北海道内温泉井における 4 回の $M 7.5$ 以上の 地震直後の地下水位変化

—1993~1994—

北海道立地質研究所* 秋 田 藤 夫
地質調査所** 松 本 則 夫

Coseismic Groundwater Level Changes in Hot Spring Wells in Hokkaido Induced by Four Earthquakes Larger than $M 7.5$ between 1993 and 1994

Fujio AKITA

Geological Survey of Hokkaido Kita 19, Nishi 12, Kita-ku,
Sapporo, Hokkaido 060-0819, Japan

Norio MATSUMOTO

Geological Survey of Japan 1-1-3 Higashi, Tsukuba,
Ibaraki 305-8567, Japan

(Received February 25, 2000; Accepted August 22, 2000)

$M 7.6$ Kushiro-Oki, $M 7.8$ Hokkaido-Nansei-Oki, $M 8.1$ Hokkaido-Toho-Oki and $M 7.5$ Sanriku-Haruka-Oki earthquakes occurred around Hokkaido, northern Japan during the period from January, 1993 to December, 1994. We have collected groundwater-level records in 12 wells observed by local governments in Hokkaido to investigate the relationship between coseismic changes in water levels and volumetric strain induced by the four large earthquakes. Coseismic water level changes are found in many wells. The maximum coseismic change in water level was 2.5 m, induced by the Hokkaido-Nansei-Oki earthquake. The volumetric strain fields induced by the four earthquakes have been calculated by using published parameters of dislocation models, and compared with the coseismic water level changes. Generally, the volumetric strain changes at wells where water level fell coseismically are dilatation, and those at wells where water level rose are contraction. As far as the relationship between water level changes and volumetric strain induced by the earthquakes in seven wells where water level data are available for at least three earthquakes, coseismic water level changes at all the seven wells are found to be proportional to the calculated volumetric strain. Furthermore, the coseismic water level changes are found to be proportional to not only the volumetric strain but also an amplitude of ground motion caused by the earthquakes in four wells where water level are available for all the four earthquakes by applying AIC (The Akaike Information Criterion) method. The strain sensitivities of the water level at the four wells, which are between 1.6 and 19.6 mm/ 10^{-8} strain when the contribution of both the volumetric strain and the ground motion are taken into account, are as large as strain sensitivities inferred from the earth tides in 17 wells observed worldwide.

Key words: Groundwater level, Coseismic change, Volumetric strain, Strain sensitivity, Large earthquake, Hokkaido.

* 〒060-0819 札幌市北区北 19 条西 12 丁目

** 〒305-8567 つくば市東 1-1-3

§ 1. はじめに

地震に関連した地下水位の変化は、国内外を問わず数多く報告されている [例えば、川辺 (1991), 小泉 (1994), ROELOFFS (1988)]. 地殻には大気圧, 地球潮汐, 海洋潮汐, プレート運動, 地震断層運動などによる様々な応力が働く. 地殻内の間隙内流体圧は, 間隙の圧縮歪では増加し, 引張り歪では減少する. 地殻の歪によって間隙水圧に変化が生じるならば, 対象とする帯水層内の水が帯水層外に移動しないという条件, すなわち非排水条件下であれば, 地下水位は地震によって生じる地殻の歪に対応して変化する [BREDEHOEFT (1967), VAN DER KAMP and GALE (1983)]. したがって, 揚水などの人工的なノイズや降雨の影響などが小さい条件下で近似的に非排水条件を満たす帯水層の地下水位または自噴量の変化は, 高感度の歪計と同様の性能を発揮することが期待される. 最近の水位計の分解能 (1 mm) からいえば, 10^{-9} strain オーダーの地殻歪の変化を水位変化として捉えることも可能であろう [松本・小泉 (1999)]. さらに, 地下水位観測は歪計による観測に比べて, 安価で取り扱いも極めて簡便という利点もある. このようなことから我々は, 人工的なノイズなどの影響が小さく, 地球潮汐や地震による歪を検出できる既存の坑井を, 歪計による観測を補完する観測点として積極的に利用したいと考えている.

地震直後の地下水位変化や自噴量変化の極性の分布については, 震源メカニズムから予想される地震直後の体積歪の分布と矛盾しないことが, 1970 年代より, 数多く報告されている [川辺 (1991), 馮 (1982), WAKITA (1975)]. これらの論文の中では, 地震直後の水位変化の極性の議論はなされているが, 歪の変化量に対する水位の変化量の定量的な議論はなされていない. 最近になって, 地下水位の地球潮汐に対する応答や地震による歪と地下水位変化とを比較し, 地震直後の地下水位の変化と地殻歪との関係を定量的に評価した報告がなされている [例えば, IGARASHI and WAKITA (1991), QUILTY and ROELOFFS (1997)]. それらによると, 地震直後の地下水位変化には大きく分けて二つの場合がある. (1) 水位変化が地球潮汐応答から推定した地下水位の歪に対する感

度と同等である場合と, (2) 同一の坑井において, 複数の地震の直後に異なる極性の歪を受けても必ず同じ極性の水位変化となったり, 地震に起因する歪では説明できないほど大きい場合とがある [IGARASHI and WAKITA (1991), 小泉 (1994), 京大防災研・地震予知センター (1995), QUILTY and ROELOFFS (1997), ROELOFFS (1998), ROELOFFS *et al.* (1998)].

1993 年から 1994 年にかけて, 北海道を取り囲むように 1993 年釧路沖地震 (M 7.8, 1 月), 1993 年北海道南西沖地震 (M 7.8, 7 月), 1994 年北海道東方沖地震 (M 8.1, 10 月), 1994 年三陸はるか沖 (M 7.5, 12 月) と 4 回の巨大地震が発生した. 我々は, 北海道内の主に温泉資源調査を目的として観測されている 12 の坑井を対象として, 地震に起因する歪を検出できる坑井を把握するために, 4 回の地震前後の水位変化を調査した. さらに, 各地震の震源断層モデルを用いて理論体積歪を計算した. 本論では, それぞれの地震による歪の極性の分布が, 今回の調査対象となった北海道内の坑井での地震直後の水位変化と矛盾しないことを示す. また, 上記の 4 回の地震のうち 3 回以上の地震前後で水位データが存在する坑井において, 地震直後の水位変化と地震に起因する歪が直線関係であることを示す. さらに, 上記の 4 回すべての地震前後に水位データが存在する 4 ヶ所の坑井において, 地震直後の水位変化が歪だけでなく地震動の影響を受けているかどうかを明らかにする. 最後に, 地震による歪を高感度に検出できると考えられる坑井を提示する.

§ 2. 巨大地震の概要

1993~1994 年にかけて北海道周辺で発生した 4 回の地震の震源位置, マグニチュード等を Table 1 に示す. 震央の位置を Fig. 1 に示す. 北海道東方沖地震の震源位置については KATSUMATA *et al.* (1995), その他の 3 回の地震の震源位置とすべての地震のマグニチュードについては気象庁 (1993), (1994), (1995a), (1995b) による.

Table 1. Catalog of the four large earthquakes. [Japan Meteorological Agency (1993), (1994), (1995a), (1995b), KATSUMATA *et al.* (1995)]

No.	name of earthquake	origin time (JST)	epicenter	depth (km)	Magnitude
EQ1	Kushiro-Oki	20:06 Jan. 15, 1993	42° 51'N, 144° 23'E	107	7.8
EQ2	Hokkaido-Nansei-Oki	22:17 Jul. 12, 1993	42° 47'N, 139° 12'E	34	7.8
EQ3	Hokkaido-Toho-Oki	22:23 Oct. 4, 1994	43° 25.2'N, 146° 48.6'E	30	8.1
EQ4	Sanriku-Haruka-Oki	21:19 Dec. 28, 1994	40° 27'N, 143° 43'E	0	7.5

Fig. 1. Map showing epicenters of the four great earthquakes (solid circles), fault models of each earthquake (frames), and observation wells (open circles). The numbers of the earthquakes are shown in Table 1.

§3. 観測点および観測結果

3.1 観測点概要

地下水位観測は温泉資源調査を主目的として、北海道内の温泉地において実施された。観測点はFig.1に示すように、北海道東部と北海道南部を中心として、ほぼ東西に広く分布する。それぞれの温泉地では、温泉の汲み上げを休止している坑井を選び、地下水位の連続観測を行っている。観測は1993～1994年の間、全観測点で実施されたわけではなく、それぞれ開始時期が異なるとともに、観測期間も異なる。主要な観測点の位置、井戸構造や地質、水理定数、観測方式等の概要をTable2に示す。観測点のうちSP1, SP2は同一井戸で異なった深度にストレーナーを設置している。

3.2 観測結果

それぞれの地震の発生前後2日間に地下水位の連続観測を行っていた観測点の水位データをFig.2に示す。それぞれの水位データには気圧・潮汐などの補正は行っていない。

3.2.1 1993年釧路沖地震(EQ1)

釧路沖地震の直後には、北海道南西部の日本海沿岸の観測点SMを除きほぼ全域で水位変化が観測された。観測記録から読みとった水位変化はSP1で2 cm, NBで

2 cm, OBで27 cm, YNで9 cmのステップ状の上昇であった。SR1だけが11 cmのステップ状の水位低下を示した。

3.2.2 1993年北海道南西沖地震(EQ2)

北海道南西沖地震の直後には、北海道東部を除いてほぼ北海道全域で水位変化が観測された。水位データはSP1で9 cm, SP2で6 cm, OBで4 cm, SR1で26 cm, SR2で19 cm, YNで73 cmのステップ状の低下を示した。中でも震源域に近いSMでは約250 cmの非常に大きなステップ状の水位低下が観測された。震源から最も遠いNBでの水位変化は認められなかった。全観測点の中で唯一KMだけは、約0.7 kg/cm²の自噴圧の上昇を示した。この坑井では、炭酸ガスが大量に付随し、ガスリフト状態で温泉が自噴しているため、他の坑井とは異なる水位変化となることが予想される。

3.2.3 1994年北海道東方沖地震(EQ3)

北海道東方沖地震の直後には、すべての坑井で水位低下が観測された。SP1で3 cm, SP2で2 cm, NBで4 cm, OBで12 cm, SR1で7 cm, SR2で8 cm, SMで1 cm, NGで17 cm, AKで17 cmの9ヶ所で水位低下を認めた。YNでは地震時、パルス状に約10 cmの水位低下を示したが、ステップ状の水位変化は認められな

Table 2. Description of 12 observation wells.

well	location of well lat., lon., altitude	well depth(m)	screened depth (m)	geology	hydraulic properties	sensitivity sampling rate
SP1	43 ° 4.74'N, 141 ° 20.19'E 12 m	657	287.9-309.9 354.1-376.2	Qs	K=2.1x10 ⁻² , T=92 S=2.1x10 ⁻³	5 mm 5 min.
SP2	43 ° 4.74'N, 141 ° 20.19'E 12 m	657	539-594	Ps	K=2.9x10 ⁻⁴ , T=1.6	5 mm 5 min.
SM	42 ° 41.13'N, 140 ° 1.6'E 20 m	625	447-495 551-617	Mv PTs	K=3.9x10 ⁻⁴ , T=4.5 S=1.8x10 ⁻²	5 mm 5 or 10 min.
YN	41 ° 46.28'N, 140 ° 47.61'E 5 m	68	48- 68	Ms, Mv	K=10 ⁻¹ -10 ⁻² S=1.8x10 ⁻²	10 mm 5 min.
SR1	42 ° 27.13'N, 141 ° 12.45'E 35 m	508	unknown	Ps, Pv, Ms, Mv	T=14.2-44.6	5 mm 5 min.
SR2	42 ° 27.44'N, 141 ° 12.19'E 9 m	458	unknown	Ps, Pv, Ms, Mv	T=14.2-44.6	5 mm 5 min.
OB	42 ° 55.4'N, 143 ° 8.14'E 56.5 m	1328	950-1060	Ps, Ms, PTs	K=4.0x10 ⁻⁵	10 mm 10 min.
TY	42 ° 33.24'N, 140 ° 49.66'E 180 m	115	104.6-115	Qv	K=10 ⁻² -10 ⁻³	5 mm 10 min.
KM	43 ° 9.22'N, 143 ° 27.18'E 21.5 m	1100	800-1100	Mv,Ms,	unknown	0.01 kg/cm ² 30 min.
NG	42 ° 7.28'N, 140 ° 26.9'E 103 m	3		Qv	unknown	5 mm 5 min.
AK	43 ° 25.72'N, 144 ° 6.20'E 432 m	1061.1	518.1-1005.8	Mv	K=2.5x10 ⁻⁴ , T=5.6	5 mm 10 min.
NB	43 ° 38.33'N, 144 ° 23.81'E 137 m	78	unknown	Qv	effective porosity 32.9%	5 mm 5 min

K: permeability (cm/s), T: transmissivity (cm²/s), S: storage coefficient.

Qs: Quaternary sedimentary rocks, Qv: Quaternary volcanic rocks, Ps: Pliocene sedimentary rocks, Pv: Pliocene volcanic rocks, Ms: Miocene sedimentary rocks, Mv: Miocene volcanic rocks, PTs: Pre-Tertiary sedimentary rocks.

Table 3. Parameters of a fault or sub-faults of the four large earthquakes.

symbol	center of the fault lat.(deg.), lon.(deg.), depth (km)	strike (deg.)	dip (deg.)	length (km)	width (km)	strike slip (m)	dip slip (m)	reference
EQ1	144.254E, 42.825N, 109	N70E	2	50	35	0	5	Hashimoto et al. (1993)
EQ2 A	139.227E, 43.101N, 10	N340E	30	27	40	0	2.26	Tanioka et al. (1995)
B	139.248E, 42.817N, 7.5	N200E	30	25	30	0	0.52	
C	139.149E, 42.617N, 7.5	N200E	30	25	30	0	6.07	
D	139.137E, 42.363N, 13	N160E	60	27	30	0	3.1	
E	139.271E, 42.096N, 13	N160E	60	35	30	0	3.79	
EQ3 A	146.511E, 43.384N, 53	N47.3E	70	56	100	-3.4	4.1	Ozawa (1996)
B	147.019E, 43.779N, 48	N47.3E	71	56	100	-1.4	1.7	
EQ4 A	142.282E, 40.441N, 38	N200E	10	60	30	0	0.75	Tanioka et al. (1996)
B	142.761E, 40.474N, 31	N200E	10	30	45	0	0.65	
C	142.662E, 40.174N, 31	N200E	10	30	45	0	0.93	
D	143.278E, 40.341N, 23	N200E	10	30	45	0	0.73	
E	143.163E, 40.091N, 23	N200E	10	30	45	0	1.71	
F	143.766E, 40.275N, 16	N200E	10	60	30	0	0.56	

かった。AK では一度水位が低下した後、徐々に上昇した。

3.2.4 1994 年三陸はるか沖地震 (EQ4)

三陸はるか沖地震時には、北海道中央部から南西部に

かけて地震直後の水位変化が観測された。水位は SP1 で 1 cm, SP2 で 2 cm, SR1 で 5 cm, NG で 5 cm, YN で 12 cm の 5 ヶ所で低下が確認された。しかし、北海道東部の AK, OB では変化が認められなかった。

Fig. 2. Raw groundwater level data before and after the four large earthquakes. The observed periods of the water levels are January 15–16, 1993, July 12–13, 1993, October 4–5, 1994 and December 28–29, 1994 for EQ1, EQ2, EQ3 and EQ4, respectively.

§ 4. 地震による歪と地震直後の水位変化との関係

ここでは、4回の地震ごとに、地震直後の水位変化と、断層モデルに基づき計算された体積歪分布とを対比する。地震による理論歪の計算方法には OKADA (1992) を用いた。理論歪の計算には、釧路沖地震では HASHIMOTO *et al.* (1993)、北海道南西沖地震では TANIOKA *et al.* (1995)、北海道東方沖地震では OZAWA (1996)、三陸はるか沖地震では TANIOKA *et al.* (1996) で示された断層

パラメータを用いた。Fig. 1 に計算で用いたそれぞれの地震の断層およびサブ断層の位置と記号を、Table 3 にはそれぞれの地震の断層およびサブ断層のパラメータを示す。

4.1 1993 年釧路沖地震 (EQ1)

Fig. 3 に釧路沖地震の断層モデルに基づき算出した理論体積歪分布と各観測点の地震直後の水位変化を示す。歪分布は、北海道東部を中心として、最大 10^{-6} オー

Fig. 3. Coseismic steps of groundwater level and calculated volumetric strain fields in response to the 1993 Kushiro-Oki earthquake (EQ1). Units of water level and volumetric strain are cm and 10^{-9} , respectively. Positive values represent increases of water level or extensional volumetric strain. Solid frame shows the location of the fault estimated by HASHIMOTO *et al.* (1993).

Fig. 4. Coseismic steps of groundwater levels and calculated volumetric strain fields in response to the 1993 Hokkaido-Nansei-Oki earthquake (EQ2). Solid frames show locations of subfaults estimated by TANIOKA *et al.* (1995).

ダーの圧縮場となっているが、北海道北部から中部を経て南西部にかけては 10^{-9} から 10^{-8} 程度の伸張場になっている。水位データは SR1 を除き、4 ヶ所で上昇している。歪は YN, SP1 の 2 ヶ所で水位変化の極性と逆

だが、他の 3 ヶ所の観測点では一致する。

4.2 1993 年北海道南西沖地震 (EQ2)

Fig. 4 に北海道南西沖地震による歪分布と地震直後の水位変化を示す。歪分布は北海道のほぼ全域が伸張場

Fig. 5. Coseismic steps of groundwater levels and calculated volumetric strain fields in response to the 1994 Hokkaido-Toho-Oki earthquake (EQ3). Solid frames show locations of subfaults estimated by Ozawa *et al.* (1996).

Fig. 6. Coseismic steps of groundwater levels and calculated volumetric strain fields in response to the 1994 Sanriku-Haruka-Oki earthquake (EQ4). Solid frames show locations of subfaults estimated by Tanioka *et al.* (1996).

になっており、西部の SM 付近では 10^{-6} のオーダーとなっている。SM における水位変化は 250 cm の低下と、今回調査した中で最大値を示した。KM では地震による歪と水位変化は逆の極性を示しているが、その他の観測点では、地震による歪分布と水位変化は調和した結果になっている。

4.3 1994 年北海道東方沖地震 (EQ3)

Fig. 5 は北海道東方沖地震による歪分布と地震直後の水位変化である。歪分布は北海道全域が伸張場になっており、特に東部では最大 10^{-6} オーダーの伸張場である。水位データは YN で変化はなかったが、その他の観測点では全て低下している。歪分布と水位変化とは矛盾のない結果となっている。

4.4 1994 年三陸はるか沖地震 (EQ4)

Fig. 6 に三陸はるか沖地震による歪分布と地震直後の水位変化を示す。歪分布は、北海道中央部から南西部にかけては 10^{-8} から 10^{-9} のオーダーの伸張場であるが、中央部から北部、東部の地域は 10^{-9} のオーダーの圧縮場になっている。北海道内ではこの地震による歪は他の地震に比べ小さい。この地震直後には、北海道中央部から南西部にかけての 5 ヶ所で 1~12 cm の水位低下を観測している。しかし、東部の AK, OB の 2 ヶ所では変化が認められなかった。この地震による歪分布と水位変化は矛盾しない結果になっている。

§ 5. 各観測点における理論体積歪と地震直後の水位変化との関係

Fig. 7 に、4 回の地震のうち 3 回以上水位の観測値が存在する NB, OB, SM, SP1, SP2, SR1, YN の 7 ヶ所の観測点での地震による理論体積歪と地震直後の水位変化との関係を示す。図中に、最小二乗法で求めたそれぞれの観測点での水位と歪との関係を示した。Table 4 に 7 ヶ所の観測点での体積歪、水位変化、震央からの距離および水位変化がすべて地震による歪に起因すると仮定したときの歪に対する水位の応答感度を示す。7 ヶ所の観測点すべてにおいて、地震直後の水位変化と地震による歪とはおおよそ直線関係を示している。

NB および OB における地震による歪と地震直後の水位変化との関係では、伸張場で水位が下降し、圧縮場では水位が上昇するなど、極性が一致し、両者の直線関係も良い。地震による歪に対する水位の応答感度は NB で $0.35 \text{ mm}/10^{-8} \text{ strain}$, OB では $8.1 \text{ mm}/10^{-8} \text{ strain}$ である。

SM では北海道南西沖地震直後に 250 cm もの大きな水位低下を記録した。そのときの体積歪は $3.49 \times 10^{-6} \text{ strain}$ と非常に大きな伸張場となった。釧路沖地震と北海道東方沖地震による歪は 10^{-8} strain オーダーで、水位変化もわずかである。地震による歪に対する水位の応答感度は $7.2 \text{ mm}/10^{-8} \text{ strain}$ である。

SP1 では地震による歪の計算結果がすべて伸びで

Fig. 7. Relationship between coseismic changes in groundwater levels (W) and calculated volumetric strain steps in response to the four large earthquakes (V) in seven wells.

Table 4. Observed coseismic steps of groundwater levels (gwl), calculated volumetric strain in response to the four large earthquakes, and epicentral distance (ep. dis). Strain sensitivities are also shown in Fig. 7 and calculated using the least-squares method.

well		EQ1	EQ2	EQ3	EQ4	strain sensitivity
NB	gwl(cm)	2	0	-4	*	0.35 mm/10 ⁻⁸ strain
	strain(10 ⁻⁸)	-46	2.7	121.1	0.33	
	ep. dis.(km)	91.2	423.2	173.3	396.0	
OB	gwl(cm)	27	-4	-12	0	8.1
	strain(10 ⁻⁸)	-24.2	7.0	25.0	-0.1	
	ep. dis(km)	92.0	319.3	279.4	284.1	
SM	gwl(cm)	0	-250	-1	*	7.2
	strain(10 ⁻⁸)	-1.1	348.7	4.9	1.7	
	ep. dis(km)	347.1	79.4	534.7	312.7	
SP1	gwl(cm)	2	-9	-3	-1	3.0
	strain(10 ⁻⁸)	4.0	32.9	10.3	1.1	
	ep. dis(km)	239.7	171.8	421.6	303.3	
SP2	gwl(cm)	*	-6	-2	-2	1.4
	strain(10 ⁻⁸)	4.0	32.9	10.3	1.1	
	ep. dis. (km)	239.7	171.8	421.6	303.3	
SR1	gwl(cm)	-11	-26	-7	-5	3.9
	strain(10 ⁻⁸)	1.8	49.5	6.8	2.9	
	ep. dis (km)	253.3	177.4	445.2	240.7	
YN	gwl(cm)	9	-73	0	-12	17.8
	strain(10 ⁻⁸)	0.1	44.6	3.4	7.3	
	ep. dis. (km)	308.4	196.0	502.3	193.5	

*: missing observation

あった。水位は釧路沖地震直後のみ上昇し、歪の極性と逆の結果となっている。地震による歪に対する水位の応答感度は3.0 mm/10⁻⁸ strainである。SP1と同一地点でストレーナー深度の異なるSP2では、各地震に対する水位変化量はSP1に比べて若干小さく、歪に対する水位の応答感度は1.4 mm/10⁻⁸ strainであった。

YNでは、地震による歪はすべて伸びを示している。釧路沖地震では約9 cmの大きな水位上昇を示しており、極性を無視したとしても歪量から説明できる変化量ではない。水位は釧路沖地震以外は下降しており、歪量と調和する結果になっている。歪に対する水位の応答感度は17.8 mm/10⁻⁸ strainと他の観測点に比べ際だって大きい。

SR1では歪の計算結果がすべて伸びとなっている。水位もすべて降下しており、地震による歪の極性と矛盾しない。歪に対する水位の応答感度は3.3 mm/10⁻⁸ strainであった。

§6. 考 察

Fig. 7で示した7ヶ所の観測点での4回の地震による理論体積歪と地震直後の水位変化との関係は、おおむね直線関係にあるといえる。しかし、Fig. 7において、最小二乗法によって決定した直線はすべての観測点で原点から離れており、これは地震による歪が0付近である

場合にも水位変化が0にならないことを示唆している。さらにSP1, YNでは断層モデルから得られた歪の極性と逆の水位変化が観測されている。また、SP2とSR1では、歪量がそれぞれ1.1×10⁻⁸, 1.8×10⁻⁸ strainの地震直後も水位が変化している。このように地震による歪が小さいにもかかわらず水位変化が0にならない理由として次の2点が考えられる。

1) 地震による理論体積歪の計算[OKADA (1992)]では、媒質を半無限の等方均質弾性体と仮定している。観測点付近で地層の不均質性が大きい場合などは、地震による歪は、計算結果と実際とは相違する可能性が考えられる。

2) ROELOFFS *et al.* (1998), MATSUMOTO and ROELOFFS (1999)では、複数の観測点で地震による10⁻⁸ strain程度の小さな歪では説明できない地震直後の大きな水位変化が報告されている。その原因としては水位観測点での地震動によって励起される観測点近傍の局所的な変化の可能性が指摘されている。

本章では上記2)について考察を行う。

坪井(1954), 宇津(1984)によると、観測点での地震動による変位A, 気象庁によるマグニチュードMと観測点からの震央距離Aとの関係は

$$M = 1.73 \log A + \log A - 0.83$$

で与えられる。Fig. 8にSR1における地震動による変

Fig. 8. Comparison of relationship between coseismic groundwater-level steps and calculated strain with that between coseismic groundwater-level steps and $10^M \Delta^{-1.73}$ which is proportional to ground motion [Tsuboi (1954), Utsu (1984)]. Δ is epicentral distance from the well.

位に比例する量である $10^M \Delta^{-1.73}$ と水位変化量との関係を表した図を示す。SR1では、特に歪が 10^{-8} strain オーダーの変化となった3回の地震において、地震動と水位変化量との直線関係は、地震による歪と地震直後の水位変化量との直線関係よりも良いことがわかる。したがって、SR1において地震による歪が 10^{-8} strain オーダーと小さい場合に10 cm程度の水位低下が観測された原因は地震動であり、地震直後の水位変化は地震に伴う歪と地震動双方が原因であることが考えられる。

ここで、地震による歪と地震動が水位変化に与える影響を定量的に調べるため、地震直後に水位変化を引き起こす要因として、地震に伴う体積歪 V と地震動による変位に比例する量 $B (=10^M \Delta^{-1.73})$ の二つを考え、以下の三つのモデルの優劣を赤池情報量基準 AIC [AKAIKE (1973), 坂元・他 (1983)] で判断することを試みる。

モデル(1): 地震直後の水位変化 W は地震直後の歪 V と地震動の変位 B で説明できる。

$$W = a_1 \times V + a_2 \times B$$

モデル(2): W は V のみで説明できる。

$$W = a_1 \times V$$

モデル(3): W は B のみで説明できる

$$W = a_2 \times B$$

係数 a_1, a_2 は最小二乗法で決める。三つのモデルの優劣を決定するには、少なくとも4回以上の地震直後の水位変化が観測されていなければならない。その条件を満たす4ヶ所の観測点 SR1, OB, SP1, YN ごとに AIC を計算した結果を Table 5 に示す。AIC は小さいほど最適なモデルとされ、AIC に1~2の差があると、完全に有意と判定できる [坂元・他 (1983)]。結果としては、4ヶ所全ての観測点で歪と地震動の双方から影響を受けるモデル(1)の AIC が最も小さくなった。このときの係数

Table 5. Calculated AIC (The Akaike Information Criterion) [AKAIKE (1973), SAKAMOTO *et al.* (1983)] of the following three models, and coefficients a_1 and a_2 of the minimum AIC model. We compare three models which are (1) coseismic steps of water level, W , is proportional to both volumetric strain, V , shown in Table 4, and estimated amplitude of ground motion, $B (=10^M \Delta^{-1.73})$, induced by the four earthquakes, that is, $W = a_1 \times V + a_2 \times B$, (2) W is proportional to V , and (3) W is proportional to B , where Δ is an epicentral distance from each well, M is a magnitude of the earthquake determined by Japan Meteorological Agency, and a_1 and a_2 are coefficients for V and B determined by the least-squares model, respectively. Model (1) is selected by the Minimum AIC procedure for all wells.

well	AIC			a_1 (mm/10 ⁻⁸ strain)	a_2 (mm/10 ⁻⁸ $\Delta^{-1.73}$)
	Model(1)	Model(2)	Model(3)		
SR1	16.86	21.66	29.08	-1.61	-0.0220
OB	13.94	33.85	29.09	-6.30	0.0046
SP1	16.87	24.36	19.04	-4.44	0.0063
YN	25.80	40.38	28.78	-19.64	0.0204

a_1, a_2 を Table 5 に示す。

地震動の影響を考慮した場合の歪に対する水位の応答感度は、地震動の影響を考慮しない場合 (Table 4) に対して SR1 で約 40% 低下し 1.6 mm/10⁻⁸ strain, OB では約 22% 低下し 6.3 mm/10⁻⁸ strain, SP1 では約 45% 上昇し 4.4 mm/10⁻⁸ strain, YN では約 10% 上昇し 19.6 mm/10⁻⁸ strain となった。地震動による水位変化への寄与は SR1 と YN で大きく、OB と SP1 はそれに対して4分の1程度である。地震動による水位変化の極性は SR1 で低下を示し、その他3ヶ所の観測点では上昇を示した。この地震動によって励起される水位変化の極性は Fig. 7 中の各観測点における歪と水位の直線関係において、歪が0であるときの水位変化の極性と同じである。

以上のように、地震直後の水位変化に対する歪と地震動による寄与が定量的に明らかになることにより、歪に対する水位の応答感度をより正確に決定することが可能となった。

ROELOFFS (1988) によると、世界各地の17の坑井において、地球潮汐の M_2 分潮に対する水位の応答は 0.4 ~ 8.1 cm と報告されている。ここで、 M_2 分潮による体積歪を 2×10^{-8} strain [川辺 (1991)] とすると、地球潮汐による体積歪に対する水位の応答感度は、坑井によっ

て異なるが、おおよそ $2 \sim 40 \text{ mm}/10^{-8} \text{ strain}$ となる。今回調査した7ヶ所の観測点のうち、地震動の影響を取り除いた4ヶ所(SR1, OB, SP1, YN)での応答感度は $1.6 \sim 19.6 \text{ mm}/10^{-8} \text{ strain}$ である。4ヶ所の観測点の地震に伴う歪に対する水位の応答感度は、世界各地の17の坑井における地球潮汐による応答感度の範囲にほぼ入っている。したがって、これらの観測点の水位は、地震による歪に適度に応答していると判定できる。

§7. 結論と今後の課題

1993年から1994年にかけて北海道周辺で発生した4回のM7.5以上の巨大地震によって、地震直後の顕著な地下水位変化が数多く観測された。北海道内各地の観測点における地震直後の水位変化の極性とその大きさは、大局的には断層運動の結果生じた広域的な地殻歪で矛盾なく説明できる。

地震直後に水位変化を起こす要因として、地震による体積歪と地震動の二つを考え、水位変化が体積歪のみに影響を受けるモデル、地震動のみに影響を受けるモデル、体積歪・地震動双方に影響を受けるモデルの三つについてAICを用いて優劣を判定した。4回すべての地震直後の水位変化が観測されている4ヶ所の観測点SR1, OB, SP1, YNに適用した結果、全観測点とも体積歪と地震動双方から影響を受けるモデルが最も妥当と判定された。地震動の影響を考慮した場合の歪に対する水位の応答感度は、考慮しない場合に対してSR1で約40%低下し $1.6 \text{ mm}/10^{-8} \text{ strain}$, OBでは約22%低下し $6.3 \text{ mm}/10^{-8} \text{ strain}$, SP1では約45%上昇し $4.4 \text{ mm}/10^{-8} \text{ strain}$, YNでは約10%上昇し $19.6 \text{ mm}/10^{-8} \text{ strain}$ となった。この結果、地震に伴う歪と地震直後の水位変化の関係をより正確に評価する事が可能となった。このことは、水位観測井の歪に対する検知能力を求める際の精度の向上をもたらし、水位観測井を歪計による観測を補完する観測点として活用するという筆者らの目標達成のためには極めて重要な意味をもつと考える。

今回調査した坑井のうち、4回の地震の前後に水位データが存在し、地震動の影響を取り除くことができた4ヶ所(SR1, OB, SP1, YN)での応答感度は $1.6 \sim 19.6 \text{ mm}/10^{-8} \text{ strain}$ である。これらの坑井での地震による歪に対する水位の応答感度は、世界各地の17の坑井における地球潮汐による応答感度の範囲にほぼ入っており、これらの坑井の水位は、地震による歪に適度に応答していると判定できる。Table 5に示した歪に対する水位の応答感度から判断すると、OBとYNは歪に対して高感度の観測井として、SP1とSR1は中程度の感度の観測井として利用可能と考えられる。

なお、4回の地震のうち3回の地震前後に水位データが存在する3ヶ所の観測点(SM, SP2, NB)については、現時点では地震動の影響を取り除いていないため、上記4ヶ所の観測点と同様の議論はできないが、Fig. 7およびTable 4の結果から、歪に対してSMは高感度、SP2は中程度の感度、NBは低感度の観測井であると推察される。この3観測井については今後ある程度の大きさの地震直後の水位変化が観測されれば、地震動の影響を取り除くことも可能になると考える。

今回は、M7.5以上の巨大地震直後の水位変化に対する歪と地震動の関係について焦点を絞って論じた。今後の課題は、各坑井における長期的な水位データが地殻歪センサーとして利用できるかどうかを検定することである。具体的には、長期水位データに対する揚水などの人工的なノイズや降雨の影響などの有無、気圧や地球潮汐の影響を評価したうえで、地震活動や地殻変動に対応する現象が表れているかどうかを検討したいと考えている。

本論では、温泉地での水位観測結果を中心として議論を行った。温泉帯水層は、ほとんどの場合、被圧帯水層を形成している。また、温泉水は地下深部まで発達する裂か系を上昇することが多いため地下深部の情報をもたらすことも期待される。さらには、温泉好きの国民性ということもあって一般の人々の関心が高く、情報を収集するうえで極めて有利である。このようなことから、地震活動や地殻変動と地殻内流体の関連性を探るうえで温泉データをさらに有効に活用したいと考えている。

謝 辞

本研究は、北海道内の地方自治体が観測した地下水位データに基づいて行われた。本論文中の地図を含む図面は地質調査所の村田泰章氏の作図システムによって作成された。北海道南西沖地震と三陸はるか沖地震の断層パラメータの詳細については気象研究所の谷岡勇二郎氏にご教示いただいた。米国地質調査所のE. A. Roeloffs氏からは本論文をまとめるにあたり、適切な助言をいただいた。京都大学防災研究所地震予知研究センターの重富國宏氏と匿名査読者のコメントは、原稿の改善に大変役立ちました。以上の方々に深く感謝申し上げます。

文 献

- AKAIKE, H., 1973, Information theory and an extension of the maximum likelihood principle, in "2nd International Symposium on Information Theory", eds. by B. N. Petrov and F. Csaki, Akademiai Kiado, Budapest, 267-281.
- BREDEHOEFT, J. D., 1967, Response of well-aquifer sys-

- tems to earth tides, *J. Geophys. Res.*, **72**, 3075–3087.
- HASHIMOTO, M., T. SAGIYA, S. OZAWA and T. TADA, 1993, Fault models for the crustal movements associated with the 1993 Off Kuroshio earthquake and the 1993 Southwestern Off Hokkaido earthquake and their tectonic significance, *Proceedings of the CRCM '93 Kobe*, 57–64.
- HSIEH, P. A., J. D. BREDEHOEFT and S. A. ROJSTACZER, 1988, Response of well aquifer system to earth tides: problem revisited, *Water Resour. Res.*, **24**, 468–472.
- IGARASHI, G. and H. WAKITA, 1991, Tidal responses and earthquake-related changes in the water level of deep wells, *J. Geophys. Res.*, **96**, 4269–4278.
- KATSUMATA, K., M. ICHIYANAGI, M. MIWA and M. KASAHARA, 1995, Aftershock distribution of the October 4, 1994 Mw 8.3 Kurile earthquake determined by a local seismic network in Hokkaido, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1321–1324.
- 川辺岩夫, 1991, 地震に伴う地下水・地球化学現象, *地震* **2**, **44**, 341–364.
- 気象庁, 1993, 平成5年(1993年)釧路沖地震(1月15日 M 7.8), 地震予知連絡会会報, **50**, 8–16.
- 気象庁, 1994, 平成5年(1993年)北海道南西沖地震(7月12日 M 7.8), 地震予知連絡会会報, **51**, 37–53.
- 気象庁, 1995a, 平成6年(1994年)北海道東方沖地震(10月4日 M 8.1), 地震予知連絡会会報, **53**, 51–56.
- 気象庁, 1995b, 平成6年(1994年)三陸はるか沖地震(12月28日 M 7.5), 地震予知連絡会会報, **54**, 75–83.
- 小泉尚嗣, 1994, 地殻歪と地殻内流体, *火山*, **39**, 169–176.
- 京大防災研・地震予知研究センター, 1995, 逢坂山観測所において観測された地下水位変化の異常と地震との関連, 地震予知連絡会会報, **54**, 738–744.
- 馮 学才, 1982, 我国大地震前地下水異常特征及其物理機制, *地震地質*, **4**, 35–49.
- 松本則夫・小泉尚嗣, 1998, 高感度地殻変動センサーとしての地下水位の変動メカニズムの解明, *月刊地球号外*, No. 20, 226–229.
- MATSUMOTO, N. and E. A. ROELOFFS, 1999, Possible mechanism of coseismic groundwater level drops at Haibara well, Japan, *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, **80**, Fall Meet. Suppl., F271.
- MELCHIOR, P., 1983, *The tide of the planet Earth* (2nd ed.), Pergamon Press, Oxford, 641 pp.
- OKADA, Y., 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 1018–1040.
- OZAWA, S., 1996, Geodetic inversion for the fault model of the 1994 Shikotan earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 2009–2012.
- QUILTY, E. G. and E. A. ROELOFFS, 1997, Water level changes in response to the December 20, 1994 M 4.7 earthquake near Parkfield, California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **87**, 310–317.
- ROELOFFS, E. A., 1988, Hydrologic precursors to earthquakes: A review, *Pure Appl. Geophys.*, **126**, 177–209.
- ROELOFFS, E. A., 1996, Polyoelastic techniques in the study of earthquake-related hydrologic phenomena, in *Advances in Geophysics*, edited by R. Dmowska, Academic, San Diego, 137–195.
- ROELOFFS, E. A., 1998, Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **103**, 869–889.
- ROELOFFS, E. A., N. MATSUMOTO, D. L. GALLOWAY, E. G. QUILTY, M. L. SOREY, C. D. FARRAR and D. E. WOODCOCK, 1998, Persistent water-level changes caused by seismic waves: similarities and differences among well sites worldwide, *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, **79**, Fall Meet. Suppl., F194.
- 坂元慶行・石黒真木夫・北川源四郎, 1983, 情報量統計学, 共立出版.
- TANIOKA, Y., K. SATAKE and L. RUFF, 1995, Total analysis of the 1993 Hokkaido Nansei-oki earthquake using seismic wave, tsunami and geodetic data, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 9–12.
- TANIOKA, Y., L. RUFF and K. SATAKE, 1996, The Sanriku-oki, Japan, earthquakes of December 28, 1994 (M_w 7.7): Rupture of a different asperity from a previous earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 1465–1468.
- 坪井忠二, 1954, 地震動の最大振幅から地震の規模 M を定めることについて, *地震* **2**, **7**, 185–193.
- 宇津徳治, 1984, 地震学第2版, 共立出版.
- VAN DER KAMP, G. and J. E. GALE, 1983, Theory of earth tide and barometric effects in porous formations with compressible grains, *Water Resour. Res.*, **19**, 538–544.
- WAKITA, H., 1975, Water wells as possible indicators of tectonic strain, *Science*, **489**, 553–555.