

熱移流を考慮した日本列島の熱流束分布と雲仙火山を対象とした熱・水連成シミュレーション

坂川幸洋^{*1} 梅田浩司^{*1} 浅森浩一^{*1}

わが国では 1957 年以降精力的に地殻熱流量（伝導熱流束）の測定が行われ、日本周辺での分布が明らかにされている。これに対して、火山地帯等での熱輸送評価に必要な伝導熱流束と移流熱流束の総熱流束についてはその分布の特徴を明らかにするほど調査が進んでいない。本報では、日本全国のボーリングデータから総熱流束および流体流動速度を計算した。その結果、総熱流束が東北日本では太平洋側で低く日本海側で高い傾向があり、西南日本では、瀬戸内海周辺で相対的に低い値であること、総熱流束の高い地域が第四紀火山付近に集中していること、 $1\text{W}/\text{m}^2$ 以上の高総熱流束は熱源により流体対流系中に局所的に発生する速い上昇流がもたらした可能性が考えられること等が明らかになった。

本報では、さらに島原半島の雲仙火山を事例に、三次元非定常熱・水連成モデルによって火山下の熱輸送や温度構造の感度解析を行うとともに、この火山周辺のボーリングデータから得られた総熱流束とシミュレーション結果との比較を行った。

Keywords :一次元熱輸送モデル、熱流束、熱・水連成モデル、シミュレーション

In Japan they have extensively measured the crustal heat flow (conductive heat flux) since 1957 to make clear the heat flow distribution around Japan. On the other hand, they have not revealed the distribution of the total heat flux yet which consists of the conductive term and the advective term, and is required for investigation of heat transfer at volcano zones and so forth.

Authors calculated the total heat fluxes and fluid flow velocities from data of wells in all over Japan to find out that in northeastern part of Japan the total heat flux is higher at Pacific side than the side of the Sea of Japan, that in southwestern part of Japan the total heat flux is lower around the Inland Sea, that the high total heat flux zones are almost confined to the vicinities of Quaternary volcanoes, that the total heat fluxes not lower than $1\text{W}/\text{m}^2$ seem to owe their growth possibly to the fast ascending fluid flows which are generated locally in the fluid convection systems by heat sources and so forth.

Authors also carried out the sensitivity study of heat transfer and temperature distribution near Unzen Volcano located in Shimabara Peninsula using a three-dimensional non-steady non-isothermal fluid flow model and compared the simulation results of total heat fluxes with estimation from data of wells near the volcano.

Keywords: one-dimensional heat transfer model, heat flux, non-isothermal fluid flow model, simulation

1 はじめに

火山活動が地質環境に及ぼす熱的な影響を評価するためには、マグマや高温岩体の熱エネルギーによる周辺岩盤の温度上昇のみならず、熱水対流系の形成や流体によって運ばれる熱を考慮することが重要となる。

地球内部からの熱エネルギーの輸送過程については、地殻熱流量に基づき議論されることが多い。通常、地殻熱流量とは、単位時間、単位面積あたりの地下から伝導によって運ばれる熱量（伝導熱流束）のことであり、ボーリングで観測された地温勾配と熱伝導率の積として求められる。わが国では 1957 年以降精力的に地殻熱流量測定が行われ、東北日本では太平洋側で熱流量が低く ($40\sim80\text{mW}/\text{m}^2$)、日本海側で高い ($>80\text{mW}/\text{m}^2$) こと、これに対して西南日本では南海トラフで熱流量が $100\text{mW}/\text{m}^2$ 以上と高く、瀬戸内海周辺では相対的に低い値であること等の特徴が明らかにされている[1]。

これに対して、火山地帯のように局所的な高温異常が認められる地域では、ボーリングで観測される地温勾配が深度とともに変化している場合が多く、熱伝導に比べて流

体（熱水）の流動による熱の輸送（熱移流）が卓越していると考えられている(例えば湯原[2])。そのため、火山地帯での熱輸送を評価するためには熱移流の寄与を考慮し、伝導熱流束と移流熱流束の総熱流束を求める必要がある。

このような地域の伝導熱流束や移流熱流束は、温度プロファイルから一次元熱輸送モデルによって計算できる(例えば[3-6])。また、マグマや高温岩体の熱による地下水理への影響を評価するための指標の 1 つである流体流動速度（ダルシー速度）も一次元熱輸送モデルにより計算できる。しかしながら、これらは一部のボーリングデータにおいて評価されているに過ぎず、広域的な総熱流束や流体流動速度等の特徴を示すまでには至っていない。本報では、火山活動の熱的影響を定量的に把握するための基盤情報として、近年、整備してきた日本全国の坑井温度プロファイルのデータベース[7]に Clauser ら[8] の一次元熱輸送モデルを適用して、総熱流束および流体流動速度を計算するとともに日本列島や第四紀火山周辺における両者の特徴を議論する。

一方、火山下のマグマ、高温岩体等の周辺の熱輸送や温度構造は、主にフォワードモデリングによって数値的にシミュレートされる場合が多いが、熱源の大きさや深度、岩盤の透水性、熱伝導率等には何らかの仮定を置かざるを得ない。これらのシミュレーションに際して、上記の総熱流束や流体流動速度等のデータは、モデルの設定に際して制約を与えるとともに、シミュレーションの結果の妥当性を検証するために重要な情報となる。本報では、さらに

Heat flux distribution in Japan with advection taken into account and non-isothermal flow simulation of Unzen volcano by Yukihiro Sakagawa (sakagawa.yukihiro@jnc.go.jp), Koji Umeda, Koichi Asamori

*1 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター 地質環境研究グループ Geoscience Research Group, Tono Geoscience Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute
〒509-5102 土岐市泉町定林寺 951-31

島原半島の雲仙火山を事例に、三次元非定常熱・水連成モデルによって火山下の熱輸送や温度構造の感度解析を行うとともに、この火山周辺のボーリングデータから得られた総熱流束や流体流動速度とシミュレーション結果との比較を行い、モデルの妥当性について検討を行った。

2 熱移流を考慮した日本列島の総熱流束分布

2.1 一次元熱輸送モデル

今回の解析に用いた Clauser ら[8]の一次元熱輸送モデルは伝導熱流束 $Q_c(W/m^2)$ と移流熱流束 $Q_m(W/m^2)$ の合計 $Q_t(W/m^2)$ が深度によらず一定に保たれていると仮定したものである。本モデルの有限層厚 $L(m)$ を有する透水層の下面の温度 $T_L(K)$ は上面の温度 $T_U(K)$ より高いとする (Fig.1)。熱伝導率 $\lambda(W/m/K)$ は 1 層以上有限層数の水平多層構造を成し各層で一定とする。また、流体の密度 $\rho(kg/m^3)$ 、比熱 $c(J/kg/K)$ 、流体流動速度(ダルシー速度) $v(m/s)$ は深度によらず一定とする。

ここで、深度軸を鉛直下方にとり、熱流束と流体流動速度を上方に正とすると、伝導熱流束 $Q_c(W/m^2)$ は深度を $z(m)$ 、温度を $T(K)$ として、

$$Q_c = \lambda \frac{dT}{dz} \quad (1)$$

である。

移流熱流束 $Q_m(W/m^2)$ は基準温度を $T_r(K)$ とすれば

$$Q_m = \rho cv(T - T_r) \quad (2)$$

である。

透水層上面での深度を z_u 、伝導熱流束を Q_{cu} とすると各深度の伝導熱流束は近似的に

$$\ln(Q_c) \approx \ln(Q_{cu}) - (\rho cv / \bar{\lambda})(z - z_u) \quad (3)$$

と書ける。ここで $\bar{\lambda}$ は透水層全体を代表する熱伝導率である。なお、透水層が n 層の水平多層構造をなす場合、第 i 層の熱伝導率を λ_i 、上面深度を z_i 、上面での温度を T_i とすると、温度に関するモデル曲線は(3)式を積分して

$$T_{th}(z) = \left[\left(\frac{Q_{cu}}{\lambda_i} \right) / \left(\frac{\rho cv}{\bar{\lambda}} \right) \right] \left[e^{-(z_i - z_u)(\rho cv / \bar{\lambda})} - e^{-(z - z_u)(\rho cv / \bar{\lambda})} \right] + T_i \quad (4)$$

$$(z_i \leq z \leq z_{i+1}, 1 \leq i \leq n)$$

となる。

Clauser ら[8]の解析では、温度プロファイルと熱伝導率プロファイルから伝導熱流束プロファイルを計算し、その自然対数を深度に対してプロットして(3)式の回帰直線を得る。各深度の伝導熱流束 Q_c は回帰直線から読み取り、流体流動速度 v は回帰直線の勾配 $-\rho cv / \bar{\lambda}$ に $-\bar{\lambda} / (\rho c)$ を乗じて求める。移流熱流束 Q_m は(2)式の T に(4)式の T_{th} を代入して計算できる。なお、ここでは $T_r = T_U$ の場合には、

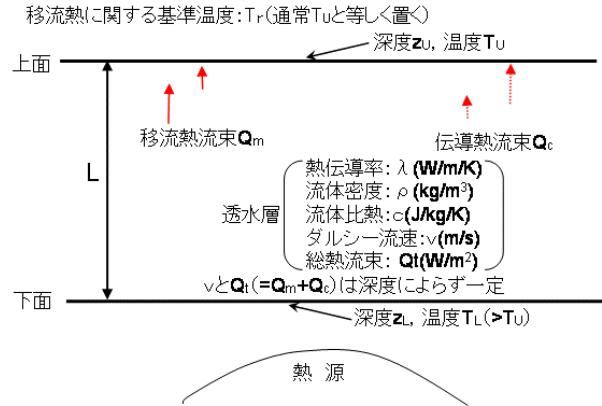


Fig.1 Conceptual Model of 1-D Ascending Flow Analysis.

透水層上面の移流熱流束は $Q_{mu} = \rho cv(T_U - T_r) = 0$ であり、したがって総熱流束は $Q_t = Q_{cu}$ となる。なお、(4)式から、回帰直線に対応する温度プロファイルは上昇流の場合 ($v > 0 m/s$ の場合) 上に凸、下降流の場合 ($v < 0 m/s$ の場合) 下に凸となる。

2.2 結 果

坑井温度プロファイルデータベース[7]に上記の方法を適用し、各坑井について総熱流束および流体流動速度を計算した。今回の解析ではデータベースに収録された 1,215 本の坑井のうち、解析に適する 1,035 本の坑井温度プロファイルを用いた。なお、岩石の熱伝導率はデータベースに収録されている値を使った。この熱伝導率値は測定値を基本とし、測定値のない坑井の場合には岩石の種類を基に推定されたものである[7]。

一般に流体流動は熱輸送を促進することから、上昇流が卓越している地域ほど高い総熱流束が観測されることが期待される。上昇流による熱輸送が顕著な坑井温度プロファイルの一例を Fig.2 に示す。図には実測温度プロファイルに、(4)式のモデル曲線と透水層に上昇流が生じなかつたと仮定した場合の仮想温度プロファイルを併示した。一般に、上昇流がある場合には深い深度で高移流熱流束、低伝導熱流束であり、浅い深度で低移流熱流束、高伝導熱流束である。Clauser ら[8]の方法による解析の結果は、透水層下面で伝導熱流束 Q_c が $0.04 W/m^2$ 、移流熱流束 Q_m が $0.35 W/m^2$ 、透水層上面で Q_c が $0.39 W/m^2$ 、 Q_m が $0 W/m^2$ 、総熱流束 Q_t が深度によらず $0.39 W/m^2$ である。一方、上昇流がない場合の仮想熱流束を計算すると $Q_t = Q_c = 0.15 W/m^2$ である。 Q_t の比較から、この例の場合、熱輸送は上昇流により 2 倍以上に促進されていると考えられる。

Fig.2 はまた、深部の熱源を捉えた数少ない坑井温度プロファイルの 1 例である。深度約 600m を透水層上面、それ以深の深部熱源域を解析範囲とすることもでき、その総熱流束は $0.15 W/m^2$ 程度と深度 600m 以浅の総熱流束より低い。総熱流束がこのように深度変化する原因として、深部の熱源に加熱された熱水が集まってきて Fig.2 の坑井の

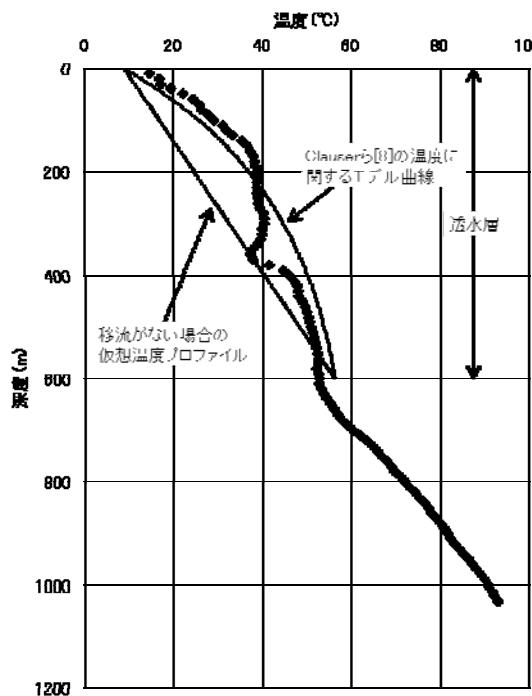


Fig.2 A Temperature Profile which Implies the Enhancement of Heat Transfer by Advection.

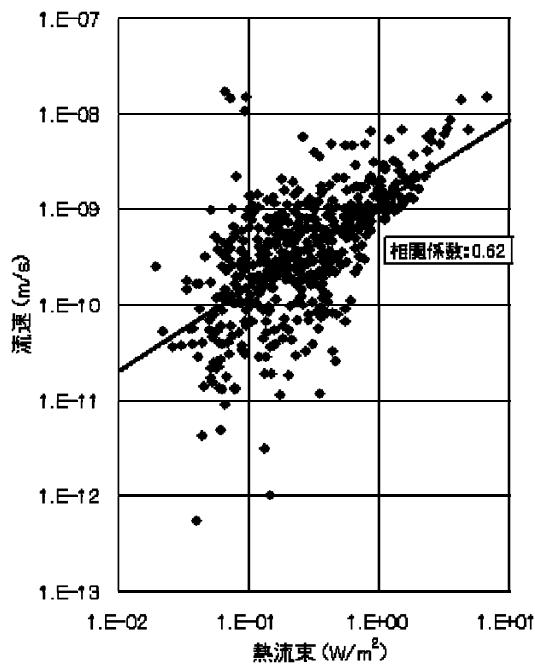
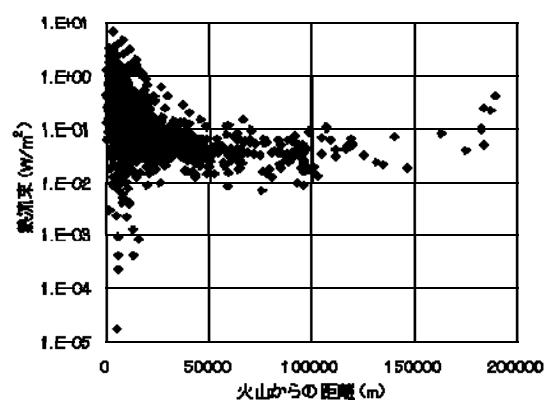


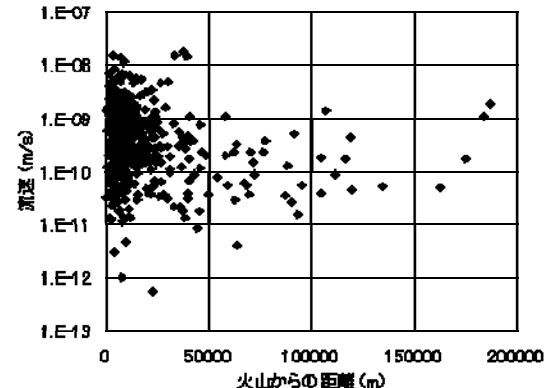
Fig.3 Scatter Plot of the Ascending Fluid Flow Velocity and the Total Heat Flux.

深度 600m 付近で上昇し始めている可能性が考えられる。Fig.2 の坑井の周囲には熱水の側方流動域や下降域が存在する可能性が考えられ、1 本の坑井だけでは熱水対流系の熱流束を部分的にしか評価できない。熱水対流系全体の熱流束を評価するには熱水対流系に偏りなく分布した複数の坑井データが必要である。

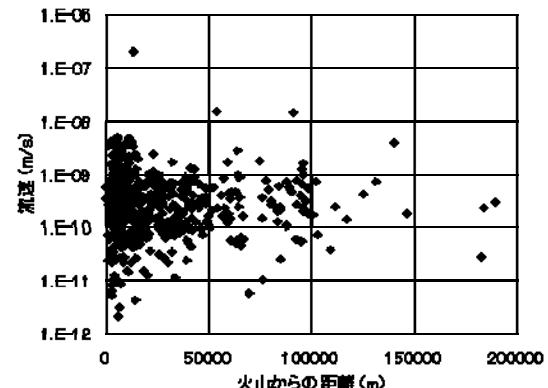
今回の解析の結果、日本列島では上昇流の速度と総熱流束との間に正の相関が認められる (Fig.3)。また、高い



a) Total Heat Flux



b) Ascending Fluid Flow Velocity



c) Descending Fluid Flow Velocity

Fig.4 Scatter Plots of the Analysis Results and the Distances from the Nearest Quaternary Volcanoes.

総熱流束は速い上昇流があつてはじめて生じている。例えば、総熱流束が $1\text{W}/\text{m}^2$ 以上の地点では $7 \times 10^{-10}\text{m}/\text{s}$ 程度以上の上昇流が生じており、総熱流束が $5\text{W}/\text{m}^2$ 以上の地点では $7 \times 10^{-9}\text{m}/\text{s}$ 程度以上の上昇流が生じている。これらのことから、総熱流束が高い地域では熱輸送が速い上昇流により促進されている可能性が考えられる。

2.2.1 第四紀火山周辺の総熱流束、流体流動速度の特徴

Fig.4 に各坑井で計算した総熱流束、上昇流および下降流の速度と第四紀火山から坑井までの距離との関係を示す。火山周辺の総熱流束は $0.01 \sim 1 \text{W/m}^2$ に及ぶが総熱流束の上限は火山から離れるにしたがって指数関数的に小さくなっている。これは、高い総熱流束が火山付近にしかないことを示唆する。例えば、図中、 1W/m^2 以上の総熱流束は火山の約 20km 以内にしかない。同様な傾向は、上昇流の速度の分布と下昇流の速度の分布にも認められ、火山周辺に他より強い流体流動が起こりやすい傾向を示している。一方、下降流の速度の下限は、上昇流とは反対に火山から離れるにしたがって指数関数的に大きくなる。

2.2.2 日本列島の総熱流束、流体流動速度の特徴

日本列島スケールでの総熱流束および流体流動速度の大規模的な地理的分布を把握するため、緯度経度 0.2° メッシュごとの格子データを作成し、その分布を Fig.5-8 に示した。格子データは、格子内に位置する坑井の総熱流束と流体流動速度の平均値および最大値である。平均値については、全データの頻度分布が対数正規分布を示すことから、算術平均ではなく幾何平均とした。

総熱流束 (Fig.5) は東北日本では太平洋側で低く日本海側で高い傾向があるが、その傾向に反するデータも多い。西南日本では、瀬戸内海の南側にデータが少ないが、瀬戸内海周辺で相対的に低い値である。

総熱流束は 0.2W/m^2 以上の高総熱流束の地域が紀伊半島南部を除き第四紀火山付近に集中している。ただし、第四紀火山付近にも総熱流束が高くなかった地域がある。一方、流体上昇流速度 (Fig.6) は第四紀火山付近でとくに速くも遅くもないように見受けられる。第四紀火山付近以外の低総熱流束の地域にも流体上昇流速度が比較的に速い地域がある。

総熱流束等について高い値を示す坑井の所在を見るため、解析結果の局所最大値分布を局所幾何平均と同じ表示法でプロットした (Fig.7-8)。 1W/m^2 以上の高総熱流束を示す地域が東北日本と九州の第四紀火山付近および焼岳付近に存在している。流体上昇流速度は東北日本の第四紀火山付近で速い傾向がある。

第四紀火山付近の流体上昇流速度は他の地域に比べ局所幾何平均が同程度である一方で、局所最大値は大きい傾向がある。すなわち第四紀火山付近の流体上昇流速度は他の地域に比べ統計的ばらつきが大きい傾向がある。第四紀火山付近の一部の地域の地下にある局所的な熱源がこの傾向を成しているのであれば、前述のとおり高い総熱流束は速い上昇流があって初めて生じ得ることとあわせて次のように考えられる。すなわち、熱源により発生あるいは助長された局所的な速い上昇流が、第四紀火山付近の一部の地点にしか見られない高い総熱流束の発現に重要な寄与を及ぼしていると考えられる。

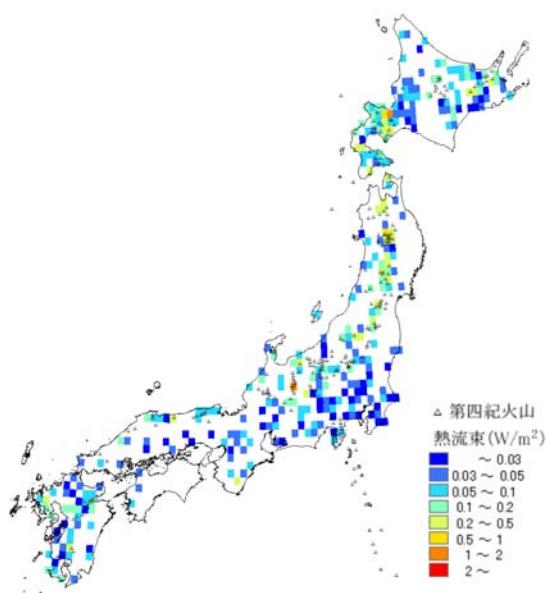


Fig.5 Distribution of the Local Geometric Mean of the Total Heat Flux.

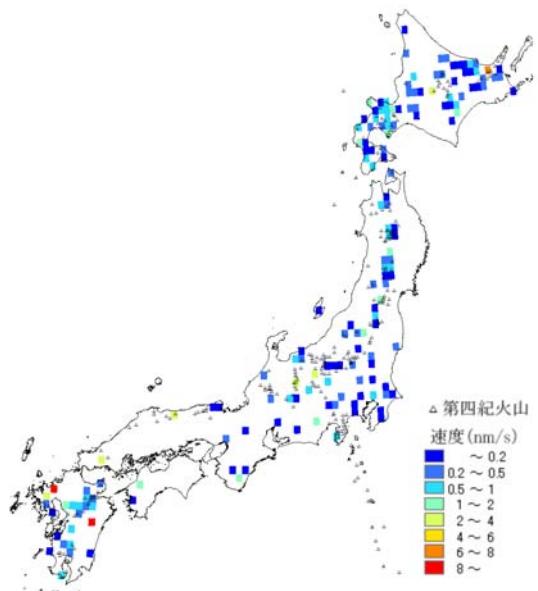


Fig.6 Distribution of the Local Geometric Mean of the Ascending Fluid Flow Velocity.

3 雲仙火山を対象とした熱・水連成シミュレーション

サイクル機構では、火山活動が地質環境に及ぼす影響を定量的に把握するための手法の一つとして、マグマ溜りの周辺岩盤の熱や地下水理等を計算するための解析コード Magma2002 の開発を行っている。このコードは、地熱シ

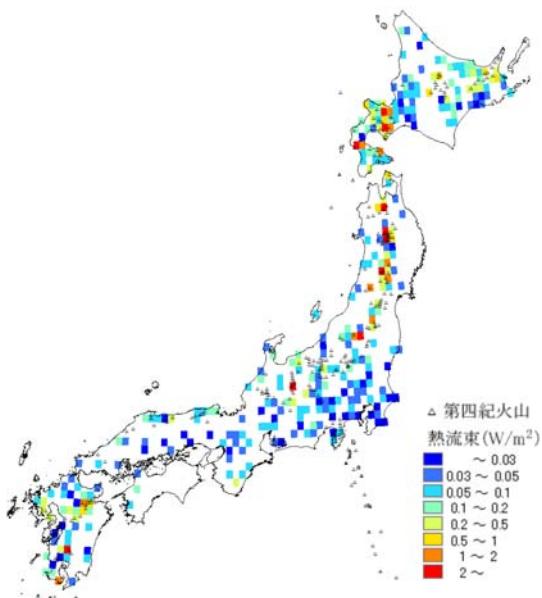


Fig.7 Distribution of the Local Maximum of the Total Heat Flux.

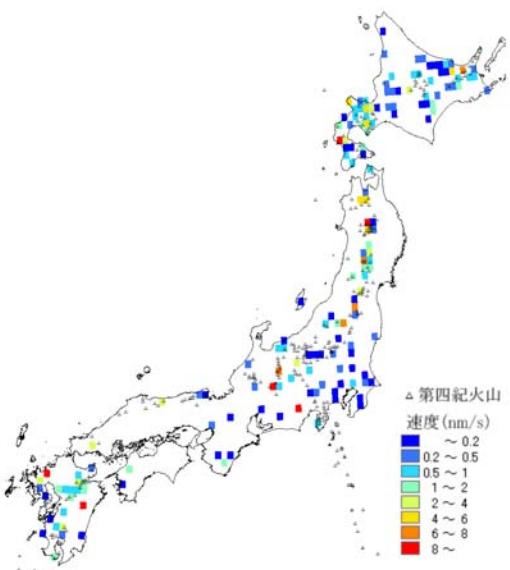


Fig.8 Distribution of the Local Maximum of the Ascending Fluid Flow Velocity.

ミュレータ FIGS3C[9]をベースにして、冷却過程で比熱や流動性が変化するなどの特徴を持つマグマ溜まりが周辺に及ぼす影響を計算できるように改良したもので、三次元非定常熱・水連成解析を行うことができる。今回、島原半島の雲仙火山およびその周辺を対象に、このコードを用いた感度解析を実施した。

3.1 解析コード

Magma2002 開発のベースとした FIGS3C は主として地熱系の開発以前の状態と地熱系の開発に対する応答を再

現することにより地熱系の数値モデルを作成し、地熱系と地熱流体生産量の将来の挙動を予測するために使われてきた。

FIGS3C は地熱貯留層内の熱と流体の質量に関する保存則を差分法で解く[9]。この場合保存則は微分形式で表される。一方、Magma2002 は保存則を次式で表される積分形式で表し差分化(Integral Finite Volume Difference)して、温度や圧力を未知数としてその時間発展を解く。

$$\frac{d\left(\int_V G^k dV\right)}{dt} = \int_S F^k \cdot \mathbf{n} dS + \int_V q^k dV \quad (5)$$

ここで V は解析領域内の任意の三次元領域、 S はその領域の表面、 \mathbf{n} は領域表面における内向き単位法線ベクトル、 t は時間(s)、 k は質量に関する量か熱に関する量かを示すインデックス、 G は単位体積あたりの質量(kg/m³)または熱量(J/m³)、 F は質量流束(kg/s-m²)または総熱流束(W/m²)、 q は単位体積あたりの質量の湧き出し量(kg/s-m³)または熱の湧き出し量(W/m³)である。熱の保存則では G は単相では温度と圧力、気液二相では蒸気飽和率と圧力で決まり、 F は温度勾配と圧力勾配と温度または蒸気飽和率に依存する。また、質量の保存則では G が温度と圧力、または蒸気飽和率と圧力で決まり、 F は圧力勾配に依存する。したがって(5)式は温度と圧力、または蒸気飽和率と圧力を主変数として差分化できる。保存則の表現の変更により、Magma2002 ではグリッドをデカルト座標系格子状、円柱座標系格子状のほか任意の形状にできるようになった。

さらに、Magma2002 では解析領域内の任意のグリッドの比熱、熱伝導率、熱の吸い込み量などを温度の関数として考慮できるように改良された。これにより、マグマの供給と漏洩が同時に起こり冷却過程で比熱や流動性が変化するマグマ溜まりが周辺に及ぼす影響を計算できるようになった。マグマ溜まりの流動性の変化は直接にはマグマ溜まり内の温度分布に影響する。高温で流動性の高い状態ではマグマ溜まり内の温度は比較的均一に保たれ、冷却が進んだ流動性の低い状態ではマグマ溜まりの内部と表面とに温度差が生じると考えられる。Magma2002 では、流動性の高い高温ではマグマ溜まりの熱伝導率を高く設定し、流動性の低い低温ではマグマ溜まりの熱伝導率を低く設定することでマグマ溜まり内の温度分布のこのような変化を近似計算できる。

3.2 解析モデル

雲仙火山の半径 10km 程度以内には新エネルギー総合開発機構の地熱開発促進調査で掘削され坑井温度プロファイルデータベース[7]に登録された坑井が 10 本あり、今回そのうちの 4 本について総熱流束等の解析を実施した。うち 1 坑井の坑井温度プロファイルをモデル曲線とともに Fig.9 に示す。この坑井では伝導熱流束は解析範囲上面で 0.10W/m²、解析範囲下面で 0.57W/m²、総熱流束は深度に

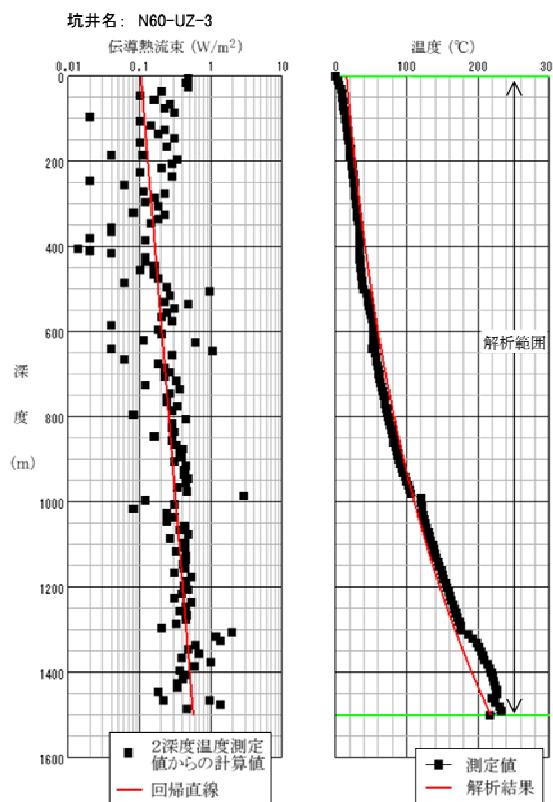


Fig.9 Temperature Profile of One of the Wells near Unzen Volcano Shown with Results of 1-D Ascending Flow Analysis.

よらず 0.10W/m^2 である。解析の結果、4 坑井の総熱流束は $0.054\sim0.20 \text{W/m}^2$ である (Fig.10)。解析モデルの作成に当たっては、火山体の直下にマグマ溜りが存在すると仮定して、モデル化を行った。なお、雲仙火山周辺の震源分布や地震波速度構造の結果から、火山体の直下にマグマ溜りが存在することが示唆される[10-11]。

解析領域は、熱輸送の場を広く取り込むよう東西 41km ×南北 41km ×深さ 25km とし、デカルト座標系格子状に分割した。グリッド幅は水平方向に 1km 、深さ方向に $0.2\sim1 \text{km}$ で、グリッド数は東西方向 $41\times$ 南北方向 $41\times$ 深さ方向 33 である。この領域の中心(雲仙火山)の直下に 5km 四方の立方体と仮定した 1000°C のマグマ溜りを設定した。マグマ溜まりの温度は東宮[12]を参考に設定した。解析は、マグマ溜まりの深度(上面深度)と母岩の浸透率を考慮した次の 3 つのケースについて計算を行った。

CASE1 は基本ケースであり、母岩の浸透率は 10^{-18}m^2 、マグマ溜まり上面深度は 20km である。CASE2 は CASE1 の母岩の浸透率を 10 倍の 10^{-17}m^2 としたケースである。CASE3 は CASE1 のマグマ溜まり上面深度を 10km と浅くしたケースである。また、マグマ溜りの温度は一定とし、定常状態とみなせる 100 万年後まで計算した。なお、上部境界は地表面を固定水頭境界で自由浸出面とし、マグマ溜りは不透水とした。

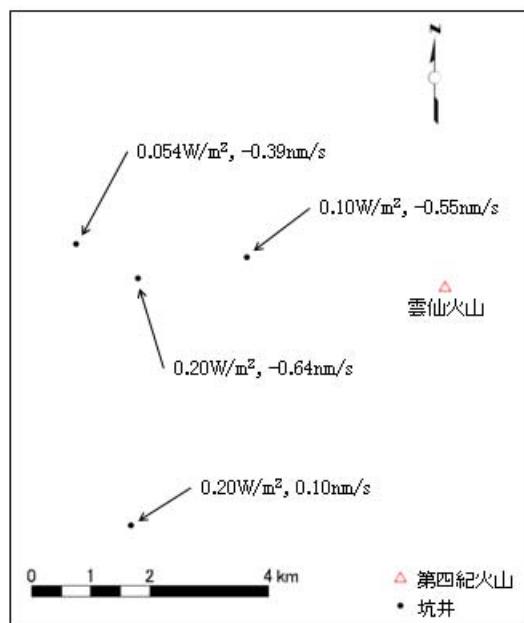
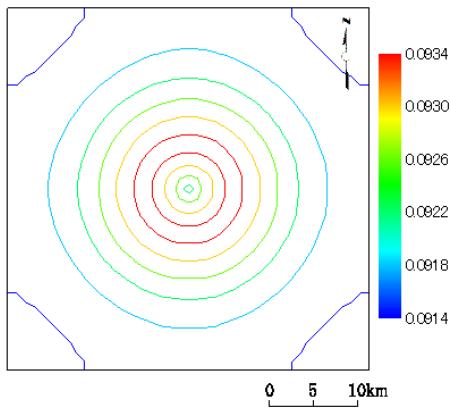


Fig.10 The Locations of Wells near Unzen Volcano and the Total Heat Fluxes and the Fluid Flow Velocities at Them Obtained by 1-D Ascending Flow Analysis.

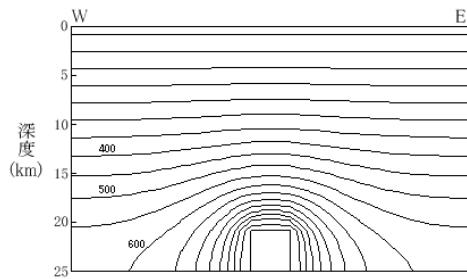
3.3 シミュレーションの結果

CASE1-3 について計算した 100 万年後の地表境界の水平方向の総熱流束分布と鉛直方向の温度分布を Fig.11-13 に示す。総熱流束分布は、マグマ溜りが深度 10km (CASE3) の場合には、火山の中心ほど大きく、火山から離れるにしたがって小さくなっているが、深度 20km (CASE1-2) では、火山の中心部で周囲より低くなっている。これは火山の高まりに由来する下降流の影響と考えられる。すなわち、火山は直径 10km 高さ 1km の円錐形に近似し、基盤は平坦面としているため、平坦な上面境界に対し地表標高の高い場所ほど高い水理ポテンシャル(圧力)を設定したことによる。また、全体的な総熱流束はマグマ溜りの深度が浅いほど大きい。母岩浸透率が 10^{-17}m^2 (CASE2) の場合は、基本ケースに比べて火山付近の総熱流束が大きくなっているが、火山から十分離れた地域の総熱流束は基本ケースと同程度である。

鉛直方向の温度分布については、基本ケースでは、上面付近で温度勾配の深度変化が小さく(等温線間隔が一定に近く)、また水平方向の温度変化が小さい (Fig.11)。また、マグマ溜まりの周囲では、マグマ溜まりに近いほど温度変化が大きい(等温線間隔が狭い)。マグマ溜まりの深度の違いについては、マグマ溜まりが 10km (CASE3) の場合には、マグマ溜まり上方の温度勾配が基本ケースに比べ顕著に高くなっている(等温線間隔が狭くなっている)、伝導熱流束がより大きいことを示唆する (Fig.13)。母岩浸透率が高い CASE2 の温度分布は基本ケースに類似しているが (Fig.12)、マグマ溜まり上方の温度がやや高くなっている、例えばマグマ溜まりの上方 5km では基本ケースに比



a) Distribution of the Total Heat Flux at the Top Boundary Surface (Unit is W/m^2)



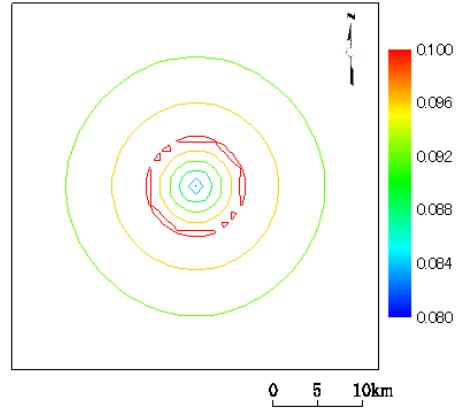
b) Temperature Distribution at the Central Cross Section (Unit is $^\circ\text{C}$)

Fig.11 The Simulation Results of the Standard Case (CASE1).

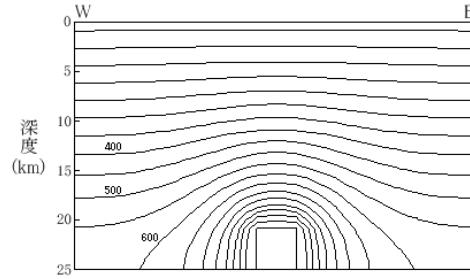
Permeability of the host rock is 10^{-18}m^2 and the buried depth of the magma chamber is 20km.

べて 40°C 程度高い。このことは、マグマ溜まりの熱の上方への輸送が移流によって促進されていることを示唆している。また、側方境界面付近とマグマ溜まり側方の温度は、基本ケースに比べてわずかに低くなっている。火山の周辺地域からマグマ溜まりに向かう下降流が大きいことを示している。

これらの解析結果について、前述の坑井データから計算した総熱流束との比較を行った。坑井 4 本の総熱流束の算術平均が $0.14\text{W}/\text{m}^2$ 、幾何平均が $0.12\text{W}/\text{m}^2$ であるのに対して、基本ケースの火山付近の総熱流束は $0.092\sim0.093\text{W}/\text{m}^2$ であり、やや低めに再現された (Fig.11)。母岩浸透率が高い場合 (CASE2) でも $0.08\sim0.10\text{W}/\text{m}^2$ とやや低い (Fig.12)。これに対してマグマ溜まりが浅い場合 (CASE3) には $0.13\sim0.17\text{W}/\text{m}^2$ と計算され、観測結果より高い値を示す (Fig.13)。今回の解析は地質的な構造を精緻にモデル化しておらず感度解析にとどまるが、坑井温度プロファイルから求めた総熱流束をおおむね再現したものと考えられる。このことから、Magma2002 等の解析コードを用いた数値シミュレーションは、火山活動が地質環



a) Distribution of the Total Heat Flux at the Top Boundary Surface (Unit is W/m^2)



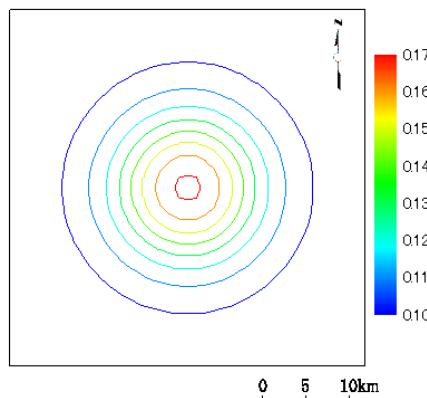
b) Temperature Distribution at the Central Cross Section (Unit is $^\circ\text{C}$)

Fig.12 The Simulation Results of the Case of the Gained Permeability (CASE2).

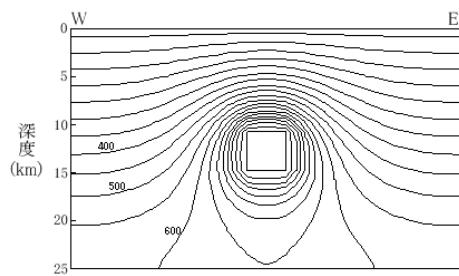
Permeability of the host rock is 10^{-17}m^2 and the buried depth of the magma chamber is 20km.

境に及ぼす影響を評価するための有効な手法の一つと考えられる。

ただし、Fig.10 に示した雲仙火山の位置の西南西約 4km 地点の雲仙温泉における放熱量は約 21MW、西南西約 9km 地点の小浜温泉における放熱量は約 50MW と推定されている [13]。雲仙温泉の面積を仮に 2km^2 とすると雲仙温泉における平均総熱流束は約 $10\text{W}/\text{m}^2$ にも達する。この値は坑井温度プロファイルから求めた値よりも高く、坑井データが高熱流束域を捉えていない可能性が考えられる。また、雲仙火山の西方～南西方には海拔-500m で 250°C に及ぶ高温域が広く分布すると推定されている ([14] の pp.1035-1036)。流体流動速度については、坑井温度プロファイルから求めた速度 (Fig.10) はシミュレーション結果より 1 オーダー速い。今回のシミュレーションではこれらの状況は再現されておらず、その再現は今後の課題である。浅部の浸透率設定などを修正して、Fig.10 の坑井データが示唆する浅部の強い下降流を適切に再現すると総熱流束が今回の解析結果より低く計算されると考えられる。そのため、流体流動速度と総熱流束を同時に再現す



a) Distribution of the Total Heat Flux at the Top Boundary Surface (Unit is W/m^2)



b) Temperature Distribution at the Central Cross Section (Unit is $^\circ\text{C}$)

Fig.13 The Simulation Results of the Shallow Magma Chamber (CASE3).
Permeability of the host rock is 10^{-18}m^2 and the buried depth of the magma chamber is 10km.

るには、総熱流束が低くならないよう高温域の浅部への伸展の再現が必要と考えられる。

4 まとめ

坂川ら[7]の坑井温度プロファイルデータを Clauser ら[8]の一次元熱輸送モデルで解析した。その結果、上昇流の速度と総熱流束には正の相関が認められた。総熱流束は東北日本では太平洋側で低く日本海側で高い傾向があり、西南日本では、瀬戸内海周辺で相対的に低い値であった。総熱流束は緯度経度 0.2° メッシュの局所幾何平均が $0.2\text{W}/\text{m}^2$ 以上の地域が紀伊半島南部を除き第四紀火山付近に集中しており、局所最大値が $1\text{W}/\text{m}^2$ 以上を示す地域が東北日本と九州の第四紀火山付近および焼岳付近に存在している。 $1\text{W}/\text{m}^2$ 以上の高総熱流束は熱源により流体対流系中に局所的に発生する速い上昇流がもたらした可能性が考えられる。

雲仙火山周辺を事例に、三次元非定常熱・水連成モデル

によって火山下の熱輸送や温度構造の感度解析を行った。雲仙火山直下に 5km 四方の立方体の 1000°C のマグマ溜まりを設定し、マグマ溜まりの上面深度を 20km にしたところ、総熱流束が坑井温度プロファイルから計算した値に比べて低めに再現され、マグマ溜まりの上面深度を 10km にすると総熱流束が高めに再現された。今回の解析は感度解析にとどまるが、坑井温度プロファイルから求めた総熱流束をおおむね再現したものと考えられる。

熱・水連成シミュレーションを活用し、火山活動が地質環境に及ぼす影響の評価を進めていくことは今後の課題である。

謝辞

本稿の執筆にあたり、匿名の査読者には有益なご助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- [1] 山野 誠, 木下正高, 山形尚司: 日本列島周辺海域の地殻熱流量分布. 地質ニュース, No.517, 12-19 (1997).
- [2] 湯原浩三: 地球物理学的にみた熱水系. 地熱, No.34, 3-14 (1972).
- [3] 江原幸雄: 九州中部地域の放熱量と熱水上昇を考慮した地殻上層の温度. 火山, 29, 195-213 (1984) .
- [4] 梶原竜哉, 花野峰行, 池内 研, 坂川幸洋: 葛根田地熱地域の透水性構造について. 日本地熱学会平成 5 年度講演会講演要旨集, B30 (1993) .
- [5] 加藤昌治, 川上純樹, 花野峰行, 富長勇作: いくつかの地熱地帯での自然対流の上昇速度について—温度検層結果を用いた上昇流解析—. 日本地熱学会平成 8 年度学術講演会要旨集, A33 (1996) .
- [6] 梅田浩司, 梶原竜哉, 内田洋平: 日本列島における坑井温度プロファイルのコンパイルと一次元熱輸送モデルによる熱流束. 地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会, T032-P002 (2003).
- [7] 坂川幸洋, 梅田浩司, 鈴木元孝, 梶原竜哉, 内田洋平: 日本の坑井温度プロファイルデータベース. 地震, 2, 57, 63-67 (2004).
- [8] Clauser, C., Villinger, H.: Analysis of conductive and convective heat transfer in a sedimentary basin, demonstrated for the Rheingraben, *Geophys. J. Int.*, **100**, 393-414 (1990).
- [9] Hanano, M., Seth, M. S.: Numerical modeling of hydrothermal convection systems including super-critical fluid. *Proc. World Geothermal Congress 1995*, Florence, Italy, **3**, 1681-1686 (1995).
- [10] 浅森浩一, 趙 大鵬: 雲仙岳下におけるマグマ溜りの 3 次元構造. 地球惑星科学関連学会 2001 年合同大会

予稿集, Jp033 (2001).

- [11] Zhao, D., Mishra, O. P., Sanda, R.: Influence of fluids and magma on earthquakes: seismological evidence. *Phys. Earth Planet Int.*, **132**, 249-267 (2002).

- [12] 東宮昭彦: マグマ溜まりが周辺地殻に与える熱的影響. *火山*, Vol.**45**, No.3, 173-179 (2000).

- [13] Yuhara, K., Ehara S., Tagomori, K.: Estimation of heat discharge rates using infrared measurements by a helicopter-borne thermocamera over the geothermal areas of Unzen Volcano, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, No.9, 99-109 (1981).

- [14] 新エネルギー総合開発機構： 地熱開発促進調査報告書 No.15 雲仙西部地域. 新エネルギー総合開発機構 (1988).

