

1999 年台湾集集地震の震源域周辺の扇状地における 地震時の井戸水位増加と強震動との関係について

比嘉万友美¹・中村 衛²・小泉尚嗣^{3,*}・頼 文基⁴

Mayumi Higa, Mamoru Nakamura, Naoji Koizumi and Wen-Chi Lai (2016) Relation between the strong ground motion and coseismic well water level rises during the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake in the alluvial fan near the hypocentral region. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol.67 (1), p.1–10, 7 figs, 2 tables.

Abstract: We compared the coseismic well water level rises (Cw) and the strong ground motions during the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake in the Quaternary alluvial fan near the hypocentral region using data produced by the dense networks of strong ground motion and groundwater observation. The correlation between the Cw of the shallowest aquifer (Layer 1) and the ground motion response spectra at 1 Hz (Sv(1.0)) is stronger than that at 0.1 Hz (Sv(0.1)). On the other hand, the correlation between the Cw of the deeper aquifers (Layers 2-1, 2-2, 3 and 4) and Sv(1.0) are weaker than that at 0.1 Hz. We also found the good correlation between the Cw and hydraulic conductivity in the all aquifers. It is difficult to estimate Cw only by the spectral amplitude even in a Quaternary alluvial fan, where the geological and geomorphological conditions are similar.

Keywords: Taiwan, 1999 Chi-Chi earthquake, groundwater, seismic ground motion, frequency, hydrogeology, response spectrum waveform observation

要 旨

1999年台湾集集地震(Mw 7.6)時の震源域近傍の濁水溪扇状地における高密度の井戸水位データ及び強震動データを用いて、地震時の水位増加(Cw)と強震動特性(応答スペクトル値)の関係を検討した。最上部の帯水層(Layer 1: 不圧～部分被圧帯水層)では高周波数側(1 Hz)において両者に相関が見られたが、Layer 1より下部のLayer 2～4(部分被圧～被圧帯水層)のCwは低周波数側(0.1 Hz)の応答スペクトル値と相関が良く高周波数側では相関が悪かった。一方、すべての帯水層について、Cwと透水係数との間に強い相関が認められた。地形・地質条件が同様な第四紀堆積層からなる扇状地においても、地震時の井戸水位変化を地震動の特定の周波数帯の強度のみで評価するのは困難である。

1. はじめに

地震時に井戸水位が変動する現象が数多く報告さ

れている(例えば、Montgomery and Manga, 2003; 小泉, 2013a)。この現象の要因として、地殻変動(静的体積歪変化や上下変位等)と地震動(動的体積歪変化や透水性の変化・液状化等)の影響が指摘されている(Wang *et al.*, 2001; Lai *et al.*, 2004; 小泉, 2013a)。地震時井戸水位変化の主要因は静的体積歪の変化であるとの報告も多い(例えば、Igarashi and Wakita, 1991; Ge and Stover, 2000; Koizumi *et al.*, 2004a; Ohno *et al.*, 2006; 小泉, 2013b)が、静的体積歪変化と井戸水位変化が対応しないこともある。この場合は、井戸水位変化に与える地震動の影響が、静的体積歪変化の影響よりもより大きいためと解釈されるが(例えば、Matsumoto *et al.*, 2003; 小泉, 2013a)、詳細なメカニズムは明らかになってはいない。

1999年9月21日午前1時47分(現地時刻)に発生した1999年台湾集集地震(Mw 7.6)は台湾中部を南北方向に延びる車籠埔断層(Chelungpu fault; 長さ約80 km)の逆断層運動によってもたらされた(Shin *et al.*, 2000)。高密度の強震観測網(Lee *et al.*, 2001)と地下水資源管理用の多数の観測井戸(Water Resources Bureau, 1999)により、こ

¹ 株式会社琉球サーベイ (Ryukyu Survey Co., Ltd.)

² 琉球大学理学部 (Faculty of Science, University of the Ryukyus)

³ 滋賀県立大学環境科学部 (School of Environmental Science, The University of Shiga Prefecture), 地質調査総合センター活断層・火山研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Earthquake and Volcano Geology)

⁴ 国立成功大学防災研究センター (Disaster Prevention Research Center, National Cheng-Kung University)

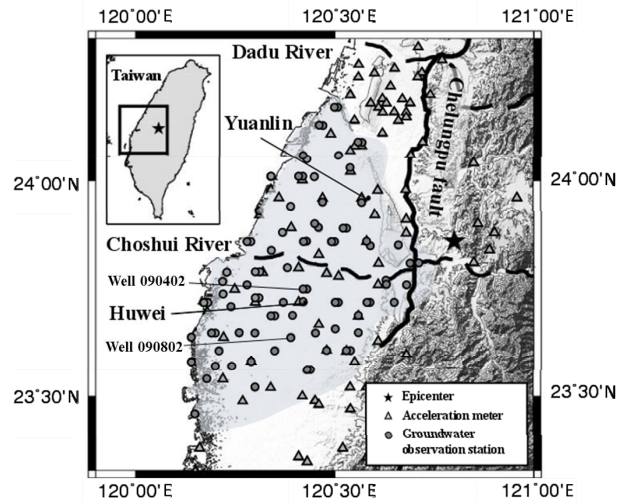
* Corresponding author: Naoji Koizumi, The University of Shiga Prefecture, 2500, Hassaka-cho, Hikone, Shiga, 522-8533, Japan. Email: koizumi.n@ses.usp.ac.jp

の地震の良好な地震波形データと地震時の井戸水位変化のデータが得られた。これらのデータを用いて、震源域近傍(後述する濁水溪扇状地およびその周辺)における地震時の井戸水位変化に関する分析が行われている。

Chia *et al.* (2001) は、井戸水位の変化量は車籠埔断層から観測井戸までの距離と関連している可能性を指摘した。Wang *et al.* (2001) は、震源近傍の第四紀堆積層からなる濁水溪扇状地 (Choshui River fan) における多数の井戸に認められた地震時の水位増加は液状化によるものとした。また、地震時井戸水位変化量と地震動とを比較し、双方の間にやや高い相関があることを見出した。Wang *et al.* (2003) は、更に解析をすすめ、浅い帯水層 (upper aquifer) の地震時井戸水位変化量と 1 Hz の加速度応答スペクトル値および速度応答スペクトル値との間に強い相関関係があるとする一方、0.1 Hz の加速度応答スペクトル値と浅い帯水層の地震時井戸水位変化量との間には相関はないとした。Lai *et al.* (2004) は地震時井戸水位変化を地震動だけでなく、水文地質条件(帯水層の地質構造や不圧・被圧の違い及び透水性等)とも比較しており、両方に対する考慮が必要とした。このように、濁水溪扇状地における地震時の井戸水位増加の要因については、Wang *et al.* (2001) の主張する液状化か、Lee *et al.* (2002) の主張する地震時の静的体積歪変化によるのか、議論があったが、Koizumi *et al.* (2004b) は、静的体積歪変化に基づく井戸水位が低下するはずで観測事実を説明できないとし、Wang *et al.* (2001) の主張を支持した。なお、液状化とは、地震動によって間隙水圧が増加した結果、有効応力が0になった状態を一般に指す(國生, 2005)。地表で液状化が確認されたのは濁水溪扇状地の一部であるが(Wang *et al.*, 2001), より広い範囲で井戸水位が増加していることを考慮すれば、1999年集集地震による強震動で、濁水溪扇状地の広い範囲で間隙水圧が増加し、一部の場所では有効応力が0になったと考えるのが妥当だろう。揺れで間隙水圧が上昇することは実験的にも確かめられているからである(國生, 2005)。

以上の中で、地震動と井戸水位変化量との関係について最も定量的な解析を行っているのは、Wang *et al.* (2003) である。Lai *et al.* (2004) が指摘するように、地震時井戸水位変化は、地震動の大きさと水文地質条件に依存する。しかし、第四紀堆積層の扇状地というように水文地質条件をある程度限定すれば、特定の周波数の加速度応答スペクトル値あるいは速度応答スペクトル値のみで、地震時の井戸水位変化量(地下水圧変化量)を評価できるというのが Wang *et al.* (2003) の主張である。ただし、Wang *et al.* (2003) では、地震時の井戸水位変化量の評価を行った「浅い帯水層」の具体的な条件が示されていない。

本研究では、Lai *et al.* (2004)と同様に、水文地質条件や深さが異なる5つの帯水層(Layer 1, 同2-1, 同2-2, 同3, 同4)のそれぞれについて、地震時の井戸水位変化を調べ

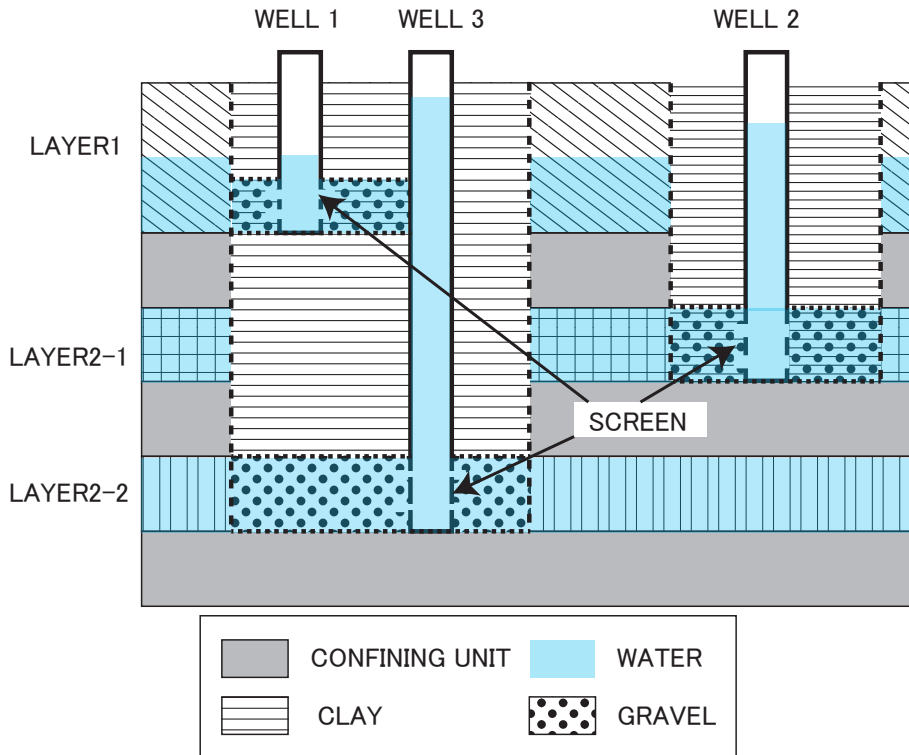


第1図 1999年集集地震の震央と車籠埔断層 (Chelungpu fault) と観測点の位置。△は地震観測点(加速度計を設置)で○は地下水観測点。影の部分は濁水溪扇状地。員林市 (Yuanlin) と雲林県の虎尾鎮 (Huwei) の位置も示す。観測井戸である Well 090402 と Well 090802 については第4図参照。

Fig. 1 Location of the epicenter of the 1999 Chi-Chi earthquake, the Chelungpu fault and observation stations. The triangles and the circles denote acceleration seismometer stations and groundwater observation stations, respectively. The shadow area is Choshui alluvial fan. The locations of Yuanlin and Huwei are also shown. As to Well 090402 and Well 090802, refer to Fig.4.

た。Layer 1の多くは不圧帯水層であるが一部被圧になっている所もあるので不圧～部分被圧帯水層とし、Layer 2～4の多くは被圧帯水層であるが、一部不圧の所もあるため部分被圧～被圧帯水層と表記する。地震動の特性としては、Wang *et al.* (2003)と同様に、低周波数側 (0.1 Hz) と高周波数側 (1 Hz) の地震動応答スペクトル値を用いる。Wang *et al.* (2003) のいう「浅い帯水層」を特定するとともに、井戸水位変化の評価法を検証することを試みた。

今回用いた台湾の地下水観測井戸は、台湾經濟部水資源局が管理している (Water Resources Bureau, 1999)。この観測井戸の本来の目的は、人工的な揚水の影響の監視であり、以下の特徴がある。複数の帯水層が存在する場合、多くは1つの掘削孔に複数の観測井戸が設置されている。この際、異なる帯水層の影響を避けるため、1つの掘削孔では、隣り合わない帯水層が観測対象とされている。さらに、掘削孔内の帯水層と帯水層との間には粘土を詰め、異なる帯水層の影響が及ぶのを防いでいる。第2図のようなケースでは、まず Layer 2-2の帯水層まで孔を掘り、Layer 2-2の層準にスクリーン(地下水を取水するための孔やスリット)の入った井戸管(第2図の Well 3)を



第2図 観測井戸の構造と帯水層との関係を示す模式図。

Fig. 2 The schematic diagram of the observation wells and aquifers.

入れる。Layer 2-2 に相当する層準に砂利を入れ、その上に Layer 1 の下端まで粘土を詰めて Layer 2-2 の水が他の帯水層に漏れないようにする。次に、Layer 1 の下部に相当する深度にスクリーンの入った別の井戸管 (Well 1) を入れ、スクリーンのある Layer 1 の下部に砂利を入れた後、地表付近まで粘土を詰める。結果として、Layer 1 と Layer 2-2 の地下水頭を井戸水位として観測できる2つの井戸 (Well 1 と Well 3) が1度の掘削作業で作成できることになる。Layer 2-1 については、別途掘削して井戸 (Well 2) を作る。このようにすると、低コストで近接して複数の観測井戸を作ることができるが、観測井戸近傍の帯水層同士(第2図ではLayer 1 と Layer 2-2)は粘土で仕切られているだけなので、帯水層毎に井戸を掘削する場合に比べて、構造的には弱くなる可能性がある。

2. 観測と解析手法

2.1 観測地域の概要と観測井戸

1999年台湾集集地震の際に活動した車籠埔断層は、台中盆地西縁の山地境界に位置する逆断層である。本研究では、集集地震の震源に近い台湾中西部の濁水溪扇状地にある井戸を対象とした(第1図)。車籠埔断層の下盤に位置する台中盆地(濁水溪扇状地はその南半分を占める)

は古第三紀～新第三紀層の上に第四紀層の堆積した場所であり、その上部を構成する沖積層は礫・砂・粘土よりなる。一方、上盤側は丘陵地を構成し、鮮新世～更新世に堆積したと考えられる砂層やシルト層・礫層および砂岩や泥岩が分布する(上島ほか, 1999; 高橋, 2000)。濁水溪扇状地は3つの難透水層によって分けられた主に4つの帯水層からなるとされており(Hsu *et al.* 2000), Lai *et al.* (2004) では上位からLayer 1, Layer 2-1 と Layer 2-2(Hsu *et al.* (2000) ではこれを1つにしている), Layer 3, Layer 4とした。

2.2 観測データ

井戸水位データは台湾經濟部水資源局から提供を受けた。台湾中西部における地下水観測点(第1図)は77点あり、上述のように、1箇所に複数の井戸があるため観測井戸数は202本である。そのうち、Lai *et al.* (2004) では、集集地震時に観測データのある168本の観測井戸のデータを使っていたが、このうちの4本にも集集地震時に欠測があることが判明したため、本研究では、これらを除いた164本の観測井戸の水位データを使用した。解析対象期間は1994年1月1日～2000年12月31日であり、観測井戸によっては一部に欠測もある。サンプリング間隔は1時間、井戸水位データの刻み幅は1 cm である。後

述する解析では、Lai *et al.* (2004)と同様に、2 cm以上の井戸水位変化を有意と判断した。観測点によっては観測装置の時計に時刻ずれがあったことが知られているが、時刻ずれに関する公式な報告はないため、時刻の補正は行っていない。また、各観測井戸における1999年集集地震前に測定されていた透水係数 (Hydraulic conductivity)のデータも使用する。ただし、上述の164本の井戸のうち、4本については透水係数のデータがなかった。

地震波形データは、台湾交通部中央気象局が管理している地震波形記録(全441点)のうち、震源域近傍の99点(第1図)のデータを用いた。サンプリング間隔は0.01秒である(Lee *et al.*, 1999)。

2.3 地震時の井戸水位変化量

井戸水位観測データから地震時の井戸水位変化を調べた。集集地震の発生時刻は1999年9月21日午前1時47分(現地時刻)であるため、地震発生直後(午前2時)の水位データと地震発生直前(午前1時)の水位データの差が地震時の井戸水位変化となるはずである。しかし、水位計の時刻が正確ではない観測点もあるとされていることから、地震発生前後で、水位が大きく変化している時刻の水位データとその1時間前の水位データとの差を地震時井戸水位変化量とした。結果として、午前1時～午前2時の(本来あるべき)水位変化量を使った井戸が12本、午前0時～1時の水位変化量を使った井戸が142本であった。午前0時～2時に1時間あたり2 cm以上の水位変化がなかった10本の井戸については水位変化なしとした(第1表)。

2.4 地震動の応答スペクトル

応答スペクトルは、様々な固有周期・減衰定数を持つ1自由度系の最大応答値として定義される量(例えば、大崎, 1997)で、地震動の周波数別の強度の指標として、土木・建築分野をはじめ強震動を扱う分野で広く用いられている。Wang *et al.* (2003)は、集集地震に伴う井戸水位変化と地震動との関係の解析に応答スペクトルを用いており、本研究でもこれを踏襲する。なお、応答スペクトルには、絶対加速度応答スペクトル (Sa)、速度応答スペクトル (Sv)と変位応答スペクトル (Sd)があるが、これらには、およそ $Sa(f)/(2\pi f) = Sv(f) = 2\pi f * Sd(f)$ の関係がある。したがって、周波数を固定すると定数倍の関係となるため、いずれか1つの応答スペクトルとの相関を調べれば十分である。

減衰定数 $h = 0.05$ とし、上下・東西・南北成分の加速度波形記録を用いて応答スペクトルを計算した。水平動成分の応答スペクトルは東西・南北成分の応答波形のベクトル合成値、3成分の応答スペクトルは上下動・水平動成分の応答波形のベクトル合成から計算した。

応答スペクトル分布の計算は先行研究と比較するた

第1表 それぞれの帯水層における地震時井戸水位変化(Cw)の増減の数。

Table 1 Coseismic well water level change (Cw) at each aquifer.

Aquifer	Coseismic Well Water Level Change			Total
	Rise	Fall	No change	
Layer 1	25	8	5	38
Layer 2-1	38	2	2	42
Layer 2-2	29	3	1	33
Layer 3	35	2	1	38
Layer 4	11	1	1	13
Total	138	16	10	164

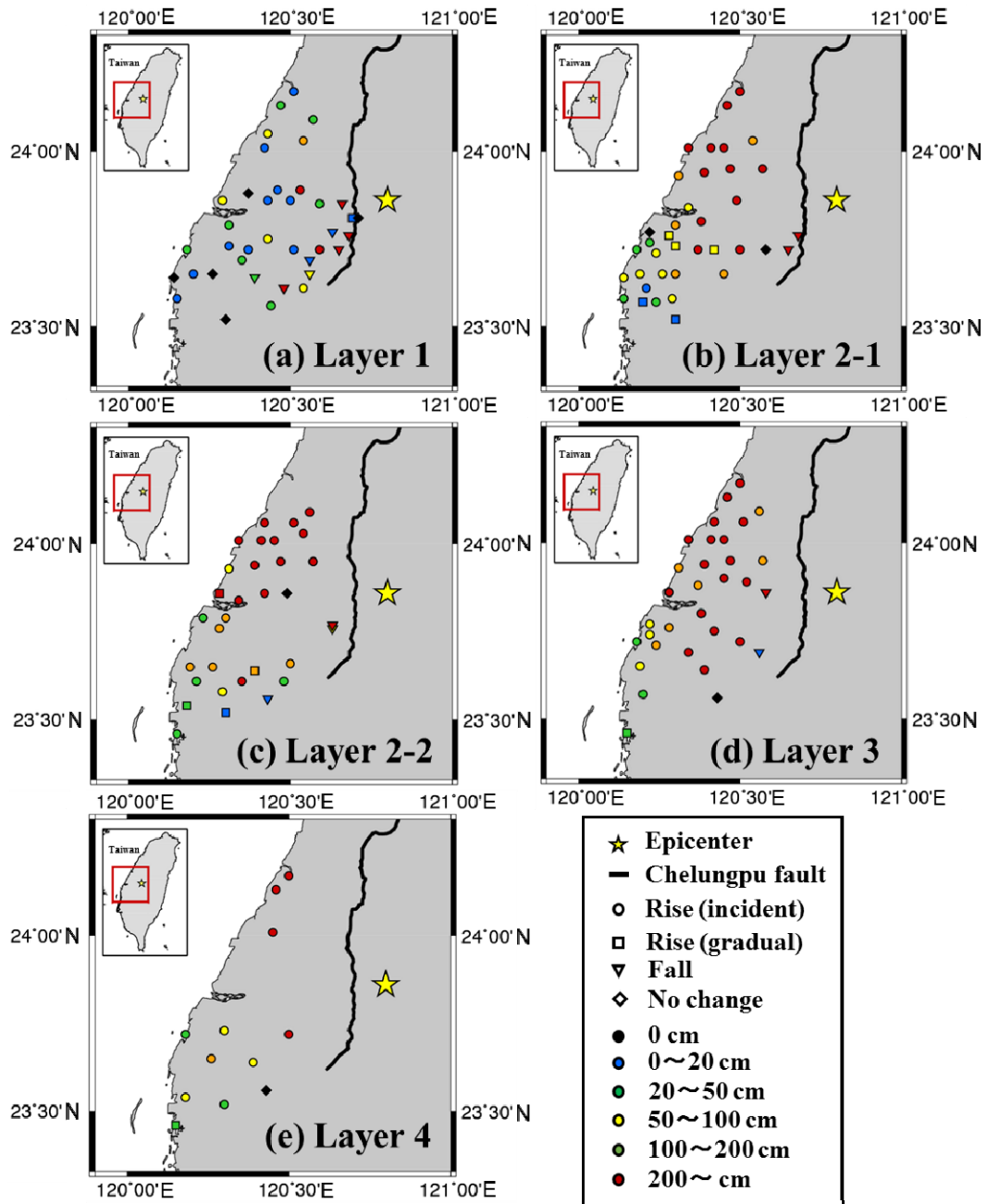
めに周波数0.1 Hzと1 Hzで作成した。これはWang *et al.* (2003)が0.1 Hzと1 Hzの2種類の周波数域で応答スペクトルを計算し、地震時井戸水位変化量との関連を調べたことによる。また観測井戸の位置は必ずしも地震観測点位置と一致していないため、観測井戸での応答スペクトル値は、Generic Mapping Tools (Wessel and Smith, 1991)の surface コマンドを用いて井戸周辺の加速度計で得られた応答スペクトル値分布に適合する曲面を自然3次スプライン補間して計算させ、その曲面から観測井戸での値を推定した。なお、特に書かれてはいないが、Wang *et al.* (2003)が使っているのは3成分合成の応答スペクトルと思われる。

3. 結果

3.1 地震時井戸水位変化

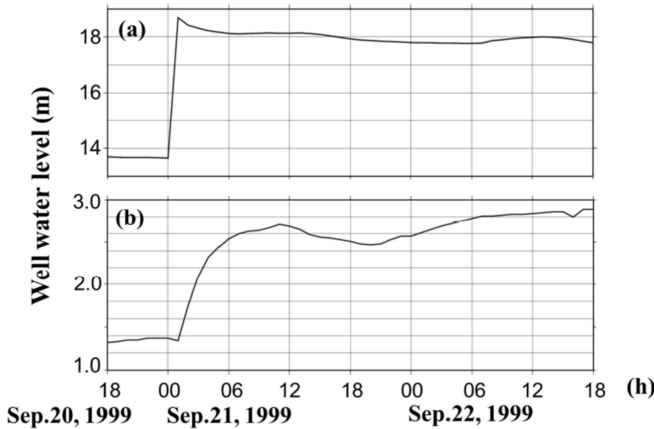
上述の定義に基づく地震時井戸水位変化として、最大1,109 cmの水位低下、最小2 cm(本研究の閾値)の水位増加を確認できた。これらの水位変化を帯水層ごとに第1表および第3a-3e図に示す。Layer 1(不圧～部分被圧帯水層)では他の帯水層に比べて水位が低下した観測井戸が多かった。また、(地震時水位変化が0であった観測井戸5本を除く) Layer 1の33本の井戸のうち、約75%に相当する25本で地震後1カ月以内に地震前の水位まで回復していた。他方、Layer 2-1, 2-2, 3, 4(部分被圧～被圧帯水層)では、地震時井戸水位変化が0であった観測井戸5本を除く121本の井戸のうち、地震後1カ月以内に地震前の水位まで回復したのは、約45%の55本であった。

濁水溪扇状地内の観測井戸では、地震時に水位が増加した井戸(138本)と低下した井戸(16本)があるが(第1表, 第3a-e図)、水位低下した井戸に関しては、一定レベルのせん断応力を堆積物が繰り返し受けたことによる地層内の空隙増加が原因と考えられ(Wang *et al.*, 2001)、水位増加した井戸とは地震時水位変化のメカニズムが異



第3図 地震時水位変化の帯水層毎の分布. a:Layer 1,b:Layer 2-1,c:Layer 2-2, d:Layer 3, e:Layer 4.

Fig. 3 Distribution of the coseismic groundwater level changes. a:Layer 1,b:Layer 2-1,c:Layer 2-2, d:Layer 3, e:Layer 4.



第4図 1999年集集地震時の井戸水位増加の例。水位の値は標高で示してある。(a) Well 090402 (第1図)における急激な水位増加。(b) Well 090802 (第1図)におけるゆっくりした水位増加。

Fig. 4 Example of the coseismic well water level rises caused by the 1999 Chi-Chi earthquake. The water level is expressed as altitude. (a) Rapid water level rise at Well 090402(Fig.1). (b) Gradual water level rise at Well 090802(Fig.1).

なると考えられるため、以降の解析では濁水溪扇状地内の水位増加した観測井戸のデータのみを使用する。さらに、地震時井戸水位変化には急激な水位増加(第4a図)とゆっくりした水位増加とがみられた(第4b図)。強震動による地下水圧増加は急激に生じる現象と一般に考えられることと、穏やかな水位増加は変化幅を見積もるのが困難なため(長期間になると雨の影響等も考慮しなければならぬため)、ゆっくりした水位増加の井戸のデータは使用しないようにした。また、1時間サンプリングであることと、上述のように時計がずれている可能性があることを考慮し、変化が生じてから2つめの水位データまでに水位増加が終了する(地震発生後2時間以内に水位増加が終了する)水位変化のみを3.3以降の解析に用いた。このような水位変化をした井戸は122本あった。内訳は、Layer 1が24本、Layer 2-1が29本、Layer 2-2が25本、Layer 3が34本、Layer 4が10本であった。

3.2 応答スペクトル

0.1 Hz と 1 Hz における、水平動成分の速度応答スペクトル値の分布を第5図に示す。全般に、車籠埔断層に近いほど値が大きく、離れるにつれて小さくなっている。(a: 0.1 Hz) は断層の北側で値が大きく、(b: 1 Hz) は断層に沿って南側および震央付近で値が大きくなっている。

3.3 応答スペクトルと水位変化量との相関

全ての帯水層 (Layer 1 ~ 4) に関して、3成分合成・水

平動成分・上下動成分それぞれの応答スペクトルと地震時井戸水位変化量(増加量)との相関係数を算出した。相関係数を求めるにあたっては、Wang *et al.* (2003) と比較するために、Wang *et al.* (2003) と同様に観測結果を指数関数近似した上で求めている(第2表)。

帯水層ごとに相関係数を比較すると、Layer 1(不圧～部分被圧帯水層)では、高周波数側(1 Hz)において応答スペクトルと水位変化量との相関が、低周波数側(0.1 Hz)に比べて少し高かったが、Layer 2~4(部分被圧～被圧帯水層)では低周波数側(0.1 Hz)の方が相関が高かった(第2表)。また、Layer 1では、相関係数が高い場合でも0.56と頭打ちの傾向が見られるのに対し、Layer 2~4では0.6を越える場合が多く認められ、最大0.80に達するケースも複数ある。水平動成分と上下動成分でみると、Layer 1では水平動成分の方が上下動成分より相関が高いが、Layer 2~4では上下動成分の方が水平動成分より相関が高かった。

Layer 1~4での周波数ごとの水平成分応答スペクトルと水位変化量との相関図を第6図に示す。(a), (d), (f), (h), (j)については相関が悪い($r = 0.06 \sim 0.42$)ため、近似曲線を示していない。

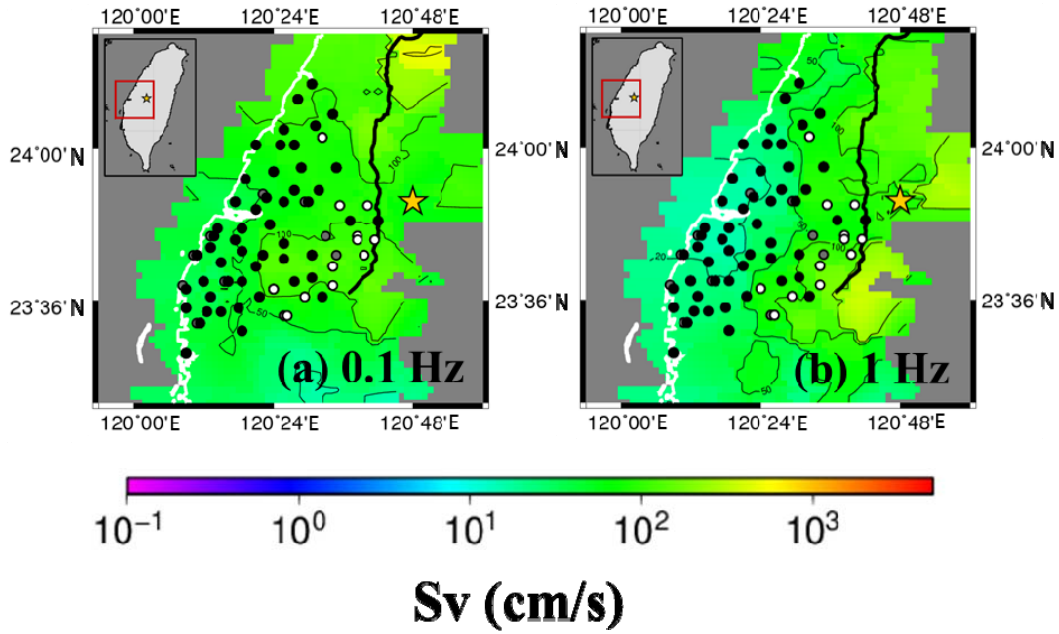
3.4 透水係数と地震時井戸水位変化量との相関

今回使用した観測井戸は、1999年の集集地震発生以前に、水資源局によって透水係数(Hydraulic conductivity)が求められているので、その値と地震時水位変化量とを比較した。透水係数が大きくなるにつれて水位変化量も大きくなる傾向にある。Layer 1で中程度の相関($r = 0.69$)、Layer 2~4では強い相関($r = 0.88 \sim 0.98$)がみられた。Layer 1~4における相関係数を第7図に示す。地震時井戸水位変化(C_w)は、地震動の応答スペクトルの振幅に対する相関より透水係数に対する相関の方が高い。

4. 考察

Layer 1の水位変化量は地震動の水平動成分の方が上下動成分より相関が高く、Layer 2~4では上下動成分の方が水平動成分より相関が高い。それぞれの理由についてはよくわからない。

Layer 1で相関係数に頭打ちの傾向が見られる理由を考える。Layer 1はLayer 2~4よりも浅いために土圧が低く、地震動によって地下水圧が上昇した場合、比較的低い圧力で周囲の土圧と等しくなるので地下水圧の上昇が抑えられ、一定レベル以上に C_w が増加できなかつたと考えられる。他方、Layer 1より深く、主に被圧帯水層であるLayer 2~4では、土圧が高いために地下水圧自体もかなり高くなることができ、結果として揺れの強さに応じて C_w が増加できたのだろう。したがって、浅いLayer 1では応答スペクトルと C_w の相関があまり大きく



第5図 0.1 Hz と 1 Hz における水平動成分の速度応答スペクトルの分布と井戸水位変化との比較。☆印は1999年集集地震の震央。●は水位増加，○は水位低下，灰色の○は水位変化なしを示す。Sv は速度スペクトルの振幅を示す。太い線は車籠埔断層。

Fig. 5 Distribution of the horizontal spectral responses in 0.1 Hz and 1 Hz and coseismic well water level changes. The star is the epicenter of the 1999 Chi-Chi earthquake. The closed, open and gray circles show coseismic rises, coseismic falls and no change in well water level, respectively. Sv is spectral velocity. The bold line shows the Chelungpu fault.

第2表 3成分合成・水平動成分・上下動成分における地震動の速度応答スペクトルの振幅と地震時井戸水位変化 (Cw) との相関係数。

Table 2 Correlation coefficient between each velocity response spectrum and coseismic well water level change (Cw).

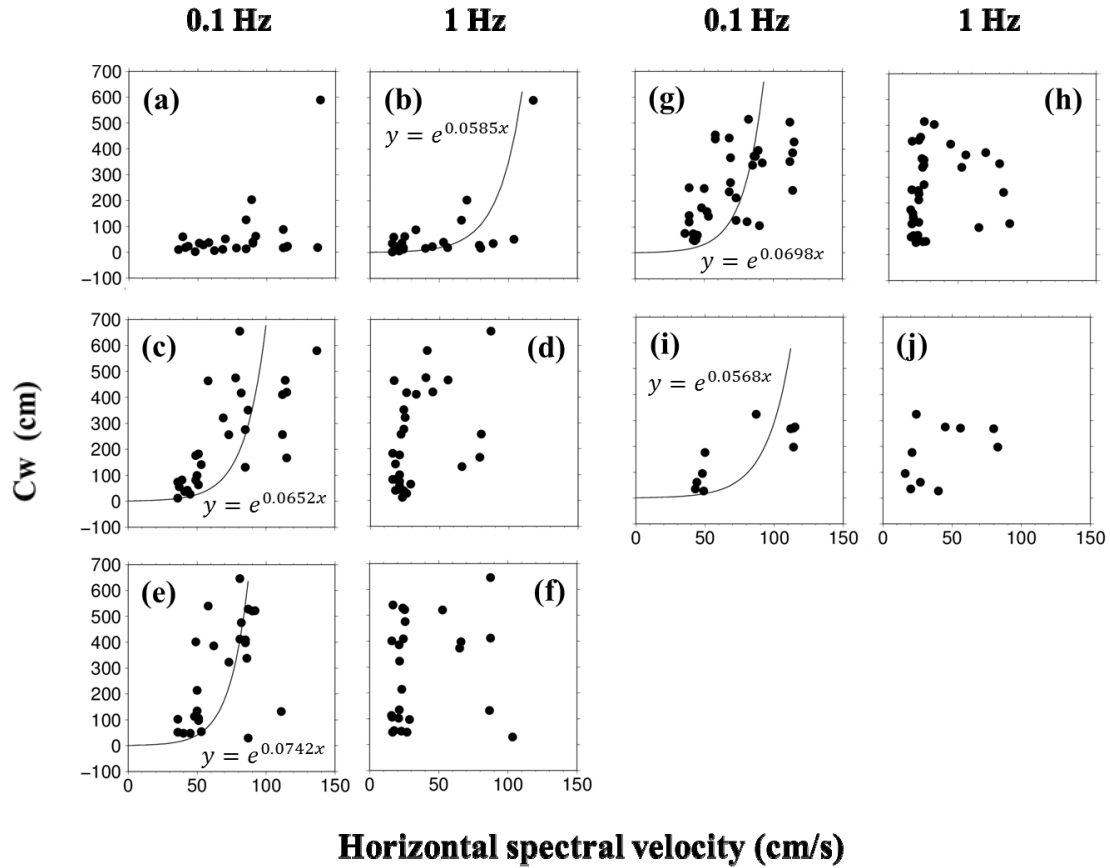
Aquifer	3 components		horizontal		vertical	
	0.1 Hz	1 Hz	0.1 Hz	1 Hz	0.1 Hz	1 Hz
Layer 1	0.42	0.56	0.41	0.56	0.33	0.47
Layer 2-1	0.74	0.40	0.74	0.40	0.81	0.69
Layer 2-2	0.53	0.06	0.51	0.06	0.75	0.45
Layer 3	0.63	0.19	0.63	0.18	0.61	0.46
Layer 4	0.80	0.42	0.80	0.42	0.80	0.72

ならず，Layer 2～4では応答スペクトルと中～強の相関を示したと考えられる。実際，Layer 1のCwは最大2 m程度なのに対し，Layer 2～4では，4 m程度以上の値が多数認められる (Lai *et al.*, 2004)。

さて，上記の考察が正しいとすると，浅い帯水層では，不圧であろうと被圧であろうと，地震動の応答スペクトルとCwとの相関係数が頭打ちになるのは必然ということになって，Wang *et al.* (2003) の「第四紀堆積層の扇状地というように水文地質条件をある程度限定すれば，特定の周波数の加速度応答スペクトル値あるいは速度応答スペクトル値のみで，地震時の井戸水位変化量(地下水

圧変化量)を評価できる」という趣旨の主張と矛盾することになる。彼らの論理展開を以下に確認してみる。

Wang *et al.* (2003)では，まず，集集地震の地震動の加速度の絶対値が 2.5 m/s^2 を越えると濁水溪扇状地において概ね液状化が発生するが， 2.5 m/s^2 を越えても必ずしも液状化しない場所があるとした。次に，1 Hzの加速度応答スペクトル値が 16 m/s^2 以上，あるいは，1 Hzの速度応答スペクトル値が 2.4 m/s 以上のところでは例外なく液状化するが，0.1 Hzの加速度応答スペクトル値を用いても，そのような明瞭な閾値は見あたらないとした。さらに，濁水溪扇状地の「浅い帯水層 (upper aquifer)」にお



第6図 地震時水位変化量 (Cw) と地震動水平成分の0.1 Hzと1 Hzの応答スペクトルの振幅(Sv)との相関。(a) Layer 1におけるCwと0.1 HzのSv, (b) Layer 1におけるCwと1 HzのSv, (c) Layer 2-1におけるCwと0.1 HzのSv, (d) Layer 2-1におけるCwと1 HzのSv, (e) Layer 2-2におけるCwと0.1 HzのSv, (f) Layer 2-2におけるCwと1 HzのSv, (g) Layer 3におけるCwと0.1 HzのSv, (h) Layer 3におけるCwと1 HzのSv, (i) Layer 4におけるCwと0.1 HzのSv, (j) Layer 4におけるCwと1 HzのSv.

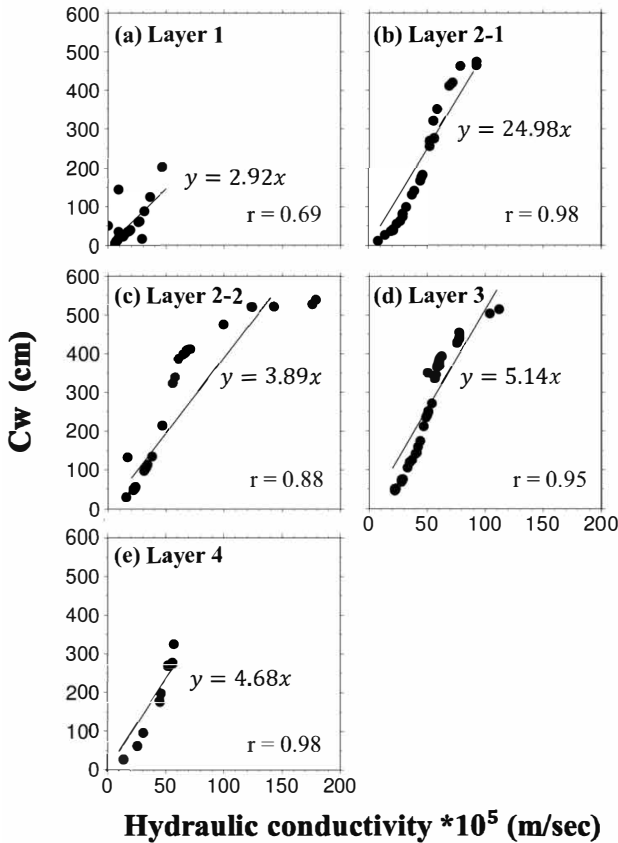
Fig. 6 Correlation between Cw and horizontal Sv, (a) Layer 1 in 0.1 Hz, (b) Layer 1 in 1 Hz, (c) Layer 2-1 in 0.1 Hz, (d) layer 2-1 in 1 Hz, (e) Layer 2-2 in 0.1 Hz, (f) layer 2-2 in 1 Hz, (g) Layer 3 in 0.1 Hz, (h) layer 3 in 1 Hz, (i) Layer 4 in 0.1 Hz and (j) layer 4 in 1 Hz. well water level, respectively. Sv is spectral velocity. The bold line shows the Chelungpu fault.

いて、1 Hzの加速度応答スペクトル値および速度応答スペクトル値と水位変化量との相関係数がそれぞれ0.98, 0.97となり、正の強い相関を示すとした(0.1 Hzの加速度応答スペクトル値および速度応答スペクトル値と水位変化量との相関係数は示していない)。

上述のように、液状化すればそれ以上の地下水圧上昇は発生しないと考えられるので、加速度応答スペクトルや速度応答スペクトルのある閾値を越えると液状化するからといって、加速度応答スペクトルや速度応答スペクトルと地震時水位変化量の相関が高くなる必要はない。実際に Wang *et al.* (2003) の図を見ると、彼らのいうところの「浅い帯水層 (upper aquifer)」の Cw はほとんどが 2 m 以下でばらついており、1 点だけ 6.5 m 程度の Cw を示す地点で 1 Hz の加速度応答スペクトルや速度応答スペ

クトルが大きいことが「0.98, 0.97」といった高い相関係数を示す原因になっているように見える。

この Wang *et al.* (2003) の結果は、本研究で Layer 1 における高周波数 (1 Hz) の応答スペクトル値で地震時水位変化との相関がやや良くなったことと対応していると考えられるが、Wang *et al.* (2003) の結果ほど相関が顕著ではないのは、Wang *et al.* (2003) のいう「浅い帯水層」が、本研究の Layer 2 ~ 4 の帯水層の一部 (おそらく、Layer 2 ~ 4 では最も浅い Layer 2-1 の一部) を含んでいるからであると考えられる。なお、Wang *et al.* (2003) で示されている加速度及び速度応答スペクトル値は、本論文の値の約 2 倍になっている。本論文では、減衰定数を一般的な 0.05 として応答スペクトルを求めているが、Wang *et al.* (2003) では、この減衰定数を 0 にしているためで、絶対



第7図 地震時水位変化 (Cw) と各井戸における透水係数との相関. r: 相関係数.

Fig.7 Correlation between Cw and hydraulic conductivity in each well. r: correlation coefficient.

値は変わるものの全体の傾向は変わらない。

他方、3.4で示したように、透水係数と地震時井戸水位変化に強い相関があることがわかった。これは、透水係数が高ければ、帯水層内の水圧変化が効果的に井戸内の水位変化に現れるということに加え、帯水層内の水圧変化そのものが透水係数に依存している可能性もあるが、後者のメカニズムについては今後の課題としたい。集集地震の濁水溪扇状地およびその周辺の地震時井戸水位変化と透水係数に相関があることは、Lai *et al.* (2004) がすでに示唆していたが、今回、濁水溪扇状地内で急激に水位増加したものだけに絞って解析したところ、相関がより強くなった。このように、地震時井戸水位変化については、透水係数にも強く依存するため、地震動の加速度及び速度応答スペクトルだけとの相関は弱くなると考えられる。

Wang *et al.* (2003) が示したように、第四紀の堆積層からなる扇状地というように、地形・地質条件を限ったとしても、地震動の特定の周波数の強度のみで、地震時井戸水位変化を評価あるいは予測しようとする事については、若干問題があるように思える。他方、この結果は、地震動の1 Hzの加速度応答スペクトルや速度応答スペクトルのある閾値を越えると上記の条件を満たす扇状地で液状化が生じるというWang *et al.* (2003) の本来の主張を否定するものではない。

5. 結 論

1999年の台湾集集地震 (Mw 7.6) 時の震源域近傍の濁水溪扇状地における高密度の井戸水位データ及び強震動データを用いて、Wang *et al.* (2003) の結果を考慮しつつ、地震動による地下水圧増加による井戸水位増加 (Cw) と地震動の速度応答スペクトル値 (0.1 Hzと1 Hz) との関係調べた。

1. Wang *et al.* (2003) が、地震動の1 Hzの加速度・速度応答スペクトルとCwとの相関が非常によいとした浅い帯水層 (Upper aquifer) は、濁水溪扇状地の最上部の帯水層 (Layer 1: 不圧～部分被圧帯水層) とその下位の帯水層 (Layer 2-1: 部分被圧～被圧帯水層) の一部であると推定できたが、Wang *et al.* (2003) のいう「浅い帯水層」の基準はよくわからなかった。

2. 上位から2番目以降の帯水層 (Layer 2-1, 2-2, 3, 4) については、Cwは1 Hzより0.1 Hzの応答スペクトル値との相関の方が高かった。

3. 第四紀の堆積層からなる扇状地というように、地形・地質条件を限ったとしても、透水係数のような、地震動以外の地震時井戸水位変化の要因が存在するので、地震動の特定の周波数の強度のみで、地震時井戸水位変化を評価するのは困難である。

謝辞：本論文を執筆するにあたって、台湾經濟部水資源局と台湾交通部中央氣象局に貴重なデータを提供していただいた。また、査読者の杉山雄一氏と吉見雅行氏には本稿を改善するための貴重な助言を多数いただいた。以上の方々に心から感謝します。

文 献

- Chia, Y., Wang, Y. S., Chiu, J. J. and Liu, C. W. (2001) Changes of groundwater level due to the 1999 Chi-Chi earthquake in the Choshui River alluvial fan in Taiwan. *Bull. Seismo. Soc. Am.*, **91**, 1062–1068.
- Ge, S. and Stover, S. C. (2000) Hydrodynamic response to strike- and dip-slip faulting in a half-space. *J. Geophys. Res.*, **105**, 25513–25524.
- Hsu, S. K., Chin, C. V. and Cheng, L. H. (2000) The result of first stage of "Groundwater Monitoring Network Plan in Taiwan". *Proceeding of water resources management in 21st century*, 177–197 (in Chinese).
- Igarashi, G. and Wakita, H. (1991) Tidal response and earthquake-related changes in the water level of deep wells. *J. Geophys. Res.*, **96**, 4269–4278.
- 小泉尚嗣(2013a) 地震時および地震後の地下水圧変化. *地学雑誌*, **122**, 159–169.
- 小泉尚嗣(2013b) 地下水観測による地震予知研究—井戸水位変化から地殻変動を推定することによる地震予測—. *Synthesiology*, **6**, 24–33.
- Koizumi, N., Kitagawa, Y., Matsumoto, N., Takahashi, M., Sato, T., Kamigaich, O. and Nakamura, K. (2004a) Pre-seismic groundwater level changes induced by crustal deformations related to earthquake swarms off the east coast of Izu peninsula, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L10606, doi: 10.1029/2004GL019557.
- Koizumi, N., Lai, W. C., Kitagawa, Y. and Matsumoto, N. (2004b) Comments on "Coseismic hydrological changes associated with dislocation of the September 21, 1999 Chichi earthquake, Taiwan" by Min Lee. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L13603, doi: 10.1029/2004GL019897.
- 國生剛治(2005) 液状化現象. 山海堂, 東京, 269p.
- Lai, W. C., Koizumi, N., Matsumoto, N., Kitagawa, Y., Lin, C. W., Shieh, C. L. and Lee, Y. P. (2004) Effects of seismic ground motion and geological setting on the coseismic groundwater level changes caused by the 1999 Chi-Chi earthquakes, Taiwan. *Earth Planets Space*, **56**, 873–880.
- Lee, M., Liu, T. K., Ma, K. F. and Chang, Y. M. (2002) Coseismic hydrological changes associated with dislocation of the September 21, 1999 Chichi earthquake, Taiwan. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1824, doi: 10.1029/2002GL015116.
- Lee, W. H. K., Shin, T. C., Kuo, K. W., Chen, K. C. and Wu, C. F. (2001) Data files from CWB free-field Strong-motion data from the 21 September Chi-Chi, Taiwan, earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **91** (5), CD supplement.
- Matsumoto, N., Kitagawa, G. and Roeloffs, E. A. (2003) Hydrological response to earthquakes in the Haibara well, central Japan – I. Groundwater level changes revealed using state space decomposition of atmospheric pressure, rainfall and tidal responses. *Geophysical Journal International*, **155**, 885–898.
- Montgomery, D. R. and Manga, M. (2003) Streamflow and water well responses to earthquakes, *Science*, **300**, 2047–2049.
- Ohno, M., Sato, T., Notsu, K., Wakita, H. and Ozawa, K. (2006) Groundwater-level changes due to pressure gradient induced by nearby earthquakes off Izu Peninsula, 1997. *Pure and Applied Geophysics*, **163**, 647–655, doi: 10.1007/s00024-006-0041-2.
- 大崎順彦(1997) 新・地震動のスペクトル解析入門. 鹿島出版会, 東京, 299 p.
- Shin, T. C., Kuo, K. W., Lee, W. H. K., Teng, T. L. and Tsai, Y. B. (2000) A preliminary report on the 1999 Chi-Chi (Taiwan) earthquake. *Seismol. Res. Lett.*, **71**, 23–29.
- 高橋治郎(2000) 台湾地震災害. 愛媛大学教育学部紀要, 第I部, 教育科学, **49**, 119–126.
- 上島照幸・芝 良昭・幡谷竜太・河井 正・豊田幸宏・矢島 浩・松田泰治(1999) 1999年台湾集集地震調査速報. 電力中央研究所報告, U99023, 1–86.
- Wang, C. Y., Cheng, L. H., Chin, C. V. and Yu, S. B. (2001) Coseismic hydrologic response of an alluvial fan to the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan. *Geology*, **29**, 831–834.
- Wang, C. Y., Douglas, S. D., Wang, C. H., Mayeri, D. and Berryman, J. G. (2003) Field relations among coseismic ground motion, water level change and liquefaction for the 1999 Chi-Chi (Mw = 7.5) earthquake, Taiwan. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, doi: 10.1029/2003GL017601.
- Water Resources Bureau (1999) Compilation of the result of first stage of "Groundwater Monitoring Network in Taiwan". 400 p (in Chinese).
- Wessel, P. and Smith, W. H. F. (1991) Free Software Helps Map and Display Data. *EOS Trans. AGU*, **72**, 441, 445–446.

(受付：2015年9月1日； 受理：2016年3月4日)