宮城県沖大地震の前兆を捉えるための深層地下水変動研究：2004年6月～2007年12月の観測結果

Studies on deep groundwater changes for detecting the precursors of anticipated large earthquakes off Miyagi Prefecture, Japan: Observation results from June 2004 to December 2007

Abstract

To detect the precursors of deep groundwater changes related to anticipated large earthquakes off Miyagi Prefecture, we selected two deep boreholes located on the hanging walls of active reverse faults, and established an observation network with a real-time, automatic data-acquisition system. After taking into account the hydrological conditions and the effects of barometric pressure, the earth's tide, and rainfall, as well as the resolution limits of temperature measurements of groundwater for the two boreholes, we identified plausible earthquake-related groundwater changes during the observation period (4 April 2004 to 31 December 2007). One of the events was a pre-seismic 0.003°C fall in groundwater temperature that began 2.7 hours prior to the main shock ($M_j 6.6$) of the 2 December 2005 off-Miyagi Prefecture earthquake. The second event was a pre-seismic 0.0012°C rise in groundwater temperature that started 2 hours before a shallow earthquake ($M_j 4.5$) located beneath Sendai Bay on 12 April 2007. The third event was a coseismic temperature fall by as much as 0.02°C associated with a shallow earthquake ($M_j 4$) on 29 May 2007, located close to one of the observation sites. The resolution limit of our temperature observation system indicates that it has the potential to detect the precursors of future large earthquakes off Miyagi Prefecture if associated with pre-seismic slip as large as that for a $M_j 6.5$ earthquake.

Keywords: Earthquake precursors, deep boreholes, groundwater temperature, water level, real-time automatic data-acquisition system

南須原美恵^{*1, †1} 鹿島雄介^{*1, †2}
中村隆志^{*1, †3} 山内常生^{*2}
大槻憲四郎^{*1}

Yoshie Nasuhara^{*1, †1}
Yusuke Kashima^{*1, †2}
Takashi Nakamura^{*1, †3}
Tsuneo Yamauchi^{*2} and
Kenshiro Otsuki^{*1}

2010年7月31日受付.

2010年11月9日受理.

^{*1} 東北大学理学研究科地学専攻
Department of Geology, Graduate School of
Science, Tohoku University

^{*2} 名古屋大学理学研究科地球惑星科学専攻
Department of Earth and Planetary Sciences,
Graduate School of Science, Nagoya University

^{†1} 現所属：経済産業省
Present address: Ministry of Economics,
Trade and Industry

^{†2} 現所属：埼玉県新座高校
Present address: Niiza High School, Saitama
Prefecture

^{†3} 現所属：東京工業大学大学院情報工学研究科情報環境学専攻
Present address: Department of Mechanical
and Environmental Informatics, Graduate
School of Information Science and Engineering,
Tokyo Institute of Technology

Corresponding author; K. Otsuki,
otsuki-k@m.tohoku.ac.jp

1. はじめに

東北日本弧の下には、太平洋プレートが約 10 cm/y の速度で沈み込んでおり、プレート間とプレート内の地震が起きている。最近、宮城県沖にいくつかのアスペリティーが見つかった (Fig. 1)。地震調査研究推進本部 (2001) は、これらのアスペリティーが平均約 37.1 年で繰り返し破壊され、最近の 1978 年 6 月 12 日の宮城県沖地震 ($M_j 7.4$; M_j は気象庁マグニチュード) を含む大地震が起きてきたとした。そして、次の大地震が 10 年以内に起きる確率を約 60% であると見積もった。宮城県防災会議地震対策専門部会 (2004)

は、これによる死傷者は 4,100 人、全半壊家屋 27,300 棟と推定した。2005 年 8 月 16 日に $M_j 7.2$ の地震が宮城県沖で発生し、上述のアスペリティーの一部が破壊された (Okada et al., 2005; Miura et al., 2006; Yaginuma et al., 2006)。2005 年 12 月 3 日には壊れ残ったアスペリティーで最大余震 ($M_j 6.6$) が起こった。近い将来、2005 年 8 月 16 日の地震ですべり残した部分が壊れ、 $M_j 7.4$ 程度の地震が起こると懸念されている。

地震調査研究推進本部 (2001) の予測を受け、我々は宮城県沖大地震到来までに前兆観測の経験を積み、直前予知研究に資すべく、2004 年 6 月 20 日に深層地下水変動観測を

Fig. 1. Locality map of the groundwater observation sites. Colored circles: boreholes for groundwater observations. AT: Atago, YM: Yamato, MN: Minamikata, KN: Kannari, ON: Onagawa, and YB: Yabitsu. Red stars: epicenters of three earthquakes for which pre- or coseismic changes in groundwater temperature were detected. Colored contour lines: asperities off Miyagi prefecture that were activated in 1936, 1978, 1981, and 2003 (after Yamanaka and Kikuchi, 2004). Color contours show seismic slip in meters. Red arrows: displacement vectors of GPS stations related to the off-Miyagi Prefecture earthquake ($M_7.2$) on 16 August 2005, for which the slip is shown in red contour lines (after Miura et al., 2005; Yaginuma et al., 2006). Thick purple lines: surface traces of active faults (after Research Group for Active Faults, 1980). F1: western marginal fault zone of the Fukushima Basin (reverse fault), F2: Sakunami-Yashikidaira Fault (reverse fault), F3: Futaba Fault zone (left-lateral fault), F4: Nagamachi-Rifu Fault zone (reverse fault), F5: Asahiya flexure (reverse fault), F6: Ichinoseki flexure (reverse fault).

開始した。数ある地震予知法の中から地下水変動観測を選んだのは、1978年1月14日伊豆大島近海地震 (Wakita et al., 1988), 1985年8月4日 Kettleman Hills earthquake (カリフォルニア, Roeloffs and Quilty, 1997), 1995年1月17日兵庫県南部地震 (Igarashi et al., 1995; Tsunogai and Wakita, 1996) などの実績があるからである。

地震に関連した地下水の水位、水温、ラドン・ヘリウム・二酸化炭素・水素などのガス濃度、各種イオン濃度などの観測結果を報告した例は多数に上る。これらは King (1986), Roeloffs (1988), Thomas (1988), Wakita et al. (1988), Kissin and Grinevsky (1990), 小泉 (1997), Montgomery and Manga (2003), Hartmann and Levy (2005), King et al. (2006), Manga and Wang (2007) などがレビューしている。よく知られているように、地震に伴う静的歪変化が震源距離 r の3乗に反比例して減衰するのに対し、地震波の速度振幅と加速度振幅は r の2乗に反比例して減衰するため (幾何減衰), その影響はより遠くまで及ぶ (Aki and Richards, 1980)。地震動による地下水変動観測事例は多数に上る (最近の例では、例えば Itaba et al., 2008a, b)。地震動に対する媒質の応答は多様で、間隙率・透水性の増加 (Rojstaczer and Wolf, 1992; Sato et al., 2000; Montgomery and Manga, 2003; Elkhoury et al., 2006; Kitagawa et al., 2007), 液状化類似のダメージによる間隙水圧の上昇 (Roeloffs, 1998; Wang et al., 2003), 沸騰・溶存ガスの発泡・散逸 (Linde et al., 1994; Roeloffs, 1998; Matsumoto and Roeloffs, 2003; Roeloffs et al., 2003) などが含まれる。スマトラ巨大地震に対しては遠く離れた中国、日本、北米などの観測井も反応し (Kitagawa et al., 2006; Manga and Wang, 2007; Sil and Freymueller, 2006), Brodsky et al. (2003) によれば、

その一部は到来表面波によるクラック沈殿物の除去によって説明できるという。

地震前後の静的歪変化への応答は、 r が地震断層の長さの数倍程度の範囲内で顕在化するようである (Manga and Wang, 2007)。歪変化に応答して多孔質媒体に変形し、間隙圧が変化し、間隙流体が流れる。線形多孔質媒体の理論に基づき、Wang (1997) や Ge and Stover (2000) は地震時の間隙水圧と水位の変化が震源域の静的な4象限体積歪分布に対応し得ることを明らかにした。Hamiel et al. (2005) は、この理論を非線形多孔質媒体の理論へと精緻化した。このような震源域体積歪の4象限分布に対応した水位変化は、2000年にアイスランドで起きた横ずれ断層性の地震 ($M_{6.5}$) で最も明瞭に示された (Jónsson et al., 2003)。このような観測事例は他にも多数あるが (例えば, Quilty and Roeloffs, 1997; Roeloffs, 1998; Koizumi et al., 1999; Akita and Matsumoto, 2004; Koizumi et al., 2004 など), これで定性的または定量的に説明できない例も少なくない (例えば, King et al., 1995; Kitagawa and Koizumi, 1996; Roeloffs, 1998 など)。震源距離が近くなれば、それだけ地震動の影響も強くなる。台湾での1999年集々地震 ($M_L 7.3$; M_L はローカルマグニチュード) に伴う水位変化も発震機構解だけでは説明できず、地盤振動による表層部のダメージや複数層準の滞水層の効果が複合した結果であると考えられている (Manga and Wang, 2007; Chia et al., 2008a,b)。

震源距離 r が地震断層の長さ程度の所では、強震動と静的歪変化に加えて、断層そのものの性質の変化が地下水変動に関わる。すなわち、硬い岩石の永久変形が新たな間隙 (微小クラック) を形成し、さらにそれらが合体する。変形が剪断帯に局所化し、ついには断層すべりによって間隙率は高いが

低透水率の剪断帯が形成される (Manga and Wang, 2007). Kumpel (1992) はこのようなニアフィールドの水理を理論的に検討し、著しい水位の変化が被圧間隙水の侵入による応力拡散によって起こり得るとした。

地震時の地下水変動に比べ、前兆的な変動を捉えた例はずっと少ない。中国の 1975 年海上地震の前兆に関しては、混乱した政治的背景から信頼性を疑う向きもあったが、最近 Wang et al. (2006) が再度データを吟味し、基本的には信頼に足るものとした。先に述べた Wakita et al. (1988) などの伊豆大島近海地震、Roeloffs and Quilty (1997) などの Kettleman Hills earthquake の観測結果は、IASPEI が “significant precursors” と認めたものである (Wyss, 1997)。複数種の観測結果に基づいた Igarashi et al. (1995), Tsunogai and Wakita (1996), および片尾・安藤 (1996) による兵庫県南部地震の前兆現象も確かなものとみなせよう。これらの他に、水位、温泉水やガスの湧出量、ラドン濃度などの観測によって前兆を検出したとする事例として、Kawabe et al. (1988), Igarashi and Wakita (1990), Igarashi et al. (1992), Koizumi et al. (1999), King et al. (2000), Koch et al. (2003), Koizumi et al. (2004), Plastino et al. (2009) などがある。地震の前兆現象は震源核の形成に関連しているものと思われるが、それに伴う微小な歪変化が地下水変動として顕在化するためには、水理学的な増幅・変調機構が働いているものと思われる。しかし、そのようなメカニズムはまだ十分に実証されていない。

地下水変動の観測記録には、地震、地球潮汐、気圧、降雨などの効果、およびノイズが重なっていて複雑である。地震に関連した変動を抽出するには、それ以外の影響を上手に補正しなければならないが、状態空間モデルなどをコード化した BAYTAP-G (石黒ほか, 1984; Tamura et al., 1991) の開発はデータ解析に進歩をもたらした (例えば、Igarashi and Wakita, 1990; 松本・高橋, 1993; Matsumoto et al., 2003)。

2004 年 6 月 20 日に地下水変動観測を開始して以来、我々は漸次観測網の充実を図りつつ観測を継続してきたが、本論文では 2007 年末までの観測結果を報告する。この期間に長期間の連続記録が得られたのは、仙台市街地と東松島市矢本にある 2 つの観測サイトからの水温と水位のデータである。その後の観測結果については本論に引き続いて本誌に公表する予定である。

2. 観測サイトと観測方法

我々は宮城県沖のアスペリティーから 100 km 余り離れた陸上において、地震に関連した地下水変動を捉えようとしており、以下の手順で観測に適したサイトを抽出した。まず、地殻変動解析支援プログラム MICAP-G (Okada, 1992; 内藤・吉川, 1999) を用い、宮城県沖地震のアスペリティーに想定震源パラメータ (宮城県防災会議地震対策等専門部会, 2004) を与えて地殻歪分布を計算した。牡鹿半島基部から太平洋側は体積歪の収縮領域で、その西北西内陸

側は膨張域となる。第二に、より大きな膨張域内にある活断層を抽出し、それらを起震断層とする地震によって強いダメージを被り続けてきた逆断層直近上盤側を重視した。なぜなら、そのような所に歪が集中しやすく、歪変化に敏感であると思われるからである。第三に、地表現象によるノイズ、特に降雨の影響から免れるため、民間・地方自治体所有の全孔井リストから深度 500 m 以上のものを抽出した。以上の 3 つの条件をより良く満足する孔井を抽出し、所有者から借用許可を得た。

観測に用いた機器は、温度計、水位計、気圧計である。温度計は筆者らの中の山内とシステム技電社が共同開発した水晶温度計 QTGW 型、またはジオファイブ社の白金抵抗体温度計であり、ともに 60 °C または 70 °C 以下で作動し、0.0002 °C の単位で出力される。これらの温度計のセンサーと電子基板を耐圧容器に納め、孔井内に降ろした。水位計は応用地質社製の S & DL 高性能 Model-4640A 型で、精度は 1 mm である。地下水位は気圧によって影響されるため、2007 年末以前は最寄りの気象庁測候所による 1 時間毎の気圧データを用いて補正したが、その後は東京鈴木製作所社製気圧計 R-30 型 (精度 ± 0.5 hPa, 分解能 0.01 hPa) を観測サイト毎に配置した。

本論文で報告する観測期間に長期連続稼働していたのは、仙台市街地の愛宕観測サイトと東松島市矢本の観測サイトのみである。観測開始当初はロガーに溜めた観測データを定期的に観測サイトに赴いて回収していたが、主として筆者らの中の中村が NTT 東日本の ADSL 回線を利用したインターネット通信による自動リアルタイム受信システムを開発し、2007 年末以降のデータは研究室のサーバーに自動収録され、その後増設した観測サイトからのデータを含めて、いつでも任意の期間のデータを閲覧できるようになっている。

3. 矢本 (YM) 観測井の水理学的条件

矢本孔井 (以降、YM と略す) は南北方向の旭山とう曲帯の上盤側に位置する (Fig. 2)。この構造は北方に延び、一関とう曲帯に続くものと思われる (Fig. 1)。とう曲帯東縁の中新統と鮮新統は東に 20 度から 45 度傾斜し、丘陵頂部の標高が約 20 m 変位していることから、旭山とう曲帯は活構造とみなされている (石井ほか, 1982)。地表露頭で逆断層性の小断層が観察されることから、このとう曲帯は地下では西傾斜の逆断層であると考えられる。2003 年にこのとう曲帯直下で $M_j 6.2$ の地震が起こり (宮城県北部連続地震と呼ばれた)、その直後に反射法地震探査が実施された (Kato et al., 2004, 2006)。これによって、地震は旭山とう曲帯によるものではなく、数 km 東を並走する須江断層の活動によるものであることが判明した。そして、須江断層は日本海拡大時の正断層が逆断層として再活動したものと考えられた。

地震探査断面によれば、先中新統基盤岩は深度約 2,500 m に横たわっている。孔井資料によれば、前・中期中新世の礫岩、安山岩質火山角礫岩、砂岩、泥岩、粗粒軽石凝灰岩・凝灰角礫岩、粗粒砂岩、シルト岩、そして再度粗粒砂岩の順に重なっていて、石井ほか (1982) による地表地質と容易に

Fig. 2. Geological cross-section across the Asahiya flexure. The seismic reflection profile and its geological interpretation are after Kato et al. (2004, 2006). The Yamoto bore-hole (YM) is projected onto the seismic profile. Also shown are a simplified geological column and the casing program. The small red square denotes the depth at which the temperature sensor was set.

対比できる。YMの孔底深度は1,010 mであり、上記の粗粒軽石凝灰岩・凝灰角礫岩まで達している (Fig. 2)。最上部の粗粒砂岩 (0~351 m) は分級度良好で透水率が高いが、下部の粗粒砂岩 (733~856 m) と凝灰岩 (856~1,010 m) は中部の不透水性のシルト岩 (351~733 m) によって水理学的に隔てられている。このような地質条件によって、孔底付近の水理は降水などの地表面象の影響を免れている。

YMの孔井は、地表から深度801 mまでケーシングパイプで覆われていて、その直径は0~320 mの区間が200 mm、320~670 mが150 mm、そして670~801 mが100 mmである。801 m以深にはストレーナーが設置されている。温度計は900 m以深には降りて行かなかったため、そこに設置せざるを得なかった。幸い、既存の比抵抗検層のデータによれば、900 m付近にはクラックが発達していて、良好な設置深度であると思われる。水位と水温がどのように連動して変化するかを前もって知っておくため、注水テストを実施した。Fig. 3に18ℓの水を一気に注入した直後の水位と深度900 mでの水温の変化を示してある。注水直後に水位は期待値の57 cmに近い44 cm上昇した後、経過時間とともに指数関数的に低下した。30 cm低下するのに要した時間はわずか10分である。もし水が温度計設置深度以深から漏れ出たのなら、孔井内水柱の温度勾配が0.033℃なので、深度900 mの水温は0.034℃低下すると期待される。ところが、観測された温度変化は通常変動の範囲内 (約0.0008℃) であった。このことは、注いだ水の大部分が深度900 m以浅から漏水したことを示唆する。もし、漏水がケーシングパイプからであれば、水位変動を地震に関係した指標として利用することは難しい。他方、この漏水は気圧による水位変化のバッファとして作用し、深度900 mでの水温がより直接的に地殻歪の変化を反映することになる。

YMの水理に関して記述しておかなければならないもう一つの問題がある。それはYMから約50 m離れた所に孔底深度200 mの孔井があって、野菜加工工場がそこから1日数トンの水を年中無休で汲み上げていることである。地下水変動に及ぼすこの揚水の影響に関しては、再度次章で述べ

Fig. 3. Groundwater level changes during a water-feeding experiment. The water level (thick grey line) rose by 44 cm after feeding 18 L of water, and it fell promptly and exponentially thereafter. The corresponding decrease in water temperature was expected to be 0.069℃, but it was much smaller than this value.

る。

4. 矢本 (YM) 観測サイトでの観測結果概要

我々は、YMでの水温と水位の連続観測を2007年4月7日に開始し、2007年11月28日には気圧計も設置した。2007年末までの観測結果をFig. 4に示す。水温と水位のデータサンプリング間隔はそれぞれ1分と10~30分であるが、図には1時間毎のデータを示してある。1時間毎の気圧と降水量 (mm/h) は、YMから約12 km離れた気象庁石巻測候所からのデータによる。0.02℃より粗いスケールで見るとき、水温は気圧にも降水にも影響されていないように見える。他方、20 cmより細かなスケールで水位変動を見たとき、それは気圧と負の相関があり、とくに数日より短い周期に関して明瞭である。しかし、十分に深い孔井のため、水位に対する降水の影響は認められない。さらに、水温と水位との間にはほとんど相関が無いように見える。

Fig. 4の水位のデータには約1日と半日周期の小振幅変動が含まれている。これは、2007年10月29日20時から2007年12月11日11時までの1時間毎の1024個のデー

Fig. 4. Changes in deep groundwater temperature (red line), water level (light blue line: raw data, deep blue line: data after correcting for the effects of earth tides, barometric pressure, and pumping up from a nearby shallow borehole), barometric pressure (purple line), and precipitation (green line) in the Yamoto borehole (YM) during the period from 7 April to 31 December 2007. Possible precursory and/or coseismic temperature changes were detected for shallow intraplate earthquakes beneath Sendai Bay (12 April, $M_{4.5}$) and in northern Miyagi Prefecture (29 May, M_4), the details of which are described in the text and in other figures. Precursors and coseismic signals were not detected for three other earthquakes that occurred during the survey period.

タに関するパワースペクトル (Fig. 5b) に明瞭に現れていて、1日周期のピークが高く、半日周期のピークは低い。これらのピークを除けば、スペクトル密度は周波数の $-b$ 乗 (この例では $b=1.02$) に比例している。このことは Fig. 4 に示した全期間の水位データに共通していて、2007年8月21日～2007年9月1日の期間 ($b=1.3$) と2007年11月9日～2007年11月20日の期間 ($b=1.56$) を除き、 b 値は1.0から1.2の狭い変動幅に納まる。Fig. 5aに気圧変動のパワースペクトル密度を示したが、ここにも約1日周期の低いピークと約半日周期の高いピークが現れている。これらのピークも Fig. 4 に示した全期間の気圧データに認められる。

Fig. 6に2007年6月13日～2007年6月28日の期間の水位 (次章で述べる方法で気圧の影響を除去済み) と水温の変化を示してある。水位のピークは常に9:00から10:20の間にあり、ボトムは常に19:00から22:00の間にある。これらは1年を通して同じであり、位相が系統的にずれることがない。さらに注目すべきことは、水位のピークとボトムの時刻はそれぞれ水温のボトムとピークの時刻に一致していて、決してその反対ではないという一見奇妙な観測結果である。ここで、前章で述べた野菜加工工場での揚水を思い出そう。常に定時にピークとボトムを迎える水位変動は、明らかに揚水の影響である。揚水用孔井の孔底深度は高透水性の最上部砂岩中であって、その下には厚さ380mもの不透水性のシルト岩が横たわっているため、揚水の影響が深度900mでの水温に即座に影響するとは思えない。むしろ、

高透水性の最上部砂岩に取り囲まれている深度320mでの異なった径のケーシングパイプの継ぎ目から漏水しているのかもしれない (商業ベースの孔井ではしばしば認められることである)。孔井の水理がそのような条件であれば、野菜加工工場での揚水量は日中に大きいため水位は低下し、漏水箇所より下の水柱は上昇するため、深度900mでの水温は上昇する。揚水量の小さい夜間にはその逆の事が起きる。先に述べた注水テストの結果もこのような漏水で説明できる。

以上のことは、YMでの水位の変動には潮汐の効果が含まれているのかもしれないものの、野菜加工工場での揚水の影響が主導的であることを示している。

5. 矢本観測井 (YM) からの水位と水温データの補正

観測水位は、地球潮汐、気圧、揚水などによる影響、および地震などの未知の原因を含んだ変化 (以後、トレンドと記す) の和とみなせよう。我々はこのトレンドを知りたいのだが、そのために以下のような手順で観測水位を補正した。

- 地球潮汐は主に約1日 (K1分潮など)、約半日周期 (M2分潮など) などの変動からなる。前述のように、気圧にもこれらの周期成分が含まれている。そこで、まず逆フーリエ変換によってこれらの周期成分を水位と気圧の観測値から除去する。これによって、野菜加工工場での揚水による1日周期の水位変動も、同時に除去される。
- 約1日と半日周期成分を除去した水位と気圧データをそのまま比較しても、両者の相関は不明瞭なままであ

Fig. 5. Power spectra of barometric pressure, water level, and water temperature for 1024-hourly data from the Yamoto borehole (YM). One Hertz on the x-axis corresponds to a period of 1023 hours. Symbols * and + denote the peaks of diurnal and semidiurnal fluctuations, respectively.

る。なぜなら、両者には互いに独立な周期成分が含まれていて、その中の最長周期成分が相関を著しく乱すからである。そこで、逆フーリエ変換によって両者の長周期側から順次長周期成分を除去しつつ、決定係数 (R^2) が最大になるまでこの操作を繰り返す。

- c) 上記の方法は長周期変動が単純な場合に有効で、 R^2 が十分大きな 954 個のデータセットの相関を Fig. 7 に示した。それらは

$$\text{水位の変動 (mm)} = -7.075 \times \text{気圧の変動 (hPa)}$$

Fig. 6. Changes in water level (grey line) after the correction for barometric pressure, and water temperature (black line) at 900 m depth in the Yamoto borehole (YM). The data are for the period from 13 to 28 June 2007, when diurnal fluctuations in water temperature were most distinctly observed. Note that the diurnal fluctuations in water temperature are negatively correlated with those in water level.

Fig. 7. Correlation between barometric pressure and water level estimated from 954 data sets obtained from the Yamoto borehole (YM) for the period from 23:00, on 30 October 2007 to 16:00 on 9 December 2007. The correlation was performed for the data on water level from which the effects of the earth tide and pumping up by a vegetable processing plant were removed by applying an inverse Fourier transform.

$$+ \text{定数} (R^2 = 0.747)$$

に回帰される。右辺第 2 項の定数は意味が無く、実際に水位を気圧補正する際には、全期間の平均的気圧からのずれに -7.075 を乗じて水位の変動値を求め、基準とした水位にこの値を加える。

Fig. 4 には、上記 a~c の補正を施した後の水位を太い実線で示してある。そこでは短周期の変化が無くなっており、地球潮汐、野菜加工工場での揚水、および気圧の影響が良く除去されていることが分かるであろう。これらの水位に対する影響は、周囲の岩石の透水係数と貯留容量によって、一般的には時間依存性を持つ。しかし、先に述べたケーシングパイプの繋ぎ目からの漏水が気圧の長周期変化に対して有効なバッファーとして作用するため、応答の遅延時間は 1 時間

Fig. 8. Geological cross-section across the Nagamachi-Rifu Fault zone. The seismic reflection profile is after Miyagi Prefecture (2000). The Atago borehole (AT) penetrates the fault zone at a depth of 800–830 m where the temperature sensor was set.

よりは短いようである (Fig. 3 を参照)。

Fig. 6 に示したような 1 日周期での水位と水温の逆位相相関は常に認められるわけではない。水位の 1 日周期の変動は常時現れるが、水温の 1 日周期の変動は約 14 日から 15 日毎に断続的に現れる。このことは水温変化に潮汐の効果が含まれていることを示唆するが、年中無休で終日稼働している野菜加工工場からの揚水量履歴のデータは入手できないため、潮汐成分を抽出・除去することが困難である。

6. 愛宕観測井 (AT) の水理学的条件と観測結果概要

愛宕孔井 (以後, AT) は仙台市の市街地にある。孔井周辺の地質と反射法地震探査断面を Fig. 8 に示す。孔井資料によれば、基盤岩は低変成度の片岩からなり、下部中新統～鮮新統によって覆われる。下部中新統は主に安山岩質凝灰岩類と溶岩よりなる。中部～上部中新統は粗粒～細粒の凝灰質砂岩よりなり、とくに上部中新統には珪長質細粒凝灰岩と軽石質凝灰岩が頻繁に挟まる。鮮新統も細粒凝灰岩と軽石質凝灰岩を挟む細粒砂岩が主体である。基盤岩と下部中新統は北東－南西方向で北西傾斜の逆断層性活断層である長町－利府断層によって切られているが、それより上位の地層は南東に傾くよう曲帯を形成している。この活断層は大年寺山断層という back-thrust を伴っている。長町－利府断層は中新世に正断層として活動したが、現在は平均変位速度 0.5 mm/y の逆断層として再活動している (中田ほか, 1976)。

AT は長町－利府断層直近の上盤側にあつて、孔底深度は 1,200 m である。深度 820 m までは鮮新統～下部中新統で占められ、深度 820 m 付近で長町－利府断層の断層帯を貫き、それ以深は基盤岩を掘り抜いている (盛合・上野, 1997)。孔井内の温度勾配は 400～795 m の深度区間では 0.0315 °C / m、805～1,200 m の区間では 0.101 °C / m だが、795～805 m の区間では 0.260 °C / m と大きい。既存の比抵抗検層データによれば、深度 800 m 付近の高温勾配の区間は、長町－利府断層に伴うクラック密集帯 (深度区間 800～830 m) と対応している。ケーシングパイプの直径は、深度 0～30 m で 300 mm、30～400 m で 200 mm、400～800 m で 150 mm であり、深度 800 m～1200 m にはストレーナーが設置されている。観測開始時の 2004 年 6 月 20 日に水晶温度計を 820 m に設置し、2006 年 9 月 28

日に水位計を、2007 年 12 月 6 日に気圧計も設置した。

Fig. 9 に 2006 年 11 月 1 日から 2007 年 10 月 31 日までの水位、水温、気圧、および降水量の変化を示す。温度計は観測開始の 2004 年 6 月 20 日に 820 m に設置した後、後述するような観測最適深度を求めて移動したが、2006 年 12 月 28 日に深度 830 m に固定した。水位と水温データのサンプリング間隔は 1 分である。1 時間毎の気圧と降水量のデータは AT から 2 km 離れた気象庁仙台測候所によるものを利用した。水温は、深度 800 m では 63.6 °C、830 m では 64.2 °C 付近を中心にほぼ ±0.1 °C の範囲の中で変動している。水位は 200 mm 程度の短周期変動を繰り返しつつも、この 1 年間を通してほぼ一定割合で低下し、低下量は約 1.1 m に達する。気圧は 20 hPa 程度の短周期変動を伴いつつ、季節的に変動している。降雨量は春・夏・秋に多く、冬に少ない。

気圧、水位、および水温のパワースペクトルを Fig. 10 に示す。いずれのパワースペクトル密度も規格化された周波数の $-b$ 乗に比例する。より詳細には、気圧の b 値は季節変動を示し、春 (4 月) には 1.8 と最大で、秋 (10 月) には 1.2 と最小である。スペクトルには 1 年を通して約半日に鋭く高いピークが認められるが、時々約 1 日周期の低いピークも認められる。水位の b 値は 3 月に 1.1 と最小で、12 月と 1 月に最大 (1.4) である。スペクトル密度は 1 年を通して約 1 日と半日に高いピークを示し、これらは主に地球潮汐を、一部は約半日周期の気圧変動を反映している。水温の b 値は 11 月 (1.09) から 3 月末 (1.41) に向かって増加し、4 月に入ると突然減少 (0.95) する。そして、5 月末に小さなピーク (1.18) を示した後、8 月に極小 (0.96) となる。このような季節変動の他に、水温のスペクトルは 8 月に約 1 日周期の小さなピークを示す。

7. 愛宕観測井 (AT) からのデータの補正、漏水、自由対流、観測最適深度

AT での水位変動の生データ (Fig. 9 の細い実線) にも地球潮汐による約 1 日と半日の周期的変動 (振幅約 60～80 mm) が認められる。地球潮汐と気圧の影響は、YM に対して行ったのと同じ方法で補正した。4305 個のデータセットから得られた結果 (Fig. 11) は、

Fig. 9. Temporal changes in groundwater temperature (red line), water level (light blue line: raw data, deep blue line: data after correcting for the effects of the earth tide and barometric pressure), barometric pressure (purple line), and precipitation (green lines) in the Atago borehole (AT) during the period from 1 November 2006 to 31 October 2007. No precursory or coseismic temperature changes were detected for earthquakes that occurred during this period.

$$\text{水位の変動 (mm)} = -6.41 \times \text{気圧の変動 (hPa)} + \text{定数} (R^2=0.929)$$

に回帰できる。データ補正後の1時間毎の水位変化がFig. 9の太い実線である。水位の短周期変動が著しく減少している、効果的に補正されていることが分かるであろう。

観測開始時には、水中ラドン濃度と溶存イオン濃度測定のため、地下水面直下から30分おきに5ℓの割合で揚水していたが、一時的に揚水量を多くした後はイオン濃度が著しく低下し、地下浅部のそれに近づく。このことは、YMと同様、ATでも浅部のケーシングパイプの繋ぎ目から漏水していることを示唆する。この揚水はその後断続的に行っていたが、水位と水温の人為的変動を無くすため、2006年1月13日に最終的に取り止めた。

ATでの水温変動観測の開始は2004年6月20日に遡るが、我々は非常に特徴的な波形を持った原因不明の水温変化に悩まされ続けた。それらは、波形からⅠ型とⅡ型の2つに分類できる (Fig. 12a)。Ⅰ型の周期は数時間から数日に及び、振幅0.05℃から0.3℃まで変化する。周期と振幅は平均水温が漸減するにつれて共に減少する傾向が明瞭である。波形は、Fig. 12bに示したように、3つの特徴的な部分からなる。周期がいかに短くなろうとも、3つの特徴的な部分波形が欠如することはないが、平均水温が低下するにつれて部分波形1の振幅に比べて部分波形2と3の振幅は相対的に増加する (Fig. 12c)。Ⅱ型の特徴的な水温変化は0.8℃に達する突然の水温上昇で特徴付けられる (Fig. 12a)。この変動は2から3週間おきに断続的に発生し、とくに平均水温が漸減しつつ進行するⅠ型の変動が継続した

後に起こる。

観測開始当初、我々は観測計器の欠陥を疑ったが、様々なチェックを行った後、正常に作動していることを確認した。そのことは、以下の2005年4月30日～2005年5月9日に実施した揚水試験でも証明された。一時的に温度センサーを深度770 mに引き上げ、水中ラドン濃度・溶存イオン濃度測定のために行っていた揚水を停止し、温度平衡に達するまで十分に長い期間放置した後、まず32.5ℓを揚水し、8時間の休止の後に65ℓ、さらに12時間休止後に130ℓの水を一気に汲み上げた。その結果、それぞれの揚水時に速やかに水温が上昇し、休止期には指数関数的に低下した (Fig. 13)。それぞれの揚水時の最高到達温度は、ほぼ揚水量に比例している。これらのことは、水温計測システムが確かに正常に作動していることを示す。上記の特徴的な波形を示す水温変化が孔井内の自然対流による可能性が強く、詳細は第9章第1節で議論する。この特徴的な水温波形は広い周波数帯域にまたがった成分を含むので、フィルタリングが難しい。水のゆっくりとした移動を妨げることなく対流を止めるため、我々は直径10 cm、厚さ3 cmの透水性ポリウレタン製スポンジのパッカーを温度センサーの上下5 mと10 mに計4個設置した。その結果、Ⅰ型の水温変動はほぼ抑えられ、Ⅱ型の変動の振幅も半分に減少した。2006年3月7日以降は上記パッカーを常時セットしてある。

地殻の微小な変形に伴う水温変化を高分解能でモニターするためには、地下水が出入りする最適のクラックを探し出し、その深度に正確にセンサーをセットすることがカギである。そこで我々は、パッカーを温度センサーの上下0.5 m

Fig. 10. Power spectra of barometric pressure, groundwater level, and water temperature for 1024-hourly data from the Atago borehole (AT). One Hertz on the x-axis corresponds to a period of 1023 hours. Symbols * and + denote the peaks of diurnal and semidiurnal fluctuations, respectively.

と1 mに計4個セットし、深度810 mから835 mまでを5 mずつ移動させて水温計測の最適深度を探索した。平均的な水温は、当然ながら深度とともに増加し、深度810 mから835 mまでの温度勾配は0.028 °Cである。パッカーをセットしてあるため、いずれの深度での計測にもI型の変動がほとんど見られなくなり、II型の変動の振幅は深度825 m以浅で0.2 °C以下、深度830 mから835 mでは0.45 °Cに抑えられていた。注目すべきことは、周期数時間の変動が深度830 mで大きく(0.08 °C)、その他の深度で

Fig. 11. Dependence of water level on barometric pressure estimated from hourly data from the Atago borehole (AT). The correlation was performed for water-level data from which the effects of the earth tide were removed by an inverse Fourier transform.

は小さい(0.03 °C以下)ことである。この短周期変動は温度計自身のノイズレベルより一桁以上大きく、実際の水温変化を表している。このことは深度830 mでクラックからの地下水の出入りが最も顕著であることを示唆するので、2006年12月28日以後、この深度に温度センサーを固定して観測を継続した。

8. 地震直前と地震時の変動

以下に、2004年6月20日に地下水変動観測を開始して以来2007年12月末までに記録された地震直前と地震時の変動3例を記述する。

1) 2005年12月2日 宮城県沖地震(M_J 6.6)に関わる水温変化

2005年8月16日11時46分、 M_J 7.2の地震が宮城県沖の深さ42 kmで発生したが(Fig. 1), 観測サイトはまだATのみであり、しかも温度計の作動をチェックするために引き揚げていた時であった。2005年12月2日22時13分には最大余震(深さ40 km, M_J 6.6)が発生した。この時点でも設置されていたのはATの温度計のみで(設置深度825 m)、震源からATまでの距離は129 kmである。スポンジのパッカーを一時取り外していたため、孔井内の自然対流によると思われる水温変動は断続的に発生していたが、幸運にも地震発生時には静穏であった。

Fig. 14の上図に地震前後の3.5日間の水温変化を、同下図には地震前後の14.5時間の拡大図を示す(いずれも生データ)。水温は地震の2.7時間前から低下し始め、40分前までに0.003 °C低下し、その後約0.003 °C上昇してピークに達した時に地震が発生した。その後水温は再び低下し、約3時間後に通常のトレンドに近づいた。気圧はこの間にわずか2 hPa低下しただけである。また、12月初め以来、強い降雨はなかった。したがって、上記の水温変動は2005年

Fig. 12. Temporal changes in water temperature in the Atago borehole (AT) during a period of 20 days (a). The characteristic waveforms suggest free convection, and they are categorized into two types. Type-I has a period of several hours to several days, and an amplitude of 0.1–0.3°C. It is composed of three phases (b and c), and the length of the period is determined mainly by the length of the phase-1. Type-II fluctuations emerge abruptly after a decreasing trend in the mean temperature of the type-I fluctuation. They occur at time intervals 10–15 days, and the water temperature rises abruptly by as much as 0.2–0.9°C.

Fig. 13. Temperature changes at 770 m depth within the Atago borehole (AT) during a pump-up test. After pumping up at a rate of 5 L every 30 minutes, the pumping was stopped at time A for 68 hours. Thereafter, 32.5, 65, and 130 L were pumped up at times B, C, and D, respectively. The water temperature rose promptly at each pumping-up, and fell exponentially thereafter. Note that the temperature rise is nearly proportional to the water volume pumped up: rises of 0.06°C, 0.1°C, and 0.225°C for pumping up with 32.5, 65, and 130 L, respectively.

12月2日22時13分の宮城県沖地震に伴うものである可能性がある。

2) 2007年4月12日 仙台湾での直下型地震 ($M_j 4.5$) に関わる水温変動

2003年7月26日に宮城県北部で $M_j 6.2$ の地震が発生した。その震源はYMの直下であったが、この時点ではまだ観測を開始していなかった。第3章で述べたように、この地震は古い正断層（須江断層）が逆断層として再活動したことによるもので、須江断層は活構造である一関－旭山という曲帯に近接・並走している。このような地質構造は仙台湾にも延び、この活構造の直下12 kmで2007年4月12日22時50分に $M_j 4.5$ の地震が発生した（Fig. 1）。

幸いにも、この地震の5日前にYMの深度900 mに水晶温度計を設置したばかりで、水位計も正常に作動していた。YMからの震央距離は26 kmである。Fig. 15に4月11

Fig. 14. Temporal changes in water temperature at a depth of 825 m in the Atago borehole (AT) just before and after the $M_j 6.6$ earthquake off Miyagi Prefecture, which occurred at 22:13 on 2 December 2005 (denoted by the vertical arrow). Because polyurethane packers were not set, free convection in the borehole caused characteristic, intermittent temperature fluctuations (upper figure). Fortunately, the earthquake occurred during a dormant period of convection (lower figure). Also shown are the changes in D_i , a measure of the magnitude of water-temperature change (see the text details).

日0時から4月14日0時までの水温と水位の生データを示す。水温は1～2時間の短周期で小さな変動を伴いつつ低下し続けている。注目すべきことは、この単調に低下するトレンドは4月12日22時頃の約0.002°Cのステップ状の水温上昇開始によって中断し、ステップの頂上直前の22時50分に地震が発生したことである。この水温上昇は、約1日周期で変動している水位とは無関係に起きている。水温上昇量は短周期変動の振幅より顕著には大きくないが、22時50分の地震の前兆的変動であるように見える。なお、この時震央距離23 kmのATの観測サイトも正常に作動していたが、

Fig. 15. Small but abrupt increase in groundwater temperature (thin line: raw data, thick line: running average) at the Yamoto borehole (YM) at 2 hours before a shallow earthquake ($M_j 4.5$) beneath Sendai Bay at 22:50 on 12 April 2007. Also shown are the changes in water level.

有意なシグナルは記録されていない。

3) 2007年5月29日 宮城県北部での浅発地震 ($M_j 4$) の地震に関わる水温変動

2007年5月29日16時3分、宮城県北部で $M_j 4$ の浅発地震 (深さ 13 km) が発生した。これは 2003 年に宮城県北部で発生した $M_j 6.2$ の地震の余震であると思われる。YM から震央までは約 5 km である。2007 年 4 月 8 日～2007 年 7 月 7 日までの長期間と地震前後の 2 日間の水温と水位の変化を Fig. 16 に示す。Fig. 16 の下図に示されているように、水温は地震発生後の 3 分後に低下し始めた。その後、約 70 分間に 0.02°C も低下し、その後の 5 時間 40 分の間に回復した。周囲の温度変化が耐圧容器内の温度センサーまで到達する遅れ時間は約 3 分なので、この水温低下は地震時のものである。もし、 0.02°C の低下が孔井内の水柱の下降によるものなら、温度勾配からそれは約 60 cm と見積もられるが、水温低下時には水位はほとんど変化していない。これは驚くことではなく、第 3 章で述べたように、18 ℓ の注水試験の際に水位は 57 cm 上昇したが、温度センサー設置深度で浅いストレーナー設置部やケーシングの繋ぎ目からの漏水のため、水温低下はわずか 0.0008°C であったからである。

Fig. 16 の上図に明らかなように、地震時の水温低下に先立って 0.8°C にも達する温度低下が認められる。それは地震の 25 日前頃から開始し、地震の 9 日前に極小となり、その後地震まで回復の途中にあった。しかし、この著しい水温低下に対応する水位変化は認められない (Fig. 4)。この地震は YM の直近で発生したので、地震に先立つこのように顕著な水温低下が地震の前兆である可能性はあるものの、確かであるとは断言できない。なお、この地震に対して AT では無感であった。

9. 議 論

1) 孔井内の自然対流

第 7 章で、AT での特徴的な波形を有する水温変化が孔井内での自然対流である可能性を指摘した。自然対流が発生するか否かはプラントル数とグラシヨフ数の積 $r^4 \Delta T \beta C_p \rho^2 g / \eta k$ が指標となる (ランダウ・リフシッツ, 1954)。ここで ρ

Fig. 16 Coseismic drop in water temperature within the Yamoto borehole (YM) associated with a $M_j 4$ earthquake in northern Miyagi Prefecture at 16:03 on 29 May 2007. Also shown are data on groundwater level. Note that the large temperature decrease started at about 20 days before the earthquake.

(密度) $= 983 \text{ kg m}^{-3}$, C_p (等圧比熱) $= 4,190 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$, β (熱膨張係数) $= 0.59 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, k (熱伝導率) $= 0.645 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, η (粘性率) $= 0.467 \times 10^{-3} \text{ Pas}$ (以上、 60°C での純水の値), g (重力加速度) $= 9.8 \text{ ms}^{-2}$, r (ケーシングパイプの半径) $= 0.05 \text{ m}$, ΔT (深度 820 m での水温勾配) $= 0.028^\circ\text{C/m}$ とすると、上記の積の値は約 13,800 となる。垂直なパイプ内の液体が自由対流を起こすのに必要なこの積の臨界値は、パイプを取り囲む物質の熱伝導率が無限小である場合には 67.4、無限大である場合には 215.8 である。したがって、AT の深度 820 m 付近では自然対流が起き得て、それによって第 7 章で記載したような特徴的な水温変化が生じてよい。

このようなケーシングパイプ内での自然対流の報告は Cermak et al. (2008) に見られる。また、我々が使用している白金抵抗体温度計を製作しているジオファイブ社の五江 潤 氏の私信によれば、AT と同様な特徴的な水温変化を

Fig. 17. Temporal fluctuations in groundwater temperature during a period of 2 days from 00:00 on 15 October 2005 at a depth of 825 m in the Atago borehole (AT). ΔT is the residuals from the second-order polynomial approximation to the original temperature data. The grey and thin black lines denote the raw data at 2-minute intervals and the hourly mean value, respectively. The thick black line shows the theoretical volumetric strain due to earth tides and oceanic loading, as calculated by the computer program GOTIC2.

観測したことがあり、当該の孔井の近接した深度に複数の温度計を設置して観測したところ、いずれにも似たような水温変化が現れたという。このような観測事例は稀であるが、孔井内での水温を高精度で計測する場合には注意を要する現象である。

2) 地殻歪に対する水温観測システムの敏感度

ATの温度センサーは、自由対流の休止期には地球潮汐に対応した変動を記録しているようである。ポリウレタン製スポンジのパッカーをセットしていない2005年10月15日から2日間の典型例をFig. 17に示す。多項式近似によって長周期のトレンドを除去してあり、その差分 ΔT を $^{\circ}\text{C}$ 単位で示してある。Fig. 17には、理論潮汐解析プログラムGOTIC2 (Matsumoto et al., 2001; 国立天文台水沢観測所 <http://www.miz.nao.ac.jp> のNAO.99b潮汐予測システムからダウンロード)によって計算した同じ期間の理論潮汐体積歪(海洋潮汐による荷重も考慮した全分潮による効果の総和)も描いてある。水温変化と体積歪(収縮を正として表示)の波形・位相は良く一致していて、収縮時に水温が上昇している。体積歪の両振幅は 3×10^{-8} 、温度変動の両振幅は 0.003°C であることから、水温換算体積歪は約 $1 \times 10^{-8}/^{\circ}\text{C}$ となる。我々の水晶温度計のノイズの両振幅は 0.001°C 程度なので、水温換算体積歪の観測限界は約 1×10^{-8} 程度と概算される。

同様な評価法をYMにも適用することを試みるべく、潮汐成分が含まれていると思われるFig. 6の水温データを地球潮汐解析プログラムBAYTAP-G (石黒ほか, 1984; 産業技術総合研究所地下水観測データベース <http://riodb02.ibase.aist.go.jp/gxwell/GSJ/water/analysis/> のwebsiteで利用できる)で解析した。その結果、日周期のK1分潮の振幅が 0.0011°C であるのに対し、半日周期のM2分潮の振幅は 0.00003°C であった。K1分潮の振幅が大きい理由は、日周期変動を示す近傍の野菜加工工場での揚水による効果を

BAYTAP-Gが潮汐によるものと誤認してしまうためである。他方、揚水の影響を受けないM2分潮の振幅は水温のノイズレベルより小さく、理論潮汐歪との比較による敏感度評価はできない。

3) 水温変化が地震に関連したものであることの信頼性

ATとYMに温度計を設置したのは、それぞれ2004年6月20日と2007年4月7日である。第8章には2004年6月20日から2007年末の期間に、ATとYMのいずれかが捉えた地震に関連したと思われる水温変動を3つ列挙した。これらを抽出する際には2つ手順を踏んだ。まず、スラブ内地震を除き、宮城県で震度3以上を記録し、観測井から約150 km以内に起きた全地震をリストアップした。その中から、地震時に観測機器が正常作動していて、孔井内自然対流による擾乱が少ない時に起きた地震のみを選び出した。抽出された地震の中、宮城県沖で発生した地震は6個で、いずれも $4 < M_j < 5.5$ である。これより大きな地震は2005年12月2日の $M_j 6.6$ の地震のみである。2005年11月15日に起きた宮城県はるか沖地震($M_j 7.2$, 震央距離約320 km)に関連した地下水変動は認められなかった。中深発地震を含めた宮城県南部沖や気仙沼沖の地震は5個抽出されたが、いずれも $M_j 5.1$ 以下のもので、地下水変動は認められなかった。福島県沖地震から抽出された $4.8 < M_j < 5.7$ の2個の地震に関わる地下水変動も認められなかった。

2004年6月20日から2007年末の期間に半径150 km圏内から抽出された浅発地震は、いずれも $M_j 4.5$ 以下である。それらの中、2006年7月6日に仙台市青葉区大倉で発生した $M_j 4.3$ の地震(ATからの震央距離約18 km)、および2007年4月5日に仙台湾で発生した $M_j 4.5$ の地震(ATからの震央距離約30 km)に関わる水温変動は捉えられなかった。続いて2007年4月12日に仙台湾で起こった $M_j 4.5$ の地震に関わる水温変動が前章で述べた事例である。2004年6月20日から2007年末の期間に宮城県北部で起きた浅発地震から抽出されたものは4個で、いずれも $3 < M_j \leq 4$ である。この中の2個は $M_j 3.3$ と 3.1 で、震源がYMに近かったにもかかわらず、地下水変動が認められなかったが、2007年5月29日の $M_j 4$ の地震と同時に開始したYMでの水温変動が前章で述べた事例である。残りの1つはより北に離れて起こった $M_j 3.3$ の地震で、これに関連した地下水変動は認められなかった。震央距離が約150 kmの2007年7月16日中越沖地震($M_j 6.8$)に関わる地下水変動も認められなかった。

既に知られているように、地震に関連した地下水変動が観測されるか否かは、震源距離とマグニチュードに依存しているが(例えば, Roeloffs, 1998; Roeloffs et al., 2003; Matsumoto et al., 2003; Montgomery and Manga, 2003), 上に述べたことはこれに調和する。この傾向を示す図は、観測事例が追加される本論文の続報に掲載する。

地下水変動記録は、地震が起きていなくともそれと似たような変動があるかどうかという逆からのチェックも不可欠である。その最も単純な方法の一つは、時刻 i の観測値を T_i とした時、等時間間隔の全時系列データに関して計算した

Fig. 18. Distribution of volumetric strain calculated by MICAP-G for an earthquake (M_j 6.6) off Miyagi Prefecture on 2 December 2005. The thick solid square represents the source fault plane; the source parameters are listed in Table 1. Solid and broken lines denote dilatation and contraction, respectively, and the contour intervals are in logarithmic scale. AT and YM denote the Atago and Yamoto observation sites, respectively.

$D_i = |T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}|$ の標準偏差 σ を基準として“異常”を抽出することである。以下に、この方法で 2005 年 12 月 2 日の宮城県沖地震前後の AT での水温変化 (Fig. 14) を評価する。この水温変動は孔井内の対流に悩まされていた期間に記録されたものである。この水温変化の時期を含み、温度センサーの機種と設置深度が同じであって、かつ対流が静穏であった時の 2 分間隔水温データを 1622 時間分切り出した。Fig. 14 に示した水温変化の時間幅を考慮し、これに 30 分毎に前後 20 分間の平均を施した 3244 個の D_i に関する平均値 μ は 0.00040°C 、 σ は 0.00033°C であった。 $\mu + 2\sigma$ より大きい D_i は 145 個 (4.47%) も存在する。Fig. 14 に示したように、 D_i は 2005 年 12 月 2 日 22 時 13 分の宮城県沖地震 (M_j 6.6) を挟んで急上昇し、 0.001648°C に達したが、これより大きな D_i 値の存在確率は 0.68 % (22 個) であった。Fig. 14 の水温変動は“W”の形をした特徴的な波形で、これと似た波形の変動は 0.68% の D_i 値中から 6 個 (0.18%) 抽出された。しかし、それ相当の地震が伴われたのは Fig. 14 の場合だけであった。以上のことから、Fig. 14 の水温変動は“異常”と言えるが、地震に関連した

変動である確実性は高くはない。

なお、目視ではあるが、2007 年 4 月 12 日の仙台湾での地震と 2007 年 5 月 29 日の宮城県北部地震とに伴う水温変動 (それぞれ Fig. 15 と Fig. 16) についてもチェックを行った。前者のような水温変動パターン (2 時間で 0.002°C のステップ状の上昇) に関しては唯一とはとても言い難いが、後者 (1 時間で 0.02°C ものスパイク状低下) は他に皆無であった。今後は、BAYTAP-G (石黒ほか 1984; Tamura et al., 1991) を適用してより高精度のデータ補正を行うとともに、自動的パターンマッチングのような手法を採用しなければならない。

4) 宮城県沖地震に対する本観測システムの検知能力

2005 年 12 月 2 日の宮城県沖地震 (M_j 6.6) に関して、気象庁による震源パラメータを用い (Table 1), MICAP-G (Okada, 1992; 内藤・吉川, 1999) で計算した体積歪分布を Fig. 18 に示す。AT と YM の地表付近では、それぞれ 1.8×10^{-8} および 2.2×10^{-8} の膨張となる (Table 1)。AT での水温換算体積歪は約 $1 \times 10^{-8}/\text{m}^\circ\text{C}$ であったから、2005 年 12 月 2 日の宮城県沖地震直前の 0.003°C の温度低下は 3×10^{-8} の体積歪に相当することになる。すなわち、もしこの温度変動が 2005 年 12 月 2 日の地震と確かに関連したものであるなら、この地震をやや上回る規模の先駆的すべりが伴われていたことになる。2005 年 8 月 16 日の宮城県沖地震 (M_j 7.2) についても MICAP-G を用いて上と同様な計算を行った。使用した震源パラメータは気象庁によるもので、Table 1 に示してある。体積歪は AT で 1.8×10^{-7} 、YM で 2.8×10^{-7} であり、 M_j 6.6 の 2005 年 12 月 2 日の宮城県沖地震より 1 桁も大きい。近い将来の宮城県沖地震は M_j 7.4 前後と考えられていて、もし M_j 6.5 かそれ以上の地震に相当する規模の先駆的すべりが伴われた場合には、前兆を水温変動として捉えることができる可能性がある。しかし、前節で検討したように、2005 年 12 月 2 日の水温変動が同日の宮城県沖地震に関連したものである確実性は低いので、観測を継続して経験を積み重ねる必要がある。

地殻歪の計算は 2007 年 4 月 12 日の仙台湾での地震と 2007 年 5 月 29 日の宮城県北部での地震についても行ったが、AT での体積歪は検出限界より 1 桁以上小さい (Table 1)。2007 年 5 月 29 日の宮城県北部地震に伴う YM での 0.02°C にも達する明瞭な地震時水温低下は、地震動によって地層がダメージを受けたためだと思われる。

Table 1. Earthquake source parameters and volumetric strain Δ calculated by MICAP-G.

	Origin Time	Hypocenter Lat. / Long.	Depth (km)	M_j	Fault plane strike/dip/rake	Δ (μstrain)	
						AT	YM
Off-Miyagi PRF	2005/8/16 11:46	38°08.9'N/142°16.6'E	42	7.2	204°/18°/88°	+0.18	+0.28
Off-Miyagi PRF	2005/12/2 22:13	38°04.3'N/142°21.2'E	40	6.6	203°/18°/87°	+0.018	+0.022
Sendai Bay	2007/4/12 22:50	38°11.9'N/141°08.8'E	12	4.5	228°/29°/134°	$+6 \times 10^{-4}$	-0.0026
N. Miyagi PRF	2007/5/29 16:03	38°24.7'N/141°06.9'E	13	4.0	97°/26°/82°	-8×10^{-5}	$+2 \times 10^{-3}$

10. 結 論

我々は危惧されている宮城県沖大地震に備え、地下水変動観測網と自動リアルタイムデータ受信システムを構築し、2004年6月20日以来、主に水温と水位を観測してきた。2007年末までの研究成果は以下の通りである。

- ①深度1,000 mに達する深層孔井での水温観測は降水等の地表変動から免れ、観測に適している。ただし、商業ベースで掘削された孔井では、ケーシングパイプの繋ぎ目から漏水していることがあり、地震に関わる地下水変動観測に利用する際には注意を要する。
- ②観測サイトの地質構造および孔井の水理的条件の吟味も不可欠である。孔井内水柱に自然対流が発生していることがあり、注意を要する。
- ③以上を吟味した上で、気圧、地球潮汐などの効果を補正した地下水変動観測データは、地震に関する変動を捉える上で有効である。水晶温度計を用いた我々の観測システムの分解能は0.001℃程度であり、愛宕観測サイトでの水温換算体積歪は $1 \times 10^{-8}/\text{m}^3$ 程度である。
- ④愛宕観測サイトでの水温変動は、2005年12月2日の宮城県沖地震($M_j 6.6$)の前兆の変動を記録していた可能性がある。矢本観測サイトの水温変動は、2007年4月12日に仙台湾で起こった浅発地震($M_j 4.5$)の前兆変動を記録していた可能性があり、2007年5月29日に起こった宮城県北部での浅発地震($M_j 4$)の地震時の変動を確実に記録していた。
- ⑤将来宮城県沖で起こる大地震が $M_j 6.5$ 程度以上の地震に相当する先駆的すべりを伴うなら、愛宕観測サイトでの水温変動観測はその前兆を捉え得る可能性がある。

11. 謝 辞

本地下水観測計画を実行するに際し、民間と地方自治体所有の孔井と温泉施設を無償で使わせて頂いた。快くご協力下さった宮城県岩沼市の株式会社上野組様、東松島市の遠藤友規様とご家族、登米市の有限会社シーアールティー様、仙台市の株式会社双葉綜合開発様、栗原市の金成温泉延年閣様、女川町と温泉施設ゆぼっぼの皆様、大崎市鳴子町のホテル弁天閣様、同川渡の沼倉旅館様、岩手県一関市ホテル瑞泉閣様、同水沢市の朝倉二三男様の皆様に深くお礼申し上げます。宮城県内の温泉ボーリング実施状況に関する情報は、宮城県庁業務課から提供して頂いた。

本論文は小泉尚嗣氏ともう一人の査読者によって懇切丁寧に査読して頂いた。とくに地下水変動システムの地殻歪に対する敏感度評価および地震に関連した変動であることの確実性のチェックに関しては、大変尤もなご批判と適切なアドバイスを頂戴した。編集長および査読者のお二人に深く感謝する。

なお、本研究は日本学術振興会科学研究費補助金基盤(A)、2006–2008、「深層地下水変動から宮城県沖地震を予知する基礎研究」、課題番号18204046の支援を受けて実施した。

12. 文 献

- Aki, K. and Richards, P. G., 1980, *Quantitative Seismology: Theory and Methods*. 2 vols., W. H. Freeman, San Francisco.
- Akita, F. and Matsumoto, N., 2004, Hydrological responses induced by the Tokachi-oki earthquake in 2003 at hot spring well in Hokkaido, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L16603, doi: 10.1029/2004GL020433.
- Brodsky, E. E., Roeloffs, E., Woodcock, D., Gall, I. and Manga, M., 2003, A mechanism for sustained groundwater pressure changes induced by distant earthquakes. *Jour. Geophys. Res.*, **108**, no. B8, 2390, doi: 10.1029/2002JB002321.
- Cermak, V., Safanda, J. and Bodri, L., 2008, Precise temperature monitoring in boreholes: evidence for oscillatory convection? Part1: Experiments and field data. *Int. Jour. Earth Sci. (Geol. Rundsch.)*, **97**, 365–373.
- Chia, Y., Chiu, J. J., Chiang, Y. H., Lee, T. P., Wu, Y. M. and Horng, M. J., 2008a, Implications of coseismic groundwater level changes observed at multiple-well monitoring stations. *Geophys. Jour. Int.*, **172**, 293–301, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03628.
- Chia, Y., Chiu, J. J., Chiang, Y. H., Lee, T. P. and Liu, C. W., 2008b, Spatial and temporal changes of groundwater level induced by thrust faulting. *Pure Appl. Geophys.*, **165**, 5–16, doi: 10.1007/s00024-007-0293-5.
- Elkhoury, J. E., Brodsky, E. E. and Agnew, D. C., 2006, Seismic waves increase permeability. *Nature*, **441**, 1135–1138.
- Ge, S. and Stover, S. C., 2000, Hydrodynamic response to strike- and dip-slip faulting in a half-space. *Jour. Geophys. Res.*, **105**, 25513–25524.
- Hamiel, Y., Lyakhovsky, V. and Agnon, A., 2005, Rock dilation, nonlinear deformation, and pore pressure change under shear. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **237**, 577–589.
- Hartmann, J. and Levy, J. K., 2005, Hydrogeological and gas-geochemical earthquake precursors—A review for application. *Natural Hazards*, **34**, 279–304.
- Igarashi, G., Saeki, S., Takahata, N., Sumikawa, K., Tasaka, S., Sasaki, Y., Takahashi, M. and Sano, Y., 1995, Ground-water radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan. *Science*, **269**, 60–61.
- Igarashi, G. and Wakita, H., 1990, Groundwater radon anomalies associated with earthquakes. *Tectonophysics*, **180**, 237–254.
- Igarashi, G., Wakita, H. and Sato, T., 1992, Precursory and coseismic anomalies in well water levels observed for the February 2, 1992 Tokyo bay earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 1583–1586.
- 石黒真木夫・佐藤忠弘・田村良明・大江昌嗣(Ishiguro, M., Sato, T., Tamura, Y. and Ooe, M.), 1984, 潮汐データ解析—プログラムBAYTAPの紹介—. 統計数理研究所集報(*Proceedings of the Institute of Statistical Mathematics*), **32**, 71–85.
- 石井武政・柳沢幸夫・山口昇一・寒川 旭・松野久也(Ishii, T., Yanagisawa, Y., Yamaguchi, S., Sangawa, A. and Matsuno, H.), 1982, 松島地域の地質. 地域地質調査報告 5 万分の 1 図幅, (*Geology of Matsushima district*, Quadrangle Series, Scale 1: 50,000), 地質調査所(Geol. Surv. Japan, AIST.), 121p.
- Itaba, S., Koizumi, N., Matsumoto, N., Takahashi, M., Sato, T., Ohtani, R., Kitagawa, Y., Kuwahara, Y., Sato, T. and Ozawa, K., 2008a, Groundwater level changes related to the ground shaking of the Noto Hanto Earthquake in 2007. *Earth Planets Space*, **60**, 1153–1159.
- Itaba, S., Koizumi, N., Toyoshima, T., Kaneko, M., Sekiya, K. and Ozawa, K., 2008b, Groundwater changes associated with the 2004 Niigata-Chuetsu and 2007 Chuetsu-oki earthquakes. *Earth Planets Space*, **60**, 1161–1168.
- 地震調査研究推進本部(The Headquarters for Earthquake Research Promotion), 2001, 宮城県沖地震の長期評価. <http://>

- jishin.go.jp/main/index.html.
- Jónsson, S., Segall, P., Pedersen, R. and Björnsson, G., 2003, Post-earthquake ground movements correlated to pore-pressure transients. *Nature*, **424**, 179–183.
- 片尾 浩・安藤雅孝(Katao, H. and Ando, M.), 1996, 兵庫県南部地震前後の地殻活動. 科学(Kagaku), **66**, 78–85.
- Kato, N., Sato, H., Imaizumi, T., Ikeda, Y., Okada, S., Kogohara, K., Kawanaka, T. and Kasahara, K., 2004, Seismic reflection profiling across the source fault of the 2003 Northern Miyagi earthquake (M 6.4), NE Japan: basin inversion of Miocene back-arc rift. *Earth Planets Space*, **56**, 1255–1261.
- Kato, N., Sato, H. and Umino, N., 2006, Fault reactivation and active tectonics on the fore-arc side of the back-arc rift system, NE Japan. *Jour. Struct. Geol.*, **28**, 2011–2022.
- Kawabe, I., Ohno, I. and Nadano, S., 1988, Groundwater flow records indicating earthquake occurrence and induced earth's free oscillations. *Geophys. Res. Lett.*, **15**, 1235–1238.
- King, C. Y., 1986, Gas geochemistry applied to earthquake prediction: An overview. *Jour. Geophys. Res.*, **91**, 12269–12281.
- King, C. Y., Azuma, S., Ohno, M., Asai, Y., He, P., Kitagawa, Y., Igarashi, G. and Wakita, H., 2000, In search of earthquake precursors in the water-level data of 16 closely clustered wells at Tono, Japan. *Geophys. Jour. Int.*, **143**, 469–477.
- King, C. Y., Koizumi, N. and Kitagawa, Y., 1995, Hydrogeochemical anomalies and the 1995 Kobe earthquake. *Science*, **269**, 38–39.
- King, C. Y., Zhang, W. and Zhang, Z., 2006, Earthquake-induced groundwater and gas changes. *Pure Appl. Geophys.*, **163**, 633–6456, doi: 10.1007/s00024-006-0047-7
- Kissin, I. G. and Grinevsky, A. O., 1990, Main features of hydrogeodynamic earthquake precursors. *Tectonophysics*, **178**, 277–286.
- Kitagawa, Y. and Koizumi, N., 1996, Comparison of postseismic groundwater temperature changes with earthquake-induced volumetric strain release: Yudani hot spring. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 3147–3150.
- Kitagawa, Y., Koizumi, N., Takahashi, M., Matsumoto, N. and Sato, T., 2006, Changes in groundwater levels or pressures associated with the 2004 earthquake off the west coast of northern Sumatra. *Earth Planets Space*, **58**, 173–179.
- Kitagawa, Y., Fujimori, K. and Koizumi, N., 2007, Temporal change in permeability of the Nojima fault zone by repeated water injection experiments. *Tectonophysics*, **443**, 183–192.
- Koch, U., Heinicke, J. and Vobberg, M., 2003, Hydrological effects of the latest Vogtland-NW Bohemian swarmquake period (August to December 2000). *Jour. Geodynamics*, **35**, 107–123.
- 小泉尚嗣(Koizumi, N.), 1997, 地球化学的地震予知研究について (Review of geochemical research for earthquake prediction). 自然災害科学 (*Jour. JSNDS*), **16**, 41–60.
- Koizumi, N., Kitagawa, Y., Matsumoto, N., Takahashi, M., Sato, T., Kamigaichi, O. and Nakamura, K., 2004, Preseismic 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: 10.1029/2004JL019557.
- Koizumi, N., Tsukuda, E., Kamigaichi, O., Matsumoto, N., Takahashi, M. and Sato, T., 1999, Preseismic changes in groundwater level and volumetric strain associated with earthquake swarms off the east coast of the Izu Peninsula, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 3509–3512.
- Kümpel, H. J., 1992, About the potential of wells to reflect stress variations within inhomogeneous crust. *Tectonophysics*, **211**, 317–336.
- ランダウ・リフシッツ(Landau, L. D. and Lifshitz, E. M.), 竹内均訳(Translated by Takeuchi, H.), 2003, 流体力学 1, 東京図書, 280p.
- Linde, A. T., Sacks, I. S., Johnston, M. J. S., Hillt, D. P. and Bilham, R. G., 1994, Increased pressure from rising bubbles as a mechanism for remotely triggered seismicity. *Nature*, **371**, 408–410.
- Manga, M. and Wang, C. Y., 2007, Earthquake Hydrology. In Schubert, G., ed., *Treatise of Geophysics*, **4**, *Earthquake Seismology, Section 10*, Elsevier, 293–320.
- Matsumoto, K., Sato, T., Takanezawa, T. and Ooe, M., 2001, GOTIC2: A program for computation of oceanic tidal loading effect. *Jour. Geod. Soc. Japan*, **47**, 243–248.
- 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. *Geophys. Jour. Int.*, **155**, 885–898.
- Matsumoto, N. and Roeloffs, E. A., 2003, Hydrological response to earthquakes in the Haibara well, central Japan—II. Possible mechanism inferred from time-varying hydraulic properties. *Geophys. Jour. Int.*, **155**, 899–913.
- 松本則夫・高橋 誠(Matsumoto, N. and Takahashi, M.), 1993, 地震にともなう地下水位変化検出のための時系列解析. 地震(2) (*Jour. Seismol. Soc. Japan, 2nd series*), **45**, 407–415.
- Miura, S., Inuma, T., Yui, S., Uchida, N., Sato, T., Tachibana, K. and Hasegawa, A., 2006, Co- and post-seismic slip associated with the 2005 Miyagi-oki earthquake (M 7.2) as inferred from GPS data. *Earth Planets Space*, **58**, 1567–1572.
- 宮城県(Miyagi Prefectural Government), 2000, 地震災害調査研究交付金 長町—利府断層帯に関する調査報告書(概要版) (*Subsidy for Earthquake Disaster Researches: Research Report for the Nagamachi-Rifu Fault Zone(digest version)*). 40p.
- 宮城県防災会議地震対策等専門部会(Special Division for Anti-earthquake Measures in Disaster Prevention Council of Miyagi Prefecture), 2004, 宮城県地震被害想定調査に関する報告書(*Research Report on the Damages by Anticipated Earthquakes in Miyagi Prefecture*). 211p.
- Montgomery, D. R. and Manga, M., 2003, Streamflow and water well responses to earthquakes. *Science*, **300**, 2047–2049.
- 盛合禎夫・上野春雄(Moriai, Y. and Ueno, H.), 1997, 仙台市における先デボン紀層と温泉の新発見及び地すべりとの関連について. 地すべり (*Landslide*), **34**, 9–16.
- 内藤宏人・吉川澄夫(Naito, H. and Yoshikawa, S.), 1999, 地殻変動解析支援プログラム MICAP-G の開発. 地震 2 (*Jour. Seismol. Soc. Japan, 2nd series*), **52**, 101–103.
- 中田 高・大槻憲四郎・今泉俊文(Nakata, T., Otsuki, K. and Imaizumi, T.), 1976, 仙台平野西縁・長町—利府線に沿う新期地殻変動. 東北地理 (*Annals Tohoku Geogr. Assoc.*), **28**, 111–120.
- Okada, Y., 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, **82**, 1018–1040.
- Okada, T., Yaginuma, T., Umino, N., Kono, T., Matsuzawa, T., Kita, S. and Hasegawa, A., 2005, The 2005 M 7.2 MIYAGI-OKI earthquake, NE Japan: Possible rerupturing of one of asperities that caused the previous M 7.4 earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, doi: 10.1029/2005GL024613.
- Plastino, W., Povinec, P. P., De Lica, G., Doglioni, C., Nisi, S., Ioannucci, L., Balata, M., Laubenstein, M., Bella, F. and Coccia, E., 2009, Uranium groundwater anomalies and L'Aquila earthquake, 6th April 2009 (Italy). *Jour. Environ. Radioact.*, **101**, 45–50, doi: 10.1016/j.jenvrad.2009.08.009.
- Quilty, E. G. and Roeloffs, E. A., 1997, Water-level changes in response to the 20 December 1994 earthquake near Parkfield, California. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, **87**, 310–317.
- 活断層研究会 編(Research Group for Active Faults edit.), 1980, 日本の活断層—分布図と資料—(*Active Faults in Japan: Sheet Map and Inventories*). 東大出版会(Univ. Tokyo. Press), 363p.

- Roeloffs, E. A., 1988, Hydrologic precursors to earthquakes: A review. *Pure Appl. Geophys.*, **126**, 177–209.
- Roeloffs, E. A., 1998, Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes. *Jour. Geophys. Res.*, **103**, 869–889.
- Roeloffs, E. and Quilty, E., 1997, Case 21 Water level and strain changes preceding and following the August 4, 1985 Kettleman Hills, California, earthquake. *Pure Appl. Geophys.*, **149**, 21–60.
- Roeloffs, E., Sneed, M., Galloway, D. L., Sorey, M. L., Farrar, C. D., Howle, J. F. and Hughes, J., 2003, Water-level changes induced by local and distant earthquakes at Long Valley caldera, California. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **127**, 269–303.
- Rojstaczer, S. and Wolf, S., 1992, Permeability changes associated with large earthquakes: An example from Loma Prieta, California. *Geology*, **20**, 211–214.
- Sato, T., Sakai, R., Furuya, K. and Kodama, T., 2000, Coseismic spring flow changes associated with the 1995 Kobe earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 1219–1222.
- Sil, S. and Freymueller, J. T., 2006, Wellwater level changes in Fairbanks, Alaska, due to the great Sumatra-Andaman earthquake. *Earth Planets Space*, **58**, 181–184.
- Tamura, Y., Sato, T., Ooe, M. and Ishiguro, M., 1991, A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion. *Geophys. Jour. Int.*, **104**, 507–516.
- Thomas, D., 1988, Geochemical precursors to seismic activity. *Pure Appl. Geophys.*, **126**, 241–266.
- Tsunogai, U. and Wakita, H., 1996, Anomalous changes in groundwater chemistry—Possible precursors of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, Japan. *Jour. Phys. Earth*, **44**, 381–390.
- Wakita, H., Nakamura, Y. and Sano, Y., 1988, Short-term and intermediate-term geochemical precursors. *Pure Appl. Geophys.*, **126**, 267–278.
- Wang, C. Y., Dreger, D. S., Wang, C. H., Mayeri, D. and Berryman, 2003, Field relations among coseismic ground motion, water level change and liquefaction for the 1999 Chi-Chi ($M_w=7.5$) earthquake, Taiwan. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, No.17, 1890, doi: 10.1029/2003GL017601.
- Wang, H. F., 1997, Effects of deviatoric stress on undrained pore pressure response to fault slip. *Jour. Geophys. Res.*, **102**, 17943–17950.
- Wang, K., Chen, Q. F., Sun, S. and Wang, A., 2006, Predicting the 1975 Haicheng earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, **96**, 757–795, doi: 10.1785/0120050191.
- Wyss, M., 1997, Second round of evaluations of proposed earthquake precursors. *Pure Appl. Geophys.*, **149**, 3–16.
- Yaginuma, T., Okada, T., Yagi, Y., Matsuzawa, T., Umino, N. and Hasegawa, A., 2006, Coseismic slip distribution of the 2005 off Miyagi earthquake ($M7.2$) estimated by inversion of teleseismic and regional seismograms. *Earth Planets Space*, **58**, 1549–1554.
- Yamanaka, Y. and Kikuchi, M., 2004, Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data. *Jour. Geophys. Res.*, **109**, 2003JB002683.

(要 旨)

南須原美恵・鹿島雄介・中村隆志・山内常生・大槻憲四郎, 2011, 宮城県沖大地震の前兆を捉えるための深層地下水変動研究: 2004年6月～2007年12月の観測結果. 地質雑, **117**, 63–78. (Nasuhara, Y., Kashima, Y., Nakamura, T., Yamauchi, T. and Otsuki, K., 2011, Studies on deep groundwater changes for detecting the precursors of anticipated large earthquakes off Miyagi Prefecture, Japan: Observation results from June 2004 to December 2007. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **117**, 63–78.)

宮城県沖大地震に関連した前兆的地下水変動を検出するため、逆断層性活断層の上盤側にある深層孔井を選び、自動リアルタイムデータ受信システムを備えた観測網を構築した。孔井2本の水理学的条件、気圧、地球潮汐、降水の影響、水温観測の解像度を検討した後、観測期間2004年4月6日から2007年末までに起こった地震の中から地震に関連した可能性のある3つの水温変動を同定した。それらは2005年12月2日の宮城県沖地震($M_j6.6$)の本震の2.7時間前から始まる0.003℃の低下、2007年4月12日に仙台湾で起こった浅発地震($M_j4.5$)の2時間前から始まった0.0012℃の上昇、および2007年5月29日に宮城県北部で起こった浅発地震(M_j4)と同時の0.02℃に達する低下である。もし、将来の宮城県沖大地震が $M_j6.5$ 以上の地震に相当する先駆すべりを伴うなら、我々の観測システムはそれを前兆的温度変化として捉え得る可能性がある。