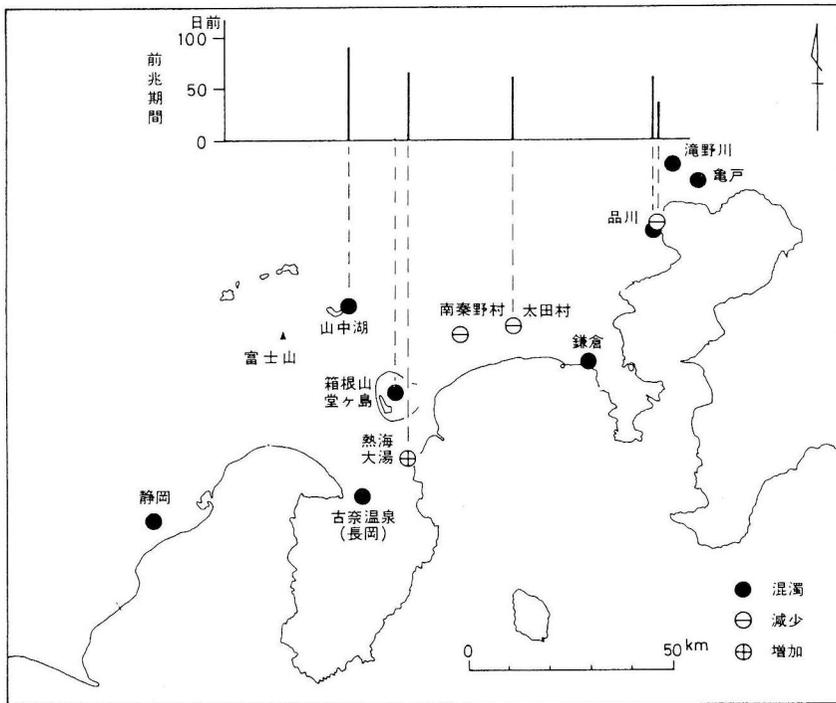


図 6 関東大地震の前兆が温泉・地下水に現れた場所、期間、種類

古奈温泉の古奈駐在所の井戸水（長岡）：9月1日大地震少し前に白濁し、地震後3日間泥濁した。

箱根山ヶ島温泉の大和屋の湯：塩類泉と単純泉とを混合使用していたが、9月1日午前6時頃温泉が泥濁となり入浴中身体が見えなくなるほど

で宿の主人は奇異を感じた。地震後2~3日は湧出が止まった。

東京品川狛師町の井戸水：品川狛師町の井戸で有機物を多量に含み褐色を呈していたが7月27日全く涸渇し、安政の大地震の時に同様なことが起きたので、大地震の前兆でないかとの照会により田代武四郎氏が調査したところ、付近の数個の井戸が涸渇していることが確認された。9月1日の地震と共に復旧し、大地震の影響であることが明らかにされた。この井戸から数百mほど離れた春雨庵という寺の境内の井戸の水質が6~7月頃から鉄臭臭く実母散のような臭いを帯びてきて飲用として使えなくなり、地震当日ももっとも甚だしかったが、その後次第に回復した。寺の門前の井戸には異常はなかった。

東京の滝野川と亀戸の井戸水：地震前濁って使用できなくなった。

神奈川県秦野村今泉と太田村下谷の井戸水：地震の前に減少していたが地震後増加した。

山中湖の湖水の変化：山中湖には流入する河川はなく、湖底からの地下水の湧出の湖であるが、5~6月頃から濁り始めた。

静岡市知事官舎の井戸水：地震2~3日前から濁った。

(3) 1989年伊豆東方沖群発地震 この地震に関連して「なまずの会」(事務局神奈川県温泉地学研究所 主に井戸水の水位の変化から地震予知を目指す民間のボランティアグループ)の会員黒川義男氏のこれまでにない温泉の源泉についての克明な観測記録が残っている。

1989年伊豆東方沖群発地震の活動は6月30日に始まり、7月4日頃から活発になった。7月7日午前0時1分にはM5.3、7月9日午前11時9分にはM5.5の引き続き2回の地震が発生した。7月9日の地震では震源に近い網代では震度4であったが、伊東市では各所で被害がでて震度は6に達した模様である。7月10日午後3時までには有感地震は457回、無感地震もあわせると2万900回の地震が観測された。7月11日夜8時30分~9時45分にわたって、強い火山性脈動が発生し、“ゴ、ゴ、ゴー”という海鳴りのような音に混じっ

てドーン、ドーンという杭を打ち込むような地響きが聞かれた。7月13日午後6時30分再び強い火山性脈動が発生し、数分後に伊東湾東部手石島北方1kmの海底で噴火がおこった。

この地震活動に伴って黒川会員所有の温泉の源泉宇佐美24号泉、宇佐美8号泉に地震の前兆現象が現れるなどいろいろの変化がみられた。以下は黒川氏の観測記録にもとづくものである。

宇佐美24号泉

宇佐美24号泉は海岸から220mに位置し、深さが624mで、孔底近くに温泉の湧出する亀裂がある。昭和47年に掘削され、62°Cの温泉が220l/分自然湧出していた。これまでもこの地域に発生する地震と関連して、温度などに再三前兆現象が現れていたことが「なまずの会」に報告されていた。昭和55年に、東京大学地震研究所の茂木研究室からの要請で井戸孔内の温度を測るために4点にサーミスタ温度計が設置された。そのため、孔内に長さ延べ600mをこえる電線が挿入され、その電線が抵抗となって温泉の湧出量が減少した。そこで、動力0.75kWの渦巻ポンプを設置し、62°C、180l/分の温泉の揚湯が保たれるようになった。揚湯中の水位(動水位)は地表から約3.5mの位置にあった。自然湧出からポンプ揚湯になって、湧出孔の温度が地震の前兆を敏感に反映しなくなったと黒川氏は感じた。自然湧出の時のような微妙な温度変化は動力装置によってうち消されてしまうと考え、これを補うために、毎朝8時に孔内水位(動水位)を測ることとした。宇佐美24号泉について図7に温度(1988年1月~1989年8月)、図8に水位(1989年7月)の変化を示す。1989年3月から泉温は61.1°Cに下がることが多かった。黒川氏の長年の観測にもとづく判断では、この辺から群発地震の前兆期に入ったとされる。6月25日に水位は5.7mとなり通常より2mも低下した。6月30日泉温は0.1°C低下して60.0°Cとなった。7月1日深夜0時24分M4.6、網代で震度1の地震が発生したが、温度は61°Cにもどり水位にも大きな変化はなかった。7月4日有感地震を交えて群発地震は活発になったが、泉温の低下はほとんどなかった。しかし、動

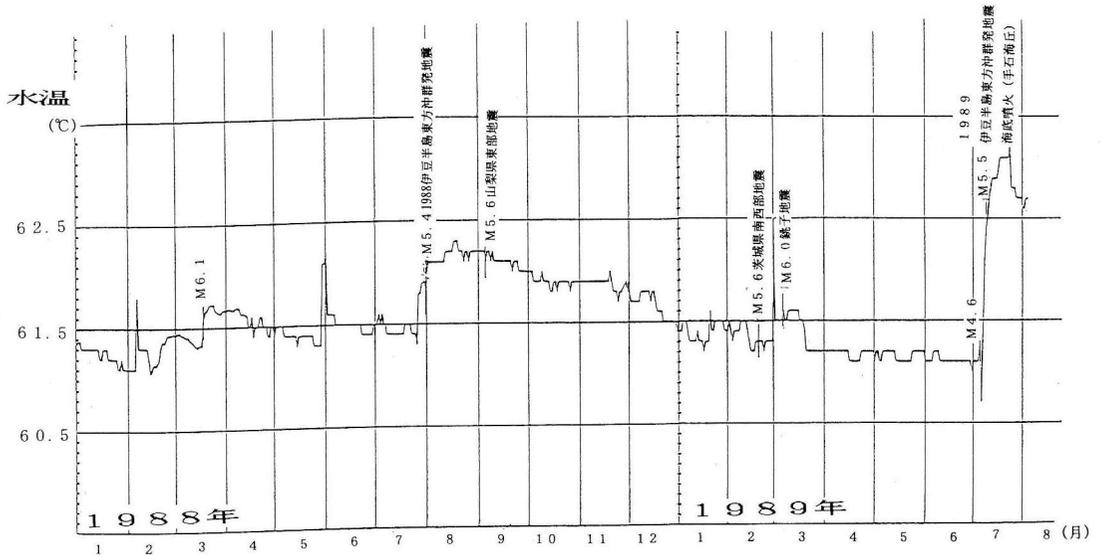


図 7 1989 伊豆半島東方沖群発地震前後の宇佐美 24 号泉の温度変化

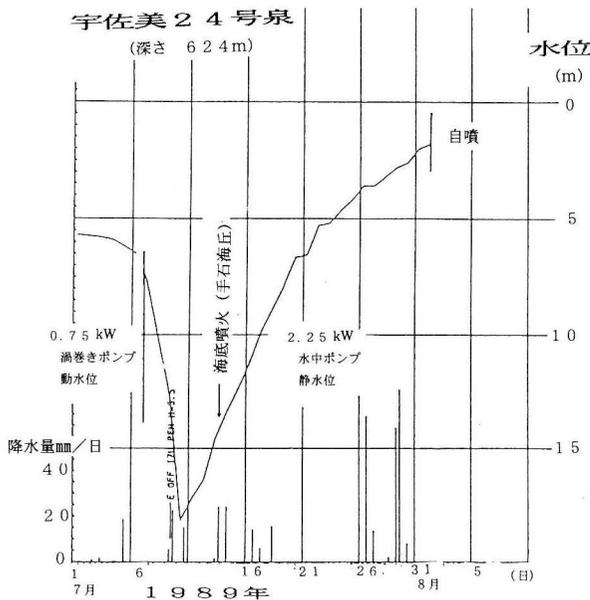


図 8 1989 伊豆半島東方沖群発地震前後の宇佐美 24 号泉の水位変化

水位は 5.9 m で 6 月 25 日より 20 cm 低下していた。7 月 6 日早朝 5 時 30 分 M 4.3 の地震がおり、宇佐見で震度 4 のゆれであった。午前 8 時の観測時に泉温は 54℃ に低下し、動水位も 60 cm 下がって 6.5 m となった。7 月 7 日深夜 0 時 1 分 M 5.3 の地震が発生し、渦巻ポンプの揚程は 8 m なのでこれ以上水位が下がるとポンプが空回りす

るおそれがあり、深夜にもかかわらず源泉に駆けつけると、水位が急激に低下していて、水位を測ったところ静水位が 7.7 m となっていて渦巻ポンプによる揚水が不可能な非常事態となっていた。連日の激しい地震で孔底付近の亀裂が閉じてしまったと心配し、黒川氏は 400 l/分の水を注水したところすべて飲み込んでしまっていて亀裂が閉じていないことが確かめられた。昭和 53 年 1 月の伊豆大島近海地震 (M 7.0)、昭和 55 年 6 月の伊豆半島東方沖の地震 (M 6.7) の時も水位の低下は起きたがこれほど大きくなかった。2.2 kW の水中ポンプを深さ 12 m に設置して揚水を確保した。7 月 9 日午前 11 時 9 分 M 5.5 の地震が 2 回立て続けに起きた。源泉に駆けつけたところ再び揚水が不可能となっていた。この地震で水位は 12.6 m に低下した。結局ポンプを 22 m まで下げて 200 l/分の揚水を確保した。7 月 10 日朝 8 時の観測では静水位は前日より 5.6 m も低下し、18.2 m となり、200 l/分の揚湯で泉温は 63.5℃ と 2.5℃ 上昇した。地震研究所 (望月氏) の観測結果ではこの日までの数日間に伊東と初島の距離が 22.5 cm も開いたとのことである。7 月 11 日午前 8 時の観測では静水位 17 m で 1.2 m 回復した。7 月 13 日朝 8 時の観測では静水位は 14.6 m で 2.4 m の回復となった。午後 6 時 30 分に前日にひき続き再び強

い火山性微動が発生し、数分後に手石島北方の海底で海底噴火が起こった。

宇佐美 8 号泉

宇佐美 8 号泉は深さ 546 m，宇佐美 24 号泉から西南西に 220 m に位置し，深度 16 m に設置した水中ポンプで 54℃，180 l/分の温泉を揚水していた。7 月 9 日 11 時 9 分の地震で水位が急激に低下し揚湯が不可能になった。ポンプを深度 26 m まで下げて揚湯を再開した。この孔井の水位の低下は 10 m 程度であった。

宇佐美 8 号泉の近傍に深さ 40 m の水井戸があるが，この期間に 30 cm 程度の水位の低下が観測され，温泉の水位低下ほど大きくはなかった。

自然湧泉にポンプを取り付けると微妙な温度の変化が把握しにくくなる。ポンプ本体や設置位置を変更するなど観測条件が変わっているが，地震活動と温度や水位に大きな変化のあったことは間違いない。かつて伝説の時代から語り継がれている大地の鳴動や温泉の温度や量の変化が起こって

いることが立証された。黒川氏の観測データは温泉地学研究所の現在の地震予知研究手法にも大きな影響を残している。

(4) 神奈川県・山梨県県境付近の地震活動と温泉の温度変化

観測環境

丹沢山地の西側では現在活発な地震活動が続いている。震源は山梨県，神奈川県の間境付近に集中し，その深さはおよそ 20～30 km に分布している。M6 クラスの地震が過去数年間に複数回発生している。丹沢山地の西側の地震活動が盛んな地域に，戦国時代以来，温泉場として利用されてきた「信玄の隠し湯」で有名な中川温泉がある。中川温泉は石英閃緑岩とその周辺に分布する結晶片岩から湧出している温泉で，泉質はアルカリ性単純泉，泉温は 25～40℃，成因は第三紀におけるマグマの貫入による熱水作用の名残りと考えられている。降雨など地表からの循環水が地下深部に

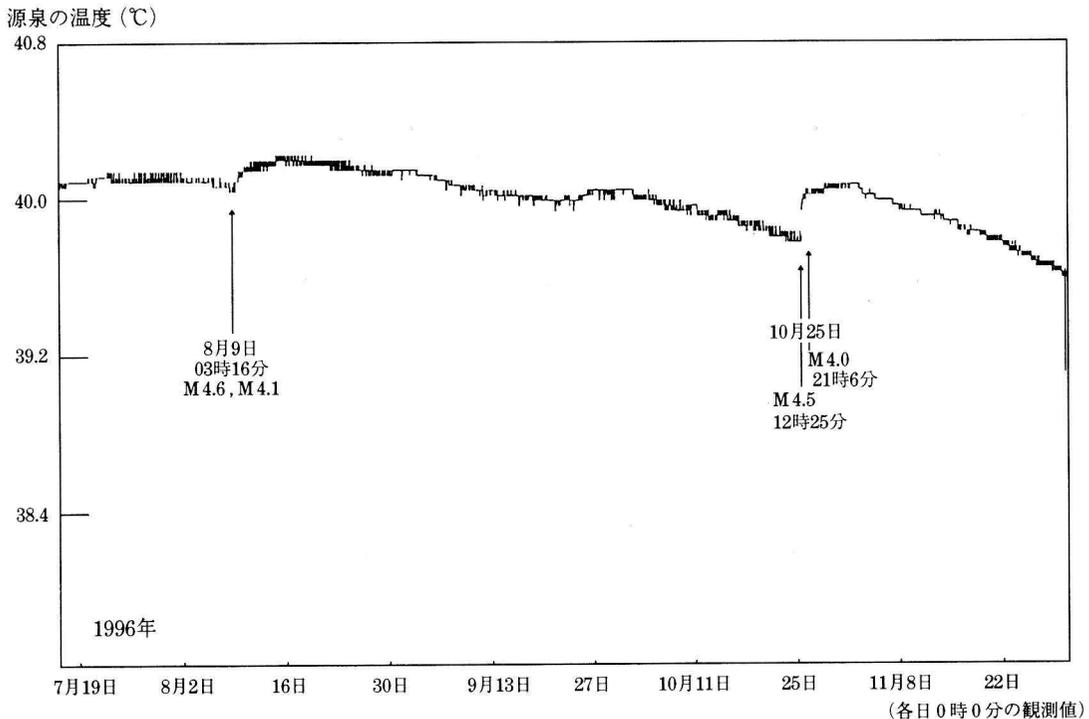


図 9 中川温泉の源泉の温度変化と地震
(各日 0 時 0 分の観測値)

残っている熱の伝導によって暖められて温泉になったと考えられている。温泉地学研究所では地震の予知研究の一環として中川温泉において地震活動と温泉の泉温の関係を観測研究している(棚田俊收他, 1998, 温泉科学に投稿中)。温泉場の東端の自噴井(深さ300 m, 自噴量56 l/分, 泉温39.6°C, pH 9.8)に温度センサーを設置した。温度センサーはサーミスタ式で, 自噴している孔井の深さ5 mの位置につり下げた。精度は±0.2°Cで, 分解能は0.03°Cである。

観測結果

1996年6月16日~1997年4月15日までの解析した約10か月の期間において, 気温, 気圧, 降水, 潮汐等と泉温の変化との間に直接的関係は認められなかった。

この期間中この付近では, 1996年8月9日早朝3時16分にM4.6, その40秒後にM4.1の余震が深さ約21 kmで発生した。さらに, 10月25日昼12時25分にM4.5, 夜9時6分にM4.0の地震がおきた。今回これらの観測では地震と同時に変化するコサイスマックな変化しか検出できなかった(図9)。源泉の温度変化と地震との関係を論じるには源泉の熱機構の解明も必要である。M5クラスの地震の震源断層の長さは, ほぼ数 km程度で, そのエネルギーはM7クラスの神奈川県西部地震の1/1,000といわれており, 今回のような小さな地震に伴って現れるいろいろの現象の規模は小さいか, あるいは地表には明白に現れないことも予想される。今後これらの観測を継続し, 研究を進め, 地震予知研究の一環として, 地震の発生機構の解明, シナリオの作成のための基礎データとして活用してゆきたい。本稿をまとめるにあたり温泉地学研究所元所長大木靖衛氏, 前所長平野富雄氏には指導, ご助言をいただいた。元研究部

長の故平賀士郎氏, 同故小鷹滋郎氏, 故黒川義男氏には貴重な資料を活用させていただいた。また, 横山尚彦現研究部長, 大山正雄専門研究員, 棚田俊收主任研究員, 八巻和幸主任研究員には協力を得た。ここに厚く感謝の意を表する。

参考文献

- 宮部直己, 1931, 東大震研彙報 9, 2
武藤勝彦, 1932, 東大震研彙報 10, 384
今村明恒, 1925, 関東大地震調査報告, 震災予防調査会報告, 100号(甲), 21-65.
中村左右衛門太郎, 1925, 関東大地震調査報告, 震災予防調査会報告, 100号(甲), 67-140.
大木靖衛・田口健志・広田 茂・荻野喜作・平野富雄・守矢正則, 1967, 中川温泉の地下温度構造, 神奈川県温泉地学研究所報告, 1(5), 23-34.
大木靖衛, 1981, 箱根芦ノ湖の九頭竜伝説と地震, 神奈川県温泉地学研究所報告, 12(4), 133-135.
平賀士郎, 1981, 地震前兆現象としての温泉・地下水異常記録—大正12年9月1日, 関東大地震一, 神奈川県温泉地学研究所報告, 12(4), 144-146.
黒川義男, 1990, 宇佐美温泉で観測された1989年伊東東方沖群発地震と海底噴火の前兆, 神奈川県温泉地学研究所報告, 21(2), 7-14.
加藤 茂・岩淵 洋・浅田 昭・加藤幸弘・菊池真一・穀田昇一・楠 勝浩・渡辺一樹, 1933, 相模湾の地殻構造と変動地形, 地学雑誌, 102(4), 399-406.
棚田俊收, 1996, 神奈川における地震活動, 神奈川県温泉地学研究所報告, 27(1・2合併号), 11-18.
力武常次, 1996, 近代世界の災害, 国会資料編纂会.
力武常次・竹田 厚, 1998, 日本の自然災害, 国会資料編纂会.
棚田俊收・大山正雄, 1998, 丹沢山地中川温泉で観測されたコサイスマックな泉温変化, 温泉科学(投稿中).
長瀬和雄・小沢 清・棚田俊收・萬年一剛, 1998, 国府津・松田断層と地震活動, 日本地質学会第105年学術大会講演要旨, 269.

地震と建築物の安全性能

アンケート意識調査結果と若干の考察

長能正武

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）では高密度に集積した都市の直下で発生した激しい地震動の直撃を受けて阪神地域で多くの構造物に甚大な被害を生じた。

直後に5,500人を超えた直接的な犠牲者の約8割は損壊した構造物や部材の下敷きとなったためであり約1割は室内の家具などの下敷きなどで生じ、残る約1割は火災に巻き込まれた結果とされている。また、兵庫県監察医の検視結果によれば死者の大半は即死状態に近かった。構造体ばかりでなく室内環境を含めた建物の地震安全性能の重要性が広く再認識された。

地震の発生が1月17日午前5時46分、連休明けの夜明け前であったため都市活動はほとんど休止状態で犠牲者のほとんどが住宅で生じた。この点から住宅の被害状況や安全性に注目した調査が多く行われている。

一方、日中に活発な業務活動が行われる多くのオフィスや商業施設、生産工場なども甚大な被害を受けた。地震の発生時間帯が異なっていたならばこうした一般事業所建築でも犠牲者が多くなった可能性は高い。しかし、事業所の被害とその影響について防災の観点からの調査は少ない。

また、建設技術の多様化や高度化、規制緩和要求を背景として、建設設計を仕様規定から性能規定設計とする建築基準法の改訂が行われ、施行体制整備の動きが進んでいる。このような背景のもとに建設省建築研究所が主催する研究委員会で建築物の利用者、発注・所有者や建築関係者へ安全性能水準に関連した考え、意識に関するアンケート調査が行われた。

2. 阪神・淡路大震災における建築物被害の概要

阪神・淡路大震災の建築物の被害調査は多くの機関によって行われ、建設省建築研究所でそれらの統合整理を試みている。整合の取れない部分が残されているが建物被害の全体像を把握するには有用な資料である。阪神地区の建物の用途区分で見た被害状況は図1、2に示されるようになっている。

建築物に占める住宅の多さが理解できる。

建物の被害理由を、被害調査報告書を参考に整理してみると以下のようなよう。

① 建築基準といわゆる既存不適格建築

1968年十勝沖地震、1978年宮城県沖地震などの被害の教訓を受けて建設技術の改善、開発が進められてきた。1980年に建築基準法の耐震設計規定が大幅に改定され「新耐震設計法」と称された。

またこのことに先立ち建築学会の構造基準が

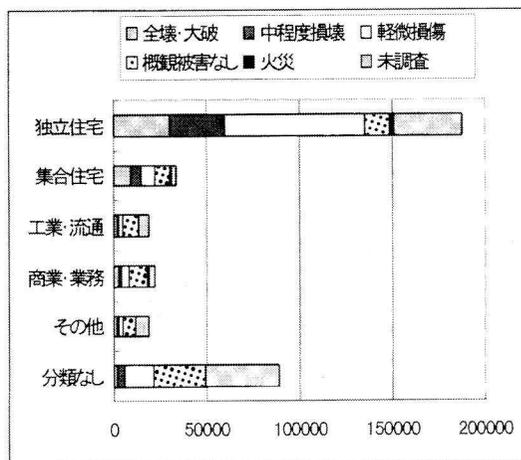


図1 建築用途別被災状況（低層：1～2階）
建築研究所にもとづく

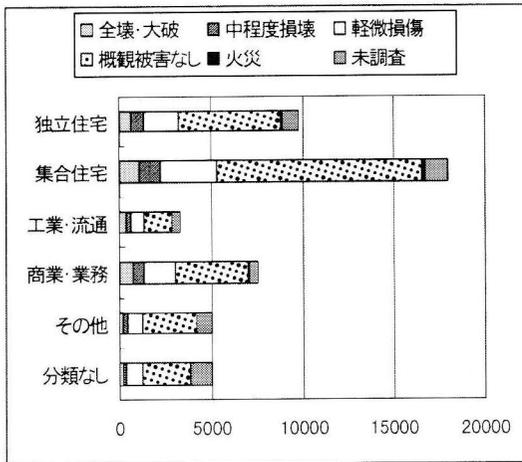


図 2 建築用途別被災状況 (中・高層)
建築研究所にもとづく

1975 年に改定されている。

しかしながら、こうした新しい技術に基づく設計基準の改定前に建設された構造物は、一部は補強対策が行われても残る多くに耐震安全の課題を内蔵している可能性がある。これらの建築物は「既存不適格構造物」としての課題が指摘されている。

違法状態の建造物も「不適格建築物」であるが、混同されやすい問題として取り扱いには注意が必要である。

「新耐震設計法」以前の建物と以降の建物被害率に明らかな差があった。法体系、基準の整備の重要性を示している。

② 維持管理不良：白蟻被害

被害調査では構造部材の欠損、腐食や木造住宅における白蟻被害など維持・管理、利用形態に係わる問題点も被害原因として指摘された。

③ 施工不良

建造物は、外装、内装が行われると耐震部材としての柱、壁、梁の実態はわかりにくくなる。これらに弱点、欠陥があると強い地震を受けて被害が生じることになる。被害個所の観察で耐震上の処理の不十分な点が指摘された事例はこれまでの震災で少なくなかった。

④ 建築工法と地域文化

阪神・淡路大震災における被害木造住宅の多く

が土葺瓦屋根の木造軸組み工法のものであったため、またこれまでの地震被害でも軸組み工法住宅が多く観察されたため再建、復旧ではこうした工法が避けられる傾向が強い。しかしながら、在来軸組み工法であっても無被害や軽微被害にとどまった例もあり、木造軸組み工法が耐震性に劣ると決めつけず建築地域文化としての評価も必要と思われる。

3. 建築物の安全性能についての意識調査

(1) 調査の概要 建設省「総合技術開発プロジェクト (略称＝総プロ)：新建築構造体系の開発」の一環として設置され、著者も参加した研究委員会「目標水準分科会・性能水準 WG・要求性能調査 SWG」；事務局建築研究所で建築物の安全性能に関するアンケート調査が行われた。興味深い結果が得られているので紹介したい。

SWG のメンバーは以下の通りである。

青木義次：東京工業大学工学部建築学科

可児長英：東京建築研究所 (平成 8 年度)

河野 守：名古屋大学大学院地圏環境工学専攻

高橋郁夫：清水建設和泉研究室

高橋 徹：千葉大学工学部建築学科

谷 明勲：神戸大学工学部建設学科

中村八郎：防災都市計画研究所

長能正武：竹中工務店技術研究所

平田京子：日本女子大学住居学科

深沢義和：三菱地所第二建築部 (平成 9 年度)

矢代嘉郎：清水建設技術研究所

大橋雄二：建設省建築研究所第三研究部

糸井川栄一：建設省建築研究所第六研究部

藤谷秀雄：建設省建築研究所第四研究部

齊藤大樹：建設省建築研究所第三研究部

調査の対象は、一般建築ユーザーと建設を発注する建築主および建築関係者の 3 分野である。一般ユーザーとしては首都圏、関西圏、及び仙台市、福岡市の住民を無作為に電話帳を基に抽出し、郵送により調査票を配布、回収している。原則的に建築主などには、自治体と関係団体、建築関係者

には業界団体を通じて、調査票を配布している。

それぞれの立場で興味深い結果となっているが、ここでは一般的な立場として建築ユーザーの調査結果について取り上げる。

調査項目が多くなったため、一般建築ユーザーに対しては2回に分けてアンケートを行っている。なお、2回目調査は1回目の住所を明示した回答者に対して行っている。1回目調査は平成9(1997)年8月、2回目調査は同年の12月に行われた。

回答率は1回目が35.7%、2回目が61.7%でこの種の調査としては高い結果となった。回答者の年齢は40歳代以上がほとんどとなった。

表1 調査票の配布と回収

地域・都市	1次調査			2次調査		
	郵送数	回収数	回収率	郵送数	回収数	回収率
首都圏	1,700	613	36.1	610	372	61
関西圏	700	250	35.7	247	153	61.5
仙台市	300	107	35.7	108	70	64.8
福岡市	300	101	33.7	101	63	62.4
合計	3,000	1,071	35.7	1,066	658	61.7

主な質問事項は以下に示すようになっている。

- ① 安全に関する一般的な認識
- ② 住宅、職場の安全性
- ③ 耐震基準について
- ④ 用語の理解
- ⑤ 耐震性能の目的
- ⑥ 耐震性能の表示
- ⑦ 知識、情報、表示
- ⑧ 用途、規模、地域による要求性能
- ⑨ 耐震性能の表現

なお、結果の解釈はSWGで調整、了承されたものではなく、また質問項目が多岐にわたっているのですべてを取り上げていない点を事前にお断りしておく。

(2) 主な調査結果 調査結果は、かなり専門的な領域に及び、全体的に耐震安全性能について高い関心と理解を示しているが、調査目的(建築物

の耐震安全)を明示している効果も考慮すべきであろう。

以下に主な結果を示す。

1) 日常の安全または危険に関する関心・意識

身の回りの安全について日常的に意識することを複数項目から3項目以内の選択で回答してもらった。

関心が高いのは病気と交通事故であり、地震災害は第3位となっている。これら上位3項目が抜きんでており他の項目とのかなりな差がある。

安全についての関心には地域差が認められる。災害や事故、トラブルの頻度や経験がその背景としてあるように感じられる。

地域別に比較すると興味深い点は阪神・淡路大震災を経験した関西地区、とりわけ神戸市の地震に対する意識が低いことである。このことは被災地で当分地震は来ないだろうとする声とも符合するが一方で関西地域の地震活動が活発化する可能性の指摘もあり意識の風化とすれば気がかりである。

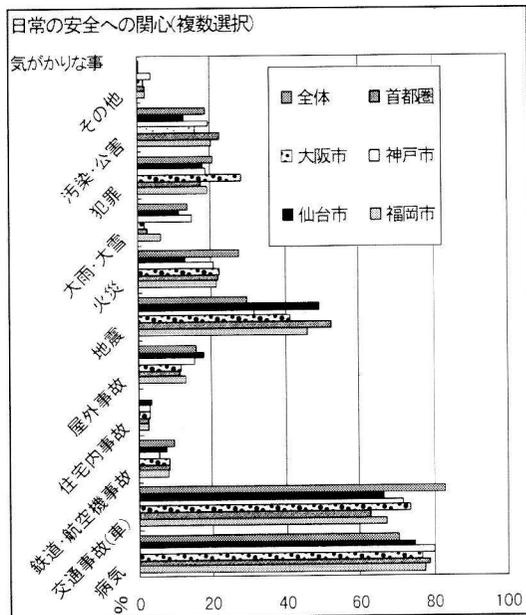


図3 日常で気がかりなこと

2) 地震で気がかりなこと

地震が起こったとき、身の周りの気がかりなことを8項目から3項目以内の選択でたずねた。

建物の倒壊による死傷がもっとも高く、次いで火災・爆発などによる死傷となり、家族の安否確認困難が続く。生死に関わることへの懸念が大きい。阪神・淡路大震災における災害状況が様々なメディアにより伝えられた影響があるように思える。

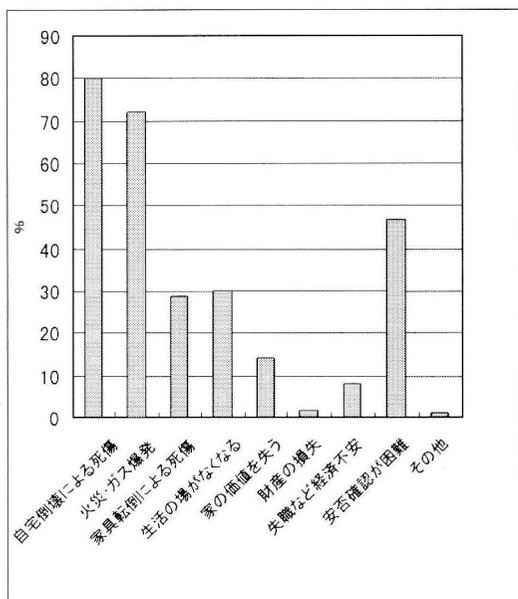


図4 地震時の気がかり

また、大地震（震度6程度以上）と思う状況についてたずねた。1/4強は本が落ち、電柱が揺れる状況以上で大地震としている。不安定なものが倒れる状況で大地震とするものも13.5%あり、地震の揺れと震度や被害の関係は良く理解されているとは言い難い。

3) 住宅の安全の意味

「住宅の安全」が意味することを選択してもらった。（複数回答選択）

安全に対する外乱としては地震が約8割でもっとも高い。次いで約6割が火災を挙げている。

安全の目的は、居住者、利用者と同様に周辺を守ることが重要とする回答がもっとも多くなっ

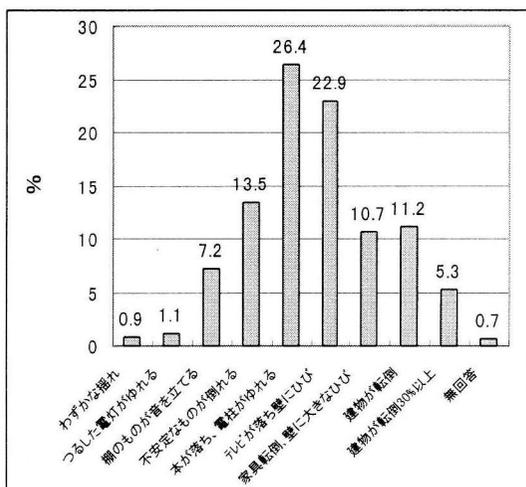


図5 大地震と思う状況

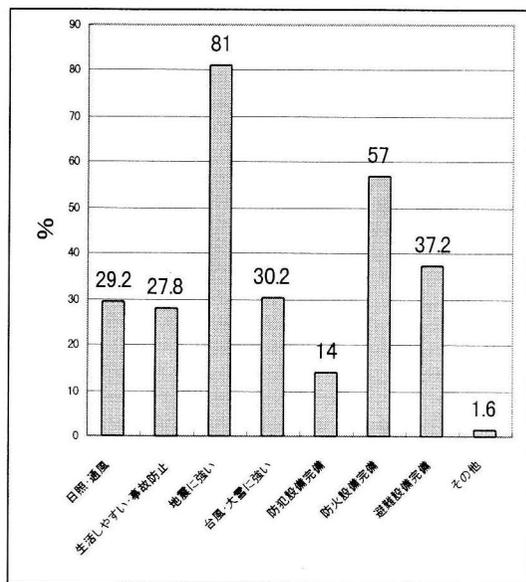


図6 建物の安全の内容（複数回答）

た。

周辺への配慮が高いのは高密度化している都市環境を反映しているようにも思える。

4) 地震による住宅の倒壊被害と責任

地震で住宅が被害を受けた場合、周辺の倒壊被害が1/3程度の場合と1/10程度の場合に分けて被害責任の所在についてたずねた。

周辺で1/3程度が倒壊する被害を受けた場合に

は誰の責任でもなくやむを得ないとする比率が高いが、周りが1/10程度が倒壊するような被害であれば建設業者（設計、施工、販売会社）にあるとする見方が多くなる。

行政の責任については1/3程度の被害の場合には28.9%に対して1/10の被害の場合には12.5%と低くなっている。大規模災害の場合には被害をやむをえないと考えても、災害の規模がそれほどでない場合には、被害は人的な要因があると考えられる傾向が見える。

住宅の安全性能の設定を行政が行うとする比率が約半数となっていることと比較すると被害率の

高い場合にはやむを得ないか規制水準が低いと考える傾向があるとも見える。

5) 住宅の安全性能の設定者

建築物の性能規定設計では当事者の関与する役割が変化すると考えられる。

住宅の安全性能を誰が設定するべきかとたずねた。

約半数が行政であるとし、約1/3が建設、販売業者であるとしている。

住宅に住む個人とする回答は1/5以下となっている。安全性能は専門領域であることが主な理由としてコメントされている。

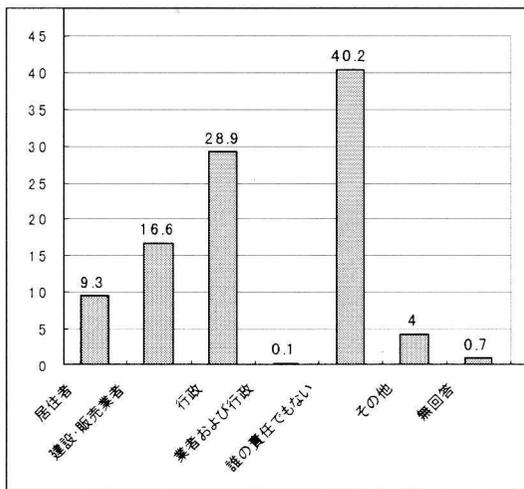


図7 地震被害と責任所在（3軒に1軒倒壊）

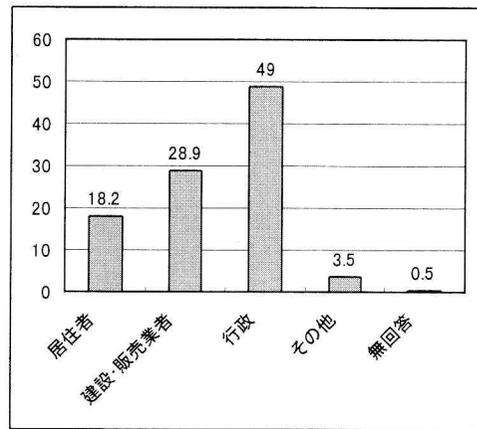


図9 住宅安全性能設定者

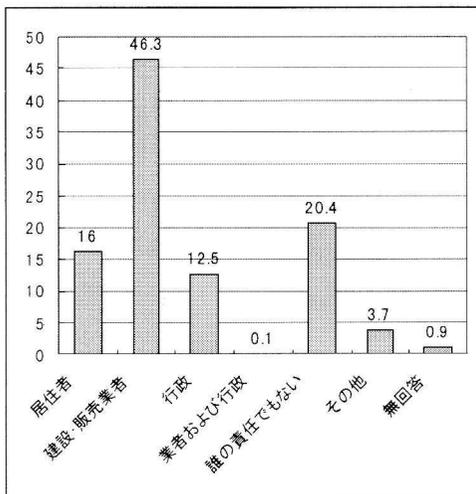


図8 地震被害と責任所在（10軒に1軒倒壊）

6) 安全と自己責任

規制緩和の流れが多く分野で進んでいるが、規制緩和は自己責任原則と不可分と考えられている。

建物の性能規定設計の動きは、規制緩和とも関連づけられている。住宅の安全性能と自己責任原則についてたずねた。

住宅の安全は法的に保護されるべき、安全は自己責任となじまないとする回答はそれぞれ約1/3であった。約1/4は自己責任原則に立つべきとしている。

7) 住宅の地震被害と居住可能性

地震で被害を受けた住宅について、どの程度までなら居住が可能と考えるかをたずねた。8項目

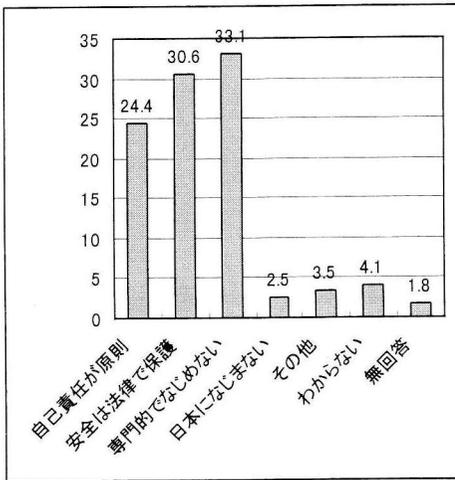


図 10 建築安全と自己責任

からの複数選択を可能とした。

多少のひび割れ (78.8%), 機能設備の一時停止 (69.4%), 窓枠, 壁にわずかな隙間 (60.5%) が多く, 設備の部分的な補修 (44.8%) が続く。これら以外の選択は非常に少なくなっている。

居住可能な被害は, かなり軽微な範囲とされていることが明瞭である。このとおりの対応行動が取られたら大規模な震災では多くの避難者が生じることになる。

被害住宅の迅速な被災度の判定を的確に行い, 居住の可否を速やかに周知する必要がある。

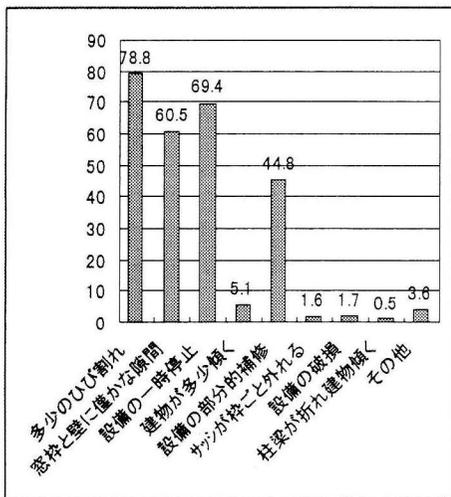


図 11 居住可能な被害の範囲

天気予報などで確率表現が普及しているが地震による建物被害の危険性を確率で表現するとした場合になじめるかを調査した。

実感できないが理解はできるとする回答が 35.7%, 理解できるが 17.5% であわせて半分強が何とかわかるとして見せる。理解できないが 28.6% となった。具体的な説明が必要との指摘があった。

8) 新築住宅の地震安全水準

最近に新築された住宅の地震安全性についてたずねた。低い (31.1%) がやや多く, かなり低い (11.5%) からかなり高い (9.9%), わからない (16.5%) までほぼ同程度に評価が分かれた。“かなり低い”と“低い”をあわせると半数弱が新築住宅でも耐震性は信頼されていないことになる。

一般住宅ユーザーは相当数が地震安全性については十分な信頼を持っていない。

また, 木造や RC など構造種別で異なるとの指摘があった。

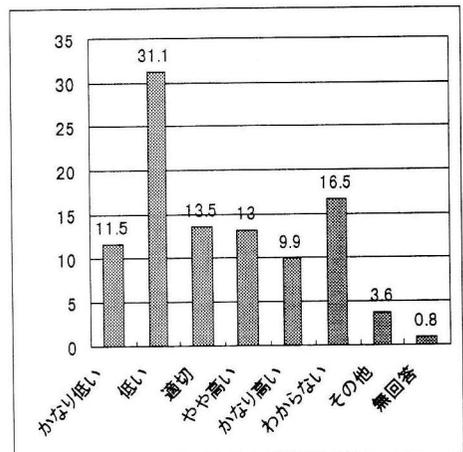


図 12 新築住宅の耐震安全水準

9) 新築住宅取得で優先検討事項

新築住宅を建設または購入する場合に優先的に検討する条件についてたずねた。(複数回答)

安全な構造 (61.0%) が最も高く, 土地の安全性 (58.6%), 住宅の価格 (55.0%), 場所の便利さ (29.7%) が続く。住まいの安全に対する関心が高

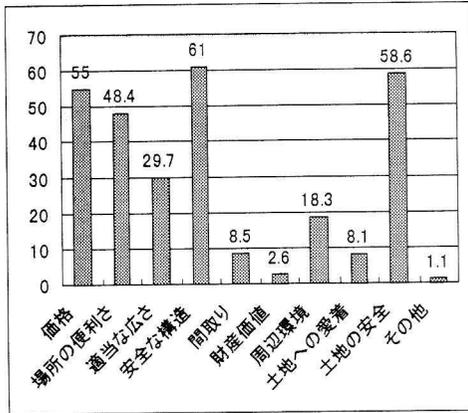


図 13 新築住宅取得の優先条件

い。

新築住宅を建設または購入する場合、安全性能についてどのような注文をつけるかをたずねた。

最低限でよしとするものはわずか(0.4%)であるが、一方無理しても安全性をあげるとするものも1/4に満たない。大多数は一般レベル(42.1%)か予算の枠内の安全性(32.9%)としている。

10) 大地震での自宅本体被害の許容程度

震度6程度以上の大地震の場合、やむをえないと考える被害の程度についてたずねた。

小さな被害(柱、壁などにひび割れ)とする回答が30.4%で最も多く、ついで軽微な被害(外壁に細かいひび割れ、ガラスの破損)程度が22.9%である。

ほとんど無被害としているものが7.7%ある。

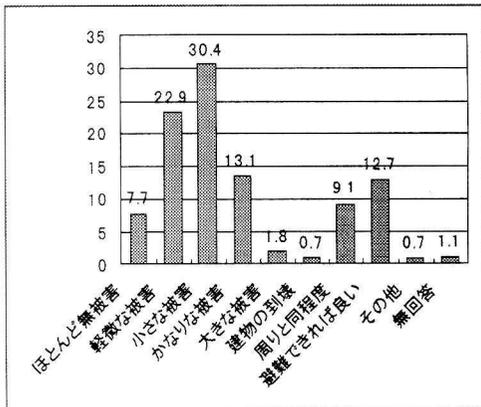


図 14 大地震による自宅建物被害の許容程度

大きな被害を許容する場合は、1.8%、倒壊もやむをえないとする場合が0.7%ある。

避難できれば良いとしている回答が12.7%となっている。

大半の回答者は大地震であっても著しい被害は許容していない。

11) 大地震での自宅室内被害の許容程度

阪神・淡路大震災では建物外観被害が軽微でも室内の家具などの転倒・散乱などの被害が著しく、人的な被害の原因ともなつたとされている。

大地震時の室内の家具などの被害でやむをえないとする程度をたずねた。

多少の損壊はやむをえないが63.2%で、元に戻ればよいが23%、大きな損壊もやむをえないとするが10.3%であった。

大地震の時は、建物本体の被害は軽いことを望んでいるが家具など室内の多少の被害はやむをえないと考えられている。

12) 大地震での職場建物のやむを得ない被害程度

阪神地域では、業務建築物の多くが多様な被害を受けた。しかしながら、休日明けの未明の地震であったため業務との関わりでは余り調査、報道されていない。

震度6程度以上の大地震が起こった場合の職場におけるやむを得ない被害程度をたずねた。

回答者の職場は、約半数(47.8%)が事務所で、

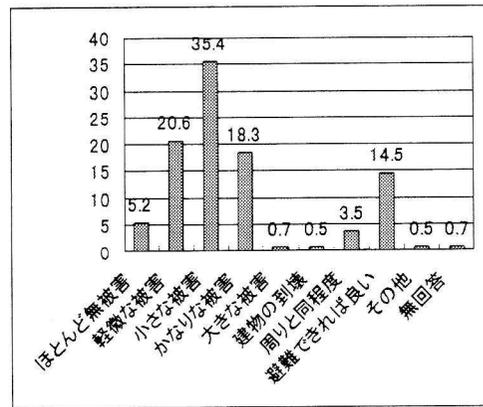


図 15 大地震の職場のやむを得ない被害

1/4強が無回答であった。

職場のやむを得ない被害程度は概ね自宅の被害と同程度：軽微な被害 20.6%，小さな被害 35.4% になっている。

13) 大地震での職場被害の業務影響

大地震による業務への影響を尋ねた。

2～3日後に通常どおりとなるとするが 30.9% で最も多く，1週間程度の休業が 27.0% と続く。

阪神・淡路大震災が，未明で業務の行われてい

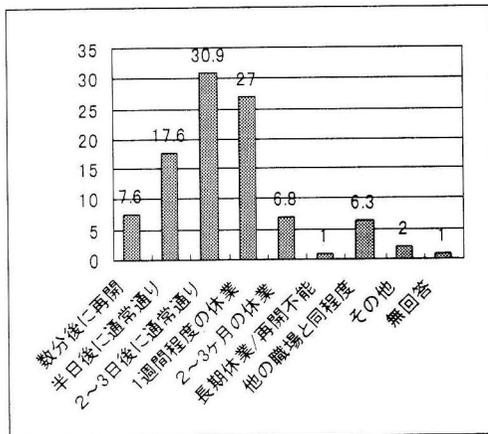


図 16 大地震の職場被害の影響

なかった時間帯であったので職場における被害及び被害の影響がかなり楽観的と思える。

阪神・淡路大震災における職場の被害とその影響があまり報告されていないことも関係しているように思われる。

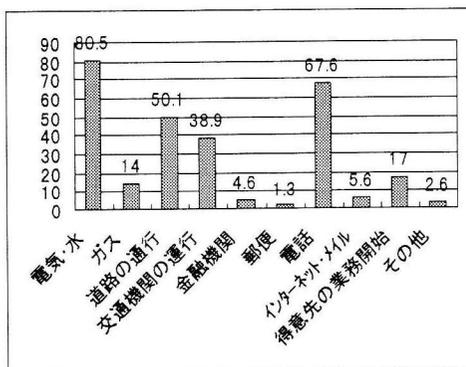


図 17 地震後の業務再開に必要なこと

地震後の業務再開に必要なことについて複数回答でたずねた。電気，水の供給の回復が最も高く 80.5% である。ついで電話が 67.6% で，道路の通行は 50.1% となっている。

阪神・淡路大震災で指摘された項目が高くなっている。

14) 耐震基準，建築基準法

建築基準法や耐震基準の意味を知っているか，またその目標や趣旨を知っているかを尋ねた。

建築基準法の存在は 78.0% が知っており，知らないは 19.8% であった。

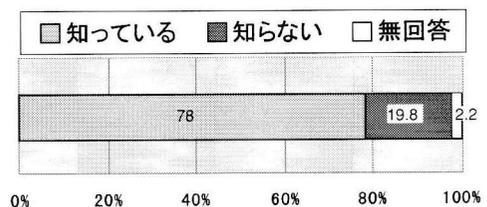


図 18 建築基準法について

建築基準法で定めている基準が最低基準であることは 66.0% が知っており，知らなかったは 31.7% であった。

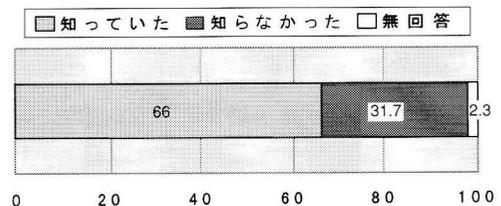


図 19 最低基準を定めていること

基準法の耐震基準目標が A) 頻度のある地震では機能を保持し，B) 希な大地震では崩壊を避け

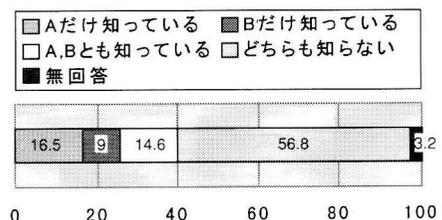


図 20 耐震基準の目標

人命を守ることであることを知っていたかをたずねた。

半数以上（56.8%）はA、Bどちらも知らなくて、両方を知っていたのは14.6%であった。

建築基準法の存在は知られていても、内容についてはあまり知られていないといえる。

15) 建築確認

住宅などを建設する場合の届け出（建築確認申請）を承知しているかをたずねた。

ほとんどが建築確認申請について知っているとの結果となった。知っている回答者へその意味を尋ねたところ大多数（83.4%）は基準にあっていないかを確認すると応えている。しかし、7.1%は事前の通知申請で形式的なことと認識している。

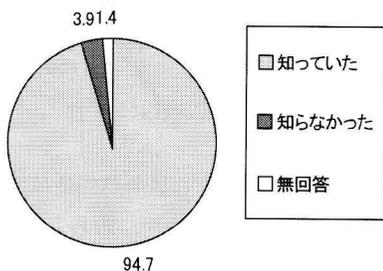


図 21 建築確認について

16) 耐震安全関連用語

耐震安全に関連する用語の例として震度、再現期間、発生確率、加速度、速度、変位を取り上げてなじみの程度をたずねた。

震度についてはほぼなじめる（48.3%）、なじめる（43.6%）であり概ねなじまれている。

地震発生の再現期間については全くなじめない10.0%、あまりなじめない39.2%で、ほぼなじめる36.8%、なじめる10.2%とほぼ2分している。

発生確率は全くなじめない9.0%、あまりなじめない41.8%で、ほぼなじめる36.6%、良くなじめる8.5%となってなじめない側がやや多くなっている。

地震の強さを示す物理量の加速度、速度、変位については全くなじめない34.0%、あまりなじめない44.3%となって震度と逆の結果になった。

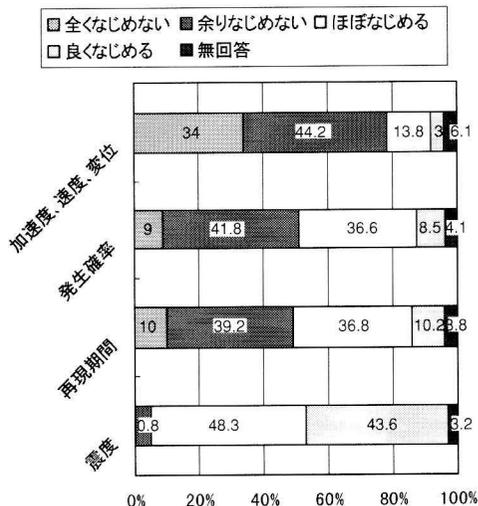


図 22 耐震関連用語のなじみ

17) 被害状況と表現

建物の被害の記述とスケッチを示して被害程度の表現を選んでもらった。

- ① 外壁に細かい亀裂の場合：軽微（33.1%）もしくは小破（44.2%）
- ② 柱、壁にひび割れの場合：小破（35.4%），中破（46.5%）

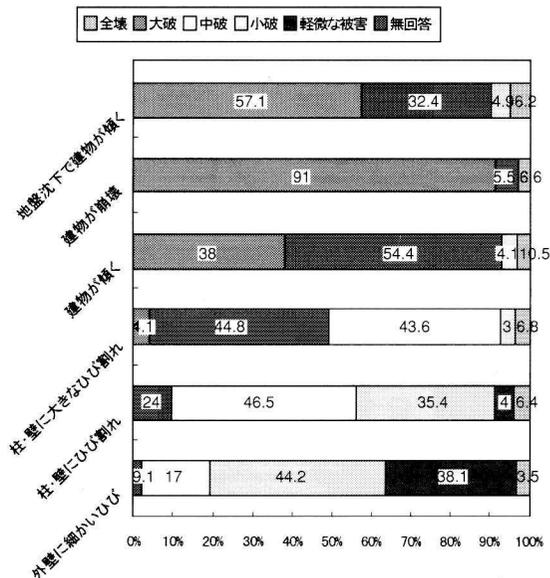


図 23 被害程度の記述

- ③ 柱、壁に大きなひび割れの場合：中破（43.6%）、大破（44.8%）
- ④ 建物が傾く場合：大破（54.4%）、全壊（38.0%）
- ⑤ 建物が倒壊の場合：全壊（91.9%）
- ⑥ 地盤沈下で傾く場合：大破（32.4%）、全壊（57.1%）

倒壊した場合にはほとんどが全壊と判断しているが、全般的に揺れの強さを大きめに見る傾向と概ね共通しており、被害調査における判定かその1段上の被害と見る傾向がある。

質問が被害程度を順次著しくして質問を行っており順番に沿って誘導された回答になっている可能性もある。

地盤沈下による傾斜は建物本体被害に直接関与しないが大破または全壊とする回答になって被害を見た目の激しさで大きめに見る傾向がある。

18) 大地震での新築住宅の性能

大地震が発生した場合、新築住宅における人的な被害でやむを得ないとする程度についてたずねた。

切り傷や打撲程度の軽傷とするが67.3%と多数となっている。無傷で助かるを期待するのも20.7%とかなり多い。ほぼ半数の回答者が新築住宅の耐震性能がそれほど高いと評価していないと

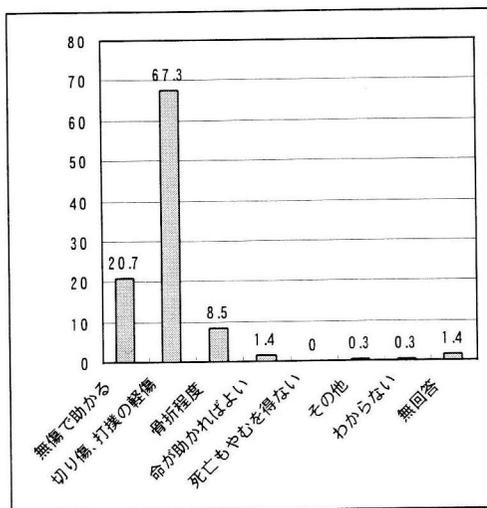


図 24 新築住宅におけるやむを得ない人的被害

した結果と矛盾しているようにも見える。

新築住宅が大地震時も安全と見なせる人的被害の程度をたずねた。安全と見なせる人的被害はやむを得ない場合とほとんど同じ結果になっていて両者の意識の差は認められない。

4. ま と め

建築物の安全性能、特に耐震安全について、建設省の「総プロ」委員会・SWGによる一般ユーザーの意識調査結果の一部を述べた。

やや専門的な質問もかなりあったにもかかわらず全般的に建物の安全性能への関心、理解は概ね高い結果を示している。

日常の安全への関心では地震は病気、交通事故に次ぐ順位にある。安全への関心には地域差が認められ、大震災を経験した大阪・神戸両市では他の地区と比較して明らかに低いことは意外であり意識の風化とすれば気がかりな状況である。

災害規模が大きくなった場合には、建物などの被害の責任は問えないとする比率が高くなり自然災害を天災と見る従来からの傾向が見える。

建築基準法は仕様規定設計から性能規定設計へ変革期にある。関係する当事者の果たす役割も見直されるべきと指摘されているが、建物の安全性能は専門家の領域とする見方が多く積極的に関与する姿勢はあまり無い。

建物の被害は大きめに見る傾向がある。居住可能な場合にも避難や解体に結びつく可能性がある。専門家の適切な情報提供が必要であろう。

職場の被害やその影響はやや楽観的である。阪神・淡路大震災が業務時間帯に発生しなかったために実態が認識されていない可能性がある。

建築物の安全性は生活に密接な事柄であり、的確な情報の提供が必要である。

参 考 資 料

建設省総合技術開発プロジェクト「新構造体系の開発」；要求性能SWG報告書，アンケートによる意識調査，建設省建築研究所・(社)建築研究振興会，平成10年3月

地震・津波碑探訪

力武常次

鎌倉・湘南方面の震災

関東地震の震源に近い鎌倉・湘南地区の震害や津波災害は猛烈をきわめた。毎回引用する「大正大震災大火災」(大日本雄辯會・講談社刊、大正12年10月1日発行、300ページ)によると、この方面の被害はつぎのように描写されている。

「震原地が相模灘中にあつた為めか、三浦半島の外側、相模灘に面した鎌倉逗子、葉山から湘南一帯、並びに伊豆の海岸及び内房州の東京灣口に近い各地は、悲惨の上に悲惨を重ねしめられた。鎌倉は、御用邸を始め、鎌倉八幡宮の樓門その他、建長寺、圓覺寺など、鎌倉時代以來、特別保護建造物指定の高壯優雅な大建物は、殆ど全部倒壊若くは半壊し、名物の大佛は二尺餘ズリ出し、辛じて倒壊を免かれ、松方公邸以下名流貴紳の別荘先づ全部潰れ、恐れ多くも別項掲記の山階宮妃佐紀子女王殿下の御傷はしい御最後を始め、名士の死傷算なく、松方老公また、倒れた家屋の下敷きとなつて微傷を負つた。次で來たつた海嘯では、海濱近く一帯の町々悉く水浸しとなり、近代戀愛館に治まつてゐた文學博士白村厨川辰夫氏夫妻は波にさらはれ、夫人は電線にからまつて助かるを得たが、博士自身は歸らぬ旅に赴いた。倒壊家屋六千三百戸、死者五百。」

また、別章には同じく鎌倉について、つぎのような記事がある。

「東京横濱の別荘地として一位であつた

鎌倉も激震の爲にはあとかたもなくなつてしまつた。此處は歴史上にも深い関係のあるところなので、ゆかりある建築物の倒壊や焼失されたことは誠に惜い至りである。地震が起るや鎌倉中の家屋は殆ど全部潰れ、若しくは半潰れとなつて居るところへ、三四ヶ所から火の手があがり、見るみる内に御用邸前から、由井ヶ濱、八幡前通りの兩側、小町、雪の下全部及び長谷通り一部を全焼してしまつた。あまつさへ震動と引つゞいて大海嘯が起り、江の島電車軌道まで押寄せ、坂の下、長谷、稲世川附近の別荘をあらひ流し、折から海水浴に出かけて居た老若男女三百名は、波にのまれて行方不明となつた。此處では尊きお方をはじめ名士が多く死傷して居る。全滅家屋六、三〇〇。死者五〇〇。折柄避暑に來た姉崎博士その他が、自ら救護隊に加はつて活動したのは興深い。」

湘南地方一帯については

「葉山では御用邸の大部崩壊し、千百戸倒壊、松岡康毅男等壓死し、茅ヶ崎、平塚全滅し、殊に平塚は海軍の火藥廠が爆發して死傷を出した。二の宮で園田孝吉男壓死し、藤澤は倒壊家屋七千、死者三百六十大磯は倒壊家屋千九百、死者二百三十、東海道線は道路は龜裂縦横、鉄道は馬入川鉄橋の陥落を始め當分開通の見込み立たぬ迄の大損害を蒙つた。」

のほか、藤沢や平塚について、つぎのような状況が記されている。

「 藤澤は五分通り倒潰したも比較的半壊がおほい。此處には有名な遊行寺がある。恰度一日は土曜日でもあり、江の島へ行く人が、此處から電車にのりかへるので、かなり人が出て居た。最もひどい場所は東海道筋に當る、町中央部の橋は陥没し、辛くも通行し得る程度で、其附近の惨害は目もあてられない。火災は遊廓を全焼してゐる。全半滅家屋、七、〇〇〇。死者三六〇。 」

「 平塚町は家屋は六分通り倒潰し、殊に新宿八幡大門、不動大門等目貫の場所は殆ど軒並に將棋だをしとなり、十日近くなつてもまだ死體の發掘されぬものも多く、最も多數の死者を出した相模紡績會社も五日夜までに、すでに百三十餘個を發掘し、六日更に五千十個出たと云ふ。海軍火藥廠火藥庫が爆發したが、設備がよいので外部には及ぼさなかつたが、同廠の死傷者は、二百人に達し、高等官々舎は全部倒壊した。附近の村にては、吾妻村二十四名、國府津村二十六名、土澤村十九名、旭村十六名、大野村二十名、須馬村三十名だが、まだ詳細に知ることは出来ない。大磯を合すれば千餘名に達することであらう。 」

このような状況なので、地震モニュメントも各地に数多く残されている。しかし、どこにも一様にあるというわけではなく、茅ヶ崎、藤沢などには多く、鎌倉には少ない。逗子・葉山などには全く存在しないようである。

鎌倉市の地震モニュメント

上記震災記事でわかるように、鎌倉は関東地震で甚大な被害があつたにもかかわらず記念碑の数は意外と少ない。市役所などにうかがつても詳しい情報を得ることができず、唯一モニュメントの存在に関する情報があつたのは、つぎの建長寺のものだけであつた。

● 建長寺（臨濟宗巨福山）の震災追憶供養塔碑
 [鎌倉市山ノ内 8] 「鎌倉の古寺—四季の花と仏像を訪ねて—」(大野雅弘編, 日本交通公社出版事業局, 151 ページ, 1996) によると、当寺は臨濟宗建長寺派大本山で、500 の末寺をもち、日本最初の本格的な禅寺であるとなつていて、建長 5 年(1253)に落慶供養が行われたという。開基は北条時頼、開山には宋の高僧蘭溪道隆が迎えられた。

図 1 の略図に示すように、JR 鎌倉駅より約 1 キロメートル北に位置し、三門、仏殿(図 2)、法堂などが図 1 の挿入図のように広大な敷地に並んでいる。「震災追憶供養塔碑」(図 3) は同じく挿入図に示す位置にあり、高さ 3 メートルほどの大きなものであるが、生い茂った樹木のかげになっていることもあり、観光客もほとんど足をとめることはない。

碑文はかなりの長文であり、古い文体で判読しにくい。特に碑の下部は苔に覆われているので若干推量によって読まざるを得ない部分もあつた。一応読取った碑文はつぎのようになっている。



図 1 建長寺と震災供養塔の位置を示す略図

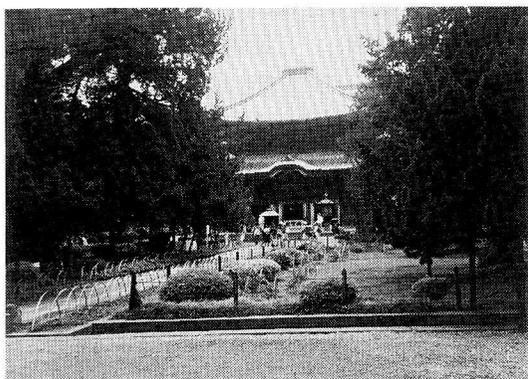


図 2 建長寺仏殿

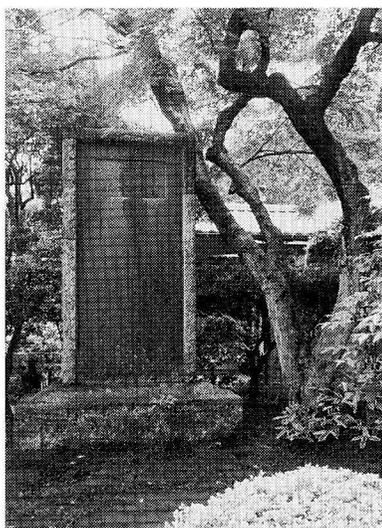


図 3 建長寺の震災追憶供養塔

震災追憶供養塔碑

山階宮武彦王殿下題額

嗟呼大正十二年九月一日人誰カ此日ヲ想起シテ戰慄セザルモノアランヤ午前十一時五十八分大震突如天柱ヲ顛倒シ地軸ヲ壊滅シ山崩レ海沸キ巨萬ノ生靈億兆ノ財寶ヲ瀉盡シ災禍ノ慘ニシテ大ナル到底筆紙ノ能ク盡ス所ニ非ズ上ハ八天潢龍種ノ尊キヨリ下無告ノ窮民ヲ擇バズ骨肉靡亂餘ス所ナク或ハ棟梁障壁ニ壓セラレ或ハ猛火毒煙ニ焚カレ親ハ子ヲ哭シ子ハ親ヲ

喪ヒ夫妻相離レ兄弟相失シ暴力ニ命ヲ殞シタル者無慮十餘萬加之劫火四方ニ起リテ紅燄天ニ連リ旋風八面ニ舞ヒテ黒煙地ヲ包ミ關東ノ都市殆ド焦土ト化シ伏屍縱横殘骸山積滿目ノ慘景眞ニ悽愴酸鼻ヲ極メ地獄ノ變相ヲ眼前ニ展開スルニ異ナラズ斯ノ如キハ有史以來未曾有ノ椿事ニ屬シ人天俱ニ悲傷スル所ナリ夫レ娑婆迷離ノ衆生ニ對シテハ菩薩三時ノ涙尚且ツ暫クモ止マズト況ヤ無數ノ生靈寧ナクシテ現ニ阿鼻叫喚ノ苦難ヲ受ケテ刹那ニ幽冥ニ赴クニ於テオヤ普濟廣度ヲ旨トスル僧伽本分豈此不幸ナル羣靈ヲ救恤セズシ可ナランヤ茲ニ於テカ山僧敢テ自ラ揣ラズ新ニ一浮圖ヲ建立シテ永久ニ罹災殉難諸靈供養ノ壇場ニ擬シ亡靈ヲシテ離苦得樂ノ妙果ヲ獲セシメ又後記者ナキ靈位ノ遺骨ヲ収納シテ追福ニ遺憾ナカラシメ更ニ遺族及現在未來ノ人ヲ此ノ稀有ノ慘事ヲ追憶シ人生無常ノ實際ニ覺醒シ長ヘニ幽魂弔慰ノ淨域ニ努メシメント欲ス即チ委ニ福山ノ淨域ヲトシ如法ノ規模ヲ定メテ密ニ其工ヲ納ムルニ値リ事畏クモ山階宮武彦王殿下ノ今聞ニ達シ特ニ題額下賜ノ恩寵ヲ蒙ル 山門ノ光榮豈何物カ之ニ加ヘン窃ニ惟ミルニ殿下同シ震災ニ妃ノ宮ヲ喪ハセラレ殉難ノ枯骨ニ垂ルルノ令慈特ニ深重ヲ仰キ國民ノ毎ニ景仰感泣スル所ナリ而モ時宛カモ吾財界未曾有ノ悲運ニ際シ經營頗ル困難ヲ極メ辛酸四星霜ヲ閱スト雖モ幸ヒ美術諸大家ノ後援ニ恵マル爰ニ漸ク造塔ノ功ヲ竣スルヲ得タリ是レ偏ヘニ佛天冥護ノ致ス所固ヨリ私力ノ如何トモスル所ニアラズ仰キ冀クハ佛陀無量ノ慈愍長ヘニ加祐ヲ垂レ大法無限ノ功德トナリ近クハ民ヲ啓沃シ德教ヲ裨補シ遠クハ幽冥ニ通シテ津濟窮リナク見聞贊毀均ク此勝緣ニ頼リ圓覺ノ妙果ヲ得ンコトヲ銘ニ曰ク

大地黒漫漫 濤聲叫喚ノ如クナルモ普門

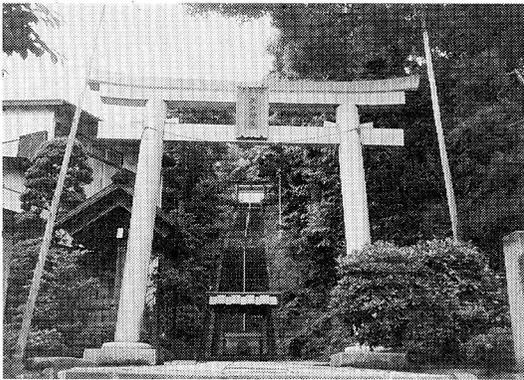


図 5 上諏訪神社の鳥居と石段



図 6 上諏訪神社の本殿



図 7 上諏訪神社の震災記念碑

蓋し未曾有の大震なりと云ふべし 陛下深く御軫念あらせられ内帑の資一千万圓を下し給ひ次で大詔を換發して恵撫慈養の道を示したまふ洵に恐懼に堪へざるなり 當神社も為に拜殿神輿其他工作物倒潰せしに依り痛く尊嚴を瀆し奉るを恐れ直に造り修めなせしも翌年正月拾五日餘震甚しく更に破損の箇所を再修し奉る氏子の被害亦尠からず全潰百八拾戸半潰二百六拾九戸全焼五戸流出拾四戸負傷者五拾二名死者三拾三名を算し辛じて生を得たるもの残壁毀瓦の間に佇みて漸く一掬の玄米に縷命を繋ぐ其悲惨凄愴の極み筆舌の盡す所に非ざるなり謹みて彌よ神明の御加護に依り國家社會の安泰を祈り奉り村長山本益蔵外有志者相謀り罹災死亡者之為に慰靈祭を執行し以て茲に災記を録して後世の傳へととなすと云爾」

とあり、また罹災死亡者 33 名の氏名、氏子総代・町世話人 16 名の名前が刻まれている。さらに

「大正十三年九月一日健之 村社諏訪神社
社掌 相原正雄撰書」

ならびに「石工 秋元大太郎」と記されている。

◇ 石段を登ればかしこ 諏訪神社
本殿横に 震災の碑

● 金砂山観世音の「嗚呼九月一日」碑 [藤沢市遊行通り 692] 時宗総本山として知られる遊行寺(藤沢山無量寿院清浄光寺)から数百メートル、JR 藤沢駅の北方約 1 キロメートルに、交通量の多い道路に面して金砂山観世音(図 8, 9)がある。

本堂に続く石段下には、つぎのような案内板があり、元來は安産子育観世音であるが、その境内に関東大震災の震災記念碑がある。

「緒言
夫れ靈驗顯著なる金砂山子育安産帯解観世音菩薩は今を去る三百有餘年前即ち寛永年間に金井清西なる者不思議の靈夢を

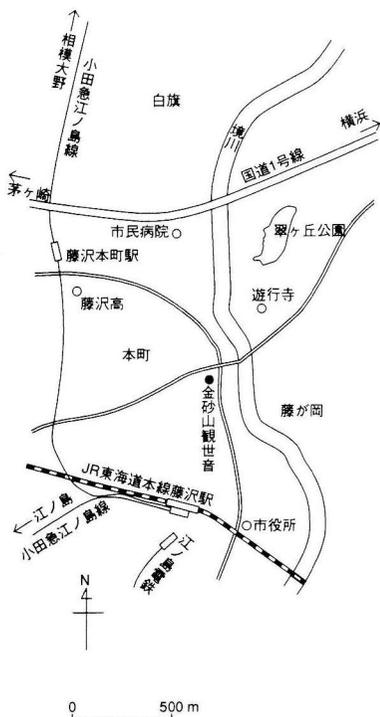


図 8 藤沢市金砂山観世音位置図

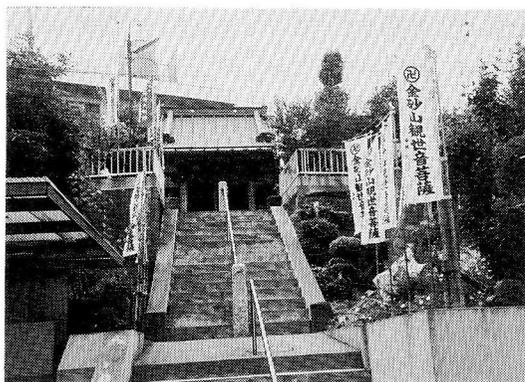


図 9 金砂山観世音

感じて一字を建立す参詣者常に群を成し善男善女の利益感應を蒙ること多し其後天保年間に梶某なる者再築して一層美観を添へ慈徳倍々輝けり然るに星移り物換り明治の初年に堂宇廢絶し眞浄院に移轉し一堂を新築せんと欲して木材を集めしに不幸十三年の大火の災禍に罹り一燼の冷灰と化す又其後毛利觀道和尚十方の浄

財に依り一堂宇を新築せられしも維持の基礎鞏固ならざりし為め廢滅に皈したるは痛恨に堪えず不肖常に復興の願意念頭を去らざること年あり然るに大悲救世の機縁熟せしにや今回有志と相計り往昔安置の砂山に圖の如き堂宇を建立し観音妙智力の慈徳を仰ぎ又當地の舊蹟を復興し繁栄の一助にせんと欲すれども十方信者の信仰力に依らずんば竣工を期し難し故に信徒諸氏は此の擧を賛して浄財を寄附し起立塔像の功德を蒙り福聚海無量現受無比樂の美果を得られんことを希ふ

大正五年七月一日

金砂山観世音世話人

眞浄院住

原悦道

本堂わきには「金砂山安産子育観世音」碑（高さ 241 センチメートル）と並んで図 10 のような高さ 387 センチメートルの「嗚呼九月一日」碑が建てられている。正面にはこの碑銘の左下に「藤澤山遊行尊光書」と刻んであり、背面の碑文より昭和 4 年（1929）の建立であることがわかる。

塔身背面には

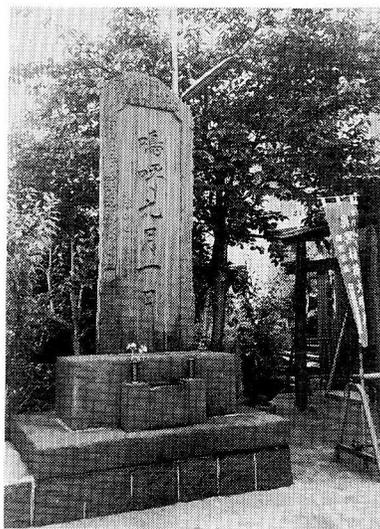


図 10 金砂山観世音の「嗚呼九月一日」碑

「大正拾貳年九月壹日関東之地大震震源称在于丹那山震幅方数十里斫地倒家滅財損人其被害甚大噓之無物就中禍殃之大爲帝都及金港不啻焦土火其地域以掃滅巨億之物貨殉難之生靈至算十數萬慘鼻之状豈忍說乎哉我藤澤之地亦在其圈中於震動最尤巍然藤澤山諸堂宇殆倒壞市街家屋亦大半没其姿一望凄然如臨荒墟特殞生命者壹百餘名爲天地暗澹鬼哭啾々日光有如無囿想當時則肌膚生粟戰慄不能語嗚呼逝者難追天譴易遺震災以來早既閱七星霜何人對殉難者無一片弔慰之念於是乎藤澤町民有志胥謀設一大法筵併建之供養碑以欲教後昆長追憶當時有所自警其舉洵美也矣予聞之贊称不指乃不吝筆勞茲錄其梗概以使其志云爾銘曰

一大地異 揺坤軸來 物貨咸喪 世夢始開
獨憐老幼 無辜殉災 及壯贊嘖 薦登靈臺

昭和四年 九月壹日

藤澤山主大僧正 他阿尊光」

と記されている。

上記引用文は「『藤沢市文化財総合調査報告書』第8集南部地区（補遺1）」（藤沢市教育委員会，1983）によるが，現地では碑文を判読して誤りを訂正した箇所もある。

また，塔身背面には100名を超える歿死者名，基礎には発起人の氏名が刻んである（紙面の都合で省略）。

◇ 由緒ある 歴史を秘めて 観世音
庶民の守る 供養塔建つ

上記藤沢市のモニュメント調査の資料については，同市教育委員会事務担当・生涯学習課・文化財担当木下氏および同市文書館^{いちほろ}櫛原氏のお世話になった。両氏に厚く謝意を表す。なお今回（1998年5月）の調査終了後，同市所在のモニュメントについて更に情報の提供があったが，これらについてはあらためて調査の上記事にしたい。

茅ヶ崎市の地震モニュメント

茅ヶ崎市におけるモニュメント調査では，同市教育委員会の御協力によって，貴重な資料を得ることができた。教育長渡邊二郎氏および市長室文化推進課，東氏に感謝する。なお，提供して頂いた塩原富男著「茅ヶ崎の記念碑」（資料館叢書10，1991年3月）は非常に役に立った。

● 熊野神社の大震災碑 [茅ヶ崎市小和田2-3]
国道1号線の小和田バス停の傍に，「熊野神社」の標識があり，そこから北に150メートルくらい入ったところに熊野神社がある（図11）。同社の入口（図12）のすぐ奥に「大震災碑」（図13）がある。この神社の祭神は熊野久須毘命で，小和田地区の鎮守である。

残念なことには，当碑は繁茂した樹木の蔭になっていて，正面からの写真撮影はきわめて困難であった。したがって，総高3メートルに及ぶ碑面にびっしりと刻まれている碑文の判読も困難であったが，幸い資料「茅ヶ崎の記念碑」に詳しく記録してあるので，ここでは全面的に同資料に依存することにする。なお，碑正面の碑文のみを示す。碑の背面には324の寄附者個人・団体名が刻んであるが，ここでは省略する。

「大震災碑/元代議士 勲四等 山宮藤吉篆額/
神奈川県町村長会長 新田信 撰文
大正十二年秋九月朔日午前十一時五十八分倏忽トシテ関東ノ野ヲ襲ヒタル大地震ハ無数ノ屋舎ヲ倒シ多大ノ人命ヲ毀傷シタルノミナラズ之ニ次グ/ニ劫火ヲ以テシ猛火ノ凶焰天ヲ焦シ燎原ノ火勢ハ二日二夜ニシテ殆ンド帝都ヲ廢墟トナシ帝国ノ関門タル横浜ヲ挙ゲテ灰燼ト化シ其ノ災害ノ及ブ所/東京神奈川千葉埼玉静岡山梨茨木等一府六県ノ広キニ亘リ許多ノ財宝ト生靈トハ須臾ニシテ烏有ニ帰セリ加之此間交通機関杜絶シタルガ為メ流言/蜚語盛ンニ伝ハリ人心恟々トシテ倍々其惨害

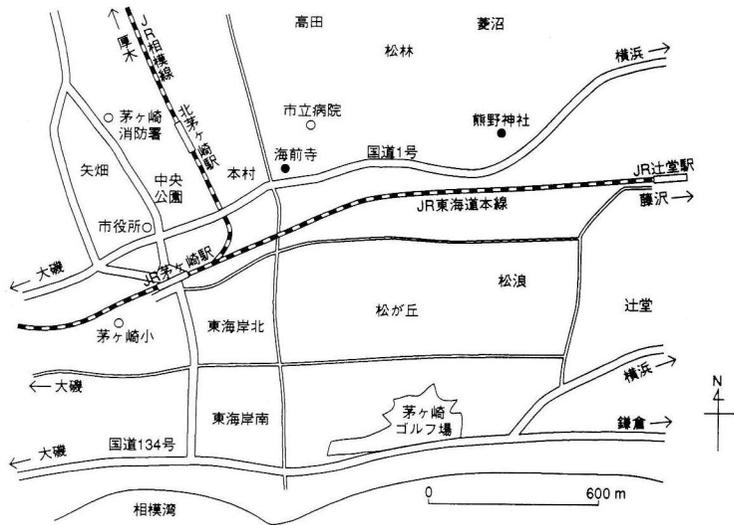


図 11 茅ヶ崎市熊野神社および海前寺位置図



図 12 熊野神社の入口

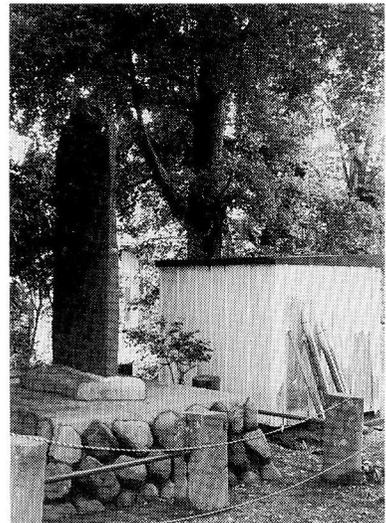


図 13 熊野神社の大震災碑

ヲ大ナラシム殊ニ湘南ノ地ハ震源地帯ナリシヲ以テ悽愴ノ状最モ甚シク全地域ニ巨ル焼失並ニ倒潰家屋/六十九万四千余戸ノ内本県内ノ被害実ニ二十三万七千余戸本町三千三百八十四戸本区熊野神社外三百戸内全潰百二十五戸半潰百七十五戸ニシテ其/惨憺タル筆舌ノ能ク尽スベキニアラズ又死傷者ノ総数十五万七千余人ノ内本県ニ於ケル死傷者五万七千余人本町二百七十三人本区十四人内死者七人傷/者七人ニシテ酸鼻ノ極人ヲシテ面ヲ背ケシムルノミ是蓋有史以来ノ大禍難ニシテ国運ノ伸暢ハ為ニ一頓挫ヲ来シタルノ觀アリ然

レドモ災民ハ当/時全国ヲ始メ遠ク欧米各国ヨリ寄せラレタル同情裡ニアリテ復興ノ志燃ユルガ如ク翌十三年一月十五日ニ於ケル再度ノ強震ニモ屈スル処ナク奮励努/力遂ニ帝都ヲ始メトシ震災前ニ数倍スル美観ト設備トヲ施シテ復興ノ計漸ク就ル固ヨリ不測ノ天変地妖ハ人力ノ如何トモスベキ所ニ非ズト雖モ災禍ノ範囲ヲ縮狭

シ救済ノ道ヲシテ遺算ナカラシムルハ人
事ノ敢テ能クスル所ナリ茲/ニ本区復興ノ
計全ク就ルニ際シ即チ鑑戒ヲ末代ニ胎シ
遺範ヲ後昆ニ垂レテ来者ノ指針ニ供セ
ン為メ区民相図リテ碑ヲ建ツ云爾

昭和五年（一九三〇）八月一日/

小室政吉書/辻堂 高野宏哉刻

この碑文は震災の状況をきわめて詳しく記して
いて、特に関東地震翌年1月15日の余震（M=
7.3）にもふれている。これは前出藤沢市上諏訪神
社や厚木市相川中学校（地震ジャーナル、24、88
ページ）および伊勢原市大田小学校（地震ジャー
ナル、24、94ページ）などにあるモニュメントにも
記されている通り、余震といえども震動が猛烈
だったことを物語っている。

◇ 大震の 惨状つぶさ 震災碑
熊野神社の 境内に建つ

●海前寺（曹洞宗東松山）の震災追善碑 [茅ヶ崎
市本村4-21] 熊野神社の位置を示す図11に海
前寺の位置も記されている。国道1号線より約
100メートル北に入ると、図14のような海前寺が
あり、山門を入れて左側の扉に沿って、図15に示
す高さ114センチメートルの小ぢんまりした震災
追善碑が建っている。

碑の保存状態は良好で、碑文をはっきりと読取
ることができ、つぎのようになっている。



図14 海前寺山門

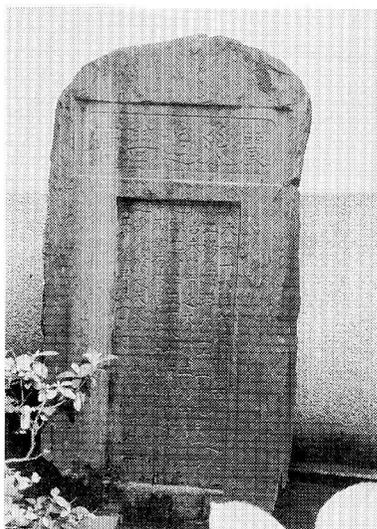


図15 海前寺の震災追善碑

震災追善碑（篆額）
天木栄一郎者岐阜県古川町之人也/当工
場在勤中大正十二年九月一日際/振古未
曾有之大震災工場全壊罹殃死/之難也当
時三百八十余名之在勤者/中不幸而独為
犠牲富春秋以前途有望/之身斃於是天災
可惜哉行年廿有三/大正十四年三月廿一
日/純水館茅ヶ崎製糸所建之

関東大震災時に、製糸工場純水館で380人あま
りの従業員中、ただ1人犠牲となった天木栄一郎
氏を哀悼した供養碑で、大正14年同工場によっ
て建てられたことが碑文からわかる。ただ1人
のためにこのような碑がつくられたことは異例とも
いえよう。なお、同工場は1937年に閉鎖された
ことである。

◇ 工場を あげて祀るは 震災に
一人横死の 犠牲者の霊

●金刀比羅神社の震災記念碑 [茅ヶ崎市南湖3-4]
図16の茅ヶ崎市南西部略図に示すように、国
道1号線南湖入口を南に入り、JR線踏切を越え
て200メートルほど先の左側に金刀比羅神社（図
17）がある。小規模な境内の社殿に向って左側に、



図 16 茅ヶ崎市金刀比羅神社，神明神社，善福寺，松尾神社および三島神社位置図



図 17 茅ヶ崎市金刀比羅神社



図 18 金刀比羅神社の震災記念碑

図 18 のような「震災記念碑」と朱色に彫り込んである高さ 115 センチの柱状モニュメントがある。正面は上記碑銘だけのさっぱりしたもので、背面に

「大正十三年九月廿日

大正拾参年（一九二四）建之上町部落」

とあるだけで（略字化），真に簡素な碑である。しかしそれだけにかえて震災の惨状を訴えているともいえよう。

◇ 詳しくは 語ることなし 震災碑
万感こめて 金刀比羅の庭

●善福寺（高野山眞言宗，柳島山宝亀院）の柳島山善福寺復興記念碑 [茅ヶ崎市柳島 1-3-28]

前出金刀比羅神社の西方約 1 キロメートルあたりに（図 16），図 19 のような善福寺があり，境内に高さ 155 センチメートルの図 20 に示す「柳島山善福寺復興記念碑」が建っている。正面の碑文には

「柳島山善福寺復興記念（篆額）
大正十二年九月一日 関東の地大に震/



図 19 茅ヶ崎市善福寺

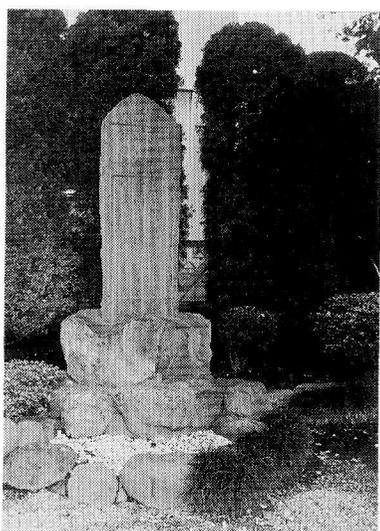


図 20 善福寺の「柳島山善福寺復興記念」碑

ひ当地方最も劇甚を極む 柳島の地民/
家全部殆と倒壊し死傷数名当山本堂/庫
裏亦其数に洩れず 災後壇信徒相議/
して其復興を企図し 昭和六年八月三/日
落成供養法会を執行しその梗概を石/
に 勒して以て不朽に伝ふと云爾

昭和七年三月 山宮藤吉書 』

とあり、背面には世話人、建築委員の名前のほか「柳島山善福寺住職井上寿山代」と刻んである。上記は資料「茅ヶ崎の記念碑」に略字化して収録されている。同資料によれば、茅ヶ崎市には神社の再建復興を機に建てられた碑が多いが、寺院関連

のものは珍しいという。

◇ 善福寺 歳月^{けみ}関し 復興す
地震にめげず 信徒結束

● 神明神社の大震災記念碑 [茅ヶ崎市松尾3-22]
前出金刀比羅神社と善福寺の間あたり、JR東海道本線脇に神明神社(図16, 21)があり、その境内に道祖神、庚申塔、厄神碑と並んで図22のような「大震災記念碑」(高さ107センチメートル)がある。関東大震災で倒壊した神社の再建記念碑であるが、写真から分かるように苔むして碑文は甚だ読みにくい。幸い資料「茅ヶ崎の記



図 21 茅ヶ崎市神明神社

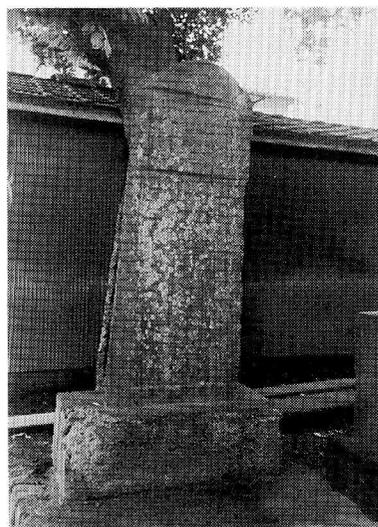


図 22 神明神社の大震災記念碑

念碑」に碑文が記載されているのもっぱら同資料によって、以下の文章とするが、実際の碑文と対比して誤字を訂正補足してある。

正面碑文は

「
大震災記念碑（篆額）
大正十二年九月一日関東の地ヲ襲イタル
大地震ハ/曠古無比ノ惨事ニシテ就中当
部落ハ被害激甚ヲ極/メ一時ハ阿鼻叫喚
ノ巷ト化シ鬼哭愁々将ニ世ノ終/焉ヲ告
グルノ思ヒアリシモ幸ニ神明ノ加護ト挙
郷/一致ノ努力トニ因リ克ク災後ノ復興
ニ善処シ今ヤ/社殿ノ再築ヲ竣リ特ニ青
年ハ参道敷石ヲ奉献シテ民心崇敬ノ中軸
ヲ確立セリ仍テ茲ニ碑ヲ建設シ永/ヘニ
追憶反省ノ規準タラシム云爾
」

となっていて、松尾地区の地震動が激烈であることが示されている。

碑背面には、「大正十五年四月八日建之」とあり、1926年の建立であることが分かる。そのほか、区長、宮総代、建設委員、青年幹事などの氏名が刻んである。

◇ ^{みやしろ}御社の 再建語る 震災碑
苔むす碑石 ^{としつき}刻む歳月

● 松尾神社の震災記念碑 [茅ヶ崎市今宿^{いまじゆく}588]

松尾神社の位置は図16に示してある。新湘南バイパスと国道1号線の交叉する今宿より、北へ約200メートル入ったところにある神社で、鳥居には図23のように「松尾大神」とある。境内には図24に示す高さ152センチメートルの震災記念碑があり、下記のように関東地震時の今宿地区の強震動や地盤液状化が描写されるとともに、村社松尾神社再興の経過が述べてある。

碑正面の碑文は

「
震災記念碑（篆額）
大正十二年九月一日関東ニ大震アリ山
嶽崩/レ田野裂ケ河海溢レ堤塘潰エ家屋
倒レ火災/起リ人畜ノ死傷極メテ多ク実
ニ曠古ノ惨事/タリ相横川沿岸我カ今宿

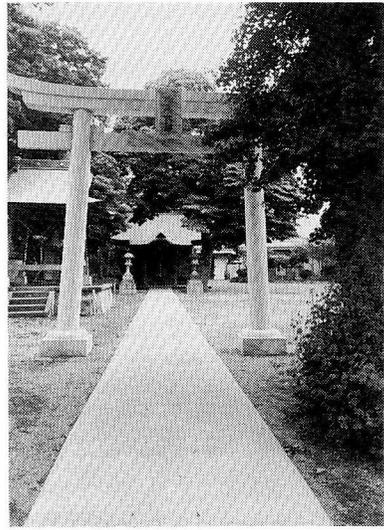


図 23 茅ヶ崎市松尾神社

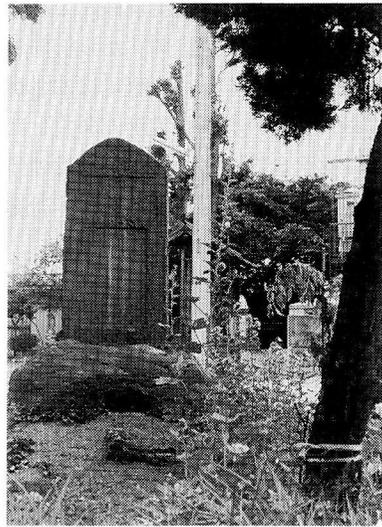


図 24 松尾神社の震災記念碑

ノ如キハ震源ノ/地ニ近キヲ以テ震度甚
ダ激シク地表決裂シ/至ル所ニ水ヲ噴キ
家屋殆ト倒壊シテ里民一/時居住ニ窮シ
飢餓ニ迫リ惨憺ノ状得ニ言フ/ベカラズ
爾来全里協同カヲ復興ニ尽スコト/四年
漸ク其ノ緒ニ就キ村社松尾神社ノ再築/
亦タ已に竣リ里民敬神ノ誠ヲ發揮スルヲ
得/タリ因リテ碑ヲ建テ文ヲ刻シ以テ後
人ニ伝フルコト此ノ如シ

となっている。この引用文は資料「茅ヶ崎の記念碑」によっているので略字化されているが、碑文は本字を用いてある。なお、実際の碑文と対比の上、脱字・誤字を訂正してある。

碑の背面には「氏子人名」が刻んである。

◇ 相模川 ^{きしべ} 岸辺一帯 液状化
松尾神社の 碑文伝える

●三島神社の社殿改築之碑 [茅ヶ崎市萩園 1719]

図 16 の地図に示すように、松尾神社から約 1 キロメートル北上すると、萩園中学校わきに三島神社があり、「神奈川県指定村社三島大神」(図 25) の標柱が建っている。境内には「三島社殿改築之碑」(図 26、高さ 182 センチメートル) の碑があり、碑正面には下記の碑文が刻んである。下記の文は資料「茅ヶ崎の記念碑」から引用しているので略字化されているが、実際には本字が用いてある。なお、資料の文章を実際の碑文と対比して誤字・脱字などは訂正してある。篆額の「三島社殿」が「三島社殿」となっているが、普通はみかけない字である。

「 三島社殿改築之碑 (篆額)



図 25 茅ヶ崎市三島神社の標石

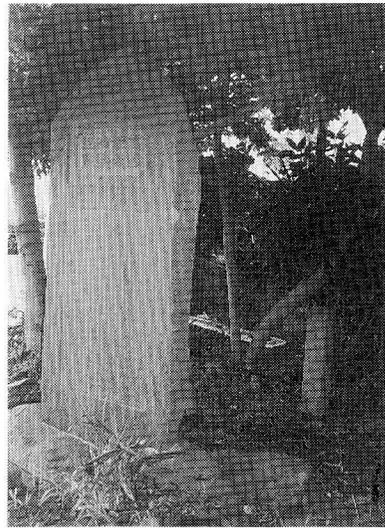


図 26 三島神社の社殿改築之碑

大正十二年九月一日関東之地大震其惨禍及一/府四県矣就中相模川沿岸最劇烈如我萩園里居/家百四十而其過半全壊死者二傷者尔十余加之/地皮亀裂而道路橋梁溝沍堤塘莫不悉壞崩被害/之甚大蓋前古未曾有也如村社三島社亦不能/免斯災厄其華表倒其社殿覆悽慘之状不可名状/聖上軫念爰賜資金賑恤焉各地有志尔倣焉災後/不日而向復興之運者不有不由 聖恩之渥与同/情之深而里民深歎社殿壞頽困厄之際夙立再建/之議競献其資拮据經營遂至復其旧觀矣敬神之/篤可以欽也乃記事由勒貞珉以誌後世云爾

大正十四年三月

衆議院議員 勲四等 山宮藤吉誌

碑の背面には社掌、氏子総代、世話人などの氏名が彫ってある。この碑文を読むと、関東地震の相模川沿岸の激震状況がよく分かり、前出の松尾地区と同様に萩園地区でも地割れや水噴出がひどかったようである。

なお、この碑は明治以降西南の役から太平洋戦争に至るまでの戦没者名を刻んだ立派な「慰霊の碑」と並んで建っている。

◇ 震災の 惨禍を偲び 森かげに
三島神社の 改築の碑

また、前出資料にはないが、道路に面して「橋石」と彫った図 27 のような 4 個の石が保存されていて、つぎのような説明板が建っている。

「 橋 石

この巨石は、小出川に架かっていたもので、番場川の橋といって村人に親しまれていた。

大正十二年九月一日・関東大震災にあり、堤防と共に、ことごとく崩壊した。間もなく河川改修が行われ、現在の萩園橋として装いを新たにした。

江戸時代中期に建造されたものと推定されるが、川巾四間・橋巾一間にこの巨石を使用した。当時としては、相当な大工事であって、村人には大きな負担が課せられたであろう。それ故に、此处が如何に重要な街道であったかが想起される。

小さい方の石は、側面に「元禄十四年三月」の記念銘があり、貴重な橋に使用されたものと推定されるので、村の中央を貫いている八王子街道の石橋の十字路にあったものと思われる。

何れも萩園の歴史を物語る重要なもので、後世に残すべくここに保存する。

昭和五十六年七月十五日

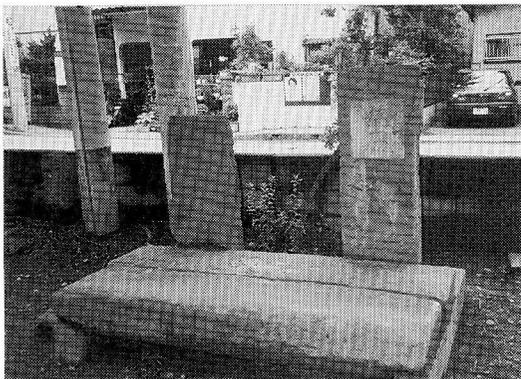


図 27 三島神社の「橋石」遺跡

萩園郷土会有志
萩園自治会
茅ヶ崎郷土会

この説明によると、これらの石は関東地震で崩壊した小出川(図 16)にかかっていた橋のものであり、江戸中期の工作物と考えられる。小さい方の石の側面には、「元禄十四年三月」と刻んであるので、およその歴史が分かる。

◇ 震災に 崩れ残れる 橋石に
元禄偲ぶ 萩園の里

● 宝蔵寺(曹洞宗金峰山)の震災記念聯芳碑
[茅ヶ崎市行谷318] 図 28 の茅ヶ崎市北部地図に示す宝蔵寺および正覚院に地震モニュメントがある。宝蔵寺は行谷地区文教大学わきのあまり人家のない場所にある(図 29)。資料「茅ヶ崎の記念碑」によると、天正 8 年(1580)創建と伝えられ、釈迦如来を本尊とする。

碑正面には篆額「震災記念聯芳碑」(図 30)の下に大きく「当時開山伝宝宗磨大和尚禪師」とあり、以下 2~23 代の歴代住職の名を刻み、供養塔としている。開山 300 年記念の建立でもある。

碑背面上段には

「 大正十二年九月一日突如而/大地震動山川
草木悉崩/壞民衆呼喚尋親呼子者現/出焦
熱地獄都市不火滅三/昼夜起流言人心惱々
震城/及一府四県家屋全壞倒/壞無数歿死
者実称十数/万当山伽藍大破折柱/落壁絶
言語檀信協力而/従事復興五星霜茲竣成/
以相当開山三百年建設聯芳/塔境内長為震
災記念者也矣

昭和二年十月一日

とあり、関東大震災時の状況と 5 年後の寺院復興の様子が述べてある。なお、下段には建設委員、信徒、檀徒、石工の名が刻んであり、高さ 160 センチメートルの碑である。

◇ あじさいの 花咲き乱れ 宝蔵寺
震災語る モニュメント建つ

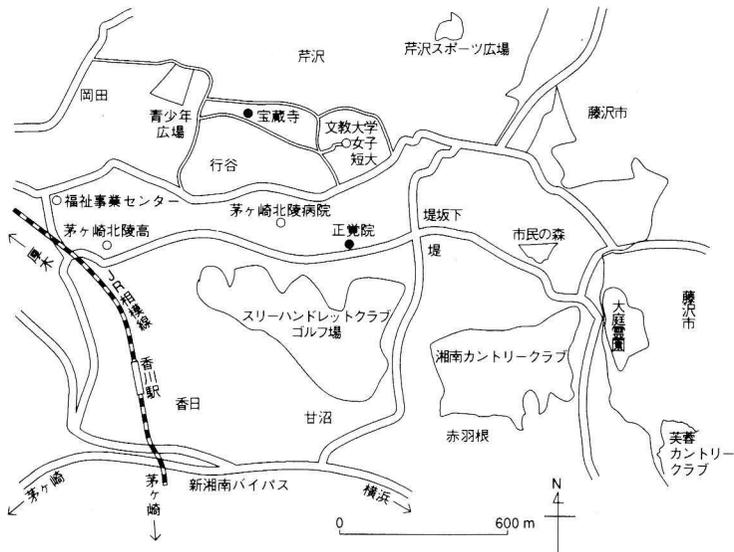


図 28 茅ヶ崎市宝蔵寺および正覚院位置図

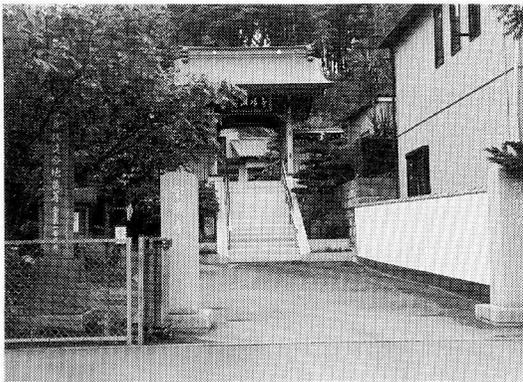


図 29 茅ヶ崎市宝蔵寺の山門

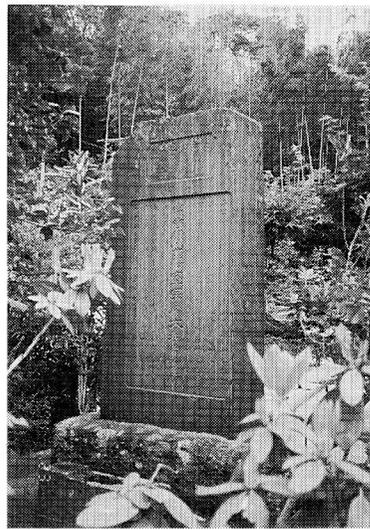


図 30 宝蔵寺の震災記念聯芳塔

● 正覚院（曹洞宗堤源山）の「嗚呼九月一日」碑
 [茅ヶ崎市堤 3681] 図 28 に示すように、文教
 大学南方約 1 キロメートルの堤地区に正覚院（図
 31）がある。資料によると、江戸初期（1665）の
 開山とされる。

地蔵尊と並んで、図 32 の「嗚呼九月一日」碑が
 建っている。碑正面の左下に「○月書」とあるが、
 風化が進んでいて読みとれない。
 背面には

「 大正十二年大震災
 歿死者十三回記念 」

とあり、ついで「岡本つる、……」など数名の横

死者名、建立者名、建立月日などが彫ってあるが、
 判読がむずかしい。高さ 198 センチメートルであ
 る。

◇ 震災の 犠牲者^{あわ}哀れ 正覚院
 万感迫る 「嗚呼九月一日」

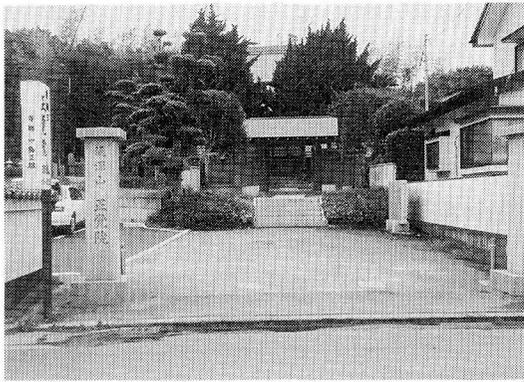


図 31 茅ヶ崎市正覚院山門



図 32 正覚院の「嗚呼九月一日」碑



図 33 平塚市八幡神社の位置図

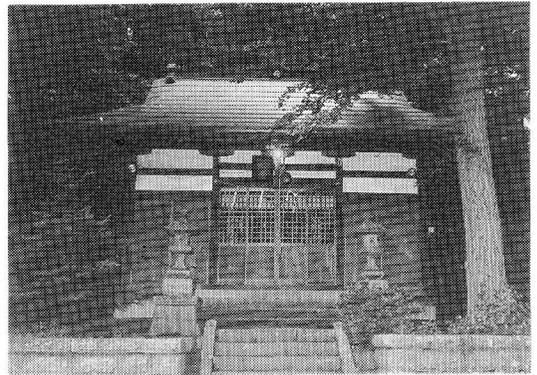


図 34 平塚市広川の八幡神社社殿

平塚市の地震モニュメント

平塚市の地震モニュメントについて同市企画室市史編纂室に照会しても十分な資料が得られなかったが、その後防災課島津氏を通して博物館学芸員土井氏の示唆により、以下に述べるモニュメントを調査することができた。

● **八幡神社の復旧鳥居** [平塚市広川] 図 33 に示す平塚市西北部広川地区の八幡神社 (図 34, 無人) にある鳥居 (図 35) は関東地震で倒壊し、後に氏子によって再建された。花崗岩の鳥居の笠木や柱には折れたあとが残っている。柱に彫られた

文は風化のため完全には読取ることができなかったが、判読できた部分をつなげるならば、大正七年四月建設された鳥居が大正十二年九月の関東地震によって崩壊したが、大正十四年氏子中によって再建されたとなっている。同神社はあまり人かげのない地区に位置している。

◇ 震災に 崩れし鳥居 いたましや
風化進みし みかげ 御影の柱

● **大鷲神社の震災遭難者之霊碑** [平塚市平塚 2 丁目] 図 36 の位置図に示すように、大鳥公園大

鷲神社(図37)には、碑正面(図38)に「震災遭難者之霊」と彫った高さ2メートルくらいの碑がある。

背面には

「 爲大正十二年九月一日遭難者追善供養建之
昭和四年九月一日平塚貸座敷組會員一同 」

とある。碑の傍にある観光協会の説明板には

「 震災遭難者供養碑
大正十二年九月一日の正午頃、突如として起ったM7.9の大地震は、平塚町とその周辺に大きな被害を与え、家屋は全

壊または半壊したものが多かった。当時の平塚町は戸数三千三百八十四戸、人口一万八千五百十八人で、死者は二百七十五人を数えた。この内焼死は一人で他は圧死であった。負傷者二百三十二人。馬入鉄橋は川中に落ち、国道の馬入橋も全壊し、道路は各所で亀裂を生じあるいは陥没して寸断された。病院は負傷者を収容しきれず、火葬場では死体の処理が間

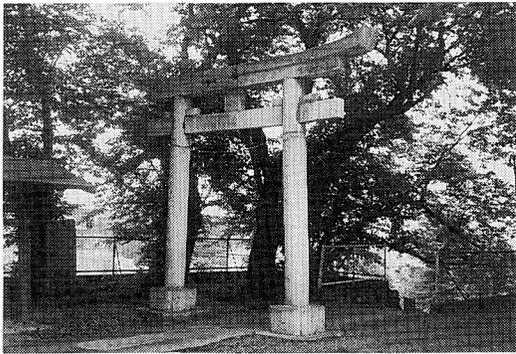


図 35 八幡神社の復旧された鳥居



図 37 大鷲神社社殿

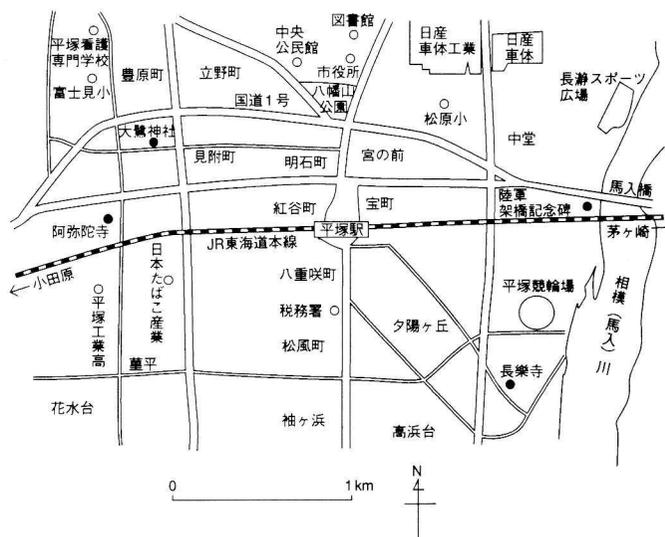


図 36 平塚市の大鷲神社、長樂寺、馬入川の陸軍架橋記念碑および阿弥陀寺の位置図

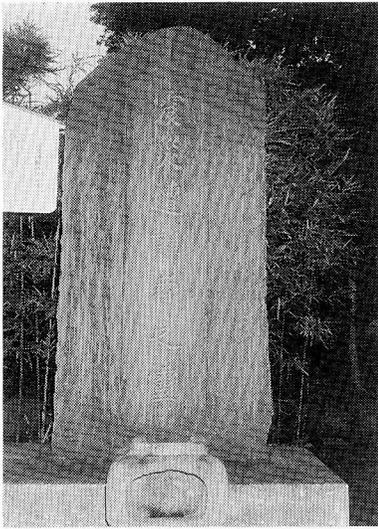


図 38 大鷲神社の震災遭難者之霊碑

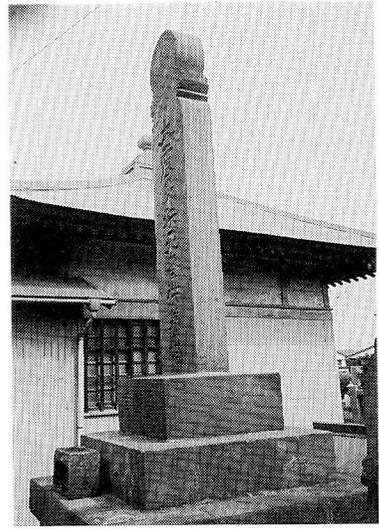


図 39 大震災歿死者供養塔

に合わない状態だった。圧死者を多く出した平塚駅、紡績工場の惨状は云うに及ばず、たまたま当時全国殖産博覧会が平塚第一小学校（現 崇善小学校の前身）で開催中だったので、ここでも圧死者を出した。

平塚市観光協会

と記されている。

◇ 平塚の 震災語る 供養の碑
おおとり
 大鷲神社の 片隅に建つ

●長樂寺（眞言宗海詠山）の大震災歿死者供養塔
 [平塚市札幌町 15] 図 36 の位置図に示すように、相模川の右岸河口近く、JR 東海道本線の南方約 500 メートルあたりに長樂寺があり、墓地内に図 39 のような「大震災歿死者供養塔」（総高 4 メートルあまり）が建っている。調査に赴いた 1998 年 5 月当時、当寺院は改築中と思われ、門柱の表札もなく、本堂らしい建物も見当らなかった。斎場は新築工事中であった。

供養塔正面には上記の碑銘があり、その下部に「長樂寺」、向って右側面に

「 大正十二年九月一日関東大地震アリ一府四県未曾有ノ惨禍ヲ受ケ東京横浜横須賀小田原等皆焼ケ其ノ他ノ各地被害甚大当村ハ家屋倒潰圧死者六十余名ヲ出ス此惨害ハ一朝ニシテ数十万ノ生民ト数十億ノ財産トヲ奪ヒ去リ実ニ悲痛ノ極ニ達セリ茲ニ歿死者ノ三回忌ニ当リ供養塔ヲ建設シテ永遠ニ記念シ回向スルモノナリ 」

（略字化）

左側面に

「 大正十四年九月一日
 発願者長樂寺第二十五世
 金剛來精辨 」

と刻んである。

上記碑文に「当村」とあるが、現在のどの地域を指すのか不明である。また、調査当日は改築中でもあり、詳しい事情を調べることができなかった。

◇ 詳しくは 知る由もなし 長樂寺
 震災歿死者の 供養塔建つ



図 40 馬入橋^{たもと} 袂の陸軍架橋記念碑

●馬入橋^{たもと} 袂の陸軍架橋記念碑 [平塚市馬入本町]

図 36 に示してあるように、相模川右岸国道 1 号線にかかる馬入橋^{たもと}の袂 南側に高さ 2 メートル くらいの「陸軍架橋記念碑」(図 40) がある。この 碑銘の下に

「 大正十二年九月大震
ノ際京都工兵第十六
大隊ハ馬入橋架設ノ
爲メ同月十七日起工
汗血の勞ヲ費スコト
一句餘十月三日竣工
橋ノ長サ四百五十米
突中三百米突
大正十二年十月工兵第十六大隊長 」

と彫ってある。

近時自然災害に際して、自衛隊の救援活動が評価されているが、関東大震災に当っては軍隊の活躍が目ざましかったようである。しかし、その活躍がモニュメント化されているのはあまり例がない。

◇ 懸命の^{みの} 努力^の 実らせ 工兵隊
みごと復旧 馬入川の橋



図 41 阿弥陀寺入口と本堂



図 42 阿弥陀寺の「平塚町大震災殉難者供養塔」(中央)と「発掘石塔等を祀る碑」(左端)

●阿弥陀寺(浄土宗報恩山来迎院)の「平塚町大震災殉難者供養塔」とその発掘由来 [平塚市平塚 3-5] 阿弥陀寺(図 36)は平塚 1 および 3 丁目のいわゆる寺町にある寺院の 1 つである。国道 1 号線に同寺の標識があり、そこを南方に 100 メートルあまり行くと、図 41 のような門柱、標識、本堂がある。本堂の前には「平塚町大震災殉難者供養塔」(図 42 中央)と「堂宇建立時発掘された石塔等を祀る碑」(図 42 左端)が並んで建っている。同供養塔の背面には「昭和四年四月建立」とあり、32 名の勸進芳名が刻んである。その左の碑正面には

「 天災地変横難横死乃至有無両縁之諸群靈
当堂宇建立時地中隠没発遺石塔之諸精靈 」

とあり(略字化)、背面には

「 昭和五十九年六月吉辰 当山第卅世信譽
棟昭代

と彫ってある。

◇ ^{ありがた}有難や 天災地変 横死の靈
今も^{まつ}祀るは 阿弥陀寺の庭

小田原方面の震災

関東地震の震源断層の上端部に近接して位置する小田原市およびその周辺域の地震動はすさまじかったようである。たびたび引用する「大正大震災大火災」では、小田原およびその周辺部の災害について、つぎのように述べている。

「 倒壊家屋五千戸の内、町の南端をのぞき、四千戸以上は焼出し、家屋の下敷となった二千の人は生きながら火葬にされたが、何れも手の出しやうがなく、助けを求める聲を耳にしながら、心を鬼にして、これを見捨てるの餘儀なく地獄の光景さながらであった。しかも食糧缺乏の爲め掠奪が行はれて居る。小田原管内の足柄下郡は仙石原村及び宮城野強羅をのぞく以外は全家屋倒れ、早川村下中村は各十數戸づつ焼失し、片浦村根府川村岩村福浦村は山海嘯と溶土の湧出の爲全部地中に埋没、死全七百名負傷者數萬を出して居る。小田原全滅家屋五、〇〇〇。死者二、〇〇〇。

「 小田原から箱根、熱海、伊豆山、湯ヶ原等温泉地方一帯も殆んど全滅で、小田原では閑院宮寛子女王殿下の薨去あり、倒壊家屋五千、死者二百三十、湯本其他箱根七湯の宿屋は全部倒潰、一村埋没した村もあり。面目一新された観がある。足柄山中に位置する村々も損害甚だしく、小山なる富士紡大工場全潰して、數千と唱へらるゝ工女の大半即死した。

となっている。

なお、小田原市南部根府川や真鶴方面の被害の詳細については、別項に述べることにする。

ところで、小田原は地震災害の名所である。日本の地震カタログによると、小田原は1600年以降5回も猛烈な地震に襲われている。すなわち、寛永10年1月21日(1633年3月1日, M=7.0, 35.2°N, 139.2°E)、元禄16年11月23日(1703年12月31日, M=7.9~8.2, 34.7°N, 139.8°E)、天明2年7月15日(1782年8月23日, M=7, 35.4°N, 139.1°E)、嘉永6年2月2日(1853年3月11日, M=6.7, 35.3°N, 139.15°E)および大正12年9月1日(1923年, M=7.9, 35.1°N, 139.5°E)の各地震である。

「増訂大日本地震史料」(文部省震災予防評議会, 1941~43)や「日本地震史料」(武者金吉, 1951)によれば、これらの地震(関東地震を除く)のオーバービューはつぎのようになっている。

○寛永地震

寛永十年一月二十一日(西曆一六三三、三、一)相模、駿河、伊豆諸國、地大ニ震ヒ、相模最モ甚シク(西曆一六三三、三、一)小田原城市破壊シ、市内ノ潰家夥シ、箱根山所々崩ル。死者百五十人アリ。是日江戸モ亦震ヒ、餘震月ヲ越エタリ。

○元禄地震

元禄十六年十一月二十三日(西曆一七〇三、一二、三一)武藏・相模・安房・上總ノ諸國地大ニ震ヒ、江戸・小田原被害甚シ。續イテ津浪襲來シ小田原・鎌倉ノ沿海、安房ノ長狭朝夷兩郡、上總ノ夷隅郡、大島、八丈島等ソノ害ヲ被ル。房總半島ノ東岸ハ地震ノ後八九町乃至一里程干潟ニナレリ。震災地全般ヲ通ジテ潰家約二万百六十二軒死者五千二百三十三人ニ達ス。

○天明地震

天明二年七月十四日(西曆一七八二、八、二二)是夜、江戸地強ク震ヒ、明朝又數ク震フ、是時、相模國最モ烈震ヲ感ジ、小田原城市破壊シ、箱根山所々崩レタリ、房州ニハ津浪襲來シ、陸中モ津浪ノタメ被害アリ。三河・越中・飛騨ノ諸國マタ

震フ。

○嘉永地震

嘉永六年二月二日(西暦一八五三、三、一一)十時頃、相模小田原大地震。城ノ天守ノ瓦壁落チ、大砲臺三ヶ所破損、市内ノ竹之花町・須藤町・大工町等ノ町家ハ殆ド全潰ス。震災地ヲ通ジテ潰家ノ數三千三百、死者マタ少ナカラズ。遠江・三河・信濃等ニテ有感。

これらの地震の記事にはすべて小田原が登場している。被害の詳細については「新編日本被害地震総覧」(宇佐美龍夫、東京大学出版会、493 ページ、1996)や「理科年表」(毎年改訂、丸善)などを参照されたい。

これらの地震の特徴的な点は、その発生間隔がほぼ一定していて、図 43 にみられるように平均 73.0 ± 0.9 年間隔で地震が起こっていることである。この傾向を単純に延長すると、1998 年に小田原方面に大地震があることになるが、果たしてどうであろうか。しかしながら、震源域も発生メカニズムも異なる地震の発生間隔を単純に平均しただけであるので、ちゃんとした物理的根拠があるわけではなく、この小田原地震説はにわかには信じ難い。このような議論があるにしても、そもそ

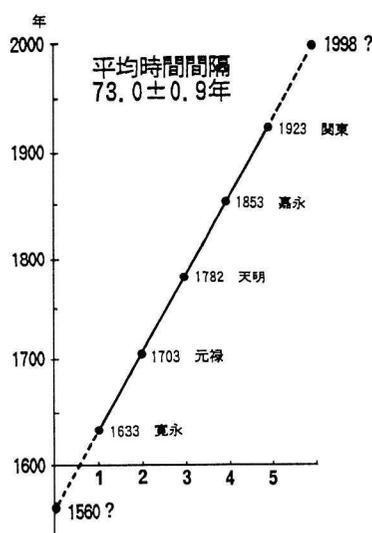


図 43 小田原市付近の大地震の繰り返し

も小田原方面は地震危険度の高い地域と考えられているので、想定される「神奈川県西部地震」に関する国家予算による調査研究が実施されている(例えば、萩原幸男、「神奈川県西部地震は果たして起こるか」、地震ジャーナル, 15, 1-6, 1993)。

小田原市中心部の地震モニュメント

中野敬次郎著「近世小田原ものがたり」(名著出版、283 ページ、1978)という本があり、その初章の 99 ページにわたって「小田原大地震の歴史」が古文書を引用して書かれている。上記の 5 個の大地震の被害についても当然述べられているが、公文書の引用の多いためか著者の言うように「小田原城地震史」ともいえる。

●小田原城の宝永二年小田原城復興碑 [小田原市内] 小田原城は、図 44 の略図に示すように、JR 小田原駅の南方数百メートルに位置し、城趾公園となっている。城は明治 3 年に廃城となったが、天守閣(図 45)は昭和 35 年に復元された。

「近世小田原ものがたり」によると、天守閣は江戸時代の大地震のたびに大被害を受け、特に寛永 10 年と元禄 16 年の際には倒壊した。天明 2 年のときは倒れなかったが東北に 30 度も傾いた。嘉永 6 年には見る影もなく大破したとされる。現在の天守閣内には、「宝永二年小田原城復興碑」(高さ 1.6 メートル)(図 46)があるがこれは元禄地震で倒壊した天守閣を再興した記念碑で、碑文は

「元禄十六癸未年十一月廿二日夜地震天守城樓回禄翌年春朔再興之事寶永二乙酉年四月日天守城樓以下迄外郭惣石壁築成矣於是彫攻于疊石以誌焉
從四位相州小田原城主兼隱岐守藤原朝臣
大久保氏長忠増再営」

となっていて、説明板にも書かれている。説明文としては

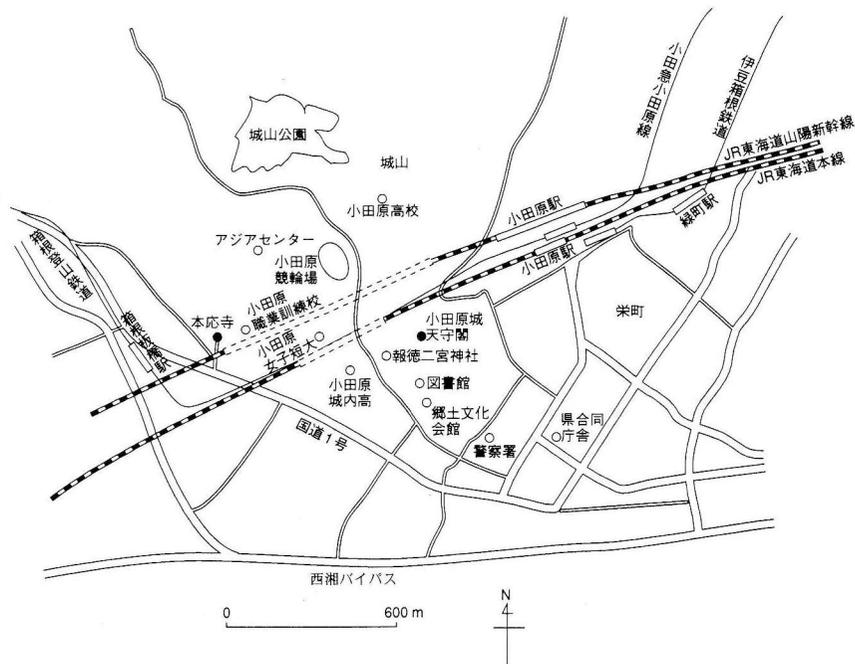


図 44 小田原市の小田原城天守閣および本応寺の位置図



図 45 小田原城天守閣

「元禄 16 年（西暦 1703 年）11 月 22 日午前 2 時に大地震があって天守閣はじめ城郭全部が焼失または崩壊したので大久保忠増は直に復興事業に着手した。宝永 2 年（西暦 1705 年）春 4 月工事が完成したのでその由来を石に刻して後世に残した記念碑である。

大正 12 年関東大震災のとき天守台の石垣が崩れてその中から発見されたものである。」

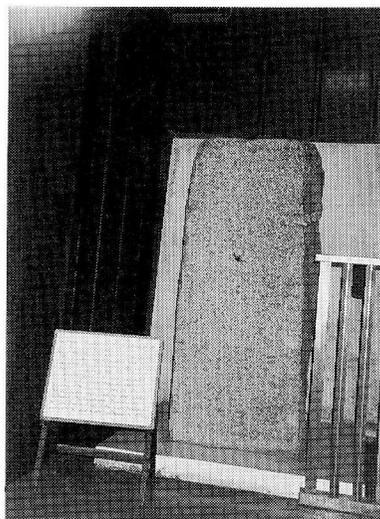


図 46 天守閣内の宝永二年小田原城復興碑

なお、英文の説明板もあり、つぎのように記されている。

「 A monument in memory of the reconstructions of the Odawara castle donjon.

On 22 November in the 16th year of Genroku era (1703), a great earthquake occurred, when the donjon and all the walls of Odawara castle were either collapsed or destroyed by fire.

The reconstruction work of the castle immediately started by Lord Tadamasa Okubo was completed in the spring of the 2nd year of Hiei era (1705). This is a monument engraved with the story about development of the reconstruction. It was discovered in the ruins of the stone walls of the donjon foundation, destroyed by the great Kanto earthquake in 1923.

◇ ^{いくたび}幾度か ^{いしづみいだ}地震に崩る 天守閣
 碑 抱き 今もそびえる

● 小田原城の石垣崩壊あと [小田原市城内]

小田原城跡には、関東地震で崩れた城壁があちこちにそのまま残されている。図47は同城本丸南側の「鉢巻石垣」崩壊あとで、付近に建っている小田原市教育委員会の「史跡 小田原城跡」説明板によると

「小田原城本丸の石垣は、上から下まで石を積んだ総石垣ではなく、鉢巻石垣、腰巻石垣となっています。本地点は関東大震災の際に、鉢巻石垣が滑り落ちたもの



図 47 小田原城の関東地震で崩れた鉢巻石垣

です。

となっている。

◇ 無残なり 崩れ残りし 石垣に
 今も^{しの}偲ぶか 大震のあと

● 本応寺（日蓮宗法雨山）の地震供養塔 [小田原市板橋 756] 図44の略式地図に示してある本応寺（図48）に図49のような供養塔がある。本調

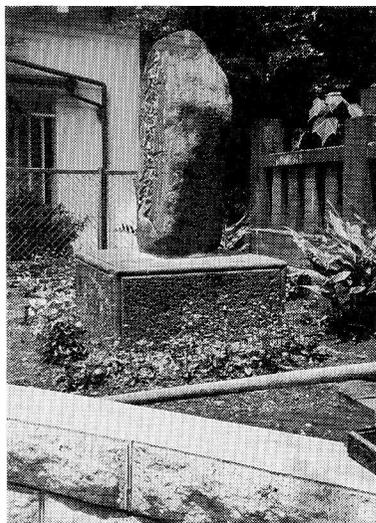


図 48 小田原市本応寺の標識



図 49 本応寺の地震供養塔

查の期日(1998年5月)には、同寺院は改築中で詳しいことを聞くことはできなかった。ここでは、主として小田原市文化財保護課大島氏や防災対策課古澤氏などの御厚意により入手することのできた「小田原の金石文」(小田原市郷土文化館、1967)に準拠する。

塔本体(高さ85センチメートル)の正面には

「 一天四海妙法流布 当山
南無妙法華経法界万霊 普正
南無日蓮大菩薩 廿八世 」

とあり、背面には

「 廿五日志者
享和二壬戌歳 深人道法
九月廿三日 顕了宗悟 石工甚五良
智観妙応
妙海童女
十五日志者 」

と彫っており、側面には

「 奉書写妙経一字一石全記
大地震靈魂為追福之営 」

とある。

台石には下記のような塔の由来が刻んである。

「 供養塔由来
この供養塔は今を去る百六十余年前享和二年九月二十三日建立されたもので徳川時代に起った小田原地方三大地震である寛永十年よりは二百年元禄十六年よりは百年宝永四年よりは九十四年で亦天明二年よりは二十一年に相当する年で即ち寛永の二百年忌元禄の百年忌及び宝永の

百年忌天明の二十三年各年忌繰り上げ等の法要を営むに当り地震被災者諸靈位の御供養を厳修するために設立されたものでその復元工事は昭和四十一年十月である

昭和四十一年十月十二日

法雨山

現董誌

上記の碑文より、塔本体は享和2年(1802)に建てられた約200年前のものであることが分かる。台石の碑文は1966年のものである。資料「小田原の金石文一」によれば、つぎのような解説がある。

「 この大地震供養碑の元碑は、本応寺の隣にあった日蓮宗妙安寺にて建立したもので、碑文中に当山二十八世普正とあるのは、妙安寺の住職である。

妙安寺が明治十九年二宮町に移転した時、碑は残されて旧寺跡前の溝中に埋もれていたものが発見され、本応寺に引きとられて建てられたのである。享和二年に建立されたものであるが、その以前に寛永十年、元禄十六年、天明二年などの大地震があったので、どの大地震の犠牲者を供養したものか不明である。 」

どの地震の犠牲者の供養に対応しているのか分からないなどという点は、近世数回の大地震に襲われている小田原の地震禍を象徴しているというべきであろう。

◇ 小田原の 横死者あまた 近世に
地震幾度 本^{いくたび}応寺の塔

■地震予知連絡会情報■ 清水 洋 本谷義信 ■

地震予知連絡会は第129回が8月17日、第130回が11月24日に開催された。取り扱われたルーチンの観測の解析期間は1998年5月から1998年10月までである。地震予知連絡会では、学術的討議を充実するために、ルーチンの観測の報告は簡潔にし、トピックスを選定して重点的に議論することになった。取り上げられたトピックスは、上高地の地震活動、岩手県内陸北部の地震、東海地域のプレート間カップリングの3件であった。

本稿ではトピックスと各地の地震活動・地殻変動に関する事項を中心に報告する。

上高地付近の地震活動

長野・岐阜県境の上高地付近で、8月7日から活発な地震活動が始まった(図1)。震源は最初焼岳の北東数kmの地点に東西に長く分布したが、8月12日にM4.7の地震が起きた頃から、7-8km北側の穂高岳付近にも飛び火し、8月14日には穂高岳付近でM4.4の地震が発生した。その後活動域はさらに北に広がり、8月16日にはM5.4の最大地震が槍ヶ岳と穂高岳の中間付近で発生した。さらに活動の北進は続き、槍ヶ岳を経て、9月5日には富山・長野県境の野口五郎岳にまで達した。その後活動は南へ折り返し、10月以降は最初に活動が始まった付近でのみ活動が続いている。活動が焼岳から北へ移動する速度と野口五郎岳から南へ移動する速度は、どちらも1km/day程度と見積られている。震源はかなり浅く、気象庁によると5km程度であるが、さらに浅い可能性がある。主な地震のメカニズム解は、北西-南東圧縮・北東-南西張力の横ずれ断層型で、この付近の過去のメカニズム解と整合的である。また、8月12日M4.7や8月16日M5.4などの大きな地震の直前には、各々の地震の近傍の領域の地震活動度が低下するという特徴が見出された。

この地域一帯では、ある特定の場所で定常的な地震活動があるのではなく、毎回場所を変えながら複数の地域で群発するという特徴がある。過去の活動としては1969年のM5.0の地震があり、今回の活動域の南東寄りに震源が決められている。また、1990年と1993年にも今回の活動域の近くで間歇的な群発地震活動があった。

今回の地震活動の成因も議論された。震央分布図と地

質図とを対応させてみると、8月14日頃までの活動は東西走行の伏在断層におおよそ対応している。また、キューリー一点深度も今回の震源域で浅くなっているという特徴は認められず、これらのことから構造性の成因が示唆される。一方、地殻熱流量のデータからは今回の震源域が温度異常域にあると推定される。また、モーメントテンソル解にはかなりのCLVD成分が含まれており、火山性の可能性も考えられる。

岩手県内陸北部の地震

岩手山近傍では1998年2月頃から火山活動に関連するとみられる微小地震が増え始め、地殻変動も進行しているので、地震予知および噴火予知に関係する機関が協力して、山体の周辺に地震、GPSの観測網などを展開して観測体制を強化している。また、水準測量の繰返しも行われている。このような状況下で、9月3日に岩手山から南西へ8kmほど離れた所で、M6.1の地震が発生した。本震の深さは10kmで多数の余震が観測された。震源域は本震直前までに発生している地震の活動域とは重なっていない(図2)。前震は観測されなかった。

GPSとAPS(測角・測距観測装置)による地殻変動の準連続観測で、岩手山の火山活動に関連する変動と本震によるコサイスマミックな変動が観測されているが、本震の前兆変動は認められなかった。合成開口レーダーのデータ解析から、岩手山周辺の地殻変動が1998年3月頃から始まった火山活動起源の広域的変動と、9月3日の地震に伴う局地的変動が重なりあって生じていることがわかった。また、震源域の北端付近では地震に伴って約50cmの隆起が生じた地域のあることが確認された(図3)。これらの地殻変動は地震のメカニズム解から推定される断層運動だけでは説明が困難であり、地震発生前の6月頃から岩手山の約10km西側の深さ約8kmにマグマまたは熱水が原因と推測される膨張源があったと考えられる。この膨張と地震発生との関連が注目されている。

この地震に伴って、雫石盆地西縁断層帯の北端部付近で地震断層が出現した。南北走向延長約850m、実変位40cm±、西側隆起の逆断層である。地震発生当日に水準測量大学合同班が岩手山南山麓で水準の繰返し測量

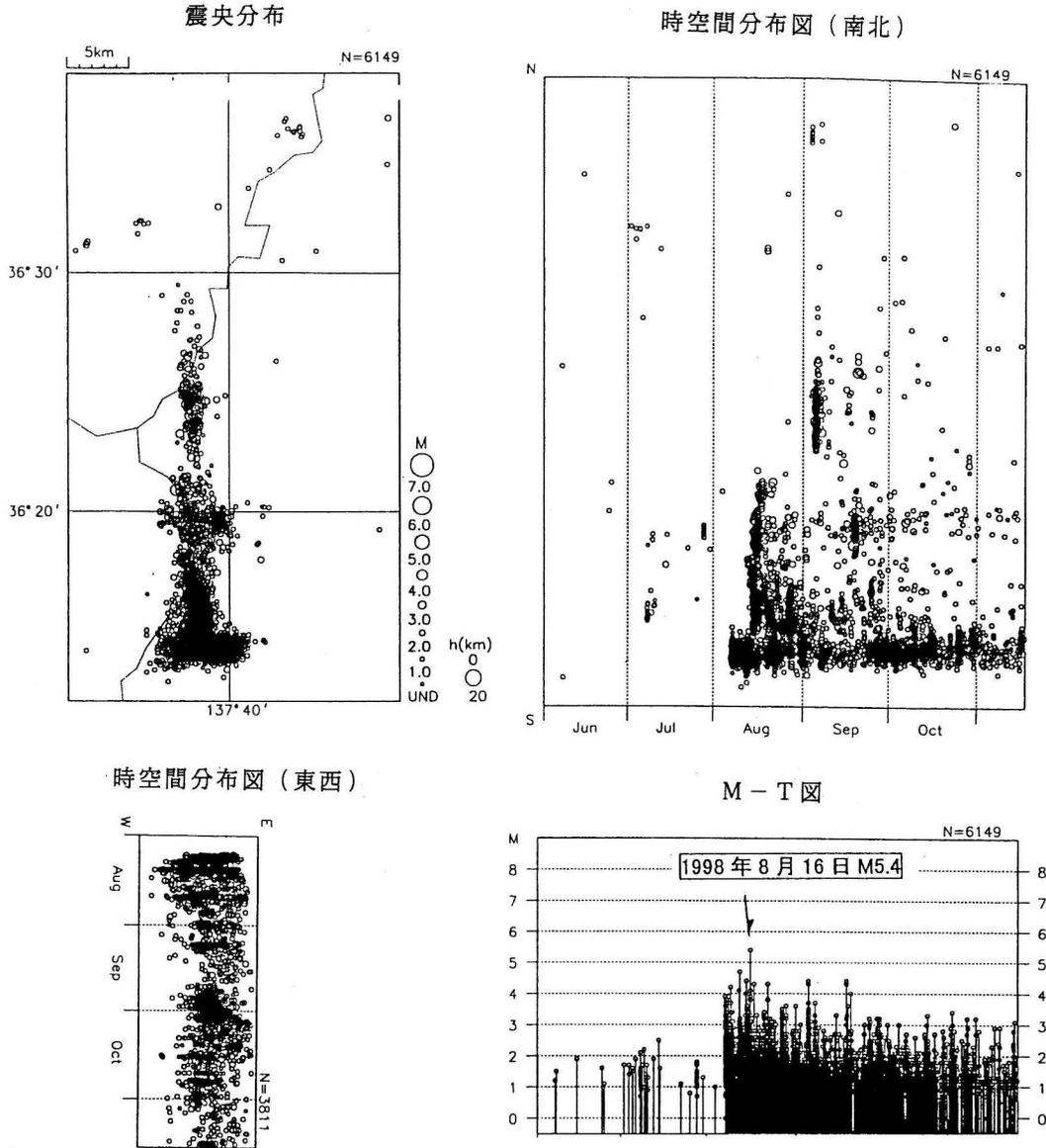


図 1 長野・岐阜・富山県境の地震活動 (1998年6月1日-1998年11月17日) (第130回:気象庁)

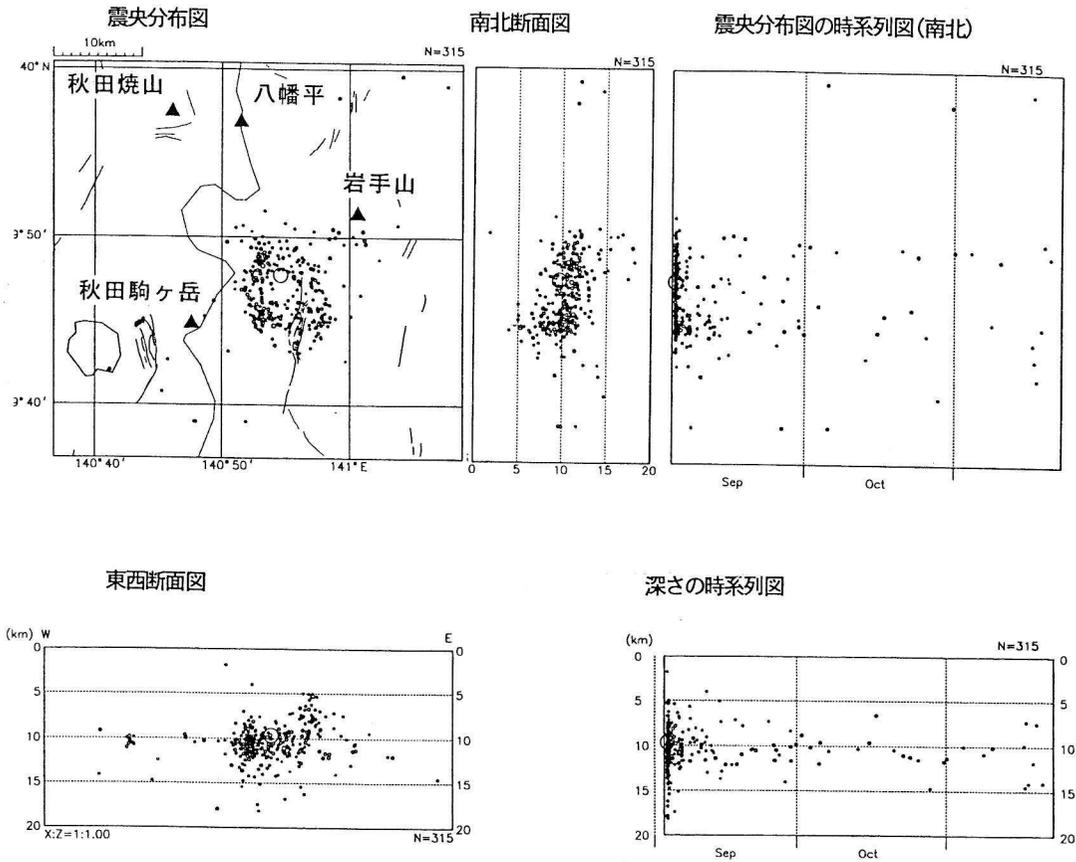
を行っていて、地震直後に、断層の位置に対応して、最大 20 cm の隆起を確認した。しかし、地震の直前には上下変動は検出されなかった。

東海地域のプレート間カップリング

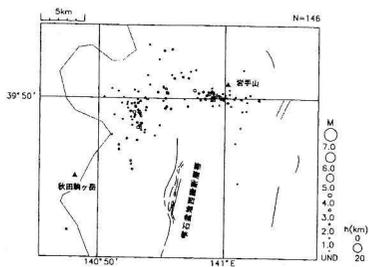
東海地方において、フィリピン海プレートとユーラシアプレートの間の相互作用は東海地震を発生させるであろう歪の蓄積に直接関連する重要な問題なので、これま

でに得られているデータに基づいて、詳細な検討をした。水準測量、光波測距、GPS 測量などにより明らかになった地殻変動から推定される東海地方のバックスリップは、数年程度で時間的にも空間的にもかなり変動していることがわかってきた。特に、遠州灘では変動が大きい (図 4)。微小地震活動から推定したプレート間の固着域とバックスリップの空間分布に系統的なずれがあり、プレートの沈み込みに関連した説明があった。また、固着域における地震活動度の低下が検出可能かどうかを議

(1998年9月3日0時~11月22日24時0分)



1998 03 01 00:00 -- 1998 09 03 16:57
本震直前までの震央分布図



地震規模の時系列図

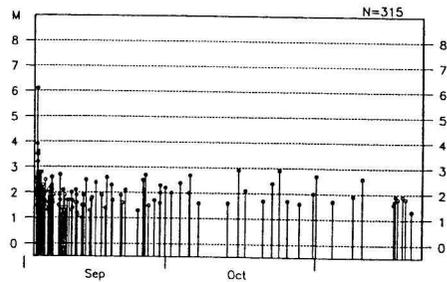
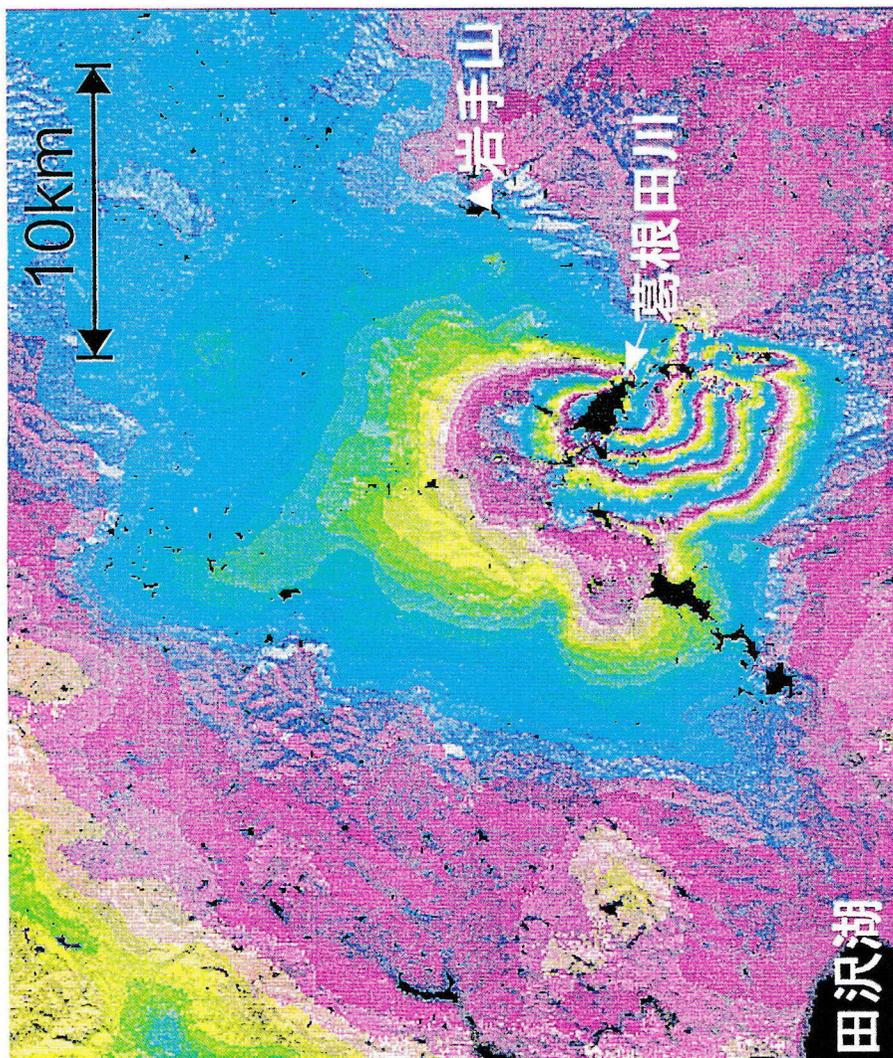


図2 岩手山付近の地震活動。震央分布図中の大きい丸が9月3日の岩手県内陸北部の地震。9月3日0時から16時57分までの地震は上下の震央分布図に重複してプロットされていることに注意(第130回:気象庁)

40度0分



39度43分

140度39分

Near



11.8cm

Far

141度5分

1997/11/5 - 1998/9/9 衛星視線方向の変動量 (cm)

図3 宇宙開発事業団の地球資源衛星「ふよう-1号」の合成開口レーダー解析による岩手山とその周辺の地殻変動（第130回：国土地理院）

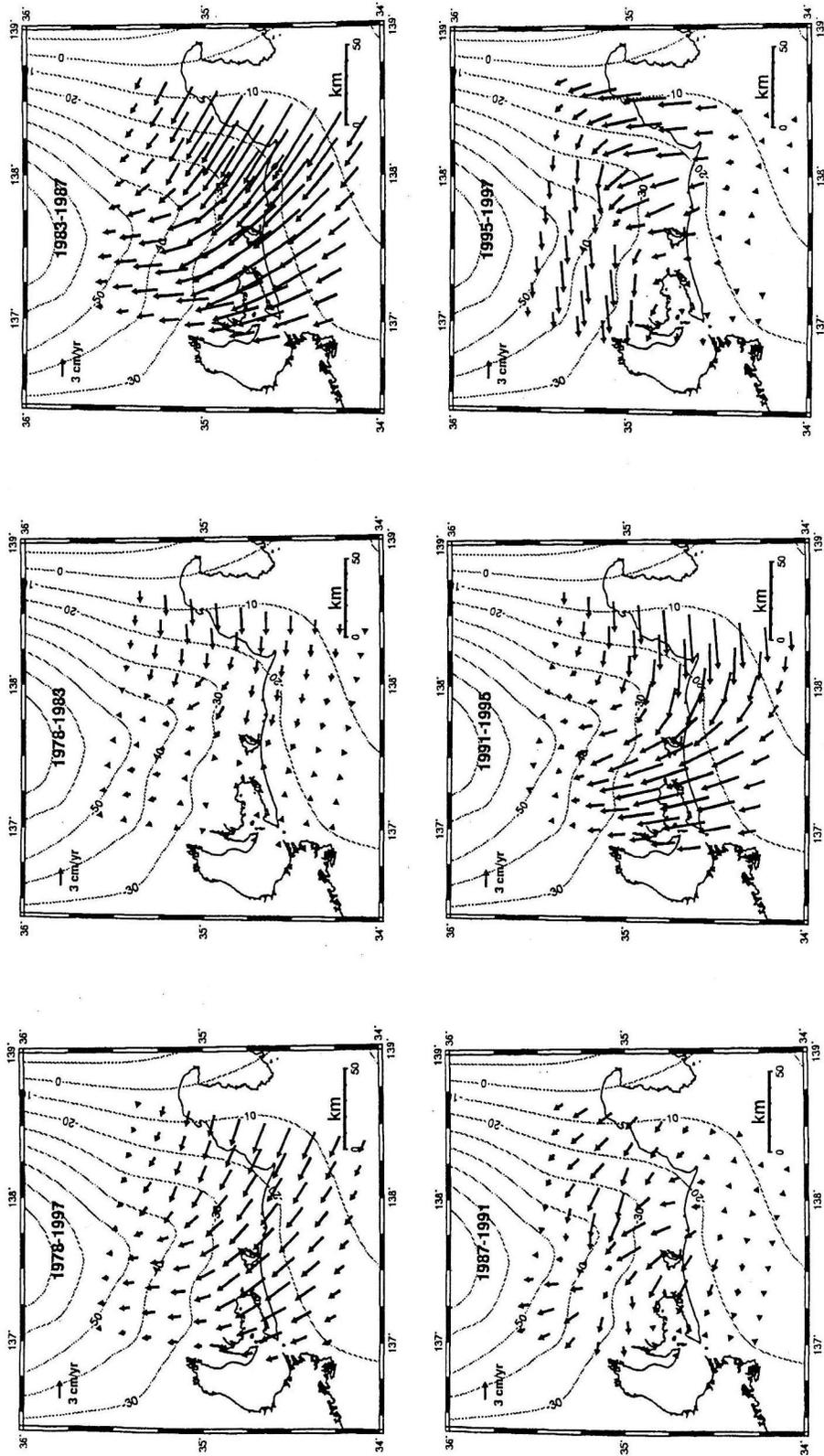


図 4 東海地域において推定されたパシフィックプレートの上面の深さ (km) (第 129 回: 名古屋大学)

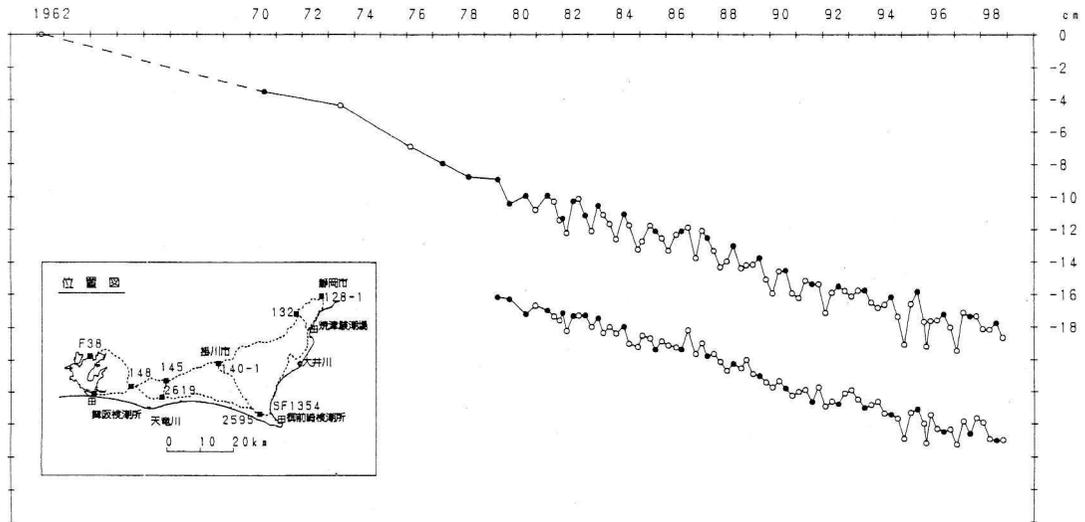


図5 掛川に対する御前崎(浜岡町)の水準点2595の上下変動の経年変化。上段は観測値，下段は年周変化を補正した値，黒丸は網平均計算した結果(第130回:国土地理院)。

論した。

関東・伊豆・東海地方

関東地方では、房総周辺でM4クラスの地震が多数発生している。東京湾奥(千葉県沿岸)で8月29日にM5.1、深さ67kmの地震があった。

伊豆地方では、1998年4月中旬から始まった群発地震の活動は6月初めまで活発に続いたが、その後は定常的な活動度で推移している。検潮データによると、伊東では1973年以降、積算で60cm以上の大きな隆起が観測されている。一方、水準測量の結果では、1997年-1998年に小室山の麓付近で3cm程度の隆起となっている。また、GPSによる観測では、1997年3月の伊東群発地震活動以後、伊豆半島南部の西方向への変位速度が増大しているように見える。

新島・神津島付近の地震活動は1991年頃から活発化し、1995年から1996年にかけて非常に活発であったが、1997年以降は比較的落ち着いている。しかし、規模は小さいがクラスター的な活動が最近でも続いている。鳥島近海で8月20日にM7.1、深さ457kmの地震があった。この付近では1984年3月6日にM7.9の巨大深発地震が発生している。

東海地方では、6月に静岡・山梨県境付近(山梨県南部)で、M3.1やM3.4などのややまとまった地震活動がみられた。東海地震の監視領域内の地震活動には異常は

認められていない。御前崎付近の水準測量によれば、浜岡の水準点2595の沈降傾向の鈍化が依然続いており、引き続き注意深く見守っていく必要がある(図5)。気象庁清水観測点の体積歪計が1998年10月11日から延びの変化を始めて10月17日に変化は収まった。過去にも同じような変化を記録した例があるが、今回の変化時定数は3.2日で最も長いものであった。地下水の観測データには特に変化は出ていない。

中部・近畿・北陸地方

上高地付近の地震活動についてはトピックスとして別に述べてある。長野県北部で7月1日にM4.7の地震が発生した。メカニズム解は北西-南東圧縮の逆断層型である。

三重・岐阜県境付近では、1998年4月22日の地震(M5.4)の余震活動が続いている。また、6月23日には三重・奈良県境でM4.2の地震が発生し、余震を伴った。本震のメカニズム解は、北西-南東張力の正断層型である。三重県では、さらに6月1日にM6.0の地震も発生したが、これは深さ411kmの深発地震で、太平洋スラブ内の地震と考えられる。このほか、和歌山県潮岬の沖合で5月6日にM4.3、和歌山県中部で6月10日にM4.2の地震が発生した。

中国・四国・九州・沖縄地方

5月23日に周防灘でM5.3の地震が発生した。震源はフィリピン海スラブ内の深さ85kmと考えられる。同じスラブのより浅い所で、5月28日にM4.0の地震も発生している。

九州では、1997年3月と5月の鹿児島県北西部（薩摩地方）地震の余震活動が依然として続いているものの、次第に収まる傾向にある。最近数カ月は、余震域の顕著な拡散などはみられず、震央分布の特徴にも変化はない。日向灘では、9月4日にM4.5、9月28日にM4.4の地震が発生した。今回の活動の震源域は、1996年のM6.6の活動域の北側に隣接している。これらの活動も含め、最近の九州における広域地震活動の特徴として、前弧から背弧に至る北緯32度線付近（日向灘-鹿児島県北西部-天草灘）の地震活動がやや顕著であることが指摘された。

石垣島近海の5月4日M7.6の地震に伴う余震活動はほぼ終わりつつある。

東北・北海道地方

岩手県内陸北部の地震についてはトピックスとして別に述べてある。東北地方の地震活動はやや活発であった。5月31日には三陸沖の北緯39度付近でM6.3の地震が発生している。CMT解では逆断層であり、低角と高角の節面が得られている。8月に入ると福島県南部の西郷村付近で地震活動があり、8月3日にはM4.9の地震が発生した。メカニズム解は逆断層型であるが、震源再決定によると、東へディップした面が断層面であると

考えられる。8月16日には福島県沖でM5.2の地震が発生した。この地震の周囲50kmの範囲で10月末までにM4.0以上の地震が6個発生した（M5.0以上の地震はない）。これらの地震の深さは30kmから100kmにわたっており、二重深発地震面の下面の地震と考えられる。さらに、9月15日には宮城県南部（仙台市東方）でM5.0の地震があり、前震と余震が観測された。

北海道では、1995年からの松前群発地震の活動域で、1998年7月にM3.2を最大地震とするクラスター的な活動があった。今回の活動域は松前群発地震の活動域の南端付近である。北海道とその周辺では1996年5月から深さが120kmより浅い $M \geq 6.0$ の地震は発生していない。地震が発生していない間隔としては、 $M \geq 7.0$ でみると特別に長くはないが、 $M \geq 6.0$ でみると最近60年間では最も長い間大きな地震が発生していないことになる。

その他

1998年8月6日、小型3成分ボアホール（石井式）歪計に広域的に異常が現れたが、この歪計には高感度の磁気センサーが使用されており、磁場擾乱がその原因であると報告された。

福井県の敦賀断層と野坂断層、三重県の桑名断層と四日市断層、大阪府上町断層系および奈良県金剛断層について、トレンチやボーリング調査等の結果が報告された。

東北地方における大規模制御震源による地下構造探査の実施状況の報告があった。

そのほかに、友ヶ島水道及び松山港周辺海底地質構造図（水路部）と都市圏活断層図（国土地理院）が配布された。

■ 書 評 ■

● 日本の自然災害の実態を知る

国会資料編纂会 編

力武常次・竹田 厚 監修

日本の自然災害

評者 植原茂次

本書はわが国の自然災害について、まさに網羅的・多面的な記述によってその実態を解説したものである。

即ち、自然災害を地震・津波、火山噴火、気候と災害の三つの範疇に分け、「Ⅰ. 日本の国土と自然災害」について解説し、「Ⅱ. 記録に見る自然災害の歴史」では時代を上・中世、近世、明治・大正、昭和前、中、後期の6区分に分けて、災害の概観、年次の災害記録の概要を示し、「Ⅲ. 地震・津波、Ⅳ. 火山噴火、Ⅴ. 台風・豪雨、Ⅵ. 豪雪・冷干害」で各々の歴史的記述と地域の特徴並びに主要災害事例について解説している。最後の「Ⅶ. 時代の変化と災害形態」では、各範疇毎の災害が社会的変化によって如何に変貌したかを解説している。

600頁を越える大部な本書は、行政の防災担当者を主な対象として編纂されたと記されており、わが国の自然災害の全体像を把握するには良い資料であるが、通読するには少し骨が折れる。

本書が訴えたいところは、最後のⅦにあると思われるが、そのために歴史的な事例によりその事実の提示を試みており、その努力が感じられる。また専門的な記述はできる限り避け、一般の人々にも理解され易い資料とすることに配慮しているが、いささか重複の気味があり、防災担当者には専門的に物足りない感もあると思われる。

しかしながら本書を読めば、我々は如何に災害の危険度の高い国土に住んでいるか、また災害が如何に恐ろしいものであるかを、改めて感じるものと思われる。

「災害経験の風化」と言われるように、時とともに失われて行く災害の記憶を呼び覚まし、過去の災害から得た教訓を防災対策に生かして行くことは、行政的な立場からの施策にしても、個人的な災害対応にしても重要なことであり、本書はその面からも活用されるべきものと思われる。

本書の意図は、自然災害の被害の実態を記述することに主眼が置かれているため、防災対策、防災技術については概要が述べられているに止まっているが、それらの面については、これまでも専門的に詳しい解説書がありまた個々の災害についても詳細な分析・記述がなされている資料は多い。従って、本書は自然災害に関する入門書、手引き書の意味もあり、巻末に掲げられた参考文献等により更にこの分野の知識を深めることが出来よう。大部な本書では、災害の発生した地理的位置・範囲が記述のみであるため、地図を片手に本書を読まれることをお勧めしたい。災害を理解するためには災害発生地域の地理的情報は不可欠であるからである。

さて、本書で述べられた趣旨の延長で言えば、社会的変化は既にグローバルな問題に発展しており、一方、地球科学技術及び防災科学技術における学際的研究開発も急速に発展しつつある。今後の防災対策は、既存の未解決な課題に対処しつつ、地球規模での資源・環境問題と関連した、新しい形態の災害への対応も図る必要があることを記しておきたい。

<国会資料編纂会、1998年4月、A4判、637頁、本体28000円>

● 震災への心構え—阪神大震災を踏えて—

「科学」編集部 編

室崎益輝・藤田和夫ほか 著

大震災以後

評者 柳川喜郎

「災害は忘れた頃にやってくる」といったのは寺田寅彦だ、といわれているが、かれの数多くの著作をみても、そういう言葉はない。だが、寅彦は「人間というのは愚かなもので、よく前車の轍を踏んでしまう」という趣旨の言葉を書き残している。

歴史はくり返すというが、ほんとうに人間は愚かなもので、痛い経験を忘れて、つい前車の轍を踏んでしまう。昨今の日本の状況を見ていて、つくづくそう思わざるをえない。

大正の中期、第1次世界大戦の戦争景気で、日本は好景気に沸いて俄か成金が続出した。しかし、戦争の終結

● 地震地質学の本質に迫る

Robert S. Yaets, Kerry Sieh, and
Clarence R. Allen 著

The Geology of Earthquakes

評者 池田安隆

「地震の地質学」というタイトルで昨年出版されたこの本は、地震の発生源である断層の挙動とその駆動メカニズムを地質学的過去までさかのぼって記述した教科書である。豊富な具体例を含めて必要な知識を余すところ無く記述したA4判568ページにおよぶ大著であり、地震やネオテクトニクスを専門とする理学・工学分野の研究者と学生のみならず、都市計画や防災に携わる人々にとっても必読の書といえよう。日本語で書かれたものも含めて本書に類するものはすでに何冊か出版されているが、本書の際立った特徴は、(1)地震をあくまで地質学的現象としてとらえ、地学的時間スケールで記述していること、(2)具体例が豊富であること(世界の主要な活断層帯と、過去の主要な地震とその地学的背景の記述がほとんど網羅されている)、および(3)文献リストと索引が充実していることである。記述のレベルは、大学院学生向き程度であり、専門課程(地球科学系)の学部学生にはやや難しいかもしれない。

本書は三つの章から構成されている。第1章 Background は、地震地質学を理解するために必要な基礎知識である。プレートテクトニクス、岩石力学、構造地質学、(狭義の)地震学、測地学、年代測定法、変動地形学等に関して、過不足無くていねいに解説してある。この章だけで地震地質学の教科書になるかもしれない。第2章 Earthquake Geology がこの本の主要部である。世界の主要な活断層帯と、過去の主要な地震断層についての研究が多数紹介されている。第3章 Living with Earthquakes では、断層の地震危険度評価について記述されている。

本書の3人の著者はいずれも地質学を専門としているが、地震学にも造詣が深い。Clarence R. Allen氏(カリフォルニア工科大学名誉教授)は、アメリカの地質学会と地震学会の両学会の会長をつとめたことを記憶している方も多であろう。氏の書いた論文は決して多くないが、数十年にわたってこの分野の研究をリードし、国内・国外の研究者に大きな影響を与えてきた。Kerry Sieh氏(カリフォルニア工科大学教授)は、Clarence R. Allen氏の一番弟子とっていい研究者であり、古地震学(Paleoseismology)の創始者である。氏の仕事はき

とともにバブルははじけ、不況がやってくる。

そこにおきたのが関東大地震である。首都を壊滅させた地震の直後、バブル景気で人々が謙虚さを失わない奢侈の風潮に染ったため天が下した罰である、という「天譴論」が知識人の間で唱えられた。

震災後も日本の不況はつづき、震災手形が大きな要因となって金融システムが破綻し、やがて世界恐慌にまきこまれていった。いま、いやな予感がするのである。

阪神・淡路大震災は近代都市の地震に対する脆弱性をあらためてみせつけた。高速道路や新幹線の安全神話は崩壊した。「まさかの地震」、「虚をつかれた地震」、「地震動が予測をはるかに越えた地震」ともいわれた。

だが、虚をつかれたからこそ大災害になったのであり、虚をつかれなければ災害にはならないのである。また、地震動に異常があったのではなく、その予測がお粗末で愚かであったのである。

カリフォルニアの地震で高速道路が落橋したとき、日本の多くの地震工学者らは「日本ではあのようなことはおきかない」と胸を張った。

だが、その無謬性は見事に打ち砕かれてしまった。そのごう慢さに天譴が下ったともいえる。

『大震災以後』では「最悪の事態に備えられなかった耐震基準」、「設計基準を上回る揺れがあるので、将来に向けて巨大地震の強震動を念頭においた建築や都市のあり方の検討が必要である」など、随所で過去の反省に立った指摘がある。

このような指摘は“大震災以前”にも一部の地震工学者がしてきたところだが、あまり世に知られてはいなかった。どうしてなのだろうか。むしろ問題はここあたりの体質なのかもしれない。

こうした意味では、「科学者が積極的に社会に発言しなければならぬ」、「誤った行政のあり方について、どれだけ科学者の立場から批判をおこなったかを問題にしなければならぬ」、「地震科学者はその専門知識にもとづいて社会に告知・説明する責任がある」という『大震災以後』の記述は大いに傾聴に価する。

科学者はつねに謙虚であるとともに、もっと社会に顔を向けて語りかけていかななくてはならない。

『大震災以後』は前車の轍を踏まないための道しるべなのかもしれない。

<岩波書店、1998年3月、B6判、356+14頁、本体2600円>

わめて緻密であり、私の好きな研究者の一人である。私は自分の指導学生に、氏の書いた論文を科学論文の手本として勧めている。Robert S. Yaets 氏（オレゴン州立大学教授）は、かつて石油探査会社に勤務した経歴がある。氏の代表的な論文は、北アメリカ西部の Transverse Ranges の活構造に関するものであるが、豊富な油井データと地震探査データを駆使し、活断層の地下構造とその進化を具体的に描き出した先駆的な仕事であった。本書の著者はいずれも来日経験が豊富であり、日本のフィールドを良く知っている。本書の中には日本の例も多数紹介されている。

<Oxford University Press, 1997, A4, 568 pages,
丸善価格 14416 円>

● 都市の地震対策—100年前に遡って—

表 俊一郎・久保寺 章 著 都市直下地震

評者 河田恵昭

本書は1889年の熊本地震から阪神・淡路大震災を引き起こした兵庫県南部地震までの都市直下地震について、資料解析からそれらの地震と被害の特徴を示したものである。内容は三部構成になっており、第一部「百年前の地震災害」に学ぶ、第二部「地震と人間の心理」を探る、第三部「将来の地震防災」を考える、についてまとめている。

第一部では、熊本地震の実態に迫る資料解析結果が紹介されている。とくに熊本地震の再評価の内容は資料解析の神髄を紹介するものであって、著者らの苦勞をしのばせるものである。ただ、本書が必ずしも地震の専門家だけでなく一般の読者も対象とするのであるから、掲載された地図上には多くの地名も含めて、記述が詳しくするのが気になるところである。

第二部では、地震時の人間心理についてアンケート調査の結果を報告している。これを読むと、時代が変わっても被災者の心理はほとんど変化していないことがよくわかる。とくに、大分県中部地震（1975年）や宮城県沖地震（1978年）については、火災への対応やビル内の滞在者の心理状況など、貴重な研究成果が報告されている。ただし、これらは、箇条書きのような形であればもっと容易に読者に理解されると思わざるを得なかった。なお、3章と4章の内容は第二部にそれほど関係するとも思われないので、削除した方がよかったような気がする。

第三部では、阪神・淡路大震災の事例解析から多くの提言がなされている。とくに災害対策の二つの道筋の第二分野で指摘された四つの項目は同感であって、これらが解決されない限り、阪神・淡路大震災を上回る被害が将来、確実に発生すると考えられる。津波に関しても、その知識についての教育、啓蒙がまず必要であることを述べており、これとともに住宅の鉄筋化の道筋についても具体的に示されており、これまでの類書にない踏み込み方をしている。低頻度災害に対する心構えとして、明日にもその災害が発生するわけではないから、長期的な観点から対策を行うべきであるという著者らの指摘はまったくその通りだと思う。ただ、ここで気になるのは米国の災害対応がほとんどすべて賞賛されていることであろう。その実態を知っている私にとっては、これらの点には同意しにくい。これらの点については参考にされた報告書の内容に問題があると言える。たとえば、ノースリッジ地震の震源近くでは、集合住宅は少なく、まばらに立てられた平屋の個人住宅が中心であるため、たとえ火災が発生しても市街地の広域延焼しにくいという特性をもっていた。ノースリッジ地震災害やロマ・ブリエータ地震災害は阪神・淡路大震災とは質的に違うということにもっと注意を払わなければ、単純な比較から得るものは決して多くはないと考えられる。

ともあれ、本書は随所に著者らの都市直下型地震対策に対する洞察の成果が示されており、防災関係者にとっても大変示唆するところが多い好書と言える。

<古今書院, 1998年8月, A5判, 209頁, 本体2800円>

● 宏観異常は無視できない

力武常次 著 予知と前兆

地震「宏観異常現象」の科学

評者 弘原海 清

著者の力武常次は地震前兆現象の解明に長年努力を続けている著名な学者である。しかも、一般の地震予知学者とは異なり、従来大学人が研究対象としなかった「宏観異常現象」を正面から取り上げた数少ない研究者でもある。これまで多くの出版物を世に出しているが（参考文献：和文と英文）、専門が異なる人々の目に触れる機会は非常に少なかった。兵庫県南部地震の前には、動物や自然に日常経験しない多くの異常が一般市民に観察され、地震直後に報告されている（前兆証言1519！、弘原海、東京出版、1995）。この地震をきっかけに宏観異常へ

の関心が市民の間に急速に高まった。しかし、マスコミ等で取り扱われるその内容が断片的で興味本位なものも多く、このままでは従来の繰り返して人々の記憶から消えてしまう危険性が大きい。このような時期に、宏観異常を科学にするため長年努力してきた著者が、用語の背景、異常の特性、情報の収集過程、地震予知への適応など、幅広い諸問題を比較的読みやすい著書として出版されたことは大変有意義である。

著書の内容は、第1章の「宏観異常」で、1995年の兵庫県南部地震を含め、紀元前から今日まで洋の東西を問わず、大地震の前に多くの宏観異常の報告が存在したこと、その情報源は、大地震の前に人体感覚で分かる異常な現象を住民が体験し、それらを地震後に別の組織が収集した（中国の一部の地震を除く）ものである。よく知られた動物異常行動以外にも目視などで土地変動、鳴動、発光現象、地下水・温泉異常、異常電磁放射など幅広い異常が存在することなどが一般的に解説されている。住民観察による地震前の異常現象を中国語で「宏観異常現象」と呼び、1960～1970年代に中国で頻発した地震の予知で活用され成果を収めたと言われている。また英語では“macroscopic anomaly”と表記される。

日本では関東大震災をきっかけに、1930年代以後、寺田寅彦、末広恭雄、畑井新喜司、武者金吉など多くの先人たちがこの分野で大きな業績を上げているが、学会等の無理解もあって残念ながら一時中断する。中国の1975年の海城地震で地震予知の成功が世界中に伝えられ、その中で直前的な地震前兆として宏観異常が有効であったことが伝えられた。1970年代の後半から、世界的に地震予知活動が新しい局面を迎える。宏観異常にかかわる力武の一連の研究成果が世に出始めたのもこの時期からである。

力武は宏観異常に取り組んだ動機として「あまりにも多くの事例があることを見逃すことが出来ない。少しでも真実を含んでいるならば、科学者として追求すべきとかがえた」と述べている。さらに、この研究には大きな困難が伴うことを初めから予想していた。一つは、宏観異常データは専門知識のない一般の人々が観察・報告したもので、当然多くのノイズ・シグナルが混入するので真実データを抽出するには慎重な配慮が必要となる。次は、現状では学会がこの分野を異端視しており、特に若手の研究者が取り組むには研究条件からみて著しく困難である、また、日本がこの分野の取り組みに不熱心なことへの海外からの批判にたいする対応など、先駆者としての著者の体験、考察、主張が随所に見られ、リアリティーが強く感じられる。

第2章の「宏観異常概観—地震別ケース・スタディー」は、(1)日本の大地震、(2)中国の大地震、(3)アメ

リカ・旧ソ連・イタリアなど、それぞれ個別の大地震と宏観異常の関連が記述された章である。特に、日本の大地震については、力武が1970年代以降に記録調査やアンケート調査などで収集したデータが基礎になっている。宏観異常は多くのノイズを多く含むとの認識から、真のシグナルを抽出するために著者は幅広いデータをより多く収集することを試みている。ただし、兵庫県南部地震の宏観異常には弘原海(1995)、佃(1995a,b)が引用されている。

各地震の宏観異常は動物、土地変動、鳴動、発光現象、地下水・温泉異常、異常電磁放射など幅広い宏観異常を網羅的に取り上げ、これら異常の報告件数と先行時間のデータをもとに、データ数と先行時間($\log T$)の関係や震央距離との関係(地図とグラフ)が図で示され大変理解しやすい。ここで驚くべきことは、時と場所を異にした世界中の大地震の宏観異常現象が著しく共通したものであることである。

第3章の「宏観異常概観—分類と特性—」は、このような日本および世界の大地震の宏観異常を種類別に分類し、その内容をより深く考察している。宏観異常についてなじみのない読者が具体的な事例を詳細に知り、貴重な知識を得るのに役立つ。この章では次の9分類項目について記述されている。①土地変形、②鳴動、③前震、④動物異常行動、⑤発光現象、⑥地下水・温泉、⑦異常気象、⑧異常電磁波、⑨超能力である。

ここで引用された資料は、年代や地域とは一応独立した大地震の宏観異常のデータを取り扱っているが、基本的には大地震の規模(M)、異常出現の震央距離(D)、先行時間 T (日単位の対数 $\log T$)が明らかなるものを出来る限り集め、宏観異常の種類とそれぞれの関係グラフを図示するよう努力している。興味ある例として、 M - $\log D$ グラフでは、 M の大きな地震ほど遠くまで前兆が出現する傾向がある(ほ乳類、鳥類、魚類、ヘビ・ミミズ・昆虫など)。また、 M と $\log T$ は無関係であるが、 T の分布のピークが1日前であるなど興味ある結果が示されている。

第4章の「宏観異常の特性と地震予知への応用」では、従来、宏観異常のデータが地震後に収集されたものが多く、現象の理解には不十分である。この点を補うために、地震前に積極的に収集されたデータや実験について注目し、議論している。日本の研究例として、(1)東京水産試験所のナマズの研究、(2)ナマズと電器の関係、(3)電気刺激と動物行動の池谷グループの研究例を紹介している。(4)アメリカの研究例として、チンパンジーの不安度、ネズミの活動度なども紹介する。(5)動物異常レベルのモニターリング可能な事象として、乳牛のミルク生産量調査、鶏卵生産量調査、漁獲量調査、動物の鳴き声調査な

どが候補として指摘されている。

第5章の「地球科学的前兆との対比」で、著者は世界中の地球科学的前兆事例を収集し、前兆事例カタログ(力武, 1985)や「地震前兆現象のデータベース」(1995)などとして発表している。精密機器による地球科学的前兆現象と住民観察による宏観異常との相互の関連性を議論できる数少ない科学者である。兵庫県南部地震以後、宏観異常に強い関心を抱く一般市民が急増し、科学者の中にも実験的な検証を含めて、この分野を志す人が次第に増加しつつある。この本は、現在から将来にわたって、一般人から専門家まで、地震予知に関心を抱く若者の教育や地震予知・防災に取り組む専門家の卵にとって必要不可欠な情報源になるであろう。

おわりに(書評者の感想)

① 世界中で広域的に居住する住民が宏観異常現象の潜在的なセンサーであり、時代を超え文化を越えて、紀元前から今日まで「日頃経験しなかった異常」として世界中で報告されている。

② しかし住民個人としては、宏観異常の発生は突発

的、局所的、生涯に多くて数回といった希少性から、統計学に上るような組織的な収集は大変困難である。特に地震発生という境界条件が未知での地震前収集は難しく、観察する住民には想像を超える苦難をしいる。地震後の収集データでは、ノイズを考慮して取り扱えば検証学的には利用できても予知には役立たない。

③ 地震前に収集するには、一つは、1970年代の中国国家地震局のような組織集中と警報活用力の絶対化が必要であろう。現在の日本では、国家レベルの東海地震や南関東地震の予知体制がその一例であろう。その他として、民間レベルや学識ボランティアによるインターネットを活用した住民参加の情報収集と地震危険予報システムが有効と思われる。

④ 宏観異常は地域住民による観察情報だから本来公開性を持ち、それ故対応に自己責任が成り立つ。問題は、その信頼性を何処まで高めることが出来るか、それこそ科学者の責任である。その意味でも、この書物は価値が高い。

<近未来社, 1998年4月, A5判, 245頁, 本体3048円>

執筆紹介

<掲載順>

氏名 有馬朗人

[ありま あきと]

現職 文部大臣

略歴 東京大学理学部物理学科卒業、理学博士、東京大学理学部助教授、教授、大型計算機センター長、理学部長、東京大学総長、理化学研究所理事長を経て参議院議員

著書『エッシャー—シンメトリーの世界—』(サイエンス社)、『原子と原子核』(朝倉書店)、『量子力学』(朝倉書店)、『物理学は何をめざしているのか』(筑摩書房)、『大学貧乏物語』(東京大学出版会)他



氏名 神沼克伊

[かみぬま かつただ]

現職 国立極地研究所教授
理学博士

略歴 東京大学大学院理学研究科博士課程修了、東京大学地震研究所助手を経て現職

研究分野 固体地球物理学

著書『極域科学への招待』(新潮社)、『南極の四季』(新潮社)、『南極100年』(ほるぶ社)、『南極情報101』(岩波書店)、『北極・南極』(共訳、朝倉書店)等



氏名 吉田 均

[よしだ ひとし]

現職 大日本図書株式会社勤務

略歴 東海大学海洋学部海洋科学科卒業、大学院海洋学研究科修了理学修士



氏名 平原和朗

[ひらはら かずろう]

現職 名古屋大学大学院理学研究科教授

略歴 京都大学大学院理学研究科地球物理学専攻博士課程修了、京都大学防災研究所助手、助教授を経て現職

研究分野 地球物理学(地震学、マントルダイナミクス)

著書 *Seismic Tomography* (Chapman & Hall) (編著)、『地震と火山(新版地学教育講座②)』(東海大学出版会) (共著)



氏名 上田誠也

[うえだ せいや]

現職 理化学研究所地震国際フロンティア研究リーダー
理学博士

略歴 東京大学理学部地球物理学科(旧制)卒業、東京大学理学部助教授、同学地震研究所教授、東海大学海洋学部教授、Texas A&M 大学地球科学部教授を経て現職



氏名 Khaled S. Al-Damegh

現職 King Abdulaziz City of Science and Technology 天文学・地球物理学研究所研究員
理学修士(地球物理学)

略歴 King Fahd University of Petroleum and Minerals (地球物理学)卒業、Texas A&M 大学大学院修士課程修了



氏名 吉田明夫

[よしだ あきお]

現職 気象庁地震火山部地震予知情報課長

理学博士

略歴 東京大学教養学部基礎科学科卒業、東京大学理学系大学院天文学専門課程、気象研究所地震火山研究部を経て現職



氏名 大林太良

[おおばやし たりょう]

現職 東京大学名誉教授

略歴 東京大学経済学部卒業、フランクフルト大学、ウィーン大学、ハーヴァード大学に民族学を学ぶ

研究分野 民族学(文化人類学)

著書『稲作の神話』『東アジアの王権神話』(弘文堂)、『邪馬台国』(中央公論社)、『神話の系譜』(講談社)、『北方の民族と文化』(山川出版社)、『北の人 文化と宗教』(第一書房)、『東と西 海と山』『正月の来た道』『北の神々 南の英雄』『海の道 海の民』『仮面と神話』(小学館)、他多数 編著『日本の古代』中央公論社、『日本民俗文化大系』『海と列島文化』(小学館)、他多数



氏名 浅野昌充

[あきの まさみつ]

現職 宮崎県立看護大学教授(自然科学)
農学博士

略歴 東京大学農学部水産学科卒業、東京大学大学院農学系研究科博士課程修了、水産庁東北水産研究所主任研究官、北里大学水産学部助教授を経て現職

研究分野 生物学

著書『回遊魚の生物学』(共著)



学会出版センター),『海洋牧場—マリーナランディング計画』(共著,恒星社厚生閣)等

氏名 長瀬和雄

[ながせ かずお]



現職 神奈川県温泉地学研究所所長,横浜国立大学教育学部非常勤講師

理学博士,技術士(応用理学)

略歴 東京教育大学理学部地学科卒業,大阪府立池田高等学校,(財)能力開発研究所,神奈川県立博物館,神奈川県温泉地学研究所研究部長を経て現職

研究分野 地下水学,温泉学,応用地質学

著書 『応用地質学』(共著,国際科学振興財団),『名水を科学する』(共著,日本地下水学会)

氏名 長能正武

[ながのう まさたけ]



現職 竹中工務店・技術研究所,基礎研究部・主任研究員

技術士;応用理学

略歴 北海道大学理学部地球物理学科卒業,北海道大学工学部建築工学科助手を経て現職

研究分野 地震防災

著書 『阪神・淡路大震災調査報告書—共通編3』(編集担当,分担執筆;建築学会ほか),*EARTH-QUAKE MOTION AND GROUND CONDITIONS*(分担執筆;建築学会),『1989年ロマンプリータ地震被害調査報告』(分担執筆;建築学会)

氏名 力武常次

[りきたけ つねじ]



現職 財団法人地震予知総合研究振興会理事

東京大学・東京工業

大学名誉教授

理学博士

略歴 東京帝国大学理学部地球物理学科卒業,東京大学地震研究所助教授,同教授,同所長,東京工業大学理学部教授,日本大学文理学部教授を歴任,現在に至る

研究分野 地球物理学(地球電磁気学,地震予知論)専攻

著書 *Electromagnetism and the Earth's Interior, Earthquake Prediction*(いづれも,Elsevier),『地球電磁気学』(岩波書店),『なぜ磁石は北をさす』(講談社),『地震予知』(中央公論社),『地震前兆現象』(東大出版会),『固体地球科学入門』(共立出版社)他

氏名 清水 洋

[しみず ひろし]



現職 九州大学理学部附属島原地震火山観測所教授
理学博士

略歴 東北大学理学部天文及び地球物理学科第二卒業,東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻博士課程修了,九州大学理学部助手,同助教授を経て現職

研究分野 地震学,火山物理学

著書 *Unzen Volcano, the 1990-1992 Eruption*(分担執筆;西日本新聞社及び九州大学出版会)

氏名 本谷義信

[もとや よしのぶ]



現職 北海道大学大学院理学研究科附属地震火山研究観測センター助手
理学博士

略歴 北海道大学大学院理学研究科地球物理学専攻修士課程修了

研究分野 地震学

氏名 植原茂次

[うえはら しげつぐ]



現職 財団法人地震予知総合研究振興会副首席主任研究員
工学博士

略歴 山梨大学工学部土木工学科卒業,建設省採用,北海道開発局建設部,科学技術庁資源調査所調査官,企画課長,第一調査グループ主任調査官,同防災科学技術研究所研究部長,所長を経て1996年退官以後現職

研究分野 水文・水資源,防災一般,リモートセンシング

著書 『災害の事典』(朝倉書店,共著),『豪雨・洪水防災』(白亜書房,共著),『リモートセンシング概論』(朝倉書店,共著)

氏名 柳川喜郎

[やながわ よしろう]



現職 御嵩町長

略歴 名古屋大学法学部法律学科卒業,NHK入局,東京本局社会部勤務,ジャカルタ支局長,ニューデリー支局長,解説委員を経て現職

研究分野 防災,環境,廃棄物

著書 『最後の大陸に行く』『桜島噴火記』(NHK出版),『火山列島日本』『情報産業の未来像』(日刊工業新聞社,共著)

氏名 池田安隆

[いけだ やすたか]



現職 東京大学大学院理学系研究科助教授

理学博士

略歴 東京大学大学院理学系研究科博士課程修了

研究分野 変動地形学

著書 『活断層とは何か』(東京大学出版会,共著)

氏名 河田恵昭

[かわた よしあき]

現職 京都大学防災
研究所巨大災害研究
センターセンター
長・教授,大阪大学,
関西大学,各非常勤講師
工学博士



略歴 京都大学工学部土木工学科卒業,同大学院工学研究科博士課程土木工学専攻修了,京都大学防災研究所助手,助教授を経て現職

研究分野 巨大災害,都市災害,総合減災システム,河川・海岸災害,自然災害論

著書 『水循環と流域環境』(編著,岩波書店),『海底地盤』(共著,地盤工学会),『地球温暖化の沿岸影響』(共著,土木学会),『都市大災害』(近未来社),『地域防災計画の実務』(共著,鹿島出版会),『大震災以後』(共著,岩波書店)

氏名 弘原海清

[わだつみ きよし]

現職 岡山理科大学
総合情報学部教授,
大阪市立大学名誉教
授
理学博士



略歴 大阪市立大学理工学部地学科卒業,同大学院修士課程修了,姫路工業大学助教授,大阪市立大学理学部助教授,教授,理学部長を経て現職

研究分野 情報地質学,環境地震学

著書 『前兆証言1519!』(東京出版),『特集 環境情報地震学』(地震災害研究会),『地震の宏観異常と危険予知—情報ネットワーク集約による警報—』(SECURITY),『宏観異常による地震危険予知—情報地質学の歩みと展望に照らして—』(日本地質学会),『大地震の前兆現象』(河出書房新社)

ご 案 内

「日本の地殻水平歪図」の複製頒布について

このたび、財団法人 地震予知総合研究振興会におきましては、建設省国土地理院、東京大学出版会および活断層研究会のご好意により、「日本の地殻水平歪図」を複製して一般の専門家の方々に提供することのご承認を得ることができました。

本図は、建設省国土地理院が1883年(明治16年)に日本全域にわたって測量を開始して以来、約数110年間の測量成果の集大成であり、「日本の地殻水平歪図」としてとりまとめられたものです。また本図は、日本全域にわたる地殻の歪が活断層とともに重ね合わせて印刷されておりますので、わが国の地震予知研究および地震防災分野の専門家にとって貴重な資料ではないかと存じます。

本図は100万分の1の歪図、3面ずつ2期間、計6面からなっています。

- ① 最近約100年間(1883年~1994年)の水平歪
(1)北海道,東北地方 (2)関東,中部,近畿地方及び東北,中国・四国地方の一部 (3)中国・四国,九州地方
- ② 最近約10年間(1985年~1994年)の水平歪
(1)北海道,東北地方 (2)関東,中部,近畿地方及び東北,中国・四国地方の一部 (3)中国・四国,九州地方

いずれも赤と青の直線の長さと同じで、歪の大きさと向きをあらわし、緑色で活断層の位置を示しています。

なお、1987年(昭和62年)に「日本の地殻水平歪」を発行しております。本書は、1883-1985年までの約100年間にわたる測量成果で、今回が「100万分の1」の図に対し、本書の図は「20万分の1」で、全国を約100等分して構成されており、実費頒布しております。

- 頒布実費 9,000円(今回「100万分の1」の図)
● “ 20,000円(前回「20万分の1」の図)

財団法人 地震予知総合研究振興会

ADEP情報

雲仙火山：科学掘削による 噴火機構とマグマ活動解明 に関する調査

雲仙普賢岳が1991年6月、大火砕流の発生によって多くの犠牲者を出したことはまだ記憶に新しいが、1995年3月以降火山活動は平穏となり現在に至っている。いまこの火山の地下をボーリングで掘削し、火山をめぐる多くの謎を解明しようという計画が科学技術振興調整費で提案されている。当地震予知総合研究振興会ではそのFS（可能性研究）を平成10年度委託調査として実施した。以下にその概要を述べる。

雲仙火山は日本列島の中でも特異な、地溝帯の中で活動を続けている火山である。北九州の別府、阿蘇、島原に至る東西方向のゾーンは南北

に広がる力が働いており、雲仙火山周辺は約50万年前から毎年平均して2mmほど沈降している。つまり、この一帯は沈下しながら、その中に火山が成長していることになる。

1990年に始まった今回の活動は火砕流、土石流、降灰などを伴い甚大な被害をもたらした。しかし、火山の活動そのものは大規模な爆発や溶岩流もなく、きわめて静かな活動であった。雲仙岳の過去の活動には爆発を伴う噴火活動もあったらしい。

噴火の様式はマグマの組成や粘性によるといわれているが、今回の溶岩は過去の溶岩の組成とあまり違ってない。また大爆発を起こしたフィリピンのピナツポ火山ともほぼ同じであった。火山活動には溶岩の組成とともに、マグマが火口まで上昇する過程が大きく関わっていることが、最近の研究で分かってきた。マグマが上昇する経路（火道）で、水や塩素などの揮発性成分を散逸したり、取り込んだりすることが、静かな活動か、爆発的な噴火かを決定していると推定される。

この火山は活動の初期から各機関が稠密な観測網を敷いて各種の調査、研究が行われた。とはいえ、実際に地下に何が、何が起っていたかはほとんど分かっていない。ボーリングによって地下の物質を入

手し、地下で各種の観測データを得ることは火山の噴火機構、山体構造の詳細を知る上で有力な決め手になる。

掘削の方式としては、火道掘削と山体掘削の二つを予定している。火道掘削は山頂近くの山腹から斜めに約2km、ボーリングして火道を横切るように掘り進める。この掘削によって火道を構成する物質を手に入れ、マグマの上昇過程を解明できる。

山体掘削では山麓から垂直に500～1500m掘り進める。これによって雲仙火山の形成の歴史、地下構造を知るための重要なデータ、情報が得られるものと期待される。

これらの掘削では試料の入手とともに地下において種々の測定が実施される。このうち地震、地殻変動、温度、流体化学成分などはやや長期間の継続的な観測を計画している。

実際に掘削が着手されるまでには多くの課題が横たわっている。高温条件下での掘削・計測技術の検討、掘削最適地点の調査・選定、機材運搬・人員アクセス手段の確保、掘削に使用する大量の水の入手、及び種々の許認可の取得などである。

噴火災害を軽減するためにも、火山の噴火様式の違いをもたらす要因、過去の活動経過と現在の状況との関連等を知ることは重要である。この計画の実現を期待したい。[KB]

編集後記

このごろは、シミュレーションという言葉が多く耳にする。このシミュレーションの多くは、コンピュータ上で、物理的量和それらを支配する法則を数値的に処理して、結果を数値や映像として見るものであり、かなり簡単なものから、非常に高度なものまで多くの分野で行われている。例えば、数値化された地下構造と、震源のモデルを与えて地表の地震動を計算したり、大洋の深さデータと地震による海底の変動を与えて海岸に達する津波の挙動を求めたりするシミュレーションは、普

通に行われている。

本号では「地震発生サイクル」に関するシミュレーションが取り上げられた。その1は、平原先生の地震を発生するすべり面での摩擦構成則をシミュレーションに取り入れるための基礎的な解説であり、その2は、吉田先生のシミュレーションの結果を具体的に“東海地震”の予知にどのように生かしていくかを解説されたものである。この種のシミュレーションは地震学の分野でも現在まだ発展途上にあるもので、今後さらに発展して、より現実的なモデルが確立されることが待たれる。[A]

地震ジャーナル 第26号

平成10年12月20日 発行

発行所 ☎101-0064
東京都千代田区猿樂町1-5-18
☎ 03-3295-1966
財団法人
地震予知総合研究振興会

発行人 萩原尊禮

編集人 力武常次

本誌に掲載の論説・記事の一部を引用される場合には、必ず出典を明記して下さい。また、長文にわたり引用される場合は、事前に当編集部へご連絡下さい。

●製作/ (財)学会誌刊行センター