

2004年新潟県中越地震による地下水異常

佐藤早苗¹・氏原英敏¹・豊島剛志²・小林健太²・渡部直喜³・大川直樹¹・
和田幸永²・小河原孝彦¹・播磨雄太¹

1：新潟大学理学部，2：新潟大学大学院自然科学研究科，3：新潟大学積雪地域災害研究センター

1. はじめに

2004年新潟県中越地震（以下、中越地震）の本震・余震域周辺は、豪雪地帯として知られており、多数の消雪井戸を有しています。元新潟大学積雪地域災害研究センター教授の故大木靖衛先生を中心とするグループ（大木ほか，1998）は、今回の地震が発生する以前（1993年から1998年）に、新潟県内の越後平野、六日町盆地等の広い範囲で、消雪井戸地下水の水温・電気伝導度・水質を測定し、複数の高温異常帯の存在を明らかにしていました。彼らは、地震を起こしうる活断層に沿って深部の高温地下水が上昇してくるために、これらの地下水温異常が生まれたとしています。我々は、彼らによって示された中越地震前の地下水温・水質分布や高温異常帯が中越地震に伴ってどのように変化したかを明らかにするため、消雪井戸等の地下水の調査を開始しました。これによって、地下水が地震による地下の断層等の動きを反映しているか、反映しているとする地震時の断層等の動きはどうだったか、新たに伏在活断層を推定できるかなどを見ることが出来ます。

中越地震の本震・余震域周辺地域におけるこれまでの調査の結果、かつての複数の高温異常帯において、中越地震に伴う著しい温度上昇が認められました。また、これまで活断層が報告されていない地域においても、複数の地下水温の高温異常帯が発見されました。小論では、中越地震に伴う地下水異常の概要を述べたいと思います。

2. 中越地震の本震・余震域周辺の 活断層と地質構造

中越地震の本震・余震域周辺には、多数の活断層が存在し、それらに平行な地下構造（褶曲，断層，活褶曲）が発達しています（図1）。丘陵や平野，盆地といった地形も、この方向に延びています。活断層としては、六日町盆地西縁断層，小平尾断層，吉野屋断層，悠久山断層，山本山断層，鳥越

断層，片貝断層などが認められています。活褶曲としては、小栗田原向斜，越路原背斜があります。規模の大きな断層としては、新発田-小出構造線，鋸山断層，板倉山断層などが示されています。規模の大きい褶曲は多数存在しており、梶屋敷向斜，田河川背斜，小屋柄川向斜，小松倉背斜，下島向斜，田麦山背斜，梶金向斜，金毘羅山向斜，小高向斜，東山背斜，小千谷向斜，時水背斜，渋海川向斜，八石背斜などと呼ばれています。これらの地下構造は、いずれも「新潟トレンド」と呼ばれる北北東-南南西方向に延び、互いに並走し合っています。これらの地下構造が地下水の分布や温度，水質などに影響を与えていると考えられます。

3. 中越地震前の地下水温異常

大木ほか（1998）や Xu et al.（1998）の研究成果によると、新潟県内の地下水温の高温異常帯は、既知の活断層や歴史被害地震と重なって分布する傾向にあります（図2）。彼らは、この傾向を利用して、逆に高温地下水の分布から未知の伏在活断層を推定しています。図2に示される中越から下越地域にかけての高温異常帯は、長岡市から角田山東方にかけて延びるだけでなく、長岡市から旧新津市を通過して新発田市に達しています。また、小千谷市中央部や、南魚沼市六日町，南魚沼市浦佐，魚沼市旧小出町，魚沼市堀之内には、北北東-南南西方向に連なる高温異常帯が見られます。さらに、上越地域には、上越市柿崎から妙高市新井，上越市南部にかけて広い高温帯が広がっています。

このような地下水温の高温異常帯は、阪神・淡路大震災のあった神戸市周辺でも知られています。石井武政ほか（1995、1996）は、地球化学的手法により高温地下水を検討し、高温地下水が地下深部由来であると結論づけ、その分布から神戸市周辺の潜在断層を推定しました。

新潟県内でも、六日町盆地西縁（Cheibany and Watanabe, 2005）や新潟県北部地震震源域（Xu et al., 1998）に沿って、塩素イオン濃度の高い地

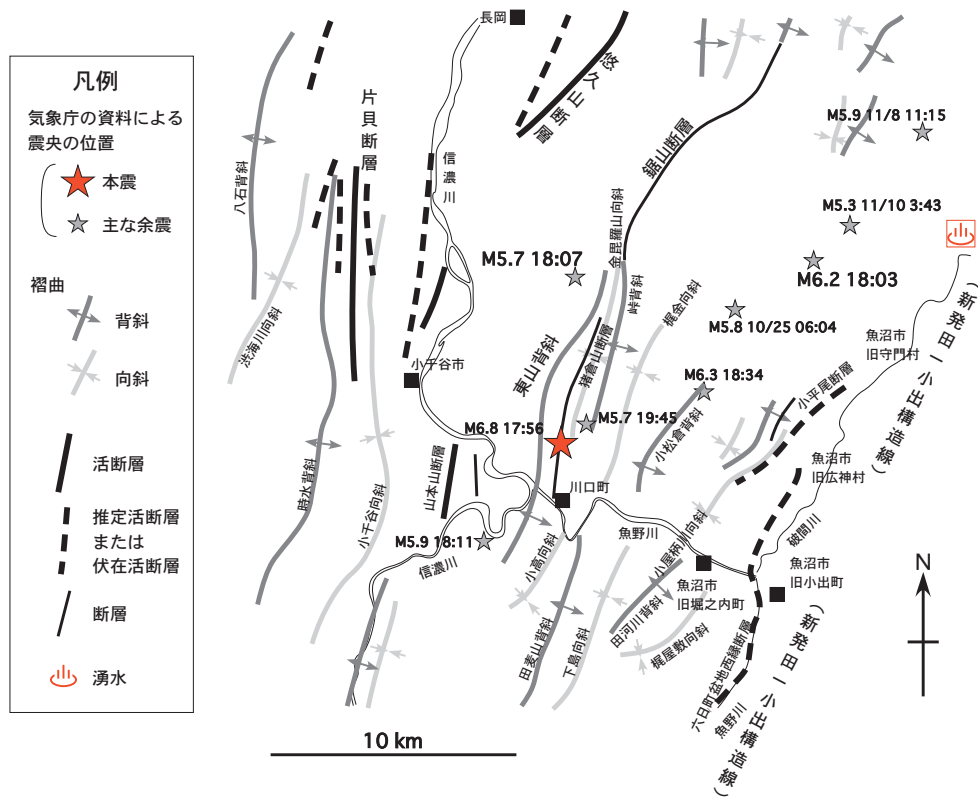


図1 中越地震の本震・余震域の地下構造. 褶曲・断層・活断層の記入にあたっては、柳沢ほか（1986）、小林ほか（1989）、小林ほか（1991）、影山・金子（1992）、新潟県（2000）、堤ほか（2001）、渡辺ほか（2001）、中田・今泉編（2002）を使用しました。

下水が見出されています。これら地下水は、地下深部から断層沿いに上昇してくる高温地下水に由来すると言われています。しかしながら、以上のような高温地下水と伏在活断層との対応関係には、いまだ不確実な部分があり、今後の検証が待たれます。

3. 中越地震直後の地下水異常

地下水温はその深度に応じて変化するので、消雪井戸地下水の温度を検討するには、地下水採水深度や地温勾配による補正が厳密には必要です。しかし、大木ほか（1998）や下記サイトで渡部が書いているように、中越地域には採水深度の大きく違う井戸が少なく、井戸の深度による誤差以上に大きな異常があるので、誤差を見込んで異常域の現れ方に違いが出ないと考えられます。そして、温度の深度補正を行っていない大木ほか（1998）の地下水温度異常分布図と比較する場合、今回得られたデータに対し深度補正をしない方が、地震前後の変化を正しく捉えることができます。

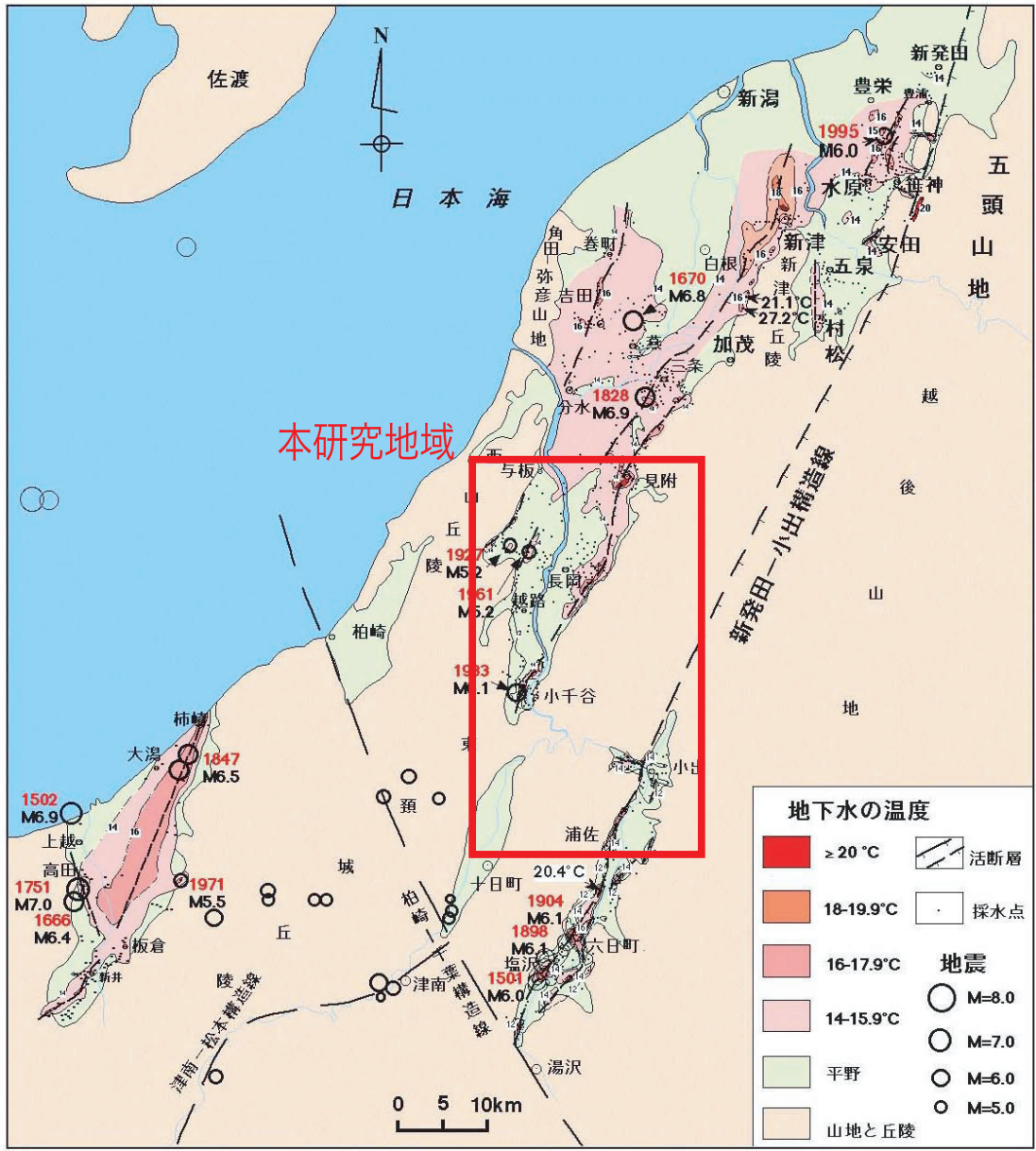
消雪井戸の地下水の、特に水温調査の有用性と問題点について、共著者の渡部直喜が「2004年新

潟県中越地震新潟大学調査団」のホームページ上の開設・中間まとめにおいて、詳しく解説していますので、そちらを参照下さい（「消雪井戸の地下水温度から推定される新潟地域の伏在活断層について」、<http://geo.sc.niigata-u.ac.jp/~earthquake/rep/04/wat1124/wat1124.html>）。

(1) 消雪井戸地下水の異常

中越地震の本震・余震域周辺地域における消雪井戸等の地下水変化の調査の結果、中越地震に伴って、広い範囲で地下水の変化が生じていることがわかりました（図3a, b）。

長岡市周辺の広い高温域は、中越地震以前にも存在していましたが、中越地震とともに範囲が大きく広がりました（図3a）。そして、悠久山断層周辺では最大20℃まで地下水温が上昇し、活断層である悠久山断層の南西方への延長部にも高温域が現れています。そのさらに南方の小千谷市内では、かつての高温異常帯の地下水温が最大25℃まで上昇しています。この信濃川の西岸を占める高温異常帯は、南北方向に延びて、山本山断層付近に連続するようにも見えます。さらに、この南北方向の高温異常帯の北方には、平野の地下に南北



新潟県の平野と盆地の地下水の温度異常と伏在活断層

図2 2004年新潟県中越地震前の地下水温度異常と伏在活断層（大木靖衛ほか，1998）。

方向の伏在活断層が推定されています。これに対し、活断層である片貝断層付近では地下水温の上昇が認められません。ただし、片貝断層の南方延長部には、中越地震前より高温になった異常帯が現れています。

余震域である東山丘陵の南東縁の新発田-小出構造線、または六日町盆地西縁断層の北方延長が通ると考えられている地域において、地下水温と電気伝導度の異常を見出しました（図3a, b）。ここでは、高温で電気伝導度の高い場所が点々と分布していたり、六日町盆地西縁断層に平行に延びる低温低電気伝導度帯が現れたりしています（図3b）。また、中越地震以前から存在した浦佐付近

の高温異常帯では、大木ほか（1998）のデータよりも約5°C温度が上昇しています。そこでは、電気伝導度の異常が認められません。

本地域において、中越地震後の消雪井戸地下水温と電気伝導度は、概ね正の相関を示しています（図4）。しかし、水温がさほど高くないにも関わらず電気伝導度がかなり大きい地下水、水温・電気伝導度ともに高い地下水（高温高電気伝導度地下水）、高水温だが低電気伝導度の地下水（高温低電気伝導度地下水）など多様な異常地下水が認められます。

また、東山丘陵（余震域）の東縁の、新発田-小出構造線が通る位置において、水温・電気伝導度・

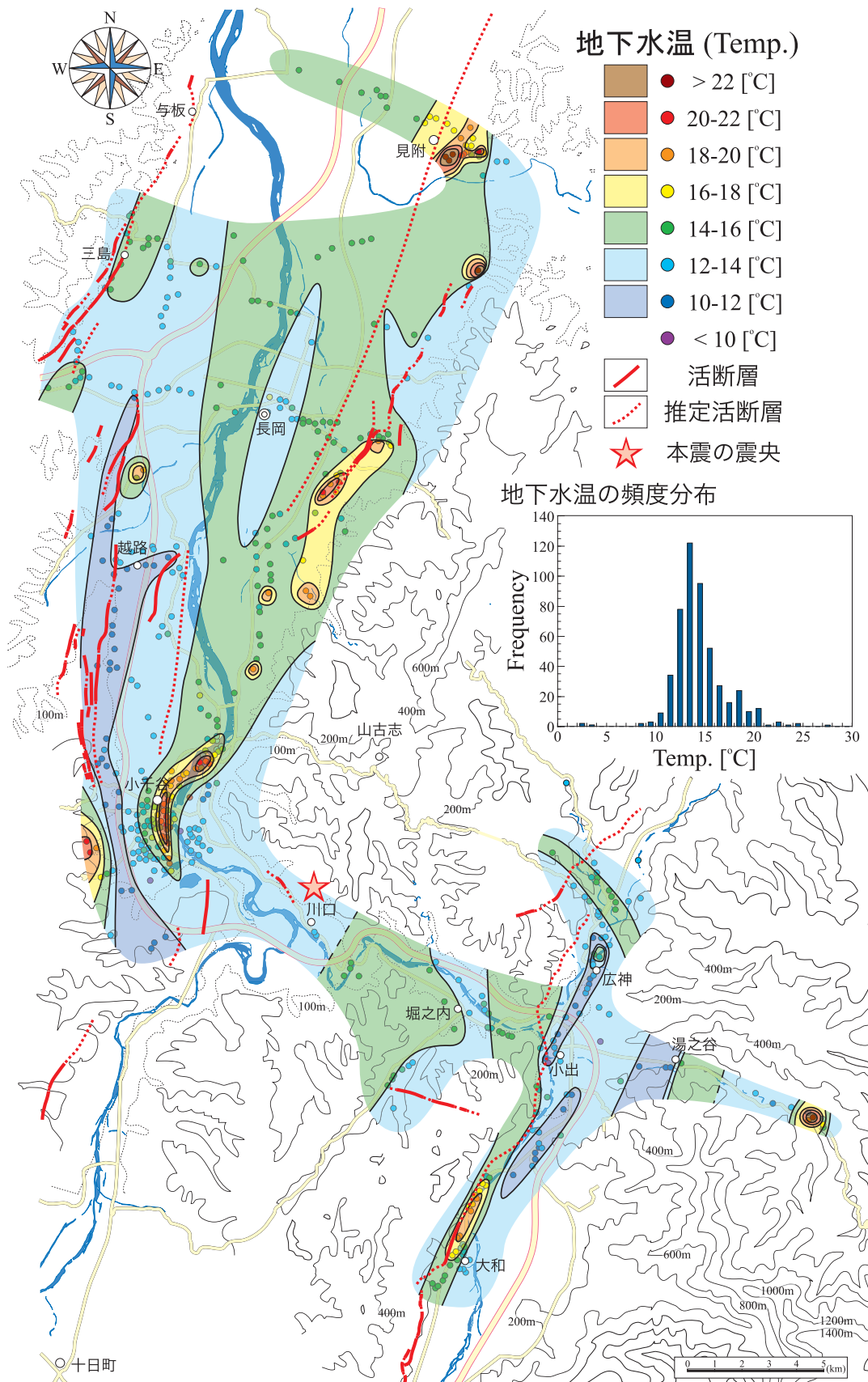


図 3 a 中越地震後の消雪井戸地下水温分布. 各所に高温異常域が認められます. 地下水温の平均値は 13.0-14.0°Cを示し, 本地域の平均気温と一致しています (地下水温の頻度分布). 活断層・伏在活断層の記入には, 活断層研究会編 (1980, 1991), 新潟県 (2000), 堤ほか (2001), 渡辺ほか (2001), 中田・今泉編 (2002) を利用しました.

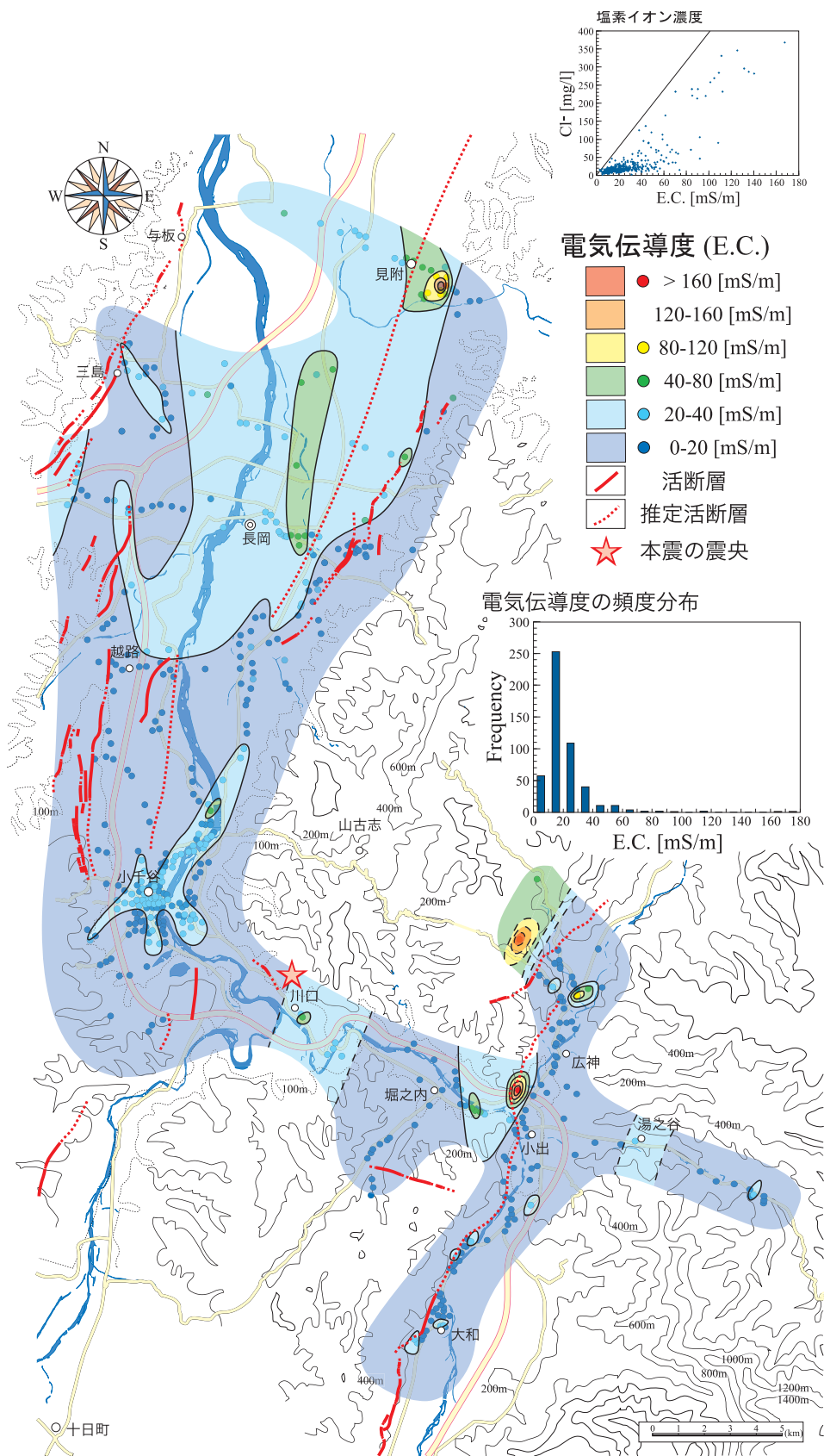


図3b 中越地震後の消雪井戸地下水の電気伝導度分布. 各所に高電気伝導度異常が出ています. 本地域の平均電気伝導度は10-20 mS/mです. 電気伝導度と塩素イオン濃度のグラフを見ると、両者には正の相関が認められますが、30-40 mS/m付近で、傾きが変わっているように見えます. 活断層・伏在活断層の記入には、活断層研究会編(1980, 1991), 新潟県(2000), 堤ほか(2001), 渡辺ほか(2001), 中田・今泉編(2002)活断層・伏在活断層を利用しました.

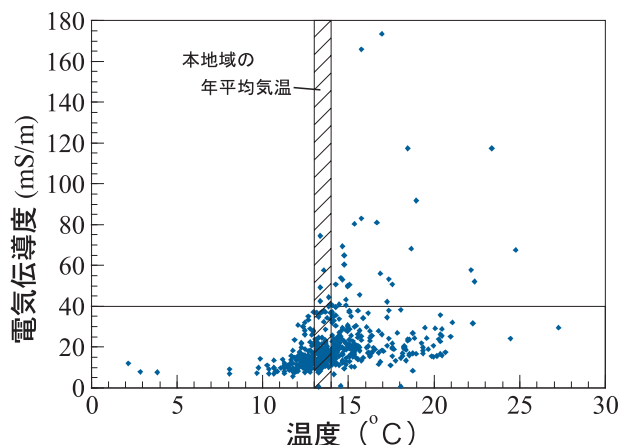


図4 中越地震後の消雪井戸地下水温度と電気伝導度との相関図。両者は正の相関を示しています。本地域には、水温がさほど高くないにも関わらず電気伝導度がかなり大きい地下水、水温・電気伝導度ともに高い地下水（高温高電気伝導度地下水）、高水温だが低電気伝導度の地下水（高温低電気伝導度地下水）など多様な異常地下水が認められます。

水質の異常を示す湧水が見つかりました（図1）。次にそれについて説明します。

（2）魚沼市旧守門村西名東部の湧水

中越地震後に、魚沼市旧守門村西名東部の西川河岸において、淡灰色粘土を含む湧水（以下、西名湧水）を見出しました。X線回折計を用いた分析によると、湧水に含まれる粘土は、主にハロイサイトとイライトからなっています（分析者：間嶋寛紀）。現地で測定された水温を表1に示します。河川水よりも湧水の方が、3.5°Cから6.0°Cも高くなっています。湧水の地点は、新発田－小出構造線が通過する位置にあたっています。

ここで、西名湧水の化学組成と、付近の河川水（西名河川水）、西川左岸の西名新田の浅層地下水（西名新田地下水）、右岸の守門温泉の源泉（守門温泉源泉）の化学組成を比較してみましょう（分析者：

表1 中越地震後の西名湧水と河川水の温度

月日	湧水	河川水
11月26日	14.5度	11.0度
11月29日	13.5度	8.5度
12月3日	13.0度	7.0度

肥塚高之・渡部直喜）。表2を見ると、西名湧水は、Na、Cl、SO₄に富んでおり、西名河川水や西名新田地下水と比較して異常な組成を示して、西名湧水地点の北西約1kmにある守門温泉源泉に近い水です。これらのことから、西名湧水は中越地震時の新発田－小出構造線沿いに深部から上昇してきた地下水（深部起源の湧水）であると考えられます。

4. 地下水の異常帯と活断層との関連、地下深部での断層活動

以上のような中越地震による地下水の異常は、中越地震に伴って発生した断層や断裂に沿って、地下深部の高温地下水が上昇したことを示すと考えられます。つまり、中越地震に伴う断層や断裂の形成が、地下深部の地下水循環を促したこととなります。具体的に言うと、悠久山断層、悠久山断層の南西延長として推定される伏在断層、魚沼市旧守門村～旧広神村周辺の新発田－小出構造線、六日町盆地西縁断層の北方延長として推定される伏在断層、以下に示される未報告の伏在活断層などが、地下深部から地表直下にわたって、震源断層として活動したらしいということです。中越地震の明瞭な地震断層は出現していませんが、これら複数の断層の動きが、地震によって生じた地下の過度な流体圧・摩擦熱を解放した可能性があります。

また、本研究の地下水温度と電気伝導度の測定と異常域の分布は、以下の場所に伏在活断層が存在

表2 西名湧水の化学分析結果（分析者：肥塚高之・渡部直喜）。

試料名	採取日	(mg/L)										pH濃度	温度	電気伝導度
		Na	NH ₄	K	Mg	Ca	HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄	pH	°C	mS/m	
西名湧水	2004.11.29	383.8	0	9.4	5.1	14.6	281.9	302.5	0	216.7	6.87	13.5	181.0	
西名河川水	2004.11.29	5.8	0	1.3	1.8	4.6	18.4	6.2	0.2	9.2	7.53	8.5	7.3	
西名新田地下水	2004.11.29	10.6	0	2.9	1.3	3.5	21.6	7.0	5.7	8.8	6.11	14.5	9.1	
守門温泉源泉	2004.11.29	808.9	0	16.1	11.1	20.3	1214.9	399.8	0	256.8	7.52	25.0	329.0	
		(meq/L)												
試料名	採取日	Na	NH ₄	K	Mg	Ca	HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄	源泉の深度			
西名湧水	2004.11.29	16.69	0	0.24	0.43	0.73	4.62	8.52	0	4.51	?			
西名河川水	2004.11.29	0.25	0	0.03	0.15	0.23	0.30	0.17	0	0.19	地表			
西名新田地下水	2004.11.29	0.46	0	0.07	0.11	0.18	0.35	0.20	0.09	0.18	地下数m			
守門温泉源泉	2004.11.29	35.17	0	0.41	0.93	1.02	19.92	11.26	0	5.35	地下40m			

する可能性を新たに示しています。

- 1) 悠久山断層の南西延長部
- 2) 長岡平野の地下
- 3) 山本山断層の北方に位置し、小千谷-長岡間の平野下の伏在活断層につながる可能性がある小千谷市中央部(信濃川西岸)
- 4) より高温になった片貝断層の南方延長部

中越地震によって起こった地下水変化(特に、水温上昇)の経年変動を、今後数年間、中越地方各地の主に消雪井戸を用いて追跡し、地震・断層と地下水変化との関係を検討する予定です。通常の方法では見つけ難い伏在活断層を地下水異常によって見出し、地下深部の断層の動きが捉えられるかもしれません。

謝辞

本研究を進めるにあたり、被災地の方々、国や県および市町村などの公的機関や各種自治体の方々、民間企業の方々に数々のご協力をいただきました。記して深謝いたします。そして、地質科学教室をはじめ、新潟大学の方々に様々なご援助を頂きました。感謝いたします。また、本研究は、新潟大学学長裁量経費や平成16年度科学技術振興調整費(2004年新潟県中越地震に関する緊急研究)、科学研究費特別研究促進費(課題番号:16800054,代表:平田直)、財団法人内田エネルギー科学振興財団の研究助成などによって財政的援助を受けました。ここに記して関係各位に感謝いたします。

末筆ながら、地震によって亡くなられた方々に心よりお悔やみを申し上げますとともに、被災された方々に慎んでお見舞い申し上げます。そして、一日も早い復興をお祈り申し上げます。

引用文献

Cheibany, Elemine, Ould and Watanabe, N., 2005, Hydrogeochemistry and environmental oxygen isotopes of groundwater from the Muikamachi Basin, Niigata Prefecture, Central Japan. J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour., Vol. 18, No. 2, 140-155.

- 池田安隆・今泉俊文・東郷正美・平川一臣・宮内崇裕・佐藤比呂志編, 2002, 第四期逆断層アトラス. 東京大学出版会, 260p.
- 石井武政・風早康平・安原正也・佐藤 努, 1995, 地下水調査から推定される神戸市周辺の潜在断層. 地質ニュース, 491, 29-32.
- 石井武政・風早康平・安原正也・丸井敦尚・佐藤 努, 1996, 神戸市周辺の高温地下水異常と全炭酸の安定炭素同位体比. 地理学評論, Ser., A, 69, 7, 493-503.
- 影山邦夫・金子信行, 1992, 日本油田・ガス田図13「新潟県中部地域」(10万分の1図幅). 地質調査所.
- 活断層研究会編, 1980, 日本の活断層-分布図と資料. 東京大学出版会, 363pp.
- 活断層研究会編, 1991, 新編 日本の活断層-分布図と資料. 東京大学出版会, 437pp.
- 小林巖雄・立石雅昭・吉岡敏和・島津光夫, 1991, 長岡地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 132pp.
- 小林巖雄・立石雅昭・黒川勝己・吉村尚久・加藤碩一, 1989, 岡野町地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 110pp.
- 中田 高・今泉俊文編, 2002, 活断層詳細デジタルマップ. 東京大学出版会, 60pp.
- 新潟県, 2000, 新潟県地質図(2000年版1:200,000)及び説明書. 新潟県地質図改訂委員会, 200pp.
- 大木靖衛・徐 輝竜・河内一男・鈴木幸治・渡部直喜・佐藤 修, 1998, 新潟県の歴史被害地震と伏在活断層について. 産業地質科学研究所研究年報, 9, 21-39.
- 堤 浩之・東郷正美・渡辺満久・金 幸隆・佐藤尚登, 2001, 1:25,000都市圏活断層図「長岡」, 国土地理院技術資料D・1-No.388.
- 渡辺満久・堤 浩之・鈴木康弘・金 幸隆・佐藤尚登, 2001, 1:25,000都市圏活断層図「小千谷」. 国土地理院技術資料D・1-No.388.
- Xu, Huilong, Oki, Y. and Ito, T., 1998, 1995 Northern Niigata earthquake with special attention to a geopressured hydrothermal system. Island Arc, 7, 647-659.
- 柳沢幸夫・小林巖雄・竹内圭史・立石雅昭・茅原一也・加藤碩一, 1986, 小千谷地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 177pp.