

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

小泉尚嗣^{1,*}・松本則夫¹・頼 文基²

Naoji Koizumi, Norio Matsumoto and Wen-Chi Lai (2011) Cooperative research entitled "Hydrological and geochemical research for earthquake prediction in Taiwan" between National Cheng-Kung University, Taiwan and National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 62(3/4), p. 185-190, 7 figs, 1 table.

Abstract: Geological Survey of Japan, AIST has been carrying out the cooperative research entitled "Hydrological and geochemical research for earthquake prediction in Taiwan" with Disaster Prevention Research Center, National Cheng-Kung University, Taiwan since 2002. We made much contribution to clarifying the mechanism of groundwater changes and their recoveries related to the 1999 Chi-chi earthquake, constructing a groundwater observation network composed of 16 wells in Taiwan and understanding the earthquake-related groundwater changes observed by the new groundwater observation network through this cooperative research. In Taiwan seismicity is more active and crustal deformation is more rapid than in Japan. Therefore observation and analysis of groundwater changes related to earthquake and crustal deformation in Taiwan will enable us to make rapid progress in hydrological and geochemical research for earthquake prediction. This cooperative research will also give important information for evaluation of long-term groundwater changes in tectonically active areas like Japan and Taiwan.

Keywords: Taiwan, 1999 Chi-chi earthquake, groundwater, earthquake prediction, crustal deformation, geochemistry, ground shaking

1. はじめに

1999 年 9 月 21 日 1 時 47 分 (台湾時間) 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台湾では, 地震・活断層研究として, 2001 年から 5 ヶ年のプロジェクト「The program of earthquakes and active-fault research (PEAR)」が始まった. この PEAR で, 地震活動, 活断層, GPS, 地殻変動等の研究とならんで, 地震に伴う地下水変化の観測・研究が, 経済省水資源局の支援のもと, 成功大学防災研究センターを中心として行われ, 5 ヶ年計画が終了した 2006 年以降も継続されている.

産業技術総合研究所 (以降, 産総研) は, 計画段階からこのプロジェクトに関与し技術支援等を行ってきた. 2005 年末までにこのプロジェクトで整備された観測井戸は 16 点であるが, このほかに, 水資源局の保持する観測井戸 (2003 年時点で約 550 点) のデータも利用可能である. これらの井戸における透水性や地質構造等が, 水資源局の統一された手法で調査済みであることを考慮すると, 台湾における地下水観測データは, 地震に伴う

地下水変化を評価する研究を行う上で大きな価値があると考えられる.

以上を考慮して, 2002 年から台湾成功大学と産総研は「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」を行なうとして共同研究契約を結んだ. 台湾側の地震に伴う地下水変化の研究プロジェクトは, 第 1 期が 2001-2005 年, 第 2 期が 2006-2009 年, 第 3 期が 2010-2012 年となっている (台湾の年度は 1 月から始まり 12 月に終わる). 他方, 共同研究契約は, 産総研側の中期計画との関係で, 第 1 期が 2002 年~2004 年, 第 2 期が 2005 年~2009 年等となって台湾のプロジェクトの期間とずれる. 以下では, 台湾側のプロジェクトの期間にしたがって研究成果を記述する.

2. 研究成果

2.1 第 1 期 (2001 ~ 2005)

第 1 期 (2001 ~ 2005) においては, 地震前後の地下水位変化データ解析のための 16 観測井戸の整備と 1999 年集集地震前後の地下水変化の解析を主に行なった. ま

¹ 活断層・地震研究センター (AIST, Geological Survey of Japan, Active Fault and Earthquake Research Center)

² 台湾国立成功大学防災センター (Disaster Prevention Research Center, National Cheng-Kung University, Taiwan)

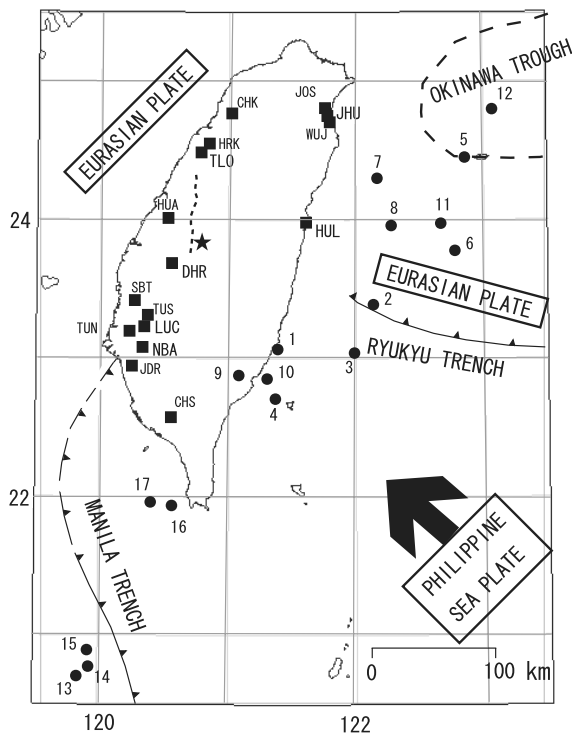
* Corresponding author: N.KOIZUMI, Centoral 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan, Email: koizumi-n@aist.go.jp

た、2002-2005 年に毎年 1 回、合計 4 回の国際ワークショップを行なった (小泉, 2005; 小泉ほか, 2005)。

16 の観測井戸は、新たに作成した 4 つの井戸と、台湾経済省水資源局が地下水資源管理のために作成した 550 の井戸の中から選んだ 12 の井戸からなる (Lai *et al.*, 2010) (第 1 図)。水資源局の井戸における水位計の分解能は 1cm, サンプル間隔は原則 1 時間で現地収録式だったが、新たに整備した 16 観測井戸における水位計の分解能は 0.2mm, サンプル間隔は 2 分でデータはテレメーターで送付されている。得られたデータを潮汐解析プログラム BAYTAP-G (Tamura *et al.*, 1991) で解析することも含め、観測・解析システムは産総研の地下水観測システム (高橋ほか, 2004) を基に設計された。

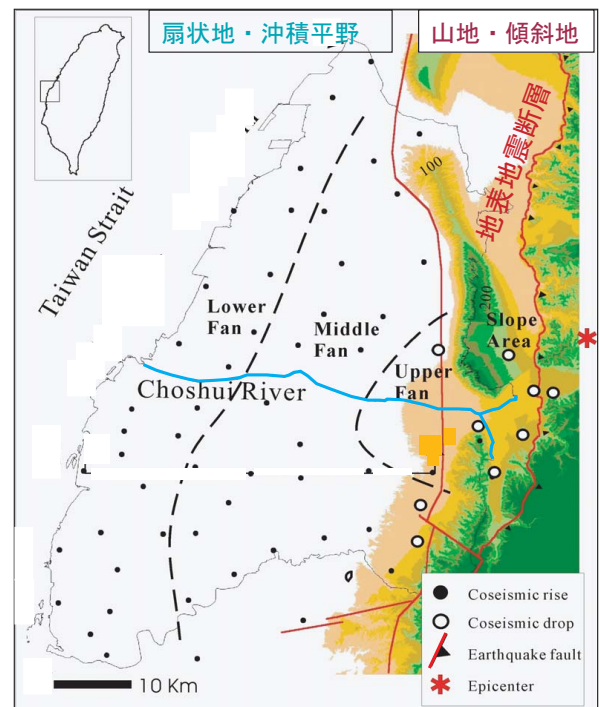
1999 年集集地震の際には、上述の水資源局の多数の観測井戸で地下水位が大きく変化した。地震動の最大加速度から考えて、気象庁震度にして 4 から 6 強程度の揺

れがあったと推定される震源近傍においては、震源地により近い山間地 (傾斜地) で最大 10 m の水位低下があり、平野部で最大 8 m 程度の水位上昇があった (第 2, 3 図)。これについては、原因を地震動による液状化等とするもの (Wang *et al.*, 2001) と静的体積歪変化によるもの (Lee *et al.*, 2002) とがあったが、Lee *et al.* (2002) は断層モデルから体積歪変化を計算する際に計算ミスがあり (Koizumi *et al.*, 2004), 結局地震動が原因であることが判った (Lai *et al.*, 2004)。Lai *et al.* (2004) では、山地・傾斜地における水位の低下については、地震動による透水性の増加が原因であるとも推定している。また、海岸近くでは、1999 年集集地震前から、産業用の揚水が原因で地下水位が海面よりも数十 m も低く、そのような場所では地震時～地震後の水位変化も小さかった (第 4 図)。



第 1 図 台湾周辺のテクトニクスと 1999 年集集地震の震央 (★), 地下水観測点 (■) の分布および 2003 年 12 月～2006 年 12 月に発生した M 6 以上の地震 (●) (Lai *et al.* (2010) の図を一部修正)。破線は 1999 年集集地震の地表地震断層 (車龍埔断層) を示す。

Fig.1 Tectonic setting of Taiwan, the epicenter of 1999 Chi-Chi earthquake (★), observation wells (■) and earthquakes (●) with magnitude of 6 or greater, which occurred during the period from December 2003 to December 2006. This figure is modified from Lai *et al.* (2010). A broken line shows the earthquake fault of 1999 Chi-Chi earthquake or the Cherlungpu fault.



第 2 図 1999 年集集地震の震央 (*) と地表地震断層 (車龍埔断層) および地下水観測点の位置。Chia *et al.* (2001) の図を一部修正したもの。●が地震時～地震後の地下水位上昇を、○は地下水位低下を示す。

Fig.2 Location of the monitoring wells, the epicenter of 1999 Chi-Chi earthquake and the earthquake fault (Cherlungpu fault). This figure is modified from Chia *et al.* (2001). Coseismic and/or postseismic drops are represented by open circles. Coseismic and/or postseismic rises are represented by solid circles.

2.2 第2期（2006～2009）

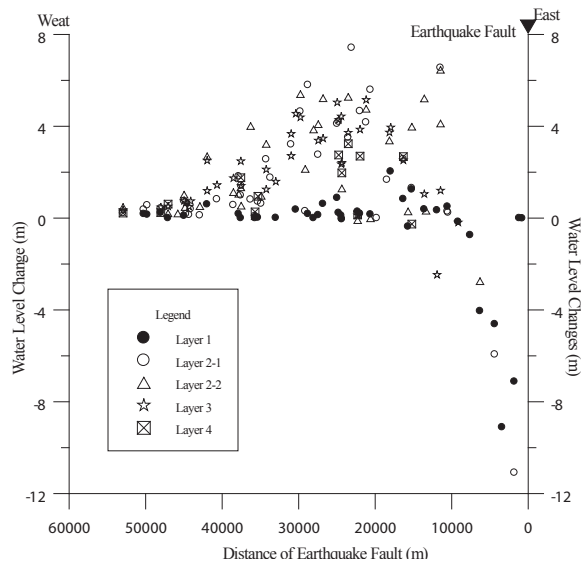
第2期においては、1999年集集地震後の地下水の長期的変化の評価と第1期で整備した16観測点の内、2003年までに観測を開始した6観測点について、地震時～地震後の地下水変化の解析を行なった。また、2006-2009年に毎年1回、合計4回の国際ワークショップを引き続き行なった（小泉，2009；謝ほか，2010）。

上述したように、1999年集集地震後には、第2図の観測井戸において、山間地（傾斜地）で最大10 m以上の水位低下があり、平野部でも最大8 m程度の水位上昇があった。山間地（傾斜地）での透水性変化によると思われる水位低下は回復するのに数年以上がかかる井戸が多く、2006年時点で戻りきっていない井戸もあった（小泉ほか，2006）。他方、平野部での液状化が主因と思われる水位上昇については地震発生後3ヶ月以内に回復していた（小泉ほか，2006）。1999年集集地震前の調査によれば、観測井戸に地下水を供給する帯水層の透水性は、平野部では $10^{-3} \sim 10^{-4}$ m/secと非常に大きい、山間地（傾斜地）の帯水層の透水性はその1/10 またはそれ以下である（Lai *et al.*, 2004）。このような透水性の大きさと、（地下水位の境界条件である）海が近いことから、平野

部では地震後の地下水位が急速に回復したと考えられる（小泉ほか，2006）。

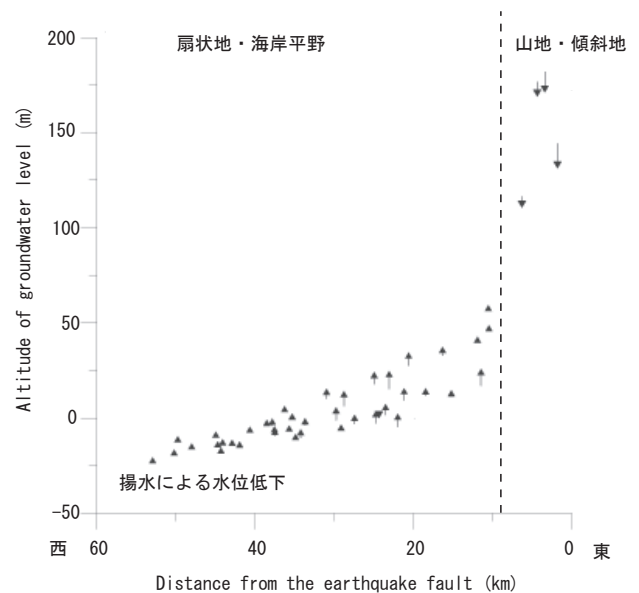
上述のように、2003年までに観測を開始した6観測井戸（第1図のJHU,HUL,TLO,DHR,LUC,NBA）について、2003年12月～2006年12月の約3年間の水位データを用いて評価した。これらの井戸のストレーナ（水の出入りする場所）の深さは80-250 m、井戸周辺の地質は第四紀の堆積岩～堆積物である。まず、水位が潮汐変化することから、体積歪の潮汐変化の理論値と比較することで、これらの観測井戸における地下水位の体積歪感度が求められた。その値は、0.1-0.5 mm/nstrainである（1 nstrainは 10^{-9} の歪）。この結果と水位計の分解能から、これらの観測点での体積歪変化の検出限界は、ほぼ1 nstrainであることがわかる。

次に、2003年12月～2006年12月に台湾周辺で発生した17個のM 6以上の地震（第1図）について地震時～地震後に生じた水位の変化が（第5図）、観測井戸における静的な体積歪変化と地震動の最大加速度でどの程度説明できるかを調べた。なお、サンプリング間隔が2分なので、水位が地震によって短周期で振動している場合、水位変化を正確に捉えられているわけではないこと



第3図 1999年集集地震の際の地震時～地震後の水位変化。横軸は地表地震断層からの距離で縦軸が水位の変化。Layer 1-4は帯水層（地下水を供給する地層）を示し、帯水層によって記号を区別している。番号が大きいほど深い。Layer 1のみ不圧帯水層でそれ以外は被圧帯水層であると考えられる。Lai *et al.* (2004) の図から引用。

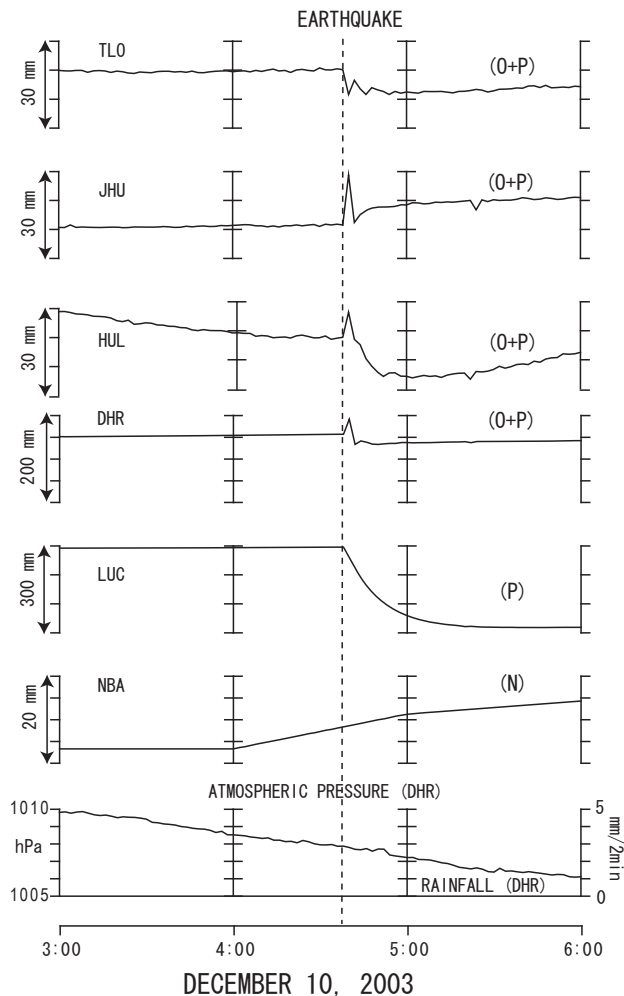
Fig.3 Coseismic and/or postseismic water level changes in the different aquifers relative to the distances between the observation wells and earthquake fault. Layer 1 is unconfined while the other layers are confined. This figure is after Lai *et al.* (2004).



第4図 観測井戸における1999年集集地震前の水位の標高と地震時～地震後の水位変化（矢印）と地表地震断層からの距離との関係を示したもの。Lai *et al.* (2004) の図を一部修正。

Fig.4 Relation among the coseismic and/or postseismic water level changes, original altitude of the water tables and distance between the observation well and the earthquake fault. The coseismic and/or postseismic changes are shown by the arrows. This figure is modified from Lai *et al.* (2004).

には注意が必要である。このことを考慮して、第 6, 7 図で振幅が評価されているのは、第 5 図で P に分類される変化のみである。静的な体積歪変化は上記の地震のモデルから地殻を均質な弾性体として計算したもので、地震動の最大加速度は、台湾における強震観測網で観測されたものから外挿して求めた。観測された多数の地震時～地震後の水位変化に対し、計算された現地の静的体積歪変化のほとんどが 1 nstrain よりはるかに小さく、静



第 5 図 2003 年 12 月 10 日の地震（第 1 図および表 1 の No.1 の地震）の時の地下水位変化。2 分毎のデータで示している。日時はグリニッジ標準時で示している。P は地震後の増加または減少がある程度継続する変化、O は振動的な変化、N は変化なしを意味する。Lai *et al.*(2010) より引用。

Fig. 5. Coseismic and/or postseismic groundwater level changes associated with the earthquake that occurred on December 10, 2003, event No. 1 in Table 1 and Fig.1. Two-minute values are shown in the graph. The date and time are in GMT. 'P', 'O' and 'N' mean, 'persistent change', 'oscillation' and 'no change', respectively. This figure is after Lai *et al.*(2010).

第 1 表 2003 年 12 月～2006 年に台湾周辺で発生した M 6 以上の 17 個の地震。震央は第 1 図に示されている。

Table 1 List of the earthquakes of M 6.0 or greater (December 2003-December 2006). Locations of the epicenters are shown in Fig.1.

No.	Date*	Time*	Lat.	Long.	Depth (km)	Mw**
1	Dec. 10, 2003	4:38	23.07	121.40	10.0	6.6
2	Feb. 4, 2004	3:24	23.38	122.15	4.0	6.0
3	May 16, 2004	06:04	23.05	121.98	12.5	6.0
4	May 19, 2004	7:04	22.71	121.37	8.7	6.5
5	Oct. 15, 2004	4:08	24.46	122.85	58.8	7.0
6	Nov. 8, 2004	15:54	23.79	122.76	10.0	6.6
7	Nov. 11, 2004	2:16	24.31	122.16	27.3	6.0
8	Sep. 6, 2005	9:16	23.96	122.28	16.8	6.1
9	Apr. 1, 2006	18:02	22.88	121.08	7.2	6.3
10	Apr. 16, 2006	6:40	22.86	121.30	17.9	6.2
11	Jul. 28, 2006	15:40	23.97	122.66	28	6.1
12	Aug. 28, 2006	1:11	24.80	123.07	135.3	6.1
13	Oct. 9, 2006	18:01	20.70	119.83	28.0	6.1
14	Oct. 9, 2006	19:08	20.77	119.93	8.0	6.1
15	Oct. 11, 2006	14:43	20.89	119.90	10.0	6.0
16	Dec. 26, 2006	20:26	21.94	120.56	44.1	6.7
17	Dec. 26, 2006	20:34	21.95	120.39	47.0	6.4

* Date and Time are expressed in GMT.

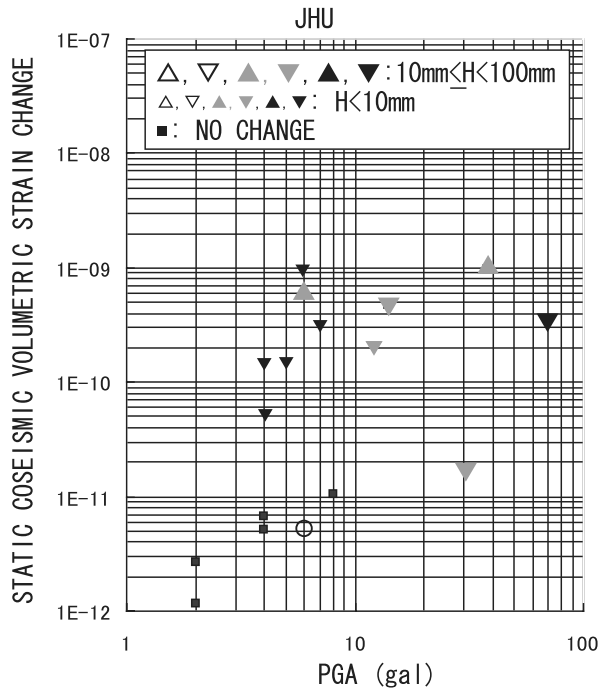
** Mw: Moment magnitude

的な体積歪変化は主因でないことが示唆された（第 6, 7 図）。他方、最大加速度が大きい時のみ水位が変化する観測点も一部にはあるものの（第 7 図）、最大加速度のみでは説明できない観測点もあった（第 6 図）。今後は、地震動による動的体積歪変化の効果等（たとえば、Brodsky *et al.*, 2003）を考慮する必要がある。静的体積歪変化の値についても、不均質性の効果を考慮すべきかもしれない（Lai *et al.*, 2010）。

3. 今後の展望

第 3 期（2010 - 2012 年）はすでに始まっている。引き続き 16 観測点での観測を継続する一方、今後は、1 年当たりの歪変化率が 10^{-6} を越える台湾東部や台湾南部（Chang *et al.*, 2003）の地下水のモニタリングやデータ解析を以下の理由で強化したいと考えている。

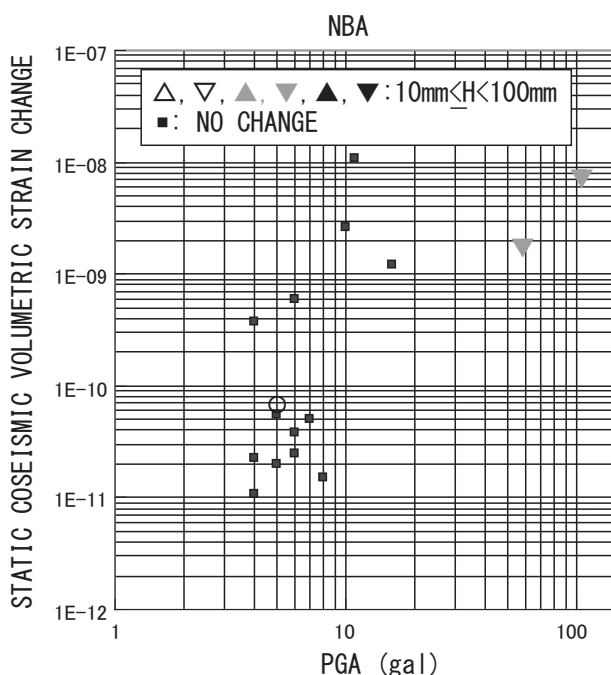
地下水の過剰揚水による地盤沈下現象から明らかなように、地下水（正確には地下の間隙水圧と水分量）と地殻変動は互いに影響し合う。しかし、水は拡散するため、地殻の変形によって水圧が変化しても時間がたてば（変形は残っていても）地下水の変化は消えてしまう。すなわち、地殻の変形率が高くなければ（目安として 1 日あたり 10^{-8} 程度の変化＝地球潮汐による歪変化に相当する変化がなければ）、地震に伴う急激なものを除いて、テクニクな長期的な地殻変動を地下水変化として検出するのは難しい。日本は、地殻変動がもっとも激しい場所（いわゆる歪集中帯）でも、変形率は 1 年あたり 10^{-7} 程度であり、これを 1 日あたりの変化に換算すると 10^{-9} を切ってしまうので地下水変化として検出するのは困難



←

第6図 JHUにおける地震時～地震後の地下水位変化と地震時の静的な体積歪変化と地震動の最大加速度(PGA)の関係を示した図。体積歪変化と地震動の最大加速度はいずれもJHUにおける値。記号は地震時～地震後の水位変化のパターンを示す。三角の記号は水位上昇または低下、丸は地震時の振動的な変化、四角は水位変化がないことを示す。三角の頂点の方向が水位の増減を示す。三角の大きさが水位変化の大小を示す。三角の色は水位変化が体積歪変化でどの程度説明可能かを示す。白：定量的に説明可能、灰色：水位変化の増減のみ説明可能、黒：全く説明できない。地震時の静的体積歪変化に水位の歪感度をかけた値が、実際の観測量の0.5～2倍の範囲になるとき、定量的に説明できると定義している。Lai *et al.*(2010)より引用。

Fig.6 Relationships among the coseismic and/or postseismic groundwater level changes, calculated coseismic static volumetric strain changes, and peak ground accelerations (PGA) at JHU. Symbols show patterns of the coseismic and/or postseismic groundwater level changes. Triangles, circles, and squares show persistent changes, only oscillations, and no changes, respectively. The directions of the triangles show persistent increases or decreases in the groundwater level. The size of the triangle shows the amplitude (H) of the persistent change. The triangle color shows how the persistent groundwater level change is explained by the volumetric strain changes. 'White' means 'quantitatively explainable', 'gray' means 'qualitatively explainable', and 'black' means it is not explained by the volumetric strain change at all. 'Quantitatively explainable' means that observed coseismic and/or postseismic groundwater level changes are 50–200% of the groundwater level changes expected from the static volumetric strain changes. This figure is after Lai *et al.*(2010).



←

第7図 NBAにおける地震時～地震後の地下水位変化と地震時の静的な体積歪変化と地震動の最大加速度(PGA)の関係を示した図。

Fig. 7 Relationships among the coseismic and/or postseismic groundwater level changes, calculated coseismic static volumetric strain changes, and peak ground accelerations at NBA.

である。しかし、1 年あたり 10^{-6} を越える変化であれば、1 日あたりの変化が 10^{-8} オーダーとなり、日本では検出し得ない、長期的な地殻変動に伴う地下水変化を発見できるかもしれない。

4. まとめ

2002 年以降、産総研は台湾の国立成功大学防災研究センターと共に台湾における地震地下水研究を行なっている。1999 年集集地震に伴う地下水変化やその変化の回復に関する研究、地震に伴う地下水変化に関する研究を行なうための 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等において成果をあげてきた。台湾は日本以上に地震活動が活発であり、歪変形率は日本の 10 倍以上に達するところがあるので、台湾において地震と地下水・地殻変動の観測・研究を行なえば、地下水観測による地震予知研究や地下水の長期安定性の評価について、より効率的に研究成果をあげることができると考えられる。

謝辞：査読者である佐藤隆司博士には、本稿を改善するための有益なコメントをいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

文 献

- Brodsky, E., E. Roeloffs, D. Woodcock, I. Gall, and M. Manga (2003) A mechanism for sustained groundwater pressure changes induced by distant earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **108**(B8), 2390, doi:10.1029/2002JB002321.
- Chang, C. P., T. Y. Chang, J. Angelier, H. Kao, J. C. Lee, and S. B. Yu (2003) Strain and stress field in Taiwan oblique convergent system: Constraints from GPS observations and tectonic data, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **214**, 115-127.
- Chia, Y., Y. S. Wang, J. J. Chiu, and C. W. Liu (2001) Changes of groundwater level due to the 1999 Chi-Chi earthquake in the Choshui River alluvial fan in Taiwan, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **91**, 1062-1068.
- 小泉尚嗣 (2005) 水文学的・地球化学的手法による地震予知研究についての第 4 回日台国際ワークショップ報告, 地震学会ニュースレター, 17, 4, 8-9.
- 小泉尚嗣 (2009) 水文学的・地球化学的手法による地震予知研究についての第 8 回日台国際ワークショップ報告, 地震学会ニュースレター, 21, 4, 8-10.
- Koizumi, N, W.C.Lai, Y.Kitagawa and N.Matsumoto (2004) 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.
- 小泉尚嗣・松本則夫・謝正倫 (2005) 国際共同研究「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 (2002 年 2 月～2005 年 3 月)」最終報告書および第 3 回水文学的・地球化学的手法による地震予知研究についての日台国際ワークショップ予稿集, 地質調査総合センター資料集, 420.
- 小泉尚嗣・W.C. Lai・C.L. Shieh・K.C. Chang・山田聡治 (2006) 1999 年集集地震前後の震源域周辺における長期的地下水変動, 平成 18 年度研究発表会講演論文集, 日本応用地質学会, 129-130.
- Lai, W.C., N.Koizumi, N.Matsumoto, Y. Kitagawa, C.W. Lin, C.L. Shieh and Y.P. Lee (2004) 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.
- Lai, W.C., K.C. Hsu, C.L. Shieh, Y.P. Lee, K.C. Chung, N.Koizumi and N.Matsumoto (2010) 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.
- Lee, M., T. K. Liu, K. F. Ma, and Y. M. Chang (2002) Coseismic hydrological changes associated with dislocation of the September 21, 1999 Chichi earthquake, Taiwan, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1824, doi:10.1029/2002GL015116.
- 謝正倫・小泉尚嗣・松本則夫 (2010) 第 8 回水文学的・地球化学的手法による地震予知研究についての日台国際ワークショップ予稿集, 地質調査総合センター資料集, 522.
- 高橋誠・松本則夫・佐藤努・北川有一・大谷竜・小泉尚嗣 (2004), 産総研 地震地下水観測ネットワーク, 地質ニュース, 596, 17-21.
- Tamura, Y., T. Sato, M. Ooe, and M. Ishiguro (1991) A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion, *Geophys. J. Int.*, **104**, 507-516.
- 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.

(受付 2010 年 8 月 17 日 ; 受理 2010 年 12 月 27 日)