

地下水等総合観測による 東海・東南海・南海地震予測

小泉 尚嗣¹⁾・高橋 誠¹⁾・松本 則夫¹⁾・佐藤 努²⁾・大谷 竜¹⁾
北川 有一¹⁾・板場 智史¹⁾・梅田 康弘¹⁾・武田 直人¹⁾

1. はじめに

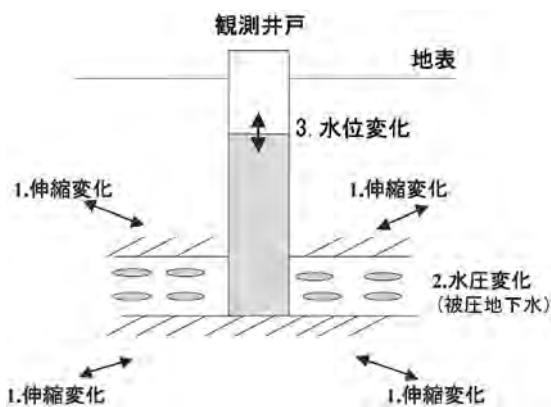
最近の地震予測の研究においては、理論による推定と観測結果とを相互に比較検討して、理論・観測両面での発展を図りつつ、地震現象に対する理解を深めていくということが重要視されています。地下水観測による地震予測の手法は、地殻変動(地面の伸縮、隆起・沈降等)の観測・解析を用いた手法に比べて研究の歴史が浅く、地震発生と結びつける理論面で弱点がありました(小泉, 1997)。しかし、地下水位変化は地殻変動と密接な関係がありますので、地下水位変化を地殻変動に換算したり、あるいは、地殻変動を地下水位変化に換算したりして、我々は地震との関係を考えています。

水を通さない層(不透水層)で挟まれた地層や岩の割れ目系の中にある水を被圧地下水と呼びます。一般に温泉水や深い地下水は被圧地下水です。被圧地

下水は、地盤が伸縮するとそれに合わせて水圧を変化させますので、その水位変化は体積歪(地盤の伸縮)変化として扱えます(第1図)。地面は通常時も、月や太陽の引力でごくわずかに伸縮し、それを地球潮汐による体積歪変化と言います。これを利用して、地下水位の体積歪変化に対する感度を求めることができます。条件の良い観測井戸では、基準となる体積の大きさを1として一億分の1(10^{-8})程度の非常に微小な体積歪変化を地下水位変化として検出できます(小泉ほか, 2005)。

被圧地下水と違って、地盤の圧力を受けていない地下水を不圧地下水や自由地下水と呼びます。不圧地下水は、不透水層が下にあり、その上に溜まっている浅い地下水と思えば良いでしょう。不圧地下水の場合は、被圧地下水と違って水を通さない層で囲まれていませんので、地盤が伸縮しても水圧がほとんど変化しません。つまり、不圧地下水の場合は、体積歪変化に対する地下水位変化の感度は悪いことになります。しかし、海岸付近の浅い不圧地下水の場合、海水面と圧力的につりあった状況にあることから、海水面に対する相対的な地面の隆起・沈降に応じて、地表からの地下水面の深さ(水位)が低下・上昇します。すなわち、地盤の隆起・沈降が、海岸付近の不圧地下水の水位変化になり得るわけです(第2図)。この場合、不圧地下水の水位変化量は、地面の隆起や沈降の量と同じかそれ以下になります。

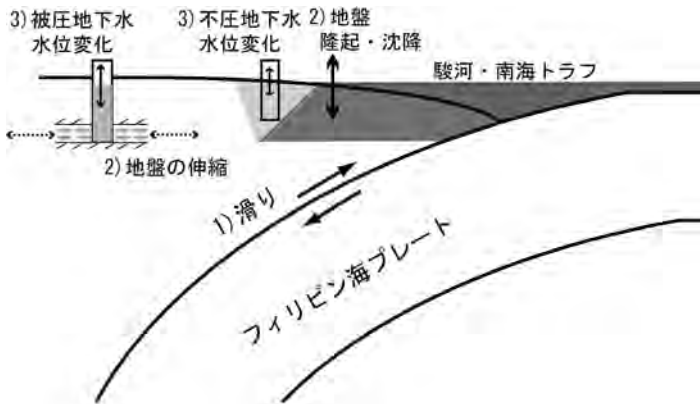
以上のような考えを前提にして、本論文では、地下水等総合観測(地下水・地殻変動・地震観測)による東海・東南海・南海地震予測について述べます。また、以下では、被圧地下水を単純に深い地下水と書き、不圧地下水を浅い地下水と書くことにします。



第1図 地盤の伸縮(体積歪変化)と被圧地下水位変化との関係を示すモデル。

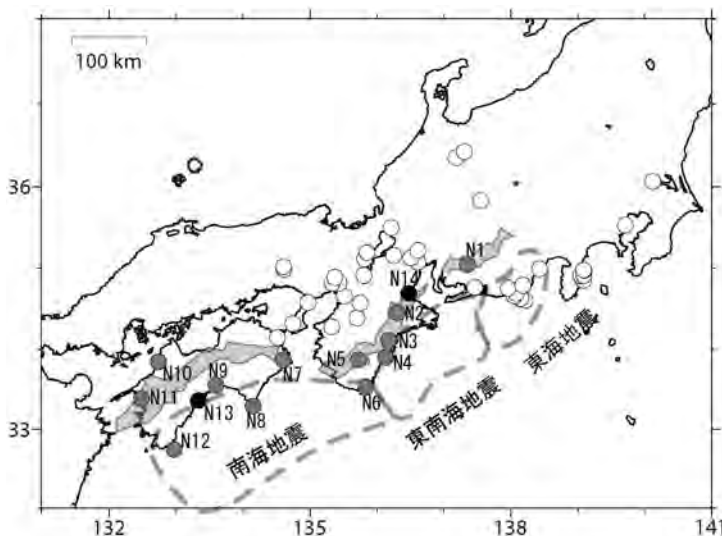
1) 産総研 活断層・地震研究センター
2) 産総研 地質情報研究部門

キーワード: 東南海地震, 南海地震, 東海地震, 地震予測, 地下水, 地殻変動, 南海トラフ



第2図

プレート境界で断層滑りがあった時の地盤の隆起・沈降と伸縮及びそれによって地下水水位変化が生じることを示す模式図。



第3図

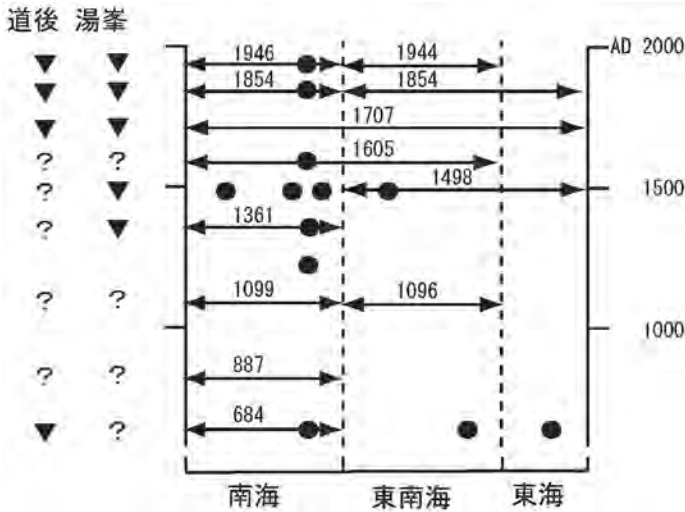
産総研の地下水等観測網(白抜き丸:従来の観測点, 灰色丸:新規観測点N1-N12, 黒丸:現在整備を行っている観測点N13-N14). 四国~紀伊半島~愛知県内陸部の灰色の領域は, 短期的ゆっくり滑り及び深部低周波微動が定期的に発生していると考えられる地域. 破線は, 東から東海・東南海・南海地震の想定震源域を示します.

2. 東海・東南海・南海地震と新規観測点

東海~四国の沖合にある駿河~南海トラフでは, 100-200年程度の間隔で, M8(マグニチュード8)クラスの巨大地震が繰り返し発生してきました(第3, 4図). 駿河トラフで生じる地震を東海地震, 南海トラフの東側で起こる地震を東南海地震, 西側で起こる地震を南海地震と呼びます. ただし, 1944年の東南海地震より前に発生した南海トラフ東側の巨大地震も, 歴史的に東海地震と呼ぶのでそれについては注意が必要です. 第4図にあるように, 最も近年に発生したものは, 1944年東南海地震(M7.9)と1946年南海地震(M8.0)で, いずれも死者・行方不明者は1,000名を超えます. この2つの地震では, 震源域が駿河トラフまで及んでいませんでしたので, 駿河トラフでの巨大地震(東海地震)が切迫しているとされ,

大規模地震対策特別措置法が1978年に制定されて国による地震予知事業が始まりました. 産業技術総合研究所(産総研:旧工業技術院)は, 当初から東海地方の地下水観測データを気象庁に提供し, 東海地震の判定を行う地震防災対策強化地域判定会の説明者として国の地震予知事業を分担してきました(小泉ほか, 2005; Matsumoto et al., 2007).

21世紀に入り, 次の東南海・南海地震の切迫性が増すと, 「東南海・南海地震に係る地震防災対策の推進に関する特別措置法」が2003年に施行され, 同地震に対する観測施設の整備が求められました. 東海地震同様, 東南海・南海地震も, 21世紀前半に日本が直面する国難と考えられたからです. このような中, 産総研は, 東南海・南海地震予測のために, 紀伊半島~四国周辺に地下水等総合観測点を2006年度から順次整備し2008年度末までに12点の整備を終え



第4図
東海・東南海・南海地震の発生履歴と道後温泉・湯峯温泉の湧水量や水位の低下。▼は低下を表し、?は、古文書に変化の有無の記載がないことを示します。●は液状化等の地震の痕跡です。寒川(1992)に加筆しました。

ました。また、東海・東南海・南海地震は一体として観測・研究すべきという観点に基づき、既存の東海地域の地下水観測点10点の高度化も行いました。四国～紀伊半島周辺においては、2009年度も引き続き新規観測点の整備を行っているところです(第3図)。

3. 地下水位による東海地震のプレスリップ検知能力

最初に述べたように、深い地下水を対象とした条件の良い観測井戸の水位データは、気象庁で使われているような体積歪計データと同様に扱えますので、気象庁が東海地震予知のために用いている体積歪データの解析手法と同じ手法で地下水位データを解析できます。

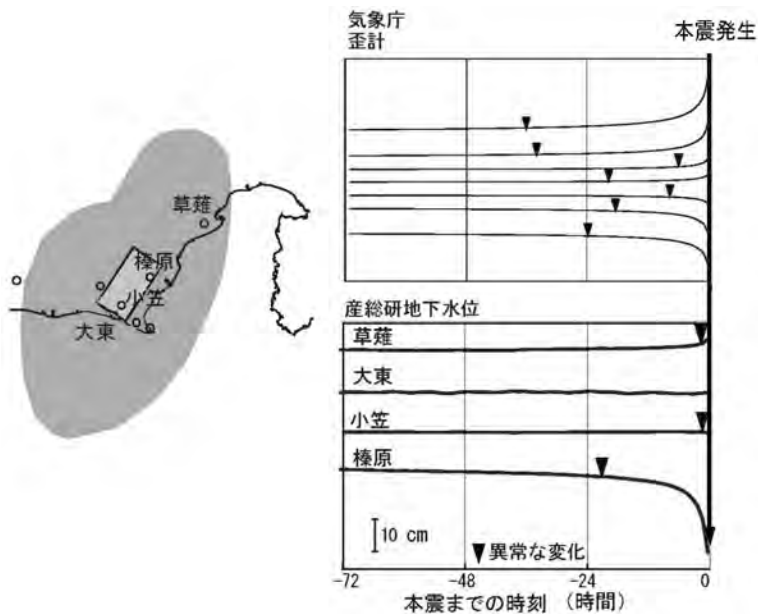
現時点で最も有望な地震の前兆現象は、地震直前に将来の地震発生域周辺で起こるゆっくり滑り(前兆滑りまたはプレスリップと呼ぶ)です。第2図は、プレート境界でゆっくり滑りが生じた時の地殻変動と地下水位変化を表した図です。地面の隆起・沈降や伸縮がどのように起こるかは、プレート境界のゆっくり滑りの場所と観測点の位置に依存します。第5図は、静岡県榛原の直下で、マグニチュード6.5の大きさに相当するプレスリップが生じた時に想定される体積歪変化と地下水位変化を示したものです。東海地方における産総研の地下水観測点の中で条件の良いものは、気象庁体積歪計に匹敵するプレスリップ検知能力をもつことがわかります(小泉ほか, 2005)。もちろん、

プレスリップの場所や大きさによって現れる水位変化は異なりますので、私たちは、東海地震の想定震源域周辺すべてで同様の計算を行っています(Matsumoto *et al.*, 2007)。気象庁の体積歪計3点で、有意な変化があり、地下水も含めた他の観測データも勘案して、それらがプレスリップによるものと判断される場合、東海地震予知情報(警戒宣言)が出されます。(気象庁, 2003)。

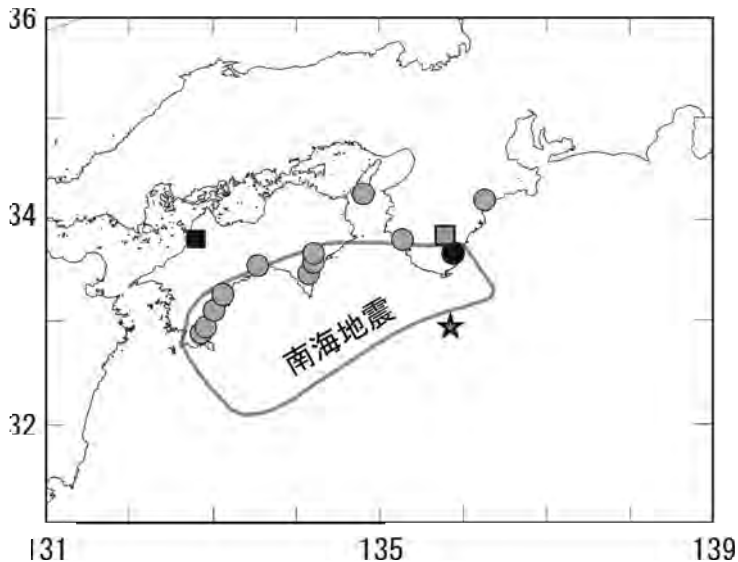
4. 東南海・南海地震予測へ

4.1 過去の南海地震における地下水変化

四国～紀伊半島の沖で発生する巨大地震である南海地震は、古くから日本の都であった京都にも被害を与えましたので、古文書によく記録が残っており、世界で最も発生履歴がよくわかっている巨大地震の一つです。古文書等の記録に基づけば、南海地震は過去8回発生しており、その中の最初のものは西暦684年に発生しました(第4図)。この8回の南海地震のうち、愛媛県松山市の道後温泉(第1図のN10付近)における水位や湧出量は4度、和歌山県本宮町湯峯温泉(第3図のN5付近)における水位や湧出量は4～5度、地震発生に伴い大きく低下しています(第4図)。ただし、それが地震前から起こっていたことなのか地震後からなのかはよくわかりません。また、1946年南海地震(M8.0)においては、紀伊半島～四国の太平洋岸の11カ所で浅い地下水(井戸水)の水位が、地震の直前～10日前に推定で数十cm以上低下したこ



第5図
東海地域の地下水観測網(○)による
プレスリップ検出シミュレーション。



第6図
1946年南海地震前の地下水位等の低下。
灰色の丸：浅い井戸水の水位が低下した
11地点，黒丸：温泉湧出量が低下した勝
浦地点，星印：1946年南海地震の震央，
実線で囲まれた部分：南海地震の想定
震源域，黒四角：道後温泉，灰色の四
角：湯峯温泉。

とが知られています(水路局, 1948, 第6図)。勝浦(第6図)では、温泉湧出量も地震の6時間前に低下しました。地下水位や温泉湧出量が地震前に低下した地点は合計12カ所で、紀伊半島～四国の太平洋岸周辺に広範囲に存在します(第6図)。ただし、水路局による調査地域は160カ所以上で、出現率としてはごく低いことになります。このような地震前の地下水位の低下は、1854年の南海地震前にも発生したことが知られています(重富ほか, 2005)。

上述のプレスリップモデルに基づいて上記の現象

を考えてみます。南海トラフのプレート境界で、南海地震の前に逆断層型のゆっくりした滑り(プレスリップ)があり、その後には本震の高速の滑りがあれば、四国や紀伊半島では、広い範囲で地震前及び地震直後に地盤が隆起し膨張します。すると、四国や紀伊半島の海岸付近の浅い地下水の水位や深い地下水である温泉水の水位は地震前に低下します。また、地震直後にもさらに大きく水位を低下させるでしょう(第2図)。

道後温泉や湯峯温泉の地震直後の水位等の低下

については、上記の考えによってある程度定量的にも説明できます(小泉ほか, 2005)。他方、浅い地下水の地震前の変化については、京大防災研(2003)のプレスリップモデル(1946年南海地震の断層の一部で、本震の10%程度の滑りが地震前に生じたとするモデル)によって定性的には説明できますが、予測される隆起量が最大でも数cm程度ですので、上述した数十cm以上という水位低下の振幅は説明できません。他方、同じモデルによる地盤の膨張は大きく、深い地下水の水位ならば数十cm以上の低下も可能です(小泉ほか, 2005)。しかし実際には、1カ所の勝浦の温泉を除いて、浅い地下水と考えられるものの水位が大きく低下しています。したがって、第5図のモデルで1946年南海地震前の地下水変化を説明するためには、プレスリップによる微小な地殻変動があることに加えて、それによって浅い地下水が大きく変化する何らかの特殊なメカニズムが必要となります。深い地下水が先に水位を低下させた後、浅い地下水から深い地下水へ水が移動し、浅い地下水も水位が低下するというのはいずれかのメカニズムです。このような特殊なメカニズムの存在する場所が限られているために、1946年南海地震前の地下水水位低下の出現率は低いのかもかもしれません。

4.2 最近発見された深部低周波微動と短期的ゆっくり滑り

最近の地震研究の進展で、東海・東南海・南海地震の想定震源域であるプレート境界の深部延長(深さ30km前後)で、通常地震より低周波数の波を出す地震が発生していることがわかりました。この地震を深部低周波地震または深部低周波微動と呼びます(Obara, 2002)。さらに、この深部低周波微動と同期して、ほぼ同じ場所のプレート境界で、ゆっくりした滑りが年に数回程度の頻度で生じていることもわかってきました(第3図, Obara *et al.*, 2004)。この「ゆっくり滑り」は、継続時間が一般に数日程度で、規模がマグニチュード5.5~6程度と、上述したプレスリップに非常に似た現象で短期的ゆっくり滑りと呼ばれます。プレスリップは、岩石破壊実験やそれに基づくシミュレーションによって想定されている現象ですが、まだ実際に観測されたことはなくその実体はよくわかっていません。一つの可能性として、この短期的ゆっくり滑りが、想定震源域に通常より近い側で発生した

り、深部側で生じていたゆっくり滑りがより浅い側(想定震源域側)まで拡大した時に大地震を誘発するといったことが考えられます。また、想定震源域にエネルギーが蓄えられてきて破壊(大地震)が近づいてきますと、その深部側で発生する深部低周波微動や短期的ゆっくり滑りの発生パターンが変化することも考えられます。したがって、この短期的ゆっくり滑りや深部低周波微動のモニタリングが東南海・南海地震の予測のために重要であると考えられます。

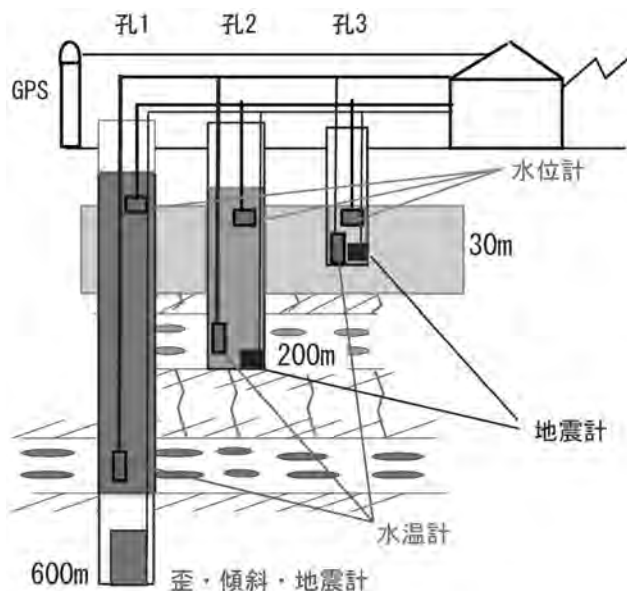
4.3 四国～紀伊半島の地下水等総合観測点

過去の南海地震前後の地下水変化と最近の深部低周波微動及び短期的ゆっくり滑りの研究を考慮して、新規観測点は第7図のようなシステムにしました。深部～浅部間の地下水の移動があり得ますので、一つの観測点に深さの異なる三つの井戸を掘削し、水位だけでなく水温も測定します。地殻変動測定のために井戸の中に歪・傾斜計も設置し、微動測定のための地震計も設置します。近くに国土地理院のGPS観測点がない場合はGPSも設置します。観測データはリアルタイムで産総研に送ります。データは「地震に関連する地下水観測データベース“Well Web”」(<http://www.gsj.jp/wellweb/>)で公開されています。

新規観測点の設置場所としては、東南海・南海地震の想定震源域に近い陸地と短期的ゆっくり滑り・深部低周波微動が定常的に発生している地域(第3図)及び過去の南海地震で地下水変化を生じている地域(第6図)の中から選びました。2007年度に第3図のN4とN5の2点で、2008年度にはN1-N3及びN6-N12の10点で観測を開始しました。現在、N13とN14の2点で新たな観測施設を構築中です。

5. 連動性も考慮した東海・東南海・南海地震予測へ

東南海・南海地震予測のための地下水等総合観測は、12点の観測点整備を終え、今やデータが蓄積されつつあります(北川ほか, 2009; 今西ほか, 2009)。同観測施設を整備し観測データを解析することで、東南海・南海地震の予測精度向上に役立つと考えています。新規観測網と東海の既存の観測網のデータを一緒に解析することで、東海地震の予測精度向上も図れます。



第7図

新規地下水等総合観測点 (N1-N14) における典型的な観測システム。200mの所に歪計を置いてある点もあります。

ただし現状では、場所を東海～紀伊半島～四国地域に限定した上で、地震発生時間の予測をしているに過ぎません。東海・東南海・南海地震は、第4図にもあるように、過去にしばしば連動しており、それによって地震の規模も変わってきます。穴倉ほか(2009, 本特集号)の古地震学的な研究によって、地震が連動する場合は、その前の地殻変動のパターンが異なる可能性が指摘されています。新規観測網等で地下水・地殻変動・地震の精度良い観測データを取得する一方、穴倉らの研究と連携を深め、連動性も考慮したより高度な地震予測を目指したいと考えています。

謝辞：新たな観測施設の整備、及び、従来の観測点の維持管理に関しては、国・自治体・民間の多くの関係者に協力をいただいています。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

今西和俊・武田直人・干野 真・桑原保人・小泉尚嗣(2009)：東南海・南海地震予測のための地下水等観測施設整備における鉛直地震計アレイ観測網の構築, 地質ニュース, 662, 45-50.
気象庁(2003)：東海地震に関する新しい情報発表について, <http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/tokai/20030728tokai.pdf>
北川有一・板場智史・武田直人・小泉尚嗣(2009)：地殻歪観測による短期的ゆっくりに滑りのモニタリング, 地質ニュース, 662, 55-59.
小泉尚嗣(1997)：地球化学的地震予知研究について, 自然災害科

学, 16, 41-60.
小泉尚嗣・高橋 誠・松本則夫・佐藤 努・大谷 竜・北川有一(2005)：水文学的手法による地震予知研究-地下水変化から地震前の地殻変動を検知する試み-, 地震2, 58, 247-258.
京大防災研(2003)：地下水変化に対する前駆的すべりの断層モデル, 地震予知連絡会会報, 70, 402-403.
Matsumoto, N., Y. Kitagawa and N. Koizumi (2007) : Groundwater-level anomalies associated with a hypothetical perslip prior to the anticipated Tokai earthquake: Detectability using the groundwater observation network of the Geological Survey of Japan, AIST, Pure Appli.Geophys., 164, 2377-2396.
Obara, K. (2002) : Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, Science, 296, 1679-1681.
Obara, K., Hirose, H., Yamamizu, F. and Kasahara, K. (2004) : Episodic slow slip events accompanied with non-volcanic tremors in southwest Japan subduction zone, Geophys. Res. Lett. 31, L23602, doi: 10.1029/2004GL020848.
寒川 旭(1992)：地震考古学, 中央公論社, 251pp.
穴倉正展・藤原 治・澤井祐紀・藤野滋弘・行谷佑一(2009)：沿岸の地形・地質調査から連動型巨大地震を予測する, 地質ニュース, 663, 23-28.
重富國宏・梅田康弘・尾上謙介・浅田照行・細 善信・近藤和男・辰巳賢一(2005)：資料・証言にみる南海地震前の井水濁れ及び異常潮位, 京都大学防災研究所, 48-B, 191-195.
水路局(1948)：水路要報増刊号, 201, 117pp.

KOIZUMI Naoji, TAKAHASHI Makoto, MATSUMOTO Norio, SATO Tsutomu, OHTANI Ryu, KITAGAWA Yuichi, ITABA Satoshi, UMEDA Yasuhiro and TAKEDA Naoto (2009) : Integrated groundwater observation for forecasting the Tokai, Tonankai and Nankai earthquakes.

<受付：2009年9月1日>