

地下水循環の指標としての自然電位特性—山岳地形効果について—

佐波 瑞恵・大島 弘光・西田 泰典・宇津木 充*

北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

*現在、京都大学大学院理学研究科付属地球熱学研究施設火山研究センター

The properties of self-potential field as an index of groundwater circulation with special attention to topographic effects

Mizue SABA, Hiromitsu OHSHIMA, Yasunori NISHIDA and Mitsuru UTSUGI *

Division of Earth and Planetary Sciences, Graduated School of Science, Hokkaido University

*Now at, Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University

I. はじめに

自然電位は、地下水観測井が十分にない火山・地熱地域における地下水の挙動を知る方法として期待されている(石戸,1981)。これは、毛細管やそれが多く集まったものと考えられる多孔質媒体中を液体が流動すると、それに伴い電位(流動電位)が発生するという現象を、地下媒体に適用するという考えに基づくものである(北原・渡辺,1972; Nourbehecht,1963)。

一般に、山岳の斜面においては、標高が低くなると電位が高くなる自然電位分布が観測され、地形効果と呼ばれている。火山・地熱地帯では、その地形効果に加え、噴火口・噴気地帯・噴火割れ目付近で高電位異常がみられる(例えば Nishida et al.,1996)。このような火山・地熱活動に伴う自然電位異常を抽出するには、地形効果を正しく評価して観測データから差し引かねばならない。地形効果の程度は、しばしば観測された自然電位を標高に対して線形近似して求めた一次の係数によって表現される。その値は観測地によって異なるが、 $-0.1 \sim -10 \text{ mV/m}$ の値をとることが多い(Ishido,1989)。地形効果をもたらすメカニズムと考えられているのが流動電位である。

Podini(1939)はかなり前に、雪解け時には地形効果が観測されるが、雪のない夏にはみられない、という報告をしており、雪解け時には山の斜面や地下を雪解け水が下降し、流動電位により地形効果が現れるが、雪のない時期にはその流れがないために、流動電位は発生しないため、と解釈している。また Nourbehecht(1963)は、岩石試料に液体を流動させて流動電位係数を測定した結果を吟味し、流動電位係数が自然電位を発生しうるほどの大きさであることを示している。

現在では、自然電位法を用いた地下水流量の定量的な見積りのために、数値計算法の開発や具体的な計算に必要なパラメータをもとめるための室内・野外実験が試みられている(Ishido and Mizutani,1981; Ishido; Oyamada et al.,1996)。

本報では、界面導電現象の構成式に基づき、自然電位における地形効果と斜面の傾斜角や湧出領域との関係を求めるモデル計算を行うと同時に、鹿児島県桜島東部黒神地区での自然電位測定結果(橋本,1999)の数値シミュレーションを行い、その妥当性について吟味する。

II. 界面導電現象の構成式

媒体中を液体・熱・電流・イオンが流れるとき、流量フラックス J はそのポテンシャル X 、つまり圧力・温度・電位・化学成分濃度の勾配に比例し、 $J=L\nabla X$ の形で表される。ここで、 L は輸送係数(conductivity)であり、個別にはそれぞれ浸透率・熱伝導率・電気伝導率・拡散係数に対応する。しかし実際には、それぞれの流動が相互に影響して生じる間接誘起流(cross-coupled flows)の存在が知られており、それを式で表すと、

$$J_i = \sum_{j=1}^4 L_{ij} \nabla X_j \quad (i = 1, 2, 3, 4)$$

となる。i はそれぞれ液体・熱・電流・イオンに対応し、 L_{ij} は連結輸送係数(cross-coupling conductivity) とよばれる。

それらの諸関係のうち、界面導電現象は液体の流れと電流の組み合わせによって記述される。界面導電現象は、固体と液体が接する境界面に発生する界面電気（電気二重層）によって起る。界面電気のうち、液体側に発生するものは拡散層を形成しているが、このような系で液体が固体に対し運動すると、拡散層内の電荷が運搬され（電流が流れ）、流れの方向に電位差が生じる。これが流動電位である。逆に、上述のような系に電場がかかると、液体の固体に対する運動を引き起こす。これを電気浸透という。

地下における界面動電現象の構成式は、上述の流量フラックスの関係を地下水流量フラックスと電流密度に対して適応したもので、地下水流量フラックス v [m/sec]、電流密度 i [Amp/m²]、圧力 P [Pa]、電位 ϕ [V]を用いて以下のように表される (Ishido and Mizutani, 1981)。

$$v = -\frac{k}{\mu} \nabla P - L_{ve} \nabla \phi \quad (1)$$

$$i = -L_{ev} \nabla P - \sigma \nabla \phi \quad (2)$$

ここで、 k は透水係数[m²]、 μ は粘性係数[Pa·sec]、 σ は電気伝導度[S/m]、 L_{ve}, L_{ev} ($L_{ve} = L_{ev}$) は連結輸送係数（流動電流係数）[Amp·m/Pa]である。(1)式右辺第1項は Darcy 則、(2)式右辺第2項は Ohm 則、(1)式右辺第2項が電気浸透、(2)式右辺第1項が流動電位を示している。

III. モデル計算

流動電位を自然電位のメカニズムとしたとき、流動電位係数が変わる物性値境界を横切って地下水が流れる場合、地下水の湧き出しがある場合に電流源が発生する (Ishido, 1989)。地形効果の原因と考えられるのは、地表から水が地中へ出入りする、いわゆる浸透と湧出現象であり、現象を規定するのは、降水量と降水状況、涵養地帯の性質と広さ、地形、地下水包蔵体の水文地質とその構造、のような事項があげられる。本研究では地形の効果のみに着目し、その他の規定事項を最も単純化した地下水循環のモデルに基づいて、地表における自然電位がどのようにあらわれるかを計算した。ここでは、地表が凹凸をもつ半無限均質媒質中に地下水が存在し、その地下水水面は地表に分布すると仮定する。すなわち、地表面に分布する地下水水面の高さを維持するように、地中に水が定常的に出入りするものとする。

解析は、安川(1998)の用いた方法で行った。まず、媒質内を微小体積部分に分割し、各々の部分において地下水の質量保存を適応することにより地下水の流量フラックスをもとめる。その時、(1)式右辺第2項の効果は通常非常に小さいとみなされるので無視する (Ishido et al., 1989)。境界条件は地下水水面が地表にあるという仮定から、地表においては圧力が標高の関数、その他の境界では流量フラックスの鉛直成分が0であるとする (第1図)。

解くべき方程式は、

$$\text{支配方程式} \quad \nabla \cdot v = 0 \quad (3)$$

$$\text{境界条件 地表}(z = z_{gs}) : P = P_{atm} + \rho g z_{gs}$$

$$\text{その他} : v \cdot n = 0$$

ここで、 z_{gs} は標高、 P_{atm} は大気圧、 ρ は水の密度、 g は重力加速度であり、 n は境界に対して鉛直方向の単位ベクトルである。

次に微小体積部分に対し、電流の保存則を適応する。計算領域は地下水の流量フラックスの計算領域より広く取り (第1図)、台形の山岳より遠方になるに従って微小体積部分を大きくする。地表において大気は地下に比べて電気伝導度が非常に小さいので、地表に対して鉛直な成分の電流は0という境界条件を与える。地下は、境界に対して鉛直な成分の電流は0という条件を用いる。解くべき方程式は

$$\text{支配方程式} \quad \nabla \cdot i = 0 \quad (4)$$

境界条件 地表 : $i \cdot n = 0$

その他 : $i \cdot n = 0$

ここで、 n は境界に対して鉛直方向の単位ベクトルである。

(2) 式を (4) 式に代入すると、

$$\begin{aligned} -\nabla \cdot (\sigma \nabla \phi) &= \nabla \cdot (L_{ev} \nabla P) \\ &= -\nabla L_v \cdot \nabla \quad (L_v = L_{ev} \mu / k) \end{aligned} \quad (5)$$

と展開される。(3) 式で求めた地下水の流量フラックス ∇ を (5) 式に代入して、電位 ϕ に関する Poisson 方程式を解くことにより、地表で期待される自然電位分布を求めることが出来る。

本研究では、第 1 図に示すように断面が台形の山岳を仮定し、(1) 斜面の傾斜角 (2) 湧出領域等をかえて 2 次元の数値計算を行った。媒体の物性値・境界条件は後に示す IV 章と同様で、比抵抗 $10^3 \Omega/m$ 、流動電位係数 $10^5 \text{Amp} \cdot \text{sec}/m^3$ 、透水係数 $0.1m\text{Darcy}$ 、地下水の粘性率 $10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{sec}$ とした。以下、地形効果の程度を比較する場合、地形効果の絶対値が大きいとき、地形効果は大きい、と表現することとする。第 2 図上図、第 3 図上図はそれぞれ上が地下水の流量フラックス場、下が地表の電位で、第 2 図左図、第 3 図左図は地表の電位を横軸を比高にして図にしたものである。

(1) 地形効果と斜面の傾斜角および湧出領域との関係

比高を一定 (180m) とし、斜面の傾斜角を $17^\circ \cdot 11^\circ \cdot 6^\circ$ 、湧出域を $100m \cdot 300m \cdot 1000m$ と変えて地下水流量フラックスと地表の電位分布を計算した結果を第 2 図に示す。傾斜が急であるほど地形効果は大きいことがわかる。これは、地下水が地表面にある、という条件下では、斜面の角度が急になるほど地表を横切る地下水の流量フラックスが大きくなり、斜面の頂上と麓にできる負と正の電流源が大きくなるためであろう。加えて、比高を一定として傾斜角を変えているから、傾斜角が急であるほど斜面が短くなり正負の電流源の距離が近づき、地形効果がさらに大きくなるためである。

湧出領域を狭くすると地中から流出する地下水の流量フラックスが大きくなるため斜面の麓の負の電流源が大きくなり、電位のカーブが急になる。また、傾斜角が急になるほど湧出領域の広さが影響し、地形効果は大きくなる。

(2) 地形効果と斜面の相似比との関係

第 3 図に比高を $90m \cdot 180m \cdot 360m$ と変えた場合についての計算結果を示す。比高が高くなるほど斜面を出入りする地下水の流量フラックスは小さくなるため、斜面上の正負の電流源は小さくなる。また、比高が高いほど斜面が長くなり斜面の頂上の負の電流源と斜面の麓の正の電流源の距離が長くなる。したがって比高が高くなるほど地形効果は小さくなる。

(1) (2) の計算結果から、地形効果を斜面における電位を用いて最小自乗法により求めたのが第 4 図である。斜面の角度が急になるほど地形効果が大きくなる傾向がみえる。この傾向に対して、比高を変えることによる地形効果の変化の方が大きい。よって、本研究の計算結果からは、地形効果に最も影響を及ぼすのは比高であるといえる。

IV. 桜島黒神地区での自然電位観測及び数値計算結果

桜島の東部にある黒神地区一帯で 1999 年 1 月 18・19 日にかけて自然電位観測が行われた (第 5 図)。観測領域の西には、桜島の寄生火山と考えられる権現山が存在する。観測目的の 1 つは、この権現山にいまだに熱活動の痕跡があるかどうかを確かめることである。観測方法は、50m 離れた 2 点間の電位差をデジタルテスターで測定、電極を交互に移動させていく蛙飛び法で、電極は非分極電極 (Pb-PbCl_2 , Cu-CuCl_2) を使用した。その結果、権現山から海にいたる測線で標高との相関係数が $-0.7mV/m$ の地形効果が観測された (第 6 図)。

権現山測線方向を断面とする 2 次元地形で近似し、また媒質を等方均質と仮定して地形効果を III 章と同様のフォワード計算により見積もった。用いたパラメータは、茂木ほか (1999) の高密度電気探査の結果から比抵抗を $10^3 \Omega/m$ 、また、現位置での値が得られていないため、流動電位係数を $10^5 \text{Amp} \cdot \text{sec}/m^3$ 、透水係数を $0.1m\text{Darcy}$ 、地下水の粘性率を $10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{sec}$ という、通常用いられている値 (安

川, 1998) を採用した。

計算された自然電位の分布曲線は、山頂付近において観測値に比べて瘦せた形になっているが、これは、地形の微妙な傾斜を数値計算の際のグリッドで表現しきれなかったため、斜面の壁の凹み、海に至るなだらかな斜面での凸凹も同じ要因であると考えられる。それらを除くと、計算結果は権現山の自然電位観測結果を比較的よく説明している。従って、権現山の自然電位は、大略地形効果で説明され、地下熱水対流系の発達には乏しいと考えられる。

V. 考察

III章で用いられた山岳モデルでは斜面の麓から計算領域の底つまり不透水層までが 500m で、特に比高を変えた相似系の比較を行う際に影響が大きく出る。地表面の形状による影響のみを比較するのであれば、計算領域の底までの距離を比高 (の変化量) に対して非常に大きく (例えば 2000m) とする必要がある。神田他(1999)では、同じ山であっても観測路線によって地形効果が異なることを指摘している。このような観測結果は、例えばIII章のように斜面の形状に着目したり、観測路線が谷沿い・尾根沿い・山腹によって区別して吟味して吟味する必要がある。

数値計算から得られた地表の電位値と現実の自然電位観測値との整合性をとるため、解析の次の段階として、単純化した地下水理モデルのをより現実的なものに改良したり、地下構造の 2 次元的・3 次元的な不均質性、微視的異方性つまり、同じ地点であっても方向によって媒体の物性値が異なること、等を考慮することが挙げられる。本研究における地下水循環モデルでは、地下水面 (自由水面) が地表にあるとしているが、多くの場合そうではない。その場合、坑井内圧力データ (地下圧力分布データ) 等により、地下水面を補正したり、坑井データが存在しない場合には、時には経験的に山の地表面の標高 $\times 0.8$ または $\times 0.7$ を地下水面の標高とする方法が地下水流動モデリングで行われている (安川, 私信)。この際には、浸透現象のとらえ方とともに、地表—地下水面間の空隙が不飽和である領域、すなわち通気帯の電気的特性が自然電位に及ぼす影響を考える必要がある (Zlotnicki and Nishida, 準備中)。

VI. 結論

2次元構造・等方均質媒質を仮定した山岳モデルを用いて、地形効果を規定する要因を、傾斜角・湧出域の広さ等を変えて調べた。その結果、標高と電位は斜面において負に依存した傾向はあるが、厳密には線形ではなく、S字である。最小2乗法で一次の近似曲線の傾きを標高と電位の相関係数とすると、その絶対値は傾斜角の減少に伴い減少する。また、湧出域が広がるほどその絶対値は小さくなり、減少の割合は広がるほど小さくなる。相似形の場合、相関係数の絶対値は、山体を拡大するに伴い減少する。

1999年1月18、19日鹿児島県桜島東部に位置する黒神地区で行われた自然電位観測でみられた異常を、発生原因が重力により天水が高所から浸透し低所に湧出することによって生じる流動電位であるとして2次元解析を行い、ほぼ観測値を説明できる解析結果が得られた。

謝辞 自然電位観測に際し、京都大学大学院理学研究科田中良和教授、同大学防災研究所火山活動研究センター神田径博士、同山本圭吾博士、東京工業大学草津白根火山研究所平林順一教授、桜島観測所員の皆様には大変お世話になりました。観測・解析にあたっては、北海道大学地震予知観測センター茂木透助教授、解析にあたり地質調査所安川香澄博士に助言をいただきました。また、京都大学大学院理学研究科橋本武志博士には、観測・データ処理・解析にあたり教授・激励していただきました。これらのことについて、ここに記して感謝の意を表します。

文献

橋本武志・田中良和・西田泰典・茂木透・山本圭吾・平林順一・石原和弘 (1999) , 桜島火山の自然電位, 桜島火山の地下水・熱水系に関する研究, 65-101, 京都大学防災研究所

石土程士、地下水対流に伴う流動電位—地熱地域における自然電位異常の1つのメカニズムとして—(1981), 日本地熱学会誌, 3巻, 87-

100

Ishido,T. and Mizutani,H.(1981), Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics, J.Geophys.Res.86,1763-1775

Ishido, T. (1989), Self-potential generation by subsurface water flow through electrokinetic coupling, Detection of subsurface flow phenomena (ed. By Merkle, G.P. et al.), Springer-Verlag, Lecture notes in earth sciences, 27,121-131

Ishido,T. Kikuti,T. and Sugihara,M.(1989), Mapping thermally driven upflows by the self-potential method,Hydrogeological Regimes and Their Subsurface Thermal Effects(Geophys. Monograph 47,IUGG Volume 2) (ed.by A.E.Beck,G.Garven and L.Stegena),Amer.Geophys.Union,151-158

神田程・橋本武志・大島弘光(1999),諏訪之瀬島火山における自然電位分布,京都大学防災研究所年報,42,B-1,11-18

北原文雄・渡辺昌 編 (1972), 界面動電現象—基礎・測定・応用—,372,共立出版

茂木透・橋本武志・神田程・田中良和・山本圭吾・大場成征・大島弘光・佐波瑞恵・平林順一 (1999), 桜島火山における高密度電気探査, 桜島火山の地下水・熱水系に関する研究, 103-108, 京都大学防災研究所

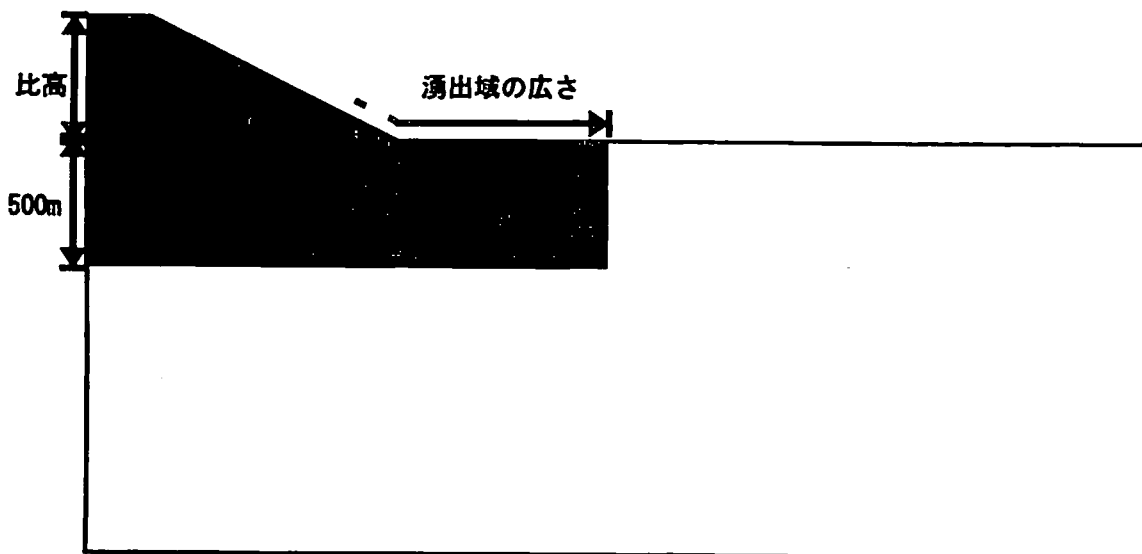
Nishida,Y., Matsushima,N., Goto,A., Nakayama,Y., Oyamada,A., Utsugi,M. and Oshima,H. (1996), Self-potential studies in volcanic areas(3)— Miyake-jima, Esan and Usu —, J.Fac.Sci.,Hokkaido Univ.,Ser.VII, 10, 63-77

Nourbehecht, B. (1963), Irreversible thermodynamic effects in inhomogeneous media and their application in certain geoelectric problems, 121,Ph.D. thesis, M.I.T

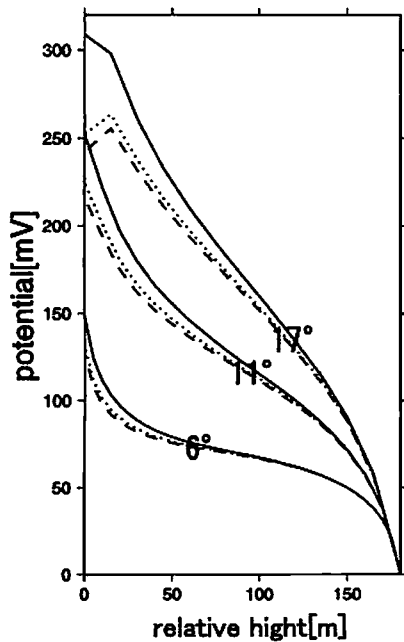
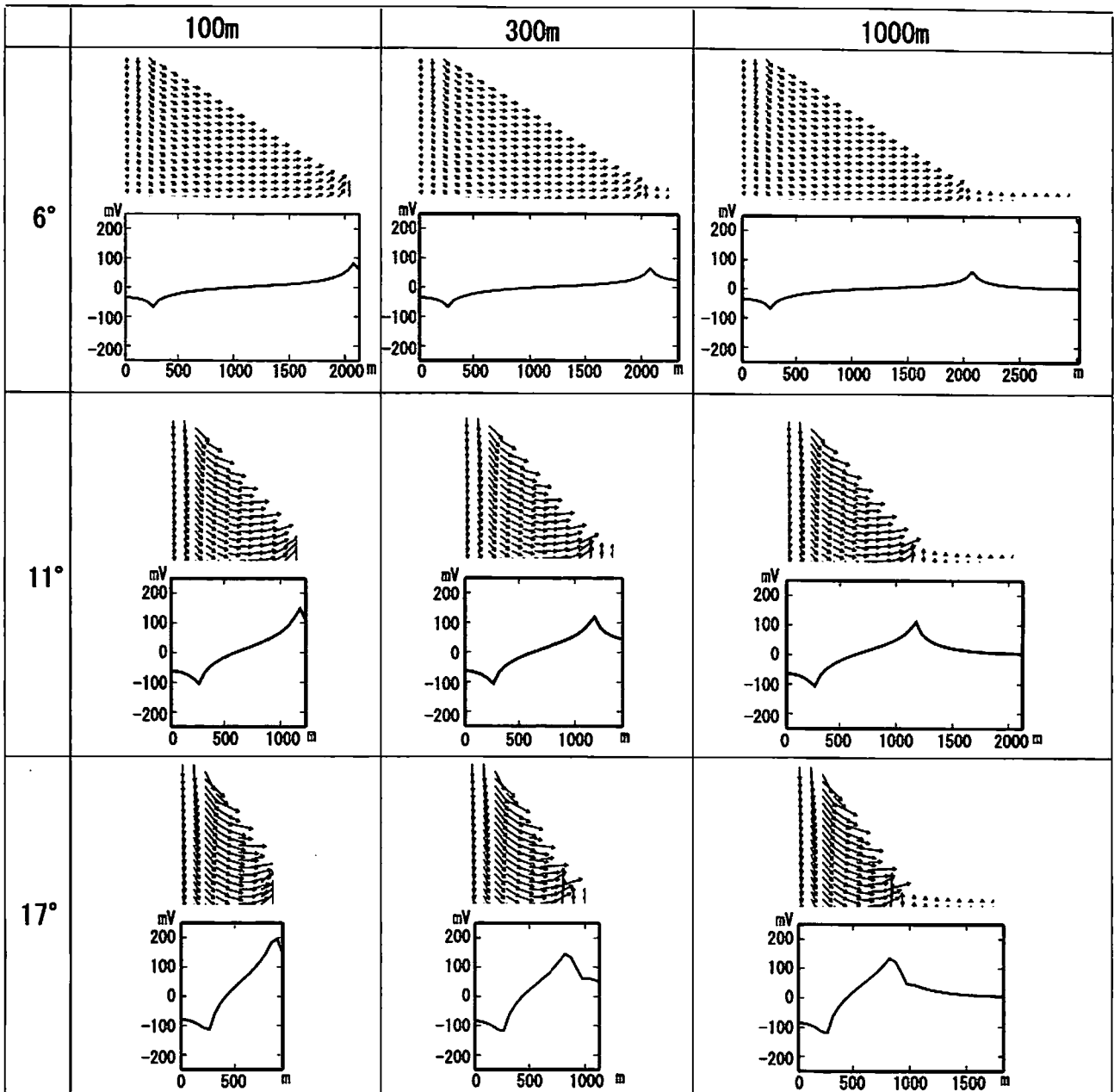
Oyamada,A., Oshima,H., Nishida,Y., Goto,A. and Furukawa,H.(1996), Self-potential studies in volcanic areas (4) —An attempt to Estimate the in-situ value of the electrokinetic coupling coefficient— Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser.VII, 10, 79-87

Poldini,E. (1939), Geophysical exploration by spontaneous polarization methods, Mining magazine, 60, 22-27

安川香澄・茂木透 (1998), 地下水流動に伴う自然電位異常に対する地形の効果—数値モデリングによるアプローチ—, 物理探査, 51, 17-26

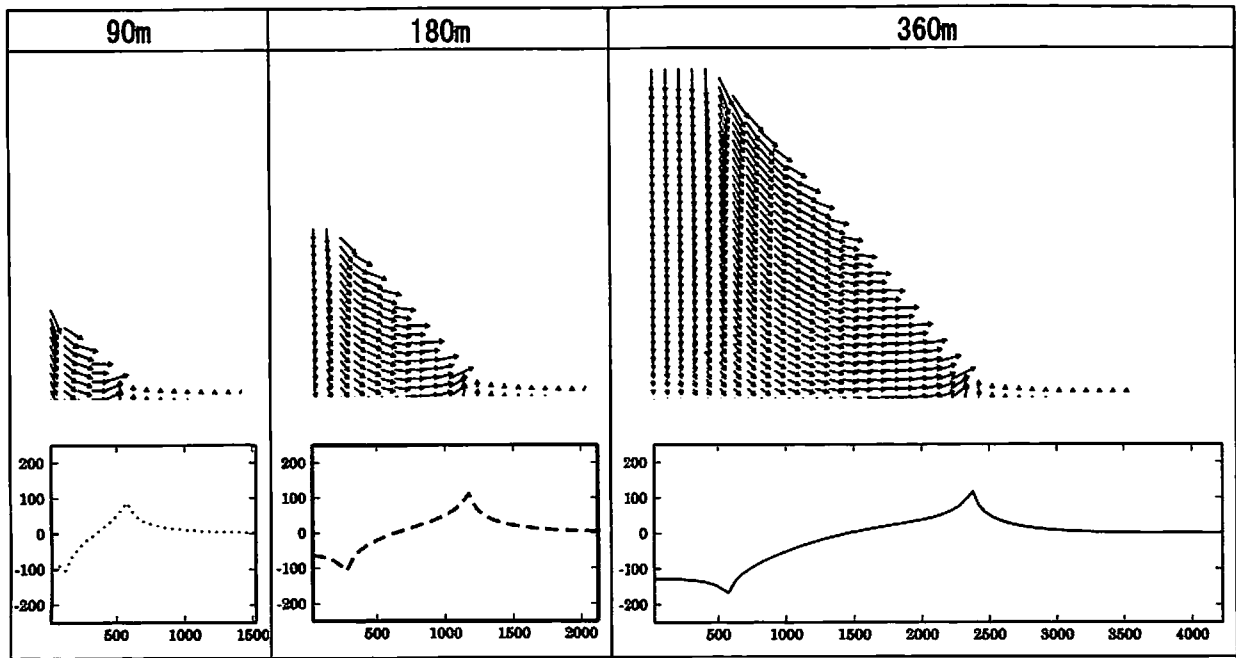


第1図 数値計算に用いた山岳モデル
地下水流量フラックスの計算で用いた領域は灰色部分
自然電位の計算で用いた領域は灰色+白色部分



第2図 上図 山岳地形モデルによる、
 地下水流量フラックスと
 地表の電位の計算結果
 傾斜角 6°・11°・17°
 湧出域の広さ 100m・300m・1000m

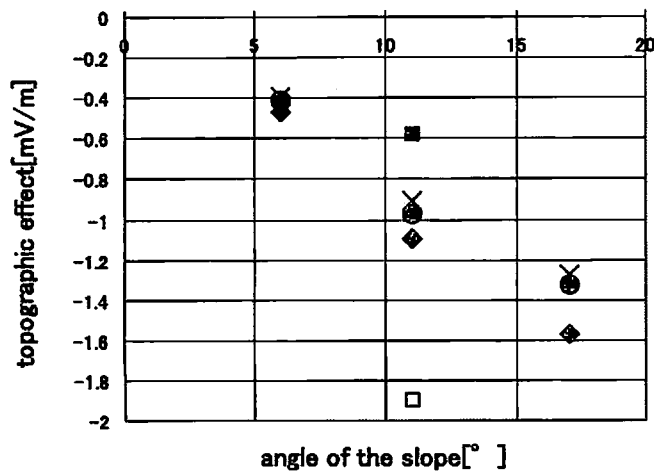
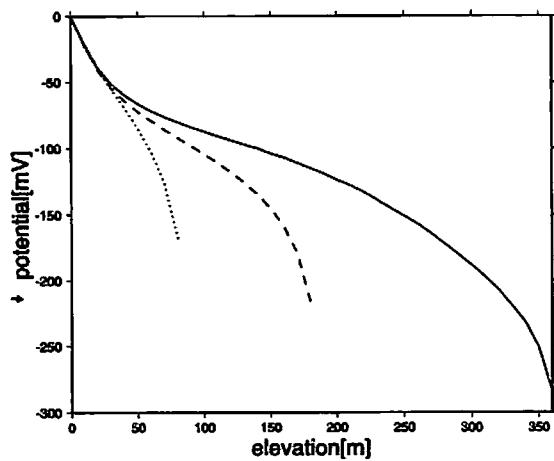
左図 斜面における地表の電位と比高の関係
 実線：湧出域の広さ 100m
 点線： 300m
 破線： 1000m



第3図

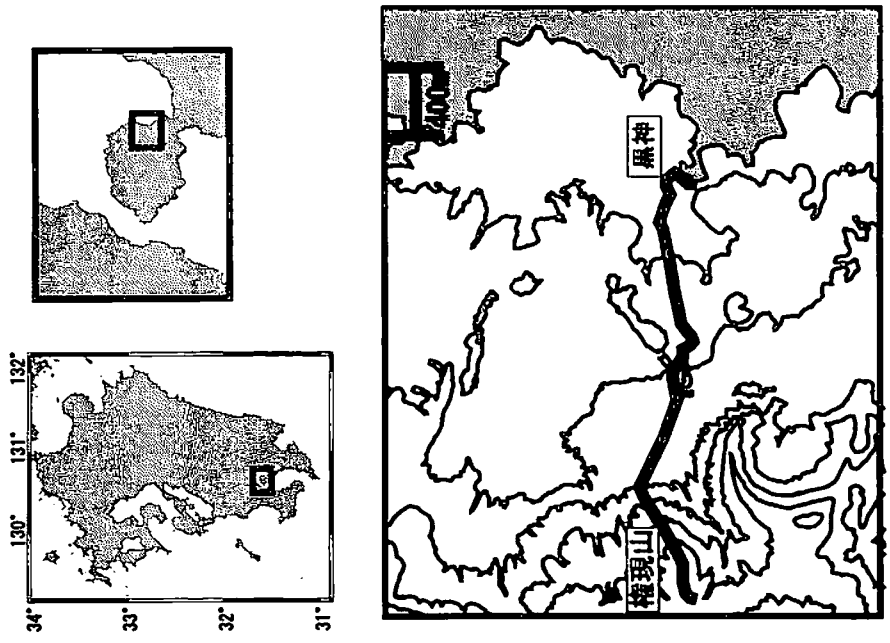
山岳地形モデルによる、
地下水流量フラックスと
地表の電位の計算結果

上図 傾斜角 11°、
湧出域の広さ 1000m、
比高 : 90m・180m・360m
左図 斜面における地表の電位と
比高の関係
実線 : 比高 360m
破線 : 180m
点線 : 90m



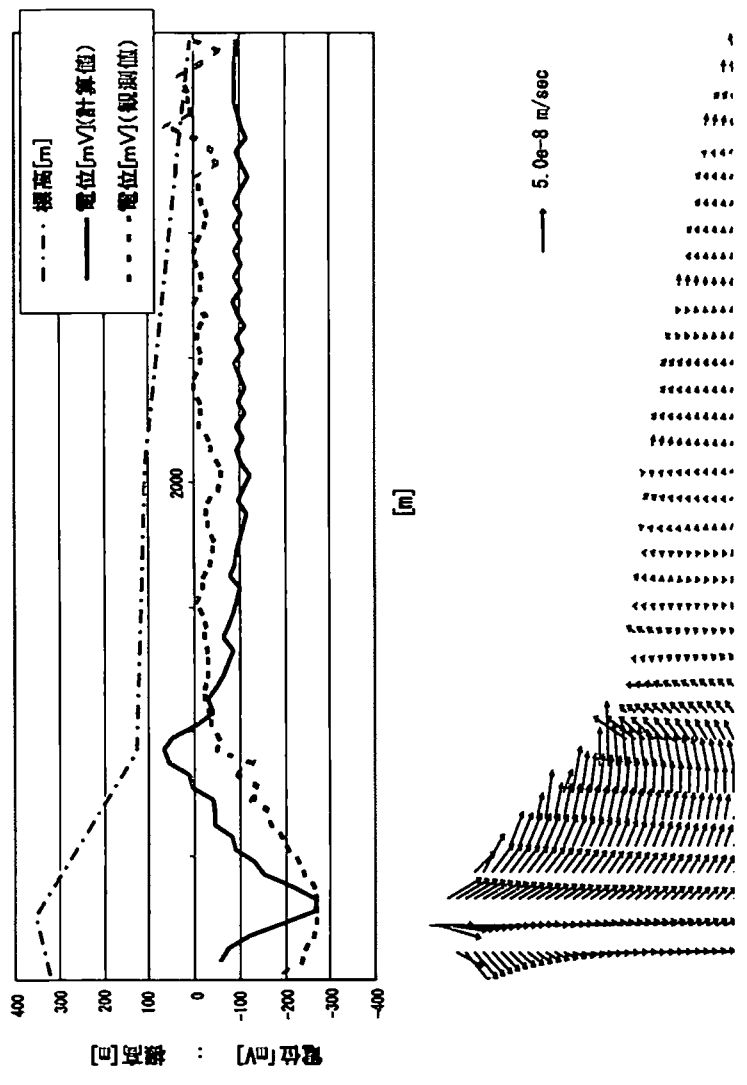
第4図

斜面の角度と
地形効果の関係
× : 湧出域の広さ 1000m
● : 300m
◆ : 100m
(比高 : 180m)
■ : 比高 360m
□ : 比高 90m
(湧出域の広さ : 1000m)



第5図 桜島黒神地区自然電位観測測線
(下図太線)

桜島黒神地区 自然電位観測・計算結果



第6図 上図 桜島黒神地区自然電位の観測値・数値計算結果
下図 地下水の流量フラックス計算結果