

信濃川地震帯のジオプレッシャー熱水を伴う活断層と 歴史被害地震

元新潟大学積雪地域災害研究センター¹, 新潟大学積雪地域災害研究センター²

神奈川県温泉地学研究所³, 西新発田高校⁴

大木靖衛¹, 徐輝竜², 石坂信之³, 河内一男⁴

(平成10年8月30日受付、平成10年11月21日受理)

Geopressured Hydrothermal System Associated with Active Faults and Historical Destructive Earthquakes in the Shinano River Seismic Zone

Research Institute for Hazards in Snowy Area, Niigata University¹

Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture²

Nishi-Shibata High School³

Yasue OKI¹, Huilong XU¹, Nobuyuki ISHIZAKA²,
and Kazuo KAWAUCHI³

Abstract

A geopressured hydrothermal system is widely distributed in the folded Neogene Tertiary Niigata Sedimentary Terrain associated with oil and gas field. The area is recently recognized as newly developing plate boundary between the Amur Plate and the Okhotsk Plate running down along the eastern margin of the Sea of Japan and into the Honshu Island along the Shinano River (Ohtake, 1995). Historical destructive large earthquakes occurred repeatedly in the plate boundary.

The 1995 Northern Niigata Earthquake (M5.5) occurred at the eastern fringe of the Niigata earthquake gap, which has been pointed as a long term precaution of an impending large earthquake (Mogi, 1988; Ishikawa, 1990, 1994). A rating of the earthquake intensity 6 (on JMA scale) with 55 houses collapsed was recorded in a narrow stretched area of 5.5 x 1 km trending NNE-SSW, which may indicate the distribution of the buried rupture fault beneath the plain. The measurements of temperature and chemical composition of snow melting wells (ca. 100m deep), which are regionally distributed along the main roads declared that the 1995 earthquake occurred at the warm temperature anomaly formed by upward percolation of geopressured thermal water along fractures of the buried active faults.

Temperature and chemical composition of snow melting wells have been made through out the plains and basins of the Niigata prefecture. Many buried active faults beneath flat plains are recognized as warm temperature and geochemical anomalies. All epicenters of the historical destructive earthquakes since the 16th century actually locate in the buried active fault zones characterized by the areas of temperature and geochemical anomalies due to the upward percolation of the geopressured hydrothermal water.

Key Words: Geopressured hydrothermal water, active fault, destructive earthquake, Shinano River seismic zone, snow melting well

キーワード: ジオプレッシャー型地層水、活断層、被害地震、信濃川地震帯、消雪井戸水

1. はじめに

大木は1990~1998年の8年間にわたり新潟地域の災害地質の研究に従事する機会を得た。これまで研究していた伊豆箱根火山地帯の温泉については「富士の見えるところに温泉はない」という諺があり、古くからの温泉場は谷底や平地に分布し、したがって山稜での温泉掘削は避けられている(大木, 1979)。新潟の温泉はもちろん谷底・低地にも分布するが、信濃川地震帯に属する新潟の新第三系褶曲山地や丘陵地では、展望の利く山稜で温泉開発が盛んに行われてるのを見て、伊豆箱根火山地帯の温泉と新潟の温泉の産状が著しく異なっていることに注目させられた。佐藤(1981, 1982)は新潟県の地すべり地帯の中心部に、しばしば塩分濃度の高い地下水が湧出していることを指摘している。新潟のこれらの温泉・地下水は、石油・天然ガスに伴って存在する異常高圧を持つジオプレッシャー熱水系として認識しなければならないことに気が付いた(大木ら, 1992)。

新潟県の新第三系褶曲山地や第四系丘陵地帯には大規模な地すべり地帯が形成されていて、それらの中心地にはジオプレッシャー熱水に起因する非火山性の温泉・鉱泉が分布している。新潟県松之山温泉の地すべり地帯において渡部ら(1995)、渡部ら(1997)が、またその西20kmの牧村宇津俣地すべりにおいて Xu et al.(1997)が、温泉や地すべり地帯の塩分に富む地下水は断層破碎帯を上昇してきたジオプレッシャー熱水に由来し、それが地すべり地帯形成に強く関与していることを明らかにした。1995年4月新潟県北部の地震(M5.5)が新潟市東方18 km福島湯付近で発生した。震央地域の消雪井戸水の水温・水質の調査から、本地震がジオプレッシャー熱水の湧出し続けている伏在活断層で発生したものと推定された(Ōki, Y. et al. 1996; 大木・徐, 1997)。これらの調査が契機となって消雪井戸水に着目し、新潟県の平野・盆地の伏在活断層の探査を開始した(大木ら, 1998; Xu, Ōki and Ito, 1998)。信濃川地震帯の歴史被害地震の震央について再検討を加えた結果、それらの地震はジオプレッシャー熱水湧出による温度異常を持った活断層地帯で発生していたことが明らかになった(河内・大木, 1996; 大木ら, 1998)。

本稿ではジオプレッシャー熱水に着目した活断層の調査や、歴史被害地震と活断層との関係について述べる。ジオプレッシャー熱水による温度異常を持つ活断層地帯は本地域の大地震の前兆現象が現れるつばであり、今後の地震に対してジオプレッシャー熱水異常を伴う伏在活断層の挙動に注目しなければならないことを指摘する。

2. ジオプレッシャー熱水系

地熱を運搬する媒体(主として水)の性状によって地熱系(Geothermal system)は表1のように分類される(White et al., 1971)。ここではジオプレッシャー熱水系についてのみ簡単な説明をする。ジオプレッシャー熱水系(Geopressured hydrothermal system)の流体圧は与えられた深度での水柱圧(Hydrostatic pressure)と熱水系を閉じこめている地層の岩柱圧(Lithostatic pressure)の中間の値をとる(図1)。北アメリカのメキシコ湾沿岸の石油・天然ガス地帯では数kmの厚い泥岩層をキャップロックとし、異常高圧を持つ熱水系が識別された(例えばMyers, J.D., 1968; Jones, P.S., 1970)。その熱源は火山ではなくマントルで、主として熱伝導で熱が与えられている。火山性熱水系では天水が循環してマグマの熱を運び出すが、ジオプレッシャー熱水系では天水の循環はない。石油・天然ガスの移動にとって重要な働きをするという観点で、近年ジオプレッシャー熱水系の詳しい研究が盛んに行われている(例えばRoberts and Nunn, 1996; McKenna and Sharp, 1997)。

図2は、帝石(株)が昭和41年から46年に新潟県で掘削した322坑井の掘さく中に遭遇した異常高圧障害を、深度-密閉坑底図にまとめたものである(白石, 1972)。深度1600m以深で水柱圧の150%以上に達する密閉坑底圧が発生して掘さく障害を起こしている。この図は新潟新第三紀堆積盆の石油・天然ガス地帯には厚さ1500m~数千mの泥岩層がキャップロックとなってジオプレッシャー熱水系が広く分布していることを示唆している。

Table 1 Classification of geothermal systems

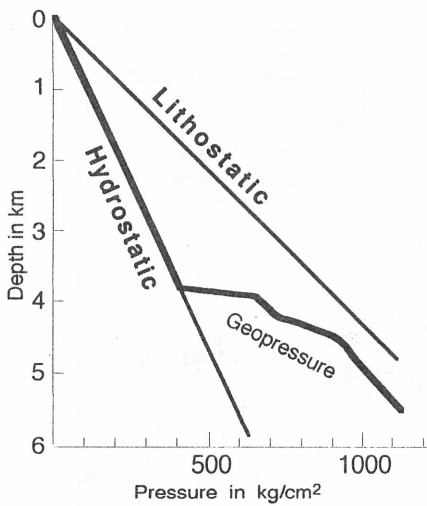
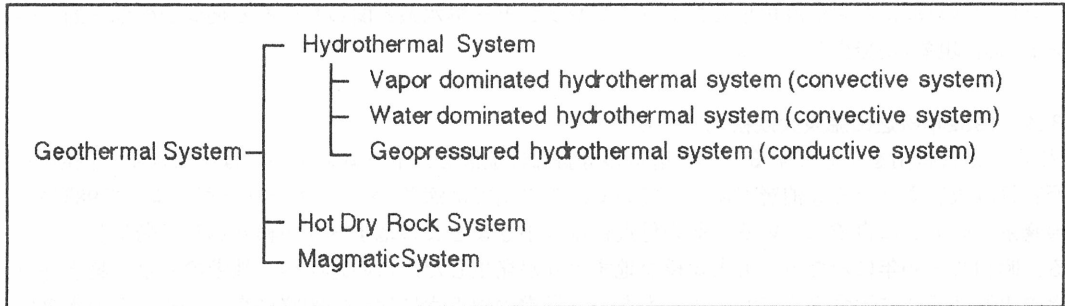


Fig.1 Depth-pressure diagram illustrating the field of a geopressure system of the off-shore area, Louisiana, USA. (Mayers, 1968). Below 3.9 km depth is the area of the geopressure system.

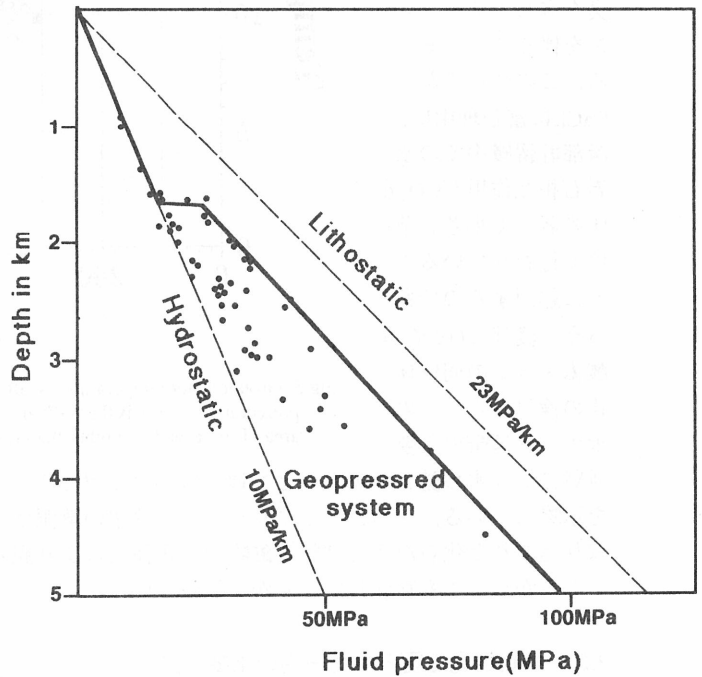


Fig.2 The geopressed hydrothermal system of the Niigata oil field is delineated by the distribution of anomalous high pressure accidents occurred during 1966 and 1971 (data from Shiroishi, 1972).

3. ジオプレッシャー熱水系に関係した異常現象

北信から新潟に及ぶ信濃川地震帯でジオプレッシャー熱水系と関わりのある幾つかの地学的イベント(異常現象)が発生している。

3.1 1962年松之山温泉大規模地すべり

松之山は大松山を中心とするドーム構造の背斜部に位置し、ドームの中心には中新世中～後期の軽石質凝灰岩よりなる寺泊層が露出している。松之山では深さ300mのボーリングによって98℃の沸騰泉が間欠的に自噴している。その付近には大小さまざまな地すべりが繰り返して発生している。昭和37～39年にわたっても大規模な地すべりが発生した。この地すべり地帯の湧水、集水井戸水の水温は図3に示すように20℃以上もあり、通常の地下水に比べて明瞭に高い。それらの水質はNaClが主成分であ

り、深部のジオプレッシャー熱水が断層破碎帯を通して地表に湧出していることを示唆している。

松之山温泉の特徴は、非火山性の温泉でありながら90℃以上の高温であり、Na-Ca-Cl型の泉質で石油臭を有し、メタンガスを伴うことである。この高温泉がCaCl₂に富む理由は、深部貯留層中での水岩石相互作用がCO₂分圧の著しく小さい条件で行われていることに起因するのであ

ろう。渡部ら(1996)は酸素・水素の同位体比の検討から、この地すべり地帯の主要断層に沿う水の動きは少なくとも地下数kmのジオプレッシャー熱水貯留層にまで達していることを示唆している。なお、ジオプレッシャー熱水の熱源はマントルであり、水の起源は地層堆積中に取り込まれた化石海水及び粘土鉱物の変成作用により脱水した水の混合物で、ことによると直接マントルからの水も存在しているかも知れない。

3.2 松代群発地震と中村一明の水噴火説

1960～62年(昭和40～42年)に発生した松代群発地震では、地震活動と連動して総量 1000万 m³もの大量な温泉が噴出し、温泉噴出が収まるのと呼応して地震活動も静穏化した(春日,1967, 図4)。中村一明(1971, 1989)はこの大量の温泉噴出を「水噴火」と呼び、松代の深部熱水が火山噴火における

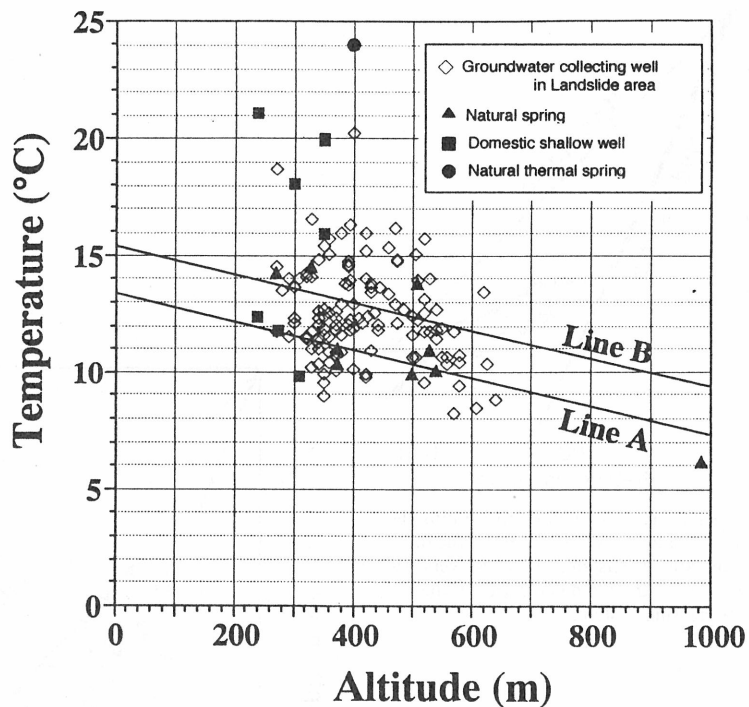


Fig.3 Groundwater temperature vs. altitude in the Matsunoyama landslide area, Niigata prefecture. Line A is the ordinary temperature-altitude linear relation of the studied area. Line B is 2 °C higher than Line A (Watanabe et al., 1995).

マグマ噴出と同様な役割を演じたと指摘し、示唆に富むユニークな発想法と高く評価された。水噴出した温泉の水質は著しくCaCl₂に富み、CO₂に過飽和であった(Kitano et al., 1967)。CaCl₂に富む水質という点では松之山温泉の泉質と類似している。理由はまだ分からないが、群発地震がしばしば発生する丹沢山地にもCaCl₂に富むNaCl型温泉が湧出している(平野ら, 1976)。

3.3. 長野市地付山地すべり

1985年(昭和60年)7月長野市地付山(733m)の南東斜面で大規模な地すべりが発生し、山麓の住宅・老人ホームを直撃した。老人ホーム倒壊により26名の死者が出た。地すべりの基本対策として地下水排除のため、直径5m、深さ15~35mの大型集水井が7井掘さくされたが、湧水量は少なく最大で毎分12ℓで、多くは毎分1~2ℓであった(熊井, 1986)。地付山では大規模な地すべり発生前に降雨が続き、地すべりブロック内の間隙水圧の上昇が地すべりの引き金になったと推定された。すなわち地すべりの原因は、地すべり地帯を構成する榎花凝灰岩が著しい熱水変質を受けてNa-モンモリロナイトが形成され、水を含むと滑りやすくなる桃色~白色のソーブストーンとなっていたためと指摘された(渡辺・山田, 1986)。私たちが1992年10月下旬に地付山地すべり地帯の地下水・温泉調査を試みたところ、この付近の地下水温は通常の地下水温より著しく高いものが多かった。地すべり直後、佐藤(1986)は地すべり地帯の各所で付近の通常の地下水より数倍から10倍のNaClを含む異常な水質を持つ地下水が湧出していたことを報告している。これらの事実は、1847年善光寺地震(M7.4)を発生させた長野盆地も、ジオプレッシャー熱水の滲出している地殻変動の活発な地帯であることを示唆している(大木ら, 1993)。

3.4 鍋立山トンネル泥噴火

新潟県南魚沼郡六日町と中頸城郡大潟町を結ぶ地域新幹線JR北陸北線は平成9年開通したが、鍋立山トンネルの掘さくでは掘さく困難な奇妙な地層に遭遇し、トンネル開通が数年も遅れてしまった。1989年(昭和64年)1月鉄建公団がトンネルボーリングマシン(TBMと略す)を用いて前期鮮新統の田麦川層の掘さくを開始したところ、TBMが褶曲する田麦川層の背斜部に達する頃から天盤の崩落、地山の押し出しが多くなり、断層帯に入るとTBMは断層破碎帯から押し出す粘土に捕らえられ、先端カッターの回転が停止した。トンネル先端の切り羽からは高圧の泥・温泉とメタンガスの混合物が猛烈な勢いで噴出し、TBMは押し返されて1ヶ月後には65m後退し、出発地点に戻ってしまった(服部, 1990)。高圧メタンガス噴出のため、火花が発生すれば坑内大爆発の危険があり、仕方なしに手堀の掘さくに切り替え、泥水メタンガスの噴出を押さえるセメント液注を繰り返して、1996年トンネルが貫通した。1990年10月の新潟県応用地質研究会で服部(1990)が発表したビデオ映像では、切り羽からの泥水ガスの噴出状況は猛烈で、まさに「泥噴火」であった。1996年松代群発地震の大量地下水噴出を中村一明は「水噴火」と表現したが、ここで「泥噴火」と呼ぶのは中村の表現からの連想である。日本の鉄道トンネルを掘削する鉄建公団始まって以来前例のない奇妙な難事であり、断層破碎帯を通して深部からのジオプレッシャー熱水噴出による珍しい事件であった。

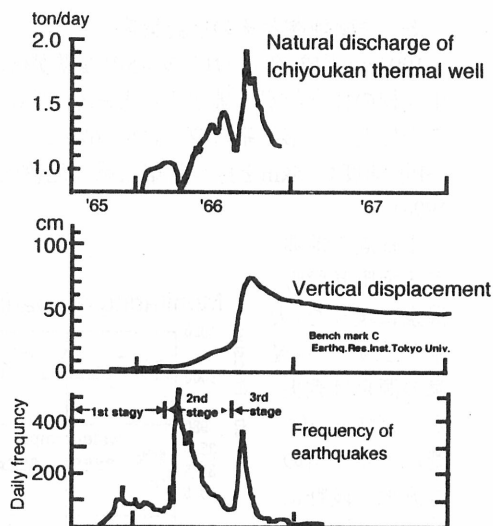


Fig.4 Discharge(ton/min.) of the thermal spring (Ichiyokan), upheaval of a bench mark at the epicentral area and the daily frequency of the 1960-62 Matsushiro earthquake swarm (Kasuga, 1967).

3.5 津南地震とその前兆異常

1992年(平成4年)12月にM4.5の地震が信濃川に沿う長野・新潟県境付近で発生し、新潟県津南町中学校の体育館が大破するなど総額6億円に達する被害を生じた。震源の深さは2~3kmと浅く、この付近の新第三系の厚さは5~6kmと見積もられている。この地震は、地震地殻としては柔らかいP波速度4~5kmを持つ新第三系の地盤内で発生した珍しい被害地震であった(Tsukuda and Oki, 1994).

本地震の前兆が津南町菅段野温泉に現れた(大木ら,1995)。本温泉の源泉は震央から東6km、信濃川と中津川の合流地点段野に掘さくされた深さ600mの孔井である。毎分50ℓ自噴するが、温泉供給を行うために水中モーターポンプを設置して毎分100ℓの揚湯をしていた。

平成4年12月24日夕刻に、「温泉が止まってしまった」との温泉利用者から今までに無かった苦情が役場にあり、源泉を調べたところ貯湯タンクの温泉水位が異常に低下していた。3日後の12月27日11時17分津南地震が発生した。地震の発生とほぼ同時に温泉の湧出量が倍増した。自噴で毎分100ℓ程度、ポンプ揚湯では毎分200ℓ以上が得られた。貯湯タンクからは余っ

Monitoring of Danno Thermal Well after the 1992 Tsunann earthquake

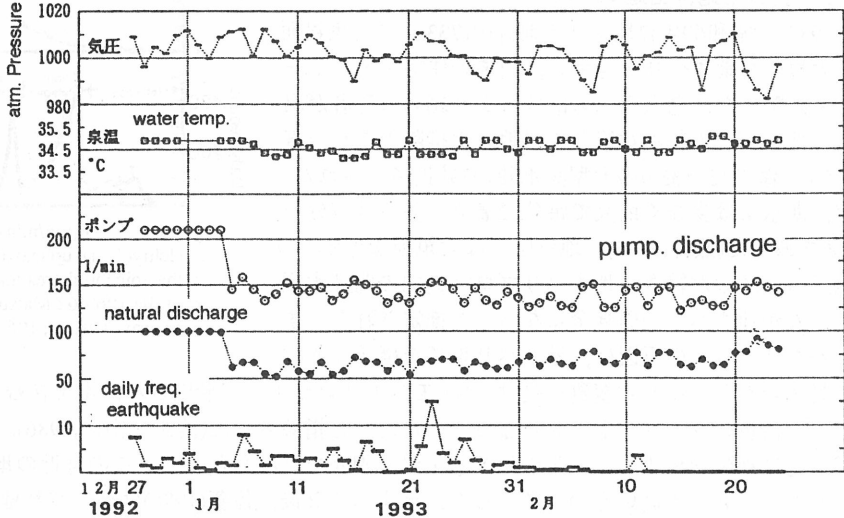


Fig.5 Thermal water discharge (l/min.), temperature of thermal water from a well 600 m deep and atmospheric pressures at Danno, epicentral area and daily frequency of the after shocks of the 1992 Tsunann earthquake (Oki et al., 1994).

$$Y(\text{discharge l/min.}) = -0.67 \times P(\text{atmospheric pressure, hPa}) + 728$$

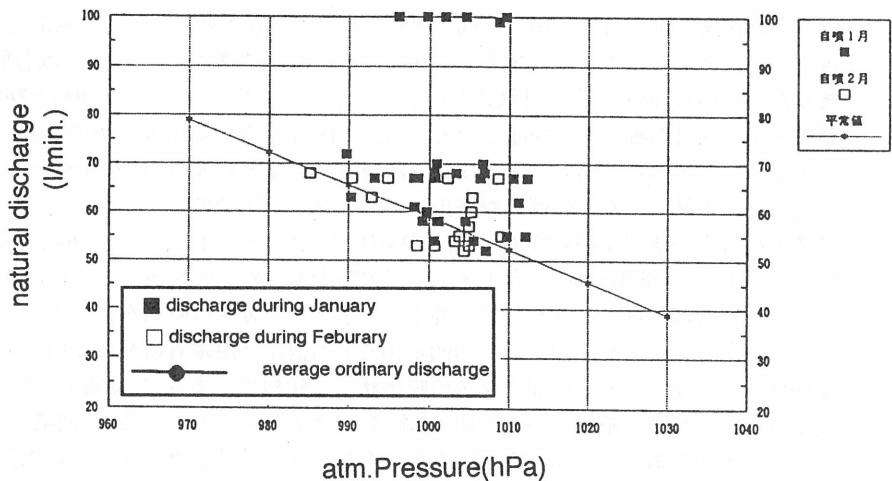


Fig.6 Diagram showing the relation between the natural discharge of thermal water from the well 600 m deep and atmospheric pressure at Danno, epicentral area of the 1992 Tsunann earthquake (Oki et al. 1994).

た温泉が溢れ出し、毎分200ℓ以上の湧出が正月4日まで続いた。その後は気圧変化と呼応しながら毎分120~150ℓ程度の揚湯量に落ち着いた。地震以前よりは湧出量は大きくなった。余震活動中の強い地震の前には揚湯量が10~20%減少することがしばしば起きた。図5は津南町段野温泉の湧出量と日別地震頻度、図6は自噴量と気圧との関係を示す(大木ら,1995)。地震により湧出量が増加していることが明瞭である。

なお、津南町付近では信濃川に沿い7段の河岸段丘が形成されている。一般に河岸段丘面は河川に沿って上流から下流に向かい傾斜している。しかし、20~25万年前に形成された米原面は地殻変動により上流に向かって傾斜している。7段もの河岸段丘が発達し、段丘面の変位も顕著なこの地域では、地震活動も活発であることが理解できる(大木ら, 1995)。

3.6 1995新潟県北部の地震

1995年新潟県北部の地震(M5.5)は石川・浜田(1985), Mogi(1988), 石川(1990,1994), Ohtake(1995)などにより大地震の可能性ありと指摘されていた新潟市付近の地震空白域で発生した中規模の地震である。空白域の規模から推定される大きな地震(M7級)の前触れではないかと深刻に受け止められている。本地震後の調査で分かったことであるが、新潟県北部の地震はジオプレッシャー熱水系の活動域で発生したものである。

1995年4月1日新潟市東方18kmの福島潟付近を震央とする新潟県北部の地震(M5.5)によって、全壊家屋55戸、被害総額93億円の被害が出たが、幸いにも死者は無かった。この地震は深さ10kmの浅い地震であったため被害が大きくなった(酒井ら,1995)。

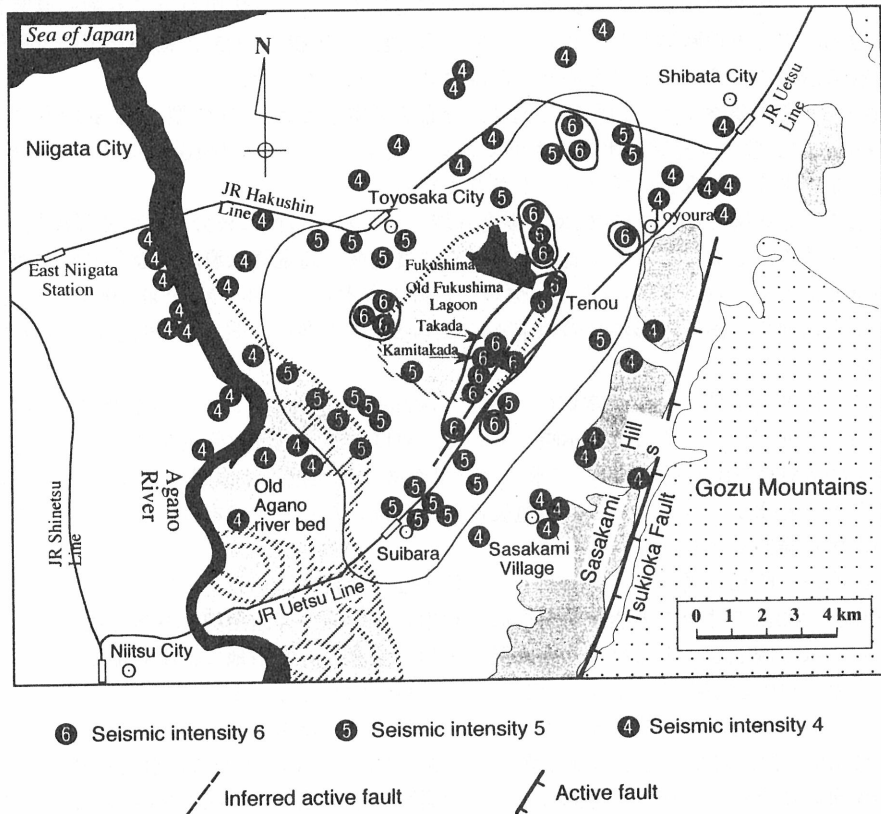


Fig.7 Map showing the distribution of earthquake intensity (on JMA scale)(Ōki et al., 1995). The linear distribution of the intensity 6 images the presence of a buried active fault, which generated the 1995 earthquake.

大木ら(1995)は90ヶ所の墓地の石塔転倒から水平最大加速度を求め、震度分布図を描いた(図7)。震央地区に北北東-南南西方向を長軸とする 5.2×1 kmの細長い地域が震度6域となり、この形状が地震を発生させた平野深部にある伏在活断層を暗示していた(Oki et al.1995)。

豪雪地帯である新潟県では、道路や屋根の雪を消すために地下水を利用しているが、そのための取水井戸を消雪井戸と呼ぶ。地震と地下水の関係を調べるために消雪井戸水の調査を行った(大木・徐,1997; Xu et al.1998)。主要道路に沿って分布する消雪井戸の深さは概ね100m前後で、揚水量も毎分500~2000ℓと大きい。主要道路に沿って掘さくされた消雪井戸は国・県などの補助金によって行われるので井戸の深さや構造には一定の基準がある。しかし、消雪井戸の深さは総てが均一に100mではない。温度の高い孔井で温度検層を行った例では、地温勾配は $4^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 前後であった。孔井の水温が水平的にどう分布するかは、各孔井の一定深度(例えば地表より深さ100m)の水温分布から求めるのが理想的である。現状ではそのような資料を収集しようとしても、消雪井が密閉されていて温度検層は不可能である。地下深部から活断層の割れ目に沿って湧出する地下水の有無を調べることとし、消雪井戸地下水の水質並びに電気伝導度を測定して、水温計測の不備を補った。

消雪井戸水の水温分布図(図8)において等温線が特定の点や線にまつわるような形状を示すとき、それを異常温度(この場合 15°C)とみなした。図9は本地域の消雪井戸水のCl濃度と水温の相関図である。 15°C 近くからCl濃度が顕著になることから、等温線の形状から定義した異常水温が適切であることが分かる。また本地区では 15°C 以上の等温線が震度6域との強い関わりを示すので、 15°C 以上を地殻変動の活発さと関連する異常温度とみなすことができる。五頭丘陵西麓の出湯温泉から村杉温泉までの範囲が 20°C 以上の顕著な温度異常地帯である。安田町付近にも強い温度異常が認められ、地形的にも庵地断層として認められている(渡辺・宇根, 1985)。笹神丘陵の東縁部を境する月岡断層に沿っては注目するほどの異常温度は認められなかった。

本地域の水質を主要陰イオンの多寡と地理的分布を考慮すると、Na-Cl型、Na- SO_4 型、Na- HCO_3 型及びNa-Ca- HCO_3 型の4種類の水質に大別できる。陰イオン三角図(図10)上でこれらの水質は著しく重複しないように住み分けてプロットされている。

図11は水質の分布図である。Na-Cl型は震度6域と、それから南に枝分かれする温度異常区域にわたって分布する。なお、ここでは省略するが高Cl濃度域、高電気伝導度域などの異常地帯と高水温異常地帯とはよく一致している(大木・徐輝, 1997; 大木ら, 1998; Xu et al.,1998)。月岡断層沿い及び五頭山西麓の出湯-村杉温泉の地下水にはNa- SO_4 型が多い。表2は代表的な各水質型の化学分析値である。

震度6域と温度異常域・NaCl異常域の一致は、深部のジオプレッシャー型地層水(熱水)が断層破砕帯に沿って湧出していることを示唆している。震度分布と地球化学的手法により推定された伏在活断層をCSAMT電磁気探査によって求めた結果が図12の比抵抗断面図である。高塩分濃度のジオプレッシャー熱水が上昇している断層亀裂は低比抵抗になるはずであり、この調査により西に傾斜した逆断層が識別できた(Xu et al.,1998)。

本地域は明治~昭和初期にかけて開発された新津油田地帯の北13 kmに位置し、各家庭では現在でも深さ100~200mの井戸で天然ガスを採取し利用している。五頭山塊と笹神丘陵を南北に分かつ村杉低地帯には月岡温泉・出湯温泉・今板温泉・杉村温泉、五頭山地には咲花温泉・三川温泉などがあり、大木ら(1992)が指摘したジオプレッシャー型熱水が存在している。

本地震については河内(1995)が述べているように数カ月に及ぶ前震活動があった。川上(1995)は震央から5km東の出湯温泉で温泉の前兆異常を観測した(図13a,b)。本地震活動と関連して月岡温泉・出湯温泉の湧出量は増加し、月岡に近い本田興野の水田地帯では深さ150mの灌漑用井戸の自噴量が倍増したなど、地下水・温泉の異常が顕著であった。

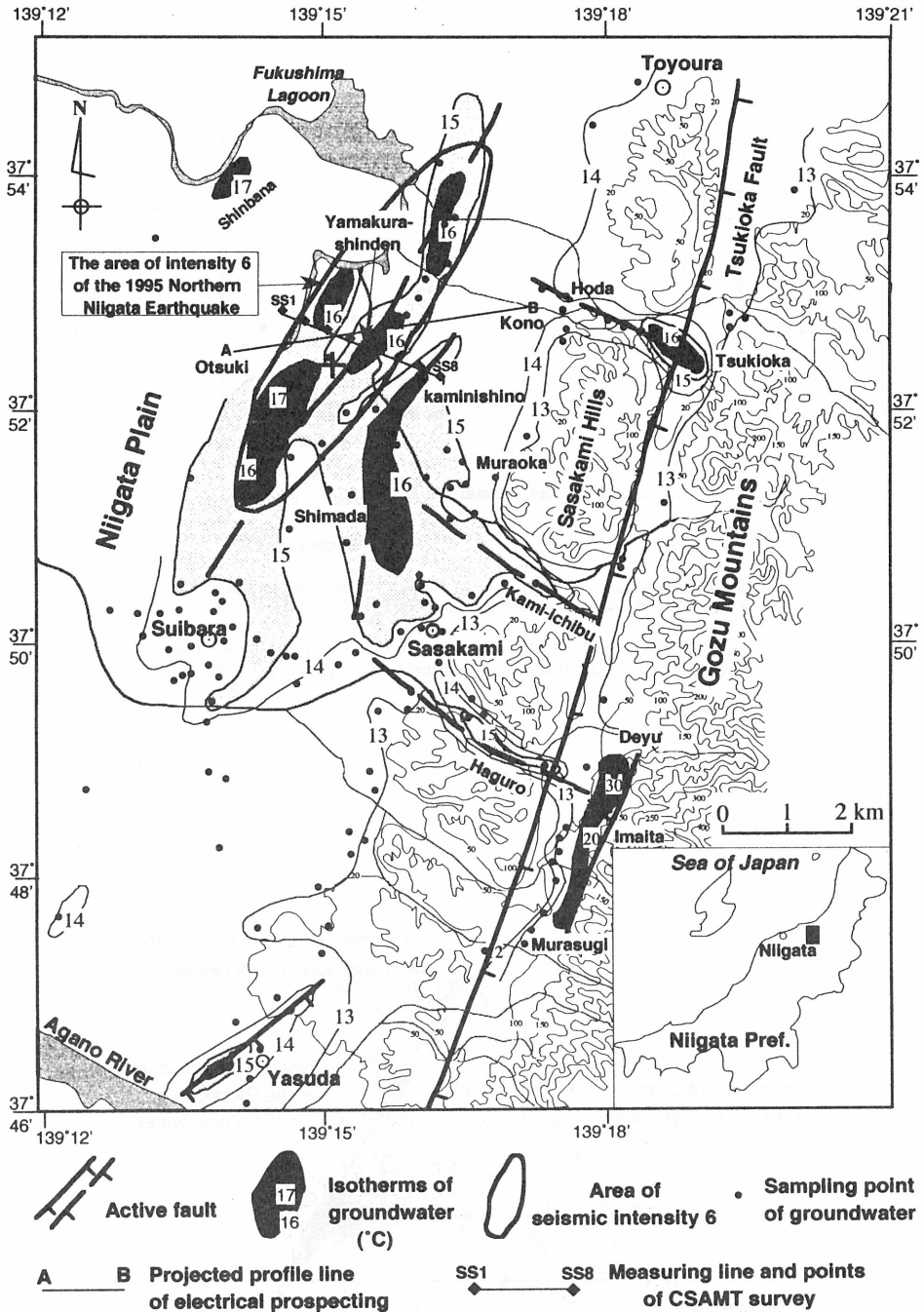


Fig.8 Map showing the temperature distribution of groundwater in the epicentral area of the 1995 Northern Niigata earthquake. The area characterized by the intensity 6 (JMA scale) exactly coincides with the zone of warm temperature above 15°C isothermal line. Line SS1-SS8 is the cross section of CSAMT prospecting gives in Fig.12 (Xu et al. 1998).

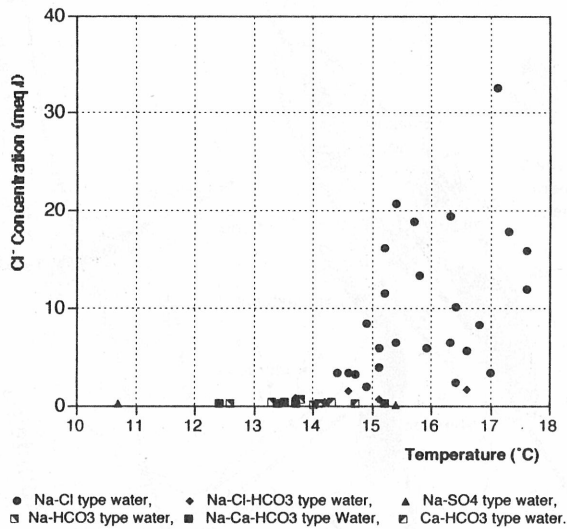


Fig.9 Temperature vs. Cl⁻ diagram of groundwaters in the epicentral area showing Cl⁻ concentration increases from 14.5°C (Xu et al., 1998).

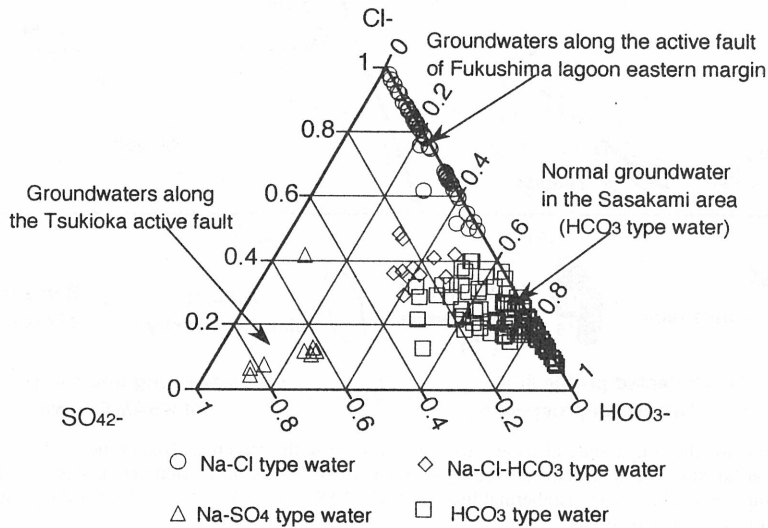


Fig.10 Cl-SO₄-HCO₃ diagram of the groundwaters in Sasagami, the 1995 earthquake epicentral area (Xu et al., 1998).

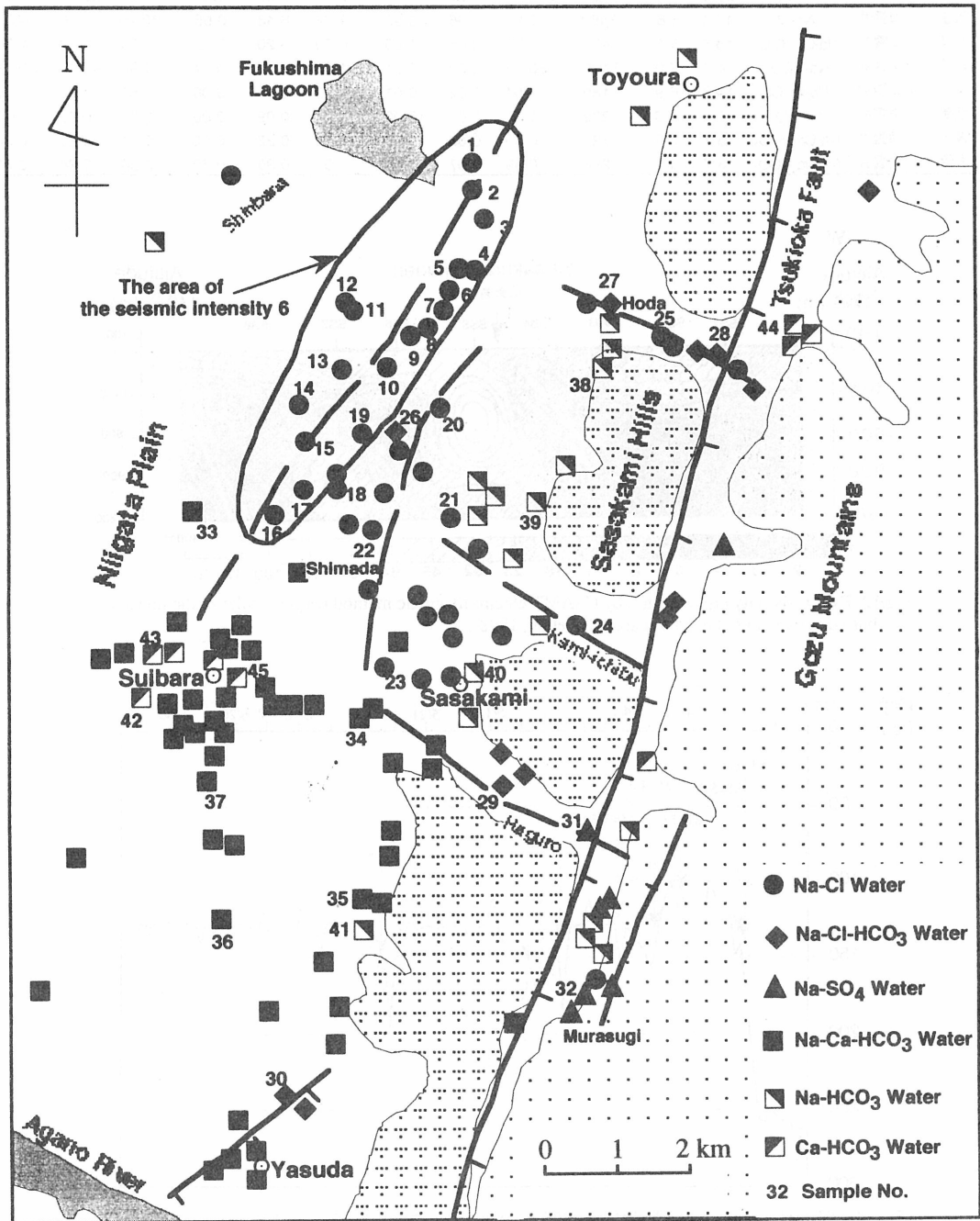


Fig.11 Map showing the distribution of the groundwater types in the 1995 epicentral area. NaCl type water shows linear distribution at the warm temperature area trending NNE direction (Xu et al., 1998).

Table 2 Representative groundwater types in the epicentral area of the 1995 Northern Niigata earthquake (Oki et al., 1998 and Xu et al., 1998). Analyzed by Xu.

No.	Locality	Type of well	Water type	Temp. (°C)	pH	E.C. (μs/cm)	Na ⁺ (meq/l)	K ⁺ (meq/l)	NH ₄ ⁺ (meq/l)	Ca ²⁺ (meq/l)	Mg ²⁺ (meq/l)	Fe ²⁺ (meq/l)	Cl ⁻ (meq/l)	HCO ₃ ⁻ (meq/l)	SO ₄ ²⁻ (meq/l)
1	新津高坪	油井	Na-Cl	23.8	7.1	16980	203.19	1.97	1.83	3.93	1.50	n.d.	150.43	56.76	n.d.
72	天王	消雪井	Na-Cl	17.1	6.8	3580	20.26	0.96	0.95	5.22	6.48	0.65	32.70	1.76	0.00
80	月岡	消雪井	Na-Cl-HCO ₃	16.6	6.4	499	3.57	0.06	0.00	0.70	0.20	0.22	1.75	1.72	1.26
S41	内沼	ガス井	Na-HCO ₃	14.6	7.0	3190	36.12	0.83	0.91	1.08	4.17	0.14	4.92	40.37	0.00
2	笹神	消雪井	Na-HCO ₃	13.9	6.9	189	1.54	0.02	0.01	0.13	0.10	0.06	0.57	1.40	0.00
25	羽黒	消雪井	Na-SO ₄	15.4	6.6	232	1.22	0.02	0.00	0.77	0.09	0.00	0.27	0.60	1.40
88	滝沢	消雪井	Na-Ca-HCO ₃	13.1	6.9	126	0.49	0.03	0.00	0.33	0.22	0.02	0.24	0.83	0.18
S26	水原	消雪井	Ca-Na-HCO ₃	13.7	6.5	298	0.69	0.07	0.03	1.01	0.80	0.50	0.50	2.24	0.00

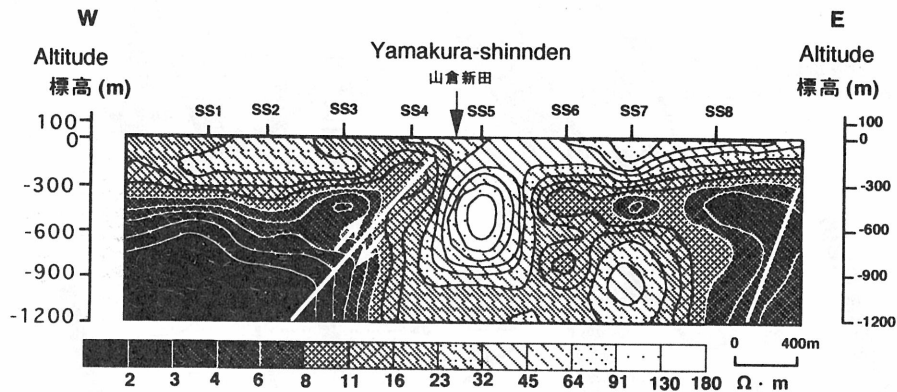


Fig.12 E-W resistivity cross section by CSAMT electro magnetic method perpendicular to the image of buried active fault at epicentral area (Xu et al., 1998).

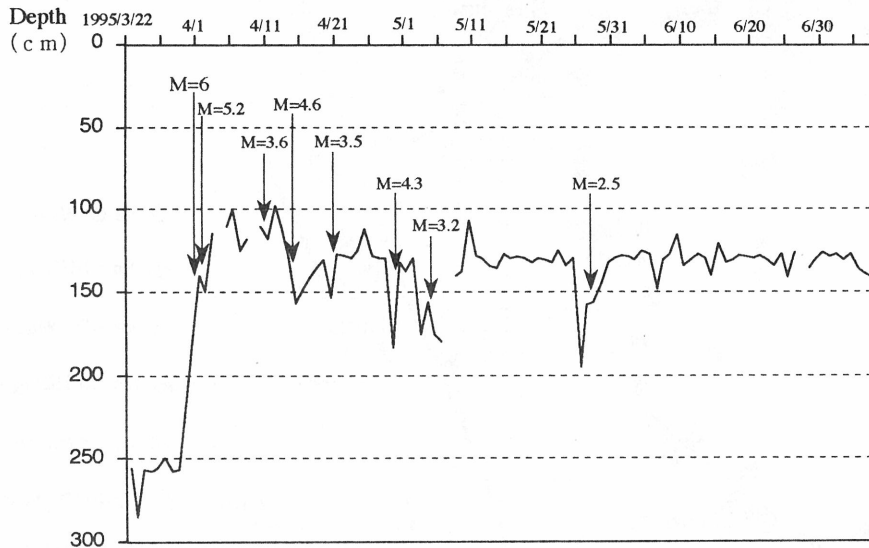


Fig.13a Water level change of Nakaki-yu(200 m deep well), Deyu Hot Springs before and after the 1995 Northern Niigata earthquake. Two days before the quake water level began to rise by 33 cm, one day before far more 44 cm rise and the time of the earthquake amounted to ca. 1 m rise from the ordinary level as precursory anomaly (measured by T.Kobayashi, Kawakami, 1995).

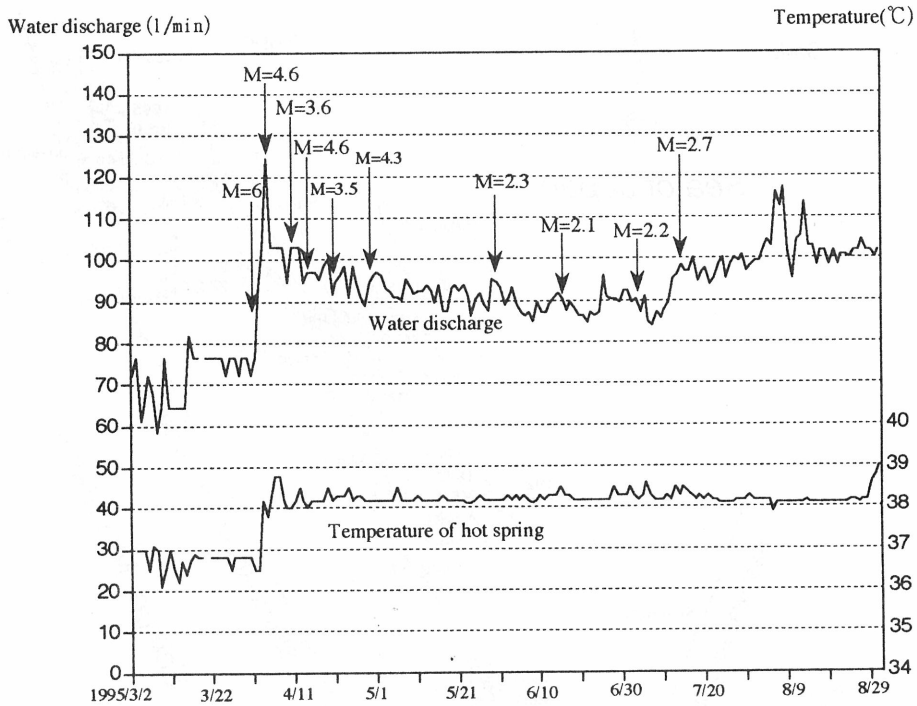


Fig.13b Thermal water discharge and temperature of Doshun-yu, Deyu Hot Springs before and after the 1995 earthquake, measured at ca. am 6.30 every morning(Kawakami, 1995). Anomalous increase of water discharge by 10.l/min. had been recognized 2 weeks before the 1995 earthquake. Kawakami recommended T.Kobayashi to check the water level of a thermal well as shown in Fig.13a (Kawakami, 1995). After the main shock, water temperature increased by 10°C.

4. 歴史被害地震と温度異常地帯

4.1. 信濃川地震帯の地震

1995年新潟県北部の地震の震央地帯が地下水の温度異常地帯と重なり合っていたことが明瞭になり、平野の伏在活断層の検出に消雪井戸水の調査が有効な手法であることが分かった。同様な調査を新潟県内の平野～盆地に広げ、総括して伏在活断層の分布を推定したのが図14である。図14には歴史被害地震の震央もプロットした。最近の地震では1904年六日町地震・1933年小千谷地震・1965年松代群発地震・1992年津南地震・1995年新潟県北部の地震、歴史地震では1670年西蒲原地震・1828年三条地震・1847年善光寺地震・1898年六日町地震などが、ジオプレッシャー熱水湧出を伴う活断層で発生している。大きな温度異常地帯が認められながら、大きな地震が発生していない地域は、新津地区、長岡市東部の悠久山断層と新発田-小出構造線の南端部に当たる堀之内・小出・浦佐の各地区、十日町断層の十日町地区で、どの断層が動くか、時期はいつかは分からないが、今後の地震発生に警戒を要する地帯である。水温異常地帯の長軸の長さとその地で発生した地震のマグニチュードとの関係を見たのが図15である。この関係は松田(1975)が国内の被害歴史地震で求めた関係式と類似し、温度異常地帯の長軸の長さからその地域で発生する地震のマグニチュードの推定ができることになる。

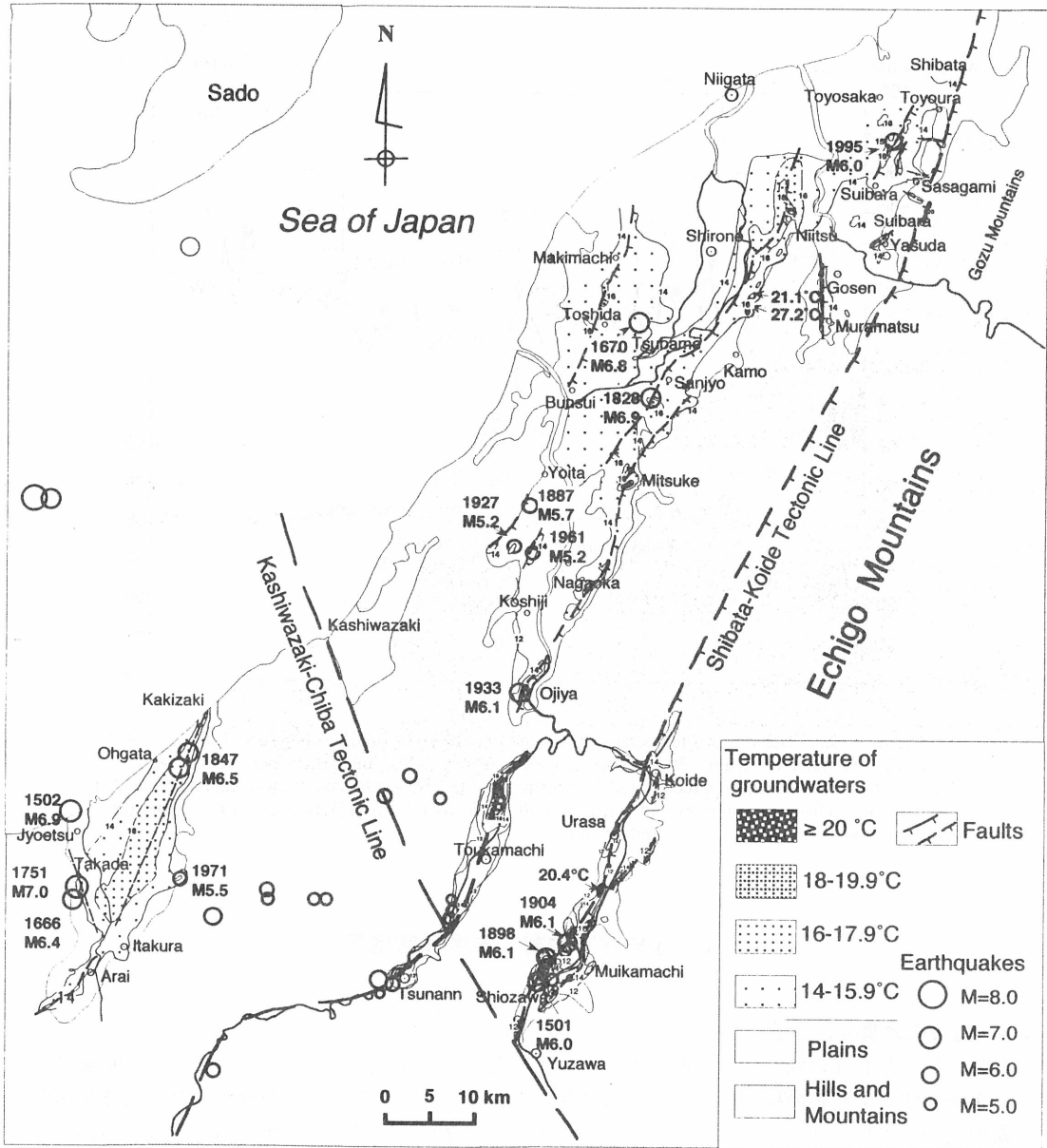


Fig.14 Map showing the distribution of buried active faults estimated by the measurement of temperature and water chemistry in the flat plains and basins of the Niigata Prefecture. Faults in the mountains and hills are not shown. The epicenters of the historical destructive earthquakes are given (Ōki, et al., 1998).

4.2. 高田平野の地震と伏在活断層

高田平野付近では、16世紀以来80~150年間隔でM7.5~6の大~中地震が繰り返し発生している。これらの地震に関係した活断層についてはほとんど分かっていない。高田平野の消雪井戸水の水温・水質を調べたところ、すでに地質構造から指摘されていた小谷(おたり)-新井構造線に沿って大きな温度異常が認められ、新井から柿崎までその長さは36kmにも達していることが分かった(図16)。高田の市街地区に震央が集中しているが、再来性など地震活動の特性に関する十分な検討はまだ行われていない。古文書による再検討が必要である。

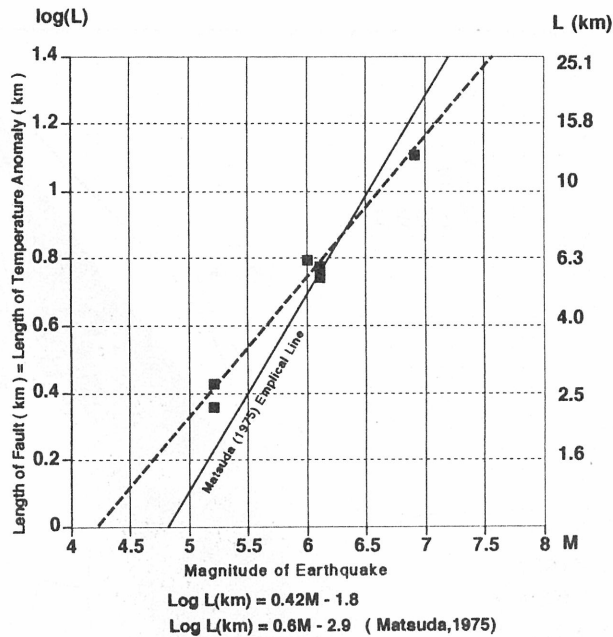


Fig.15 Diagram illustrating the relation between Magnitude of earthquake and length of fault defined by Matsuda (1975). The historical destructive earthquakes of the Niigata district are plotted using the length of temperature anomaly as length of fault. The result shows fairly good correlation with Matsuda's formula (Ōki, et al., 1998).

本州を横断する糸魚川-静岡構造線の南部は伊豆箱根地域で、石橋が指摘するように73年再来間隔で大地震が発生し、一方この構造線の北部に当たる上越地域では80年(～150年)間隔で顕著な地震が発生し、両者の地震発生は時代的にもほぼ同一時期に連動している。高田平野では1914年のM5.7の地震以来顕著な地震がまだ発生していない。次の高田地震について本格的な検討を急がなければならない。なお、高田平野ではジオプレッシャー熱水の特徴であるNa-Cl型の地下水は認められていないが、その理由は分からない。この付近の異常地下水はメタンガスを伴うNa-HCO₃型である。

5. おわりに

日本海東縁部には大陸側のアムールプレートと東北日本を乗せる北米プレート(またはオホーツクプレート)のプレート境界が南北に走り、このプレート境界に沿って大きな地震が発生している。この地震帯で石川(1994)は16世紀以来現在までの間に、100年の活動期との100年の静穏期が繰り返す再来間隔のあることを明らかにした。Ohtake(1995)は日本海東縁部の大地震の震源位置を再検討し、従来佐渡島の西を経て糸魚川-静岡構造線に結んでいたプレート境界を、新しいプレート境界が佐渡島の東を経て新潟市付近から信濃川に沿って内陸部に入り、長野盆地・松本盆地を経て糸魚川-静岡構造線につながっているとする説を提唱した。河内・大木(1997)は新潟県に発生した大地震の再検討を行い、1670年越後の地震は信濃川に沿う新潟平野で発生したことを明らかにした。このように大森(1922)が指摘した信濃川地震帯は地殻変動が激しく、東頸城丘陵・魚沼丘陵で中規

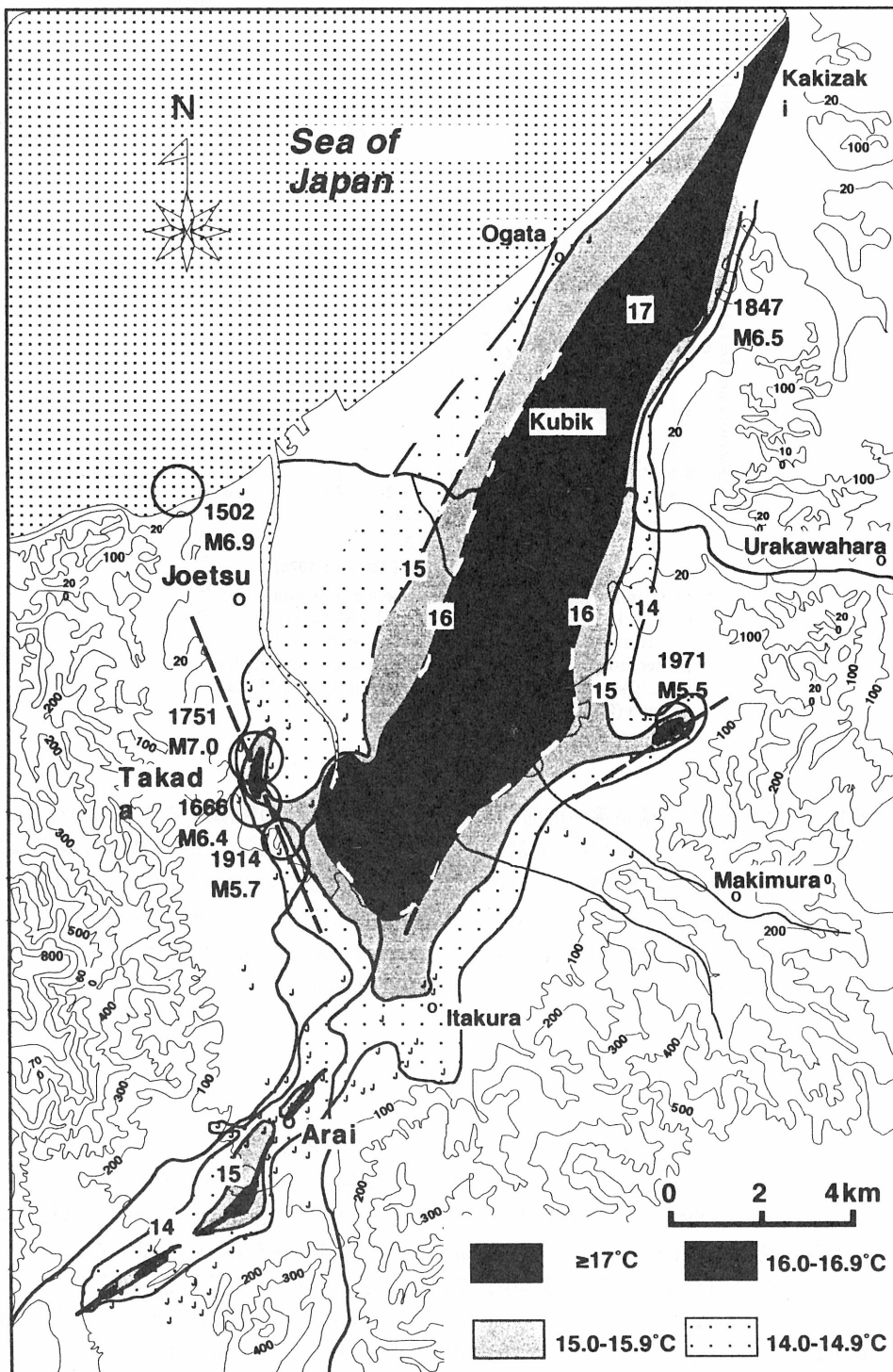


Fig.16 Map showing the distribution of temperature anomaly due to upward percolation of geopressed hydrothermal water in the Takada plain. Destructive earthquakes occurred repeatedly with 80 to 150 years interval since 16th century (Öki et al., 1998).

模の地震が繰り返し発生している。

1995年阪神淡路大震災が有馬一高槻構造線に属する沿岸部の伏在活断層の地震によって発生した。M7級の地震の予知は難しいとされるが、予知ができなくても、内陸部の活断層で発生する地震について、断層の危険がどの程度であるかを評価し、地震に強い街造りが強く求められるようになった。日本の都市は沿岸平野や盆地にあって、平野の下に隠れている活断層を見つけだすのは容易ではない。新潟平野の場合は、活断層から滲出するジオプレッシャー熱水がつくる異常地帯を消雪井戸水の調査によって簡単に伏在活断層の検出が可能であった。しかし、まだ平野の伏在活断層の平面的なイメージが描き出されたに過ぎない。今後はこのようにして求めた伏在活断層のより正確な位置や形状を地震探査・電磁気探査などにより求め、さらにトレンチ調査を実施して活断層の経歴や活動度を明らかにしなければならない。

新潟県は古くから石油・天然ガスの産出で知られている。地表から数百mの深さまでに貯留されていた石油は断層破砕帯を通してジオプレッシャー熱水の移動によって地下深部から運び出されたものであり、この作用は今も続いている。したがってジオプレッシャー熱水の温度異常が断層破砕帯に沿って形成されているのは当然のことと言えよう。推定される活断層は地下どの位に深さまで達しているのだろうか。地震を起こす地殻歪みが地震として解放されるときジオプレッシャー熱水の役割を知りたいと思う。

地震予知の立場からみるとジオプレッシャー熱水異常地帯は地下深部の歪みをのぞく窓であり、地震の前兆の現れやすいつばである。ジオプレッシャー型温泉に各種の観測装置を配置し、地殻の挙動の情報と合わせて地震予知に貢献できるように要望したい。

6. 謝辞

大木に新潟大学で教育研究の機会を与えてくださったのは青木滋新潟大名誉教授である。同大学積雪地域災害研究センター佐藤修教授は、この研究を進めるに際し実験室の利用を快く認められ、地すべり地帯の地下水について色々教えてくださった。武藤輝一元新潟大学学長、大塚清二元新潟大学経理部長、益本俊治元主計課長には、この研究を積極的に支援していただいた。地震予知研究総合振興会萩原尊礼東京大学名誉教授、同振興会高木章雄東北大学名誉教授、佃為成東京大学地震研究所助教授、石川有三気象研究所第3研究室長、渡部直喜新潟大学積雪地域災害研究センター講師、鈴木幸治同センター技官、周藤賢治同大学理学部教授、日下部実岡山大学固体地球研究センター教授、大竹政和東北大学教授、小林智夫元東北電力新潟支店長、日野和夫元同支店長代理、水谷宣明(株)日さく技術研究所長、伊藤俊方(株)日さく新潟支店調査部長からは有益な支援や助言を頂いた。新潟大学経済学部学生川辺千夏嬢は多くの図面の作成を引き受けてくださった。新潟県消防防災課、津南町役場、笹神村役場、小国町役場、水原町役場、津南町川津屋旅館、柏崎市花栄寺、鯖石川ダム管理事務所、豊浦町市島邸、笹神村徳昌寺、豊栄市本田栄次先生は、地震観測や野外調査に御協力くださった。本研究には、文部省科研費課題番号07554019(代表者大木靖衛)、東京海上火災各務財団、および上越市田中産業(株)田中利之社長及び(財)産業地質科学研究所中山輝也理事長からの研究助成金を使用させていただいた。本特集号の西村進編集委員長ならびに2名の隠名査読者の助言は原稿を完成させるために大変役立った。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

(1996年日本地震学会秋季大会、日本地質学会秋季大会、第30回万国地質会議北京大会、

IASPEI Regional Assembly in Asia, Chinaで発表。)

文献

- 服部修一(1990) 鍋立山トンネルの施行について, 新潟応用地質研究会誌, 35, 2-24.
- 平野富雄・小鷹滋郎・栗屋徹・大山正雄・広田茂・大木靖衛(1976) 松田寄(やどろぎ)の塩化カルシウム型温泉, 神奈川温泉地研報, 7,93-104.
- 石川有三(1990) 日本列島内陸部の地震活動空白域—序論. 月刊地球, 6, 355-361.
- 石川有三(1994) 残された空白域, 月刊海洋号外7号,102-107.
- 石川有三・浜田信生(1985) 再決定震源に基づく日本の地震活動—その1, その2—. 地震学会予稿集, No.2, 15-16.
- Jones,P.H.(1970) Geothermal resources of the northern Gulf of Mexico basin. UN Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources, Pisa Proceedings (Geothermics, Spec. Iss.2), v.2,pt. 1, 14-26.
- 春日功(1967) 松代地震による加賀井温泉の変化, 地学雑誌, 76, 76-86.
- 川上貞雄(1995) 1995年新潟県北部地震と温泉・地下水の異常について. 月刊地球, 17, 758-761.
- 河内一男(1995) 新潟県北部の地震の前震に伴った鳴動, 月刊地球, 17, 774-778.
- 河内一男・大木靖衛(1996) 1670年西蒲原地震($M6\frac{3}{4}$)の震央の再検討, 地震2, 49, 337-346.
- Kitano, Y., Yoshioka, R., Okuda, S. and Okunishi, K. (1967) Geochemical study of ground waters in the Matsushiro area, pt.1: Geochemical composition of ground waters. Bull. Disas. Prev. Inst. Kyoto Univ.,v.17, pt.2, 47-71.
- 熊井久雄(1986) 地下水の動向, 1985年長野市地付山地すべりの災害調査研究(代表者河上浩), 自然災害突発災害研究成果B-60-5,78-88.
- McKenna, T.E. and Sharp, Jr. J.M. (1997) Subsurface temperatures, fluid pressures, and salinities in the Rio Grande Embayment, Gulf of Mexico basin, USA. Proceed.30th International Geological Congress, China.
- 松田時彦(1975) 活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震, 28,269-283.
- Mogi, K. (1988) The mechanism of the occurrence of the Matsushiro earthquake swarm in central Japan and its relation to the 1964 Niigata earthquake. Tectonophysics 159, 109-119.
- Myers, J.D., (1968) Differential pressures, a trapping mechanism in Gulf Coast oil and gas fields. Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. Trans., 18, 56-80.
- 中村一明(1971) 松代地震から学んだこと, 朝日科学, 10, 127-133.
- 中村一明(1989) 火山とプレートテクトニクス, 東大出版会, 東京.
- Ohtake, M. (1995) A seismic gap in the eastern margin of the Sea of Japan as inferred from the time-space distribution of past seismicity. The Island Arc, 4, 156-165.
- 大木靖衛(1979) 箱根火山と温泉, 164頁, 神奈川合同出版, 横浜.
- 大木靖衛・佐藤修・青木滋(1992) 北部フォッサマグナのジオプレッシャー熱水系に起因する地震と地すべり, 月刊地球, 号外5, 121-125.
- 大木靖衛・佐藤修・渡部直喜・鈴木幸治・青木滋(1993) 長野市地付山地すべりとジオプレッシャー型熱水系の関係について(要旨)日本地質学会第100年学術大会講演要旨集, 695.
- 大木靖衛・徐輝竜・渡部直喜・鈴木幸治・佐藤修(1995) 1995年新潟県北部地震の震度分布と伏在活断層について, 月刊地球, 17, 766-773.
- 大木靖衛・徐輝竜・渡部直喜・鈴木幸治・佐藤修・河内一男(1996) 1995年新潟県北部の地震について, 第四紀研究, 35, 153-163.
- Okii, Y., H. Xu, N. Watanabe, K. Suzuki and O. Sato (1995) 1995 Northern Niigata earthquake of M 6.0 and a buried fault imaged by distribution of seismic intensity. Ann. Rep. Saigai-ken, Niigata Univ, 17, 69-82.
- Okii, Y., Xu, H., Watanabe, N., Suzuki, K., and Sato, O. (1996) Geopressured hydrothermal anomalies appeared in

- the Niigata plain indicating buried active faults generated destructive earthquakes. The Abstracts of the 1996 IASPEI Regional Assembly in Asia, 202-203, Tangshan, China.
- 大木靖衛・徐輝竜(1997)消雪井戸地下水温度・水質から推定され1995年新潟県北部地震の伏在活断層, 産業地質科学研究所年報, 8, 9-19.
- 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年報, 9, 21-39.
- 大森房吉(1921)大正7年信州大町地方激震調査報告, 震災予防調査会報告第94号, 震災予防調査会.
- Roberts, S.J. and Nunn, J.A. (1996) Expulsion of abnormally pressured fluids along faults. *Jour. Geophys. Res.*, 101(B12), 28231-28252.
- 酒井慎一・橋本信一・小林勝・酒井要・羽田敏夫・卜部卓・東田進也(1995)1995年新潟県北部地震の余震分布, 月刊地球, 17, 779-783.
- 佐藤修(1981)地すべり地の陸水の水質(1)虫亀, 高倉地すべり, 新潟大災害研年報3, 47-58.
- 佐藤修(1982)地すべり地の陸水の水質(2)濁沢, 上馬場地すべり, 新潟大災害研年報4, 77-86.
- 佐藤修(1986a)地下水の水質, 1985年長野市地付山地すべりの災害調査研究(代表者河上浩), 自然災害突発災害研究成果B-60-5, 94-107.
- 佐藤修(1986b)長野県地附山地すべりの地下水の水質, 新潟大災害研年報8, 57-70.
- 白石健男(1972)新潟地区における掘さく障害, 石油技術協会誌, 37(6号), 338-339.
- Tsukuda, T. and Ōki, Y. (1994) A destructive shallow small earthquake-the 1992 Tsunan earthquake of M4.5 in southern Niigata prefecture, central Japan-. *Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ.* v.69, 1/2, 19-38.
- 渡辺見二・山田哲雄(1986)裾花凝灰岩層の変質作用, 1985年長野市地付山地すべりの災害調査研究(代表者河上浩), 自然災害突発災害研究成果B-60-5, 29-38.
- 渡辺満久・宇根寛(1985)新潟平野東縁部の活断層と山地の隆起. 地理評, 58A, 536-547.
- 渡部直喜・鷲津史也・大木靖衛・佐藤修・日下部実(1996)新潟県松之山地すべり地のNa-Cl型地下水の起源, 新潟大災害研年報, 18, 61-92.
- 渡部直喜・大木靖衛・佐藤修(1995)新潟県松之山地すべり地域の地下水の水質について, 地すべり, 32, 32-40.
- White, D.E., Muffler, L.P.J. and Truesdell, A.H. (1971) Vapor-dominated hydrothermal systems compared with hot-water systems. *Econ. Geol.*, 66, 954-973.
- Xu, H., Ōki, Y., Sato, O. and Watanabe, H. (1997) Geochemistry of groundwaters in the Utsunomata landslide area, Maki village, Higashikubiki district, Niigata prefecture. *Jour. Japan Landslide Society*, 34(2), 25-34.
- Xu, H., Ōki, Y. and Ito, T. (1998) The 1995 northern Niigata earthquake of M5.5 with special attention to a geopressured hydrothermal system. *The Island Arc*, 7, 647-659.