

地震予知研究における水文学的・地球化学的手法の役割

小泉尚嗣¹⁾・高橋 誠¹⁾・松本則夫¹⁾・佐藤 努¹⁾・大谷 竜¹⁾・北川有一¹⁾

1. はじめに

地震予知は、いろいろの手法を組み合わせ、相互に情報交換しつつ協力して研究していかなくては達成できない困難な課題です。地震予知研究の手法において水文学的手法(主に地下水の水位や自噴量・水温の観測・研究を用いた手法)や地球化学的手法(主に地下水や地下ガスの化学分析結果を利用した手法)は、従来の地球物理学的手法(地震や地殻変動の観測・研究を用いた手法)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す(小泉, 1997)。したがって、水文学的・地球化学的手法が得意とするような課題を優先的に研究する一方で、得られたデータを、他手法によるものと比較できる形にしておくことが重要です。そのような観点にたつと、地震予知研究における水文学的・地球化学的手法の役割は下記の5点が考えられます。

(1) 地下水データから換算できる、地盤の伸縮や昇降といった地殻変動データの提供。これは、地震の短期・直前予測および長期予測への貢献が考えられます(松本ほか, 2003)。また、地震後にゆっくりとした地殻変動が続くことがあり、それは余効地殻変動と呼ばれますが、それについても地下水の影響を考えることが重要です(Jonsson *et al.*, 2003)。

(2) 活断層周辺の地下における透水性(水の通りやすさ)の時間変化に関する情報の提供。(a) 断層の固着している部分に力が加わり、エネルギーが蓄えられ、ついに地震が発生し、固着部分が破壊され、割れ目がたくさんできて水が通りやすくなる。(b) その後、断層の破壊された部分が徐々に修復し、割れ目がだんだんなくなって水が通りにくくなる。(c) 再びエネルギーが蓄えられて次の地震が起

こる。(a)→(c)という地震発生サイクルの研究に、透水性の時間変化の情報は役立つので、地震の長期予測に役立ちます(北川ほか, 2004; Sato *et al.*, 2000)。

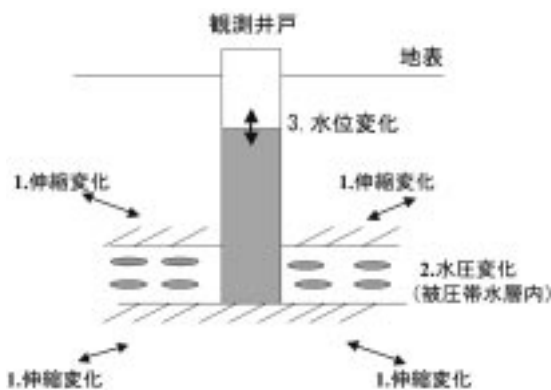
(3) 地震に無関係な地下水変化に伴う地盤の昇降に関する情報の提供。GPSなどの測量の精度向上につながるので、地震の中～長期予測に貢献できます。人工的な地下水のくみ上げや降雨のような地震に無関係な要因による浅い地下水位の変化に基づく地盤の昇降についての研究では、松本(1996)やOhtani *et al.* (2000)の先駆的な研究がありますが、最近では、測量の専門家といえる国土地理院でも取り組みが始まりました(宗包ほか, 2003; 飛田ほか, 2003)。

(4) 地震が発生する深さにおける間隙水圧変化(地盤内の水圧変化)に関する情報の提供。地震が発生するメカニズムにおいて、地下深部の間隙水圧変化は大きな役割を果たしていると考えられています。しかし、通常観測できる地下水の深さは1km程度までなのに対し、地震が発生する深さは数km～数百kmなので、地下水の観測結果から地震が発生する深さにおける間隙水圧の情報を得ようとする研究は進んでいません。深さ数kmや場所によってはそれより浅いところでの地震活動が活発で、熱水利用のための深さ1km以上の井戸が存在することのある熱水地域における観測・研究が、この課題に対する回答をもたらしてくれるかもしれないと考えられます(Roeloffs *et al.*, 2003)。

(5) 地震に伴う地盤内の物質移動に関する情報の提供。地球化学的手法にとって、もっとも得意な分野といえますが、地震前に物質が地盤内で移動するメカニズムを定量的に明らかにすることが困難な状況が続いています。また、地震発生域付近から

1) 産総研 地球科学情報研究部門 地震地下水研究グループ

キーワード: 地震予知, 水文学, 地下水, 地球化学, 地殻変動, プレスリップ, 東海地震, 南海地震



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。

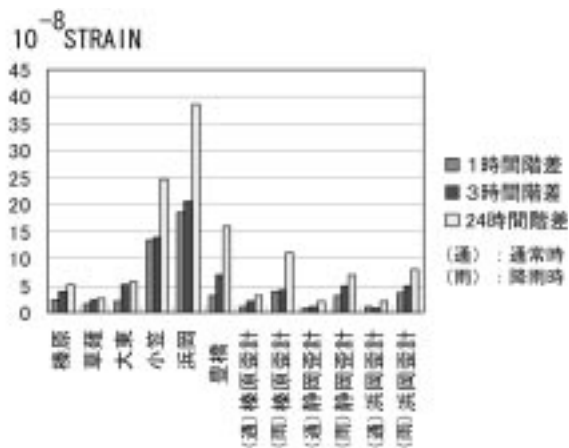
の物質の移動が、地震活動の推移とともに観測で確認されたのは松代地震(1965-1967)のみであると考えられており(Yoshioka *et al.*, 1970; 大竹, 1976), この課題についても現在なお研究段階といえます。

現時点で、観測量を地震予知と結び付けて定量的な議論ができ、東海地震予知に代表される実用的な地震予知に適用できるのは上記(1)のみですから、本稿では主に(1)について議論をおこないます。

2. 議論

2.1 地下水位データの地殻変動データへの換算

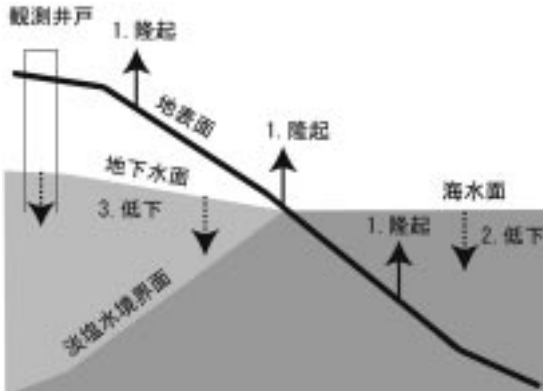
水を通さない層で囲まれた地層や岩の割れ目系の中にある水を被圧地下水といい、被圧地下水を含む地層や割れ目系を被圧帯水層と呼びます(第1図)。被圧地下水は、地盤が伸縮するとそれにあわせて水圧を変化させるので、その水位変化は体積歪(地盤の伸縮)変化として扱えます。地面は、潮の満ち引きのように、月や太陽の引力で伸縮し、それを地球潮汐による体積歪の潮汐変化といいます。その伸縮変化による地下水位変化を利用して、地下水位の体積歪変化に対する感度を求めることができます。地球潮汐による体積歪の変化は、基準となる体積の大きさを1として、その1千万分の1~1億分の1といった非常に小さな変化ですが、ごく条件のよい観測井戸であれば、数cm程度の振幅の潮汐変化が観測できます。我々が通常用いる高感度の水位計の分解能が0.2mm程度であるので、100億分の1程度の体積歪変化の検出が期待できることに



第2図 歪換算後の水位のノイズレベルと、気象庁体積歪計のノイズレベル(小林・松森, 1999)との比較。

なります(第1図)。ただし、(1)降雨が地下水位へ与える長期的な影響を取り除くのが難しいこと、(2)数日以上の時間をかけてゆっくりと変化する体積歪に対しては、一般に地下水位はあまり変化しないこと、つまり、地下水位変化の体積歪変化に対する感度が落ちること、(3)数日以内の変化に限っても、地下水位は通常時に数mm程度は変化することといった理由により、条件のよい場合でも1時間毎、3時間毎、24時間毎の変化(1時間階差、3時間階差、24時間階差と呼びます)にして、 10^{-8} (1億分の1)の体積歪変化に対応するような通常時の変化(ノイズレベル)があります(第2図)。これはつまり、 10^{-8} の体積歪変化を越えるような地盤の伸縮ならば、地下水位変化として検出できることを意味します。

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地下水と思えばよいでしょう。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かこまれていないので、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となります。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昇降に応じて、地表からの地下水面の深さ(水位)が変化します。すなわち、ある基準面に対する地盤の高さ(比高と呼びます)の変化が、海岸付近の



第3図 地盤の隆起と海岸付近の地下水位の低下との関係を示した模式図。

不圧地下水の水位変化になり得るわけです(第3図)。その場合、比高変化があった後も、海岸付近の不圧地下水と海面とで圧力がつりあった状態になっているならば、不圧地下水の水位変化量は比高変化量と同じかそれ以下になります。

2.2 地下水データを地殻変動データに換算することのメリット

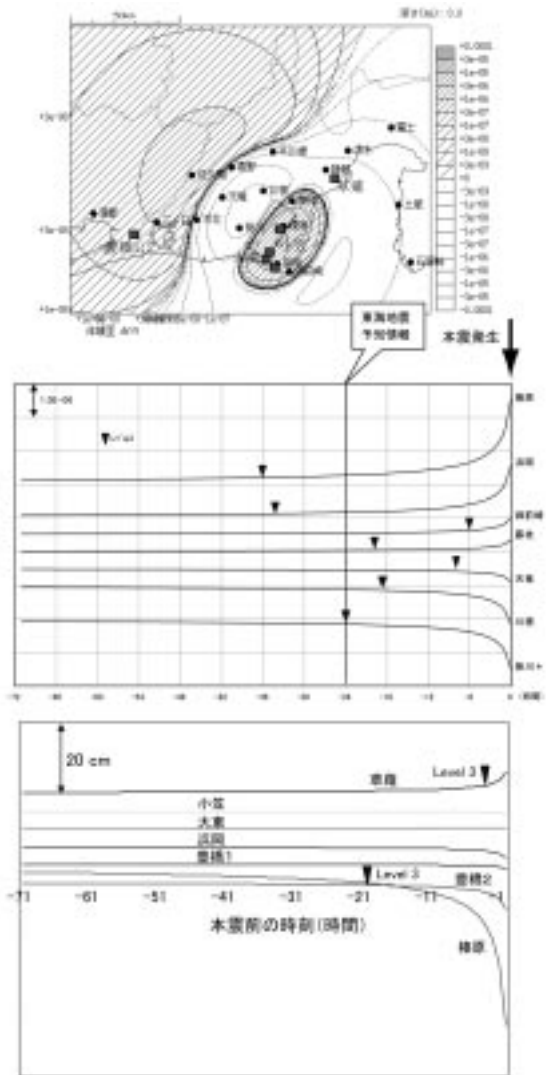
下記の4点が考えられます。

- (1) 帯水層の広がりに対応する範囲の空間的な平均値を測定できること。
- (2) 地殻変動を測定する通常の観測機器とは独立した観測であることから、それらの地殻変動観測機器と比較・検討することで観測データの信頼性が増すこと。
- (3) 既存の地下水データ・地下水観測設備の利用により、近代的観測の行われていない場所・時代での地殻変動データが提供できること。
- (4) 地下水位等の観測機器は、通常の地殻変動の観測機器に比べて安く扱いも簡単なこと。

3. 応用

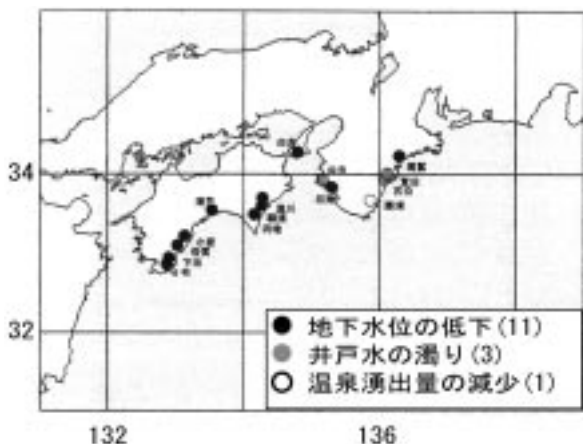
3.1 想定東海地震におけるプレスリップ検知能力

上述のように、被圧地下水であって地球潮汐による潮汐変化を確認できるような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まったく同様に扱えるので、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様の手法で地下水位データを解析し、相互



第4図 静岡県榛原町の直下で、マグニチュード6.5の大きさに相当するプレスリップ(地震前のゆっくりすべり)が生じた時に想定される体積歪変化の分布(上図)と気象庁の体積歪計(上図の●)の変化(中図)と産総研の地下水位計(上図の■)の変化(下図)。上図と中図は気象庁(2003)に加筆したもの。

に比較することができます。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すべり(プレスリップと呼ぶ)ですが、第4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。気象庁の体積歪計3点で、レベル3(第2図で示したノイズレベルの2倍)を越える変化



第5図 1946年南海地震前の地下水の変化 (京大防災研, 2003a).

があり、しかもそれ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。東海地方における産業技術総合研究所(以降、産総研と略称)の地下水観測点の中で条件のよいものは、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(松本ほか, 2003; 小泉ほか, 2003)。

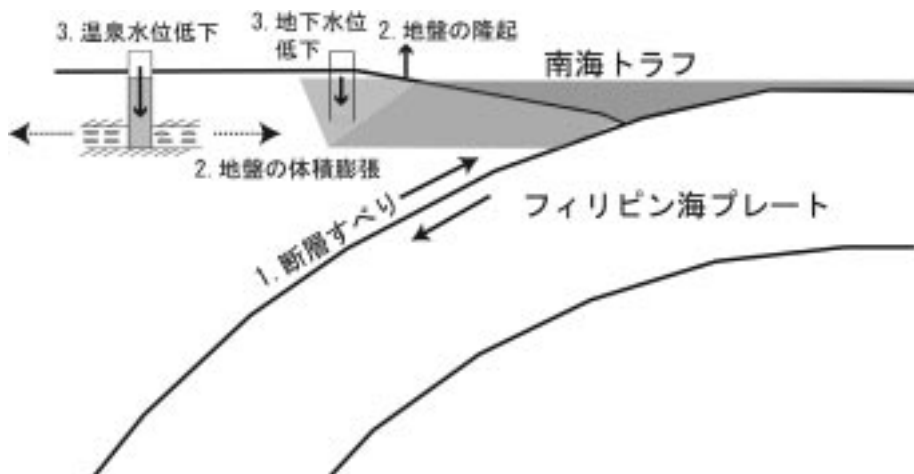
低コストで東海地震の予測精度を向上させるために、東海地震の想定震源域周辺で体積歪計のないところに地下水観測点を新たに設けることも、今後の展開としては考えられます。

3.2 1946年南海地震前後の地下水変化の評価

紀伊半島～四国の南の沖合いで、何度も発生して

いるM(マグニチュード)8クラスの巨大地震は南海地震と呼ばれます。過去1,300年間に8～9回の発生が古文書等で確認されている南海地震では、四国や紀伊半島の温泉でくりかえし自噴量や水位の低下があったことが知られています。特に、1946年南海地震(1946年12月21日発生, M8.0)においては、地震時における温泉水の自噴量・水位の低下に加え、地震の数日前から、紀伊半島～四国の太平洋岸の浅い地下水の水位が、推定で数十cm以上低下したことが知られています(第5図, 水路局, 1948; 京大防災研, 2003a, 2003b)。1946年南海地震の断層モデルから計算すると、紀伊半島～四国の陸域では基本的に体積歪が地震時に増大、すなわち地盤が地震時に膨張します。したがって、地震時の温泉水の自噴量・水位の低下については、温泉水を被圧地下水と考えて、上述のように計算される体積歪変化で定性的かつ定量的に説明できます。地震前の浅い地下水の水位低下も、南海地震本震の震源域周辺でプレスリップがあったとすれば、紀伊半島～四国の太平洋岸で陸地が隆起することで、2.1で示した考えに基づき定量的に説明できますが(第6図)、その量は数cm程度にとどまり、上述の数十cm以上といった振幅は説明できません。本来なら数cm程度の低下にとどまるはずの地下水位変化を数十cm以上にするような何らかの増幅機構があるはずで、それを解明することが課題です。

このように、当時の地下水変化を地殻変動と結びつけて考えることで、1946年南海地震の発生モデルを本震発生前の過程も含めて議論・評価で



第6図 1946年南海地震前後の地下水変化を説明する模式図。

き、これは次期南海地震発生予測精度向上に貢献できると考えられます(京大防災研, 2003a, 2003b; 小泉, 2004)。

4. 課題

4.1 地下水変化を地殻変動データに換算する際の周波数依存性の評価

体積歪変化に対する被圧地下水の水位変化のところで説明したように、地面の伸縮や比高変化がゆっくりなのか速いのかによって、地下水位の変化の仕方が変わります。このような性質を、地殻変動に対する地下水位変化の「周波数依存性」と呼びます。

潮汐とは違うスピードで変化する気圧変化によっても地面は伸縮し地下水位は変化します。また、海水面もいろいろな要因で地面に対して上下し、それに応じて海岸付近の浅い地下水は変化します。このような地下水位変化を詳しく解析して、上述の周波数依存性を解明することが大切です。それによって、より精度の高い、地下水変化から地殻変動への換算ができることとなります(北川ほか, 2003)。

4.2 地震時に地下水変化をもたらす他の要因による寄与の評価

地震の時には、体積歪変化や比高変化だけではなく、地面が強くゆれて、地面の中の水圧が急増する液状化や地盤の中の水の通しやすさ(透水性)の変化も生じ、それらによっても地下水は変化します。通常時の変化を把握し、過去の地震時・地震後の変化を理解しておけば、地震前の変化が適切に評価できます。すなわち、異常か異常でないか、異常ならばどの程度異常なのかがわかるわけで、それに基づいて、地震時・地震後の変化について要因別に分類・評価できるようにしておくことが重要です。液状化や透水性の変化は、観測井戸のまわりの地質状況や地震の揺れ(地震動)の強さに左右されると考えられますから、今後、それらと地下水変化を比較検討していく必要があります。台湾で発生した1999年集集地震(M7.6)後に、地質状況がよく把握された数百の地下水観測点で詳細な地下水変化が捉えられていて、台湾のもつ高密度

な地震動観測データと比較可能なので、このデータの解析が一つの回答を与えてくれる可能性があります(Wang *et al.*, 2001; Lai *et al.*, 2003)。

4.3 反映している地殻変動の空間的な把握

2.2の(1)で帯水層の広がりに対応する範囲の地殻変動の空間平均を地下水変化は示すとしましたが、実際のどの程度の範囲を代表しているかはよくわからないというのが実情です。(1)広範囲の地殻変動の検出に優れたGPS観測データや、狭い範囲の地殻変動検出にすぐれた体積歪・傾斜計データ等との相互比較や、(2)狭い範囲に観測井戸を集中させて、潮汐・気圧変化・地震動によってもたらされる、それぞれ速さの異なる地殻変動に対する個々の観測井戸における地下水変化を比較検討するといった手法で、上述の範囲を推定していくといったような解決策が考えられます。

5. まとめ

地下水変化を地殻変動に換算することで、地震に関連した地下水変化を、地震の理論やシミュレーションと結び付けて定量的評価ができます。上述したように、体積歪変化に対して敏感な井戸ならば、近代的な地下水位観測がされているところで 10^{-8} 程度の体積歪変化が検出できます。また、地下水位変化の記録が人の目で見積もったものにすぎない場合でも、人の目で判断できる数十cm程度の水位変化に相当する $10^{-6} \sim 10^{-7}$ (百万分の1~1千万分の1)程度の体積歪変化を検出している可能性があります。海岸付近の地下水位変化の比高変化への換算等も考慮すると、近代的観測の行われていない場所・時代における地震前後の地殻変動に関する情報を既存の地下水記録から得ることができます。地震のモデルやシミュレーションの発展には、過去の地震前後の地殻変動に関する情報が不可欠なので、その点でもこのような研究は大きな価値があるといえます。

謝辞:産総研で行われている水文学的・地球化学的手法による地震予知研究においては、特に観測の面で、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。

文 献

- Jonsson, S., P. Segall, R. Pedersen and G. Bjornsson (2003) : Post-earthquake ground movements correlated to pore-pressure transients, *Nature*, 424, 179-183.
- 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.jma.go.jp/JMA_HP/jma/press/0307/28a/20030728tokai.pdf
- 北川有一・小泉尚嗣・松本則夫・高橋 誠 (2003) : 産総研観測網における地殻歪・地下水位データの周波数依存性とノイズレベル, 日本地震学会講演予稿集, 130p.
- 北川有一・藤森邦夫・小泉尚嗣 (2004) : 大地震発生後の断層帯の透水性の時間変化-繰り返し注水実験による測定-, 地質ニュース, no.596, 29-34.
- 京大防災研 (2003a) : 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.
- 京大防災研 (2003b) : 南海地震の前の井戸水の減少について-増幅のメカニズム-, 地震予知連絡会会報, 70, 423-428.
- 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・松本則夫・北川有一・大谷 竜・高橋 誠・佐藤 努 (2003) : 東海地域における地下水位変化と地殻変動との比較研究, 月刊地球, 号外41号, 48-54.
- 小泉尚嗣 (2004) : 昭和南海地震: 次の南海地震の予知をめざして, 産総研シリーズ「活断層と古地震-過去から学び, 将来を予測する-」, 印刷中.
- 小林昭夫・松森敏幸 (1999) : 埋込式体積歪計のノイズレベル調査及び異常監視処理, 地震時報, 62, 17-41.
- Lai, W.-C., N. Matsumoto, N. Koizumi, E. Roeloffs, Y. Kitagawa, C.-L. Shieh and Y.-P. Lee (2003) : Effects of seismic ground motion and geological setting on the coseismic groundwater level changes caused by the 1999 Chi-Chi Earthquake, Taiwan 地球惑星科学関連学会2003年合同大会, S049-P002.
- 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14号, 33-41.
- 松本則夫・高橋 誠・北川有一・小泉尚嗣 (2003) : 産総研・地下水位観測ネットワークによる想定東海地震の前駆すべりの検知能力 日本地震学会講演予稿集, 129p.
- 宗包浩志・飛田幹男・高島和宏・松阪 茂・黒石裕樹・眞崎良光 (2003) : 地下水で動く電子基準点 I, 測地学会講演予稿集, 65-66.
- 大竹政和 (1976) : 松代地震から10年, 科学, 46, 306-313.
- Ohtani, R., N. Koizumi, N. Matsumoto and E. Tsukuda (2000) : Preliminary results from permanent GPS array by the Geological Survey of Japan in conjunction with groundwater-level observations, *Earth Planets Space*, 52, 663-668.
- Roeloffs, E., M. Sneed, D. L. Galloway, M. L. Sorey, C. D. Farrar, J. F. Howle and J. Hughes (2003) : Water-level changes induced by local and distant earthquakes at Long Valley caldera, California, *J. Volc. Geotherm. Res.*, 127, 269-303.
- Sato, T., R. Sakai, K. Furuya and T. Kodama (2000) : Coseismic spring flow changes associated with the 1995 Kobe earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 1219-1222.
- 水路局 (1948) : 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, 117p.
- 飛田幹男・宗包浩志・松阪 茂・黒石裕樹・眞崎良光・加藤 敏 (2003) : 地下水で動く電子基準点 II, 測地学会講演予稿集, 67-68.
- Wang, C.-Y., L.-H. Cheng, C.-V. Chin and S.-B. Yu (2001) : Coseismic hydrologic response of an alluvial fan to the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan, *Geology*, 29, 831-834.
- Yoshioka, R., S. Okuda and Y. Kitano (1970) : Calcium chloride type water discharged from the Matushiro area in connection with swarm earthquakes, *Geochem J.*, 4, 61-74.

KOIZUMI Naoji, TAKAHASHI Makoto, MATSUMOTO Norio, SATO Tsutomu, OHTANI Ryu and KITAGAWA Yuichi (2004) : Strategical roles of hydrological and geochemical methods for earthquake prediction research.

<受付: 2004年2月18日>