

地下水観測による地震予知研究

— 地下水位変化から地殻変動を推定することによる地震予測 —

小泉 尚嗣

我々は、長期の地下水観測・解析に多孔質弾性論と前兆すべりモデルを組み合わせた第2種基礎研究の結果として「前兆的地下水位変化検出システム」を構築し、国の東海地震予知事業に貢献している。この「前兆的地下水位変化検出システム」を東南海・南海地震予測にも適用するために、四国から紀伊半島地域にも地下水等総合観測網を拡大し観測を続けている。また、このシステムを用いて東南アジアの地震防災にも貢献するため、台湾で2002年から国際共同研究も行っている。2011年東北太平洋沖地震では、地震の規模を過小に予測したことが震災の要因の一つになった。しかし、この規模を過小評価してしまったことについて科学的に吟味した上で、さらに地震予知研究を進めるべきと考える。

キーワード：地下水、地震予知、地殻変動、前兆すべり、東海地震

Earthquake prediction research based on observation of groundwater

– Earthquake forecasting based on crustal deformation estimated from groundwater level change –

Naoji KOIZUMI

We constructed a system for detecting preseismic changes in groundwater levels that uses a combination of long-term observation and analysis of groundwater, a poro-elastic theory, and the pre-slip model. This system is now in operation and is contributing to the national project for prediction of the Tokai earthquake. To apply this system to Tonankai and Nankai earthquakes, we constructed an integrated groundwater observation network in and around Shikoku and the Kii Peninsula (Japan). This network is now being used to observe and study groundwater and crustal deformation. Since 2002, we have also been carrying out international cooperative hydrological research for earthquake prediction in Taiwan to help minimize the damage caused by earthquakes in Southeast Asia. We underestimated the magnitude of the 2011 Tohoku earthquake, which was one of the factors that brought about the severe damage in and around the Tohoku area. Therefore, we should examine scientifically the reasons for underestimation, and advance earthquake prediction research.

Keywords: Groundwater, earthquake prediction, crustal deformation, pre-slip, Tokai earthquake

1 はじめに

地震予知研究は典型的な「第2種の基礎研究」である。地震現象そのものの基礎研究が、地震発生の推定にも役立つと考えられることから、地震予知（実用的な地震予測）に役立つとされる第1種の基礎研究に相当する研究成果は過去にも多数報告されてきたが、それらを統合して実際の地震予知につなげようとするのはとても困難である。地下水観測による地震予知研究も例外ではない。日本で、地下水観測による地震予知研究が本格的にスタートしたのは、1975年7月の文部省測地学審議会の建議：「第三次地震予知計画の一部見直しについて」からであり、当初は、大学では、東京大学、名古屋大学、京都大学が参加し、国立研究所では工業技術院地質調査所（現在の、産総研地質調査総合センター）が参加した。

しかし、長期の観測とそれに伴う経費が必要な割に

は学術論文としての成果が上がるのが少ないことがわかってくると、大学での研究は停滞気味になり、1990年代の後半になっても積極的な観測・研究を行っているのは地質調査所だけとなってしまった。これは、大学に比べて、国立研究所の方が息の長い研究が認められたということに加え、1978年に成立した大規模地震対策特別措置法（以降、大震法）に基づく国の東海地震予知事業において、地下水観測を地質調査所が担当したことから、地震予知のための地下水の観測と研究が地質調査所の社会的責任とみなされたことが大きい。このようにして、第2種基礎研究における「悪夢の時代」^[1]を地質調査所は耐え抜いたことになる。

2 過去の南海地震前後の顕著な地下水変化

東海～四国の沖合にある駿河トラフ～南海トラフで

産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター 〒305-8567 つくば市東 1-1-1 つくば中央第7
Active Fault and Earthquake Research Center, Geological Survey of Japan, AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan
E-mail: koizumi-n@aist.go.jp

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た（図1、2）。歴史的には、南海トラフの東側と駿河トラフの両方を破壊している地震でも東海地震と呼ぶが、ここでは簡単に、駿河トラフで生じる地震を東海地震、南海トラフ沿いの熊野灘から遠州灘で起こる地震を東南海地震、南海トラフ沿いの潮岬から西側で起こる地震を南海地震とする（図1、2）。

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、古くから都のあった京都周辺で被害を生じたため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ある。過去8回の南海地震のうち、愛媛県松山市の道後温泉（図1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（図1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る（図2）。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らない。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カ所で生活用水として使っていた井戸水（不圧地下水（後述）と考えられる浅い地下水）が、地震の直前～10日前に涸れたとされており^[3]、推定で数十cm以上水位が低下したと考えられる（図3）。勝浦（図3）では、温泉の湧出量も地震の6時間前に低下した。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する（図3）。ただし、海上保安庁水路局による調査地域は160カ所

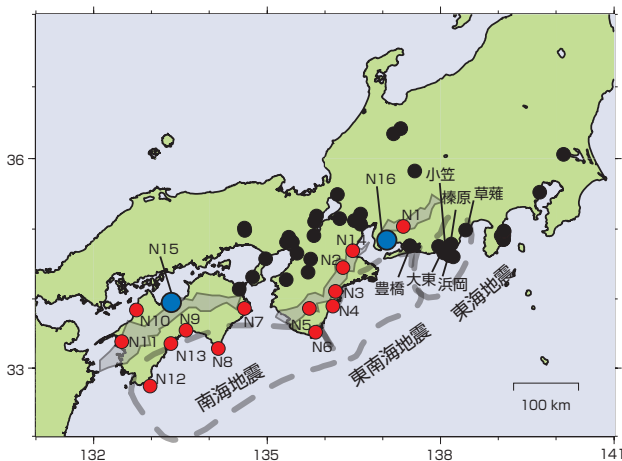


図1 東海・東南海・南海地震の想定震源域（破線）と産総研の地震予知研究のための地下水等観測網（●（黒）：2004年度以前に整備した観測点、●（赤）：2006年度以降に整備した新規観測点N1-N14、●（青）：現在整備を行っている観測点N15-N16）。四国～紀伊半島～愛知県内陸部の灰色の領域は、短期的ゆっくりすべりおよび深部低周波微動が定期的に発生していると考えられる地域。N5の観測点の近傍に湯峯温泉があり、N10の観測点の近傍に道後温泉がある。湯峯温泉と道後温泉については図2参照。

上で^[3]、出現率としてはごく低いことになる。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四国や紀伊半島の太平洋岸で発生したことが知られている^[4]。

3 多孔質弾性論による地下水と地震との結びつけ

上述のように、地下水が地震前に変化することがあるのは日本では古くから知られていて、脇田（1978）^[5]が過去の例を表の形にまとめている。しかし、これらはいわば観測事実のみであり、地震と地下水を結びつける理論が薄弱だったために、組織的な研究が日本で始まったのは1975年からである^[6]。ダイラタンシー水拡散モデル^{[7][8]}（震源域に力が集中して割れ目が増加し、その割れ目に周囲から地下水が流れ込んで震源域の強度が下がり地震が発生するというモデル）が提案されて、地下水変化と地震の関係の理論的な裏付けができたことが、1975年から本格的な研究が始まったことの一因である。ダイラタンシー水拡散モデルが支持されなくなると^[9]、地下水観測はいったん理論的裏付けを失うが、その代わりに理論的根拠になったのが多孔質弾性論である。

物体にかかる力（応力）と変形（歪（ひずみ））の関係を記述したのが弾性論であり、地震と地殻変動（地面の変形）は弾性論によって理論的に結びつけることができる。地震を断層における食い違いとし、それによる変形が（地震に伴う）地殻変動であるとする事で地震と地殻変動は結びつけられるのである。GPSや歪計等で観測される地殻変動と地震との関係は一般に弾性論で説明され、弾性論における変数は応力と歪の二つであるからここに地下水の関与する余地はない。

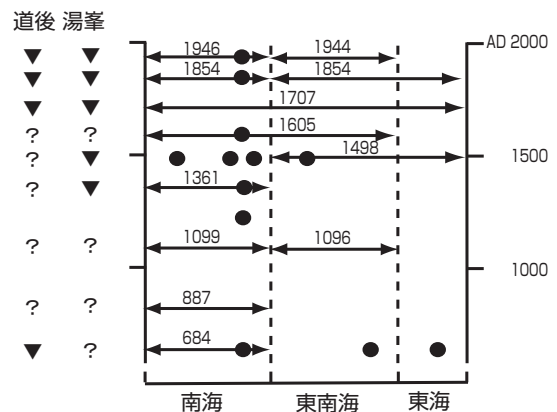


図2 東海・東南海・南海地震の発生履歴と道後温泉・湯峯温泉の湧水量や水位の低下 ▼は低下を表し、？は古文書に変化の有無の記載がないことを示す。●は液状化等の地震の痕跡。寒川（1992）^[4]に加筆。この結果を考慮して、湯峯温泉の近傍にN5の観測点を、道後温泉の近傍にN10の観測点を設けた。

他方、多孔質弾性論は、空隙のある弾性体を考え、その空隙が水で満たされている状況での、応力・歪・空隙中の水圧・空隙中の水の量（以降、単に含水量と称す）との相互関係を示す理論である^{[10][12]}。空隙中の水＝地下水、空隙中の水圧＝空隙圧＝地下水圧＝地下水位とみなせば、この理論を用いることで地下水と地殻変動を結びつけることができる。多孔質弾性論の立場から考えると、地下水と地殻変動は密接な関係があるので、地殻変動を正確に理解するためには地下水の観測が必須ということになり、この理論を用いることで、地殻変動を仲立ちにして地下水と地震とを理論的に結びつけることができる。実際には、地下深部の地震発生位置付近の含水量や空隙圧を把握するのは難しい。現状の我々の解析では、地震の断層モデルとそれによって生じると考えられる地殻変動については弾性論を用い、その地殻変動と地下水変化との関係については多孔質弾性論を用いる形をとっている。

地殻変動と地下水変化との関係で実際によく用いるのは、地震に伴う地殻変動は地下水の移動に比べて十分早いとして含水量の変化はないとしたときの、地殻の体積変化（体積歪変化： ε ）と地下水圧変化（ p ）との比例関係式

$$p = k\varepsilon \quad (1)$$

である。観測された地下水圧変化から体積歪変化を求めたりその逆を行うのである。ここで k は、地下水圧の体積歪変化に対する感度（以降、単に体積歪感度）とも呼ぶべきものである。

地下水圧変化を体積歪変化に換算するのに必要な感度 k は、月や太陽の引力による地面の変形（地球潮汐）で

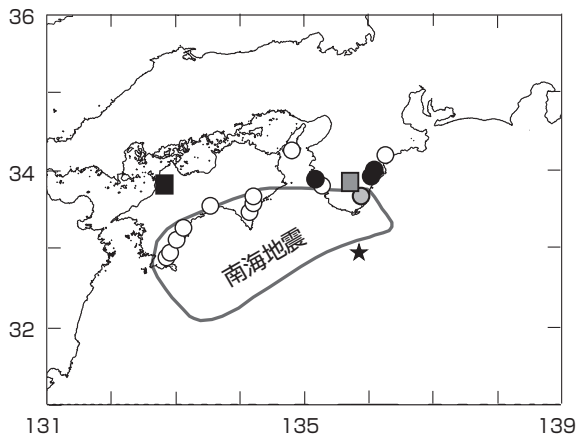


図3 1946年南海地震前の地下水位等の低下
○：浅い井戸水の水位が低下した11地点、●：浅い井戸水が濁った3地点、●（灰色）：温泉湧出量が低下した勝浦地点、★：1946年南海地震の震央、実線で囲まれた部分：南海地震の想定震源域、■：道後温泉、■（灰色）：湯峯温泉。

生じた体積歪の潮汐変化（日本では 10^{-7} 程度の大きさ）による p の変化によって一般に見積もっている。地下水は大きく不圧地下水（水を通さない地層や岩盤の上にある自由地下水面をもつ地下水、自由地下水面では気圧と水圧がつりあっている）と被圧地下水（水を通さない地層や岩盤に挟まれた地下水）に分けられるが、不圧地下水（一般に浅い地下水）では k はごく小さくて 10^{-7} 程度の体積歪変化に対する水位の潮汐変化は検出されない。他方、被圧地下水（一般に深い地下水や温泉水）では検出可能で、水位に対する k は、観測点によって異なるがおおむね $0.1 \sim 10$ ($\text{cm}/10^{-7}$)程度である^{[13][14]}。図4に三重県津市にあるN14観測点（図1）における2012年3月1日～15日の観測結果を示す。この観測点では、地下水位が地表より上にくるので、井戸を密閉して水圧として測定している。生の水圧データには、気圧や降雨による変化に加え、半日や1日を周期とする変化が見いだせるが、これが体積歪の潮汐変化による地下水圧変化である。気圧や降雨の地下水位（水圧）への影響を統計的に除去するプログラム^[15]を用いてそれぞれの成分を分離すると、両振幅で6 cm程度の潮汐成分が認められる。また、気圧・降雨の寄与や潮汐成分を除いた（補正

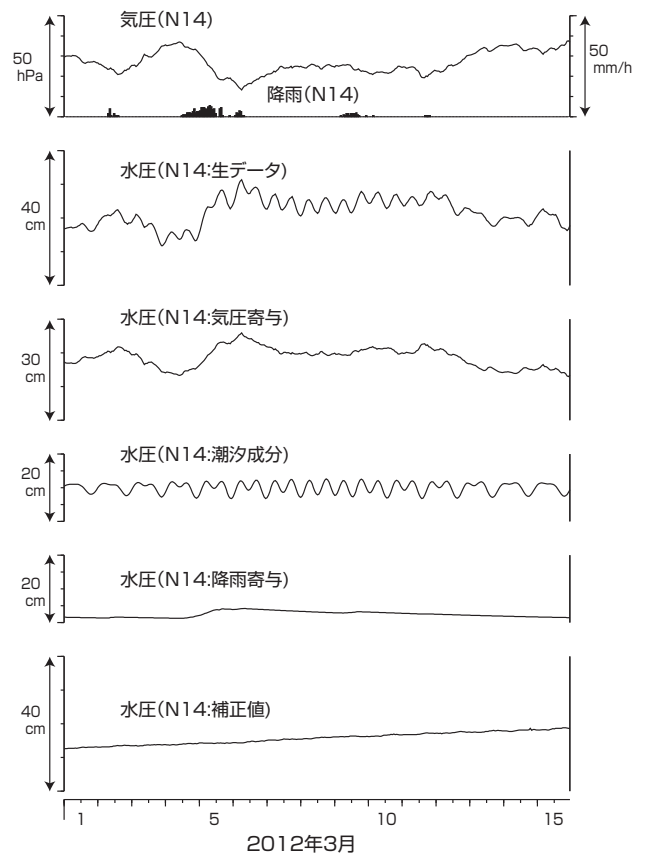


図4 N14観測点（図1）における水圧変化の観測例
水圧を水位の単位に換算して表示している。

された) 水圧には、この期間ではほとんど変化がないことがわかる。

4 東海・東南海・南海地震予測と産総研の地下水等観測

図2に示したように、駿河～南海トラフで最も近年に発生したM8クラスの巨大地震は、1944年東南海地震(M7.9)と1946年南海地震(M8.0)である。この二つの地震では、震源域が駿河トラフまで及んでいなかったため、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、大震法が1978年に制定されて国による地震予知事業が始まった。

産総研は旧工業技術院地質調査所のこの事業を継承し、東海地方周辺に地下水観測点を設け、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当初から分担してきた^{[16][17]}。我々は、東海地方での長年の地下水観測によって、通常時の観測点毎の地下水変化の特性をつかむとともに、図4に示したような気圧や降雨の地下水への影響を統計的に除去するプログラムを開発し^[15]、地下水観測のS/Nを向上させてきた。加えて、多孔質弾性論を用いることで、地下水の観測によって体積歪変化も推定してきた。その結果「体積歪観測」として考えたときの地下水観測のS/Nを定量的に評価できるようになっていった。観測された地下水位(水圧)・湧水量には、平常時において、気圧や降雨・潮汐の影響を除去しても、図4の補正值に示すように長期的な上昇や下降といった変化が残る。また、期間を24時間以内といった短期間に限っても数mm～数cm程度の水位変化が残る。このような変化は「ノイズ」と考えられる。そのノイズのレベルを越える変化があったときに異常な地下水変化として検出できることになる。このようなノイズは体積歪を直接観測した場合でも存在する。地下水観測のノイズレベルと体積歪観測のノイズレベルは、そのままでは単位が異なるので比較ができないが、上述の k を使うことで、地下水データを体積歪データに換算でき比較可能となる。図5は、地下水位のノイズレベルを体積歪に換算し、気象庁の体積歪計のノイズレベル(1999年時点)と比較したものである。地下水位も歪も長期的な変化におけるノイズの見積が困難なので、1時間、3時間、24時間といった短い時間の差(階差)の中でのノイズレベルを見積もっている。気象庁では、1999年の時点では歪計における雨量補正を行っていなかったため、降雨時と通常時(降雨のない時)を区別してノイズレベルを求めているのに対し、産総研は水位において降雨補正をしているのでその区別をしていない。産総研の

地下水観測点のノイズレベルは、気象庁の体積歪計のそれに比べて同程度～数倍程度である。水位計等の地下水観測機器の価格が、体積歪計のそれに比べて1/10～1/100であることを考慮すると、コストパフォーマンス的に優れていることがわかる。また、後述するように、歪計等の高価な地殻変動観測機器が整備されていない地域や国々においても、地下水位等の観測が行われている所が多いことも考慮すれば、地震予知のための手法として汎用性に優れているともいえる。

21世紀に入り、次の東南海・南海地震の切迫性が増すと^[20]、「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た。同法は、国に四国・紀伊半島を中心とする東南海・南海地震防災対策推進地域において地震防災対策を求める一方で、観測網の整備と研究も求めている。このようななか、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観測施設を2006年度から新規に構築して2011年度末までに14点の整備を終え、現在は、さらに新規2点を整備中である(図1)。これについては4.3で述べる。

4.1 地下水観測による東海地震の前兆すべり検出

現時点で東海地震の最も有望な前兆現象は、地震直前に将来の地震発生域周辺で起こるゆっくりすべり(前兆すべりまたはプレスリップと呼ぶ)である。図6に、プレート境界で逆断層型のすべりがあったときの地盤の隆起・沈降や伸縮およびそれに伴う地下水位変化を模式的に示した。このようなすべりが地震直前にあって、それ

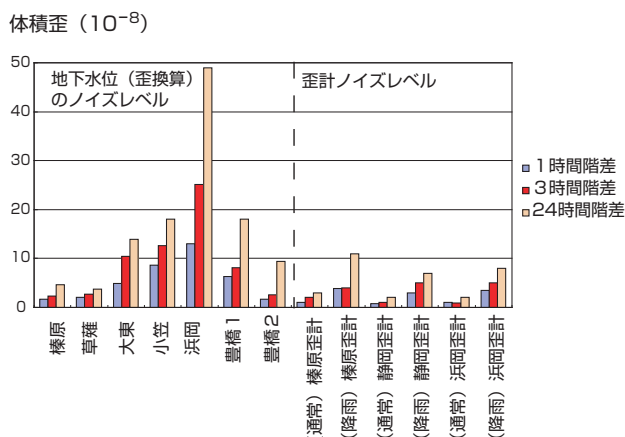


図5 東海地方における、産総研の主な地下水観測点のノイズレベル (左側7組のグラフ、観測点の位置については図1参照) と気象庁の体積歪計のノイズレベル^[18](右側6組)との比較(松本・北川(2005)^[19]の図を一部修正)。豊橋には観測井戸が二つあるので、それぞれ豊橋1・豊橋2としている。

に伴う地殻変動を事前に検出できれば地震予知ができることになる。

気象庁（2003）^[21]がこのような前兆すべりによる地殻変動検出による東海地震予知シナリオを発表したとき、地下水変化を体積歪変化として評価できるようになっていた我々はそれに対応して地下水観測による定量的な地震予知方法を作り上げた^[17]。この方法を使うことで、歪計・傾斜計・GPSといった地殻変動観測機器と同様にして地下水位変化を定量的に評価できるようになった。図7は、産総研の榛原観測点の直下でマグニチュード6.5の大きさに相当する前兆すべりが生じた時に想定される、気象庁観測点での体積歪変化と産総研観測点での地下水位変化を示したものである。上述のように、産総研の地下水観測点のノイズレベルは体積歪に換算して気象庁の体積歪観測点の同程度～数倍なので、それを反映して有意な変化の検出は気象庁の体積歪観測点と同程度か遅れる。他方、実際にこのような変化があった場合には、歪観測とは独立な観測である地下水位観測結果も前兆すべりで説明できることから、前兆すべりが発生しているという推定への信頼性が増すと考えられる。もちろん、前兆すべりの場所や大きさによって現れる水位変化は異なるので、我々は、東海地震の想定震源域周辺すべてで前兆すべりの大きさも変えて同様の計算を行って、観測値と比較できるようにしている^[17]。このような観測から解析にいたる手順一式を、我々は「前兆的地下水位変化検出システム」と呼んでいる。このシステムによって、地下水観測による前兆現象検出についての精度が増し、東海地震予知手法全体についての信頼性向上に貢献したと考えられる。

産総研の東海地域における地下水観測データは産総研を経由してリアルタイムで気象庁に送られていて、東海地震予知のために気象庁で24時間監視されている。すなわち、産総研による東海地域での安定な地下水観測そ

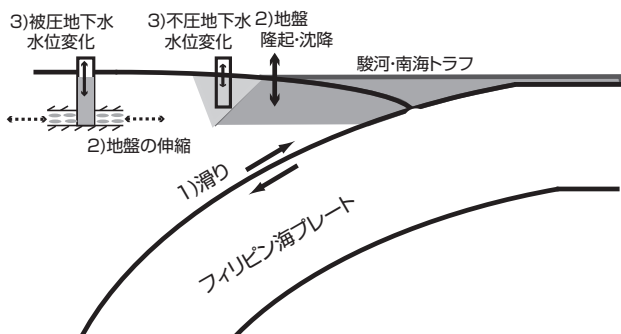


図6 プレート境界で逆断層型のすべりがあったときの地盤の隆起・沈降と伸縮およびそれによって地下水位変化が生じることを示す模式図

のものが社会的なアウトカムとなっている。

4.2 前兆すべりモデルに基づく過去の南海地震前の地下水変化の解釈

上述の前兆すべりモデルに基づいて2章で示した南海地震前の地下水低下を考えてみる。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すべり（前兆すべり）があれば、四国や紀伊半島では広い範囲で地震前に地盤が隆起し体積歪が増加する。被圧地下水は体積歪が増加すると上述のように水位が下がり得る。不圧地下水は体積歪変化に対して鈍感だが、海岸付近の不圧地下水は海水と圧力平衡にあるので、地盤が隆起すると、相対的に低下した海水面に呼应して（陸地の表面から見て）水位が低下する（図6）。したがって、過去の南海地震前の地下水位や温泉湧水量の低下は、定性的ではあるが前兆すべりによって説明することができる。

他方、1946年南海地震における不圧地下水の地震前の変化については、京都大学防災研究所（2003）^[23]の前兆すべりモデル（1946年南海地震の断層の一部で、本震の10%程度のすべりが地震前に生じたとするモデル）で予測される隆起量が最大でも数cm程度なので、上述した数十cm以上という水位低下の振幅は説明できない。他方、同じモデルによる体積歪増加は大きく、被圧地下水の水位ならば数十cm以上の低下も可能である^[16]。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

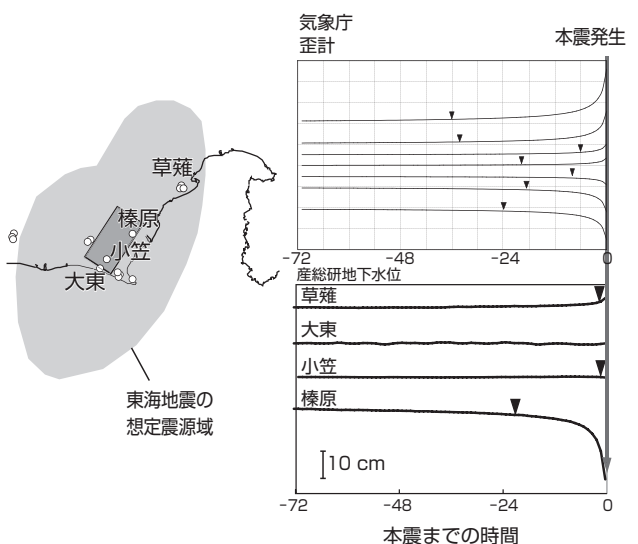


図7 前兆すべりに伴う地下水位変化のシミュレーション^[17] 左側の小さな○は産総研の地下水観測点の位置。灰色のナスビ状の形は東海地震の想定震源域を地表に投影したもの。左側の想定震源域の中の灰色の四角で示した矩形形状の断層でM6.5相当の前兆すべりが72時間かけて生じた時に気象庁の歪データや産総研の地下水位データにどのような変化が生じるかを計算したのが右の図。通常時のノイズレベルを越えたときに「有意な変化」として▼印を入れている。

る。したがって、図6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、前兆すべりによる微小な地殻変動があることに加えて、それによって不圧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る。被圧地下水が先に水位を低下させた後、不圧地下水から被圧地下水へ水が移動し、不圧地下水も水位が低下するというのはあり得る一つのメカニズムである。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位低下の出現率は低いのかかもしれない。

4.3 新たな観測システムの設計と整備

以上のことから、東海地震用に構築した「前兆の地下水位変化検出システム」を東南海・南海地震にも適用するため、過去の南海地震前の地下水位低下メカニズムを明らかにするために、産総研は、地下水等総合観測点を2006年度から2012年度までに、整備中のものも含めて四国～紀伊半島周辺に16点構築し(図1)、東海地域の観測網と統合して観測・解析を行っている^[22]。観測点の選定にあたっては、過去の南海地震前後に地下水が変化した場所や(図3)、東南海・南海地震の想定震源域に近い場所(図1)、および、後述する短期的ゆっくりすべりや深部低周波微動の発生位置を考慮して決めた(図1)。歴史的にみれば、東海地震は、東南海・南海地震と連動して発生するのが通例なので(図2)、この観測と解析は東海地震予知にも役立つ。

四国から紀伊半島に整備した新たな産総研の観測点では(図1のN1-N14)、地下水の観測に加えて歪や傾斜や地震の観測も行っている。近くに国土地理院のGPS観測点がない場合はGPSも測定している。過去の南海地震では、被圧地下水と考えられる深い地下水(温泉水)だけでなく、不圧地下水と考えられる浅い地下水も変化したとされており(図3)、上述のように鉛直方向の地下水の移動があり得ることから、深さの異なる3本の井戸を掘削して水位(水圧)・水温の観測を行っている(図8)。現在整備中のN15・N16観測点でも同様の観測を行う予定である。なお、観測データはリアルタイムで産総研に送られている。また、産総研を経由してリアルタイムで気象庁にもデータが送られている。

東海地震および東南海・南海地震の想定震源域の深部延長では、想定されている前兆すべりに酷似した短期的ゆっくりすべりが深部低周波微動^[24](プレート境界付近の深さ30-40km程度で発生し、通常地震より低周波の微弱な波を出し、始まりと終わりがはっきりしない地震)と共に年に数回発生することが知られており^[25]、その時空間分布を正確に把握することが東海・東南海・南

海地震の予測精度向上に必須である^[26]。短期的ゆっくりすべりが拡大して想定震源域にまで及べば、本震を誘発することが考えられる。さらに、震源域に応力が集中して本震の発生が近づくと、震源域の深部延長部分でも応力状態等が変化して短期的ゆっくりすべりの発生パターンが変わることがシミュレーションで推定されている^[27]。産総研は、防災科学技術研究所や気象庁と協力してこの短期的ゆっくりすべりや微動のモニタリングを行っていて、今までよくわかっていなかった紀伊半島での短期的ゆっくりすべりの時空間分布^{[28][29]}や微動の高感度検出^[30]等においてすでにいくつかの成果を出している。同時に、この短期的ゆっくりすべりによって地下水がどのように変化するかどうかも調査している。現状では、一部の観測点の被圧地下水について、短期的ゆっくりすべりに伴う地下水圧の変化は検出されているが^[31]、それは、歪変化等から想定される範囲内である。また、短期的ゆっくりすべりに伴う不圧地下水の水位変化は検出されておらず、過去の南海地震前の地下水位低下メカニズムを明らかにするには至っていない。

これらの観測データのグラフは、<http://www.gsj.jp/wellweb/>で公開しており、グラフは毎日更新している。

5 地下水観測による地震予知研究手法を海外にも適用する試みについて

地殻変動観測機器は一般に高価であり、地震リスクが高くても、地殻変動観測が不十分な地域や国々はたくさんある。例えば、東南アジアの国々もその一例である。しかし、そのような国々でも、地下水の観測は、地震予知以外の目的で一般に行われている。降雨の影響が少な

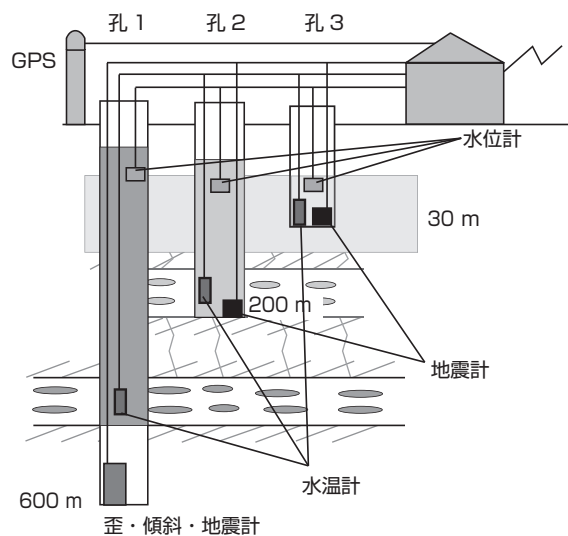


図8 N1-N16観測点(図1)における典型的な観測システム

い、揚水の影響が少ない、地下水位の体積歪感度が高いといった条件で観測井戸を選び出して地下水位観測網を作れば、短時間で「簡易」地殻変動（体積歪）観測網ができることになり、前兆的地下水位変化検出システムをその地域に適用することが可能になる。また、以前の地下水位データを体積歪感度を使って洗い直すことで、過去にさかのぼって地震前後の地殻変動を推定することも可能になる。以上のことから、その地域の地震災害軽減に低コストで貢献できると考えられる。このような考えに基づいて、我々は、台湾の成功大学と地下水観測による地震予知研究について2002年から共同研究「台湾における水文学的・地球化学的手法による地震予知研究」を行っている^[32]。この背景には、1999年に台湾西部で発生した集集地震（モーメントマグニチュード7.6）で大きな被害が生じた結果、将来の地震予知も視野に入れた地震・活断層研究が2001年から台湾で活発になったことがある。

約10年間の共同研究によって、1999年集集地震に伴う地下水変化のメカニズムに関する研究^{[33][34]}、地震に伴う地下水変化に関する研究を行うための16点からなる地下水観測網の構築、同観測網での地震時～地震後の地下水変化の分析^[35]等において成果をあげてきた。他方、既存の地下水観測井戸のデータを用いる場合は、人工的な揚水の影響を受けることが多くS/Nの評価については大きな課題である。前兆的地下水位変化検出システムの技術移転を台湾に行うことで、人材の養成も含めて台湾側の地震防災に貢献できる。また、台湾は日本以上に地震活動が活発であり、通常の地殻変動の大きさは年率にして日本の10倍以上に達するところもある。したがって、日本で観測するよりも短時間で、地震や地殻変動に対する地下水変化の観測例を蓄積することができるので、台湾において地震と地下水・地殻変動の観測・研究を行えば、より効率的に研究成果をあげることができる。今後とも、双方にメリットのあるこの共同研究を続け、将来的には東南アジアの地震災害軽減に貢献したい。

6 2011年東北地方太平洋沖地震後の地震予知研究に対する考え方

地震発生の場所・規模・時期をあらかじめ推定して震災軽減に役立てようという研究において、先人たちが「予測（あらかじめ推し測る）」という言葉ではなく、「予知（予め知る）」というより強い言葉を使ったのは（例えば、今村（1929）^[36]）、地震前の防災行動に直接つながる「精度の高い予測」を目指したからだろう。実際の所、地震予知研究に携わる研究者が、現在に至るまで終始一

貫行ってきたのは「地震予測」の研究であり、その精度を高める努力を続けてきたわけである^[37]。その成果の一つとして、日本およびその周辺域における地震の長期予測が行われるようになった^[38]。しかし、2011年東北地方太平洋沖地震は、これまでその場所で地震学者が想定してきた規模をはるかに上回るマグニチュード9に達し、主に津波によって約2万人の死者・行方不明者を出して、我々の予測のレベルが予知と呼ぶには不十分なことを示した^[39]。ただし、データが少なく評価不能な三陸沖中部や福島県沖（想定地震規模M7.4、30年発生確率7%）を除く、三陸沖北部・宮城県沖・茨城県沖では、M7-7.5クラスと想定された規模の地震の30年発生確率は80%以上と高かったので^{[40][41]}、地震の長期予測における場所と時間予測についてはおおむね的中したとも考えられる。特に、宮城県沖では、2005年にM7.2の地震が発生していたのにも関わらず、GPS等の観測結果から、想定されている震源域周辺ではまだエネルギーが解放されていないとして、引き続き30年以内での発生確率99%という数値（地震調査研究推進本部の長期予測確率の最大値）を変更せず警戒を呼びかけていたのも事実である^[42]。このように、同地震前の予測に関しては、科学的にも防災的にも評価できる部分があり、「地震予知（予測）の研究は無駄」といった批判は的外れであろう。今後、2011年東北地方太平洋沖地震の事前の予測とその結果についての科学的な評価・検証を十分に行った上で、さらに地震予知研究を進めるべきと考える^[43]。

7 まとめ

長期の地下水観測と解析結果に多孔質弾性論と（気象庁が明確化した）東海地震予知モデルを組み合わせた第2種基礎研究の結果、「前兆的地下水位変化検出システム」を構築し、アウトカムとして東海地震予知事業に貢献している。「前兆的地下水位変化検出システム」を東南海・南海地震予測にも適用するために、四国から紀伊半島地域にも地下水等総合観測網を拡大し、観測と研究を続けている。また、同システムを用いて東南アジアの地震防災にも貢献するため、台湾で2002年から国際共同研究を行っている。台湾は日本より地震活動が高く、地殻変動も大きいので、日本で観測するよりも効率よく地震と地下水との関係がわかる可能性もあり同システムの改善への期待が持てる。2011年東北太平洋沖地震では、地震の規模を過小評価したことも一因となって大きな被害が出たが、場所や時期については、予測はある程度当たっていたとも考えられる。科学的な検証を行った上でさらに地震予知研究を進めるべきである。

参考文献

- [1] 吉川弘之, 内藤 耕: 第2種基礎研究-実用化につながる開発研究の新しい考え方-, 日経BP社 (2003).
- [2] 寒川 旭: 地震考古学, 中央公論社 (1992).
- [3] 海上保安庁水路局: 昭和21年南海大地震調査報告-地変及び被害編-, 水路要報増刊号, 201 (1948).
- [4] 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: 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年報, 48-B, 191-195 (2005).
- [5] 脇田 宏: 地下水の水位, 化学組成変化, 浅田敏編「地震予知の方法」, 東京大学出版会, 146-166 (1978).
- [6] 小泉尚嗣: 地球化学的地震予知研究について, 自然災害科学, 16, 41-60 (1997).
- [7] A. Nur: Dilatancy, pore fluids, and premonitory variation of tp/ts travel times, *Bull. Seismo. Soc. Am.*, 62, 1217-1222 (1972).
- [8] C.H. Scholz, L.R. Sykes and Y.P. Aggarwal: Earthquake prediction: a physical basis, *Science*, 181, 803-810 (1973).
- [9] 茂木清夫: 日本の地震予知, サイエンス社 (1982).
- [10] M.A. Biot: General theory of three-dimensional consolidation, *J. Appl. Phys.*, 12, 155-164 (1941).
- [11] E.A. Roeloffs: Poroelastic techniques in the study of earthquake-related hydrologic phenomena, *Adv. Geophys.*, 37, 135-195 (1996).
- [12] H.F. Wang: *Theory of Linear Poroelasticity with Applications to Geomechanics and Hydrogeology*, Princeton Univ. Press, Princeton (2000).
- [13] E.A. Roeloffs: Hydrologic precursors to earthquakes: a review, *Pure Appl. Geophys.*, 126, 177-209 (1988).
- [14] S. Itaba, N. Koizumi, T. Toyoshima, M. Kaneko, K. Sekiya, and K. Ozawa: Groundwater changes associated with the 2004 Niigata-Chuetsu and 2007 Chuetsu-oki earthquakes, *Earth Planets Space*, 60, 1161-1168 (2008).
- [15] N. Matsumoto: Regression analysis for anomalous changes of groundwater level due to earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 19, 1193-1196 (1992).
- [16] 小泉尚嗣, 高橋 誠, 松本則夫, 佐藤 努, 大谷 竜, 北川有一: 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 (2005).
- [17] N. Matsumoto, Y. Kitagawa and N. Koizumi: Groundwater-level anomalies associated with a hypothetical preslip prior to the anticipated Tokai earthquake: Detectability using the groundwater observation network of the Geological Survey of Japan, AIST, *Pure Appl. Geophys.*, 164, 2377-2396 (2007).
- [18] 小林昭夫, 松森敏幸: 埋め込み式体積歪計のノイズレベル調査及び異常監視処理, 駿震時報, 62, 17-41 (1999).
- [19] 松本則夫, 北川有一: 想定東海地震震源域付近の観測井における地下水位の歪感度とノイズレベル, 測地学会誌, 51, 131-145 (2005).
- [20] 地震調査研究推進本部: 南海トラフの地震の長期評価, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/01sep_nankai/nankai.pdf (2001).
- [21] 気象庁: 東海地震に関する新しい情報発表について, <http://www.jma.go.jp/jma/press/0307/28a/20030728tokai.pdf> (2003).
- [22] 小泉尚嗣, 高橋 誠, 松本則夫, 佐藤 努, 大谷 竜, 北川有一, 板場智史, 梅田康弘, 武田直人: 地下水等総合観測による東海, 東南海, 南海地震予測, 地質ニュース, 663, 29-34 (2009).
- [23] 京都大学防災研究所: 地下水変化に対する前駆的すべりの断層モデル, 地震予知連絡学会報, 70, 402-403 (2003).
- [24] K. Obara: Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, *Science*, 296, 1679-1681 (2002).
- [25] K. Obara, H. Hirose, F. Yamamizu and K. Kasahara: Episodic slow slip events accompanied with non-volcanic tremors in southwest Japan subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L23602, doi: 10.1029/2004GL020848 (2004).
- [26] 小原一成: スロー地震モニタリングは巨大地震予測に有効か?, 日本地震学会講演予稿集2011年度秋季大会, 104 (2011).
- [27] T. Matsuzawa, H. Hirose, B. Shibasaki and K. Obara: Modeling short- and long-term slow slip events in the seismic cycles of large subduction earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 115, B12301, doi:10.1029/2010JB007566 (2010).
- [28] S. Itaba, N. Koizumi, N. Matsumoto and R. Ohtani: Continuous observation of groundwater and crustal deformation for forecasting Tonankai and Nankai earthquakes in Japan, *Pure Appl. Geophys.*, 167, 1105-1114 (2010).
- [29] S. Itaba and R. Ando: A slow slip event triggered by teleseismic surface waves, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L21306, doi:10.1029/2011GL049593 (2011).
- [30] K. Imanishi, N. Takeda, Y. Kuwahara and N. Koizumi: Enhanced detection capability of non-volcanic tremor using a 3-level vertical seismic array network, VA-net, in southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L20305, doi:10.1029/2011GL049071 (2011).
- [31] 北川有一, 松本則夫, 小泉尚嗣: 津安濃観測点の地下水圧変化による三重県北部および中部での短期的SSEの検出, 日本地震学会講演予稿集2011年度秋季大会, 148 (2011).
- [32] 小泉尚嗣, 松本則夫, 頼 文基: 台湾国立成功大学と産業技術総合研究所との共同研究「台湾における水文学的, 地球化学的手法による地震予知研究」について, 地質調査研究報告, 62, 185-190 (2011).
- [33] WC. Lai, N. Koizumi, N. Matsumoto, Y. Kitagawa, CW. Lin, CL. Shieh and YP. Lee: Effects of seismic ground motion and geological setting on the coseismic groundwater level changes caused by the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan, *Earth Planets Space*, 56, 873-880 (2004).
- [34] N. Koizumi, WC. Lai, Y. Kitagawa and N. Matsumoto: Comments on "Coseismic hydrological changes associated with dislocation of the September 21, 1999 Chichi earthquake, Taiwan" by Min Lee *et al.*, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L13603, doi:10.1029/2004GL019897 (2004).
- [35] WC. Lai, KC. Hsu, CL. Shieh, YP. Lee, KC. Chung, N. Koizumi and N. Matsumoto: Evaluation of the effects of ground shaking and static volumetric strain change on earthquake-related groundwater level changes in Taiwan, *Earth Planets Space*, 62, 391-400 (2010).
- [36] 今村明恒: 關東並に近畿地方に於ける地震活動の循環と大震前の諸現象とに就いて, 地震1, 1, 4-16 (1929).
- [37] 日本地震学会地震予知検討委員会: 地震予知の科学, 東大出版会 (2007).
- [38] 地震調査研究推進本部: 地震に関する評価, http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka.htm (2011).
- [39] 松澤 暢: なぜ東北日本沈み帯でM9の地震が発生しえたのか?-われわれはどこで間違えたのか?, 科学, 81, 1020-1026 (2011).
- [40] 地震調査研究推進本部: 宮城県沖地震の長期評価, <http://www.jishin.go.jp/main/chousa/00nov4/miyagi.htm> (2000)
- [41] 地震調査研究推進本部: 三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価の一部改訂について, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09mar_sanriku/index.htm (2009).
- [42] 地震調査研究推進本部: 今までに公表した活断層及び海溝型地震の長期評価結果一覧, http://www.jishin.go.jp/main/choukihyoka/ichiran_past/ichiran20110111.pdf (2011).
- [43] 小泉尚嗣: 2011年東北地方太平洋沖地震後における地震の予知・予測研究への批判について, 日本地震学会論文集「地震学の今を問う(東北地方太平洋沖地震対応臨時委員会報告)」, 58-61 (2012).

追記

本論文を執筆し、受理後、筆者も所属する公益社団法人日本地震学会（以降、単に地震学会と記す）が、2011年東北地方太平洋沖地震によって生じた様々な課題に対処するためとして行動計画 2012 (<http://www.zisin.jp/pdf/SSJplan2012.pdf>) を発表し、その中で「地震予知」と「地震予測」の用語の厳密化を図っている。従来、地震予知は「場所、大きさ、時間を特定して地震の発生を事前に予測すること」という広い意味でも使われてきたが、それが警報につながる狭義の地震予知と混同され、地震前の「警報」に対する社会の過剰な期待を生むことになり、その裏返しとして、2011年東北地方太平洋沖地震後に地震学者は大きな批判を浴びた。この反省から、地震学会は、「場所、大きさ、時間を特定して地震の発生を事前に予測すること」については地震予測と呼ぶことにし、警報につながる精度の高い地震予測のみ地震予知とよぶべきと用語を整理し、現状では地震予知は非常に困難であるとの認識を改めて示したのである。ただし、6章でも述べたように、地震予測の精度を上げれば（狭義の）地震予知につながるわけであるから、研究レベルで地震予知研究と地震予測研究を明瞭に区別するのは困難であると考えられる。「地震予知と地震予測の定義の厳密化」については、以前から地震学会内でも議論されていたことではあるので、本論文でも、警報にすぐにつながるもの（地震予知）とすぐにはつながらないもの（地震予測）ということを意識して使い分けてはいるが、明瞭に区別できているわけではない。

イタリアのラクイラでの地震（2009年4月6日発生、M6.3、死者300名以上）で、事前に「安全宣言」を出したということで、6名の科学者を含む7名が罪に問われている。地震予知の難しさを改めて示す出来事であるが、困難であっても取り組まなければならない研究課題というものはある。地震国日本において、地震予知は、まさにそのようなタイプの研究課題であると筆者は考えるものである。

執筆者略歴

小泉 尚嗣（こいずみ なおじ）

1988年京都大学大学院理学研究科博士後期課程地球物理学専攻単位取得退学。1989年京都大学防災研究所助手、同年博士（理学）（京都大学）取得。1996年通商産業省工業技術院地質調査所に異動。2001年独立行政法人産業技術総合研究所地球科学情報研究部門地震地下水研究グループ長、2009年活断層・地震研究センター地震地下水研究チーム長、2011年からは同センターの主幹研究員となる。学生時代から一貫して地下水観測による地震予知研究に取り組む。震災軽減のためには、研究成果の広報活動が最も重要とも思っている。



査読者との議論

議論1 全般的コメント

コメント（佃 栄吉：産業技術総合研究所、多屋 秀人：産業技術総合研究所広報部）

この研究論文は、長期にわたる地下水位の観測と解析技術の中核に、理論的基礎（多孔質弾性論）を背景に地殻変動に伴う地下水位と地震発生との関連に展開し、また、地下水位観測システムの構築、観測網の整備を通じて東海・東南海・南海地震予知に向けて一連のプロセスについて言及した優れた論文と判断しました。東海・東南海・南海地震については、その切迫性が高まる中、また、東日本大震災の経験もあり社会的関心もますます高まっています。地震予知情報が出されれば人的被害を効果的に軽減できることから、その研究の進展が強く期待されていると理解しています。一方、その結果が得られるまで長期的な観測の継続が必要であり、そのため公的研究機関が担うべきであることは自明であるものの、本格研究として困難な課題に挑戦されていると思います。

議論2 潮汐による体積歪

質問（多屋 秀人）

潮汐による「体積歪」についての質問です。日本では、「 10^{-7} 程度の大きさ」とのことですが、地球の緯度でおおよそ決まるものなのでしょうか？

回答（小泉 尚嗣）

潮汐による地盤の変形の最大振幅は、おおよそ緯度で決まります。

議論3 地下水位観測による地震予知

質問（多屋 秀人）

日本各地域で地震は発生しているが、それぞれ発生メカニズムが異なると思います。その中で、地下水位観測により地震予知が可能と想定される地震とはどのようなもののでしょうか？

回答（小泉 尚嗣）

現状では、プレート海溝型の地震であって、前兆滑りのシナリオが使えるもののみ地震予知の可能性があると思っています。今後、他のタイプの地震についても、信頼できるモデルに基づく地震前の定量的な地殻変動のシナリオが提示されれば対応は可能だと思います。

議論4 新たな超巨大地震の想定と観測体制

質問（佃 栄吉）

国はすでにマグニチュード9クラスの地震を想定して被害予測を行っていますが、これについて観測体制との関係でコメントしてください。これまでより大きな規模ですが、想定モデルに基づく観測に影響はありませんか？

回答（小泉 尚嗣）

南海トラフで発生する可能性があるとして新たに想定されたM9クラスの超巨大地震について、想定震源域が西（日向灘）へ広がった分については、今後は九州の観測点が必要になるかもしれません。沖合に広がった分については陸の観測では及ばないので、海洋研究開発機構や気象庁等が行う海底観測との連携が必要になるでしょう。また、想定モデルが大きく変わったので、観測データの解釈やそれに基づく予測について困難になることは事実です。

議論5 低頻度の巨大地震予知研究のための観測と国際共同研究

質問（佃 栄吉）

特定の地域の地震発生の間隔は短くても100年程度であり、研究者のライフタイムより優位に長い。このことが、地震研究においては仮説・検証による飛躍的な科学的進歩を阻害しているともいえます。これを克服する一つの方法として国際共同研究があると思います。台湾以外にも海外事例を集める努力があってもよいと思いますがどう

しょうか。地震発生プロセス（準備過程）について、最近の海外事例についてコメントをお願いします。

回答（小泉 尚嗣）

地震に関連した地下水変化に関する観測・研究については、台湾以外に米国地質調査所（USGS）とも連携を続けてきています。観測事例を増やすために、このような連携が今後さらに重要になることは事実で努力を続けたいと思います。

地震後の解析で、前兆滑りの可能性のある現象が観測された海外の事例としては、1960年チリ地震（M9.5）、1997年カムチャッカ地震（M7.8）、2001年ペルー地震（M8.4）の最大余震地震（M7.6）があります。日本では、1944年東南海地震（M7.9）、1946年南海地震（M8.0）に加えて、1964年新潟地震（M7.5）、1983年日本海中部地震（M7.7）があります。また、2011年東北地方太平洋沖地震についても、直前の地震活動の移動の様子や、海底津波計の観測結果から、前兆滑りが発生していた可能性が示唆されていますが、東海地震の前兆滑りで想定されているような滑りの加速はなかったようです。このような結果を受けて、今後、地震発生プロセスに関しては、今までのモデルの見直しや新たなモデルの提出があると考えられます。モデルの改善・創出と精密な観測データとは密接な関係があります。今後も、モデルに適切な拘束条件を与えるべく、精密な観測・解析を行う一方、国内外の地震発生プロセスの研究成果を注意深く収集していきます。

議論6 気象庁の体積歪計と地下水観測

コメント（佃 栄吉）

地下水の観測データの価値について、気象庁の体積歪計があれば必要ないとも読めます。地下水データの特徴と他のデータとの補完性についてもう少し詳しく述べてはいかがでしょうか。

回答（小泉 尚嗣）

この論文でも述べましたが、ノイズレベルから推定できる地下水観測の歪検出精度は、体積歪計のそれに比べて同程度～やや劣ると考えられますが、水位計等の地下水観測機器の価格が、体積歪計のそ

れに比べて1/10～1/100であることを考慮すると、コストパフォーマンス的に優れているといえます。また、歪計等の高価な地殻変動観測機器が整備されていない地域や国々においても、地下水位等の観測が行われている所が多いことも考慮すれば、地震予知のための手法として地下水観測は汎用性に優れているともいえます。さらに、歪観測と地下水位観測は独立なので、両方のデータが前兆滑りモデルのような一つの物理モデルで説明できる場合は、物理モデルそのものとその物理モデルが示す予測への信頼性が増すと考えられます。

議論7 地下水による地震予知研究の社会的リスク

コメント（佃 栄吉）

地下水の変動については、論文にあるとおり、観測が比較的容易であることや、生活に密接なものであるため、一般の宏観現象として、報告されることも多々あり、精度の悪い民間情報（多くは誤情報）が発信されて、社会が混乱する恐れもあります。その際に、長年にわたる科学的観測データが重要であり、社会的役割も大きいと思います。気象庁との連携等も必要と思います。想定される対応についてコメントをお願いします。

回答（小泉 尚嗣）

ご指摘のとおり、きちんと管理された精度のよい地下水観測データを示すことで、地震予知に関する誤った情報の流布を防止できると考えます。したがって、観測データのグラフを公開しています。地震と地下水に関する研究成果については、積極的なアウトリーチ活動（産総研の一般公開や出前講座等）を行っています。気象庁とは、観測データや解析結果を提供するだけでなく、地震に関する種々の情報・解析手法等について共有するようにしています。異常な地下水変化等について気象庁に問い合わせがあったときは、我々の方から適切な解釈の仕方について情報を提供することもあります。

また、民間に限らず、地震に関して発信される種々のデータやモデルに対して、自治体の防災担当職員が正しく解釈・判断できることが、社会的な混乱の予防に重要という観点から、観測点を置いている自治体の防災担当職員を主な対象として「地震・津波に関する自治体職員用研修プログラム」を実施しています。