

水文環境調査

堆積平野の水理地質環境

丸井敦尚¹・越谷 賢¹・宮越昭暢¹・内田洋平¹・町田 功¹・吉澤拓也¹・伊藤成輝¹

キーワード：沿岸域堆積平野, 堆積構造, 温度分布, 地下水環境, 水理地質

要旨

新潟平野と石狩平野の水理地質環境を高精度に把握し, 活断層や潜在する断層との関連について確認するため, 次のステップに従って地下水研究を実施した。まず, 沿岸域堆積平野の水理地質構造を既存のデータベース, 基礎試錘データや地震探査データ等から地球統計学的手法に基づき推定し, 三次元水理地質モデルを作成した。つぎに地下温度データ等から帯水層区分や地下水の流動範囲などをとらえ, 評価する水理地質構造の中での地下水流動領域を確定する。最終的に, 地下水質や同位体データなどを用いて, 地下水の流動解析を実施し, 水文環境を把握することを目的としている。本研究では初年度にあたる今年度, 新潟平野においては地下温度分布研究まで, 石狩平野においては堆積層の三次元水理地質構造モデリングまでを実施した。

1 新潟平野と石狩平野の三次元水理地質構造

1 はじめに

沿岸域の地下水は, 塩水と淡水のそれぞれが異なるドライビング・フォースを持って存在しているため, その環境は複雑である。また, 浅層部に断層などの構造が存在する場合, 地下水の流動はその影響を受け, 地下水環境をより複雑にする。本調査においては, 対象となる新潟平野と石狩平野についてそれぞれの三次元水理地質構造を把握するため, 当該モデルを作成した。

2 三次元水理地質構造モデルの構築

対象地域においては, 三次元水理地質構造を既存資料から推定し, まず三次元モデルを作成した。これ

により帯水層の存在や大深度流域界を推定し, 広域かつ大深度地下水流動解析の実施を可能にできるようにしている。実際には, 三次元水理地質構造モデルに現地実測データをオーバーレイし, これをクリッピングポイントとする地下水流動解析を行うことで, 沿岸域の地質・活断層構造に起因する地下水環境の特異性を明確にする予定である。本年度は, 新潟・石狩両地域の三次元水理地質構造モデルを作成し, 続けて新潟平野においては現地実測データによる地下水流動の推定を実施した。次年度は同様のデータ収集を石狩地域で行うと同時に, 両地域において最終的な地質・活断層構造に起因する地下水環境の把握・推定を取りまとめることにしている。両対象域のモデリングに使用されたおもなデータは以下に示すとおりであり, 第1図, 第2図に示す三次元水理地質構造モデルを作成している。尚, 作図は地表での地質境界を決定した後に地下地質をボーリングデータ等により決定するが, データ補完に関してはクリギング法を採用している。両図のなかでの時代区分は鹿野ほか(1991)に従っている。具体的に, N1 とは前期中新世中期～中期中新世前期(22-15Ma), N2 とは中期中新世中期～後期中新世前期(15-7Ma), N3 とは後期中新世後期～鮮新世(7-1.7Ma), Q1 とは前期更新世(1.7-0.7Ma), Q2 とは中期更新世以降(0.7Ma～), Top とは現在の地形面をそれぞれ指している。

・ボーリングデータ

地質調査所(1998) いどじびき(現在非公開)
天然ガス鉱業会(1969)日本の石油・天然ガス資源,
天然ガス鉱業会, 東京, 283 p.
天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会(1982)新版
日本の石油・天然ガス資源, 天然ガス鉱業会・

¹産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地圏資源環境研究部門 地下水研究グループ (AIST, Geological Survey of Japan, Institute for Geo-Resources and Environment, Groundwater Research Group)

大陸棚石油開発協会, 東京, 455 p.
天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会 (1992) 改訂
版日本の石油・天然ガス資源, 天然ガス鉱業会・
大陸棚石油開発協会, 東京, 520 p.
北海道立地質研究所 (2004) 北海道市町村の地熱・
温泉ボーリングデータ集, 220p.
坂川幸洋・梅田浩司・鈴木元考・梶原竜哉・内田洋平
(2004) “日本の坑井温度プロファイルデータ
ベース”, 地震, 第 2 輯, Vol.57, p.63-67.

・地質図データ

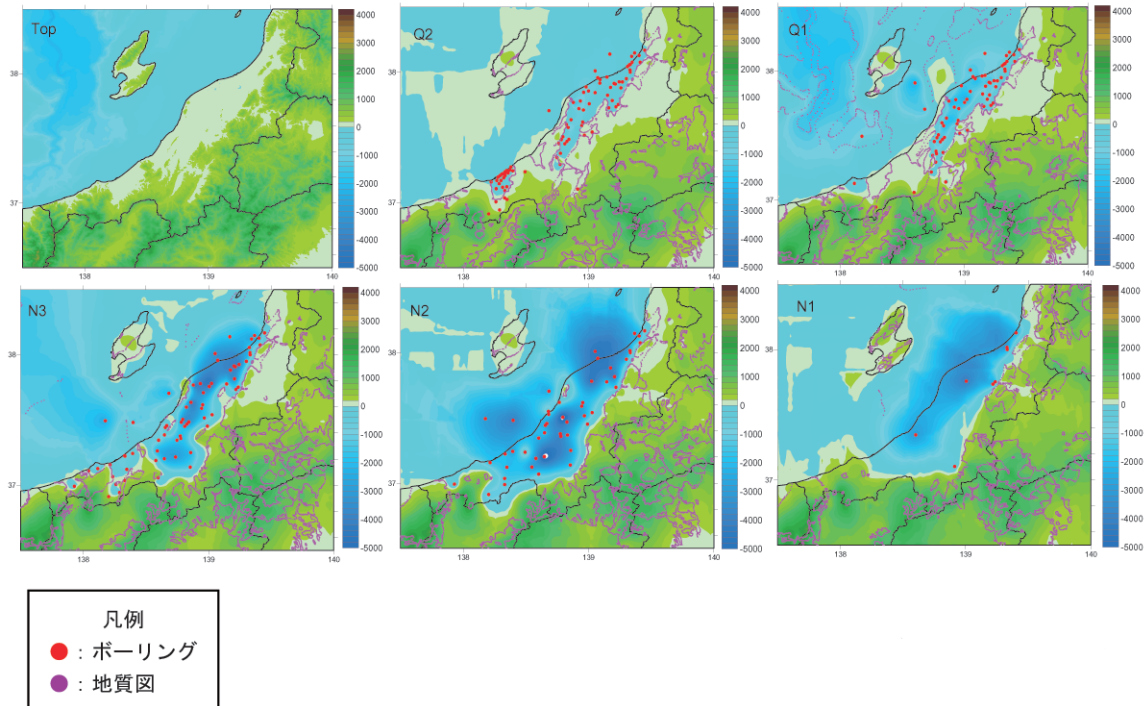
産業技術総合研究所地質調査総合センター (編)
(2003) 100 万分の 1 日本地質図第 3 版 CD-
ROM 第 2 版, 産業技術総合研究所地質調査総
合センター, 数値地質図 G-1.
地質調査所 (編) (2001) : 日本周辺海域音波探査デ
ータベース (CD-ROM 版) . 数値地質図 M-1,
地質調査所 .

3 まとめ

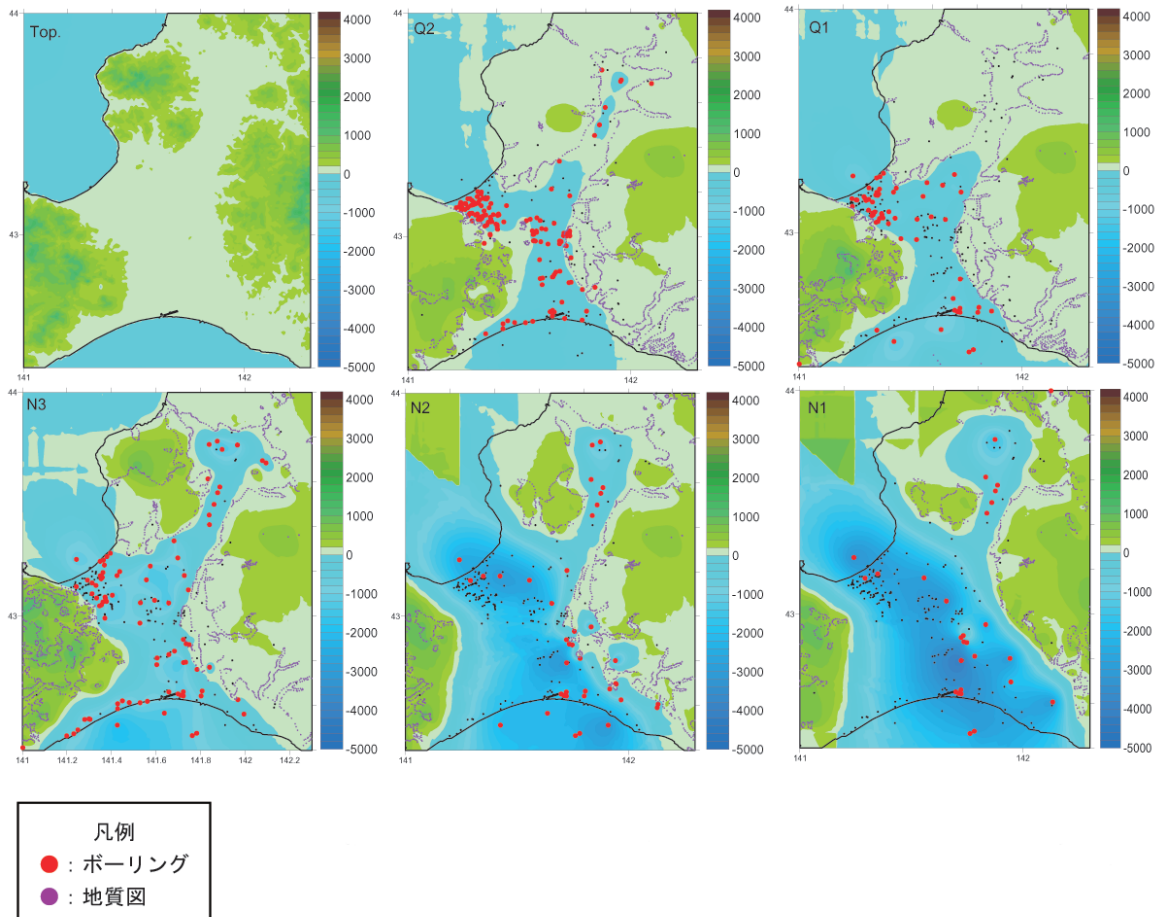
新潟・石狩両地域の三次元水理地質構造をモデル
化し, 第三系以降の堆積層の状況を把握することが
できた. 両地域とも 3000m を超える堆積層があり,
それぞれの地域は N1 を見る限り大規模地下水盆と
確認することができた. また, 第四系以浅に関して
は N1 レベルの大規模地下水盆が複数の堆積盆 (地
下水盆) に区分されることが判明した. 今後に予定
される実証的なデータ取得ならびに解析や地下水環
境の把握・推定に関しては, この基礎的な三次元水
理地質構造モデルに基づき, データの取得・解析等
を実施する予定である.

文献

鹿野和彦, 加藤碩一, 柳沢幸夫, and 吉田史郎 (編),
1991, 日本の新生界層序と地史: 地質調査所報
告, v. 274, p. 114p.



第 1 図 新潟平野における三次元水理地質構造解析結果（標高 m で表示）.



第 2 図 石狩平野における三次元水理地質構造解析結果（標高 m で表示）.

II. 地下温度を指標とした新潟平野の水理地質構造評価

1 はじめに

地下水流動は、地形と地質の自然条件に支配される。都市域では地下水揚水などの人為影響を受けているが、影響深度は限定的である。地下水流動に対する地形と人間活動の影響は深度と共に減衰するため、浅部よりも深部の地下水環境は地質条件の影響を相対的に強く反映している。例えば透水性の分布が異なる地質条件の場合、境界となる地質構造を境として、水質や地下水温等の地下水データの分布に変化が認められる。これは地質境界に従って地下水流動が異なることを示しており、地下水データの広域分布から地下水流動の境界となる地質構造を3次元で把握することが可能となる。

地下水流動の境界となる地質構造には、層序境界の他、断層がある。断層は地下水流動を阻害するだけでなく、水みちとして流動を卓越させる場合があり、地下水データの広域分布には、断層の沿った地下水データの anomalies の分布が確認できる。このような地下水データ分布から断層の分布推定することが可能であるが、一般に地下水データの取得地点は井戸の分布に制限され、広域分布の把握が困難である問題点があった。

本研究では、地下温度を指標とすることで、この問題点の克服を試みた。地下温度は地下水流動評価の指標として古くから適用されており、地下水水質など、他の流動指標と比較して地域的・深度的な制約を受け難く、広域への適用に利点がある。また、地下水調査において必須となる基本項目であり、蓄積されたデータ数が豊富である。農業用水・都市用水などの比較的浅部の地下水から、工業用水や温泉水などの深部の地下水の温度データを併せて評価することが可能であり、深度方向の地下温度 anomalies の把握や石油や天然ガス開発地域においては大深度の地下温度データの活用も期待できる。

本研究は新潟平野における地下温度分布を、既存データの再解析により把握する。解析に適用するデータは、GSJ が有する地球科学データベースを活用して収集する。浅部（深度 30～200 m）の地下温度データの把握には、地下水データベースである「いどじびき (Marui, 2000)」を活用し、それよりも深部の地下温度データには「地温勾配値のコンパイル (田中ほか, 1999)」を活用する。これらデータの解析から

新潟平野における地温勾配分布を把握し、その中から地質条件の影響を抽出することで地下温度を指標とした地質構造の評価を試みる。

2 新潟平野における地下温度分布と断層評価

新潟平野における地下温度分布に関して、高橋 (1967) は深度 150 m 程度までの浅部を対象とした地下水調査に認められた水温を報告している (第 1 図)。新潟平野の地温勾配は、北陸地方の平野と比較し、地下水温と地温勾配が共に低い。阿賀野川下流地域においては、水質が要因で利用率が低い、平野東部の五泉地域には自噴帯が認められ水質も良く、地下水の利用が比較的進んでいる。地下水温は深度 20～45 m で 12.4～14.5℃、深度 80～150 m で平均 12～13℃の低温であり、地温勾配も低い。この傾向は長岡地域においても認められるが、地下水温は 40 m で 12.5℃程度、90 m で 14℃程度であり地温勾配は相対的に高くなる。深部の地下温度に関しては、乗富 (1975) が平野内 850 本の石油・天然ガス試掘井で測定された地下温度から平野の地温勾配分布を求めている (第 2 図)。地温勾配は新潟市周辺では 2.5～3.0℃/100m を示しており、東の五頭山地および越後山地山麓では 3.0℃/100m 以上に上昇する傾向が認められる。堆積層が厚く堆積している平野西部～中央部では、地下温度は周囲よりも相対的に低く、高橋 (1967) が報告する浅部の地温勾配の分布傾向と合致する。

近年の研究では、新潟平野における地下水データの広域分布にデータ異常域の存在が確認されており、ジオプレッシャー熱水との関係が指摘されている。大木ほか (1999) は、消雪井戸を利用して把握した新潟平野における地下水の水質・温度分布を報告している (第 3 図)。深度 100 m の通常の地下温度は 13℃程度であるが、15℃以上の異常高温域が認められ、1995 年新潟県北部地震の震度 6 域と異常高温域の分布がほぼ一致することを指摘した。異常高温域の地下水質は、周囲の浅部地下水よりも溶存成分濃度が高く、異なる性状の地下水が存在していると考えられる。震度 6 域には伏在断層の存在が推定されており、異常高温域は断層沿いに上昇するジオプレッシャー熱水により形成された可能性を指摘した。高橋 (1967) および乗富 (1965) の事例には、スポット的に分布する異常高温域は確認されていないが、これらの研究で報告されている山地に向かい地温勾配が高くなる傾向

は、山地と平野部の境界に存在する断層など、何らかの地質構造の影響を示唆している可能性がある。

3 研究方法

GSJ・AISTが有するデータベースを活用し、新潟平野における地下温度データを収集した。データの分布域を検討し、新潟平野の中でも、データ密度の確保できる信濃川下流と阿賀野川下流～中流を含む平野中央部（北緯 37 度 33 分～北緯 38 度 00 分，東経 138 度 40 分～139 度 16 分）を本研究の研究対象地域とした（第 4 図）。深度 300m 以浅の浅部地下温度に関しては、「いどじびき」（Marui, 2000）に含まれる地下水データから、31 地点の温度データを抽出した（第 1 表）。深度 300m 以深の深部地下温度に関しては、「地温勾配値のコンパイル」（田中ほか，1999）から、地下温度データを引用した（第 2 表）。「いどじびき」では農業・工業用水や消雪井戸を含む生活用水用途の井戸、「日本列島地温勾配図」では工業用水・温泉井や石油・天然ガス孔井で測定された地下水の水温を収録している。これらの井戸ではスクリーンが複数設置されており、地下水温度データの深度を確定することができないため、井戸孔底深度を地下温度データの深度と仮定する。また、揚水した地下水の水温を吐出口で測定したものを「水温」として取り扱っており、一般に揚水過程で温度が低下している可能性がある。しかしながら、本研究で対象とした井戸においては揚水量も多く通常使用している井戸であり、この影響は小さいと考えられる。

4 解析結果および考察

浅部（第 1 表）と深部（第 2 表）の地下温度データを用いて、新潟平野における地温勾配を求めた。熱伝導率一定、発熱量を無視できると仮定すると、ある深度の温度 T は、以下のように近似できる。

$$T = \nabla T \times d + T_s \quad (1)$$

∇T は地温勾配 [$^{\circ}\text{C}/\text{m}$]、 d は深度 [m]、 T_s は地表温度（地表面直下の温度） [$^{\circ}\text{C}$] である。新潟平野の浅部データ（第 5 図）より最小二乗法を用いて、 ∇T と T_s を求めると、

$$\nabla T = 0.0178 \text{ [}^{\circ}\text{C}/\text{m}] = 1.78 \text{ [}^{\circ}\text{C}/100\text{m}], \quad (2)$$

$$T_s = 12.9 \text{ [}^{\circ}\text{C}]$$

となる。地表温度 (T_s) に関して、アメダスの観測地点「新潟」の 1970～2008 年までの年平均気温の平均値は 13.7°C （気象庁，2009）であり、浅部地下温

度から求めた $T_s = 12.9\text{[}^{\circ}\text{C}]$ よりも高い。これは本地域が積雪地域であり、冬季に地表面が雪に覆われるため、地表面温度が 0°C 程度に保たれることが一因であると考えられる。

また、第 5 図に示すように、地下温度が周囲よりも高い地点が確認された。i19 は深度 40m で 20.5°C 、i20 は深度 180m で 23°C を示し、共に信濃川河口に位置する。2 地点の温度と深度から地温勾配を求めると $\nabla T = 0.0179 \text{ [}^{\circ}\text{C}/\text{m}]$ であり、温度は高温であるが地温勾配には周囲の差が認められず、高温域は深度 40～200m 程度まで連続して分布する構造を有している。これら 2 地点の大木ほか（1999）が指摘している異常高温域との関連性を検討するためには、周辺データの更なる収集と解析・評価が必要であろう。

次に、新潟平野の浅部データ（第 1 表）と深部データ（第 2 表）を用いて、平野の地温勾配を求めた。第 6 図に示す両データの比較から、最小二乗法により ∇T と T_s を求めると、

$$\nabla T = 0.0259 \text{ [}^{\circ}\text{C}/\text{m}] = 2.59 \text{ [}^{\circ}\text{C}/100\text{m}] \quad (3)$$

$$T_s = 11.1 \text{ [}^{\circ}\text{C}]$$

となり、 $2.59^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ が新潟平野中央部の平均的な地温勾配と考えられる。この値は浅部データから求めた条件 (2) の地温勾配と比較して高い。条件 (2) においては地下水流動の影響がより強く反映される浅部データのみを用いたため、地下水流動の影響が相対的に小さくなる深部データも併せて考慮した (3) の条件よりも低い地温勾配を示した可能性がある。

地温勾配の分布傾向を評価するために、深部データ地点から最も近い浅部データを抽出し、比較を行った（第 7 図）。第 3 表に浅部と深部データの対応関係と最小二乗法により計算した ∇T と T_s を示す。地表面温度 T_s は、海岸部の g51 で他の 5 地点よりも 1°C 以上高い。g51 は新潟市の市街地に位置しており、他 5 地点よりも都市化された地域に位置していると言える。地温勾配の計算に用いた浅部データは地下水流動の影響に加えて、地表面温度の影響を受けていると考えられ、地表面の土地利用や被覆形態の影響で都市域の T_s が高くなった可能性がある。地温勾配 ∇T に関しては、最も海岸側に位置する g51 において $0.024^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 、内陸側に位置する g52、g54 の $0.025^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 、 $0.026^{\circ}\text{C}/\text{m}$ であり、海岸から内陸に向かって地温勾配が上昇する傾向を示している。この傾向は山地側にも連続しており、角田・弥彦山地に近い g53 では $0.029^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 、越後山地に近い g56 では $0.032^{\circ}\text{C}/\text{m}$

を示し、平野の海岸部と比較して内陸、特に山地側では地温勾配が高くなる傾向が認められる。これらの山地では、第三系基盤が地表面に露出しており、山地周辺地域では基盤深度は相対的に浅い。一般に第三系基盤においては、帯水層に相当する第四系堆積層と比較し、相対的に熱伝導率が高いと考えられる。また、このような堆積盆の構造に加えて、角田・弥彦山地西側には新潟平野西縁断層帯、越後山地北西側や新津丘陵には複数の断層が存在することが指摘されており、山地側における地温勾配の上昇傾向の要因となっている可能性がある。

5 まとめ

新潟平野、特に信濃川下流と阿賀野川下流・中流域を含む平野中央部を対象として、既存地下水データの再評価による浅部地下温度の分布傾向の把握、および浅部と深部データによる地温勾配の推定を行った。浅部地下温度分布には信濃川河口付近において、高温域が認められた。この地点の地温勾配は他地点と同程度であり、高温域は深度 200m 以浅に連続して分布していると考えられる。

また、浅部と深部データの比較から求めた地温勾配は、浅部データのみから求めた地温勾配よりも相対的に地下水流動や地表面温度の影響が小さく、地質条件が強く反映されている。本地域の平均的な地温勾配は 0.0259℃/m 程度と推定され、海岸部では勾配が小さく、内陸に向かい高くなる傾向が認められた。特に第三系基盤深度が浅く断層が存在する角田・弥彦山地西側や越後山地北西側で地温勾配が高い。本地域においてはジオプレッシャー熱水域の存在が確認されており、異常高温域と震源分布および伏在断層の位置の関連が指摘されている。本研究では既存データの再評価により高温域および地温勾配の分布傾向が推定されたが、この結果を基に地域を限定し、更に詳細な検討を実施することで、活構造を含めた地質構造評価の実現が期待される。

文献

Oki, Y., Xu, H., Watanabe, N., Suzuki, K. and Saito, O.

(1996) : Geopressed hydrothermal anomalies appered in the Niigata plain indicating buried active faults generated destructive earthquakes. The Abstracts of the 1996 IASPEI Regional Assembly in Asia, pp.202-203, Tangshan, China.

Marui, A. (2000) : The national well and hydrology database of the Geological Survey of Japan, and its handling software "Well-King Dictionary" (in Japanese, Idojibiki). Journal of Japanese Association of Hydrological Sciences, 30-1, pp.15-22.

大木靖衛・徐輝竜・石坂信之・河内一男 (1999) : 信濃川地溝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. 温泉科学, 48, pp.163-181.

気象庁 (2008) : 気象統計情報 <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/>

高橋稠 (1967) : 地下水調査地域にみられる水温の総合的研究. 地質調査所報告, 219, pp.1-41.

田中明子・矢野雄策・笹田政克・大久保泰邦・梅田浩司・中司昇・秋田藤夫 (1999) : 坑井の温度データによる日本の地温勾配値のコンパイル. 地質調査所月報, 50, pp.457-487.

第1表 浅部地下温度データ一覧.

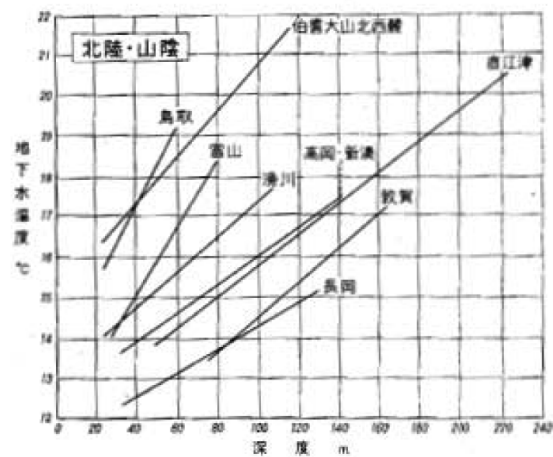
ID	経度(度)	緯度(度)	使用目的	井戸深度(m)	水温(℃)
i01	139.19	37.74	酒造用	55.2	12
i02	138.83	37.75	用水井	80	16.5
i03	138.90	37.67	消雪用水	125	16
i04	138.90	37.67	雑用水	132	15
i05	138.90	37.62	消雪用	87	13
i06	138.90	37.62	消雪用	97	13
i07	138.90	37.63	消雪用	90	13
i08	138.93	37.62	-	70	13.1
i09	138.92	37.58	消雪用	60	13
i10	138.95	37.62	雑用水	100	14
i11	138.95	37.62	冷却水	100	16
i12	138.95	37.62	冷却水	100	15
i13	138.98	37.65	消雪用	70	13
i14	138.97	37.62	消雪用	70	15.5
i15	138.97	37.62	消雪用	79.5	16
i16	138.93	37.58	消雪用	62	13
i17	138.85	38.47	消雪用	104.5	14
i18	138.85	38.45	消雪用	45	13.5
i19	139.05	37.92	-	40	20.5
i20	139.07	37.93	-	180	23
i21	139.07	37.92	さく井	30	15
i22	139.07	37.92	工業用水	30	13.5
i23	139.07	37.92	-	30	14
i24	139.07	37.92	-	30	14
i25	139.05	37.92	水源井	60	14
i26	139.10	37.93	-	30	13.5
i27	139.05	37.90	-	184.3	17.5
i28	139.02	37.83	-	205	15.5
i29	139.08	37.70	水源用	70	13
i30	139.08	37.70	水源用	110	16.5

第2表 深部地下温度データ一覧.

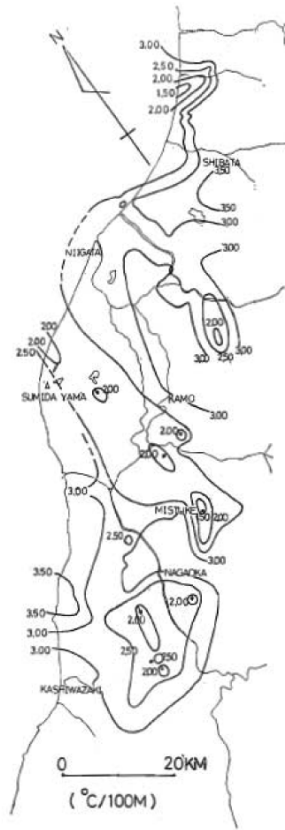
ID	経度(度)	緯度(度)	深度(m)	温度(℃)
g051	138.99	37.87	5007	136
g052	138.95	37.76	5015	137
g053	138.88	37.77	6310	197
g054	139.02	37.75	4903	138
g082	139.18	37.88	4625	146

第 3 表 浅部と深部データの比較における対応関係と解析結果.

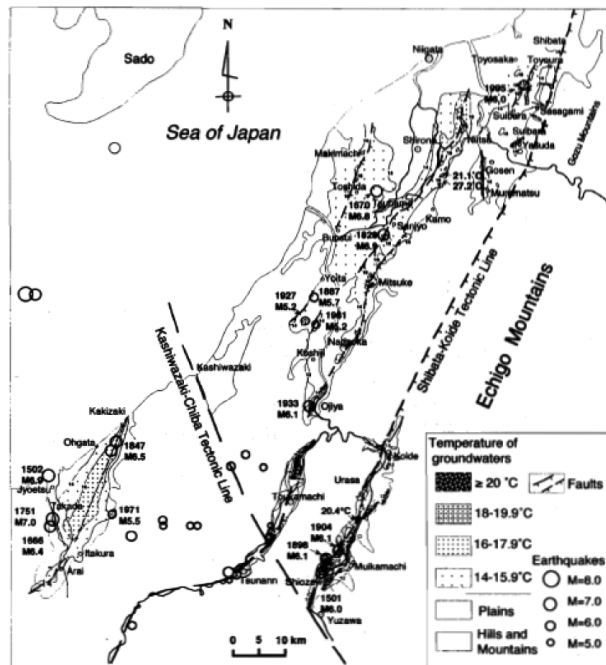
深部データ	浅部データ	∇T [°C/m]	T_s [°C]
g51	i17	0.024	13.8
	i18		
	i19		
	i20		
	i21		
	i22		
	i23		
	i24		
	i25		
	i27		
g52	i05	0.025	12.0
	i06		
	i07		
	i08		
	i09		
	i10		
	i11		
	i12		
g53	i02	0.029	12.5
	i03		
	i04		
g54	i13	0.026	12.1
	i29		
	i30		
g56	i01	0.032	10.3
g82	i26	0.028	12.7



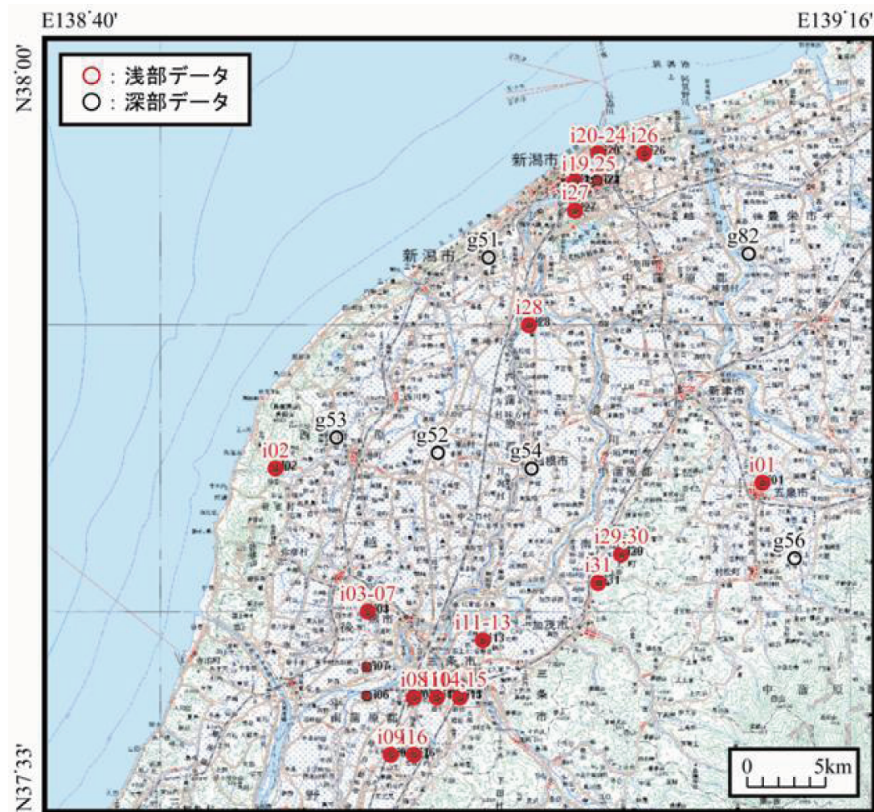
第 1 図 北陸地方の地温勾配 (高橋, 1967).



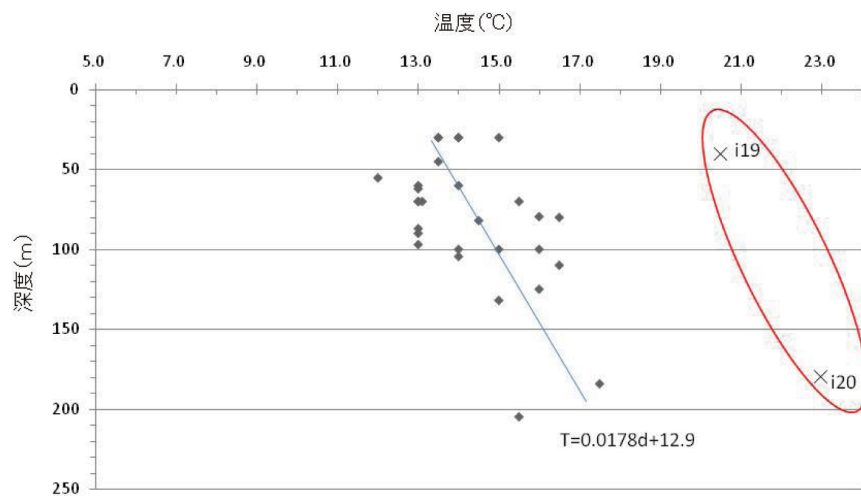
第2図 石油・天然ガス孔井データから求めた新潟平野の地温勾配 (乗富, 1975).



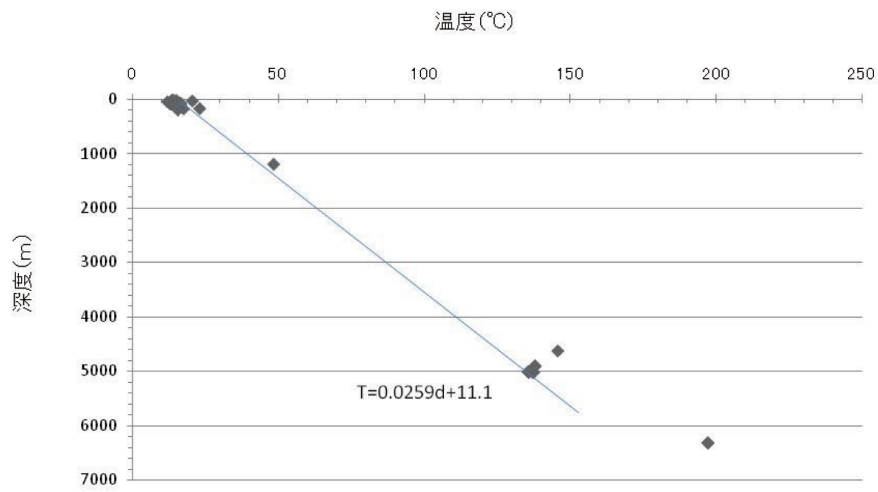
第3図 新潟平野における異常高温域と震源の分布 (Oki et al., 1998).



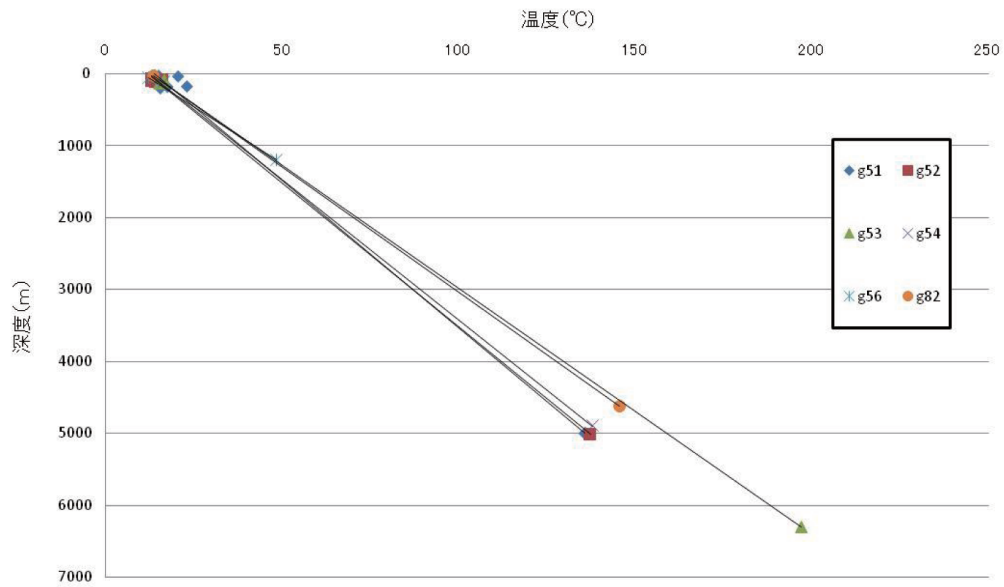
第 4 図 研究対象地域.



第 5 図 浅部地下温度データ.



第6図 浅部と深部地下温度データの比較と地温勾配.



第7図 地温勾配の地域性.

石狩平野の三次元水理地質構造モデル

1 モデリングの指針（今後の予定）

次年度より、石狩平野におけるモデリングを計画している。石狩平野の水理地質構造モデリングを実施するにあたり、北海道立地質研究所の各種資料を入手し、以下のステップで実施することを決定した。

- ・道立地質研究所の水文地質図から、水質データをコンパイル・デジタル化
- ・デジタル化したデータを GIS で編集
- ・温度に関しては、平野北部の観測井で測定されたデータをコンパイル
- ・以上の D B を用いた地下水流動に関する考察