

今後、各研究が進むにつれてここに書かれた内容がさらに具体的な行動計画に結びついていくとすれば、南海地震の発生予測、被害軽減策は成功を収めることになるだろう。

## 1. 南海トラフ沿いに起きる次の巨大地震

安藤 雅孝\*

東海沖、紀伊半島沖、四国沖を走る南海トラフに沿って、フィリピン海プレートはユーラシアプレートの下に沈み込む。フィリピン海プレートはふだんはユーラシアプレートを一緒に引きずり込む。この引きずり込みが限界を越えると、巨大地震が発生する。これらの巨大地震のうち、最新のものは1944年東南海地震と1946年南海地震である。684年白鳳の地震以来、11回の巨大地震の発生が歴史に残されている。

南海トラフ沿いでは、次の巨大地震が起きるのは近いと言われている。南海トラフに次に起こる地震は、どのくらい近いのか、その時期推定の幅はどの程度なのか、その大きさと破壊域の位置の予測の幅は？これらの問題について、一問一答形式で議論を進めてみる。

### 1.1 次の地震の発生時期の予測

(1) 問：南海トラフ沿いに、巨大地震\*\*が同じ断層に繰り返し発生してきた証拠は？

答：同じ断層面上に地震が繰り返され、その変形が地形にまで残されるほど成長すると、活断層と認識されることが多い。岐阜県の北部を流れる高原川は、跡津川断層に2.7 kmも鉤型に曲げられている。これはみごとな地形で、断層によるずれとみればすぐに理解できる。2.7 kmの屈曲は少なくとも数百回の地震が繰り返し跡津川断層上に発生したために生じたものである。このように繰り返し地震が発生するのは、プレート境界でも同様である。南海トラフで繰り返し巨大地震が発生したことは歴史資料から明らかである（例えば、Imamura, 1930; Ando, 1975; 寒川, 1992; 宇佐

美, 1996)。また隆起海岸の地形学的な研究からもこれは裏付けられている（吉川, 1964; 米倉, 1968)。最近では、考古遺跡の発掘調査から得られた液状化現象（寒川, 1992, 図1-1)や津波堆積物（佃・他, 1999)の年代決定が行われ、地震の

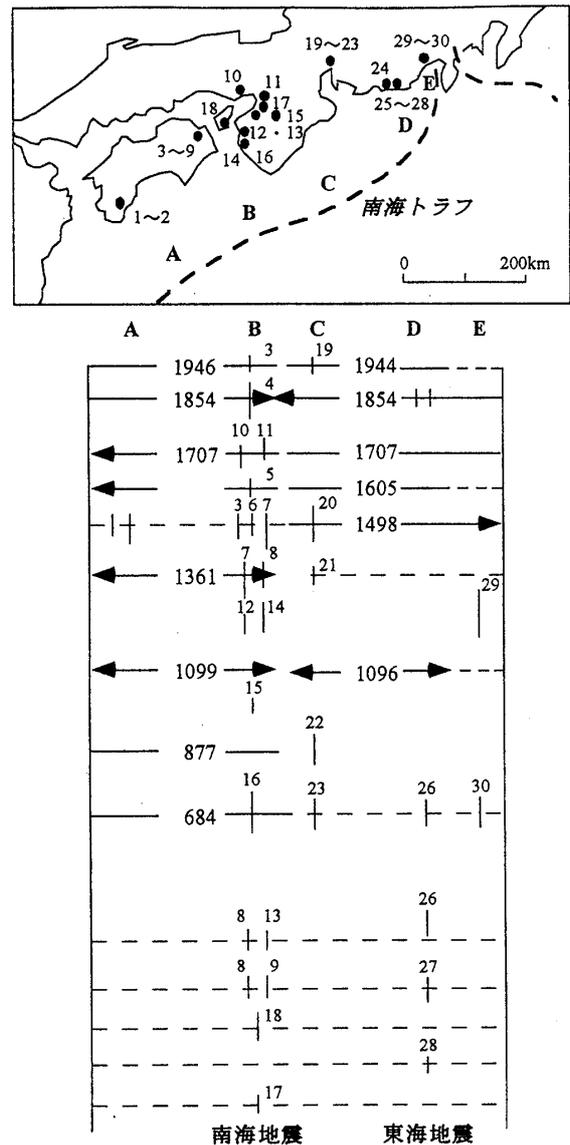


図1-1 南海地震と東海地震の発生時期. 西暦は資料から求めた発生時期. 縦線は遺跡で検出された地震跡の年代幅を示す. 1.アヅノ, 2.船戸, 3.宮ノ前, 4.神宅, 5.黒谷川古城, 6.古城, 7.中島田, 8.黒谷川宮ノ前, 9.黒谷川那須, 10.小阪邸跡, 11.池島福万寺, 12.石津太神社, 13.下田, 14.藤並, 15.箸尾, 16.川辺, 17.田井中, 18.下内膳, 19.東畑廃寺, 20.尾張国府跡, 21.門間沼, 22.地藏越, 23.田所, 24.御殿二之宮, 25.袋井宿, 26.坂尻, 27.鶴松, 28.原川, 29.上土, 30.川合 (一部著者加筆).

\* 京都大学防災研究所

\*\* マグニチュード8以上の地震

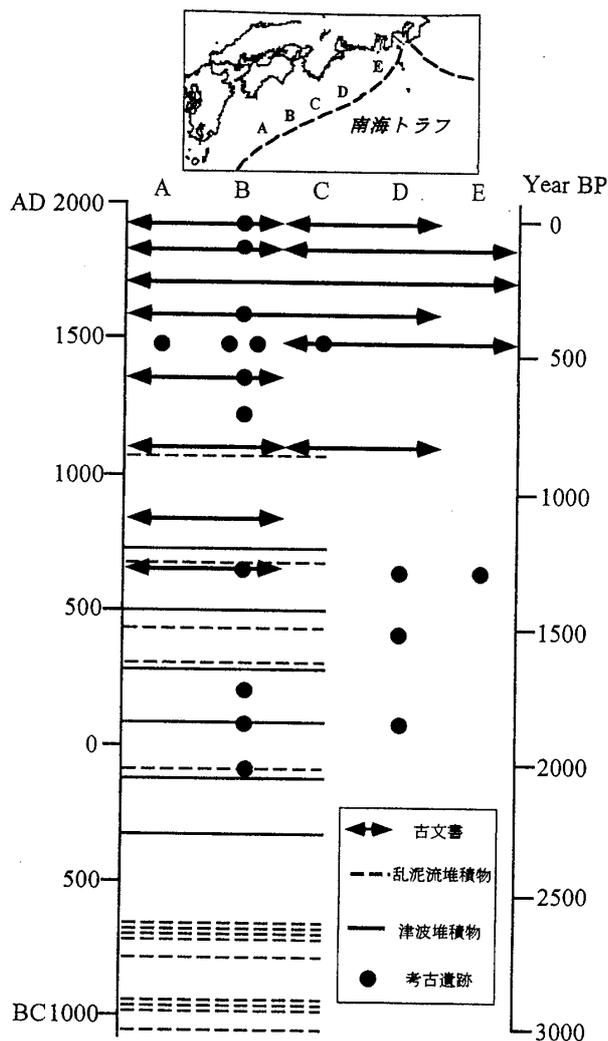


図 1-2 過去 3 千年の巨大地震の年代. 寒川 (1992) に加筆. 考古遺跡 (寒川), 津波堆積物 (佃・他), 乱泥流堆積物 (池原) に基づき筆者がまとめたもの.

編年は過去 5000 年にまでさかのぼろうとしている (安藤, 1998, 図 1-2)。

(2) 問: 南海トラフの巨大地震の繰り返し間隔には, 統計的な規則性が見られるのか?

答: 地震の繰り返し間隔のモデルとしては, 1) 規則性がまったくない (ランダム-ポアソン分布), 2) いつも同じ間隔で起こる, これら二つが極端な例として考えられる。南海トラフの巨大地震に関しては, ランダムでも等間隔でもないことが明らかであり, これは統計的にも裏付けられている (島崎・他, 1998)。通常はこれら二つの型の間と考えられる。島崎・他によれば, 歴史的に知ら

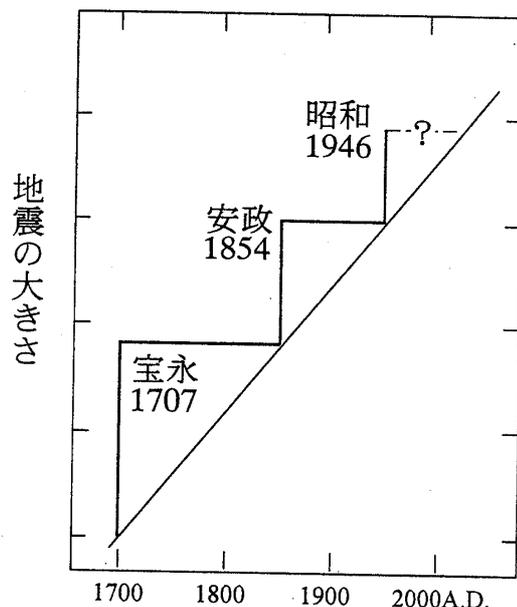


図 1-3 時間予測モデルによる, 次の地震までの間隔. 地震の大きさは相対的なものである (Shimazaki and Nakata に筆者加筆).

れている地震の間隔に対しては, 対数正規, 二項分布, ワイブル分布などいずれでも, モデル間に優劣はみられないとのことである。島崎・他は, 南海地震から発生年代が分かっている内陸地震までも含めて, 標準偏差を 0.23 と求めている。したがって繰り返し間隔のバラツキはそれほど高いものではないらしい。

(3) 問: 次の南海地震までの時間は?

答: 時間予測モデル (time predictable model: Shimazaki and Nakata, 1980) を採用すると, 前の地震 (1944 年東南海地震や 1946 年南海地震) から 70 年程度と短くなる可能性がある (安藤, 1998, 図 1-3)。時間予測モデルによると, 次の地震までの時間は, 前回の地震の大きさにより決まる。これら二つの地震のマグニチュードは 8 を越える巨大地震に分類されるが, それ以前の地震である, 1854 年安政地震や 1707 年宝永地震と比べると, “小粒” である (例えば Ando, 1975)。震度分布を比べると南海地震は安政地震と比べてコンター一つ分だけ小さな方へずれている。つまりの南海地震の際に震度 5 のところは安政地震では震度 6 であった。また, 1946 年南海地震の有感

余震数が極端に少なかったことや津波も小さかったことが知られている。地震の大きさを比較するには、地震モーメントないし、断層面上のすべりを比較する必要がある。海底付近で観察される土地隆起や沈降、それに津波の浸水波高がなかでも信頼性が高い。前者は観察される場所が限られているが、津波は広域にわたり記録が残っている。ただしこの場合には繰り返し発生する地震は characteristic 地震\*であることが要求される。

(4) 問：ところで時間予測モデルとは？

答：次の地震までの間隔は、前の地震の大きさに比例するとの考え。前の地震の大きさが何らかの方法でわかるとすれば、地震予知には「明るい」モデルである。これに対照的なモデルは「すべり予測モデル」である。つまり、次の地震までの間隔が次の地震の大きさに比例するとの考えである (Bufe et al., 1977)。前の地震の際に応力 (有効応力) がゼロまで下がり、その後経過した時間が次の地震で解放される歪エネルギー (応力) に比例するとの考えである。

(5) 問：時間予測モデルはどのようにして作られたのか？

答：地殻変動の量など地震の大きさが定量的にわかる、過去の地震のデータを基に組み立てられたものである。Mogi (1985) は岩石破壊実験の結果を基に以下のように説明している。つまり、岩石の破壊強度まで応力が達すると破壊 (地震) を起こし、地震により下がった応力を回復するためには、降下した応力に比例する回復時間が必要である。1707 年宝永地震と 1854 年安政地震の間隔は 147 年であり、その後の 1946 年昭和の地震までは 92 年である。地震の大きさは宝永地震の方が安政地震より 50%ほど大きかったと推定される。「すべり予測モデル」はこれらの一連の地震発生間隔と大きさを説明することはできない。

(6) 問：時間予測モデルによる推定にはどの程

\* 断層面上のすべりが似たようなパターンを示す地震のこと。

度の幅があるのか？

答：次の地震までの間隔は目安を与えるもので、もちろん決定論的なものではない。南海地震でも古くまで逆のぼるとかなりバラツキがあり、2～3割程度のバラツキでは収まらない。Kumagai (1996) は、過去 1000 年の地震に対して発掘調査の成果 (寒川, 1992) を取り入れれば時間予測モデルでも説明可能と考えている。

(7) 問：南海トラフ沿いの巨大地震では連鎖的に発生する可能性はあるのか？

答：東から西へと連鎖的に発生した例は 1944 年東南海と 1946 年南海地震、1854 年に 32 時間おいて発生した安政地震、1360 年の地震と 1361 年の地震、1096 年と 1099 年の地震と 4 組の例が知られている。1707 年宝永地震は東と西に同時に起きたので連鎖的に起きたかどうかはわからない。

## 1.2 過去の南海地震

(1) 問：南海地震の歴史に見落としはないのか？

答：1605 年慶長地震より古い地震の間隔は、200 年程度となり長い。実際に間隔は長かったとの考えもあるが、単に歴史から漏れているとの考えもある。最近話題になったことは、1498 年 (明応) の地震は、西日本でも起きたとの考えが出された (これは後に否定された)。さらに上記のように、史料に対する新たな解釈により新しい「南海地震」が書き加えられることがある (例えば 1099 年康和地震、下記の間い参照)。さらに寒川 (1992) のように、発掘調査を通して新たな地震の発見がある。

(2) 問：今後、古文書から過去の南海地震が見つけだされる可能性は？

答：都司 (1999b) の資料を下記に引用する。「平安鎌倉時代の日記でいまもおりおり京都奈良の新資料が見いだされることがある。ただし、江戸時代の事例のような高い期待は寄せられない。例：「外記日記」(前田育徳会)、「実躬卿記」(京都静嘉堂文庫)、また、荘園支配関係の資料に、四国紀伊

半島の異変を記す記録が発掘される可能性がある。1099年康和地震が京都・大阪のローカルな地震ではなく南海地震であると認定されたのも東洋文庫内の「紙背文書」によるものであった。貴族の荘園支配文書、および寺院文書が唯一期待できる史料源である。中国、韓国の記録が傍証する可能性がある。」(都司, 1999b)。

(3) 問：古文書以外に過去の地震を読みとる方法はないか？

答：考古遺跡からの液状化現象から数多く地震が読み取られており、地震の位置や年代の推定に役立っている(例えば寒川, 1992, 1997)。これらについては、月刊「地球」号外24巻「南海地震」にまとめられているので参照していただきたい。また津波がもたらす堆積物、乱泥流の堆積物の年代決定が行われている。乱泥流とは、海底にたまった堆積層が、地震による強い揺れにより、崩壊を起こして流れ出したものと考えられている。四国沖には、駿河湾に流れる富士川を源流とする堆積物が多い。

(4) 問：自然現象の調査研究からは何か新しいことがわかったか？

答：高知県須崎の津波堆積物からは、ほぼ100年程度の地震が6回が見つかり、歴史地震の間隔にほぼ一致した。ここで注目することは、これらの堆積物から明らかにされた年代は、歴史資料から求められた地震間隔と近い値が得られた点であろう。つまり過去において地震の間隔が現在に比べ長かったり短かったりしたことはないとの点であろう。一方、乱泥流からは、間隔はまちまちでかなり短いものもある。年代決定の信頼性と乱泥流の起源については今後の検討が必要である。

(5) 問：過去の南海地震の共通性は？

答：1) 室戸半島や潮岬など海に突き出たところが隆起し、高知や田辺などやや陸側で沈下する地殻変動、2) 津波の襲来、3) 温泉の変化などが共通した地震現象である(宇佐美, 1996)。このような特徴を用いて、記述された地震現象から南海

地震と判断できる。

(6) 問：これら3つの特徴から南海地震はどんな地震だとわかるか？

答：陸側が海側にのし上がる低角逆断層地震の典型的な特徴を持つ。1923年関東地震、1960年チリ地震、1964年アラスカ地震などがこの例。広域に地殻変動を引き起こすことから断層の規模は数百キロメートルに達するはずである。地震前後で広域に地下水や温泉の湧水量が変わる(川辺, 1991)ことも、低角逆断層地震であることを示唆する。

(7) 問：過去の南海地震の強震動や津波は同じか？

答：地震毎に少しずつ異なるのが特徴。特に違うのは1605年の慶長の地震。津波の報告だけが残されている。1992年ニカラグア沖の地震(M8.0, Kanamori and Kikuchi, 1993)のような slow-slip earthquake ではないかとの説もある。1707年、1854年、1944年、1946年の地震では、1707年は最大、安政の地震は中規模、昭和の地震は小規模であった。断層面上のすべりの速さと大きさが異なった(Ando, 1975)のだろう。

### 1.3 次の南海地震はどのようなものか？

(1) 問：次の地震の大きさは？

答：地震の大きさは、壊れる前にわかるのか？これはまだ決着がつかない。ただし、南海トラフに沿う地震では、マグニチュード7と8の間に地震が起きていない。地震の数( $N$ )と大きさ(マグニチュード,  $M$ )の間には、

$$N = 10^{a-bM}$$

(Gutenberg-Richter の関係) が成り立つことが知られている。 $N$  はマグニチュード  $M$  以下の地震数の積算和、 $a$  は定数である。もちろん対象とする地域で、十分にサンプルできた場合の話である。図1-4は、南海トラフにおける過去100年にわたる地震の数とマグニチュードの関係を示したものである。図から明らかのようにM7と8の間に地震が起きていない。 $b$  値は一般に1に近いの

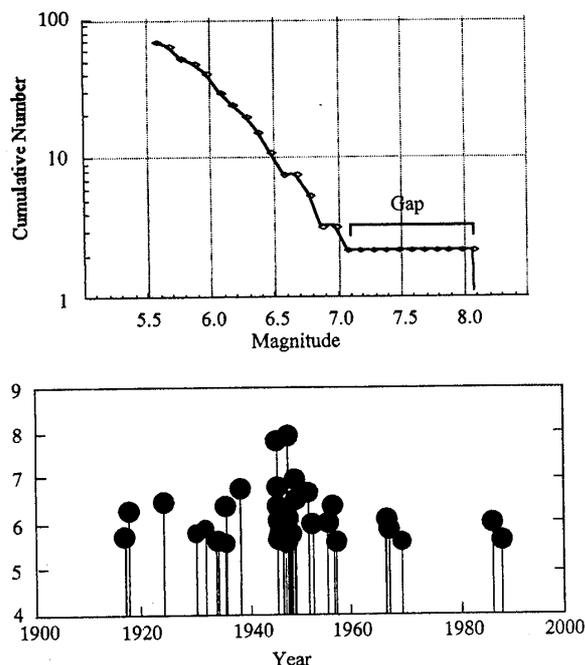


図 1-4 (上) 1900 年以降に、南海トラフ沿いに発生した  $M > 5.5$  以上の浅発地震の、マグニチュードと積算頻度の関係。マグニチュード 7 と 8 の間に地震は起きていないのが特徴。(下) マグニチュードと時間の関係。1944 年と 1946 年にマグニチュード 8 クラスの地震が起きているが、その他はすべてマグニチュード 7 以下の地震である。

で、 $M 8$  の地震が 1 個起きるときには、 $M 7.5$  は 2 個。 $M 7$  は 10 個起きるはずである。南海トラフの地震では Gutenberg-Richter の関係は成り立たない。さらに、 $M 6.5$  と  $M 7$  の間の地震はほとんどが余震である。したがって、南海トラフでは地震がはずみでまた大きくなって巨大地震に成長する、とは考えにくい。断層上の破壊がマグニチュード 7 に達したら、その後は止まらずマグニチュード 8 の大きさにまで達するのだろう。地震発生の準備ができたときに、 $M 8$  の地震が発生すると考えられる。したがって、中途半端な地震ではなく  $M 8$  以上の地震を予測する必要がある。

(2) 問：強震動と津波は過去と同じ様なものを想定する必要があるか？

答：日本の歴史上知られている大地震は、1707 年宝永の地震である。断層の長さ 600 km にわたり、ほぼ同じ時に起きたものと考えられる (10 分

以内か?)。この時の津波と強震動はかなり大きい。しかし、1946 年昭和の地震の強震動は、1707 年と 1854 年地震に比べ、小さかったようである。したがって昭和の地震を想定地震にすると、小さすぎるかもしれない。

(3) 問：次の地震が、ゆっくりとすべる「津波地震」の可能性はあるのか？

答：起こるか否かは、正直なところわからない。もし、1605 年慶長地震が津波地震で、かつ同じ断層面上に起きたならば、その可能性はある。また 1605 年の地震が海溝付近の堆積層の中に出てきた断層の可能性も否定できない (例えば 1972 年クリル地震, Fukao, 1979)。このような断層は音響反射断層からも見つけられている。この場合は、短周期地震計による観測では監視できない。広帯域地震計による監視が必要であろう。断層の破壊過程のシミュレーションから、同じ断層面上でも条件の違いにより、2 種類の地震を起こすことが示唆されている。今後の課題でもある。

(4) 問：前の地震からの間隔が 90 年より短くなる可能性はあるのか？

答：一番短い地震間隔は、1854 年安政地震と 1944 年東南海地震の 90 年間。もしこれが最短の地震間隔を与えるならば、次の地震は一番早くて 2034 年となる。歴史上は 90 年より短い例は知られていない。が、都司 (1999a) によると、1185 年の京都の地震 (宇佐美, 1996, p.36) は南海地震の一つである可能性が高いらしい。この場合、その一つ前の地震は 1099 年であり、その間隔は 86 年となる。今後、1185 年の地震については検討されその詳細が明らかになるであろうが、歴史資料から新しい発見がまだあり得るのは興味深い。都司によれば 1185 年の地震の規模は極めて大規模である可能性がある。その次の南海地震が 1361 年 (間隔 176 年) であることを考えると、時間予測モデルに適合すると指摘している。

(5) 問：南海トラフ沿いの巨大地震の発生には季節性や他の現象との関連があるのか？

答：684年の白鳳の地震以来11個の地震が発生しているが、そのうち5個は12月に発生している。特に4月から8月までの5カ月間は1個も発生していない。季節性についての議論は昔からあるが、その妥当性とメカニズムは明らかでない。岡田(1978)は、南海トラフの $M > 6.5$ の地震を1870年から調べて、地震の発生と潮流の関係があると指摘している。それによると黒潮は大蛇行期と直進期とを繰り返すが南海トラフの大地震は直進期に発生しやすいとしている。大蛇行期には東海沖で海底面への垂直圧力の変化が生じる。

(6) 問：現在の歪み蓄積の状況は？

答：海洋プレートの沈み速度は極めて一様であることが知られている(Ozawa et al., 1999; Kato, 1998)。プレート境界面の応力蓄積はほぼ時間に比例するものと考えられる。したがって応力蓄積に急激な変化がないものとするれば、 $M 8$ の地震までに必要な準備にはある程度の時間が必要である。これが、地震間隔に最小値を持つ理由であろうと考えられる。

(7) 問：次の南海地震は予知可能か？

答：可能性はあるだろうが、本当のところはわからない。現在のところ、南海地震に描くシナリオは、東海地震予知で想定されている(吉田・他, 1998)ものと同じである。直前のゆっくりした変動を種々の手法を用いて捉えることが必要であろう。東南海地震前には、静岡県掛川でゆっくりした変動(1~2日)が起きたことが、精密測地測量から知られている(Mogi, 1986)。これが短期予知の可能性の一つの根拠となっている。ただし、東南海地震の最初の破壊(震源)は新宮市の沖だから、掛川の直下の動きが新宮市付近の破壊を誘発したとは考え難い。ゆっくりとした変動は、掛川から新宮までの広域に起きたと考える必要がある。このような広域な「ゆっくりしたすべり」が本当に起きたのか、そして次回も起きるのかを検討するのは今後の課題であろう。

## 参考文献

- Ando, M.: Source mechanisms and tectonic significance of historical earthquakes along the Nankai Trough, Japan, *Tectonophysics*, 27, pp.119-140, 1975.
- 安藤雅孝：南海地震予知, 新地震予知研究, 月刊地球号外, 20, pp.71-76, 1998.
- Bufe, C. G., P. W. Harsh and R. O. Burford: Steady-state seismic slip - a precise recurrence model, *Geophys. Res. Lett.*, 4, pp.91-94, 1977.
- Fukao, Y.: Tsunami earthquakes and subduction processes near deep-sea trenches, *J. Geophys. Res.*, 84, pp.2303-2314, 1979.
- 池原 研：深海底タービダイトからみた南海トラフ沿いの巨大地震の発生間隔, 月刊地球「南海地震」, 号外 24, pp.70-75, 1999.
- Imamura, A.: Topographical changes accompanying earthquakes or volcanic eruptions, *Publ. Earthquake Invest. Comm. Foreign Languages*, 25, pp.1-143, 1930.
- Kanamori, H. and M. Kikuchi: The 1992 Nicaragua earthquake; a slow tsunami earthquake associated with subducted sediments, *Nature*, 361, 6414, pp.714-716, 1993.
- Kato, H.: Eastern Asia Natural Hazards Mapping Project, *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 49, 2-3, pp.107-123, 1998.
- 川辺岩夫：地震に伴う地下水, 地球化学現象, 地震2, 44, pp.341-364, 1991.
- Kumagai, H.: Time sequence and the recurrence models for large earthquakes along the Nankai Trough revisited, *Geophys. Res. Lett.*, 23, pp.1139-1142, 1996.
- Mogi, K.: *Earthquake Prediction*. Academic Press, New York, 1985.
- Mogi, K.: Strain accumulation and rupture processes in the subduction zone along the Nankai-Suruga trough in western Japan, in "Earthquake Source Mechanism", ed. by S. Das et al.: Maurice Ewing Series 6, AGU, Washington D. C., pp.183-194, 1986.
- 岡田正実：黒潮変動が本州南岸大地震発生の trigger として作用する可能性, 地震学会講演予稿集, No 1, 80, 1978.
- Ozawa, T., T. Tabei, and S. Miyazaki: Interplate coupling along the Nankai Trough off Southwest Japan derived from GPS measurements, *Geophys.*

Res. Lett., 26, 7, pp.927-930, 1999.

寒川 旭：地震考古学，中公新書，中央公論社，251 pp., 1992.

寒川 旭：揺れる大地 日本列島の地震，同朋社出版，272 pp., 1997.

Shimazaki, K and T. Nakata: Time-predictable recurrence model for large earthquakes, Geophys. Res. Lett., 7, pp.279-282, 1980.

島崎邦彦・河瀬和重・佐竹健治・鈴木康弘・尾形良彦・井元政二郎・隈元崇：地震の繰り返し発生に関する統計モデルの検討，日本地震学会 1998 年度秋季大会講演予稿集，p.136, 1998.

都司嘉宣：歴史上に発生した津波地震，月刊地球，16, pp.73-85, 1994.

都司嘉宣：南海地震とそれに伴う津波，月刊地球「南海地震」，号外 24, pp.36-49, 1999a.

都司嘉宣：「南海地震」将来計画会議資料（1999 年 6 月 12 日），地震予知総合研究振興会，東京，1999b.

佃 栄吉・岡村 眞・松岡裕美：過去約二千年の地層に刻まれた地震，月刊地球「南海地震」，号外 24, pp.64-69, 1999.

宇佐美龍夫：新編日本被害地震総覧 [増補改訂 416-195]，東大出版会，493 pp, 1996.

宇佐美龍夫：「日本の歴史地震史料」拾遺，日本電気協会，512 pp., 1998.

米倉伸之：紀伊半島南部の海成段丘と地殻変動，地学雑誌，77, pp.1-23, 1968.

吉田明夫・松村正三・野口伸一・鷲谷 威・加藤尚之：プレート沈み込み境界巨大地震の震源域とその周辺における応力の蓄積・解放過程の解明に関する研究—東海地震の予知精度の向上に向けて—，月刊地球，号外 20, pp.62-65, 1998.

吉川虎雄：土佐湾北東岸の海成段丘と地殻変動，地理学評論，37, pp.627-648, 1964.

## 2. 南海地震津波の特徴と被害軽減対策

村上 仁士\*・上月 康則\*

### 2.1 まえがき

南海道沿岸の集落では，海溝性の巨大地震に伴う大津波により幾度となく壊滅的な被害を受けてきた。なかでも同じ集落が繰返し大きな津波被害を受けていることが目立つ。その直接的な原因は，

地震発生から津波の第 1 波の到達時間が早かったことや津波高が大きく，陸上に氾濫して物的または人的被害を与えたことと考えられる。同じ集落で繰返しこうしたことが起きるのは，津波発生の波源域が変わっても，その沿岸域に津波が集中しやすく，被害を受けやすい仕組みになっているからともいえよう。

昭和 21 年の南海地震 (M8.0) から半世紀が過ぎ，次の南海地震はこれよりも規模が大きく，次世紀の前半には起きるといわれているが，どこで起きるかわからない。

ここでは，まず過去の南海地震津波の被害状況について略述する。ついで次の南海地震津波を想定して，任意の波源域から津波が発生した場合，南海道沿岸のどの領域が危険か，津波到達時間，津波の集中度や波高の特性を基に南海地震津波の特徴を述べる。さらに人的被害予測の一例を示し，人的被害軽減対策にも若干ふれる。

### 2.2 過去における南海地震津波

#### (1) 江戸時代以前の津波

684 年の白鳳地震 (M8.4) では，高知で地盤沈下により 12 km<sup>2</sup> が海中に沈み，この地震に伴う津波で貢物を運んでいた船が多数沈没したと日本書紀に記され，記録に残る最古の津波が高知を襲った。

887 年の仁和地震 (M8.6) でも，四国，紀伊半島，大阪湾一帯を大津波が襲い，多くの溺死者を出した。1099 年の康和 (承德) 地震 (M8.0) では，高知市潮江の田畑が 10 km<sup>2</sup> 水没している。津波の記録はないが地震や地盤沈下の規模から考え，津波も起きたと推測できる。1361 年の正平地震 (M8.4) による津波は，大阪，高知，徳島各沿岸に大きな被害を与えている。

徳島県海部郡由岐では，1,700 戸の家屋の流失が太平記にも記され，高知県香美郡の正興寺でも津波で古文書が流失した記録が残っている。

#### (2) 江戸時代以降の津波

江戸時代以降になると各地に多くの被害記録が残されているため，ここでは四国の津波の人的被

\* 徳島大学大学院工学研究科エコシステム工学専攻