2008年岩手・宮城内陸地震(M_L7.2)に伴う温泉の変動

Changes in hot spring activity associated with the 2008 Iwate-Miyagi inland earthquake (M_L7.2), north-east Japan

大槻憲四郎*

Kenshiro Otsuki*

2009年7月22日受付.

2009年11月12日受理.

* 東北大学理学研究科地学専攻
Department of Geology, Graduate School of
Science, Tohoku University, 6-3, aza-Aoba,
Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8578, Japan

Corresponding author; K. Otsuki,
otsuki@dges.tohoku.ac.jp

Abstract

On 14 June 2008, the Iwate-Miyagi inland earthquake (M_L7.2) occurred along a NNE-SSW-trending reverse fault at the boundary between Iwate and Miyagi Prefectures, resulting in heavy damage and loss of human life. After the earthquake, the present author undertook a hearing investigation of pre- and coseismic changes in hot spring activity in and around the epicentral region. Coseismic changes in the discharge rate and color of hot spring water were more commonly observed in the hanging wall of the fault than in the footwall. A preseismic increase in water temperature (of up to 5 °C) was recorded at the Maturube, Shinyu, and Yuhama spas, located near the epicentral region. Increases in discharge rate were recorded at the Kawatabi spa and part of the Narugo spa, which are located at the southern end of the aftershock area. These preseismic changes were clearly observed, yet a tilt meter and GPS unit set very close to the epicenter did not detect any precursor events. These observations provide important information regarding preseismic deformation of the earth's crust and strategies for earthquake prediction.

Keywords: Iwate-Miyagi inland earthquake, hot spring, preseismic, coseismic, water temperature, discharge rate

はじめに

2008年6月14日午前8時43分、岩手県内陸南部を震源とする「岩手・宮城内陸地震」M_L7.2 (M_w6.9) が発生した。最大震度は6強で、岩手県一関市西部、宮城県栗原市西部の花山を中心に、死者・行方不明者23名、負傷者447名、全壊家屋22棟、半壊家屋46棟など大きな被害をもたらした。山間地の多数地点で急崖が崩壊し、形成された堰き止め湖の決壊に伴う二次災害も依然として懸念されている。さらに、栗原市西部二迫川上流の耕営地区では、約1000 m × 700 m の巨大地滑りが発生した。

気象庁の発表によれば、本震の震源は一関市西部祭時温泉^{まつるべ}北東方約2 km 付近(北緯39度1.7分, 東経140度52.8分)で、深さ約8 km であった。震源断層は、走向が北北東-南南西で西傾斜の逆断層型である。祭時温泉付近に設置されていたKiK-net観測点IWTH25は153 cm(東へ45 cm, 北へ44 cm, 上へ140 cm)の永久変位を記録した(防災科学技術研究所のwebsite)。地震計、傾斜計・歪計、GPSなどの観測、レーダー干渉画像解析、地表地形地質調査、反射法地震探査、重力異常データ解析などにより、余震分布、本震のメカニズム解、強震動、震源過程、断層モデル、地殻変動、地下構造、地表地震断層、斜面崩壊、地滑りなど多面的な調査観測結果が報告されている。観測、調査、解析の結果は学会

等で発表され、その一部は論文として公表されつつあるが(Ohta et al., 2008; Takada et al., 2008 など)、地震の概要は以下のウェブサイトを参照しつつ、順次公表される論文を参照されたい。

地震調査研究推進本部: http://www.jishin.go.jp/main/oshirase/20080614_iwate_miyagi.htm

気象庁: http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/2008_06_14_iwate-miyagi/index.html

国土地理院: http://www.gsi.go.jp/johosystem/johosystem_40087.html

防災科学技術研究所: <http://www.hinet.bousai.go.jp/topics/iwate-miyagi.080614/>

産業科学技術総合研究所: http://www.gsj.jp/jishin/iwatemiyagi_080614/index.html

東北大学理学研究科附属地震・噴火予知研究センター: http://www.aob.geophys.tohoku.ac.jp/info/topics/20080614_news/index.html

東京大学地震研究所: <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/topics/Iwate2008/>

名古屋大学環境科学研究科附属地震・噴火予知研究センター: http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/INFO/iwate_miyagi080614/

京都大学防災研究所: <http://www.dpri.kyoto->

Fig. 1. The types and distribution of the changes in hot spring activities associates with the 2008 Iwate-Miyagi inland earthquake; the results of hearing investigation.

u.ac.jp/web_j/saigai/saigai_report.html

震源域周辺は、一関市西部、栗原市花山、大崎市川渡・鳴子・鬼首、秋田県湯沢市秋の宮・子安・大湯、栗駒山山頂部の須川など、一大温泉地帯である。一関市祭時温泉や大崎市鳴子温泉などにおいては、岩手・宮城内陸地震に先立って湯温や湯量に変化があったことが地震発生直後にマスコミ等で報じられた。このような前兆的な温泉変動は珍しいことではなく、脇田（1978）に事例集が掲載されている。このような現象は今後の地震予知のための基礎資料として貴重であるため、岩手・宮城内陸地震に関しても系統的な温泉聞き取り調査を実施した。本報告はそれらを取りまとめたものである。

なお、聞き取り調査では地震の前および地震時・地震後の

湯温、湯量または水位、湯の色と沈殿物、およびその他の変化に分けて質問した。湯温に関しては、毎日定時に測定している温泉は稀である上、使用しているのは通常の水銀またはアルコール温度計である。機器を使って湯量を測定している温泉は無く、大抵は目視に依っている。ポンプアップしている温泉では、当然ながら水位の変化は直接的には分からない。さらに、温泉管理の緻密さには温泉毎に大きなばらつきがあるようである。以上のことに留意して聞き取り結果を理解して頂きたい。

各地の温泉変動

聞き取り調査の結果を Fig. 1 と Table 1 に示した。東北大学理学研究科附属地震噴火予知研究センターの website に従

って、Fig. 1 には余震の分布範囲を点線で、地下の断層面の水平投影を太い実線で示してある。岩手・宮城内陸地震に伴う温泉変動の特徴は以下の通りである。以下に、余震域の外と内の地域に分けて記述する。なお、聞き取り調査対象の温泉郷や温泉名の後のカッコ内に地点番号を付した。Fig. 1 と Table 1 の地点番号を参照し、位置を確認されたい。

1. 余震域外での状況

①地震断層の上盤側で、余震域の西に位置する秋田県湯沢市秋の宮温泉郷 (22-25)、泥湯温泉 (21)、子安温泉郷 (18-20)、大湯温泉郷 (16-17) では、本震直後に多くの源泉に濁り、湯量の増加、湯量の減少や停止が認められた。秋の宮温泉郷では、変化が認められなかった源泉もあった。余震域南西端付近の宮城県大崎市鬼首温泉郷 (26-29) では変動は認められなかったか、地震直後の温度の上昇と濁りのみであった。なお、J-Power 所有の鬼首地熱発電所 (30) は、地震の1ヶ月ほど前から定期点検の期間に入っており、地震に関わる変動は不明である。

②地震断層の下盤側 (東側) に位置する厳美温泉郷 (2-3)、文字温泉 (4) では、全く変動が認められなかった。奥州市胆沢区若柳堰袋にあるスパオアゴ (1) で、地震直後に濁りが認められた。

以上のように、余震域外の地域では、変化が無かったか、有っても地震直後の変動のみである。地震直後の変動は、震源断層の上盤地域の方が下盤地域よりも多かったようである。

2. 余震域内での状況

①鳴子・東鳴子・川渡の温泉地域 余震域南端付近の鳴子温泉郷 (31-32) の源泉のほとんどには変動が無かったようだが、温泉街東端にある車湯弁天閣 (32) では以下のような変動が認められた。通常の揚湯量は 70 ℓ/分だが、地震前日の 6 月 13 日に 1.5 倍に増加し、地震直後には約 2 倍に増加した。6 月 16 日からは徐々に減り続け、正常に戻った。この源泉と貯湯槽はホテルの玄関先にあつて、所有者が日常的に観察しているので、上記の変動は間違いなくあった。なお、揚湯方式はエアーリフトによっていることから、湯量の増加は水位の上昇を示唆する。車湯弁天閣のすぐ東隣にある東鳴子温泉の源泉 (33) でも地震直後のオーバーフローが顕著で、付近が水浸しになるほどであったという。東鳴子温泉郷の黒湯 (34) では、地震直後に一時的に自噴が止まった。同馬場温泉 (35) では、地震直後に温度が 2℃ほど上昇し、かつ湯量も 2 割ほど増加したという。

東鳴子温泉郷の東に隣接する川渡温泉郷 (36-39) でも地震に先立つ変動と地震直後の変動があった。地震に先立つ湯量の増加は沼倉温泉 (36) と高東温泉 (37) で認められた。沼倉温泉の通常の水位は地下 1 m 程度で、エアーリフトで揚湯している。湯量が増加し始めたのは 3 月頃に遡るというが、正確な期日は分からない。しかし、地震の直前には貯湯槽をオーバーフローした。地震後には揚湯パイプの繋ぎ目から湯が自噴し、8 月中旬頃までに次第に減少した (Fig. 2)。高東温泉での湯量の増加は 6 月 8 日頃から始まったようである。閉めていたバルブを開けると天井まで噴出したという。

地震後に湯が黒く濁ったという現象は、川渡温泉の中、少なくとも高東温泉 (37)、藤島旅館 (38)、および越後旅館 (39) で共通し、越後旅館では地震直後に湯量が 2 割ほど増加し、10 日ほどで元に戻った。

②山武温泉さくらの湯・温湯・湯の倉・湯浜温泉地域 荒砥沢ダムのすぐ下流にある山武温泉さくらの湯 (12) の孔底深度は 850 m で、地震断層上盤に位置するが、地震直後に赤い濁りが濃くなっただけである。水位がほとんど 0 m の温湯温泉 (13) でも地震直後の湯の華が赤味を帯びるようになっただけだという。湯の倉温泉 (14) は土砂ダムに埋まってしまう、経営者から電話による聞き取りを行っただけであるが、地震の前の何時からかは定かでないが、客から温度が低いとか逆に高いというクレームが多くなっていたという。通行止めが続いているため、湯浜温泉三浦旅館 (15) の状況に関しても電話での聞き取りのみであるが、興味深い変動があったようである。高温と低温の 2 本の源泉からの湯を併せて使用していて、通常約 40℃に調整していた。冬期は閉鎖し、2008 年は 4 月 29 日から営業開始したが、それ以来高めの温度 (約 48℃) で入浴できず、2 本の源泉からの湯量を調整し直した。また、通常の湯の華は黄色味を帯びた白色だが、地震の前に茶色に変化したという。地震の後、自噴が止まったままである。

③栗駒山山頂付近の温泉 この温泉は硫酸イオンの濃度が高く、火山性の温泉である。栗駒山山頂付近の須川温泉 (9) では、地震前の変動は認められず、地震直後に白濁し、自噴の位置も変わった。近隣の栗駒山荘 (8) は湯を須川温泉から分けてもらっていて、1 日に 1 回温度を測定していたが、地震前には温度の変化が認められなかった。栗駒山東側中腹にあるハイルザーム栗駒 (10) といこいの村栗駒 (11) には、通行止めが続いていたために赴けなかった。電話での聞き取りによれば、地震前の変動は無かったという。

④矢櫃温泉・祭時温泉・真湯温泉 いずれも孔底深度 1000 m 前後の温泉である。矢櫃温泉 (5) では地震前後の変動は認められなかったというが、源泉とホテル瑞泉閣との距離が 1 km ほど離れているので、確かなことは分からない。祭時温泉かみくら (6) の変動は大変興味深い。平時の温度は約 42℃であったが、5 月上旬に温度が高くなっていることに気付いて計ったところ 44℃になっていた。その後、5 月下旬に 46℃、そして地震の 1 週間前には 47℃になっていた。本震の後、2008 年の 12 月末に営業再開したときには、平常の 42℃に戻っていた。湯の華にも変化があり、通常白色であったものが、やや茶色になった。地震の 1ヶ月前には黒い沈殿物が浴槽の底に沈殿するようになったが、地震の直前までには少なくなったという。真湯温泉 (7) でも地震に先立って温度が上昇したらしく、平時に 58℃であったものが 2007 年 12 月か 2008 年 1 月頃から 1℃ほど上昇していたという。

以上のように、余震域内の大部分の温泉では、地震直後に変動が認められた。注目すべきことは、祭時温泉 (6) と真湯温泉 (7)、および湯浜温泉 (15) で地震に先立って水温が上昇していたこと、また、鳴子温泉郷東端の車湯弁天閣 (32)

Table 1. The results of hearing investigation for the changes in activity of the hot springs in and around the epicentral regions of the 2008 Iwate-Miyagi inland earthquake.

Loc. No & Name of spa	Address	Depth m	Discharge rate ↓		Preseismic ↓		Postseismic ↓		Changes in hot spring activity associated with the earthquake
			Temp. ℃	ℓ/min	Chem. Comp.				
1: スパオアゴ	奥州市胆沢区 若柳堰袋		27-32			×	○		地震直後に濁ったが、その後もとに戻った。水位の変化なし。通常水温は夏場で約 32 度、冬場で 27 度。温度は常時測定。
2: 湊泉閣	一関市蔵美町	1100	45.8	197	Na-Cl	×	×	×	変化なし。
3: かんぼの宿一関	同上					×	×	×	変化なし。
4: 文字温泉	栗原市栗原町	自噴	18.4	0.5	As-SO ₄	×	×	×	変化なし。
5: 矢櫃温泉瑞泉閣	一関市蔵美町	784	63.8	140	Na・Ca- -Cl・SO ₄	×	×	×	特に変化なし。源泉とホテルとの距離は約 1km。
6: 祭時温泉 かみくら	同上	1300	65.4	668	Na・Ca -SO ₄	○	?	?	通常 42℃→5月上旬に 44℃→5月下旬に 46℃→地震の 1 週間前に 47℃。通常白色の湯の華が、この間にやや茶色になった。地震の 1 月前頃に黒い沈殿物が目立つようになったが、地震の前までには少なくなった。12 月末の営業再開時には、42℃にもどっていた。
7: 真湯温泉	同上	1500	61	67.1	Na・Ca -SO ₄	○	?	?	地震前は 58℃。2007 年 12 月から 2008 年 1 月から 1℃ほど上昇していた。
8: 須川温泉 栗駒山荘	雄勝郡 東成瀬村					×	○		湯温は毎日測定。地震前は 48℃。地震前の変化は無かったよう。7 月 5 日に湯を再開通し、やや高めで 49℃。2, 3 日後に元に戻った。湯の華は多くなったよう。源泉は須川高原温泉で、地震後に湯送パイプ一部交換のために温度が上がったのかもしれない。
9: 須川高原温泉	一関市蔵美町	自噴	70	5000	S-AL・Ca・ Fe-SO ₄	×	○		地震前の変化なし。地震直後に白く濁った。自噴の場所が変わった。
10: ハイルザーム 栗駒	栗原市栗駒	1300	74.2	127	Na-SO ₄ ・Cl	×	?	?	7 月 20 日の 2, 3 日前から 1℃低下。 地震前には変化が無かったよう。
11: いこいの村 栗駒	同上					×	?	?	地震前には変化が無かったよう。
12: 山武温泉 さくらの湯	同上	850	37-38			×	○		通常 37-38℃ (揚水を大きくする朝には 46℃)。地震の前に変化無し。地震直後に赤い濁りが濃くなったが、2-3 日後に正常になった。
13: 温湯温泉	栗原市花山	自噴	69.3	38.7	Na-Cl	×	○		地震後に湯の華が赤みを帯びるようになった。
14: 湯の倉温泉	同上	自噴	66	58.3	Na-Cl	○	?	?	地震の前に、客から温度が低いとか熱すぎるといった苦情が頻繁に寄せられた。この温度変動が地震の 1 ヶ月前から 1 週間前からは定かでない。土砂ダムに埋まってしまっている。地震後のことは不明。
15: 湯浜温泉 三浦旅館	同上	自噴	94.4	14.5	Na-Cl	○	○		源泉は 2 本あって、通常両方合わせて使用しているときの温度は 40℃程度。2008 年は 4 月 29 日から営業開始。温度は測定していないが、営業開始以来ずっと高めの温度で、48℃程度で、熱くて入浴できず。低温の源泉をひとつだけ使用しても 40℃前後であった。通常、湯の華は黄色味を帯びた白色だが、地震の前には茶色に変化した。地震の後、自噴が止まったまま (6 月 20 日に貯湯タンクが空であることを確認)。6 月 27 日に温度の低い方の源泉に裏山の沢水を注水したら、生暖かい水が出てきた。5 月 25 日に前震 2 回あり。
16: 阿部旅館	皆瀬村大湯	自噴	98.5	1442	As-Na-Cl	×	○		地震直後から 2 つの源泉のうちの 1 つが止まったまま。

17:よしかわ	皆瀬村大湯	自噴				?	○	地震の前に湯量が少なくなり、湯の華が多くなった感じ。しかし、2008 年は雨が少ないせいかもしれない。地震時に源泉 2 つのうちの 1 つが止まったが、その後回復。
18:鶴峯館	皆瀬村子安					×	○	地震の前には変化なし。地震直後に濁った。
19:多郎兵衛	同上	自噴	98.5	1442	As-Na-Cl	×	○	地震直後に濁った。
20:『大噴湯』	同上	自噴				×	○	地震後に湯量が増加した。
21:泥湯温泉	湯沢市高松	自噴	80	170	S-SO ₄	×	○	地震時に濁ったが、特に変化なし。5 月 29 日に前震があった。
22:稲住温泉	雄勝町秋ノ宮					×	×	特に変化なし。
23:秋ノ宮 山荘の湯	同上					×	○	地震時に濁ったが、その他の変化なし。 秋ノ宮の他の温泉全体も特に変化無し。
24:湯ノ又温泉	同上	自噴	54.5	30	Na-HCO ₃	×	○	地震直後の 1 日だけ透明な湯が白く濁った。
25:宝寿温泉	同上					×	×	変化なし
26:宮沢温泉 大新館	大崎市鳴子温 泉鬼首	自噴	87	14	Na-Cl	×	○	地震前には変化なし。地震直後に濁ったが 10 日ほどで正常にもどる。地震後に温度が上昇したという旅館もある。
27:宮沢温泉元湯	同上	自噴			Na-Cl	×	×	変化なし。
28:鬼首ロジ	同上					×	○	地震直後には濁ったが、とくに変化なし。
29:轟温泉	同上	自噴	78.6		Na-Cl	×	×	変化なし。
30:鬼首地熱発電所	同上							地震の 1 ヶ月ほど前から定期点検中であつたため、不明。
31:ホテル扇屋	大崎市 鳴子温泉郷	自噴	95			×	×	変化なし。
32:車湯弁天閣	同上	116	80			○	○	毎分 700 だった湯量が、地震前日の 13 日には約 1.5 倍、地震直後には約 2 倍に増加、16 日からは徐々に減り続けて正常に戻った。地震直後にはものすごいオーバーフロー。すぐ東隣の東鳴子温泉の源泉での地震直後のオーバーフローも、付近が水浸しになるほどのすごさであった。
33:ホテル ニューあちお	大崎市 東鳴子温泉郷					×	×	ほとんど変化なし。
34:黒湯	同上	自噴				×	○	地震前の変化には気がつかなかったが、地震時に一時自噴が止まった。
35:馬場温泉	同上	自噴	47			×	○	地震前に変化なし。地震後に温度 2℃上昇、湯量も 2 割増加。粘土分も増加。
36:沼倉温泉	大崎市 川渡温泉郷					○	○	地震の前に湯量増加 (3 月?頃まで遡る?)。貯湯槽オーバーフロー。地震後、現在まで自噴。温度と色は変化せず。
37:高東温泉	同上		66	325	Na-HCO ₃ ・SO ₄	○	○	6 月 8 日頃から湯量増加。閉めていたバルブを開けると天井まで噴出した。温度と湯の華に変化なし。6 月 27 日の余震後、湯の華が黒くなった。
38:藤島旅館	同上		49			×	○	通常緑色の湯が地震直後に黒く変化。しばらくして元にもどった。温度・湯量に変化なし。
39:越後旅館	同上					×	○	地震直後に真っ黒いお湯が出て、湯量が 2 割ほど増加。10 日ほどで元にもどった。

** Numbers in the first column correspond to the locality numbers in Fig.1.

** Most of the data in the 3rd to 6th columns are after Geological Survey of Japan, AIST (2005).

** ○ and × in the 7th and 8th columns denote with or without of pre- and postseismic changes in hot spring activity, respectively.

Fig. 2. Photographs showing the postseismic change in discharge rate of water at the Numakura hot spring in Kawatabi spa, Osaka City. (a): the photograph taken on July 1, 2008. Hot water was spouting out from the joint of pipes at the well site. (b): the photograph taken on August 8, 2008. Spouting hot water decreased already.

と川渡温泉郷 (36, 37) で地震に先立って湯量が増加したことである。

議論と結論

1. 地震直後の温泉変動の原因

地震に関連した地下水の水位、水温、ラドンなどのガスの濃度、各種イオン濃度の変化に関しては多数の論文があり、レビューされている (Roeloffs, 1988; Thomas, 1988; Wakita et al., 1988; Kissin and Grinevsky, 1990; Montgomery and Manga, 2003; Hartmann and Levy, 2005; King et al., 2006; Manga and Wang, 2007 など)。日本での最近の地下水変動は、例えば 1995 年兵庫県南部地震に関して詳しく調べられた (Igarashi et al., 1995; King et al., 1995; Tsunogai and Wakita, 1995; Sato et al., 2000 など)。

地震断層の長さの数倍の範囲での地下水位の変動は、発震機構解の 4 象限の分布と対応する事例があり、静的歪変化が原因であると見なせるが、必ずしもこれと調和しない事例も少なくなく、地震動による水理学的物性の変化も寄与しているようである。地震時の地下水変動は、震源と観測点との距離が 1,000–10,000 km も離れていてさえも認められることが、スマトラ大地震の際の中国、日本、北米 (Manga and Wang, 2007; Kitagawa et al., 2006; Sil and Freymueller,

2006) の観測点で確認されている。地下水位の変化開始が表面波の到達と同じ時刻であることから、地下水の通路である開口割れ目に溜まった沈殿物が地震動によって除去されるためであると考え、遠地地震に対する観測井の挙動を矛盾なく説明できるという (Brodsky et al., 2003; Brodsky and Prejean, 2005)。本論文で報告した温泉の変動は、震源断層の長さの 2 倍以内の範囲にあるもので、少なくとも地震動と静的歪変化の双方が関係しているものと思われる。いずれの温泉でも水位を実測しているわけではないので、確かなことは言えないが、自噴泉が枯れた湯浜温泉 (15)、大湯温泉阿部旅館 (16)、湯量が減少した大湯温泉よしかわ (17) はいずれも震源断層の上盤側にあって、静的歪変化が膨張の領域に含まれ、水位の低下が起きてよい。地震直後の湯の濁りは、地震動による温泉水の通路の変化や沈殿物の剥離・運搬によるものと考えられる。

2. 栗駒火山との関係

栗駒火山は震央から 15 km しか離れていず、震源断層下端の直上付近にある。化学組成から、栗駒火山と密接に関連する温泉は須川温泉 (8, 9) と栗駒山東側中腹のハイルザーム栗駒・いこいの村栗駒 (10, 11) である。しかし、これらの温泉には地震直後の温泉変動は認められるものの、地震に先立つ変動はなかったようである。さらに、地震後に栗駒山の火山活動に変化があるという報告はないし、余震は栗駒火山の直下では少ない傾向にある。したがって、岩手・宮城内陸地震の発生が栗駒火山の活動と直接的な関係は無いものと思われる。

3. 地震前の温泉変動は前兆現象か

最も興味深いのは、地震の 3 カ月 (?) 前から前日にかけて湯量が増加した鳴子温泉郷車湯弁天閣 (32)、川渡温泉郷の沼倉温泉 (36)・高東温泉 (37) の事例、および地震の半年あるいは 1 ヶ月ほど前から温度が上昇した湯浜温泉 (15)、真湯温泉 (7)、および祭時温泉 (6) の事例である。前者の温泉は余震域南端付近、後者は震源断層の上盤直上に位置する。

水位、湯量、湯温などは降水量によって変化する可能性があるが、Fig. 3 に川渡と祭時温泉での降水量を気象庁のデータから転載する。鳴子温泉郷車湯弁天閣の孔底深度は 116 m、川渡温泉郷の源泉のほとんどは 10 m 以下なので、降水の影響を受けやすい。川渡では 5 月 20 日に約 60 mm/day、4 月 18 日と 6 月 5 日に約 40 mm/day のやや多めの雨が降った。しかし、車湯弁天閣での湯量が増加し出したのは 6 月 13 日であり、上の 3 回のやや多めの降水に対応した湯量の増加は認められない。川渡温泉郷の孔井はごく浅いので、降雨の効果は即座に湯量に反映されるはずだが、沼倉温泉の湯量の増加は 3 月頃までに遡るようである。高東温泉の湯量はやや降水量の多かった 5 月 20 日から 6 月 7 日の直後から開始している。しかし、この程度の降雨によって湯量が顕著に増加することはないという。したがって、車湯弁天閣と川渡温泉郷での湯量の増加は、降水によるものではない。

栗原市の湯浜温泉と湯の倉温泉は自噴泉であり、これらも降水の影響を受けやすいと思われるが、湯浜温泉の温度上昇

Fig. 3. Daily precipitation from January to June, 2008 at Kawatabi, Osaki City (solid line) and Maturube, Ichinoseki City (broken line). The precipitation on May 20 is 65.5 mm/day at Kawatabi and 125.5 mm/day at Maturube. The data are from Meteorological Agency, Japan.

は4月末から始まっており、降水の影響ではない。一関市祭時付近での降雨量の推移は川渡とよく似ている。しかし、祭時温泉かみくらの孔底深度は1300 m、真湯温泉のそれは1500 mであり、短期的な降水の影響が即座に水温などに反映されるとは思えない。以上のことは、地震に先立つ湯量の増加と湯温の上昇が、降水量とは無関係であることを強く示唆する。

4. 温泉の前兆的変動と震源核形成

震源断層とその近傍では、断層帯そのものや硬質岩中のマイクロクラックの形成と結合によって水理学的物性が変化し、地下水変動の原因となり得る (Manga and Wang, 2007)。鳴子温泉弁天閣と川渡温泉郷での湯量の増加、および祭時温泉、真湯温泉、湯浜温泉の湯温上昇は岩手・宮城内陸地震に先立って起こっていたのだから、それらの原因となった水理学的物性の変化は、震源核の形成に関係した現象であると考えられる。

ここで2つの興味深い問題が生じる。第一の問題は、鳴子温泉郷と川渡温泉郷は余震域の南端付近にあるものの震源断層域の外にあって、本震に先立って何らかの地殻変形が起こったにもかかわらず、本震の破壊に至らなかったのである。すなわち、放棄された震源核ということになり、ひとつの地震に関して複数の震源核が存在し、その中のひとつが本震をトリガーするという描像が描けるのかもしれない。

本震に先立って湯温が上昇した祭時温泉、真湯温泉および湯浜温泉は震源断層の上にあるので、この水温上昇は震源核形成と関係した現象である可能性が高い。祭時温泉付近の傾斜計とGPS各1台をはじめ、震源から約30 km以内には6つの傾斜計 (防災科学研究所) と18のGPS (国土地理院、東北大学地震噴火予知研究センターなど) が設置されていた (Fig. 1)。第二の問題とは、それにもかかわらず、いずれも前兆的地殻変動は捉えられていなかったということである (現在では、傾斜計の観測データは防災科研のwebsiteから除かれている)。

祭時温泉かみくらでは、本震の一カ月余り前から徐々に

5℃も湯温の上昇が進行していたというのに、地下では何が進行していたのであろうか。GPSは数mm程度の精度である。傾斜計の精度は、設置条件、ノイズ、ドリフトの程度によって異なるものの、 10^{-9} から 10^{-8} rad. (歪に換算しても同等) 程度の分解能を持つであろう。したがって、震源核形成に関わる歪や変位がこれらの観測では検知できない程小さく、かつ5℃もの水温を上昇させるメカニズムを考えなければならない。地殻変動解析支援プログラム MICAP-G (Okada, 1992; 内藤・吉川, 1999) を用いて予想的に検討すれば、例えば1 km × 1 km のクラックが地下1 kmに存在し、開口変位が1 mmである場合 (GPSでは検出できない)、 10^{-8} strain 以上の領域は、主歪が最大になるクラックに直交する方向で約4 km以内である。したがって、傾斜計でさえも地殻変動が検出できず、水温 (流量) だけが変化し得る状況とは、深さ1 kmにある100 m × 100 m オーダーの垂直なクラックが1 mm程度開口変位し、より高温の地下水の通路形成に都合の良い他のクラックとの連結が確保されるような場合であろう。すなわち、震源核周囲での極めて微小な歪変化が先ずはクラックのような弱い部分に集中することが想定されるのではなかろうか。

本報告は、岩手・宮城内陸地震に伴う温泉変動の記録を後世に残し、今後の地震予知法や容易には観測できない地下深部の微妙な水理学的な物性変化の研究の一助となれば、幸いである。

謝 辞 被災し、苦境に立たされた状況であったにもかかわらず、聞き取り調査に快く応じて下さった全ての方々、被災者の方々との連絡法に便宜を図って下さった栗原市役所、および地熱発電所と近隣の温泉湯温のデータを提供して下さいましたJ-Powerと大崎市役所の関係者に感謝します。なお、本研究には、科学研究費補助金基盤研究 (A) 課題番号70004497の一部を使用した。

文 献

- Brodsky, E. E. and Prejean, S. G., 2005, New constraints on mechanisms of remotely triggered seismicity at Long Valley Caldera. *Jour. Geophys. Res.*, **110**, B04302, doi: 10.1029/2004JB003211.
- 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**, 2390, doi: 10.1029/2002JB002321.
- Geological Survey of Japan, AIST, 2005, *Distribution Map and Catalogue of Hot and Mineral Springs in Japan, 2nded.*, CD-ROM Version, Digital Geoscience Map GT2.
- Hartmann, J. and Levy, J. K., 2005, Hydrological and gasgeochemical earthquake precursors-A review for application. *Natl. 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.
- 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. *PAGEOPH*, **163**, 633-645, doi: 10.1007/s00024-006-0049-7.
- Kissin, I. G. and Grinevsky, A. O., 1990, Main features of hydrogeodynamic earthquake precursors. *Tectonophysics*, **178**, 277-286.
- 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.
- Manga, M. and Wang, C.-Y., 2007, Earthquake hydrology. In Schubert, G. Editor in Chief, *Treatise of Geophysics, Vol. 4, Earthquake Seismology*, Section 10, Elsevier, 293-320.
- Montgomery, D. R. and Manga, M., 2003, Streamflow and water well responses to earthquakes. *Science*, **300**, 2047-2049.
- 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 (*Jishin, Jour. Seismol. Soc. Japan*), **2** (52), 101-103.
- Ohta, Y., Ohzono, M., Miura, S., Imura, T., Tachibana, K., Takatsuka, K., Miyao, K., Sato, T. and Umino, N., 2008, Coseismic fault model of the Iwate-Miyagi Nairiku earthquake deduced by a dense GPS network. *Earth Planets Space*, **60**, 1197-1201.
- Okada, Y., 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, **82**, 1018-1040.
- Roeloffs, E., 1988, Hydrologic precursors to earthquakes: A review. *PAGEOPH*, **126**, 177-209.
- 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.
- Takada, Y., Kobayashi, T., Furuya, M. and Murakami, M., 2008, Coseismic displacement due to the 2009 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake detected by ALOS/PALSAR: preliminary results. *Earth Planets Space*, **61**, e9-e12.
- Thomas, D., 1988, Geochemical precursors to seismic activity. *PAGEOPH*, **126**, 241-266.
- Tsunogai, U. and Wakita, H., 1995, Precursory chemical changes in ground water: Kobe earthquake, Japan. *Science*, **269**, 61-63.
- 脇田 宏 (Wakita, H.), 1978, 地下水の水位・化学組成の変化 [Changes in water level and chemical composition of groundwater]. 浅田 敏編著 (In Asada, B., ed.), 地震予知の方法 [Methods of Earthquake Prediction], 東海大学出版会 (Tokai Univ. Press), 146-166. *
- Wakita, H., Nakamura, Y. and Sano, Y., 1988, Short-term and intermediate-term geochemical precursors. *PAGEOPH*, **126**, 268-278.

* English translation from the original written in Japanese

(要 旨)

大槻憲四郎, 2010, 2008 年岩手・宮城内陸地震 (M7.2) に伴う温泉の変動. 地質雑, **116**, 151-158. (Otsuki, K., 2010, Changes in hot spring activity associated with the 2008 Iwate-Miyagi inland earthquake (M7.2), northeast Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **116**, 151-158.)

2008 年 6 月 14 日, 岩手・宮城内陸地震 (M7.2) が起こった. これは岩手県と宮城県の境界地域での北北東-南南西方向の逆断層運動によるもので, 甚大な被害をもたらした. 地震の後, 震源地域やその周辺にある温泉について, 地震前後の変化を聞き取り調査した. 地震直後の湯量や色の変化は, 震源断層下盤より上盤地域の方が顕著であった. 注目すべき事は, 震源の真上やその近傍にある祭時温泉, 真湯温泉, および湯浜温泉においては, 地震に先立って ~5℃ の湯温上昇があったこと, 同様に余震域南端に位置する川渡温泉と鳴子温泉の一部では, 湯量が顕著に増加したことである. 地震に先立つこれらの変化は明瞭であったにもかかわらず, 震源直上近傍に設置されていた傾斜計と GPS でさえ, 地震の前兆を検出できなかった. この事実は, 本震に先立つ地殻の変形と地震直前予知の戦略に対し, 重要な示唆を与えよう.