

石狩低地帯とその周辺域の「大深度(掘削)温泉」の 化学組成と地下地質の3次元分布

—公開電子地球科学情報の簡易統合処理による表示・解析の試み—

茂野 博¹⁾

1. はじめに

語源的に「温泉 (hot spring)」は自然湧出のものを指すが、日本ではボーリング(坑井掘削)を通じて動力揚湯で得られる地下の温水・熱水 (thermal water) なども「温泉」と呼ばれて浴用利用されている。1960年代以降、深度1,000mを超える深いボーリングによって、非常に多数の「新規温泉地」が開発されてきた。このような温泉は、最近では「大深度(掘削)温泉」とも呼ばれており、地下の賦存環境が溶存化学組成などによって調査・研究されている(例えば、宮崎ほか, 2007; 甘露寺, 2010)。「大深度(掘削)温泉」の多くは、新第三紀以降の堆積岩類が厚く発達する海岸平野(非火山性地域)に分布している。このような堆積盆地の深部は、石油・天然ガス(有用な水溶存ヨウ素なども含む)鉱床の生成場ともなっており、付随する地層水(「大深度(掘削)温泉」にも該当する)の溶存化学組成の研究も行われてきた。近年、上記の堆積盆地は放射性廃棄物の「地層処分」や地球温暖化ガスCO₂の「地中貯蔵」などの目的でも注目されており、地下深部に分布する地層水の化学性状への関心が深まっている(例えば、奥山ほか, 2008)。

このような堆積盆地の地下深部の地質層序・構造については、従来主に石油・天然ガス鉱床の資源評価や開発の目的で調査・探査が行われて、各種物理探査やボーリング調査の情報が整理されてきた。近年では、大地震による震動災害を軽減化する目的で、地盤が軟弱な海岸平野の調査とそのデータ解析が大規模・総合的に行われるようになり、地下3次元の地質分布が電子数値化されて公開されるようになってきた。

さて、1975年頃のエネルギー(石油)危機の時代に、

上記の堆積盆地の「大深度(掘削)温泉」や地層水は、新エネルギー(地熱資源の一環)の「深層熱水」などの名称で地域暖房などへの大規模利用が期待され、調査・研究がある程度行われた歴史がある(例えば、安藤, 1982; 茂野, 1982)。筆者もこれに関係して、石狩低地帯南西端部の「深層熱水」の研究などを行った。その成果の公表は口頭発表に留まっていた(例えば、茂野・阿部, 1977; 茂野, 2004b)が、旧資料の整理や最近の文献の検討を進めて近い将来に論文発表の予定である(茂野, 2011)。この過程で最近の多様な公開電子地球科学情報を系統的に処理したところ、研究の主対象からは外れるが、幅広い利用に資する各種データの処理事例が集まった。

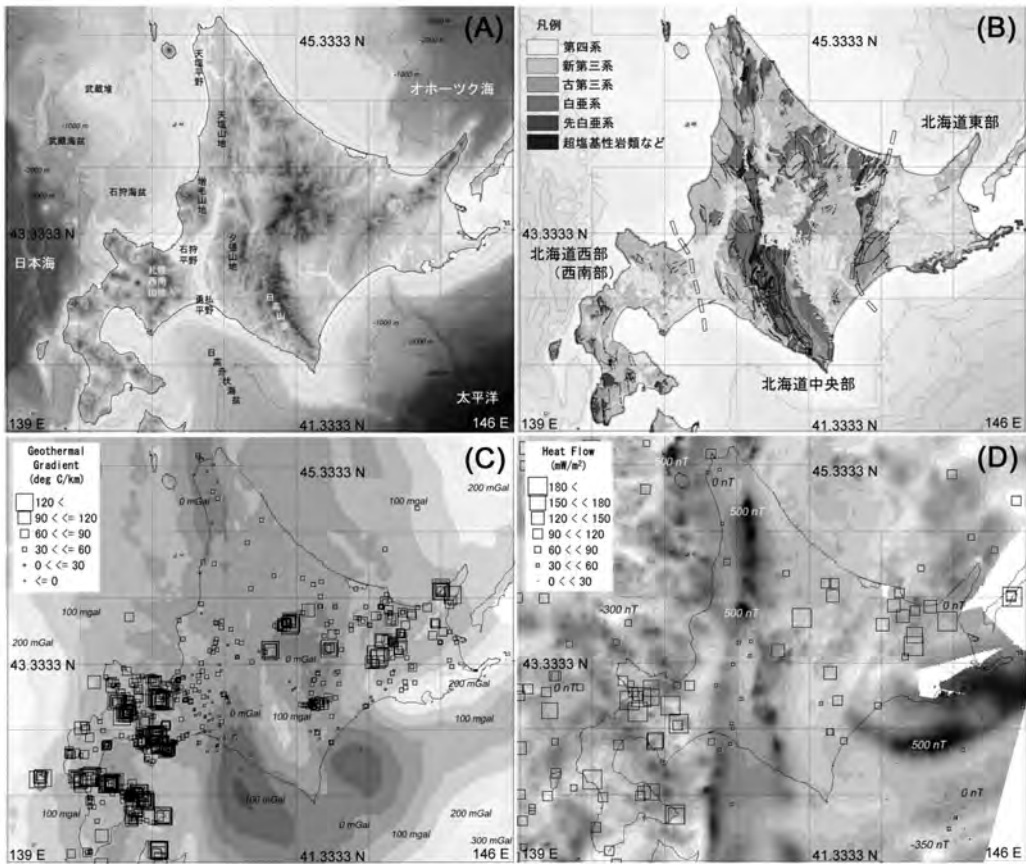
本説は、このような経緯で取りまとめられたもので、既存の電子地球科学情報を用いて北海道の地球科学ミニアトラスを提供するとともに、特に石狩低地帯(石狩平野と勇払平野を合わせた地域)とその周辺域(以下、これらを合わせて「石狩低地帯域」と略記)の地下地質分布と「大深度(掘削)温泉」の水化学組成分布を3次元的に表示し、地下の「温泉水」の生成・分布環境について若干の考察を加えたものである。なお、冒頭に述べた観点から、用語として「温(地下・地層)水」を用いた方が妥当性が高いと思われるが、本説でも湧出前のものを含めて多くの場合に「温泉水」を使用した。また、本説の各種地図では、便宜的な理由があり、また小縮尺でもあるため、旧日本測地系が使用されていることにご留意願いたい。

2. 北海道の地球科学ミニアトラスの作成

北海道と石狩低地帯域の各概要と両者の関係を

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード: 北海道, 石狩低地帯, 大深度温泉, 非火山性温泉, 深層熱水, 水化学, 地盤地質, 電子地球科学情報, 簡易統合処理, 地熱資源



第1図 北海道の地球科学ミニアトラス(その1). (A) 標高・水深・海岸線・旧支庁境界(関係主要地名も表示). (B) 地質(年代区分による;北海道の主要地質構造3分帯も表示). (C) ブーゲー重力異常と地温勾配. (D) 磁気異常と地殻熱流量. 電子情報の出典については, 第1表を参照.

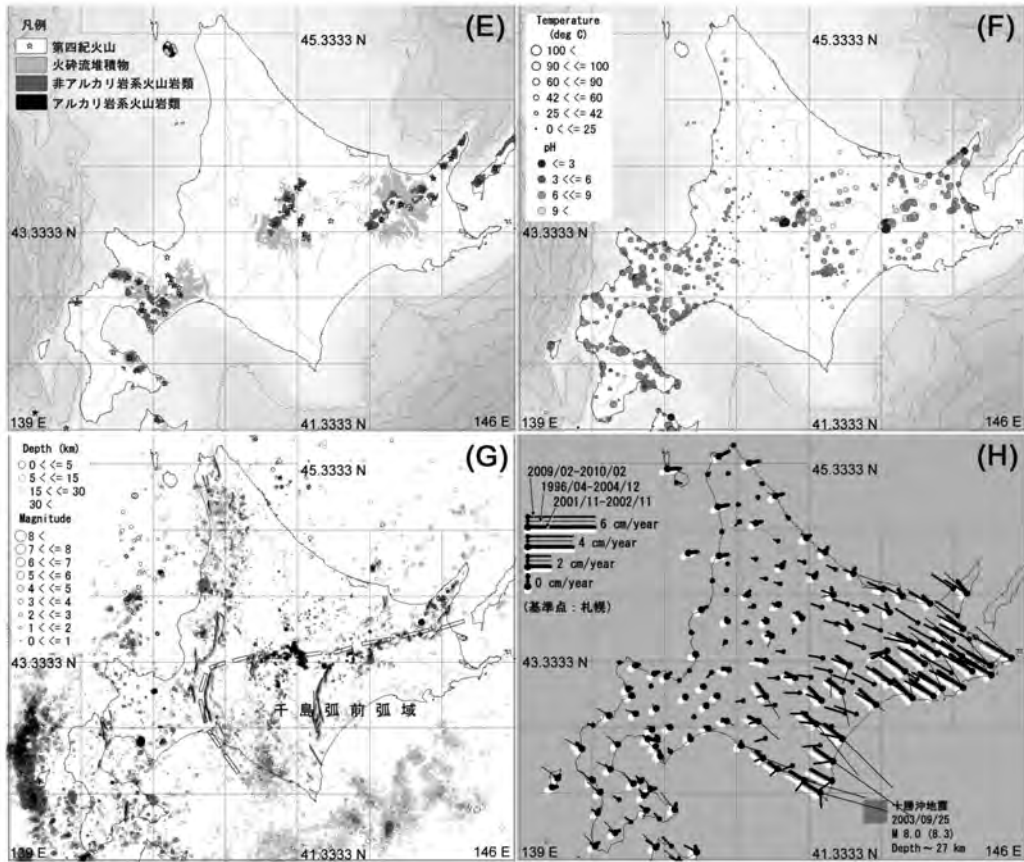
分かり易く紹介する目的で, 各種の電子地球科学情報を処理して, 第1図(その1・その2の(A)~(H)の合計8小図)に北海道の地球科学ミニアトラスを示す. 第1表に, 作図に使用した地球科学情報の原典一覧を示す. 各種のデータの処理と地図の作成・編集方法は, 基本的に茂野(2005, 2008)・地質調査総合センター(2007)に基づく.

第1図をはじめ以下の図では, 経度-緯度(-深度)直交座標系を用いた. ただし, 経線長/緯線長を1.37(北緯43.33°の概略値)として表示した.

北海道と石狩低地帯の地質環境・地熱環境については後述の5. に概説するが, 第1図について特に注意を要する点を以下に簡単に述べる. (B)の地質図では, 地質調査所(1995)の地質凡例表に基づく処理によって, 岩石の生成年代で大区分したものを示す. (A)の標高, (C)のブーゲー重力異常, (D)の磁気異

常にも示されるように, 北海道には南北方向の構造が発達しており, (B)に示すように北海道は東部-中央部-西部(西南部)に大きく3分帯される(例えば, 日本の地質「北海道地方」編集委員会 編, 1990).

第1図の(H)では, 国土地理院のWWW公開データファイルに基づいて3つの期間のGPS地殻変動(P1: 2001年11月~2002年11月; P2: 1996年4月~2004年12月; P3: 2009年2月~2010年2月; 各々札幌を基準点とした1年間の変動)を示す. 上記3期間の地殻の運動は大きく変化している. 特に, 2003年9月26日に十勝沖地震(M8.0)が発生したため, その時期を含むP2(日高山脈周辺で南東方向への大きな水平移動と沈降が発生)ではP1・P3との違いが顕著である. 北海道の定常的な運動は, 概略的にP1で代表される可能性が高いと推定される(P3はP1と類似性が高い). P1における千島弧前弧域の西方への運動



第1図 北海道の地球科学ミニアトラス(その2). (E) 第四紀火山. (F) 温泉(温度・pH). (G) 震源(深度30 km以浅)と活断層(千島弧前弧域も表示). (H) GPS地殻変動(P1・P2・P3の3つの期間; 2003年十勝沖地震の震源域も簡略的に表示). 電子情報の出典については, 第1表を参照.

第1表 北海道の地球科学ミニアトラス(第1図)の作成などに使用した電子地球科学情報の原典一覧表.

使用図号	項目(略号)	出典および備考
(A) \$1	海岸線(CL) \$4	国土地理院(2000) 数値地図25000(行政界・海岸線)(CD-ROM版).
(A)	標高(Elev)	国土地理院(1997) 数値地図250メッシュ(標高)(CD-ROM版).
(A) \$2	水深(SBD)	日本海洋データセンター(—) 500mメッシュ水深データ(J-EG0500). (WWWダウンロードによる)
(B) \$3	地質(Geol)	地質調査所(1995) 100万分の1日本地質図第3版, CD-ROM版. 数値地質図, G-1.
(C)	重力異常(Grav)	地質調査所(2000b) 日本重力 CD-ROM. 数値地質図, P-2. (仮定密度, 2.67 g/cm ³)
(C)	地温勾配(TG)	地質調査総合センター(2004) 日本列島及びその周辺域の地温勾配及び地殻熱流量データベース. 数値地質図, P-5.
(D)	磁気異常(MMag)	Geological Survey of Japan(1996) Magnetic anomaly map of East Asia 1:4,000,000, CD-ROM version. DGM P-1.
(D)	熱流量(HF)	地質調査総合センター(2004) 日本列島及びその周辺域の地温勾配及び地殻熱流量データベース. 数値地質図, P-5.
(E)	第四紀火山(QV)	地質調査所(2000a) 日本の新生代火山岩の分布と産状 Ver. 1.0. 数値地質図, G-4.
(F)	温泉(HS)	地質調査総合センター(2005a) 日本温泉・鉱泉分布図及び一覧(第2版)(CD-ROM版). 数値地質図, G1-2.
(G)	震源(EQHC)	気象庁(2006) 平成17年地震年報(CD-ROM).
(G)	活断層(AF) \$4	中田 高・今泉俊文編(2002) 活断層詳細デジタルマップ(DVD 2枚). 東大出版会. (製品シリアル番号: DAFM0345)
(G)	同上 \$4	地質調査総合センター(2005b) 全国主要活断層活動確率地図, 構造図, no. 14. (電子数値データは未公表.)
(H)	地殻変動(GPS)	国土地理院(—) 地殻変動分布データ, (WWWダウンロードによる)

\$1 (B)~(H)にも使用. \$2 (B)・(E)・(F)にも使用. \$3 (E)にも使用. \$4 線ベクトルデータ(他は, メッシュあるいは点データ).

は、第1図(G)の地殻内の震源分布と対応しているように見える。これに基づいて第1図(G)には、千島弧前弧域の範囲を概略的に示した。

3. 地下3次元地質分布図の作成

北海道の地質の概要については、例えば日本の地質「北海道地方」編集委員会 編(1990)などによって取りまとめられている。特に、石狩低地帯域については、石油・天然ガス鉱床の探査・評価の目的で地下の地質分布・構造が天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会(1982, 1992), 石油技術協会(2004), 地質調査総合センター(2005)などによって紹介されている。本地域では上記の目的で深度4,000mを超える坑井が多数掘削されており、苫小牧に位置する大規模な勇払油・ガス田の生成環境を軸に、国安・山田(2004)などによって地下深部の地質層序・構造が議論されている。一方、近年地震災害への対策推進のために岡(2004, 2005), 吉田ほか(2007)などによって、石狩低地帯域の地盤地質も総合的に検討されている。

今回の地質データの処理では、吉田ほか 編(2009)が深部坑井調査や各種の物理調査に基づいて総合的に編集した北海道の電子地盤データファイル(MODEL.DAT)を用いた。本ファイルは北海道全領域(経度範囲139.50°~146.00°E; 緯度範囲41.50°~45.75°N)を、概略的に~1kmメッシュ(経度については0.012500°刻み; 緯度については0.008333°刻み)でほぼカバーしており、地質は第1層の完新統~中部更新統から第12層の深度100km面以深(マントルやスラブ)までの12単元の区分となっている。本ファイルは大容量(~50MB)であるが、その構成は単純で各メッシュが1行に整理されて、14列のデータ(経度, 緯度, 12個の地質単元の上面境界深度)がテキスト形式で書かれている(ヘッダー部はない)。なお、ファイルの内容・仕様や使用上の注意事項などについては、吉田ほか 編(2009)中のREADME.TXTやPOLICY.TXTファイルに示されている。第2表に、吉田ほか 編(2009)で設定されている地質単元区分(地盤構造モデル)とその物性値などとともに、今回使用した地質略号とカラー地図の塗色パラメータ(RGB値; 地質調査所(1995)の地質図カラー凡例を準用)を示す。

今回のデータ処理では、プログラム作成環境として

Microsoft社のVisual Basic v.6を用いた。処理に当たっては、MODEL.DATファイルを利用し易いように各種の変換処理を行った(地域・標高・地下深度などで再整理した暫定ファイル群を作成)。各種の平面図と垂直断面図の作成については、地質調査総合センター(2007)が提供する地図作成ソフト(QMM系)のプログラムソース(Visual Basic v.6による)に改変を加えて処理を行った(茂野(2005, 2008)を参照)。

第2図として、北海道全域について(A)基盤岩類~コンラッド面(第9層; 白亜紀後期以前に生成した岩石と変成岩-深成岩類)および(C)グリーンタフ(第6層(中新世前期に生成); 分布しない場合は古第三系~基盤岩類(第7層~第9層))の各上面の深度(海水準を基準とした標高)分布を、各々等深線平面図で示す。また第2図(B)には、古第三系(第7層)の層厚の平面分布を示し、さらに(D)には、東西方向の5つの地質断面図を示す。なお、吉田ほか(2007)・吉田ほか 編(2009)では、石狩低地帯域以外でのデータの信頼性については保障をしていないが、今回試行的に第2図の作成を行った(従って、その利用には注意が必要である)。

特に本説の主対象の石狩低地帯域については、第3図に地表面・海底面からの深度1,500mの地下地質の平面分布図を示す。また第4図には、東西断面形式の地質分布図((A) 43.30°N, (B) 43.10°N, (C) 42.90°N, (D) 42.70°Nの4断面図)を示す。さらに上記のデータ処理に基づいて第5図には、「大深度(掘削)温泉」のボーリング坑底に推定される地質(単元番号)の分布を断面図形式で示した。

4. 「大深度(掘削)温泉」の水化学分布図の作成

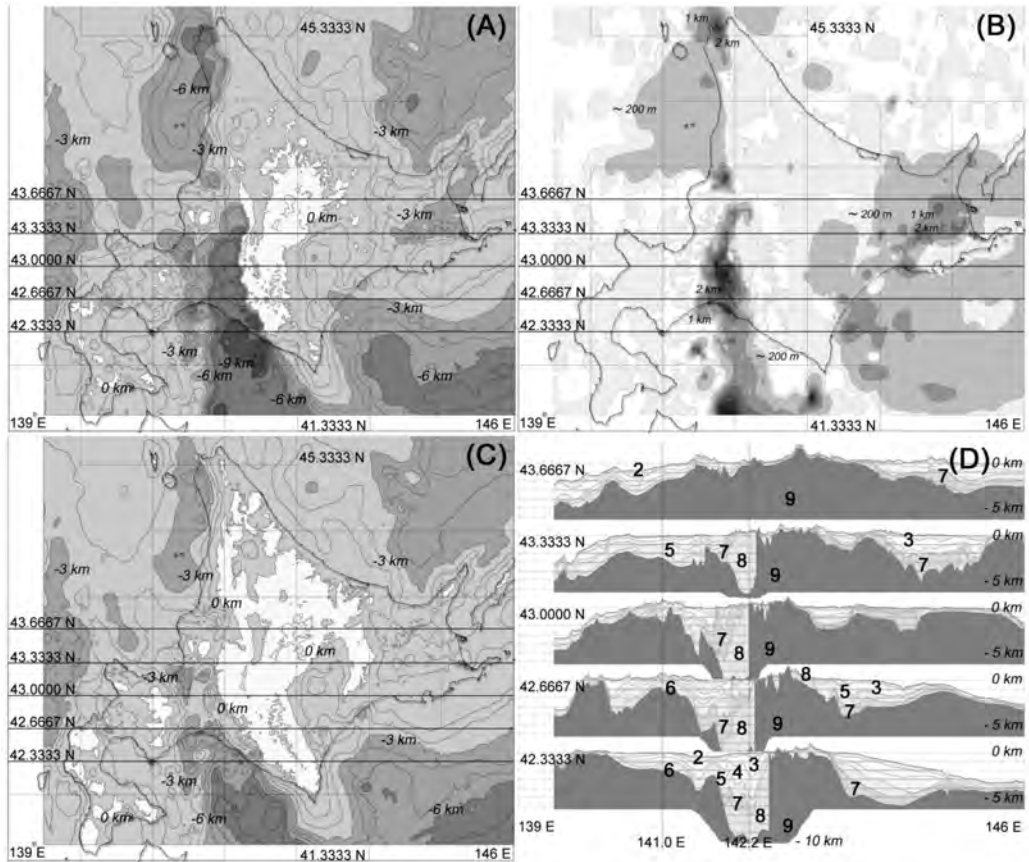
北海道の温泉については、道立地質研究所(2000年以前は道立地下資源調査所)・道立衛生研究所などによって非常に多くの化学的調査・研究が行われている(例えば、北海道立地下資源調査所(1977, 1979, 1982)の取りまとめを参照)。石狩低地帯域については、最近では柴田・秋田(2004), 柴田ほか(2005), 松波ほか(2007), 宮崎ほか(2007)などの報告がある。

しかし、今回の温泉水化学データの処理では、主に地質調査総合センター(2002)の編集データ(ファイル名: HSDSAP.TXT)を用いた。これは、データが比

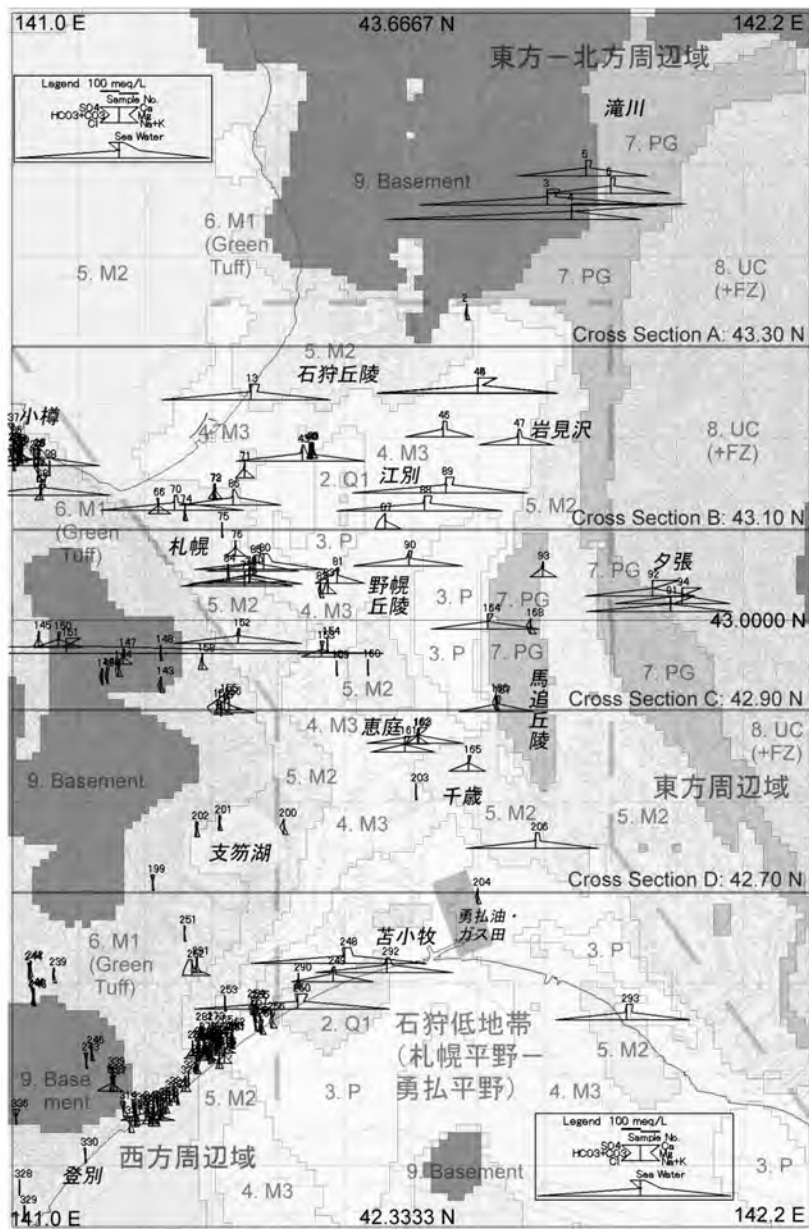
第2表 北海道の地質単元の一覧表(吉田ほか 編(2009)に基づく; 試行的に加工して第2図・第3図・第4図・第5図の作成に使用した)。

番号	地質単元	地層名		Vp km/s	Vs km/s	ρ g/cm ³	地図表示 略号	塗色パラメータ		
		石狩平野北西部の場合 \$1	勇払平野・馬追丘陵の場合					R値	G値	B値
1	完新統～中部更新統	(略)	(略)	176	0.40	1.98	H-Q2	220	255	220
2	下部更新統	(略)	(略)	209	0.72	1.98	Q1	220	255	188
3	鮮新統	当別層	荷桑層	2.62	1.20	2.06	P	255	255	190
4	上部中新統	望来層	平取層・軽舞層	3.21	1.73	2.27	M3	255	255	130
5	中部中新統	盤の沢層・厚田層・奔須部都層	川端層・振老層・滝の上層(上部)	4.07	2.35	2.41	M2	255	250	0
6	グリーンタフ(下部中新統)	定山溪層(グリーンタフ)	滝の上層(下部)	5.42	3.13	2.57	M1	224	254	61
7	古第三系	樺戸層	紅葉山層・南長沼層・ 幌内層、石狩層群	3.41	2.00	2.36	PG	255	220	92
8	上部白亜系・衝上断層帯	-	函淵層群、上部・中部蝦夷層群	4.67	2.70	2.58	UC (+FZ)	188	255	156
9	基盤岩類～コンラッド面	限根尻層群	下部蝦夷層群、限根尻層群、 空知層群、神居古譚変成岩類、 日高変成岩類	5.78	3.40	2.77	Basement	236	0	255
10	コンラッド面～モホ面	-	-	6.70	3.75	2.90	-	220	0	156
11	モホ面～深度100 km面	-	-	7.70	4.30	3.25	-	255	0	127
12	深度100 km面以深	-	-	8.10	4.50	3.37	-	255	0	0

備考: 本表の左の7列は吉田ほか(2007)、吉田ほか編(2009)に基づく。右の4列は今回試行的に設定した。\$1は札幌西南山地を含む。
 番号9の基盤岩類は、後期白亜紀よりも古い岩石・地層とともに、それ以降の変成岩類・深成岩類などを含む(吉田ほか, 2007)



第2図 3次元地盤データ(吉田ほか 編, 2009)に基づく北海道の地下地質分布図。(A)は基盤岩類(第9層)の上面の分布深度(海拔)を,(B)は古第三系(第7層)の厚さを,(C)はグリーンタフ(第6層)の上面の分布深度(海拔)を, 各々等値線平面図で示す。(D)は東西方向の5つの地質分布断面図を示す(垂直方向の縮尺は水平方向の10倍; 北海道中央部に分布する大規模な衝上断層群が垂直線で表現されていることに注意), 地質単元の番号は, 第2表を参照。



第3図

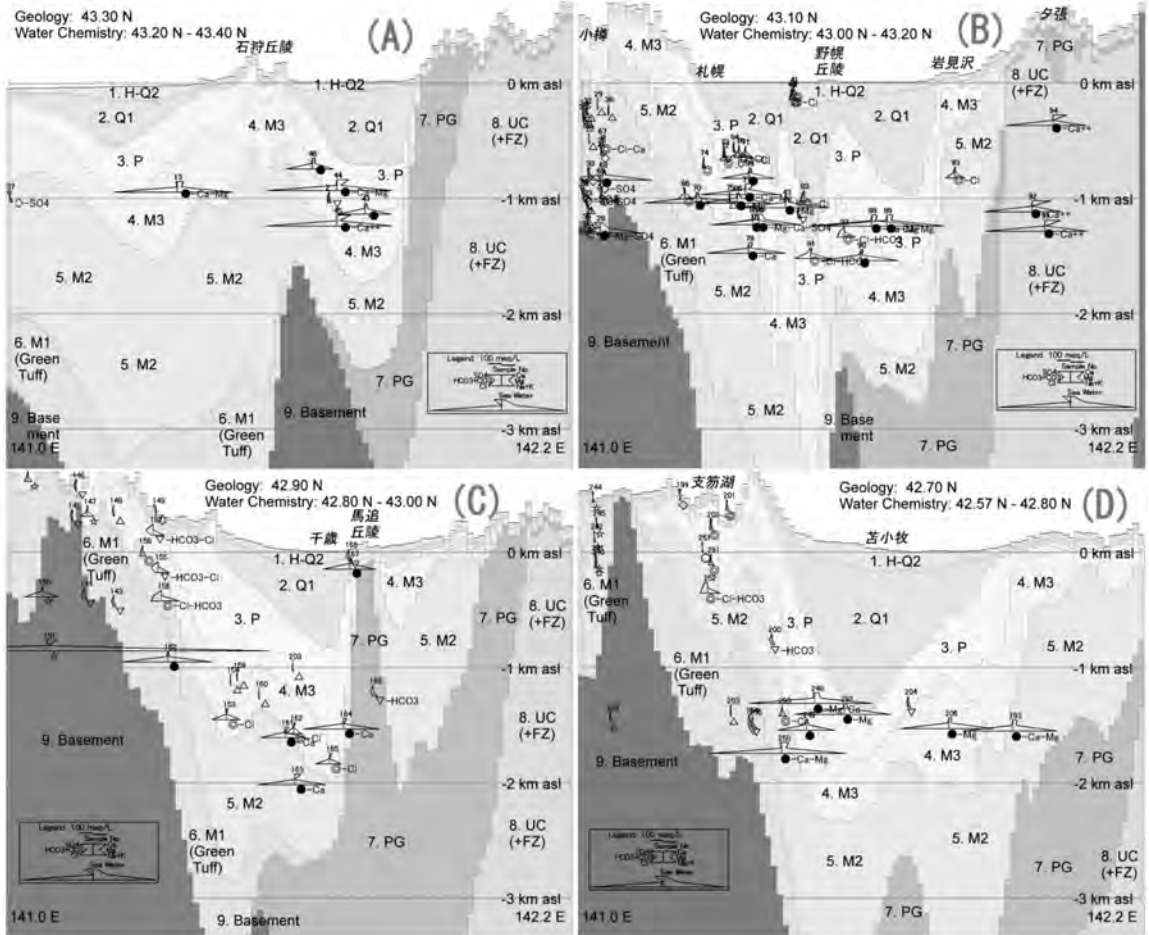
石狩低地帯域の地下地質と温泉水化学の平面分布図。地質分布は、吉田ほか編(2009)に基づいて地表面・海底面から深度1,500 mのものを示す。地質単元の略号は、第2表を参照。温泉水化学データは地質調査総合センター(2002)により、試料番号はHSDSAP.TXTファイルの掲載順序による。その他の使用データについては第1表を参照。薄灰色の破線で概略的な地域区分を示した。詳しくは本文参照。

較的新しいとともに、分布地点の経度・緯度、ボーリング深度などを含めてデータが規格電子化されているために利用が容易であることによる。

今回のデータ処理のプログラム作成環境は、上記3.と同様である。HSDSAP.TXTファイルの処理に当たっては、上記3.のMODEL.DATファイルなどを処理して温泉分布地点の標高、ボーリング坑底の地質分布などの項目を追加した。各種の作図処理を、茂野(2004a)・地質調査総合センター(2007)による水化

学データ処理ソフト系(Stiff_Map, Piper_Diaなど)の実行形式プログラムを直接用いて、あるいはソースプログラムを改変して行った。

第3図には、石狩低地帯域について作成した温泉水化学(溶存主成分)のヘキサ図を、1,500m深の地下地質の平面分布図に重ねて示す。第4図には、緯度範囲別の温泉水のヘキサ図を、石狩低地帯域の東西方向の4つの地質断面分布図に重ねて示す。また第4図には、後述の第8図の温泉水の分類型記号を



第4図 石狩低地帯域の地下地質と温泉水化学の4断面分布図((A)~(D))。地質断面線は東西方向(第3図参照;垂直方向の縮尺は水平方向の20倍)で、各々両側~0.2°範囲内の温泉水化学のヘキサ図と分類型を示す。地質データは吉田ほか編(2009)、温泉水化学データは地質調査総合センター(2002)による。ヘキサ図の中心は、ボーリングの坑底位置あるいは自然湧出の標高に描かれている。詳しくは本文、第3図、第8図を参照。

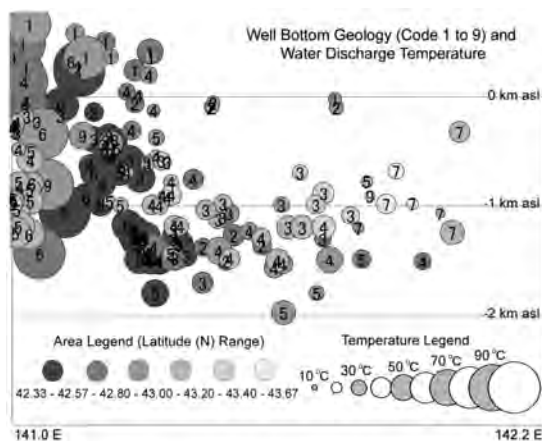
添付した。

一方、第5図には、HSDSAP.TXTファイルに基づいて温泉水の湧出温度を、断面図形式により坑井の坑底位置に円の大きさで示す(上記3.を参照)。また、第6図の上部には石狩低地帯域の温泉水のキー図を示す。第6図の上部では、後述の第8図の分類型記号を用いた(ただし、図の大きさの制約により4次分類の英字記号の添付は省略した)。比較のために第6図の下部には、北海道の各種環境の高塩濃度温泉水(松波, 1992, 1993, 1994, 1995; 鈴木・柴田, 2007)の主要陰・陽イオン三角図の主要部を示す。

5. 北海道と石狩低地帯域の概要

5.1 北海道の地質(テクトニクス)環境

北海道は、地質構造的に大きく東部、中央部、西部(西南部)に3分帯される(第1図(B)参照)。日本海(日本海盆)とオホーツク海(千島海盆)の拡大以前(~30Ma以前)には、これらの3地域は海を隔てて異なる環境にあり、概略的に東部は古千島弧としてより東方~北東方に、中央部(南北方向にさらに4~7分帯される)の大部分は北方のサハリンと繋がってより北方に、西部は現在の東北日本弧の北部として西方(アジア大陸のロシア沿海州付近に接合)に位置していたと考えられている。その後非常に大きなテクトニ



第5図 石狩低地帯域の温泉水の湧出温度とボーリング坑底地質の分布図(東西方向の断面図)。地質調査総合センター(2002)に基づいて、○の大きさと温泉水の湧出温度をボーリングの坑底(あるいは自然湧出)位置に表示した。また吉田ほか編(2009)に基づいて、坑底に分布が推定される地質単元を番号で表示した(第2表参照)。

クス変動(沈み込む海洋プレート-スラブの分布・移動の変遷, 上記2緑海の発生・拡大, 3島弧の移動・回転・接合・衝突など)を受けて, 現在の北海道が成立した。しかし, 北海道の地質構造は複雑で, その発達史についてはまだよく分からない点が多く, 様々な議論がある(例えば, 日本の地質「北海道地方」編集委員会編(1990), 小疇ほか編(2003)などを参照)。以下5.2の石狩低地帯域の概説についても, これらの文献に基づいている。

5.2 石狩低地帯域の地質(テクトニクス)環境

石狩低地帯は, 北海道の中央部と西部の境界部に位置し, 概略的に東方の日高山脈-夕張山地-増毛(樺戸)山地と西方の山地(固有名がなく, 「札幌西南山地」などと呼ばれる)の隆起域に挟まれた石狩平野と勇払平野を結び合わせた地域である(第1図(その1)参照; なお, 第2図(C)・第3図に示すように石狩平野から北東方向へ伸びる「砂川低地帯」は新第三紀以降の堆積盆が浅いため除いて考える)。より広くは, 南東~南方向の日高舟状海盆(日本海溝と千島海溝との会合部に始まる)から, 北西方向の石狩海盆(~武蔵海盆)へと繋がる大規模な沈降帯(堆積場)と見ることができる。また, 石狩低地帯は東北日本弧の北

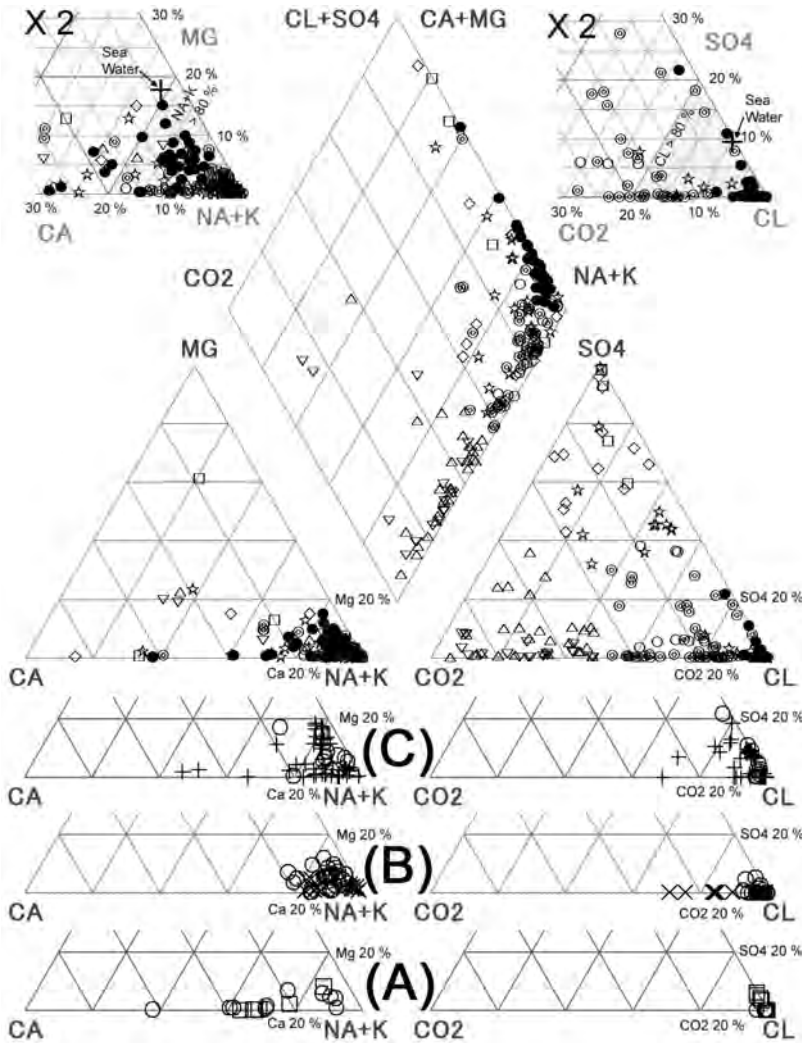
端部と千島弧の南西端部の接合域に当たる(太平洋プレート, ユーラシアプレート, 北アメリカプレート, その他のマイクロプレートの境界としての議論も様々に行われている)。

白亜紀後期~古第三紀には, 概略的に石狩低地帯の西部は東北日本弧の前弧域の堆積物が比較的蓄積し難い環境に, 東部は南北方向に伸びた(サハリンへと繋がる)別の島弧に沿った前弧海盆~内陸性の堆積物が厚く蓄積する環境(古第三系は多数の石炭層を含む)にあつたと考えられる。石狩低地帯の深部には「苫小牧リッジ」と呼ばれる先古第三紀の基盤岩類の高まりが, 南北方向に長く分布することが知られており, ホルスト構造, フラクチャー群, 古第三系の基底礫岩などの発達により深度~5,000mに国内有数規模の勇払油・ガス田が生成している。

日本海とオホーツク海の拡大の終了以降(~13Ma以降)には, 太平洋プレートの東南東方向からの斜め沈み込みによって千島弧南西部の前弧域(スリバー)は西方へと移動している。その先端地表部に当たる石狩低地帯東縁部では, 活逆断層群・活褶曲群(馬追丘陵など)が発達している。なお, この前弧域の西方移動は, 現在の日高山脈-夕張山地, 東方の十勝平野・白糠丘陵域の隆起運動・活断層形成なども引き起こしている。一方, 北海道の西方海域(日本海の東縁部)では, 第四紀に新たな背弧海盆の形成が開始し, 北海道西部~北海道中央部の西北縁辺域の東方移動が始まったらしい(これによって増毛山地の東縁部の活断層など(第1図(G)参照)も活動している可能性がある)。

上記の複雑な状況から, 第2図・第3図・第4図に示す石狩低地帯域の地下環境は複雑であり, 主要には東西方向に, 副次的には南北方向にも大きく変化している。概略的に東から西へ整理すると, 1) 基盤岩類(上部白亜系およびそれより若い変成岩類・深成岩類など), 2) 激しい変動を受けた白亜紀後期の厚い海成堆積岩類, 3) 同じく古第三紀の主に海成堆積岩類(石炭層を含む), 4) 厚い新第三紀~第四紀の主に海成堆積岩類, 5) 基盤岩類, グリーンタフ, 第四紀火山の各分布域となる。

石狩低地帯の本体部である4) 厚い新第三紀~第四紀の堆積岩類分布域についても, 上述した活断層群・活褶曲群などの発達があり, さらに東西方向に概略的に4a) 東端部の沈降域, 4b) 東部の隆起域(馬追



第6図

石狩低地帯域の温泉水のキー図と北海道の各種の高塩濃度温泉水のキー図(部分)の比較. 上の温泉水化学データは地質調査総合センター(2002)により, 記号の形は第8図の3次分類に基づく. 最上部の右・左には, 陰・陽イオン三角図のCl端部とNa+K端部の2倍拡大図を示し, 海水(+)も表示した. 比較のため, 下部の3図に北海道の高塩濃度温泉水として, (A) 炭田地域の湧出水(松波, 1994; ○は石狩・樺戸炭田地域, □は釧路炭田地域), (B) 北海道中軸部の温泉水(松波, 1993; 鈴木・柴田, 2007; ○は石狩低地帯域, ×は天塩平野地域), (C) 海岸近傍の温泉水(松波, 1995; ○は石狩低地帯域, +はその他の地域)を示す.

丘陵など), 4c) 幅広い西部の沈降域(第四系の厚さが部分的に1kmを超える)などに細分されるが, 南北方向の変化があって単純ではない(第2図(C)・第3図・第4図参照). 北の札幌市周辺では, 4c)の中に南北方向に野幌丘陵-石狩丘陵の活褶曲隆起帯があり, 深い沈降域を東西に2分しているが, 深い沈降域は北方(増毛山地)には延長しない. これに対して, 南の苫小牧市周辺では, 深い沈降域は南方向と南東方向へ広がっている. 一方, 中間の千歳市-恵庭市周辺では, 東西両方向からの先新第三系の張り出しによって4c)の沈降域は狭く, また相対的に浅く(~3km以浅)になっている.

5.3 石狩低地帯域の地熱環境

2011年2月号

北海道の第四紀火山活動地域の多くは, 太平洋プレートスラブの沈み込みに対応して, 北海道の西部(東北日本弧の北端域の中軸部)と東部(千島弧の中軸部)の震源深度が100~200kmの地域に分布している(第1図(E)). これに対して, 千島弧前弧域の南西端部の日高山脈-夕張山地とともに, 特異的な沈降域に当たる石狩低地帯域(震源深度100~200km域を含む)には, 第四紀火山は分布しない.

また, 石狩低地帯域は, 第1図の(F)の温泉の湧出温度とともに, (C)の地温勾配, (D)の地殻熱流量も非常に低く, 地熱に関して恵まれない環境となっている. しかし, 上記5.2のように(白亜紀~)古第三紀以降の主に海成の碎屑性堆積岩類(深成岩類や変成岩類)に比較して空隙率・浸透率が高く, 当初生成場の

海水に飽和していた)が広く・厚く発達しているために、中温～低温の「大深度(掘削)温泉水」が大規模に分布する環境となっている。

6. 考察

6.1 石狩低地帯域の温泉の化学的分類

「大深度(掘削)温泉水」が多い石狩低地帯域の温泉の主要溶存成分濃度の分布には、第3図の平面図中および第4図の断面図中のヘキサ図で示されるように、地域と深度によってかなり系統的な変化が認められる。この空間変化について理解を進める目的で、第6図に示した松波(1992, 1993, 1994, 1995)などによる北海道の各種の高塩濃度温泉の研究例を参考にして、新たに第7図に石狩低地帯域の温泉水のCa-Mgの対数濃度相関図をまとめた。第7図では、Cl, SO₄, HCO₃の各濃度を合わせて示すとともに、地下で「温泉水」のCaとMgの分別を生じる各種の物理・化学的プロセスとその変化方向を模式的に示した。さらに第6図・第7図に基づいて、本地域の温泉水の系統的な分類と型命名の試みを第8図に示す。

第8図の分類と型命名の基本的な流れとして、まず1次の温度による2分類中の高温型(☆; 60℃<)は、化学的に多様であるが、本説の主題からは離れるので2次以下の細分は省略した。これに対して低温型については、2次分類として塩濃度によって3分割したが、その高塩濃度型(10g/l<)については、3次分類の卓越陰イオン型による3分割では、Cl型(●)のみが存在する。これを、さらに付随する高濃度成分(SO₄, HCO₃, Ca, Mg; 各20meq/l<と100meq/l<の2段階)によって、4次分類として命名した(●-Ca-Mg型, ●-Ca⁺⁺型など)。一方、低温型の中塩濃度型(10g/l>>1g/l)と低塩濃度型(1g/l>)のものには、3次分類の卓越陰イオン型としてCl型(各◎, ○), SO₄型(各◇, □), HCO₃型(各▽, △)があり、さらに付随的に高濃度成分(Cl, SO₄, HCO₃, Ca, Mg; 各20meq/l<)によって、4次分類として命名した(◎-HCO₃型, ▽-HCO₃型など)。

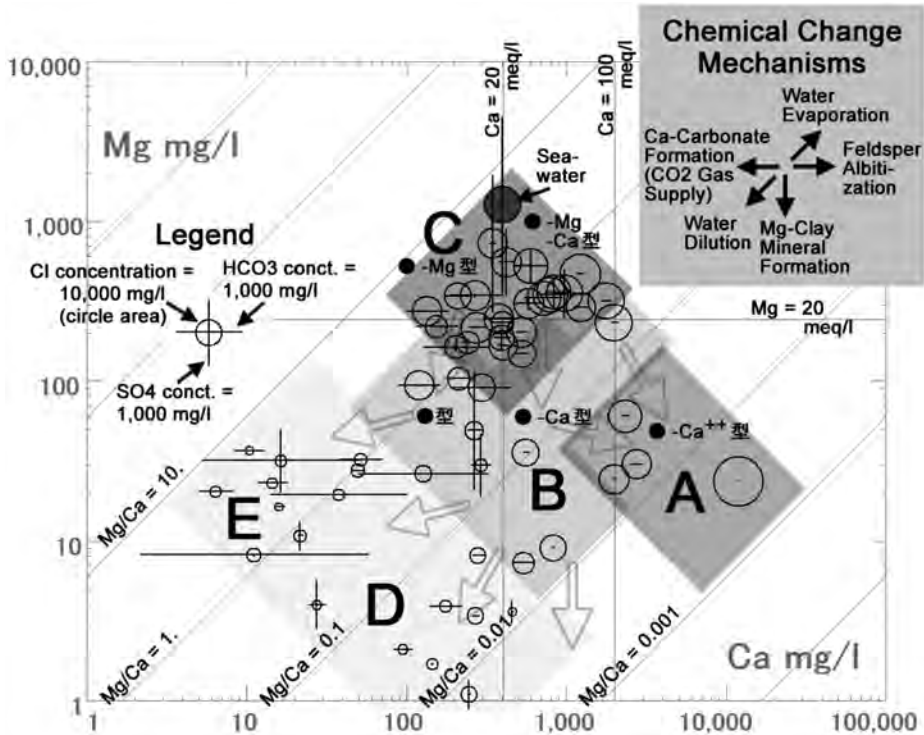
6.2 石狩低地帯域の温泉水の生成環境

上記の第3図～第7図を総合化するとともに、6.1の化学的分類(第8図)を利用することによって、石狩低地帯域の温泉水の生成環境について理解を進めるこ

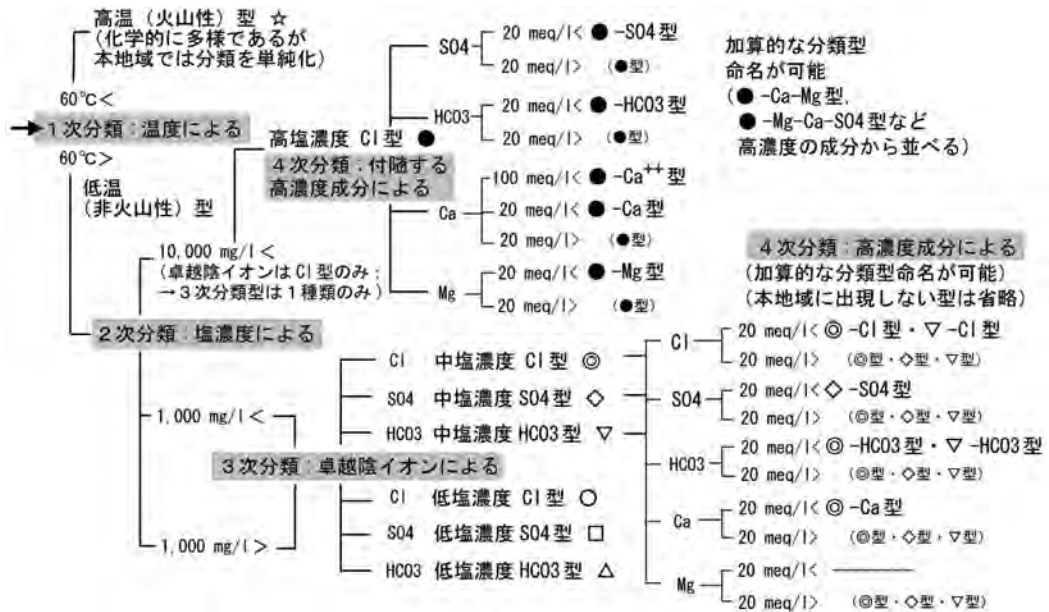
とができる。第9図には、本地域の温泉水の分布について、A～Fの7領域(E領域については、後述するようにE-1とE-2の2領域に細分化)に分類した断面モデルを示す(出現する温泉水分類型の代表的なヘキサ図の例を含めた)。各領域の概要は以下の通りである(各々第3図・第4図を参照)。

(A) 最も東側(第3図の東方(-北方)周辺域)に位置する地下深部(～500～1,500m深)のA領域には、高塩濃度の●-Ca⁺⁺型が分布している。第6図(A)が示すように、●-Ca⁺⁺型は北海道の炭田地域((白亜系～)古第三系の堆積岩類分布域)に湧出するもの(松波, 1994)で、水(主に堆積時に地下にもたらされた古い海水起源)-岩石反応の進行によって、SO₄・Mg濃度の低下が進むとともに、Ca濃度が上昇したと推定される。なお、その後(～現在)の降水起源水も、一部混合していると考えられる。このような●-Ca⁺⁺型の地層水は、北米の油田地域などでも卓越している(例えば、White, 1957; Collins, 1975; Davisson and Criss, 1996)。なお、松波(1994)は夕張地域の●-Ca⁺⁺型について、白亜系と古第三系の境界をなす大規模逆断層を通じて地下深部から上昇してきた可能性を指摘しているが、●-Ca⁺⁺型は第3図の最北部(古第三系の上面深度が浅い; 樺戸炭田東縁域)にも分布しており、石狩低地帯(特に東半部)の深部(～2,500m深)にも広く分布している可能性も考えられる。本説では、非火山性(広域地殻熱流を熱の起源とする)の「古期化石海水起源系」と称する。

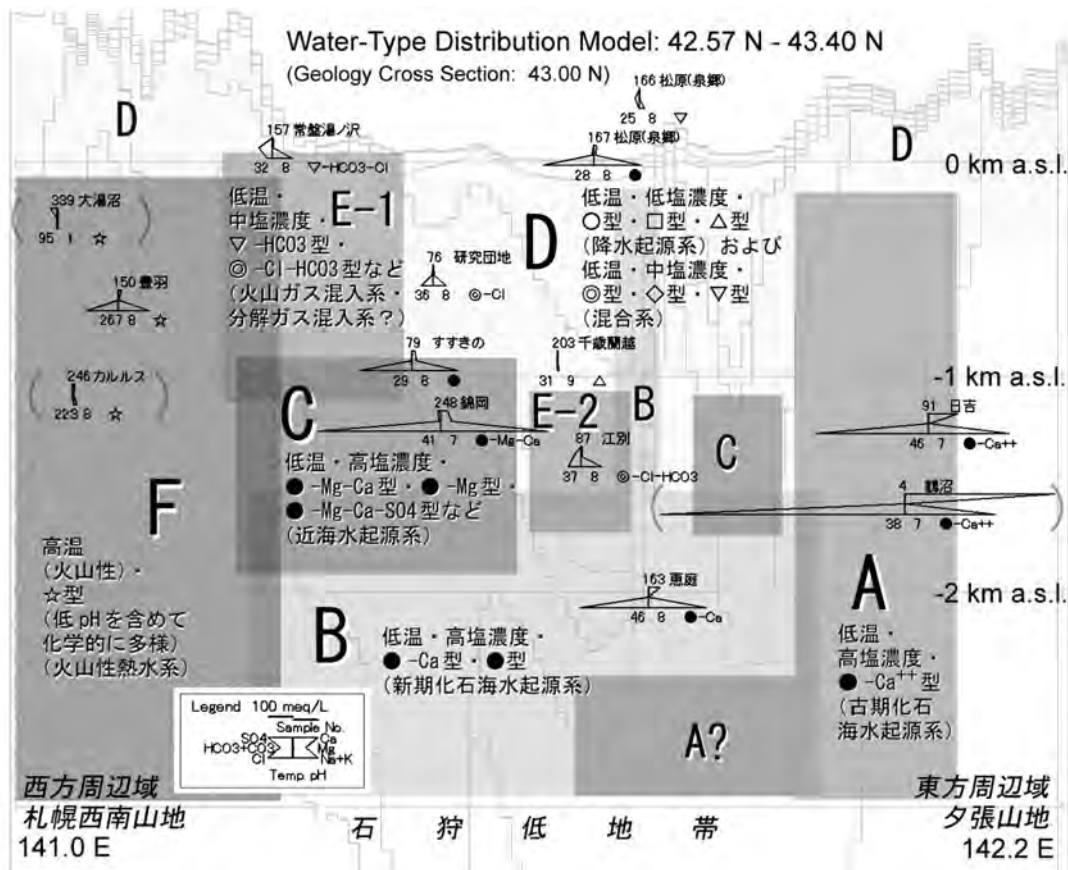
(B) 石狩低地帯の中央部に位置する地下深部(～1,000～2,000m深)のB領域には、高塩濃度の●-Ca型や●型が分布している。特に第4図(C)の断面図(5. M2の中部中新統の堆積岩が～2km以浅に分布; 第2図(C)に示されるように新第三紀以降の堆積盆が相対的に浅い)に、これらの型の温泉水の分布が顕著である。これらの型は、(A)の●-Ca⁺⁺型と下記(C)の●-Mg-Ca型や●-Mg-Ca-SO₄型などの中間的なもので、水(主に堆積時に地下にもたらされた古い海水起源)-岩石反応の進行によって、SO₄・Mg濃度の低下が進んでいるが、まだCa濃度の上昇は進んでいない段階にあると推定される。なお、その後(～現在)の降水起源水も、一部混合していると考えられる。これらの型の温泉水は、活褶曲・活断層系を通じて馬追丘陵周辺の地下浅部にも上昇分布しているようである(第4図(C)・第9図の松原(泉郷))。本説



第7図 石狩低地帯域の温泉水のCaとMgの対数濃度相関図。本図ではCl, SO₄, HCO₃の各濃度を合わせて示す(左の凡例を参照)。また、第8図の温泉水の化学的分類(●-Ca⁺⁺型など)および第9図の領域区分(A~E)も合わせて示す。右上の図は、地下における「温泉水」のCaとMgの分別を生じる各種の物理・化学的な過程と分別の方向を模式的に示す。



第8図 石狩低地帯域の温泉水に適用した分類と型名。温泉水の湧出温度・塩濃度・卓越陰イオン・高濃度成分に基づいて、左から右への処理の流れによって1次~4次の分類と型の命名を行った。



第9図 温泉水の分類に基づく石狩低地帯域の温泉水の生成分布モデル図。第8図の温泉水の分類型に基づいて、推測したA~F (EはE-1とE-2に2分化)の7領域の温泉水(地下に胚胎する温水・熱水;地層水)の生成・分布モデル図を示す。各々の型の代表的な温泉水のヘキサ図を添付するとともに、背景に薄く43.00°Nの東西方向の地質断面図を示した。第3図・第4図・第7図・第8図を比較参照。詳しくは本文参照。

では、非火山性の「新期化石海水起源系」と称する。
(C) 石狩低地帯で比較的海岸近傍に位置する地下深部(〜500〜1,500m深)のC領域には、高塩濃度の●-Mg-Ca型や●-Mg-Ca-SO₄型などが分布している。特に第4図(B)・(D)の断面図(4. M3の上部中新統よりも若い堆積岩が〜2km以深にまで分布;第2図(C)に示されるように新第三紀以降の堆積盆が相対的に深い)に、これらの型の温泉水の分布が顕著である。第6図(C)が示すように、これらの型は北海道の海岸沿いに湧出するもの(松波(1995)のグループI系列)で、上記の(A)・(B)に比較して水(堆積時に地下にもたらされた海水起源および浸透した近過去の海水)-岩石反応が進んでおらず、SO₄・Mgが高濃度を保っている」と推定される。なお、その後(〜現在)

の降水起源水も、一部混合していると考えられる。本説では、非火山性の「近海水起源系」と称する。
(D) 石狩低地帯の中深部(最大〜1,500m深まで)のD領域には、中〜低塩濃度の各種の型(◎型・▽型(4次分類型も出現);○型・△型)が分布する。分布には地域的な特徴が認められ、第4図(C)の千歳市-恵庭市付近では△型が地下深部にまで、第4図(B)の札幌市中心地域などでは◎-Cl型が広く分布する。これらの中〜低塩濃度の各種の型は、基本的に降水起源の地下水の深部浸透・流動の寄与が大きいが、中塩濃度の◎-Cl型などでは上記のA・B・C領域の●型各種の温泉水との混合がかなり大きいと考えられる。特に石狩低地帯の中部〜南部では、西方に近接して基盤岩類・グリーンタフが山地を形成す

るとともに第四紀の火山岩類の分布(大規模カルデラを含む)が顕著であり、降水起源地下水の地下深部への浸透・流動が生じ易いと推定される。しかし、淡水卓越環境で堆積した新第三紀後期～第四紀の堆積岩類を起源とする水の寄与も、一部には存在する可能性がある。本説では、非火山性の「降水起源系」および「混合系」と称する。

(E-1) 石狩低地帯とその西方の基盤岩類-第四紀火山岩類分布山地域との境界域の比較的地下浅部(～1,000m以浅)のE-1領域には、中塩濃度の▽-HCO₃-Cl型・◎-Cl-HCO₃型が分布する。このような型の温泉水の生成機構としては、主に降水を起源とした深部浸透・流動地下水へのCO₂ガスの混入とその後の水-岩石反応が想定され、上記の空間的な分布から火山性の発散物であるCO₂の直接的あるいは熱水系活動を通じた間接的な寄与の可能性が高いと考えられる。本説では、半火山性の「火山ガス混入系」と称する。ただし、この中には、以下のE-2領域と同様の「分解ガス混入系」のものなどが含まれている可能性があり、また両系の混合系なども存在する可能性がある。

(E-2) 石狩低地帯の中心部の深部には部分的にE-2領域として、中塩濃度の◎-Cl-HCO₃型・▽-HCO₃型が分布する。これらの型の温泉水の生成機構としては、堆積岩中の有機物の熱分解によって地下深部で生成したCO₂ガスが断層系などを通じて上昇し、降水起源地下水と各種海水起源地下水との混合水に溶解してさらに水-岩石反応を行った可能性が指摘される。本説では、この可能性から非火山性の「分解ガス混入系」と称する。第9図に示した代表例(no.87江別)は野幌丘陵の活隆起域に分布しており、断層などを通じて地下深部からガスや温泉水が上昇し易い環境にあると考えられる。なお、第6図(B)に示すように北海道中軸部北方の天塩平野域(第1図(A))では、より高塩濃度の●-HCO₃⁺型相当の温泉水(多くは試掘井から天然ガスとともに自噴する地層水;深度は1,000m以浅であるが中部中新統(5. M2)に賦存)が分布しており、かなり高いB/Clモル比(0.02～0.08;松波, 1993)や試掘時の異常高圧発生(北海道立地下資源調査所, 1979)などから続成水～変成水(例えば, White, 1957; White *et al.*, 1973; Shigeno and Abe, 1982)の寄与の可能性が指摘される。

(F) 石狩低地帯西方の山地では、基盤岩類・グリ

ンタフが分布するとともに第四紀火山の活動が活発で、各種の火山体(大規模カルデラを含む)・変質帯・熱水性鉱床などが分布している。この地域には地表に多数の高温～低温の温泉・噴気が自然湧出・噴出しており、地熱調査井などによって地下の高温熱水系の発達も確認されている(例えば、地質調査総合センター, 2002)。本説では、この地域の地下深部には温水・熱水が広く分布すると推定してF領域とし、火山性の☆型(高塩濃度のCl型や低塩濃度のSO₄型・HCO₃型など化学的に多様なものを含む)などの温泉水が湧出するとした。これらの温泉水の起源としては降水起源地下水、マグマ起源水の様々な物理・化学過程が想定されるが、本節では主題から離れるためまとめて「火山性熱水系」と略称する(上記の(E-1)との関連に注意)。なお、A～E領域に比較して低空隙率・低浸透率の岩石分布(第6層・第9層)が卓越するF領域では、断層系の分布に規制されて地下の温水・熱水の分布は局在化している可能性が高いことに注意を要する。

7. おわりに

本説では、北海道中央部-西部の境界に位置し新生代の地層が厚く分布する石狩低地帯域について、公開電子地球科学情報を利用して地質分布と「大深度(掘削)温泉」の水化学組成・湧出温度の分布を、簡易的に地下3次元表示・解析した結果を紹介した。これは、石狩低地帯南西端部における「深層熱水」についての過去の研究との関連で、各種の多量の既存関連情報を整理・検討すると同時に、「電子地球科学情報を利用した地熱資源評価の継承-発展的な研究」(例えば、地質調査総合センター, 2007)の一環として進めたものである(茂野(2011)参照)。

今回利用した電子データには、精度、信頼性などについて各種の限界がある。すなわち、吉田ほか編(2009)のMODEL.DATファイルは、地震振動被害の予測に利用する目的で編集された地下地質データであり、地質単元の区分は想定された物性値に基づくかなり概略的なもので、石狩低地帯以外の地域のデータの信頼性については保障されていない。また、地質調査総合センター(2002)のHSDSAP.TXTファイルは、各種の文献に基づく温泉水の編集データであり、ボーリング坑井内の温泉水の採取深度(ストレナ

一設置深度など)は不明のため、坑底深度を利用した。また、温泉水の温度は一般に地下貯留層中と湧出口(温度測定点)ではかなり大きく異なり、湧出量・速度や低温の浅層地下水の混入の程度によって大きく影響を受けるなどの問題もある。

従って、本説の結果は試行的な検討事例として、その利用には十分注意を願いたい。しかし、上記の制約にも係わらず、石狩低地帯域の地下の地質分布と「大深度(掘削)温泉」の水化学組成などの総合的な関係について、本説が概略的な理解の一助となれば幸いである。また、他の地域の「大深度(掘削)温泉」などについても、理解への参考となれば幸いである。

本説で利用した地下3次元地質情報(規格化メッシュのテキストファイル形式)は、様々な目的で電子化一般公開が長らく期待されてきたものである(例えば、茂野・阪口, 2002)。類似の電子地盤情報は全国的に整備されつつある(例えば、藤原ほか, 2009)。今後、地下環境についてより幅広く各種の電子地球科学情報が編集・一般公開され、様々に効率的・総合的・継承-発展的な利用が進展することを期待したい。

謝辞: 活断層・地震研究センターの担当の方には、電子出版物の提供のご協力を頂いた。原稿について、地熱資源研究グループの阪口圭一グループ長、北海道センターの中川 充氏には有益なコメントを頂いた。また、北海道の温泉について長らく様々な調査・研究を進められ、議論をして頂いた(株)ドリリング計測の松波武雄氏(元 北海道立地下資源調査所所属)からは、今回貴重なコメントを頂いた。記して厚く感謝します。

文 献

- 安藤 武(1982): 深層地下水地熱資源。湯原浩三 編, 地熱開発総合ハンドブック, フジテクノシステム, 748-766。
- 地質調査所(1995): 100万分の1日本地質図 第3版, CD-ROM版, 数値地質図, G-1。
- 地質調査総合センター(2002): 東北・九州地熱資源図(CD-ROM版)。数値地質図, GT-1。
- 地質調査総合センター(2005): 燃料資源地質図「三陸沖」。数値地質図, FR-1。
- 地質調査総合センター(2007): 九州-大分-豊肥地域の地熱データ処理集「地理情報システム(GIS)を利用した地熱資源の評価の研究(2001-2005年度)」のまとめと簡易統合的処理データ・プログラム集(CD-ROM)。数値地質図, GT-3。
- Collins, A. G. (1975): *Geochemistry of Oilfield Waters*. Elsevier, 496p.
- Davison, M. L. and Criss, R. E. (1996): Na-Ca-Cl relations in basinal fluids. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **60**, 2743-2752。
- 藤原広行・河合伸一・青井 真・森川信之・先名重樹・工藤暢章・大井昌弘・はお憲生・早川 謙・遠山信彦・松山尚典・岩本綱司・鈴木晴彦・劉 瑛(2009): 強震動評価のための全国深部地盤構造モデル作成手法の検討。防災科学技術研究所研究資料, no.337 (DVD付)。
- 北海道立地下資源調査所(1977): 北海道の地熱・温泉(B) 西南北海道北部。198p. 地下資源調査所調査研究報告, no.4。
- 北海道立地下資源調査所(1979): 北海道の地熱・温泉(C) 北海道中央部。192p. 地下資源調査所調査研究報告, no.7。
- 北海道立地下資源調査所(1982): 北海道地熱温泉分布図(60万分の1; 北海道地熱温泉一覧表および北海道の地熱温泉資源が付属)。北海道の地質と資源Ⅱ, 1葉(+22p+54p)。
- 甘露寺泰雄(2010): 温泉(深井戸)ボーリングデータ公開の課題。地質ニュース, no.667, 39-48。
- 小崎 尚・野上道男・小野有五・平川一臣 編(2003): 日本の地形2 北海道。東大出版会, 384p。
- 国安 稔・山田泰広(2004): 中央北海道南部地域の深部構造。石油技術協会誌, **69**, 131-144。
- 松波武雄(1992): 北海道の高濃度塩化物泉について。地下資源調査所報告, no.64, 17-30。
- 松波武雄(1993): 北海道中央部新第三系堆積盆の塩水について。地下資源調査所報告, no.65, 55-72。
- 松波武雄(1994): 北海道中央部および東部炭田地帯の塩水について。地下資源調査所報告, no.66, 27-39。
- 松波武雄(1995): 北海道の海岸地域に分布する高濃度塩水について。地下資源調査所報告, no.67, 41-58。
- 松波武雄・川森博史・藤本和徳・高橋徹哉(2007): 札幌市街北部の地下流体について。北海道立地質研究所報告, no.78, 157-161。
- 宮崎哲郎・柴田智郎・秋田藤夫・高橋徹哉・青柳直樹・中山憲司・内野栄治・橋爪 清・甘露寺泰雄(2007): 関東平野, 大阪平野, 石狩平野, 濃尾平野, 伊勢・志摩・鈴鹿地方における大深度温泉。温泉科学, **57**, 99-114。
- 日本の地質「北海道地方」編集委員会 編(1990): 日本の地質1, 北海道地方。共立出版, 337p。
- 岡 孝雄(2004): 流体資源ボーリングによる苫小牧地域の地下地質構造の解明(第1報) - 2003年十勝沖地震の地震動に関連して -。北海道立地質研究所報告, no.75, 85-108。
- 岡 孝雄(2005): 流体資源ボーリングによる札幌市中心部とその北西地域の地下地質構造の解明一付, 札幌市などによる6地震探査断面の地質解釈 -。北海道立地質研究所報告, no.76, 1-54。
- 奥山康子・佐々木宗建・村岡洋文・金子信行・徂徠正夫(2008): CO₂帯水層貯留での「地層水」の役割とわが国でのCO₂地化学トラッピングへの適用性。地学雑誌, **117**, 768-781。
- 石油技術協会(2004): 石油・天然ガス資源の未来を拓く - 最前線からのメッセージ。492p。
- 柴田智郎・秋田藤夫(2004): 札幌市とその周辺地域における温泉資源の現況。北海道立地質研究所報告, no.75, 27-31。
- 柴田智郎・秋田藤夫・鈴木隆弘・高橋徹哉(2005): 札幌市とその周辺地域における温泉資源。北海道立地質研究所報告, no.76, 79-82。
- 茂野 博・阿部喜久男(1977): 北海道白老町周辺の深層熱水の地球化学的特性。日本地球化学会年会講演要旨集, 1977, 140。
- Shigeno, H. and Abe, K. (1982): Oxygen and hydrogen isotope geochemistry of "connate" formation waters in Yabase oil field, Japan. *Abstracts of 5th Internat. Conf. on Geochronology, Cos-*

- mochronology and Isotope Geochemistry, Nikko National Park, Japan 1982, 344-345.*
- 茂野 博(1982):非火山性地域の地熱資源-深層熱水-,地質ニュース, no.337, 202-203.
- 茂野 博・阪口圭一(2002):地質調査所「100万分の1日本地質図CD-ROM版」メッシュデータの様々な利用法-国土地理院・標高メッシュ・ファイルフォーマット化を通じて-,地質ニュース, no.578, 36-49.
- 茂野 博(2004a):地熱流体化学データの簡易データベース化と統合解析-GISを利用した地熱資源評価研究の一環として「豊肥」地域を例に-,地質ニュース, no.594, 58-69.
- 茂野 博(2004b):石狩低地帯南部周辺(島弧プレート衝突域)における多様な熱水の帯状分布,日本地熱学会平成16年学術講演会講演要旨集, P14.
- 茂野 博(2005):九州地方を例とした「地球科学アトラス」の自作:電子地球科学情報の簡易的な統合利用に向けて-,地質ニュース, no.616, 44-57.
- 茂野 博(2008):プレートテクトニクスに基づく湯の峰・有馬温泉の生成環境のモデル化-電子地球科学情報の統合解析による近畿地方の高温温泉の検討(2)-,地質ニュース, no.647, 25-38.
- 茂野 博(2011):北海道 胆振地方,白老地域と周辺3広域地域の「温泉水」の地球化学・同位体化学的な特徴と起源-「深層熱水型資源」・「大深度(掘削)温泉」の事例研究-,地質調査研究報告, 62(印刷中).
- 鈴木隆弘・柴田智郎(2007):北海道,日本海側北部の温泉資源,北海道立地質研究所報告, no.78, 15-20.
- 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会(1982):日本の石油・天然ガス資源, 455p.
- 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, 520p.
- White, D. E. (1957): Magmatic, connate, and metamorphic waters. *Geol. Soc. Ame. Bull.*, **68**, 1659-1682.
- White, D. E., Barnes, I. and O'Neil, J. R. (1973): Thermal and mineral waters of non-meteoritic origin, California Coast Ranges. *Geol. Soc. Ame. Bull.*, **84**, 547-560.
- 吉田邦一・吉見雅行・鈴木晴彦・森野道夫・滝沢文教・関口春子・堀川晴央(2007):長周期地震動計算のための石狩平野および勇払平野の3次元堆積盆地構造モデル,活断層・古地震研究報告, no.7, 1-29.
- 吉田邦一・吉見雅行・関口春子・堀川晴央 編(2009):石狩平野・勇払平野3次元地盤構造モデル(CD-ROM),地質調査総合センター速報, no.48.
-
- SHIGENO Hiroshi (2011): Three-dimensional distributions of deep thermal-water chemistry and geology at the Ishikari Lowland and its surrounding areas, Hokkaido, studied based on open electronic Earth Sciences information.
-

<受付:2010年5月19日>