

概 報

観測強化地域及び特定観測地域における地下水等観測研究

佃 栄吉¹

Eikichi TSUKUDA(2000) Groundwater Monitoring Studies in the Tokai Intensified Observation Area and Other Special Observation Areas for Earthquake Prediction Research *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 51 (9), p. 391-400, 11 figs.

Abstract: In this paper, the author as the project leader introduces the groundwater monitoring system in the Tokai-Izu and Chubu-Kinki districts, which was developed during the research period from 1994 to 1999. The Tokai region, a central part of Honshu (Main Island), is considered to be the area where a destructive earthquake, the Tokai Earthquake, is very likely to occur. The Tokai Earthquake, however, is considered to be predictable since the nature of its earthquake mechanism is well understood than other earthquakes. Therefore, the instruments such as strainmeters, tiltmeters and extensometers are intensively deployed in the area. They are supposed to be able to identify precursory anomalies. The observation of groundwater is also believed to be one of the practical methods to predict the Tokai Earthquake because there are many records of groundwater changes before large earthquakes. Since 1976, the Geological Survey of Japan (GSJ) has been developing the telemeter groundwater observation system in the area according to the proposal of the Geodetic Council of Ministry of Education, Science and Culture (Tsukuda *et al.*, 1980). Groundwater data are transferred to the Japan Meteorological Agency (JMA) and carefully monitored day to day and on a 24 hours basis. The meeting of the Earthquake Assessment Committee in JMA is held monthly to discuss whether there is any anomalous changes of the data. It is a major task for the research group of GSJ to prepare the charts of three-month and two-year groundwater data, and submit them to the committee with comments. One of our major objectives of this study is to develop algorithms to detect anomalous changes automatically before large earthquakes. As a milestone for this purpose, Matsumoto N. (1992; 1999) developed a data correction method using statistical analysis to make it possible to detect pre- and co-seismic anomalous changes of groundwater level by eliminating the effects of barometric pressure, earth tide, rain fall and other noise.

After the 1995 Kobe earthquake, we concentrated our efforts to establish new comprehensive observation wells in the Kinki district in 1996 and then extended the area of observation to the Chubu district in 1998. It is well known that there are many active faults in the Kinki and Chubu districts. We located observation wells near active faults using a careful examination of subsurface geology. We also developed a comprehensive observation system for the analysis of groundwater, borehole strainmeter, seismometers and GPS data, in those areas for earthquake prediction studies at the end of this study. The data analysis of the groundwater level in Kinki shows that the system is able to detect earthquake related crustal deformations corresponding to the volumetric strain changes on the order of 10^{-9} (Koizumi *et al.*, 1999).

Almost all our groundwater related data and data correction methods are publicized at <http://gxwell.aist.go.jp>.

要 旨

本研究は第7次地震予知計画に基づく、地震予知研究を目的として、平成6年度から地下水等の観測施設の整備に取り組んだ。平成6年度中には地震防災対策観測強

化地域である東海地域及び伊豆半島東部地域を含め、大室山北・冷川南・草薙・牧ノ原・小笠の5地点の新規の観測井を整備した。平成7年に発生した兵庫県南部地震の後、近畿地域およびその周辺地域に、板東、根来、西

¹ 地質調査所企画室長 (Director of Research Planning Office, GSJ)

Keywords: groundwater monitoring system, telemeter network, Tokai earthquake, earthquake prediction, active fault, the Kinki and Chubu areas

淡, 平林, 垂水, 育波, 宝塚, 池田, 天王寺, 広陵, 秦荘, 若王寺, 末広町, 猪名川の14の観測井を整備した。さらに平成8年度から9年度にかけて活断層モニタリング施設として, 近畿および中部地域の10本の主要活断層近傍に, 安富, 安富北, 花折, 大原, 黄檗, 五條, 木之元, 南濃, 北勢, 桑名, 跡津川, 宮川, 王滝, 豊橋の14地点の新規観測井を設置した。これらの新規観測施設整備にあたっては地下構造など地質学的な検討を十分行うとともに, 地下水だけではなく, 3成分地殻歪計やGPSなど地殻変動観測データが並行観測できるように設計した。これらのデータを一元的に収集処理するため, 総合的な観測ネットワーク整備を行うとともに, 地下水のデータ処理技術においては自動的に雨量, 地球潮汐, 気圧変化などのノイズデータを除去処理できるプログラムを開発して組み込み, 地殻変動に関連した変化の検出が容易になった。また, 場所的制限を受けないでデータの監視ができるように, データ及び時系列解析プログラムのWebでの公開を実現した。こうしたデータ解析処理技術の向上(松本, 1996など)により, 東海地域の榛原, 草薙の観測井では地震に伴う変動がより明確にとらえることができるようになり, 前兆現象の検出の可能性を示すことができた。これらにより, 地震予知の実用化に一步近づくことができた。また, 伊豆東部地域での群発地震に関連して, 前兆的地下水位変動が捉えられた(小泉他, 1998)。近畿地域およびその周辺の地下水位観測データの解析では, 潮汐と地震時について 10^{-9} またはそれより大きい体積歪み変化を地下水位変化として検出することが可能であることがわかった(小泉他, 1999)。

1. はじめに

本研究は「第7次地震予知計画(平成5年7月, 測地学審議会建議)」に基づき, 平成6年度から工業技術院特別研究「東海地域地震予知のための地下水等観測研究」として開始した。その後, 1995年兵庫県南部地震の後の「第7次地震予知計画の見直しについて(平成7年4月, 同建議)」及び近畿地域等の観測井の整備を契機として, 地震防災対策観測強化地域(以下観測強化地域)の東海地域だけではなく, 近畿地域などの特定観測地域も含めた総合的観測ネットワークによる地震予知のための地下水等観測研究として, 平成9年度より研究内容を一部修正した上で実施したものである。本研究では地下水観測に基礎をおいて, 最終的に以下の重点研究項目を設定した。

- 1) 観測強化地域である東海・南関東地域及び特定観測地域の近畿地域を中心に地下水・地下ガスに関する観測体制の維持・改良につとめ, 地震に関連する変動を含む良質の連続観測データの取得する。
- 2) 水位変動の前兆パターンに基づく地震予知システム

構築の研究を行うとともに, 観測データの公開を行う。
3) 基礎研究として, 地下水位変動メカニズムの解明につとめるとともに, 新規観測地点の展開に備え, 資料の収集・解析をおこなう。

これらの研究を実施するため, 本研究期間においては, 新規の観測施設の整備にも多大の労力を注いだ。新規観測施設の整備については補正予算の実行により達成されたものの, 緊急的整備事業であったことから, 本来の研究の実行に影響することが多くあったといわねばならない。したがって, 本研究期間の終了時には十分その成果が出たとはいえないものもある。しかし, この研究を継承した工業技術院特別研究「地震防災対策強化地域及び活断層近傍における地下水等総合観測研究(平成11年度-平成15年度)」においては多くの成果が出されるものと期待している。

本報告では, 地質調査所で実施してきた地震予知のための地下水観測研究の経緯を紹介し, 本研究期間中に実施した観測施設や観測システム整備及び研究成果について述べる。

2. 研究の経緯

地下水観測による短期的地震予知研究は, 1970年代初頭に登場したダイレイタンシー水拡散モデル(Sholz *et al.*, 1973)と1975年に発生した中国の海城地震の予知の成功などを契機として急速に関心を集め, 1975年7月に出された文部省測地学審議会の建議, 「第3次地震予知計画の一部見直しについて」に基づき, 組織的な研究として取り組まれることとなった。このようななか, 従来の地下水研究の実績から, 地震予知のための地下水観測担当の国の研究機関として地質調査所が位置づけられ, 1977年3月から, 東海地域において地下水のテレメータ連続観測を開始している(垣見・東野, 1980; 佃他, 1980)。「東海地震」の災害軽減を目的として策定された大規模地震対策特別措置法に基づく「地震防災対策観測強化地域判定会」(以下, 判定会と略す)への対応として, 観測データを気象庁へ自動的に転送するシステムがこの時点ですでに組み込まれている。地震予知のための地下水観測は研究開始当初から, 東海地震予知のための24時間観測体制に位置づけられ, 欠測の少ない, 高頻度連続観測データの提供が求められている。また, 毎月開かれる判定会ではその間の地下水等の変動について説明するとともに, 気象庁をはじめとする関係各機関のデータについて総合的な検討に参加している。

1980年代初めまでの地下水・地下ガスに関わる観測研究の経緯と研究内容については地震予知・地球化学的研究グループ(1984a, 1984b, 1984c)に詳しく掲載されている。地震予知のための地下水観測研究は研究開始当初においては, 環境地質部地震地質課が担当したが, すぐ

に新設の地震化学課に引き継がれ、その後長く同課が主に担当してきた。さらに、1997年7月の地質調査所研究部の改組の際に新設された地震地質部変動解析研究室に観測研究体制が継承され、従来の地球化学中心のスタッフに加え、地球物理分野の研究者の充実が図られ、より総合的研究が可能となる体制整備がなされた。

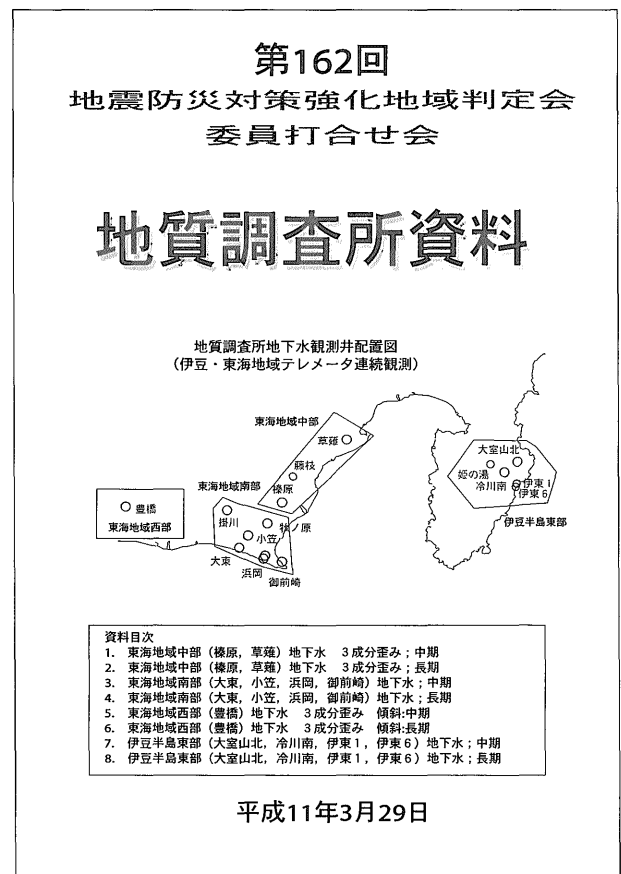
地震予知研究としての、地質調査所の地下水観測研究は今まで20年以上にわたって継続実施されてきているものの、観測データが蓄積し始めてからの期間は巨大地震の発生間隔からしても圧倒的に短く、大地震と地下水変動の関係に関する事例研究経験も少ない。また、地震観測や他の地殻変動観測などに比べ、観測研究の歴史が新しい分野であり、当初の、観測手法の選択・開発、観測地点・観測深度の選定などについてのいわば手探り状態の段階から、経験に基づいてよりシステマティックな観測体制へと発展する段階であるというのが現状と考える。地下水の観測については当初より東海地震の短期的地震予知の手法として期待されているが、その変動のメカニズムについては多くの場合未解明のまま残されている。その原因の一つは地下水を涵養する地質構造、帯水層の構造が観測地点それぞれに特性があり、その解明が十分でないことによる。地震活動、地殻変動データなどの他の観測データと総合的に検討するためには、地下水変動の意味が説明できるよう着実かつ早急に、観測井の立地する地質構造などの水文学的影響など、地下水位変動の物理的メカニズムの解明を進める必要がある。兵庫県南部地震の際にも改めて確認されたように、地震に伴う地下水の変動は著しく(佐藤, 1997; 佐藤他, 1997; Koizumi *et al.*, 1996 など), その変動の地球物理学, 地球化学及び水文学的意味がより一層理解できるように、研究の進展が強く期待されている。

3. 東海・伊豆地域の地下水等の観測

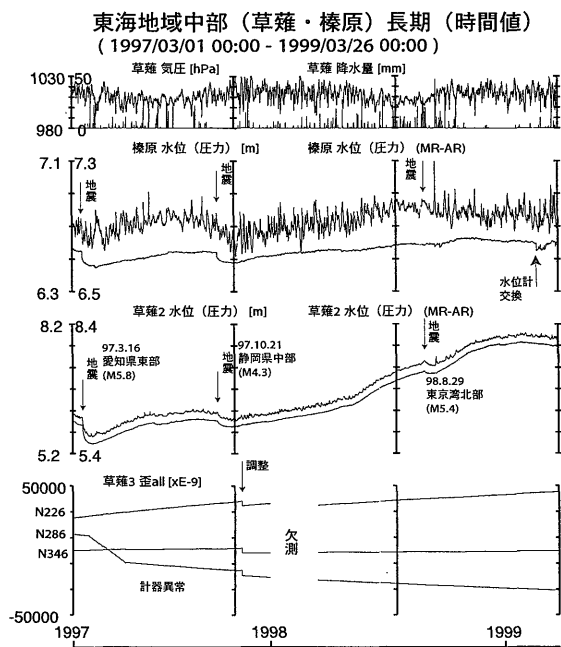
観測強化地域である東海地域およびその周辺地域のやや老朽化してきた観測ネットワークの改善を図るため、伊豆半島の大室山北、中伊豆、東海地域の草薙、小笠、牧ノ原の5つの観測井の整備(平成5年度補正予算)を平成6年度に実施し、ネットワークに新たに組み入れた。また、平成7年度補正予算により、観測ネットワークの基準観測井として、草薙観測井を高度化することに取り組んだ。草薙観測井では最深部に設置した3成分歪み計データ、GPS データ等も同時に観測できるようにした。この草薙以外の観測井では地下水位または自噴量の観測を中心として、ほかに、水温、気圧、降水量などが2分おきに自動連続観測されている。藤枝観測井や姫の湯観測井での水中ラドン濃度のデータは機器の開発等に取り組んでいることもあって、現在では観測を一時休止している。御前崎の地下水観測井は自噴を遮蔽し、水圧

観測に切り替えたことから電気伝導度観測の意味がなくなったので観測を中止している。テレメータ観測されたデータの一部は気象庁へも転送され24時間常時監視されている。現在ではこの他平成8年度の補正予算で平成9年度に完成した愛知県豊橋市の豊橋観測井の地下水位及び3成分歪み計データも東海地域判定会の資料として提供している。現在、判定会資料としては、榛原、草薙を東海地域中部、大東、小笠、浜岡、御前崎を東海地域中部、豊橋を東海地域西部、大室山北、伊東1(赤沢1)、伊東6(赤沢6)を伊豆半島東部としてグルーピングし、それぞれ中期(3ヶ月間)及び長期(2年間)のデータ出力に調整し、コメントを添えて提出している(第1図及び第2図)

地震予知のための地下水観測研究の歴史は浅く、地質調査所ではまだ20年程度の観測実績しかない。しかし、この間のデータの蓄積と解析手法に関する研究の進展により、現在では地下水位変化に関する気圧、降水量、潮汐の影響を補正する統計的手法はすでに確立されている。その結果、地震の前兆的変動と見て取れる地下水位変化パターンを抽出することが可能となっている(Matsumoto, 1992, 1999, Kitagawa and Matsumoto, 1996)。

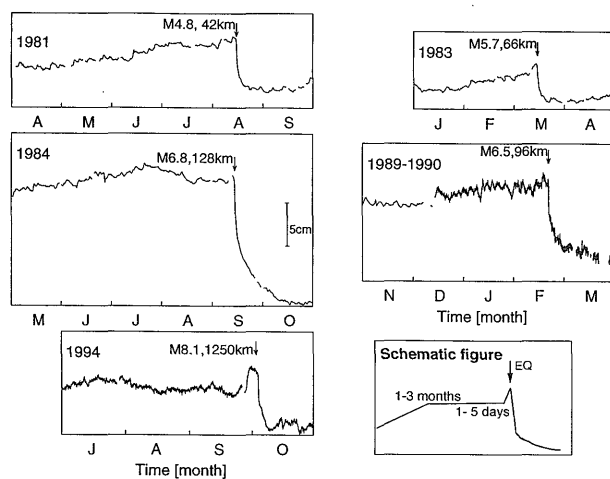


第1図 東海地域判定会資料の表紙。
Fig.1 Cover page of the groundwater data in the Tokai area for the Earthquake Assessment Committee.



第2図 東海地域中部の榛原観測井及び草薙観測井の2年間のデータ出力例。
 Fig.2 Data charts of the Haibara and Kusanagi observation wells in the Tokai area.

榛原観測井は地質調査所の観測井の中でもっとも長期間のデータが蓄積されている。上に述べた補正処理をした結果、第3図に示すように、大小5個の地震に対して前兆的変動パターンを捉えることができています。榛原観測井は東海地震に関連する前兆的地殻変動に対して、非常に敏感な観測井の一つとして注目している。前兆的变化を認識できるタイミングとしては、地震の1ヵ月から3ヵ月前に現れる長期的な水位上昇傾向が変化する時点、さらに直前の1日前から5日前に現れる水位が上昇に転じる時点である。第4図は1981年から1994年の期間に発生したマグニチュード3.8以上の地震に関して、榛原観測井での地下水位変化と地震との関係について、榛原観測井からの震源距離と地震のマグニチュードの関係として図に示したものである。図の■は前兆的变化が検出できたもの、□は地震と同時に変化が現れたもの、×は全く変化が捉えられなかったものである。地震規模が小さくても近くの地震、あるいは遠くの地震でも規模が大きければ何らかの変化を検出している。結果として、図の右上がりの直線より左上側の領域に入る地震に関しては前兆的変動が現れる可能性が大きいことになる。東海地震は明らかにこのマグニチュードと震央距離の領域

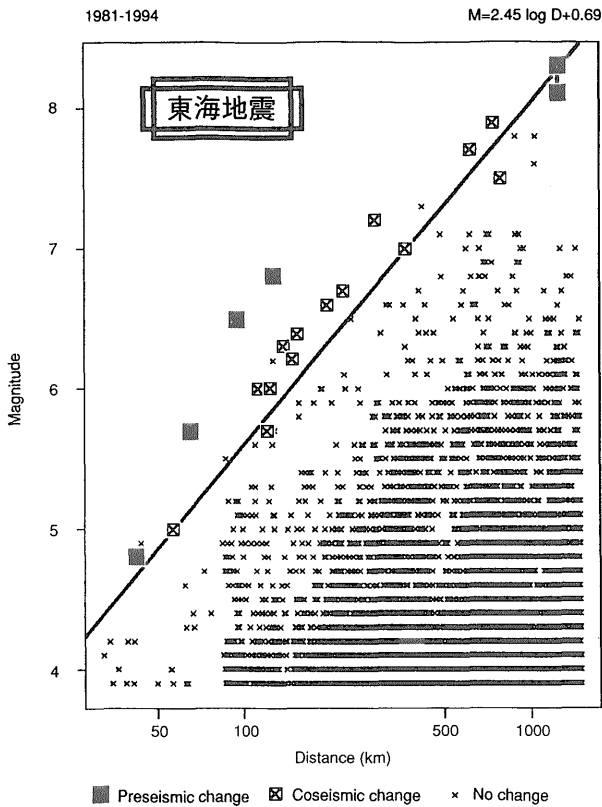


第3図 地震発生前及び直後の特徴的な地下水変動パターン(榛原観測井の例:松本,1996による)。1981年8月15日掛川付近の地震(M4.8),1983年3月16日浜名湖付近の地震,1984年8月14日長野県西部地震および1994年10月4日北海道東方沖地震(M8.1)の前後の期間について、気圧等のノイズを補正した後の地下水位変化。地震前の1から3ヶ月前の変化と直前の1から5日前の変化に特徴的なパターンが見られる。矢印は地震発生時刻を示す。
 Fig.3 A characteristic pre-seismic and co-seismic groundwater level changes of the Haibara well.

(第4図参照)の地震であるので、榛原観測井では確実に前兆的变化が観測できるものと期待している。

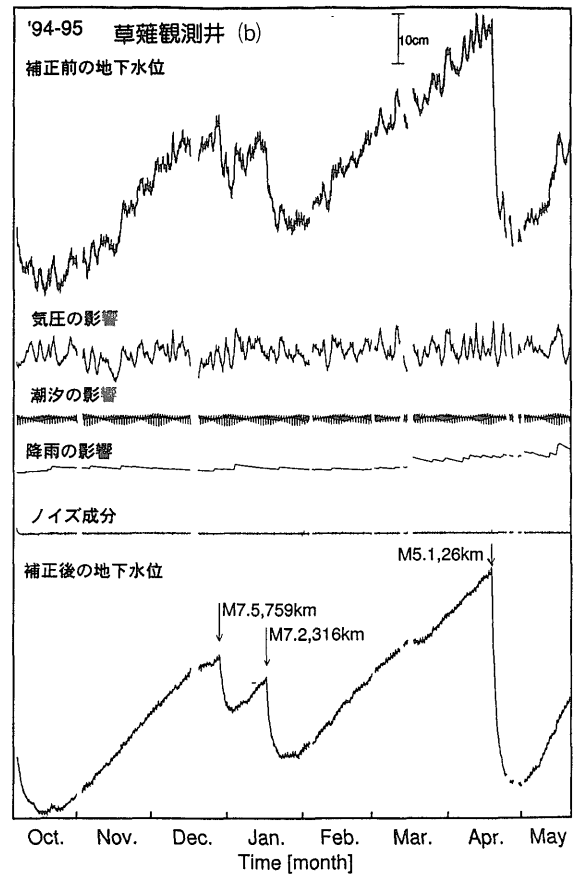
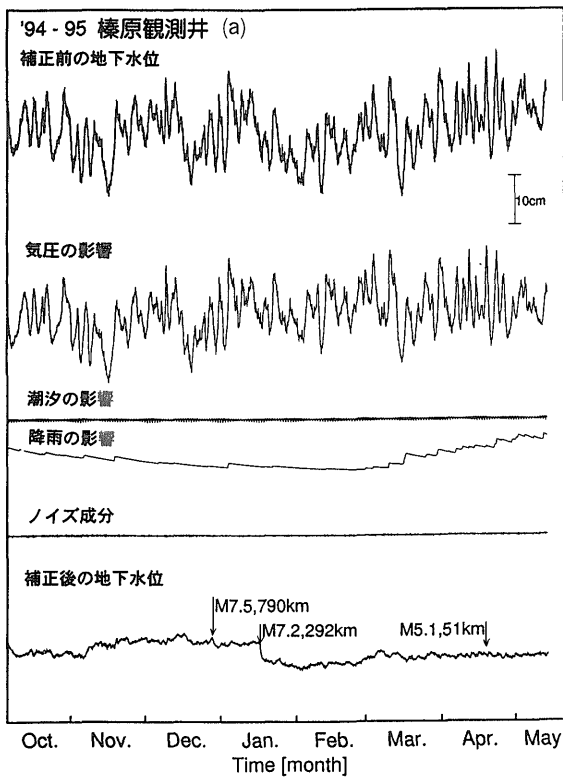
第5図aは静岡県榛原観測井の1994年の10月から1995年の5月にかけての地下水位データの解析事例である。これと1994年10月から観測をはじめた静岡県草薙運動公園内にある草薙観測井のデータを比較すると、地震に伴う変動が榛原観測井よりも顕著に現れることが明瞭である(第5図b)。これにより榛原観測井とあわせて、より精度の高い前兆把握ができる可能性がでてきたといえる。ここでは帯水層の下にある岩盤(静岡層群)に3成分歪計も設置しており、地殻歪みと地下水位変化のメカニズムの研究を行っている。榛原観測井と草薙観測井が他と比べて、なぜ地震に敏感であるのかについては、観測している帯水層が向斜構造を呈していること、地下水が被圧地下水のため流動しにくい環境にあることが要因ではないかと考えている(第6図)。後で述べる近畿・中部地域の観測施設の整備では、この観点から地下構造資料も参考にして設置地点の選定を行っている。

伊豆半島東部の伊東市に近い海域では、近年群発地震活動が活発である。これらの活動に伴って、地質調査所で観測している地下水位及び自噴量の顕著な変化が現れている。とくに、平成6年度から観測を開始した大室山北観測井(第7図参照)では、平成9年3月の群発地震活動に伴って、前兆と思える水位変化をとらえているこ



第4図 地震のマグニチュードと榛原観測井からの震央距離との関係(松本, 1996を一部改変). 斜めの線から図の左上のエリアにプロットされる地震には前兆的変動が現れる可能性が大きい. 想定されている東海地震は, 震央位置が榛原観測点から50kmから100km, 地震の規模はマグニチュード8クラスで, 図の四角で囲った「東海地震」の範囲に考えられる. したがって, 前兆的変動を検出できるものと期待している.

Fig. 4 Relation between the magnitude of earthquakes and their focal distances from the Haibara well. (modified from Matsumoto, 1996).

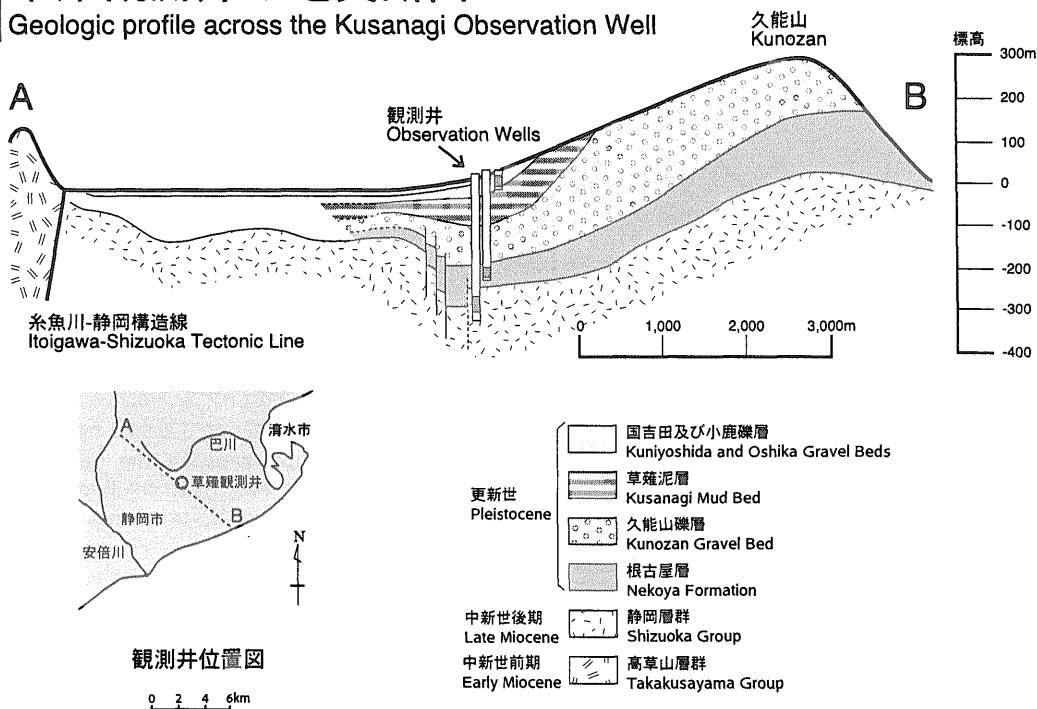


第5図 静岡県榛原観測井 (a) と草薙観測井 (b) の地震に伴った地下水変動の例 (1994年10月~1995年5月). 原データから気圧, 潮汐, 降雨の影響を取り除くと図の下部のように非常になめらかな曲線として地殻変動を検出することができる.

Fig. 5 Observed groundwater level, barometric pressure and rainfall data at the Haibara and Kusanagi wells.

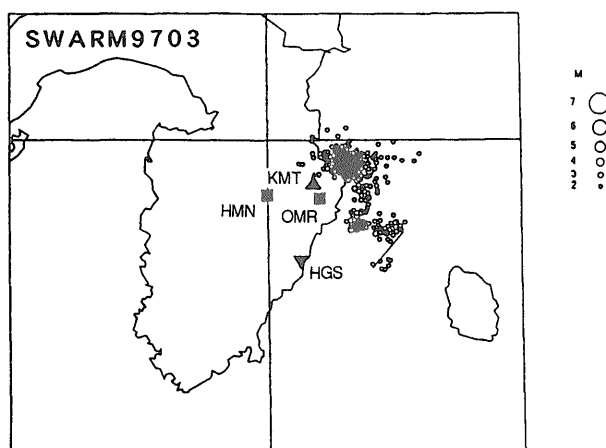
草薙観測井の地質断面

Geologic profile across the Kusanagi Observation Well



第6図 草薙観測井の地下地質構造。3本の観測井のストレーナ位置は浅い方からそれぞれ国吉田層、根古屋層および静岡層群内に設定されている。

Fig. 6 Geologic structure around the Kusanagi well.



第7図 1997年3月の伊豆半島東方沖の群発地震活動(小泉他, 1998による)。図の小丸はマグニチュード2以上の地震の分布を示す。HMN: 姫の湯観測井, OMR: 大室山北観測点, KMT: 気象庁鎌田観測点, HGS: 気象庁東伊豆観測点。

Fig. 7 Location of observation stations and epicenter distribution of the earthquake swarm (March, 1997) off the east coast of the Izu Peninsula (from Koizumi, 1998). OMR: Omuroyama-kita well, HKW: Hiekawa-minami well, KMT: Kamata seismic station (JMA), HGS: Higashi-Izu strain station

とが明らかとなっている(小泉ほか, 1998)。第8図は大室山北観測井の水位データと気象庁の東伊豆観測点の体積歪計データと鎌田観測点での地震回数とを比較したものである。体積歪計のデータは原記録から潮汐と気圧の影響及び不規則ノイズを取り除いたもので、水位データは原記録から気圧の影響と不規則ノイズを取り除いている。これによると平成9年3月の群発地震活動の発生約10時間前に水位が変化していることがわかる(第8図矢印)。体積歪計も同様に変化していることから、この結果の信頼性はかなり高いと判断している。

4. 近畿・中部地域の地下水等観測井の整備

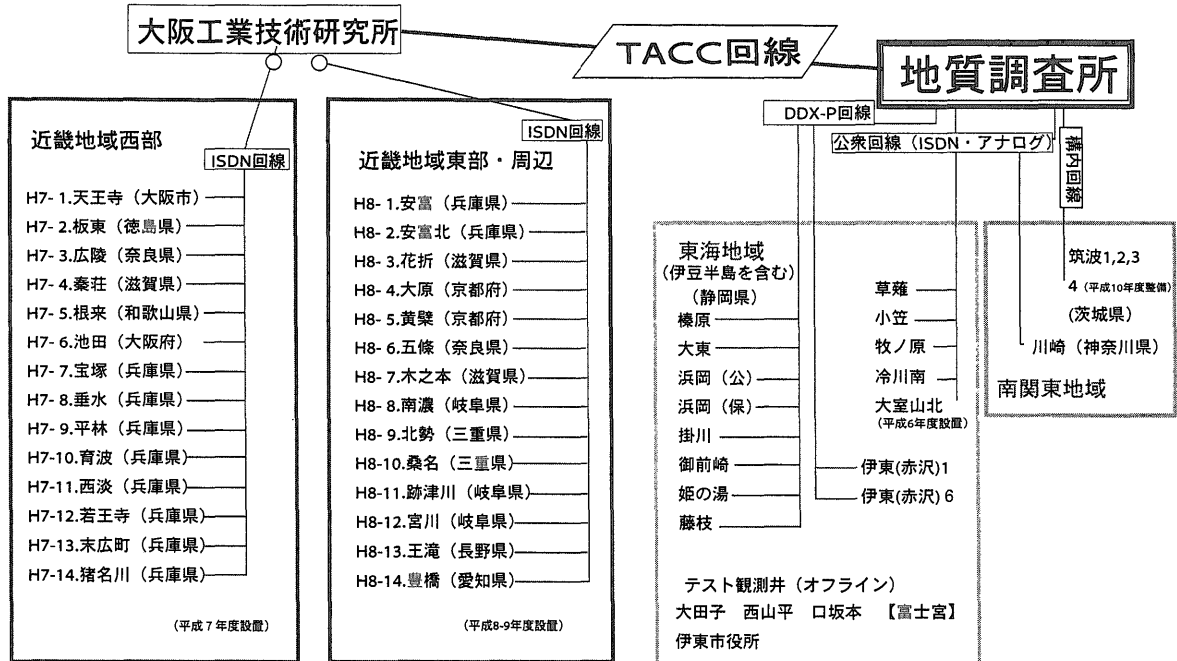
1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震(M7.2)を契機として、近畿地域西部において地下水観測を中心とした観測網を1995年より緊急に整備することとなった。地質調査所としては活断層密集地域において内陸直下型地震の予知研究に新たに取り組むことになったわけである。地下水観測を主目的として、人工的影響など地表からの影響を受けにくいと考えられる深度500m~600m級の観測井を設計し、活断層近傍であることや第四紀層の変形が期待されることなどの地質条件の下に場所の選定を行い、大阪市内の天王寺観測井(上町断層, 603m)、徳島県鳴門市板東観測井(中央構造線, 502m)、奈良県広

地下水等観測施設の位置図



第10図 地下水等テレメータ観測施設の位置。観測地点名は第11図を参照。
Fig. 10 Location of the observation wells operated by GSJ.

テレメータネットワークの概要



第11図 地質調査所の地下水観測ネットワークの概要。
Fig. 11 Outline of the telemeter network of the groundwater observation wells.

結果、対象となった19観測井の内13の観測井で、潮汐と地震時について 10^{-9} またはそれより大きい体積歪み変化(あるいはそれに相当する地殻変動)を地下水位として検出できることが明らかとなった(小泉他, 1999)。このことは、検知能力が 10^{-8} 程度とされる体積歪計、GPSな

ど他の地殻変動観測に比べても地下水観測が優位であり、前兆的地殻変動を複数の観測点で観測できる可能性が期待できることを示している。

地質調査所に集中したデータは自動処理解析され、インターネット上でその結果を見ることができる。1日に

一回更新される解析結果の図とともに、解析に用いた時系列解析プログラムも公開しており、これは広く活用されることを願っている。インターネット上で解析結果がどこでも見ることができるようになったことで、判定会招集時など緊急時への対応が容易になったといえる。

5. まとめ及び今後の課題

平成5年度補正予算、平成7年度補正予算、平成8年度補正予算等による施設整備を実施する中で、既存システムの見直しを行い、近畿地域から東海・南関東地域のデータ収集・解析システムの高度化を行った。これらの観測システムの整備によって、判定会等各機関からの問い合わせに対して、より迅速かつ組織的な対応がとれるように改善された。また、前兆変動を自動で認識するためのプロトタイププログラムを作成し、その実用性を検討することができるようになった。さらに、近畿地域の新規地下水観測井については、その前兆的地殻変動検知能力に関して、それぞれの評価を終了し、その高い能力を確認した。

地質調査所では1977年3月より、東海地域の地下水のテレメータ連続観測に着手し、その後、順次体制を強化して今日に至っており、この間、適宜観測項目、観測地点の見直しを行ってきている。観測項目については地下水位が地震予知のために最も長期的に安定したデータであると評価している。本研究および施設整備に関連して、地質調査所の地下水観測研究については当面以下の課題に取り組むことが重要と判断される。

a. 観測強化地域等における地下水観測体制を継続・維持し、高品質の連続データを収集し、大・小の地震に対する地下水変動の事例を蓄積する。観測データについては判定会、地震予知連絡会等に報告するとともに、インターネット等でのデータ流通体制を整える。

b. それぞれの観測井の地震に対する特性を明らかにするとともに、前兆の変動を事前に認知するための、補正処理技術の改良及びノイズレベル調査を行う。これをもとに前兆自動認識プログラムを改良する。

c. 観測データ及び他の地殻変動データをもとに、観測井再配置等の見直しを行う。

d. 地下水位の変動について、観測地点の地質構造、GPS等測地データ、地殻歪データ、地震活動などをもとに、変動出現のメカニズムの解明に努め、地震前兆変動の検知精度の向上を図る。

本報告では地質調査所の研究に限っているので、最近の地下水観測による地震予知研究の全般的な内容については小泉(1997)などを参照していただきたい。また、本報告は研究の終了報告と位置付け、その概要を環境地質部地震化学課長及び地震地質部変動解析室長として、本研究グループリーダーを担当した筆者が、観測システム

整備および観測体制を中心として総括したものである。本研究に関わる個々の研究の詳細についてはそれぞれの研究成果を参照していただきたい。本報告では研究内容及びそのための作業結果については研究終了時点のものを記している。したがって、今後、本報告に述べた観測地点配置・観測項目・結果の報告様式は変更されることもあることを留意していただきたい。

謝辞 本研究の実施においては、気象庁地震火山部をはじめとする関係機関のご支援及び新規観測井の設置用地を快く提供いただいた各自治体・個人の方々の理解あるご協力が不可欠であった。ここではそれぞれの方々をすべてあげることはできないがここに記して深く感謝の意を表したい。

なお、本研究には筆者の他、地震地質部から高橋 誠、乗原保人、小泉尚嗣、佐藤 努、伊藤 忍、杉山雄一、下川浩一、楠瀬勤一郎、佐藤隆司、長 秋雄、伊藤久男、地殻熱部から大湊隆雄、西沢 修、地質情報センターから松本則夫、長谷川功の各氏及び岐阜大学から佐々木嘉三、田坂茂樹、東京大学から五十嵐丈二、京都大学から渡辺邦彦の各氏など多くの研究者が参加して可能となったものであることをここに明記しておきたい。

観測網を広域に展開することはそれだけ地震と関連した変動データを多く収集できることにつながり、研究が急速に進歩するものと期待しているが、一方で研究所として長期的な観測を維持することは、研究補助スタッフの慢性的不足もあり、困難な問題も抱えている。しかし、長期的観測のデータがあつて初めて地震予知研究が可能になるものであり、観測維持は研究の根幹として、また、国立研究所の重要な使命の一つとして今後とも継続していくことが必要であろう。実際の観測維持は研究成果に必ずしもすぐにつながらないものであるが、変動解析研究室室員を中心とするスタッフの献身的な努力により可能となったものである。これによりデータの欠測も少なく、毎月開催される東海地域判定会にも着実に資料を提出することができた。研究グループリーダーとしてこれを高く評価したい。

文 献

- 長 秋雄 (1998) 地質調査所活断層モニタリング施設整備の概要。岩の力学ニュース, 48, 3-4.
- 地震予知・地球化学的研究グループ (1984) 地質調査所における地下水・地下ガスによる地震予知研究の概要 (その1)。地質ニュース, no. 356, 6-24.
- 地震予知・地球化学的研究グループ (1984) 地質調査所における地下水・地下ガスによる地震予知研究の概要 (その2)。地質ニュース, no. 358,

- 14-24.
- 地震予知・地球化学的研究グループ(1984)地質調査所における地下水・地下ガスによる地震予知研究の概要(その3)。地質ニュース, no. 359, 16-26.
- 垣見俊弘・東野徳夫(1980)東海地域地下水観測網。地震予知研究シンポジウム(1980), 107-115.
- Kitagawa, G. and Matsumoto, N. (1996) Detection of coseismic changes of underground water level. *Jour. Am. Stat. Assoc., Application and casestudies*, no. 434, 521-528.
- 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, 16-1, 40-60.
- Koizumi, N., Kano, Y., Kitagawa, Y., Sato, T., Takahashi, M., Nishimura, S., and Nishida, R. (1996) Groundwater anomalies associated with the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake. *J. Phys. Earth*, **44**, 373-380.
- Koizumi, N., Kitagawa, Y. I., Kazahaya, K., and Takahashi, M. (1998) Volcanic gas concentration and aquifer permeability estimated from tidal fluctuations in groundwater level: Case of Koshimizu well in Izu-Oshima, Japan. *Geophys. Res. Lett.* **25**, (12), 2237-2240.
- 小泉尚嗣・松本則夫・高橋 誠・佐藤 努・上垣内修(1998)1997年3月の伊豆半島東方沖群発地震前後の伊東市大室山北観測井における地下水位変動について。地震予知連絡会会報, **59**, 246-251.
- Matsumoto, N. (1992) Regression analysis for anomalous changes of groundwater level due to earthquakes. *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 1193-1196.
- 松本則夫(1996)東海地域の地下水位変動—地震及び地殻変動との比較。月刊地球, 号外 no. 14, 33-41.
- Matsumoto, N. (1999) Detection of groundwater level changes related to earthquakes. *The practice of time series analysis*, Springer-Verlag, 341-351.
- 佐藤 努(1997)水が突然噴き出す現象—地震活動による地下水変動—。月刊地球, 号外 no. 18, 17-22.
- 佐藤 努・高橋 誠(1997)淡路島の異常湧水の化学組成変化。地球化学, **31**, 89-98.
- Scholz, C.H., Sykes, L.R. and Aggarwall, Y.P. (1973) Earthquake prediction: A physical basis, *Science*, **181**, 803-810.
- 高橋 誠(1993)地震予知のための地下水テレメータ観測システム。地学雑誌, **102**, 241-251.
- 佃 栄吉・衣笠善博・杉山雄一(1980)東海地域地震予知のための地下水変動データ処理・監視システム。地調月報, **31**, 619-634.
- 佃 栄吉・高橋 誠・佐藤 努・松本則夫・伊藤久男(1996)地質調査所における地震予知地下水観測網—近畿地域の地下水観測網の新設—。地質ニュース, no. 505, 11-15.

(受付:2000年6月14日;受理:2000年7月26日)