

熱・熱水の影響を考慮した広域地下水流動の数値シミュレーション

中尾信典¹・菊地恒夫²・玉生志郎²

Shinsuke Nakao, Tsuneo Kikuchi and Shiro Tamanyu (2008) Numerical simulations of regional-scale groundwater flow considering influence of heat and hydrothermal water. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 59(1/2), p.53 - 64, 11 figs, 3 tables.

Abstract: Numerical simulations of regional-scale groundwater flow and heat transport using a 2-D model are conducted along the E-W Tohoku region which covers 120 km length and 8.7 km depth. In the numerical simulations, geological and topographical data are incorporated to construct a precise numerical model. A multi-component, multi-phase geothermal reservoir simulator is used for the numerical simulations. As results of sensitivity analysis, it is necessary to assign inhomogeneous heat sources (heat flows) at the bottom of the model to qualitatively reproduce high-temperature anomalies right beneath the mountain areas. It is also revealed that deep-seated hot water around the temperature of 50 °C can be found even right beneath the plains due to heat and groundwater convection and advection driven by topographical effects, although volcanic high-temperature heat sources are not existed under the plains.

Keywords: regional, groundwater flow, numerical simulation, hydrothermal water, heat source, permeability

要 旨

北上低地を含む東北地方の東西120 kmにわたる地形を取り込んだ2次元断面について、地質データ等を参考にして精緻なモデルを作成し、地熱用の多成分多相流体流動シミュレータを用いた広域流動シミュレーションによる感度解析を実施した。その結果、山岳部地下の熱異常（高温部）を定性的に再現するためには、一様ではない熱源（熱流量）を与える必要があることが判明した。また、平野部（低地）では火山性熱源が直下になくても、地形効果による地下水の対流などにより、50 °C程度の深層熱水が賦存する可能性があることがシミュレーションにより確認された。

1. はじめに

火山フロントの前弧側では一般的に、火山フロントから離れるに従って温泉の分布密度と温度は低下する。火山フロントから20~30 kmほど離れると温度が低下して鉱泉のみとなる場合が多いが、例えば東北地方ではフロントから40 km程離れた上北平野や75 kmも離れた常磐において、数多くの温泉が存在している。このような非火山性地域の熱異常の状況や成因を調査することが必要である（例えば、玉生、2004）。

そこで、高温地域の地球科学的特性、高温地域の成

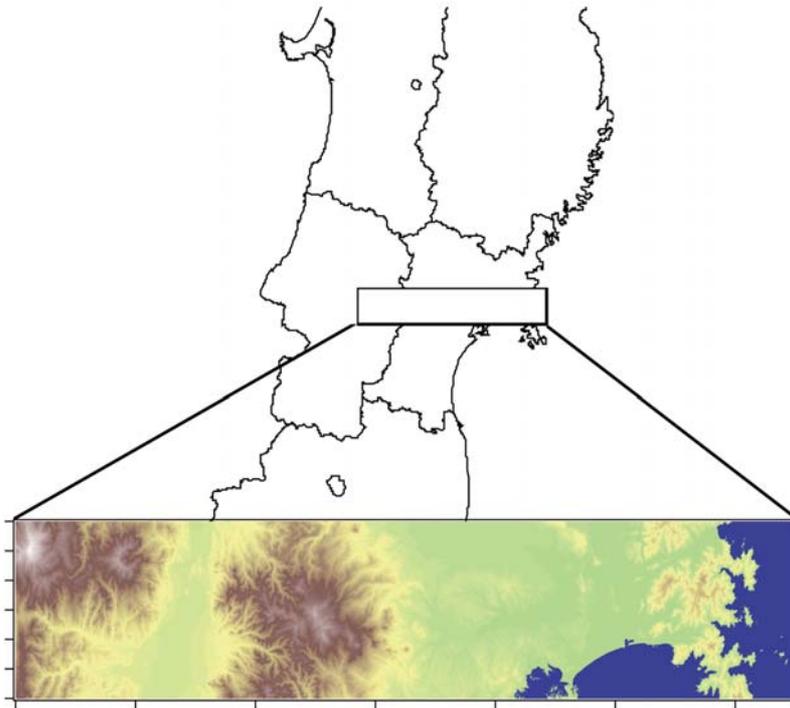
因、調査・解析・評価手法の観点から、非火山地域の熱異常の状況や成因を明らかにし、熱・熱水に対する長期的な影響を適正に評価することを目的として、原子力発電環境整備機構（NUMO）の委託研究「熱・熱水の影響評価手法に関する検討」（平成15年度~17年度）が進められた。その一環として、本研究では、広域流体流動系の数値シミュレーションを対象とし、国内外の文献調査から数値モデル構築に必要なモデル域の規模、物性分布、境界条件等のパラメータの範囲を検討してきた（中尾ほか、2004）。また、委託研究全体で得られる地質、地化学、及び物理探査等のデータを参考にしてモデル地域の概念モデルを構築して広域流動シミュレーションを実施し、非火山地域における熱異常の間接的な成因の検討を行ってきた。

熱と地下水の移動に関係する最も重要なパラメータのひとつは、地層・岩石の浸透率である。水圧勾配が1 MPa/kmより小さい上部地殻では、浸透率が 10^{-20} m^2 以上であると溶質について、更に 10^{-16} m^2 以上であると熱について、移流の効果が無視できなくなる。また、広域スケールでの地下水と熱の連成した解析では浸透率が 10^{-17} から 10^{-14} m^2 のレンジが妥当と示唆される場合が多いので、溶質の移動においては常に、また熱の移動においては多くの場合に、移流効果が卓越する（Manning and Ingebritsen, 1999）。

ここでは、北上低地を含む東北地方の東西120 kmに

¹地圏資源環境研究部門：現 経済産業省(AIST, Geological Survey of Japan, Institute for Geo-Resources and Environment : at present, METI)

²地圏資源環境研究部門(AIST, Geological Survey of Japan, Institute for Geo-Resources and Environment)



第1図 シミュレーション実施地域の平面図.

Fig.1 Location map of the simulation area.

わたる地形を取り込んだ2次元断面について(第1図), 地質データ等を参考にして仮想的な精緻モデルを作成し, 地熱用の多成分多相流体流動シミュレータを用いた広域流動シミュレーションによる感度解析を実施した結果を報告する. 非火山性地域熱異常の成因を検討するために用いた感度解析の主なパラメータは, 上述の地層・岩石の浸透率, 熱異常に大きな影響を与えると考えられる熱源の位置や規模に関する静的な境界条件である.

2. 当該地域の既存データについて

文献調査の一環として, シミュレーションによる感度解析の対象エリア周辺域の既存データを収集した. 第1図に示したシミュレーション対象域に最も近いエリアでは, 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)による地熱開発促進調査「尾花沢東部地域」の調査データ(NEDO, 1991)がある. 尾花沢東部地域は, 山形県北東部の尾花沢市にあり, 同市東部の銀山温泉をほぼ中心とした面積65 km²の範囲からなる. 参考としたデータは, 7本掘削された400 m級の熱流量坑(OB-T-1~OB-T-7)及び3本掘削された調査井(N63-OB-1, N1-OB-2, 3)のデータである. 調査井の地層別・岩石別の有効空隙率及び熱伝導率を第1表に示す. これらの物性データは, “4.5章 その他の物性値の検討”

において用いられている.

また, シミュレーション実施地域付近の温泉温度データを, 地質調査総合センター発行の東北・九州地熱資源図(CD-ROM版)から抜粋した(地質調査総合センター, 2002). シミュレーションモデルの2次元断面測線図, 尾花沢東部地域の熱流量坑の位置と, 温泉の位置を第2(a)図に示す. また, 第2(b)図には, 泉温データと熱流量の値を示している. 第2表には, 温泉の位置と泉温を示す. これらの既存データを, シミュレーション結果との定性的な比較に使用する.

3. シミュレーション・モデルの作成

広域流動シミュレーションには汎用シミュレータSTARを使用した(Pritchett, 1995). 本シミュレータは解法に差分法を用いている. STARについての詳細は, 石戸(2002), 中尾ほか(2004)を参照されたい.

シミュレーション・モデルを作成した手順は以下のとおりである. まず, 図化処理ソフトウェアのAVSを用いて, 国土地理院の数値地図50 mメッシュ(国土地理院, 1997)から標高データを読み取り, シミュレーション実施予定地域の平面図を作成する(第1図). 平面図の左下の点は, 北緯38度20分, 東経140度, 右上の点は, 北緯38度35分, 東経141度37分30秒となり, 東西約120 km, 南北約30 kmの範囲となる. 原点は左

第1表 尾花沢東部地域調査井の地層別・岩石別有効空隙率及び熱伝導率. NEDO (1991)より引用.

Table 1 Effective porosity and thermal conductivity of core samples obtained from survey wells in Obanzawa-tobu area (NEDO, 1991).

地層名	岩石名	個数	有効空隙率(%)	個数	熱伝導率(W/m·K)
田沢層	凝灰岩	-	-	17	1.24
	砂岩	-	-	4	1.31
	シルト岩	-	-	1	1.64
	計	-	-	55	1.27
延沢層	凝灰岩	-	-	1	1.12
	砂岩	-	-	1	1.47
	シルト岩	-	-	8	1.64
	計	-	-	10	1.57
銀山層	火山礫凝灰岩など	61	23.02	122	1.34
	計	61	23.02	122	1.34
新山層	玄武岩(水冷破碎溶岩)	12	15.94	17	1.71
	安山岩溶岩	-	-	1	1.22
	凝灰岩	10	14.63	12	2.36
	砂岩など	61	16.29	75	2.17
	計	83	16.04	105	2.11
楯岡層	砂岩・泥岩	5	8.95	5	2.67
	凝灰岩	11	18.17	11	1.41
	計	16	15.29	16	2.34
貫入岩	デイサイト	2	11.06	13	2.3
	安山岩	4	13.77	4	2.23
	ドレライト	9	5.44	9	2.11
	計	15	8.41	26	2.22

下の点とし、横軸、縦軸とも単位はkmである。次に、データベースソフト (SAIC社製GEOSYS) のシミュレータ用入力ファイル作成機能を用いて、第1図に示した標高データを読み込み、シミュレーション用グリッドブロック、境界条件、初期条件等を与える入力ファイルを作成する。GEOSYSに読み込んだ標高データからモデルの範囲を指定し、その範囲を差分のグリッドに分割する。

シミュレーションは、第2 (a) 図の赤の太い実線 (A-B) にそった断面について2次元で行うこととし、なるべく2次元性があるような断面位置を選定した。差分モデルは第3 (a) 図に示すようなx-z断面で、東西 (x) 方向に約120 kmの距離を50分割、深度 (z) 方向に-8,700 m~1,300 mの間を26分割した。z方向には、地表面付近を細かく分割し ($\Delta z=0.1$ km, 第3 (b) 図参照)、深度が大きくなるにしたがって分割を大きくしている ($\Delta z=0.5\sim 1$ km)。また、紙面に向かって垂直方向 (y方向) には厚さ2 kmのブロックを1つ設定した。

グリッド中の数字は地層の区分を表しており、下から順に1と2がそれぞれ下部基盤岩と上部基盤岩 (先第三系基盤岩類)、3が透水ゾーン (第三系)、4がキャップブロック (第三紀後期シルト層)、5が表層 (第四紀火山岩類)、0が大気である。この2次元断面 (第3図) は、

玉生ほか (2008) のタイプ分類に基づくと、紙面に向かって左から背弧側山地 (月山) - 背弧低地 (山形盆地) - 第四紀火山性山地 (舟形山) - 前弧側低地 (仙北平野) を測線として想定したモデルである。

第3表に5種類の地層の物性値を示す。これらの地質区分は、北村 (1986) を主に参考にして区分したものである (第4図)。透水ゾーンの分布深度と下部形状は、高橋ほか (1996) 及び駒澤 (2003) による重力基盤図を参考にして作成している。地層物性値のうち、浸透率についてはTamanyu (2004) を参考にして水平方向の浸透率を設定し、垂直方向の浸透率は水平方向の1/10とした。地層の熱伝導率及び空隙率については、尾花沢東部地域のコアから得られたデータがあるが、局所的なデータであることを鑑み、全地層ともそれぞれ2.0 W/m·K及び0.05とした。他の物性値は、日本の一般的な地質情報を参考にして設定し、一般的な感度解析を目的とした。

4. 広域流動モデリングの感度解析

4.1 境界条件及び初期条件

初期条件として、温度は地表面温度を15℃とし、モデル全体も15℃で一様とした。圧力は、標高0 mを1

第2表 シミュレーション実施地域付近の温泉位置と泉温. 地質調査総合センター (2002) より引用.

Table 2 Locations and temperature of hot springs near the 2-D simulation model.

温泉番号	温泉地名	都道府県	所在地	経度	緯度	泉温
AKI403	追分	宮城県	桃生郡北上町女川字大峰	141.409	38.571	24
AKI405	松島	宮城県	宮城郡松島町磯崎浜	141.087	38.374	24
AKI406	湯ノ原霊泉	宮城県	宮城郡松島町松島字湯ノ原	141.05	38.364	14.5
AKI443	三本木	宮城県	志田郡三本木町坂本字青山	140.91	38.508	24
AKI445	牛野森	宮城県	黒川郡大衡村大瓜上	140.835	38.466	18.2
AKI446	花の杜	宮城県	黒川郡大衡村大瓜字中山	140.83	38.463	53
AKI447	台ヶ森	宮城県	黒川郡大和町台ヶ森	140.817	38.438	17
AKI453	定義	宮城県	仙台市青葉区大倉屋敷平	140.663	38.375	38.9
AKI457	泉	宮城県	仙台市泉区福岡湯沢	140.78	38.358	24.6
AKI540	銀山	山形県	尾花沢市銀山新畑	140.539	38.565	62.4
AKI541	鶴子・尾花	山形県	尾花沢市赤森山	140.517	38.539	30.5
AKI544	細野	山形県	尾花沢市細野	140.466	38.549	12.6
AKI548	大石田	山形県	北村山郡大石田町豊田字西浦	140.416	38.566	50.1
AKI549	湯舟沢	山形県	村山市土生田	140.423	38.546	19.5
AKI550	樽石戸羽沢	山形県	村山市樽石	140.325	38.513	14
AKI551	湯野沢	山形県	村山市湯野沢湯の入	140.291	38.475	29
AKI552	南郷	山形県	村山市湯野沢南郷	140.323	38.467	64.7
AKI553	基点	山形県	村山市基点	140.347	38.486	40
AKI554	東沢	山形県	村山市楯岡大沢	140.406	38.48	44
AKI555	東根	山形県	東根市東根	140.398	38.459	69
AKI556	上野	山形県	寒河江市白岩	140.212	38.409	39
AKI557	白岩	山形県	寒河江市白岩福田	140.229	38.408	22
AKI558	石持	山形県	寒河江市石持町	140.27	38.39	34.1
AKI559	寒河江	山形県	寒河江市寒河江, 幸町	140.275	38.375	46
AKI560	新寒河江	山形県	寒河江市島島西	140.282	38.363	52
AKI561	高嶋	山形県	寒河江市島島東	140.287	38.354	17.5
AKI562	河北	山形県	西村山郡河北町	140.318	38.413	30.8
AKI563	天童	山形県	天童市山元, 貫津	140.385	38.353	70.1
AKI564	鼻毛	山形県	天童市貫津山崎	140.403	38.348	28
AKI566	塩原	山形県	東村山郡中山町	140.26	38.348	39
AKI568	海味	山形県	西村山郡西川町	140.152	38.433	15
AKI569	間沢	山形県	西村山郡西川町	140.129	38.426	13
AKI570	本道寺	山形県	西村山郡西川町	140.073	38.439	27.3
AKI574	左沢	山形県	西村山郡大江町	140.215	38.383	21.5
AKI575	左巻	山形県	西村山郡大江町	140.209	38.362	17
AKI645	弥蛇原	山形県	東田川郡立川町(本沢25林班)	140.028	38.583	2.6

気圧とし、深度方向に静水圧を与え、モデル全体が水で飽和されている状態とした。状態方程式については、今回は、水の二相（液相と蒸気相）を取り扱うものを使用した。

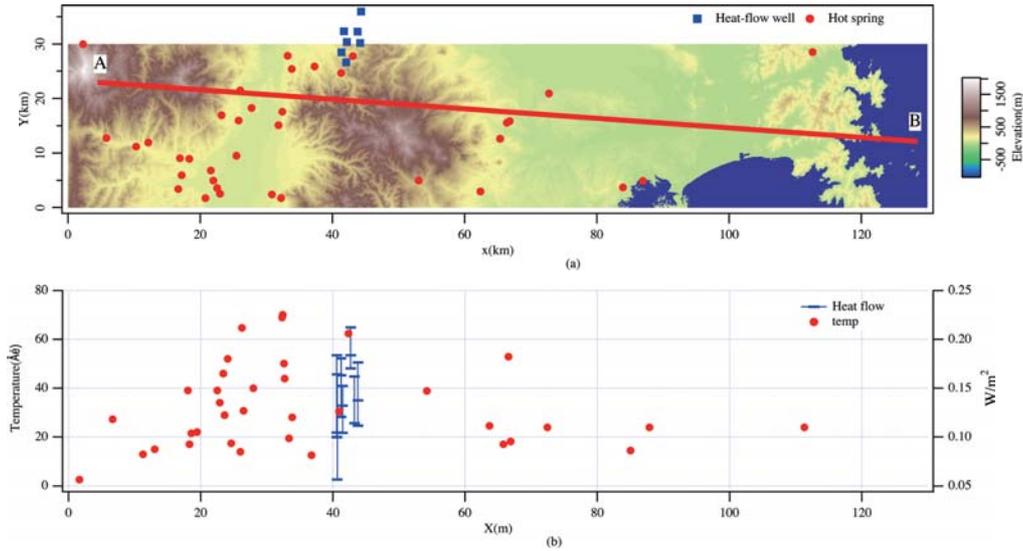
境界条件は、上面に関しては、標高0mの地表面を1気圧、15℃とし、標高が高くなるにしたがって標準的に気圧及び温度が小さくなるような圧力一定境界とした。それ以外の他のすべての面（側面及び下面）は閉境界とした。モデルを単純化するため、東側面の海域の影響（海水準の変動等）は含めていない。最下部には、全面にわたり熱流量を与え（それらの分布についてはパラメータの項で説明する）、100万年の計算時間で、地

下の温度分布がどのようなになるかを調べた。つまり、100万年前を時間ゼロとして計算を開始し、現在（100万年後）の温度分布状態の再現を試みたものである。

4.2 感度解析を行ったパラメータについて

流体流動のシミュレーションでは、様々な入力パラメータと境界条件を用いるが、モデルの形状や、地質データ等を総合的に解釈して、問題設定に最適なものを選択する必要がある。その中で、熱・熱水の流動に関して重要と考えられる熱源と、地層（岩石）の浸透率について主に検討を行った。

熱源に関しては、広域流動モデルの下部境界（深さ



第2図 (a) シミュレーションモデルの2次元断面測線図及び温泉(丸), 尾花沢東部地域の熱流量坑(四角)の平面位置. (b) 周辺地域の温泉温度データと「尾花沢東部」地域の熱流量データ (NEDO,1991).

Fig. 2 (a) Trajectory on the ground surface of the 2-D simulation model, locations of hot springs (solid circles) and heat-flow observation wells (squares) in Obanaza-Tobu area, (b) Temperature values of hot springs and heat flow values of observation wells in Obanazawa-tobu area (NEDO, 1991).

8.7 km)に、熱流量(熱流密度)として与える。日本における平均的な熱流量は60 mW/m²程度であるが、ここでは玉生・佐藤(2004)による当該地域の推定温度断面(第5図)を参考にして、高温域が上に凸状になっている部分に対しては熱流量を大きくし、一様でない与え方を試みた。

浸透率に関しては、前章で述べたように地層を5種類に区分し、各地層に第3表に示した浸透率を与えた。これを基準として、流動の主要な領域を占める上部基盤岩の浸透率と透水ゾーンの浸透率を大きく設定した場合に、どのような温度分布になるかを検討した。また、基準モデルでは深度方向の浸透率を水平方向のその1/10としたが、その比を変化させた場合も計算を行った。

更に、当該地域近傍で実施された地熱開発促進調査「尾花沢東部地域」にて得られている他の岩石物性を当てはめた場合の結果も検討した。

4.3 熱源に関する感度解析

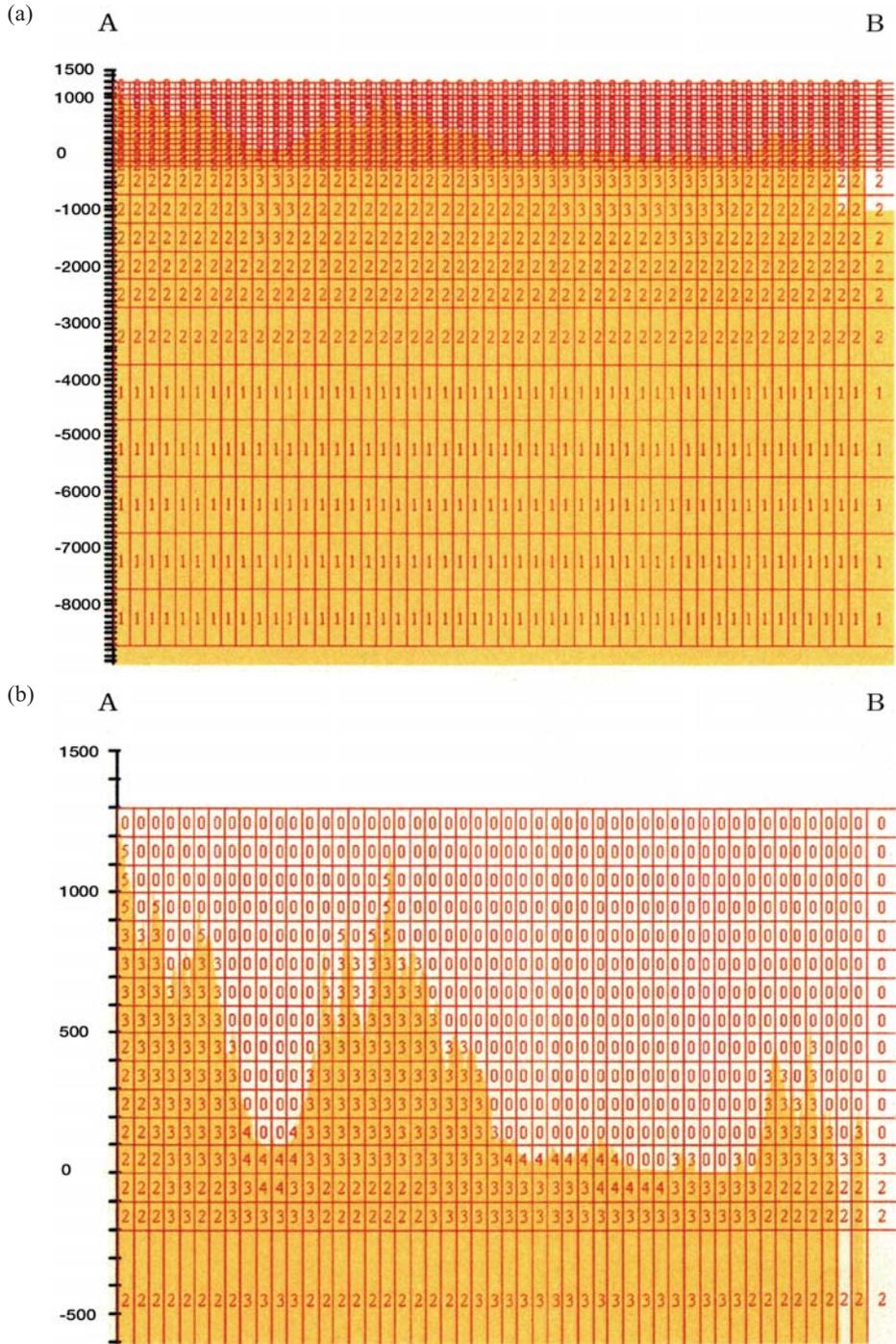
玉生・佐藤(2004)による温度断面図では、背弧側山岳部(月山付近)と前弧側山岳部(舟形山付近)の直下に高温域が凸状に張り出している(第5図)。これを表すために、山岳部直下の熱流量を大きく、平野部の熱流量を小さくするような熱源を設定した(第6図)。ケース2から4になるにしたがって、高熱流量域の値が90 mW/m²から100, 120へと大きくなるように、低熱流量域の値が60 mW/m²から50, 40と小さく

なるように設定している。参考のため60 mW/m²で一様な熱流量とした場合をケース1として計算を行った。第7図は、シミュレーションにより計算された100万年後のモデル全体(x-z断面)の温度分布を示している。図中の黒枠は5つに区分した地層を表している。100万年後の計算結果を見ると、ケース2から4の熱源が一様でない場合は、2つの山岳部直下で高温域が凸状になっていることが観察される。一方、平野部の温度分布については、平野部の熱流量が60 mW/m²の場合(ケース1, 2)、50℃のコンターが地表面に凸状に突き出す結果となり、50 mW/m²(ケース3)では50℃コンターが地下浅部に地表面に並行して留まり、40 mW/m²(ケース4)であれば50℃コンターが地下浅部で凹状に現れていることが観察される。

これらの結果から、温度分布の高低を定性的に再現するためには、少なくとも一様ではない熱源を与える必要性が示唆される。また、熱流量の定量的な推定は難しいが、今回のモデルでは、深度8.7 kmにおいて40 mWから120 mW/m²の熱流量を与えている。

4.4 浸透率に関する感度解析

ここでは、広域地下水流動の主要な領域を占める上部基盤岩の浸透率とその上位に位置する透水ゾーンの浸透率を大きくした場合に、どのような温度分布になるかを検討した。熱源は上述のケース3に用いたものとし、第8図に示すように上部基盤岩の浸透率を10倍とした場合をケース3A、上部基盤岩の浸透率と透水ゾー



第3図 (a)A - Bラインに沿った二次元モデルのブロック分割と地層の分布 (0: 空気, 1: 下部基盤岩, 2: 上部基盤岩, 3: 透水ゾーン, 4: キャップロック, 5: 表層), (b)地表面付近を拡大した図.

Fig. 3 (a) 2-D simulation model along the line A-B with finite difference grid and distribution of layers. 0: air, 1: lower basement rock, 2: upper basement rock, 3: permeable rock, 4: cap rock, 5: surface rock. (b) enlarged figure of ground surface.

ンの浸透率をそれぞれ50倍及び10倍とした場合をケース3Bとする。それぞれ100万年の計算時間で得られた温度分布を比較した(第9図)。

50℃のコンターに着目すると、ケース3では深部の熱伝導卓越の状況が影響し、山岳部(高い熱源位置)直

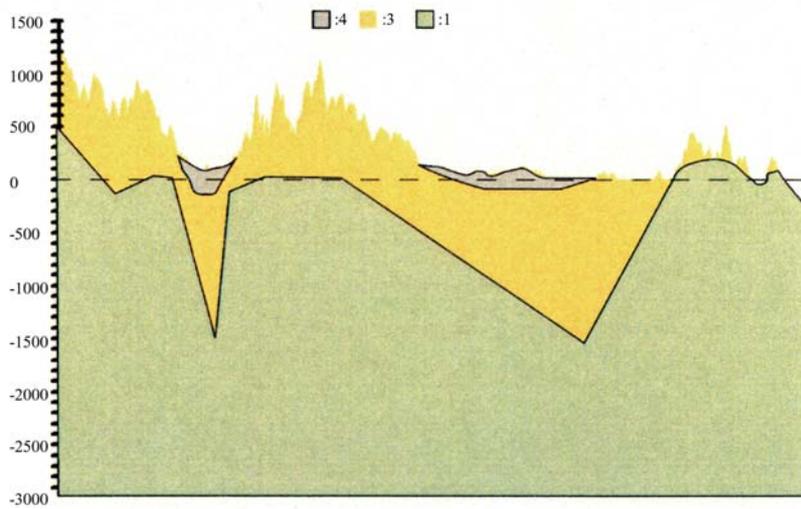
下の浅部が高温となっている。上部基盤岩の水平浸透率が透水ゾーンと同じ 10^{-15} m^2 となるケース3Aでは、平野部において逆に高温の盛り上がり形成されてくる。これは、深部の熱伝導卓越の状況から徐々に熱の移流効果が大きくなってきたためと解釈される。更に透水

熱・熱水の影響を考慮した広域地下水流動シミュレーション(中尾ほか)

第3表 シミュレーションに用いた地層の物性値.

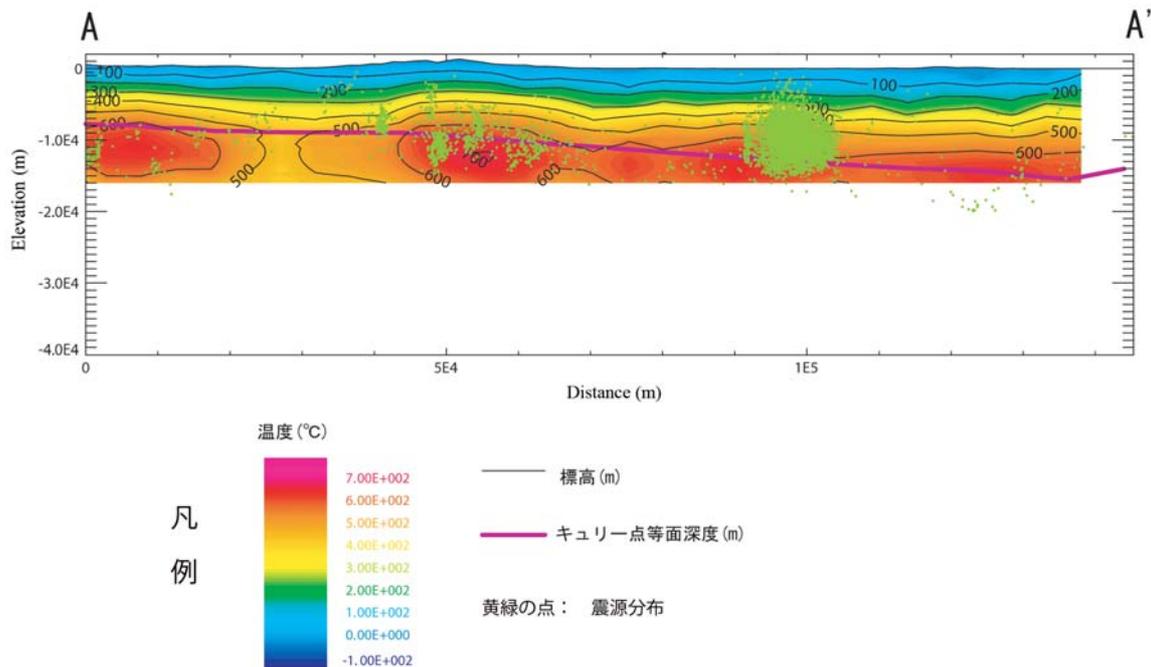
Table 3 Description of rock units and their physical properties in numerical simulations.

地層	下部基盤岩	上部基盤岩	透水ゾーン	キャップロック	表層
区分番号	1	2	3	4	5
熱容量 (J/kg·K)	1000	1000	1000	1000	1000
熱伝導率 (W/m·K)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
密度 (kg/m ³)	2600	2600	2600	2600	2600
空隙率 (-)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
体積弾性率 (Pa)	2x10 ¹⁰				
浸透率(x方向) (m ²)	1x10 ⁻¹⁷	1x10 ⁻¹⁷	1x10 ⁻¹⁵	1x10 ⁻¹⁷	1x10 ⁻¹⁵
浸透率(y方向) (m ²)	1x10 ⁻¹⁷	1x10 ⁻¹⁷	1x10 ⁻¹⁵	1x10 ⁻¹⁷	1x10 ⁻¹⁵
浸透率(z方向) (m ²)	1x10 ⁻¹⁸	1x10 ⁻¹⁸	1x10 ⁻¹⁶	1x10 ⁻¹⁸	1x10 ⁻¹⁶



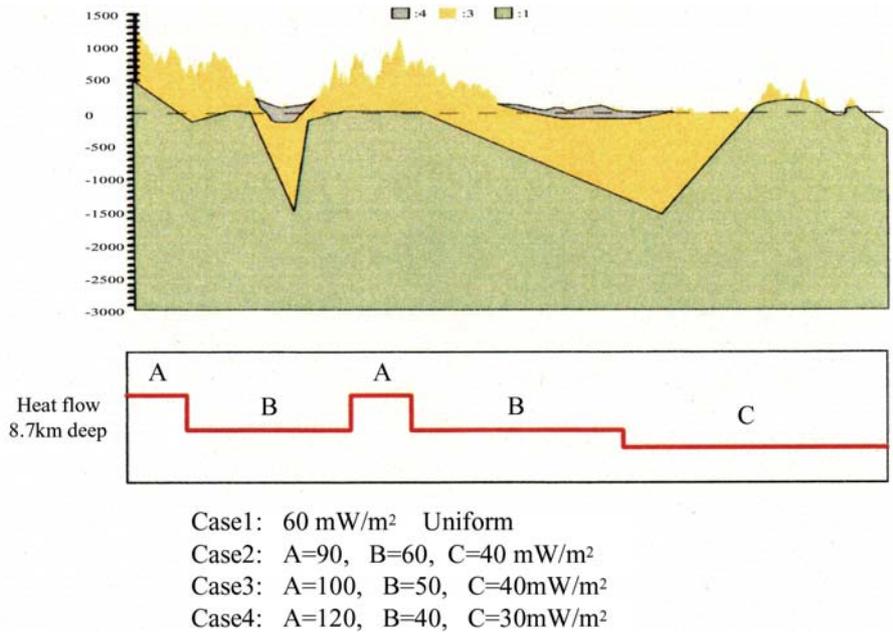
第4図 推定地質構造断面図. 1: 基盤岩, 3: 透水ゾーン, 4: キャップロック. なお, 5の地層は浅層にごく一部分布しているだけなので省略しており, 基盤岩はシミュレーション計算では上部と下部の2つに分けたが, 本図では分けて表示していない.

Fig. 4 Cross-section view of the estimated geologic structure along the line A-B. 1: Basement rock, 3: permeable rock, 4: cap rock. Surface rock is omitted in this figure because the area is very small. Upper and lower basement rocks are displayed collectively in one.

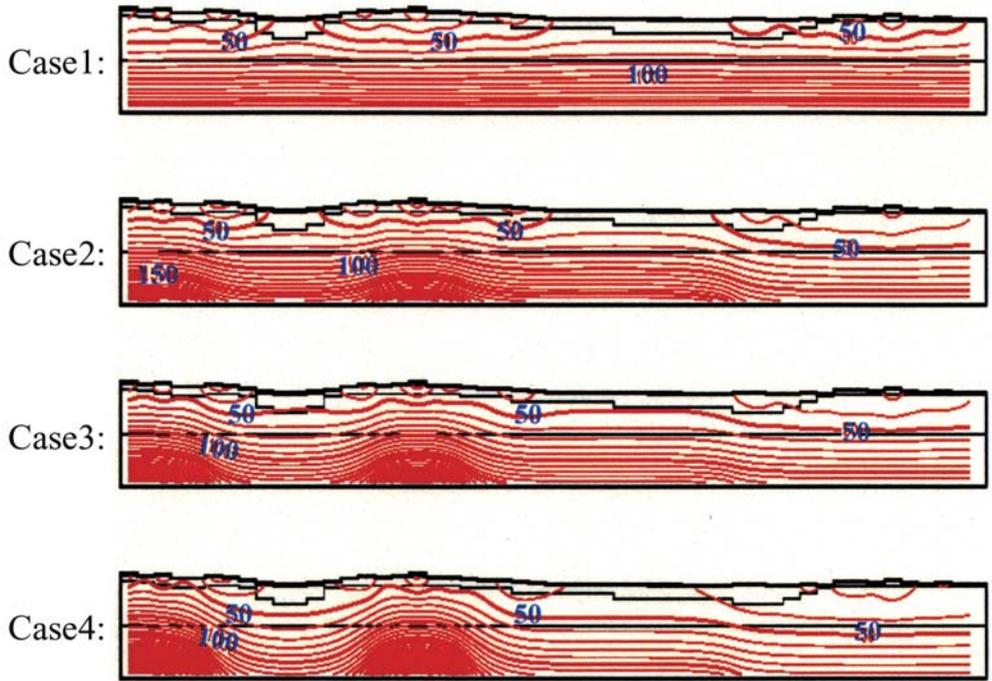


第5図 玉生・佐藤 (2004) による当該地域の推定温度断面図.

Fig. 5 Cross-section view of estimated temperature distribution along the line A-B from Tamanyu and Sato (2004).



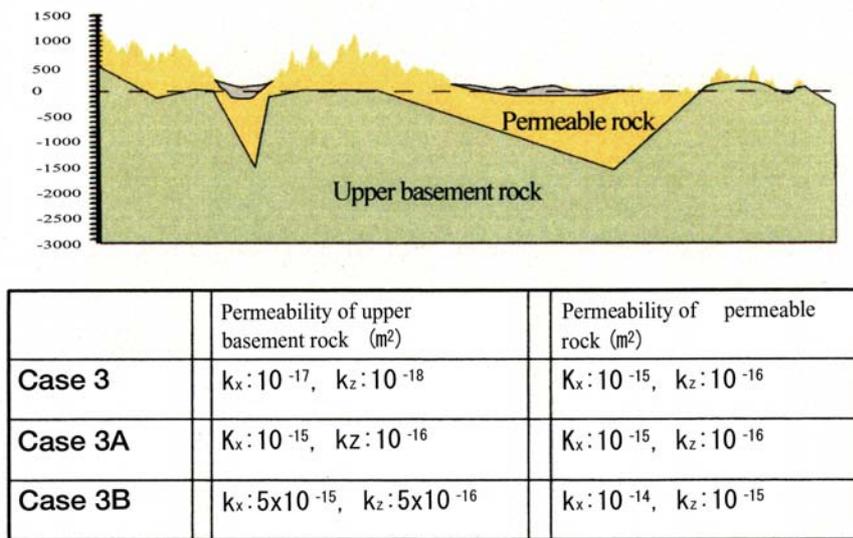
第6図 熱流量（熱源）検討の設定ケース。
 Fig. 6 Four simulation models (Case 1-4) for various heat sources.



第7図 熱流量（熱源）の検討，100万年後の温度分布計算結果。
 Fig. 7 Distributions of calculated temperature after 1,000,000 years in simulations for Case 1-4.

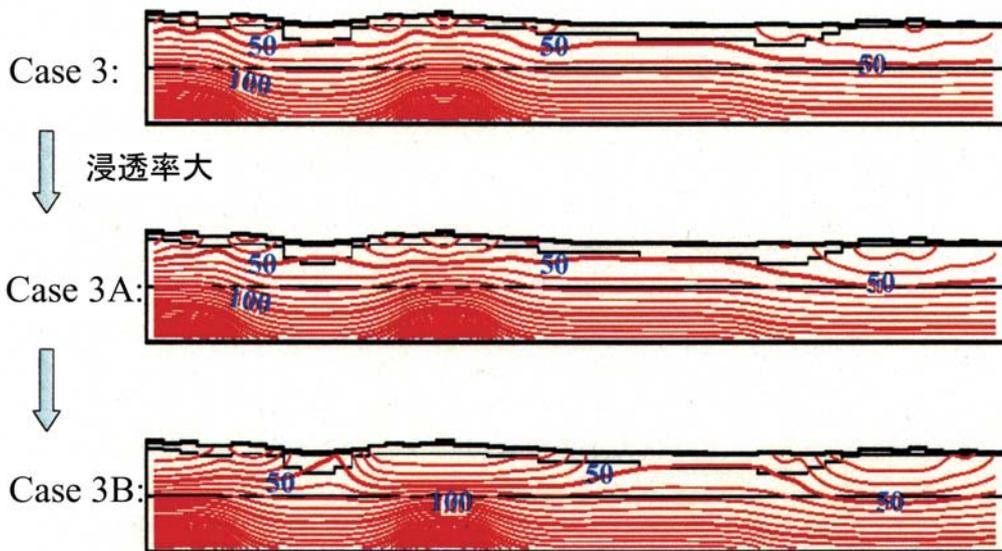
ゾーンと上部基盤岩の浸透率が大きいケース3Bでは、熱の移流効果が卓越し、更に地形の起伏に起因した山岳部から平地への流れも加味され、山岳部の浅部で低温、平地の浅部で高温となる温度の逆転現象が現れて

くる。Hayba and Ingebritsen (1997) は貫入岩の冷却による熱水系発達の問題を数値シミュレーションにより検討し、浸透率が 10^{-16} m^2 以下であると熱伝導が卓越し、 10^{-15} m^2 以上では移流効果が卓越することを示した



第8図 浸透率の検討の設定ケース。

Fig. 8 Three simulation models (Case 3, 3A, 3B) for various values of permeability.



第9図 浸透率の検討, 100万年後の温度分布計算結果。

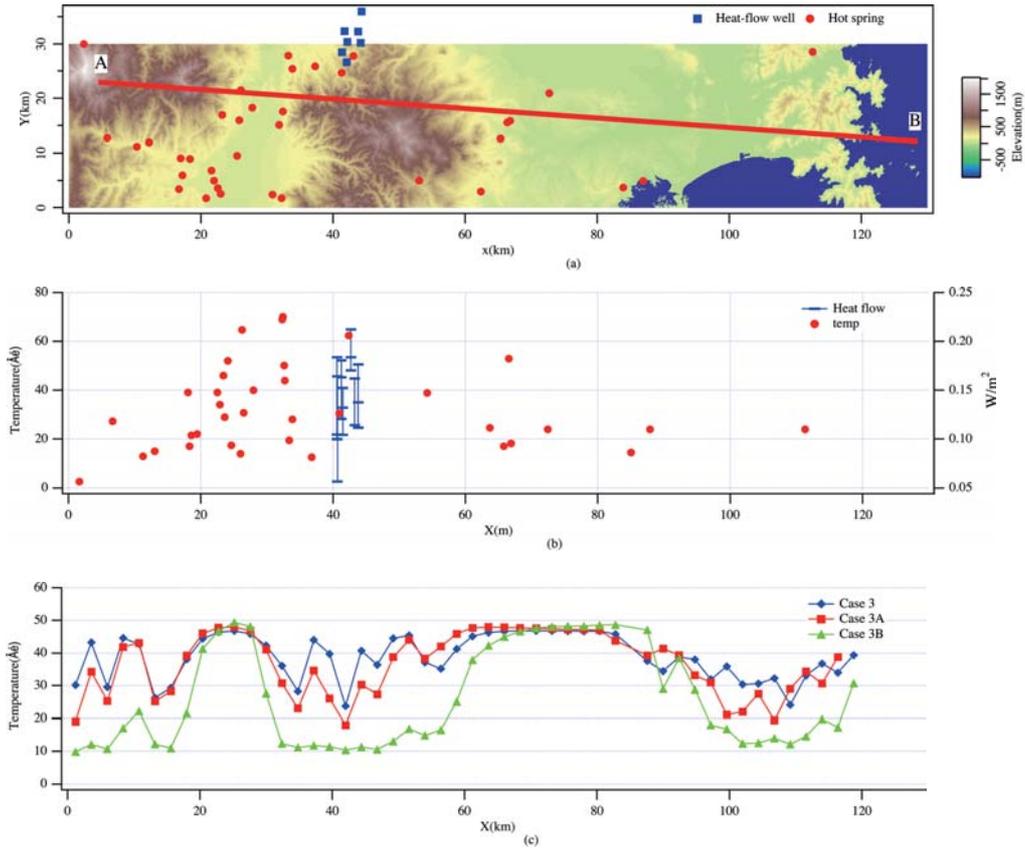
Fig. 9 Distributions of calculated temperature after 1,000,000 years in simulations for Case 3, 3A and 3B. Case 3B has the largest permeability values of upper basement rock and permeable rock.

が、本検討もそれと調和的な結果を示している。

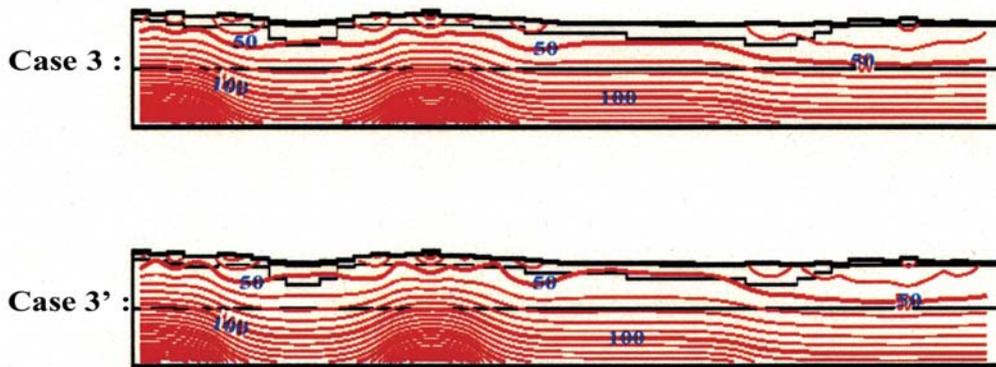
第10図は、計算結果における地表面グリッドブロックの温度分布を東西測線に沿って表示したものである。併せて当該地域の温泉温度データ及び地熱開発促進調査「尾花沢東部地域」の熱流量データを比較表示している。温泉温度データと計算値を比較するとよく一致しているとはいえないが、オーダー的には矛盾がない範囲と考えられる。どの計算のケースも平野部の温度は50℃弱となっており大きな違いが無い。一方山岳部で

は、ケース3及び3Aの温度分布パターンは類似しているが、ケース3Bの温度は10℃へと極端に低下していることが観察される。山岳部で実際に60℃程度の温泉が存在することや、尾花沢東部の熱流量データが平均と比較して大きいことから、ケース3Bの温度分布より、ケース3及び3Aの温度分布の方が定性的には現実的であると考えられる。このような考察から、浸透率の適切な範囲をある程度想定することが可能であろう。

また、基盤岩(上部及び下部)の鉛直方向浸透率を



第10図 (a)シミュレーションモデルの2次元断面測線図及び温泉、熱流量坑の平面位置、(b)周辺地域の温泉温度データと「尾花沢東部」地域の熱流量データ (NEDO,1991)、(c)浸透率の検討における計算時間100万年後の地表面グリッド温度分布。
 Fig. 10 (a) Trajectory on the ground surface of the 2-D simulation model, locations of hot springs (solid circles) and heat-flow observation wells (squares), (b) Temperature values of hot springs and heat flow values of observation wells in Obanazawa-tobu area (NEDO, 1991), (c) Distributions of calculated temperature of the ground surface grids after 1,000,000 years in simulations for Case 3, 3A and 3B.



第11図 熱伝導率の検討、100万年後の温度分布計算結果。
 Fig. 11 Distributions of calculated temperature after 1,000,000 years in simulations for Case 3 and 3'. Thermal conductivity and porosity of Case 3' are greater than those of Case 3.

基本ケースであるケース3の 10^{-18} m^2 から1/10の 10^{-19} 、10倍の 10^{-17} と変えて計算を行ったが、温度分布構造には有意な変化は認められなかった。

4.5 その他の物性値の検討

次に、当該地域周辺で実施された地熱開発促進調査「尾花沢東部地域」において得られている岩石の熱伝導率と空隙率データ(第1表)を当てはめた場合のシミュ

レーション結果を検討した。基盤岩(上部及び下部)の熱伝導率を2.0から2.3 W/m·K, 透水ゾーンから上位の地層のそれを2.0から1.5 W/m·Kに変更した。また, 空隙率は, 基盤岩(上部及び下部)を0.05で変えず, 透水ゾーンから上位の地層を0.05から0.15に変更した。これをケース3'とする。前述のケース3の計算結果とケース3'の温度分布を比較したものを第11図に示す。50℃のコンターに着目すると, ケース3'では50℃のコンターがやや浅部に移行していることが観察される。これは, 基盤岩の熱伝導率を大きくしたために, ケース3に比べて鉛直方向の熱伝導が促進されたためと考えられる。地層の熱伝導率は, 標準的には1から3 W/m·K強の範囲なので, 数桁のオーダーで変化する浸透率の影響ほど大きくはないと考えられるが, 熱伝導・移流に関しては非常に重要な物性値である。特定地域の広域地下水流動モデリングを実施する場合は, その地域の具体的な地質情報及び地層物性値に関する文献調査を行うとともに, 坑井調査により岩石物性を把握しておく必要がある。

5. まとめ

北上低地を含む東北地方の東西120 kmにわたる地形を取り込んだ2次元断面について, 地質データ等を参考にして精緻なモデルを作成し, 地熱用の多成分多相流体流動シミュレータを用いた広域流動シミュレーションによる感度解析を実施した。本シミュレーションでは, 熱源の規模及び位置などの静的な境界条件, また, グリッドブロックの岩石物性値などをパラメータとして検討した。その結果及び展望をまとめる。

(1) 熱源に関する感度解析の結果, 山岳部地下の熱異常(高温部)を定性的に再現するためには, 一様ではない熱源(熱流量)を与える必要があることが確認された。今回のモデルでは深度8.7 kmにおいて40 mWから120 mW/m²程度の熱流量を与えた。

(2) 浸透率に関して定性的には, 浸透率が小さいと熱伝導が卓越して山岳部地下が高温となること, 浸透率が中程度になると熱伝導に熱移流の効果が加わり山岳部地下のみならず平地の地下にも高温部が生じてくること, 浸透率が大きいと熱移流が卓越してくるため逆に山岳部地下が低温で平地の地下が高温となってくること, が示された。山形盆地及び仙北平野両方の平野部(低地)では, 火山性熱源が直下になくても適度な浸透率構造を伴えば, 地形効果による地下水の対流などにより, 50℃程度の深層熱水が賦存する可能性があることがシミュレーションにより確認された。

(3) 地質データに基づいた熱源の設定及び地層の浸透率の設定が地下温度分布の再現には非常に重要なパラメータであることが確認された。また, 地層の熱伝

導率も重要なパラメータである。

(4) 広域地下水流動の数値シミュレーション結果の妥当性を検討するためには, その地域の観測データ, すなわち温泉データ(温度データ)や熱流量データと比較検討することが不可欠である。したがって, 特定地域の広域地下水流動モデリングを実施する場合は, その地域の具体的な地質情報, 水文学的情報及び地層物性値に関する文献調査を行うとともに, 対象エリアを面的または測線的にカバーする坑井調査等により坑井内温度・圧力・流量, 熱流量データ, 岩石物性などの各種物性を把握しておくことが必要であろう。

(5) シミュレーション手法は, 将来予測をする上で必要不可欠なツールである。ただし, シミュレーションでは熱源を位置や規模などの境界条件として与え, また, グリッドブロックの岩石物性値やモデルの形状などを総合してシミュレーション・モデルを構築することが必要である。更に, 自然状態のモデリング結果と現在の観測データが調和するかどうかを比較検討して熱源の位置や規模(シミュレーションの構成要素)の妥当性を推定していくという手順をとる。高温地域の成因検討の観点からすると, それはあくまでも高温成因の間接的な推定であり, 熱源の成因自体を直接的に表すものではない。したがって, シミュレーションにより得られた結果の妥当性の判断には, 地質学的な解釈のフィードバックが更に必要であり, そのルーチンの構築が今後の課題のひとつと考えられる。

また, 本シミュレーションでは, 静的な境界条件(熱源の位置, 規模など)を主に検討してきたが, 更に側方及び上下境界条件の精緻化を進めるとともに, 今後, 将来予測のツールとして使用するためには, 動的な境界条件(海水準変動, 地殻変動, 火山フロントの移動など)の検討を更に進める必要があると思われる。そして, 科学的根拠に基づいた動的境界条件と人工的な攪乱(立坑掘削など)をシナリオとすることで, 概念モデル(現在の自然状態を適切に表しているモデル)を初期状態とした将来予測シミュレーションが初めて可能になるものと考えられる。

謝辞: 本研究は, 原子力発電環境整備機構の委託研究として実施したものである。当機構の関係各位に対して, 深謝の意を表す。

文献

- 地質調査総合センター(2002)東北・九州地熱資源図(CD-ROM版).
- Hayba, D. O. and Ingebritsen, S. E. (1997) Multiphase groundwater flow near cooling plutons. *J. Geophys. Res.*, **102**, 12,235-12,252.

- 石戸経士 (2002) 地熱貯留層工学. 日本地熱調査会, 176p.
- 北村 信 編(1986) 新生代東北本州弧地質資料集第3巻—その1—島弧横断ルートNo.22(温海—鶴岡—尾花沢—松島) 執筆担当: 佐藤比呂志・山路 敦, 執筆分担: 石井武政.
- 国土地理院 (1997) 数値地図50 mメッシュ (標高) 日本—II.
- 駒澤正夫 (2003) 日本の重力探査事情—地下構造とのかわり. 石油技術協会誌, **68**, 21-30.
- Manning, C. E. and Ingebritsen, S. E. (1999) Permeability of the continental crust: implications of geothermal data and metamorphic systems. *Rev. Geophys.*, **37**, 127-150.
- 中尾信典・菊地恒夫・石戸恒雄 (2004) 地層処分に関わる広域地下水流動研究及び数値シミュレーションの動向. 地調研報, **55**, 409-415.
- Pritchett, J. W. (1995) Star; a geothermal reservoir simulation system. *WGC'95*, 2959-2963.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1991) 地熱開発促進調査報告書, No.28, 尾花沢東部地域. 756p.
- 高橋正明・駒澤正夫・村田泰章・玉生志郎 (1996) 50万分の1 秋田地熱資源図及び同説明書. 特殊地質図 (31-2), 地質調査所, 162p.
- 玉生志郎 (2004) 「放射性廃棄物地層処分における熱・熱水の影響評価に関する基礎研究」の背景と概要. 地調研報, **55**, 389-391.
- 玉生志郎・佐藤龍也 (2004) データベース・システムによる地質・地球物理データの重ね合わせ—東北地方中東部での例—. 地調研報, **55**, 399-408.
- Tamanyu, S. (2004) Fluid flow patterns calculated from patterns of subsurface temperature and hydrogeologic modeling: example of the Yuzawa-Ogachi geothermal area, Akita, Japan. *Proceedings of the Second International Symposium on Dynamics of Fluids in Fractured Rock*, 90-94.

(受付: 2008年1月31日; 受理: 2008年2月7日)