

富士山周辺の水文調査*

Hydrological research around Mt. Fuji

井川怜欧¹・小野昌彦¹・神谷貴文²・渡邊雅之³・村中康秀²・平野智章⁴・丸井敦尚¹
Reo Ikawa¹, Masahiko Ono¹, Takafumi Kamitani², Masayuki Watanabe³, Yasuhide
Muranaka², Tomonori Hirano⁴, Atsunao Marui¹

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 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute for Geo-Resources and Environment)

2 静岡県環境衛生科学研究所 (Shizuoka Institute of Environment and Hygiene)

3 静岡県工業技術研究所 (Industrial Research Institute of Shizuoka Prefecture)

4 日本工営株式会社 (Nippon Koei co. Ltd)

Abstract: A large number of hydrogeological studies for Mt Fuji have been conducted over a century. Consequently, various hydrogeological processes such as groundwater flow, groundwater age, and groundwater recharge in volcanic body could be revealed. However, information about the existence of a hydraulic basement seem still insufficient. Therefore, in order to approach for a quantitative evaluation of groundwater storage at Mt. Fuji by using a numerical model, certain problems exist. Large scale groundwater sampling and geochemical analysis (inorganic ion concentration and hydrogen and oxygen stable isotopic ratios) have been conducted in 2014 in order to understand the hydrogeological environment and establish the information needed to understand the hydraulic basement at Mt. Fuji. As a result, groundwater flow systems and groundwater boundaries at Mt. Fuji and its surrounding mountains were explained by spatial distribution of geochemical species in spring water and groundwater. In order to determine the hydraulic basement, it's necessary to get further hydrogeological information for deep aquifers in the future.

Key words: Mt Fuji, Groundwater, hydrological environment, inorganic ion concentration, hydrogen and oxygen stable isotopic ratios

要 旨

富士山における水文地質学的研究は100年以上前から行われてきた。その結果、富士山における地下水流動、滞留時間、及び涵養プロセスなどが明らかになった。しかしながら、水理基盤面の形状や深度については、未だ明らかとなっておらず、地下水賦存量の定量評価については課題を残している。そこで、富士山における水文環境と水理基盤の把握に必要な情報を整理するため、2013年度、富士山流域において大規模な採水調査を行い、無機溶存イオン濃度及び水素・酸素安定同位体比の分析を実施した。その結果、地下水や湧水における水質及び同位体比の空間分布から富士山や周辺の山地における地下水流動系と、その影響範囲が明らかとなった。水理基盤の把握のためには、新たな地化学トレーサーを含む深層の水文地質データの更なる取得が必要である。

1. はじめに

富士山は山梨県と静岡県の県境に位置する日本を代表する火山である。この日本最大の火山にもたらされる大量の降水や降雪は、透水性の高いスコリアや玄武岩質溶岩などの火山噴出物で構成される表層部から山体内部へと浸透し、膨大な地下水となり、山麓下部における数多くの湧水や湖を潤し、地域の人々の生活・文化に根強く関与している。また明治20年から岳南地域のパルプ・製紙工場における主要な工業用水源となっており過剰揚水に起因する塩水化が深刻化した時期もあったが(村下, 1977; 村下, 1982; 池田, 1995)、現在では回復傾向にあり、一部の報告では豊富な地下水は海底湧水として駿河湾における水産資源にも影響を与えているといわれている(伊藤・丸井, 2008)。富士山周辺の陸水(河川や湖沼)や地下水に関する学術的報告は井上(1917a, b)に始まり、現在

*本稿のデータは水文環境図 No.9「富士山」(2016年3月発行)に収録されています。

まで約1世紀にわたり続いている。時代とともに、過去には明らかとなっていなかった各種水文現象に関する知見が様々な物理的・化学的手法を通じて解明されつつあるが、一方で、富士山のもつ広大な流域や火山地域特有の帯水層構造の複雑さにより未だ明らかとなっていない点も残されている。産業技術総合研究所地質調査総合センターでは、「沿岸域の地質・活断層調査」として平成25年度から2年間、駿河湾沿岸域を対象とした各種調査を行っている。本稿では、平成25年度に行われた水文調査で得られた各種知見と今後の課題について報告する。

なお、本稿は、地質調査総合センター速報 No. 65 で概要を報告し（井川ほか, 2014）その後、新たに考察を行い海陸シームレス情報集として取りまとめたものである。

2. 既存研究

先述したように、富士山における水文地質学的研究の歴史は非常に長く、数多くの論文・報告書が公表されている。一方で、富士山全域を対象とした研究、特に地下水研究は広大な流域規模のため限定されている。巨視的な観点から富士山の地下水を捉えた初めての学術的研究は井上禧之助が1917年に発表した「富士四近の水理」である（井上, 1917a, b）。本稿では大正5年9月に行った現地調査のデータをもとに、富士山周辺の湧水や河川、湖沼に関する水理的特徴を紹介している。富士山周辺の地質と水理についての初めての包括的な整理は神原（1929）によってなされている。本書では湧水や河川流量から富士山体の水理構造について推察を行っているが、地下水の流動に関する記載は乏しい。富士山全域の地下水に着目した研究は蔵田（1948）により行われており、本稿では井戸と湧水の位置関係などから山体内部の地下水脈の機構について言及しているが帯水層などの概念は入っていない。既往研究の大規模なとりまとめは蔵田（1966）により行われた。本書では、ボーリングデータを用いた断面図などを用いて主に富士山の東西麓の帯水層の概念を含めた地下水流動や水温と水質について考察を行っている。山本（1970）は、これまで定性的にしか議論されてこなかった富士山の湧水の湧出量と減衰率について数学的なモデルシミュレーションを始めて行った。得られた結果は、実測値と比較して妥当なものであり、このことから火山体を貯水池として扱うことに問題がないことを実証した。神原（1929）以後、学術的な書籍としてのとりまとめとしては、「日本の地下水」において志村・佐藤（1986a, b, c）や宮本（1986）が行っている。本書において筆者たちは、ボーリング柱状図、地下水面図、及び井戸の取水量などから富士山の東・西・南・北麓における水文地質図を作成し、各地層における帯水層能（地下水貯留能）を評価した。

水質や同位体などの化学トレーサーは水循環や地下水の流動系を把握するための重要な手がかりとなる。富士山の地下水に関する水質研究は、塩水化が激しかった富士南西麓（岳南地域）に多く見られるが（例えば、池田（1967）や Ikeda（1989））、全域あるいは広域を扱った事例としては、井野（1987）、佐藤ほか（1997）、及び鹿園ほか（2014）などが上げられる。井野（1987）では北麓地域は研究対象に含まれておらず、また水質情報も電気伝導度（EC）、pH、水温などに限定されている。本研究は、水質情報を直接的に地下水流動と結び付けた研究ではないが、富士山流域の湧水における過去のデータを知る上で貴重な資料である。佐藤ほか（1997）は富士山周辺の地下水及び湧水における水質の空間分布を明らかにし、また主成分分析結果から地下水の流動と水質特性には一定の関係があることを示したが、一方で水質データのみによる地下水流動系把握の限界を示している。鹿園ほか（2014）は、湧水の水質と窒素安定同位体を用いて水-岩石反応を用いた湧水高度による水質変化、ならびに硝酸性窒素汚染の汚染源の特定を試みた。その結果、標高の低下に伴う陽イオンと H_4SiO_2 の増加は水-岩石反応の進行によるものと結論付けている。また硝酸性窒素の汚染源についても、茶畑に散布された無機化学肥料であると結論付けた。

Craig（1961）や Dansgaard（1964）などにより、水素・酸素安定同位体比が水循環を把握する強力なツールとして証明されて以降、1960年後半から日本国内における水文研究に同位体が徐々に用いられるようになり、早稲田・中井（1983）によって富士山の降水と南西麓の地下水と湧水の酸素同位体比が初めて測定された。その結果、富士山の地下水の同位体比は降水量や地下水位の変動にかかわらず、一年を通じてほぼ一定の値を示すことが明らかとなり、山地に降った雨が降水の同位体比の季節変動を打ち消す程度の滞留時間を経て地下水として流動していることが明らかとなった。1990年代には、同位体測定技術の向上も伴って富士山体や溶岩中の滞留時間を含めた地下水流動系の把握に各種同位体が用いられるようになった（例えば吉岡ほか（1993）；馬原ほか（1993）；中井ほか（1995））。水素・酸素安定同位体を用いた富士山全域を対称とした最新の研究は安原ほか（2007）である。彼らは富士山の全方向の異なる標高の降水を1年間にわたって採取し、各方向における降水の同位体比特性を明らかにするとともに、標高別の湧水や風穴水の同位体比から富士山流域における地下水涵養線を求め、各地域の地下水の涵養標高を算出することで、標高1,100～2,700mの降水が新富士火山噴出物における地下水の主要な涵養源であることを明らかにした。また Tosaki *et al.*（2011）は、放射性同位体である ^{36}Cl を用いて富士山南西麓の地下水の年代を推定した。その結果、富士山流域の地下水年代はおおよそ20～30年程度と推定された。こ

の値は、過去に富士山東麓の三島溶岩流中の地下水を対象に、 ^3H 法や $^3\text{H}/^4\text{He}$ 法によって行われた馬原ほか(1993)や落合(1994b)の値(4~10年程度)と比較すると、やや大きな値となっているが、吉岡ほか(1993)が ^3H により推定した地下水年代(30年程度)とは一致する。いずれにせよ、早稲田・中井(1983)によって提唱されたように、富士山周辺の地下水が降水の水素・酸素同位体比の季節変動を打ち消す程度の滞留時間を要していることは確実である。

3. 富士山の水理地質

富士山の詳細な水理地質の取りまとめについては、蔵田(1966)、志村・佐藤(1986a, b, c)及び宮本(1986)などによりすでに行われているため、本稿では概要を述べる。富士山(標高3,776m)は玄武岩質の岩石から構成されており、周囲を天子山地(西側)、御坂山地(北側)、丹沢山地(北東側)などの新第三紀の火山噴出物や堆積岩、ならびに箱根山(南東側)や愛鷹山(南側)などの第四紀の火山噴出物に囲まれている。また富士山の東西には、丹那起震断層や富士川河口起震断層などのいくつかの活断層がそれぞれ位置している(第1図)。なお本稿の図中に示した活断層の分布は中田・今泉編(2002)を引用している。第1表は富士山周辺の水文地質構造をまとめたものである。方角により多少の差異はあるが、おおまかには新第三紀堆積岩及び火山岩を基盤としており、その上に富士山や愛鷹山などの火山が形成されている。富士山は更新世に噴火した古富士火山と後期更新世から完新世にかけて噴火した新富士火山に分けられる。山元ほか(2005)が行った放射性炭素年代測定によると古富士/新富士移行時の不整合の形成は、BC18,000年頃とされており、新富士火山では旧期(BC15,000~6,000年頃)、中期(BC3,600~1,700年頃)、新时期前半(BC1,500~300)、及び新时期後半(BC300年以降)の合計4回の噴火活動が確認されている。古富士火山の噴出物は玄武岩質の火山泥流であることから古富士泥流とも呼ばれている。白糸の滝に代表される富士山西麓の湧水の多くが、古富士泥流と新富士溶岩層の境界から湧出していることから、古富士泥流は水理的基盤と考えられてきたが、第1表にもあるように古富士泥流も帯水層としては有効であることが過去の研究から明らかになっており、実際の水理的基盤はさらに下位にあると考えられる。一方で、古富士やそれより下位の地層を対象とした観測井等が存在しないため、今もって真の水理的基盤の形状や深度については明らかとなっていない。

4. 水文調査の概要

本調査では第1図に示した範囲において2013年11~12月にかけて採水を行った。採水地点は、湧水96

地点、地下水位観測井40地点、水道水源井21地点、及び河川水44地点の合計201地点である。湧水では湧出口での採水を基本とし、それを行えない場合に限り、近傍あるいは、流出下流部で採水を行った。観測井については水位測定後、ペーラーを用いてスクリーン区間の中間点付近で採水を行った。水源井については、すべて既設の蛇口を用いて採水を行った。河川水については川岸での直接採水を基本とし、それが行えない一部の河川では、橋の上から採水容器を用いて採水を行った。現地では電気伝導度(EC)、pH、酸化還元電位(ORP)、ならびに溶存酸素濃度(DO)の測定を行い、主要溶存成分(Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-)やアルカリ度(HCO_3^-)、及び水素・酸素安定同位体比(δD 及び $\delta^{18}\text{O}$)については、適宜、採水ボトルに採取し持ち帰った後、室内分析を行った。無機溶存イオンについては0.45 μm のフィルターでろ過した後、イオンクロマトグラフィー(DIONEX社製ICS5000)、アルカリ度についてはpH4.8の滴定法、水素・酸素安定同位体比については、0.45 μm のフィルターでろ過した後、近赤外線レーザー方式水同位体比分析装置(PICARRO社製L2120-i)を用いてそれぞれ測定を行った。

5. 富士山東南西麓における水質・同位体比の空間分布

第2図~第7図に調査対象地域におけるEC、pH、水温、 Cl^- 、 NO_3^- 、及び $\delta^{18}\text{O}$ の分布を示す。湧水を含む地下水のECは相対的には、富士山頂からの距離に比例して大きくなる傾向を示す。また河川水については、相対的に河口部に近いところほど高い値を示した。pHについては一部の観測井で9.0以上の非常に高い値を示したが、それらを除く地下水の傾向は、おおむね富士山頂から離れるほど小さな値を示した。湧水については、富士西麓では地下水と共通した傾向がみられないものの、東麓では同様の分布傾向を示し、御殿場市付近で高い値を示した。また高いpH値は南側の愛鷹山南麓においても確認された。水温については、明瞭な分布傾向を示し、地下水・湧水問わず高標高の地域、すなわち山地ほど低く、低標高地域、すなわち沿岸域ほど高い値を示した。地下水の水温は地域の年平均気温に依存するため、今回のような分布傾向が見られたと考えられる。 Cl^- については過去に塩水化が報告された地域(田子の浦周辺地域)の観測井2本で高い値が見られた。他の地域ではすべて10mg/L以下の低い値を示すが、相対的には、海に近い地域ほど高い値を示す。これは沿岸部ほど風送塩による影響が大きいためと考えられる。河川水では、流域面積、河道勾配、ならびに流量が小さな河川の河口部において、高い Cl^- 濃度を示した。これはECの分布傾向と一致しており、これらの河川では潮汐変動にともなう塩水の浸

入等が生じているものと考えられる。NO₃⁻については、自然界においても植物の活動により一定量の負荷は存在するが、高濃度になる要因としては田畑への施肥や家畜のし尿、生活排水など人為的影響があげられる。湧水中のNO₃⁻分布を見ると、富士山南西麓と愛鷹山南麓の高濃度の地域が集中している。これは鹿園ほか(2014)において、高い値が確認された地域と一致しており、茶畑への施肥などが主な要因である。一方で、地下水では南西麓の一部の地域で高濃度の地域がみられるものの、湧水ほど顕著ではない。地下水中の硝酸濃度の低下の要因としては、一般的に帯水層中での脱窒反応が考えられるが、本地域では地下水中のDO値も流動方向に向かって低下するものの、大部分が0以上であるため脱窒反応が生じるような還元的环境ではない。したがって、地下水中の濃度の低下は、人為的要因による硝酸汚染が生じていない高標高地域で涵養された深層地下水による十分な希釈が原因と考えられる。δ¹⁸Oについては、地下水の高度効果に伴う値の変化が見て取れた。一方、湧水では富士山南西麓(吉原地域)や南東麓(三島地域)において周辺よりも低い同位体比を示す湧水が見られた。これは本地域の地下水流動系に起因するものであるが、詳細は後述する。

5.1 富士山東麓の地下水流動系

本地域は、御殿場市を中心とする東麓の緩傾斜地は新期火山砂礫層及び新期泥流に覆われており、裾野市から三島市にかけての狭窄平坦部には古期溶岩類に属する三島溶岩が分布している(第1表参照)。三島溶岩は新富士旧期の多孔質な玄武岩質溶岩であり、数層の溶岩流からなり(第8図)、溶岩に末端には三島湧水群や柿田川湧水群など大規模な湧水帯が存在している。湧水の詳細な湧出メカニズムについては土(2004, 2007)にまとめられている。第9図に示すように、本地域における湧水の同位体比分布は特異な傾向を示す。植野ほか(1998)によって示された富士山東麓地域における地下水面図(第10図)に照らし合わせると、湧水及び地下水は、地下水位と標高が高い御殿場市付近で-9.0‰以下のもっとも低い値を示し、裾野市から三島市にかけての狭窄平坦部で、-7.9‰以上の大きな値を示した後、三島湧水群や柿田川湧水群が位置する大場川と黄瀬川と狩野川で囲まれた三島溶岩の末端部で再び-8.0～-8.9‰の小さな値を示した。これは三島溶岩流における帯水層構造に起因している。第11図と第12図に落合(1994a, b)に示された三島溶岩流の地質断面図と地下水流速断面図をそれぞれ示す。本図からも明らかのように、溶岩内では透水層と難透水層が互層しており、また同じ溶岩層であっても流速、すなわち透水性が著しく変化する。したがって、御殿場から三島地域に至る流動系において、愛鷹山東麓の裾野市地域に降った雨は、三島溶岩中の深部層に浸透しにくい構造となっていると推察される。第9図にお

いて、狭窄平坦部の観測井の地下水が湧水と比較して有意に軽い値を持っており、溶岩の末端部の湧水と同じ同位体比を示していることもこのことを支持している。第10図の地下水面図から富士山東麓の御殿場から三島に向かう地下水の流れは、富士山、愛鷹山、及び箱根山の3つの起源を有していることがわかる。柿田川・三島湧水群の両端に見られる相対的に大きな同位体比を示す湧水は、富士山で涵養された地下水よりも、低標高の地域、すなわち愛鷹山や箱根山で涵養された地下水と考えられる。

5.2 富士山南麓(愛鷹山南麓)の地下水流動系

愛鷹山は、富士山南麓に位置する1,509mの第四紀の火山である。沢村(1955)は本火山を古期玄武岩層と新期安山岩層に大別した。玄武岩を噴出した旧期活動は愛鷹火山体の主部を形成しており、上・中・下部に分類される(第13図参照)。下部火砕岩が水文地質学的に難透水層～不透水層であるのに対し、中部火砕岩及び上部火砕岩の一部は良好な透水層となっている(志村・佐藤, 1986b)。第9図において、愛鷹山周辺の地下水及び湧水はすべての試料で-7.0～-7.9‰の範囲の同位体比を示し、富士山由来のものと比較して有意に低い。また、愛鷹山周辺の地下水や湧水のδ¹⁸O分布をさらに詳細に分類すると、沿岸部により低い値を示す地下水や湧水が存在する(第14図)。これらの地下水は第13図の地下水流動方向から、愛鷹山麓近辺の湧水よりも愛鷹山の高標高域で涵養された地下水がより深部を通過して沿岸部に至ったと推察される。

5.3 富士山西麓の地下水流動系

富士山西麓には、白糸の滝や湧玉の池に代表される富士宮湧水群が存在する。これらの湧水は、大宮溶岩や白糸溶岩などの新富士旧期溶岩と古富士泥流層の間から湧出している。これらの湧水の特徴は、融雪量や降水量と緩やかな相関をもつことであり、富士西麓の中腹以上で涵養された地下水が降水や融雪による水圧の上昇により、被圧され押し出されるように噴出していると考えられている(土, 2007)。これらの地域では、古富士泥流は不透水層の役割を果たし水理的基盤となっている。一方で、田子の浦地区に代表される岳南地域では、前述したように明治20年からパルプ・製紙業が盛んに行われ、深度100mを超える深井戸からの大量の揚水が行われた結果、被圧地下水における深刻な塩水化が生じた(尾崎, 1978)。富士山南西地域における地下水の有効な帯水層は、扇状地堆積物や新富士溶岩層などであるが、一部の地域では古富士泥流からの大規模な揚水も行っている(志村・佐藤, 1986c)。また標高500～800mの地域では地下水面が古富士泥流内にあることも報告されており、本層が必ずしも、水理学的基盤となっていないことがわかる。本地域の湧水におけるδ¹⁸O分布を第15図(a)に示す。

北部の猪之頭地区に分布する幾つかの湧水で、異なる同位体比が見られる要因は地下水の涵養域の違いに起因すると考えられる。すなわち、芝川の東側の相対的に小さな同位体比を示す湧水は高標高の富士山の降水を起源とした地下水であり、西側の大きな値を示す湧水は、低標高の天守山地の降水を起源とした地下水である。富士山の高標高域で涵養された地下水は潤井川の水源ともなっており、潤井川沿いに周辺と同じあるいは高い標高の湧水よりも小さな同位体比を示す湧水の存在が確認される。また相対的に小さな同位体比をもつ湧水は、田子の浦周辺の岳南付近にも見られ、愛鷹山を起源とする湧水とは赤淵川付近で明瞭な違いを有している。地下水温についても池田（1995）において指摘されているように、赤淵川より西では相対的に低い温度を示し（第16図）、より標高の高い富士山で涵養された地下水であることを示している。地下水の同位体比では、芝川に沿った相対的に小さな同位体比を持つ地下水、愛鷹山から田子の浦に向かう相対的に大きな同位体比を持つ地下水、そして富士山から沿岸部に向かう両者の中間の値を持つ地下水が見られる（第15図(b)）。これらは、志村・佐藤（1986c）において報告されている富士山西麓の地下水等高線から読みとれる地下水流動方向と一致しており（第17図）、酸素・水素安定同位体比が本地域における地下水流動系の推定に有効なツールであることを示している。志村・佐藤（1986c）が示した地下水流動方向は静岡県が平成25年に行った東部地域地下水脈調査（未公表）においても夏季と冬季の両方で確認されており、本地域の普遍的な地下水流動系であると考えられる。

本地域における地質学的特長としては、入山瀬断層の存在があげられる。断層と地下水との関係については、古くから関心もたれており（脇田，1978）、とくに地下水の温度や水質などの情報は断層帯の分布と密接に関している。大木ほか（1998）は新潟平野における消雪井の水質と水温を用いて、沖積層に覆われ断層地形の判別が不可能な地域での伏在断層の識別を試みており一定の成果を上げている。本地域においても入山瀬断層の正確な位置については把握がなされておらず、本調査において位置の特定を試みた。第16図において、富士川扇状地、とくに富士川河口部の地下水は周辺の地下水と比べて相対的に高い温度を示すように見える。高い地下水温を示す地下水の分布範囲は図中の断層位置とは一致していないが、伊藤・山口（2016）による富士川河口域における反射法地震探査の結果、入山瀬断層の位置は、中田・今泉編（2002）に基づき地震調査研究推進本部（2010）が示した従来の位置よりも400m以上、西に位置していることが明らかとなっている。また深部では少数の断層に収斂するものの、浅部では450m以上の広範囲に分岐して存在していることも明らかとなった。よって本地域で見られる高い温度分布は入山瀬断層に起因する可能性が

示唆される。しかしながら、Cl濃度や酸素同位体比の分布からは特異的な分布は確認できていない。したがって、今後は斎藤・高田（1994）が行った²²²Rnなどの地殻物質から地下水中に供給される成分を測定することで、入山瀬断層と地下水との関係について、新たな知見を得られる可能性がある。

6. 富士山の地下水研究における課題と展望

富士山の地下水を対象とした従来の研究例は多い。これらの研究により地下水の湧出機構、流動方向、涵養プロセス、地下水年代（滞留時間）など多くの情報が得られている。一方で、本地域における地下水開発は火山地域における地下水の確保に端を発している。そのため、観測井を含む多くの井戸は複数の帯水層にまたがってスクリーンが設けられており、その結果、各帯水層の特性については未だ明らかとなっていない。とくに古富士泥流以深の帯水層については、十分なデータがなく明確な水理学的基盤の形状や深度については不明である。古富士泥流の帯水層としての役割を把握することの重要性については、これまでの多くの研究で指摘されており、より深部の地下水流動系を明らかにする上で必要不可欠である。また駿河湾における富士山からの海底下地下水流出においてもその実態はほとんど明らかとなっていない。産業技術総合研究所では平成26年度に水文環境図「富士山」プロジェクトの一環として、古富士泥流を含む深部地下水調査を静岡県と共同で行っており、また平成25・26年度に行われている経済産業省受託研究「海域地質環境調査確証技術開発」において地下水の各種同位体分析（⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, ¹⁴C, ³⁶Clなど）や微量元素成分分析、さらに駿河湾における大規模な海底湧水調査を行っている。これらの成果は、本稿のデータとともに水文環境図「富士山」や各種論文として随時発表予定であり、これにより富士山の地下水研究は大きく前進するものと思われる。

7. まとめ

富士山の東南西麓において採取した湧水・地下水・河川水の水質と水素・酸素安定同位体比の空間分布から富士山流域における地下水流動系について考察を行った。その結果、富士山東麓では、三島溶岩の流れと構造に沿った地下水流動が形成されており、また東麓沿岸部まで箱根山や愛鷹山から明瞭な地下水系の存在が明らかとなった。また富士西麓においても芝川、富士山、愛鷹山の3つの地下水系が存在しており、それぞれが明瞭な地下水特性を持ち、区分されることが明らかとなった。さらに入山瀬断層付近では、地下水温と断層との間に関連性が存在する可能性が示唆された。現在、本地域では集中的な地下水研究が行われて

おり、ここ数年で更なる多くの知見が得られるものと期待される。

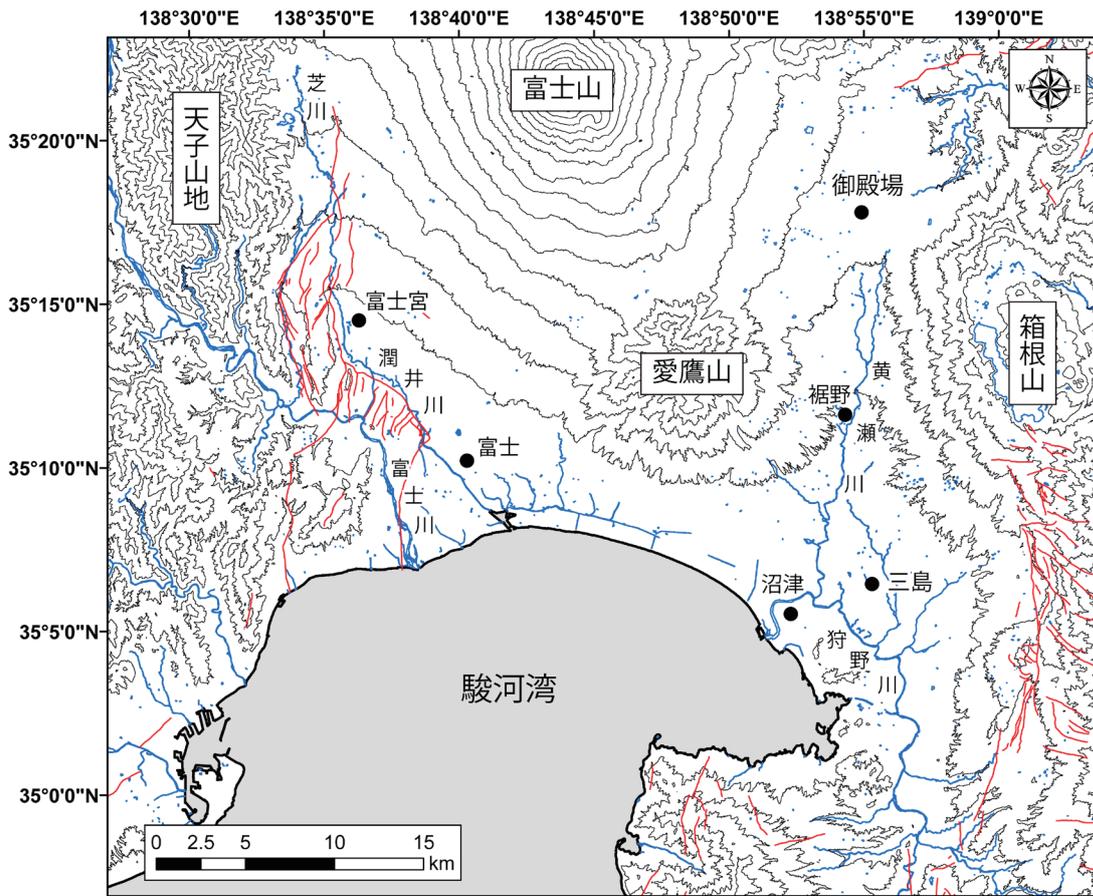
謝辞：本研究を行うにあたり、採水にご協力いただいた各市町村の担当者の方々、とくに富士市産業経済部産業政策課の久保博司氏と町田陽平氏には、岳南地域における水文データの提供など多大なるご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を示す。

文 献

- Craig, H. (1961) Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, **133**, 1702-1703.
- Dansgaard, W. (1964) Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, **16**, 436-468.
- 井川怜欧・町田 功・小野昌彦・平野智章・丸井敦尚・内田洋平・吉岡真弓・シュレスタ ガウラブ・クラウディア ハートヴィッグ・村中康秀・神谷貴文・渡邊雅之 (2014) 沿岸域の水理地質環境。平成 25 年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告，産業技術総合研究所地質調査総合センター速報，no.65, 77-110.
- 池田喜代治 (1967) 地下水の塩水化についての研究—第 2 報 塩水化地下水の地球科学的研究。地質調査所月報，**18**, 393-411.
- Ikeda Kiyoji (1989) Chemical evolution of groundwater quality in the southern foot of Mount Fuji, *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, **40**, 331-404.
- 池田喜代治 (1995) 富士山南麓地域における地下水の水文化的研究—地下水塩水化前後における水文と水質の挙動—。日本水文科学会誌，**25**, 57-70.
- 井野盛夫 (1987) 富士山東南西麓の湧水。日本水文科学会誌，**17**, 63-74.
- 井上禧之助 (1917a) 富士四近水理 (未完)。地学雑誌，**29**, 581-594.
- 井上禧之助 (1917b) 富士四近水理 (承前、完)。地学雑誌，**29**, 645-652.
- 伊藤成輝・丸井敦尚 (2008) 日本列島の海底地下水湧出量分布。産総研地質調査総合センター第 11 回シンポジウム，43-44.
- 伊藤 忍・山口和雄 (2016) 富士川河口域における反射法地震探査。海陸シームレス地質情報集，「駿河湾北部沿岸域」。海陸シームレス地質図 S-5，産業技術総合研究所地質調査総合センター。
- 伊藤 忍・山口和雄・入谷良平 (2014) 富士川河口域における反射法地震探査。平成 25 年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告，産業技術総合研究所地質調査総合センター速報，no.65, 59-64.
- 地震調査研究推進本部 (2010) 富士川河口断層帯の長期評価の一部改訂について。
- 神原信一郎 (1929) 富士山の地質と水理。博進館，東京，482p.
- 蔵田延男 (1948) 開拓地に於ける飲用水及諸用水の研究 [II]。開拓研究，**1**, 49-63.
- 蔵田延男 (1966) 富士山城水理地質図説明書—富士山の地下水・既往の調査成果の水理地質学的総括—。日本水理地質図，**14**, 1-31.
- 馬原保典・五十嵐敏文・田中靖治 (1993) 三島溶岩流内地下水の年代について。地下水学会誌，**35**, 201-215.
- 宮本 昇 (1986) 北富士山麓 (富士北麓)。農業用水地下水研究グループ「日本の地下水」編集委員会編，日本の地下水，地球社，東京，366-370.
- 村下敏夫 (1977) 静岡県富士市における地下水の塩水化。工業用水，**225**, 30-42.
- 村下敏夫 (1982) 本邦における地下水の塩分化。地質調査所月報，**33**, 479-530.
- 中井信之・菊田直子・土 隆一 (1995) 富士山及び周辺の地下水・河川水の安定同位体組成とその水文学への応用。日本水文科学会誌，**25**, 71-81.
- 中田 高・今泉俊文編 (2002) 「活断層詳細デジタルマップ」。東京大学出版会，東京，2 DVD-ROM, 1 Map, 60p.
- 落合敏郎 (1994) 東富士川の地下水系と地下水流出 (I)。地下水技術，**36**, 1-12.
- 落合敏郎 (1994) 東富士の地下水系と地下水流出 (II)。地下水技術，**36**, 1-22.
- 大木靖衛・除 輝竜・河内一男・鈴木幸治・渡部直喜・佐藤 修 (1998) 新潟県の歴史被害地震と伏在活断層について。(財)産業地質科学研究所 研究年報，**9**, 21-39.
- 尾崎次男 (1978) 塩化物イオンの濃度変化からみた被圧地下水の塩水化について—静岡県富士地区の例。地質調査所月報，**29**, 645-666.
- 斎藤正明・高田 茂 (1994) 立川断層地帯の地下水中²²²Rnの起源。RADIOISOTOPE，**43**, 507-514.
- 佐藤芳徳・安池慎治・河野 忠・北川光雄・鈴木裕一・高山茂美 (1997) 富士山周辺の湧水及び地下水の水質について。日本水文科学会誌，**27**, 17-25.
- 沢村孝之助 (1955) II 2.3.3 愛鷹火山噴出物。沼津図幅地質説明書 (7 万 5 千分の 1 地質図幅)，地質調査所，32-35.
- 鹿園直建・荒川貴之・中野孝教 (2014) 富士山南麓の地下水水質。流動と窒素汚染，地学雑誌，**123**, 323-342.
- 志村 馨・佐藤 昭 (1986a) 東富士山麓 (富士東麓)。農業用水地下水研究グループ「日本の地下水」編集委員会編，日本の地下水，地球社，東京，347-354.
- 志村 馨・佐藤 昭 (1986b) 愛鷹山麓。農業用水地下水研究グループ「日本の地下水」編集委員会編，日本の地下水，地球社，東京，354-358.
- 志村 馨・佐藤 昭 (1986c) 西富士山麓 (富士西麓)。

- 農業用水地下水研究グループ「日本の地下水」編集委員会編，日本の地下水，地球社，東京，359-366.
- Tosaki, Y., Tase, N., Sasa, K., Takahashi, T., Nagashima, Y. (2011) Estimation of Groundwater Residence Time Using the ^{36}Cl Bomb Pulse, *GROUND WATER*, **49**, 891-902.
- 土 隆一 (2004) 富士山の地下水涵養量について. 地下水技術, **46**, 1-10.
- 土 隆一 (2007) 富士山の地下水・湧水. 富士火山編集委員会 (日本火山学会) 編, 富士火山, 山梨県環境科学研究所, 富士吉田, 375-387.
- 植野利康・石原慶一・山内扶美・齋藤 庸・田中 柔・平田 潔 (1998) 黄瀬川・大場川流における水循環の現状と柿田川・三島周辺湧水群の保全に関する検討. 地下水技術, **40**, 1-13.
- 脇田 宏 (1978) 地下水の水位. 化学組成変化, 浅田敏編「地震予知の方法」, 東京大学出版会, 東京, 146-166.
- 早稲田 周・中井信之 (1983) 中部日本・東北日本における天然水の同位体組成. 地球科学, **17**, 83-91.
- 山本荘毅 (1970) 富士山の水文学的研究—火山体の水文学序説—. 地理学評論, **43**, 267-284.
- 山元孝広・高田 亮・石塚吉浩・中野 俊 (2005) 放射性炭素年代測定による富士火山噴出物の再編年. 火山, **50**, 53-70.
- 安原正也・風早康平・丸井敦尚 (2007) 富士山の地下水と涵養プロセスについて. 富士火山, 389-405.
- 吉岡龍馬・北岡豪一・小泉尚嗣 (1993) 同位体組成から推定される地下水の流動系について—三島市及びその周辺地域を例にして—. 地下水学会誌, **35**, 271-285.

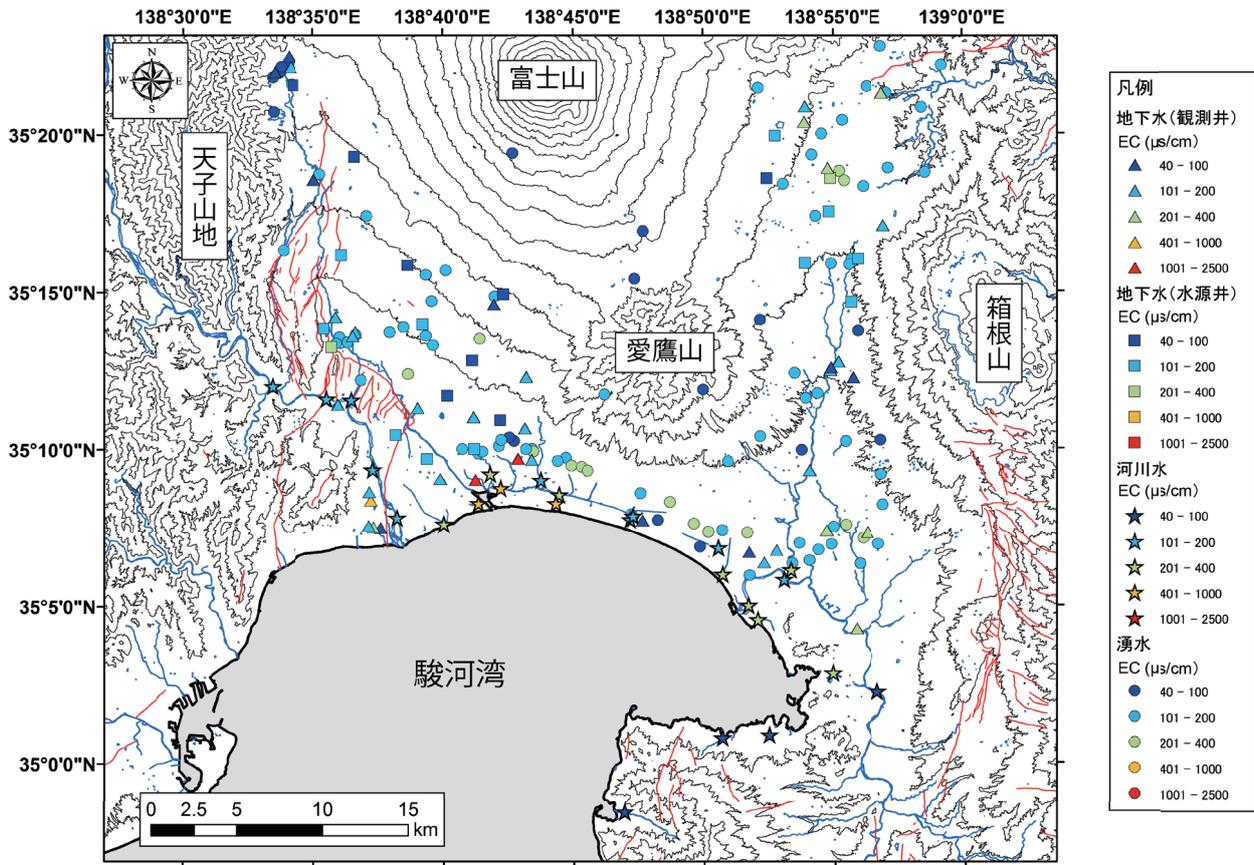
(受付 : 2014 年 12 月 11 日 ; 受理 : 2015 年 3 月 25 日)



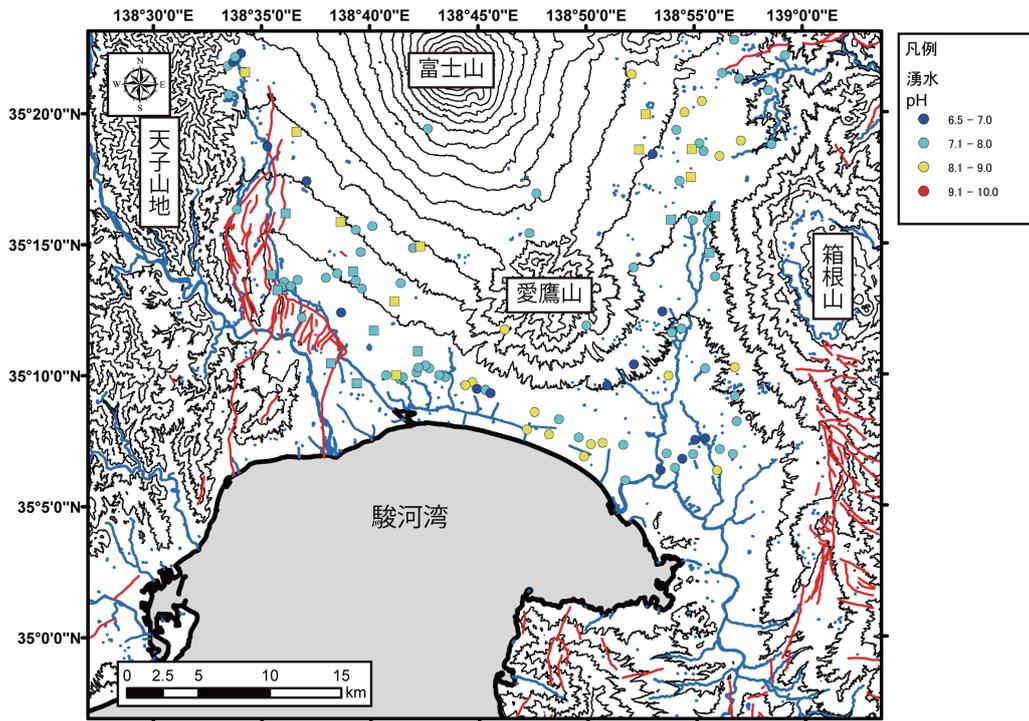
第1図 研究对象地域（富士山東南西麓地域）

Fig.1 Study area (Eastern, southern and western foets of Mt. Fuji)

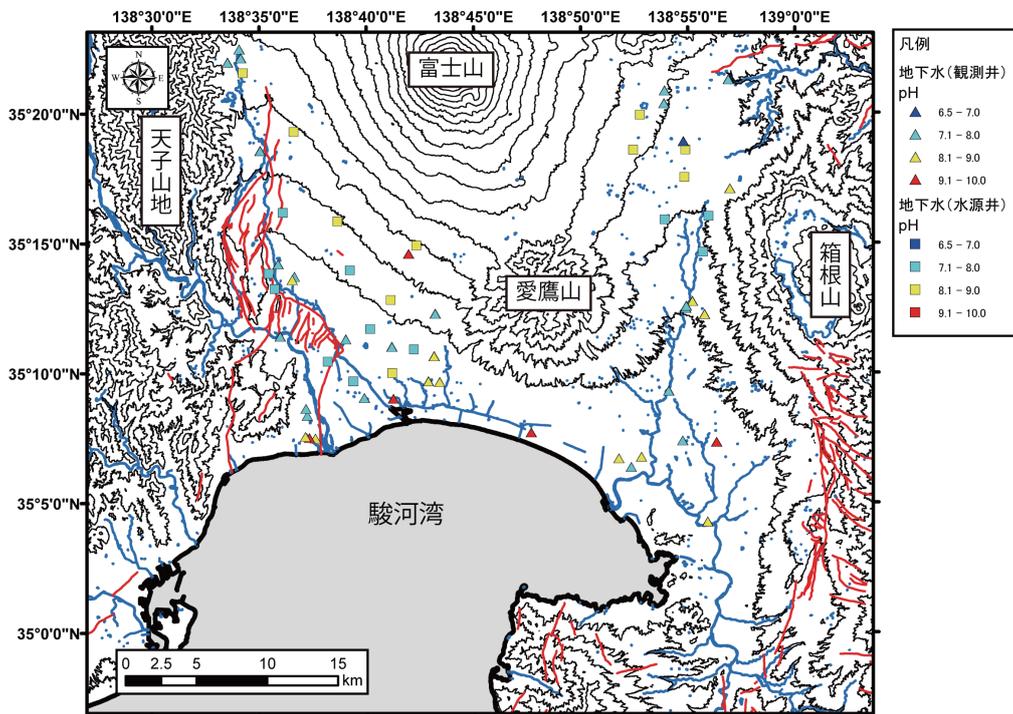
富士山周辺の水文調査



第2図 研究対象地域における EC の空間分布
Fig.2 Spatial distribution of EC in the study area.

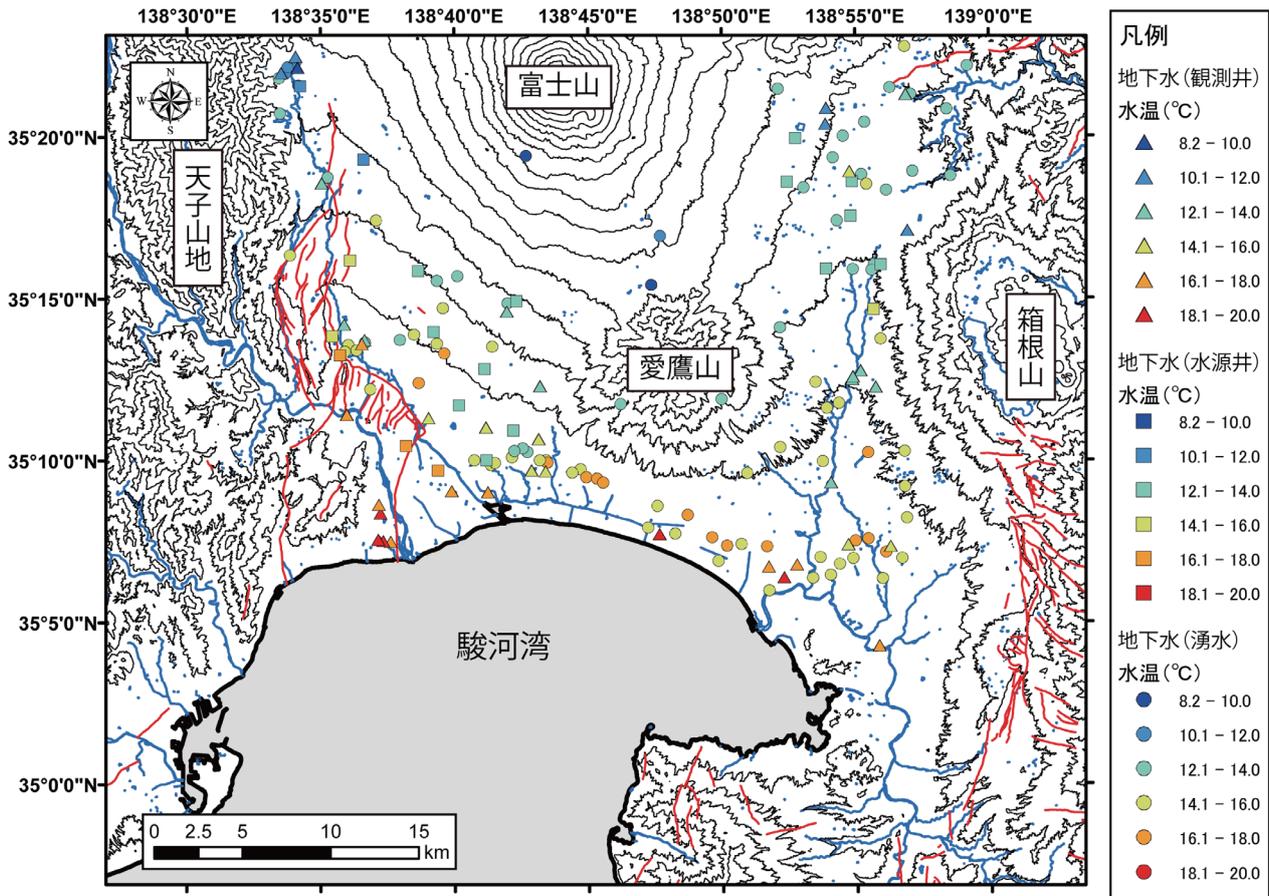


(a) 湧水

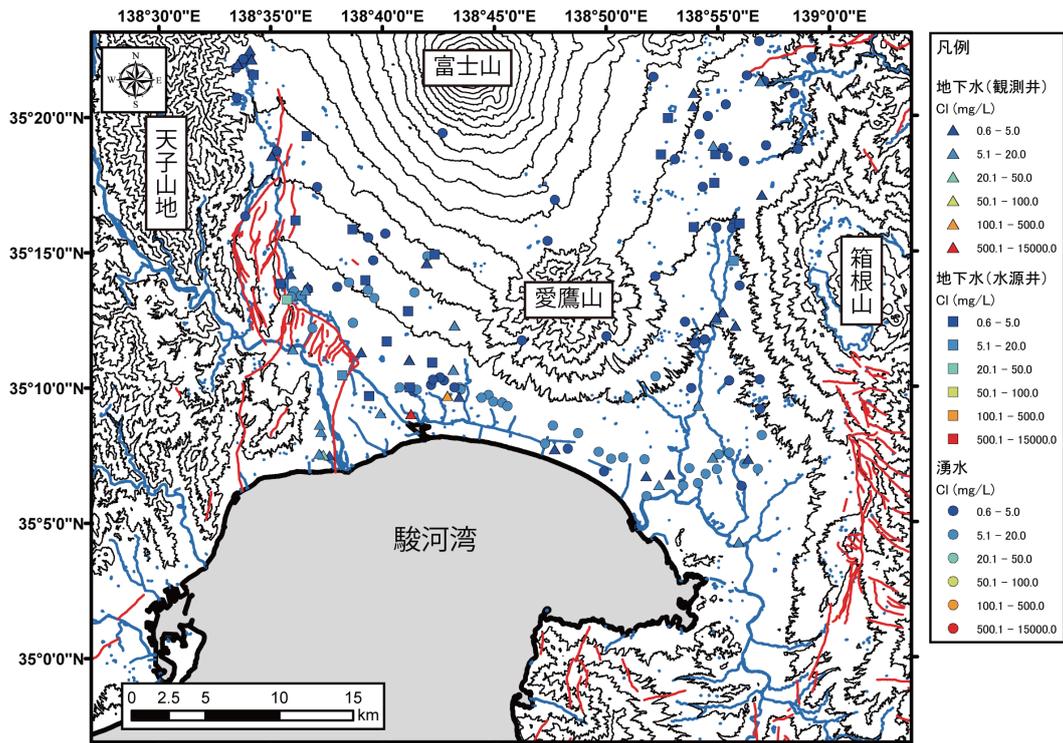


(b) 地下水

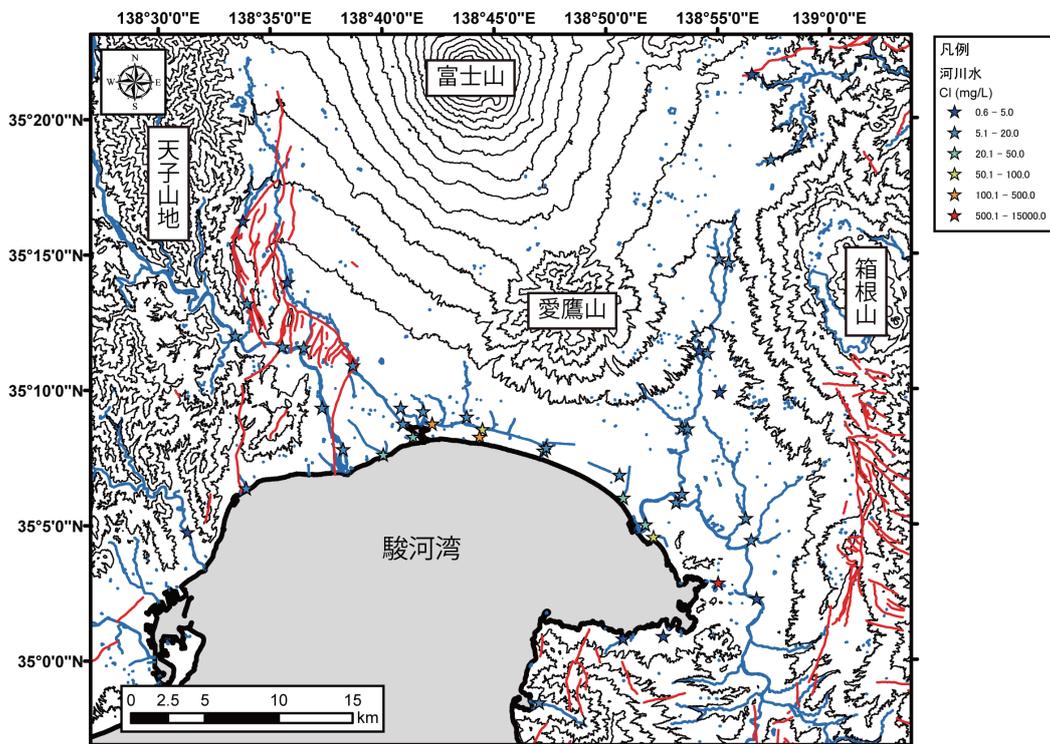
第 3 図 研究対象地域における pH の空間分布
 Fig.3 Spatial distribution of pH in the study area.
 (a)Spring water (b) Groundwater



第4図 研究対象地域における水温の空間分布
Fig.4 Spatial distribution of water temperature in the study area.



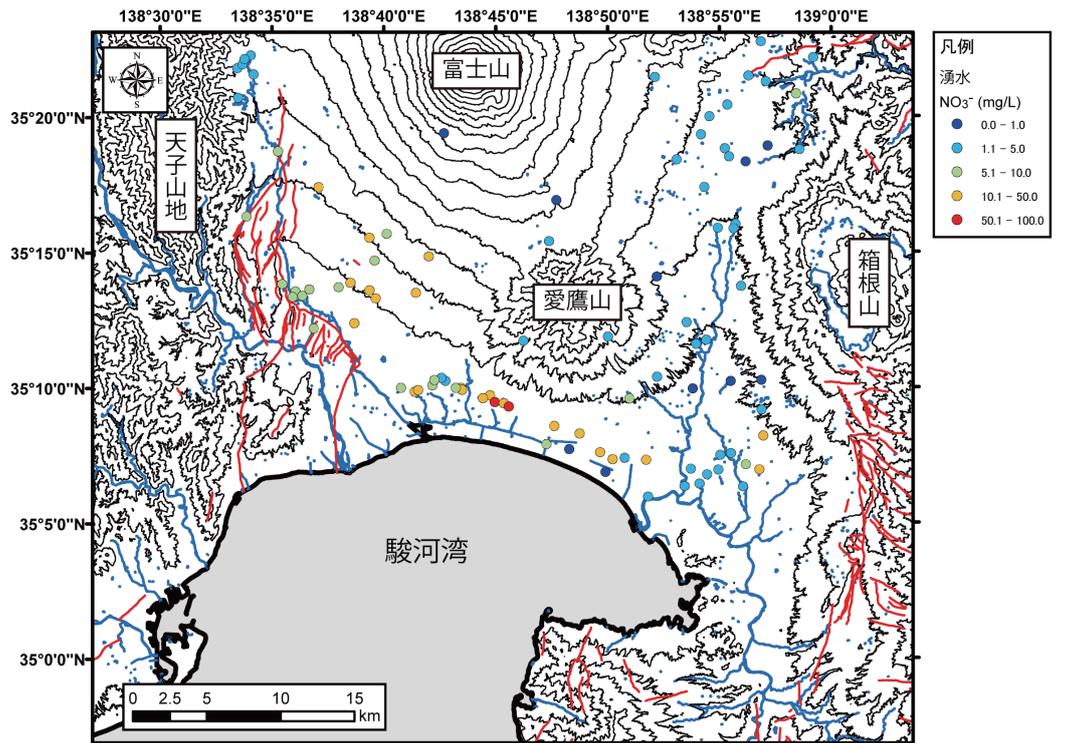
(a) 湧水と地下水



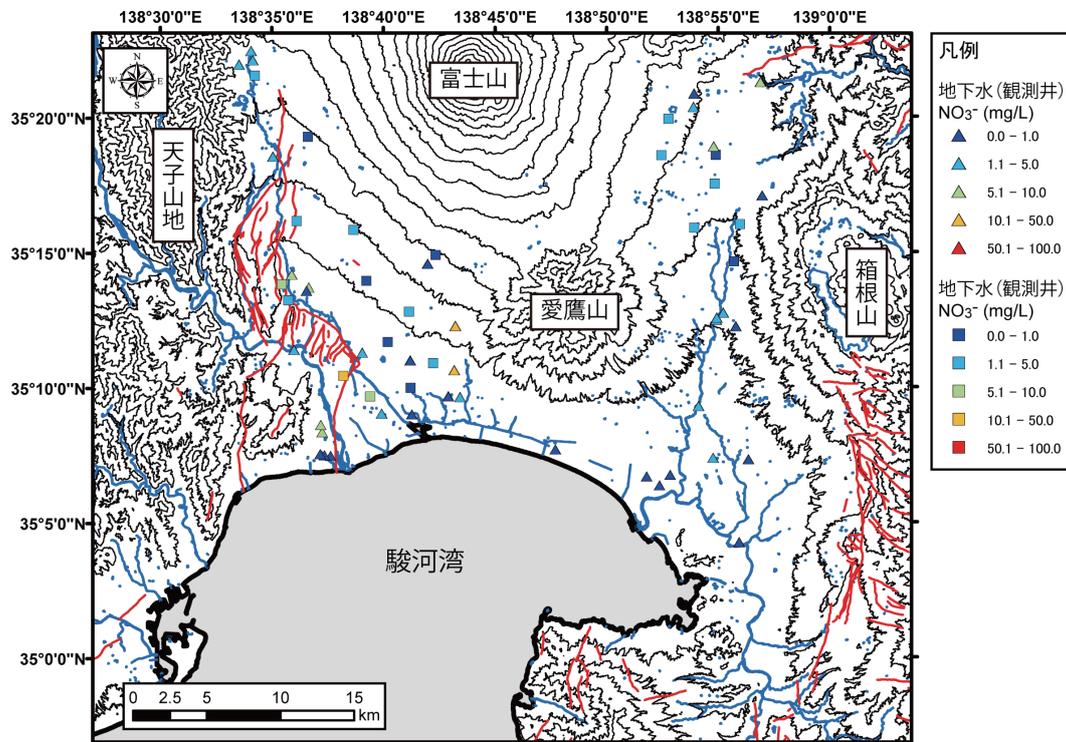
(b) 河川水

第 5 図 研究対象地域における Cl⁻ 濃度の空間分布
 Fig.5 Spatial distribution of Cl⁻ concentration in the study area.
 (a)Spring water (b) Groundwater

富士山周辺の水文調査

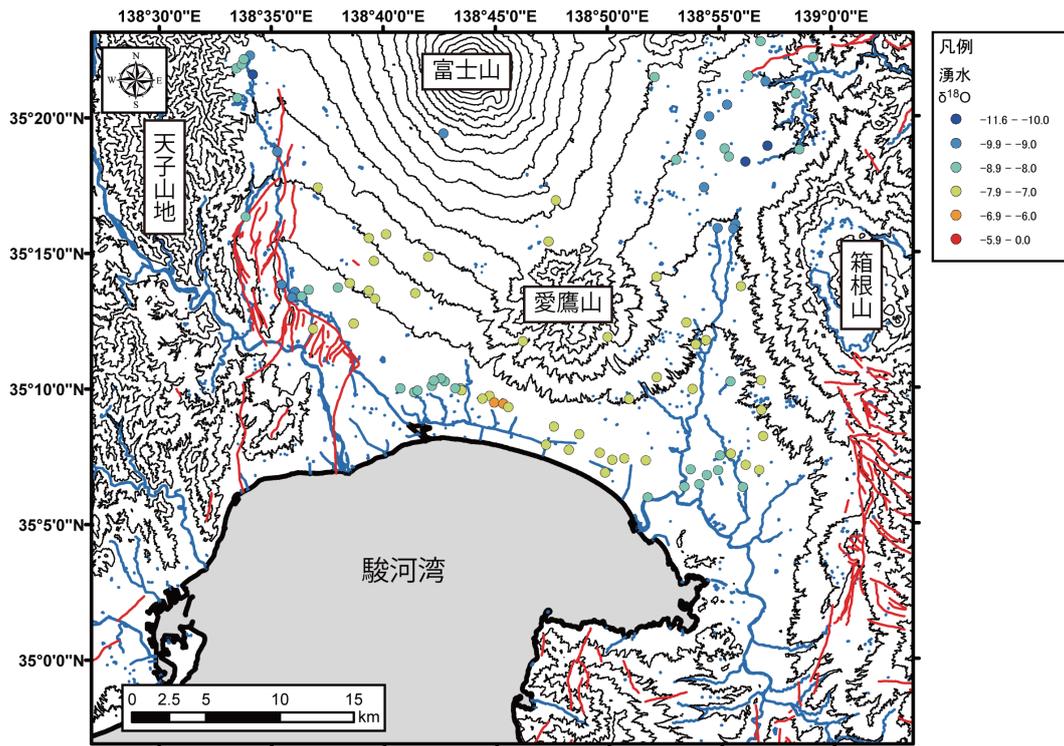


(a) 湧水

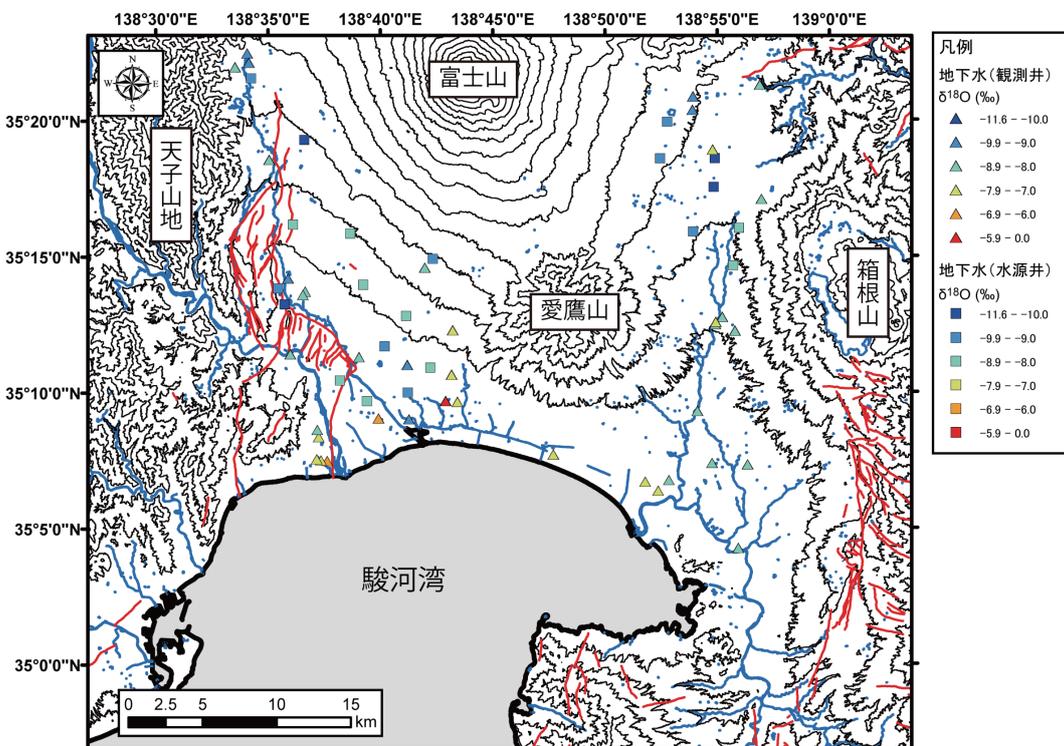


(b) 地下水

第 6 図 研究対象地域における NO₃⁻ 濃度の空間分布
 Fig.6 Spatial distribution of NO₃⁻ concentration in the study area.
 (a)Spring water (b) Groundwater

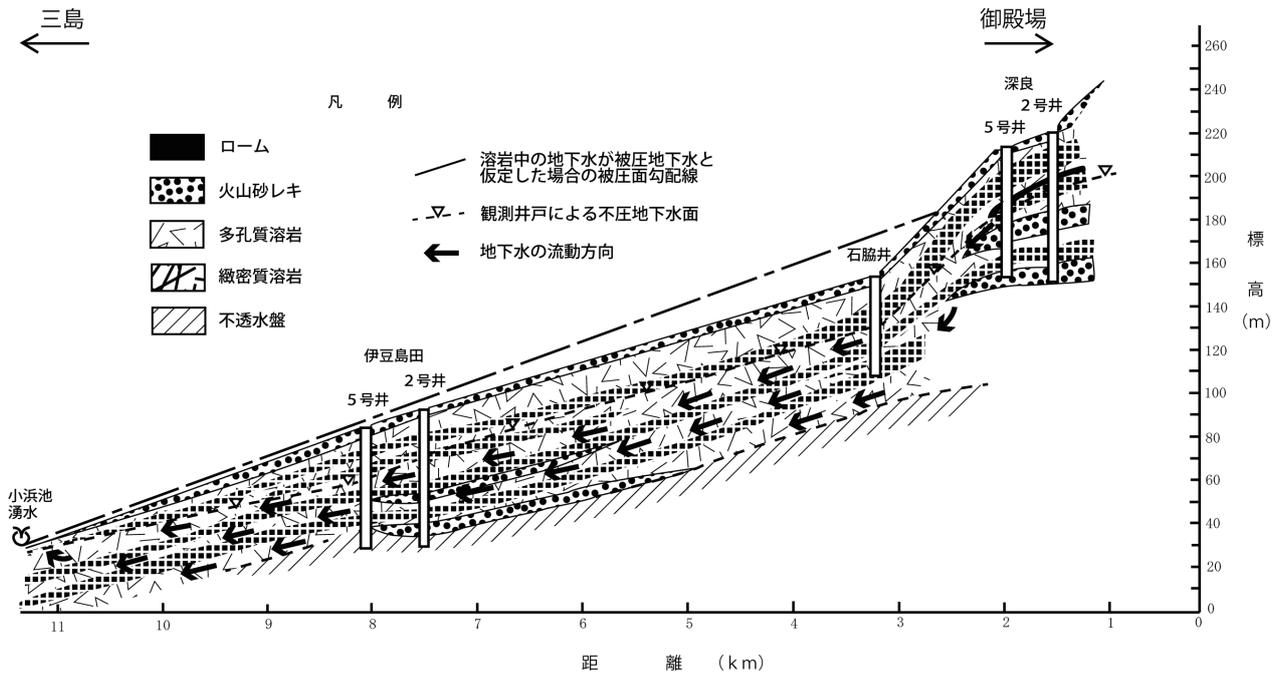


(a) 湧水



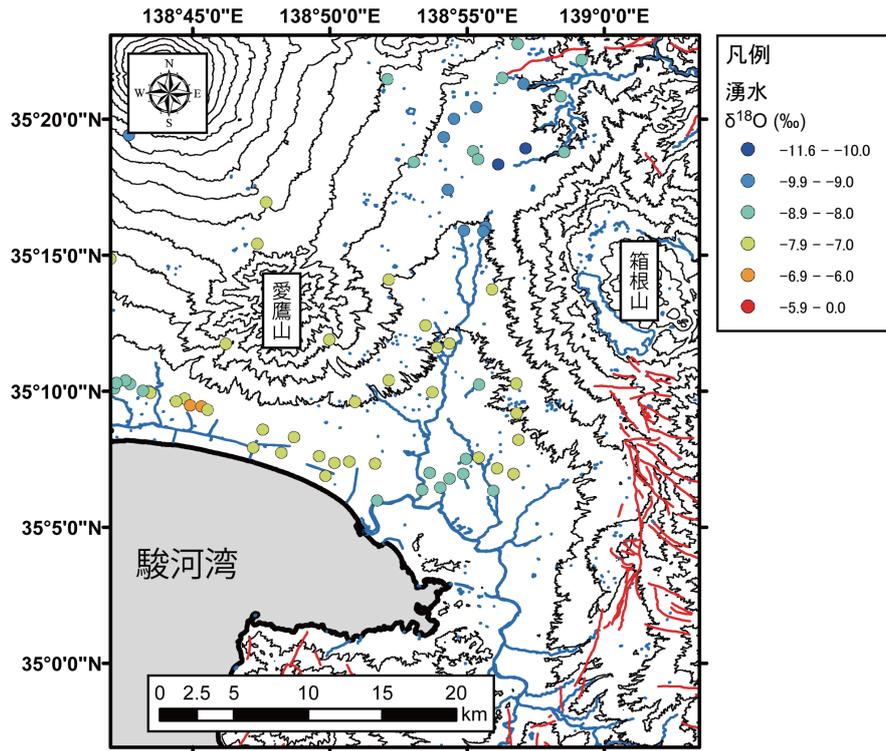
(b) 地下水

第7図 研究対象地域における $\delta^{18}\text{O}$ の空間分布
 Fig.7 Spatial distribution of $\delta^{18}\text{O}$ in the study area.
 (a)Spring water (b) Groundwater

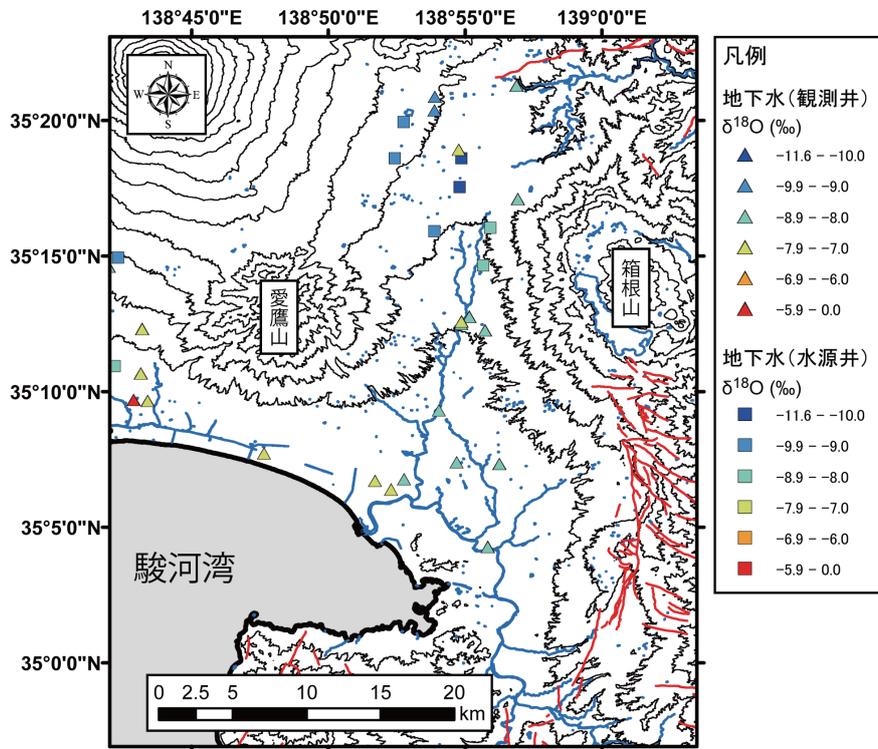


第 8 図 三島溶岩の縦断面図 (落合, 1994b 一部修正)

Fig.8 Longitudinal section of Mishima lava. (modified after Ochiai, 1994b)



(a) 湧水

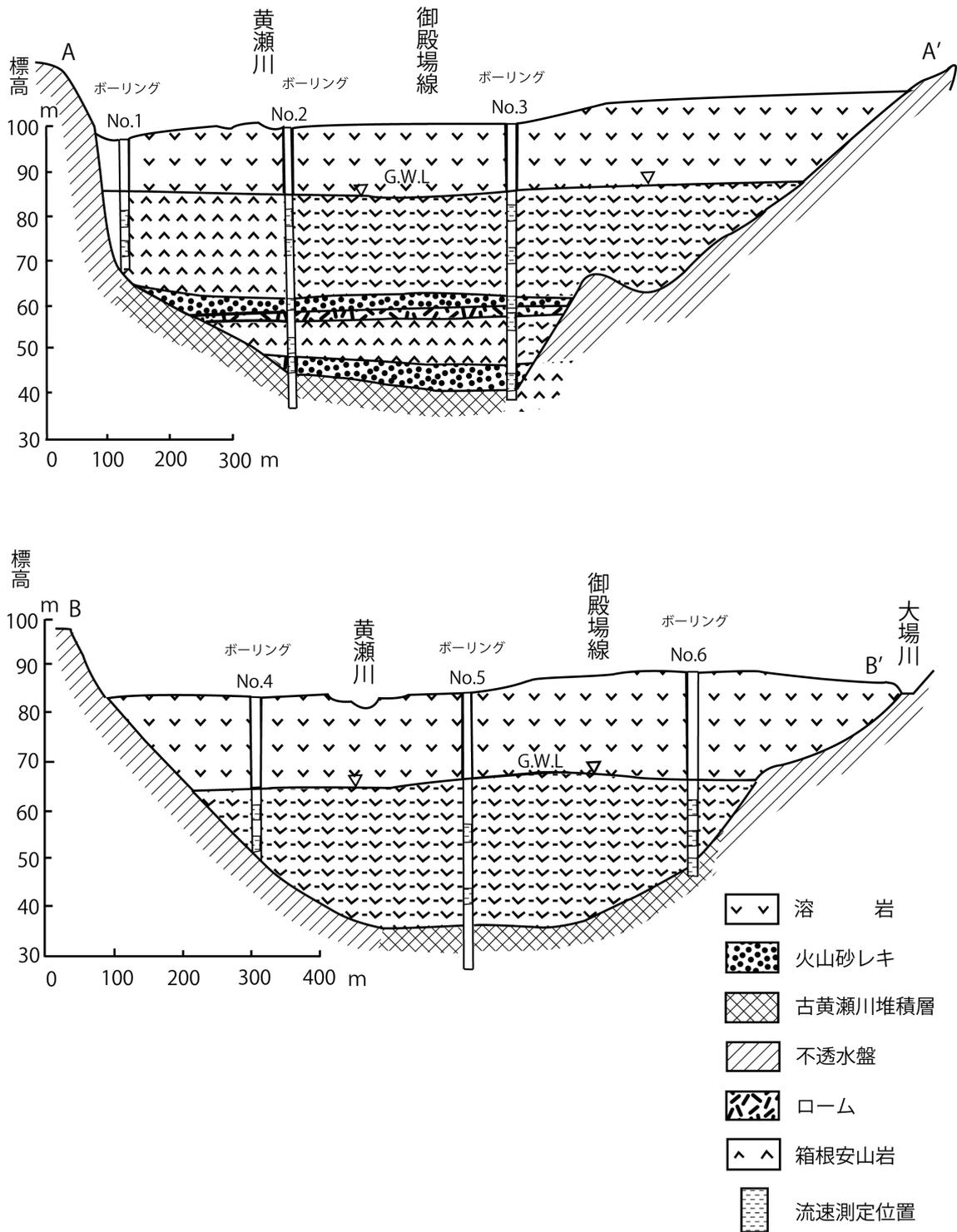


(b) 地下水

第9図 富士山東麓における $\delta^{18}\text{O}$ の空間分布

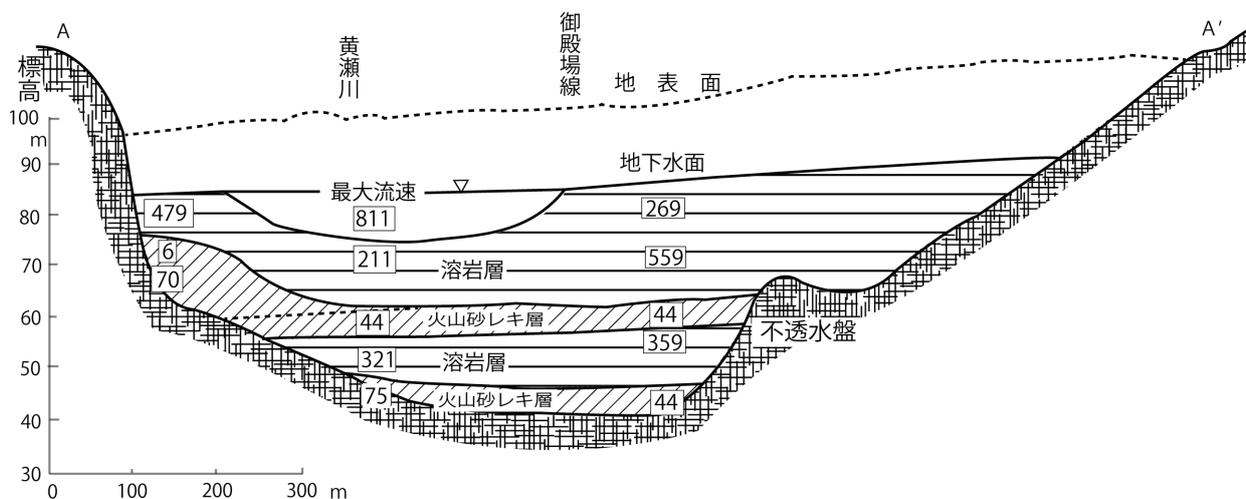
Fig.9 Spatial distribution of $\delta^{18}\text{O}$ in the eastern foot of Mt. Fuji.

(a)Spring water (b) Groundwater

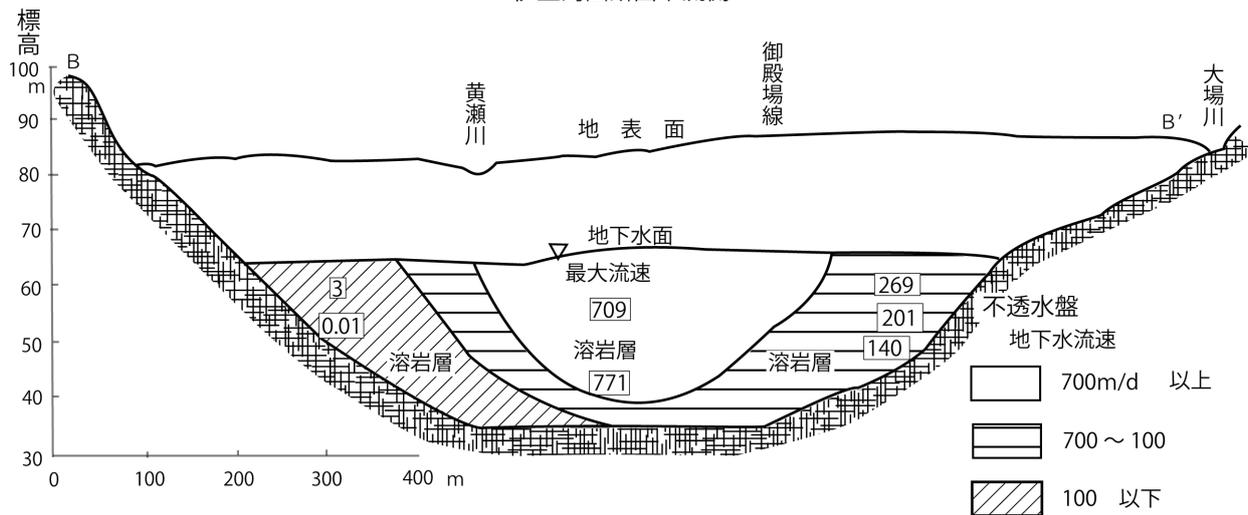


第 11 図 三島溶岩の地質断面図 (落合, 1994b)
 Fig.11 Cross section of Mishima lava (Ochiai, 1994b)

伊豆島田断面上流側

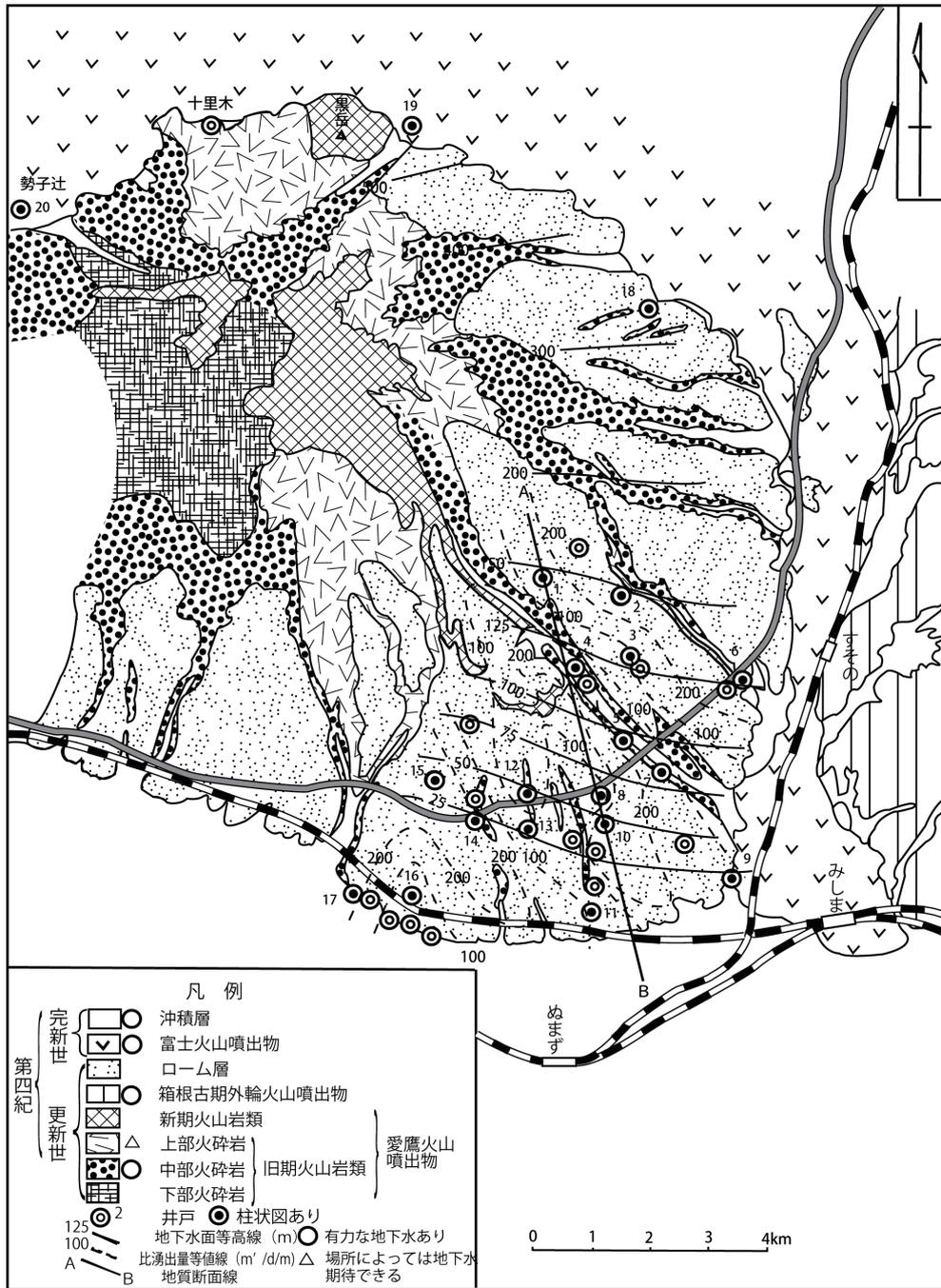


伊豆島田断面下流側



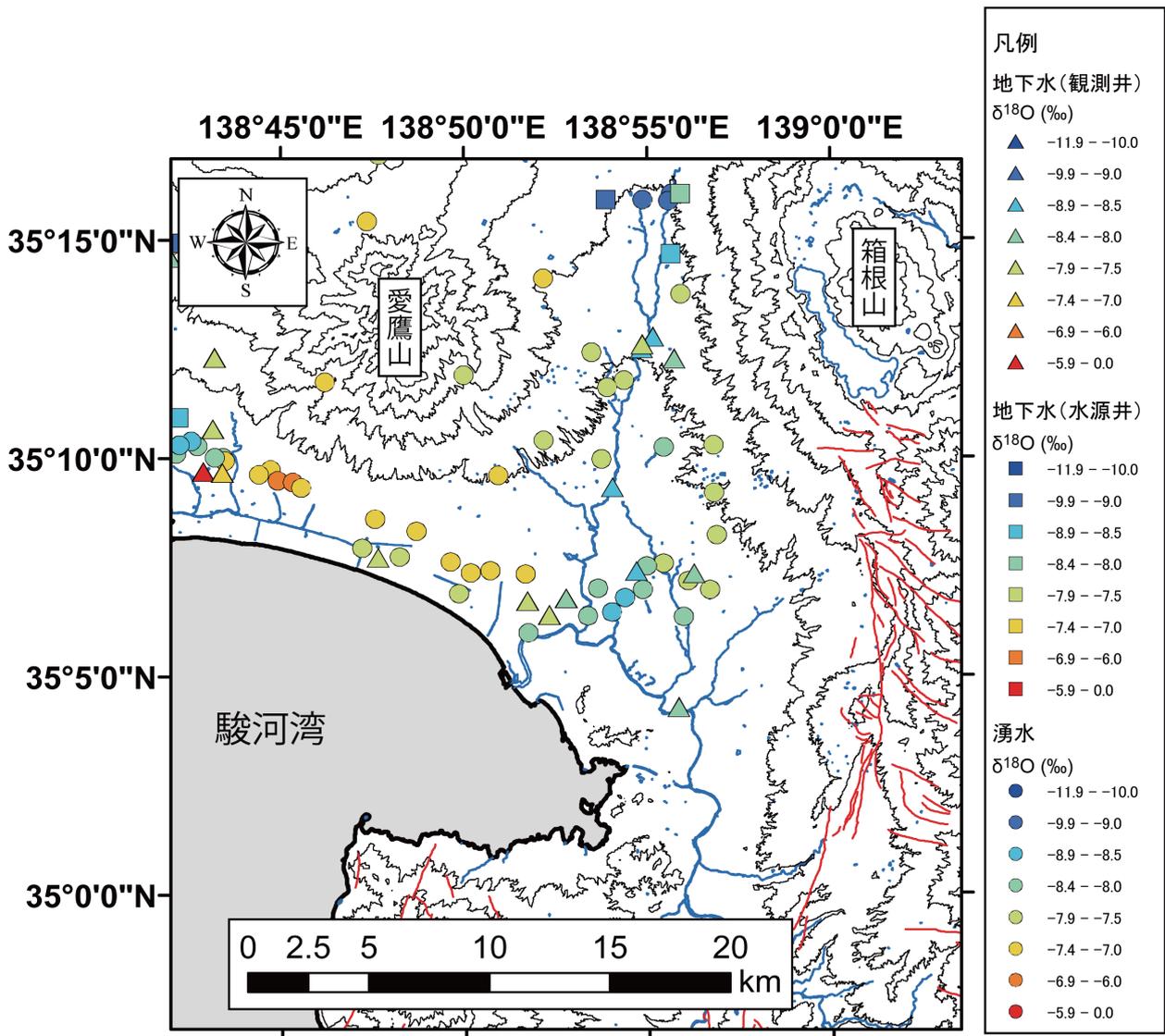
第 12 図 三島溶岩の地下水流速断面図 (落合, 1994a)

Fig.11 Cross section of groundwater velocity in Mishima lava (Ochiai, 1994a)



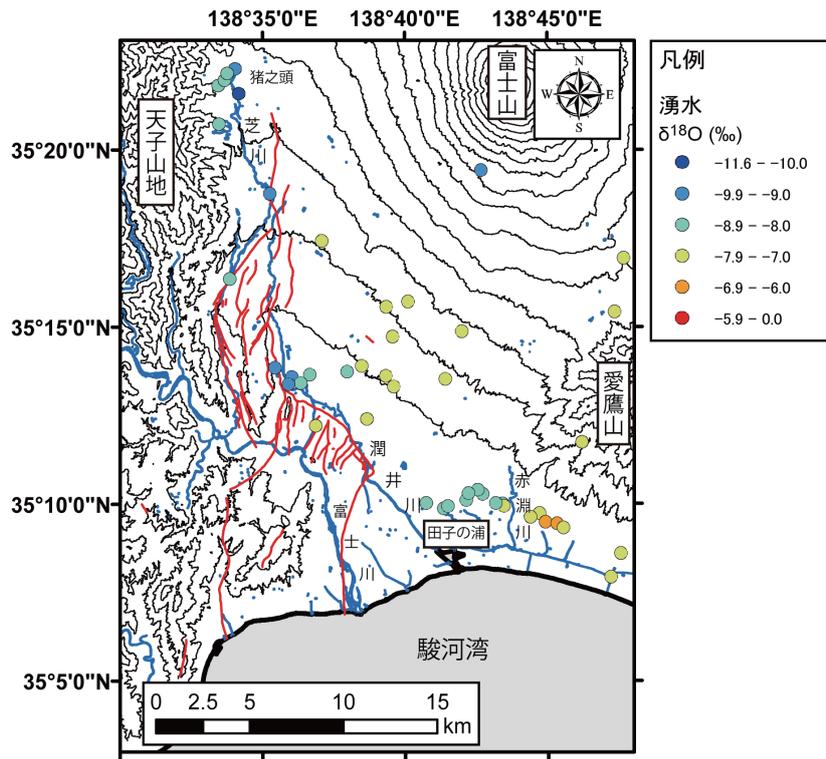
第 13 図 愛鷹山南麓の水文地質図 (志村・佐藤, 1986b)

Fig.13 Hydrogeological map in the southern foot of Mt. Ashitaka (Shimura and Sato, 1986b)

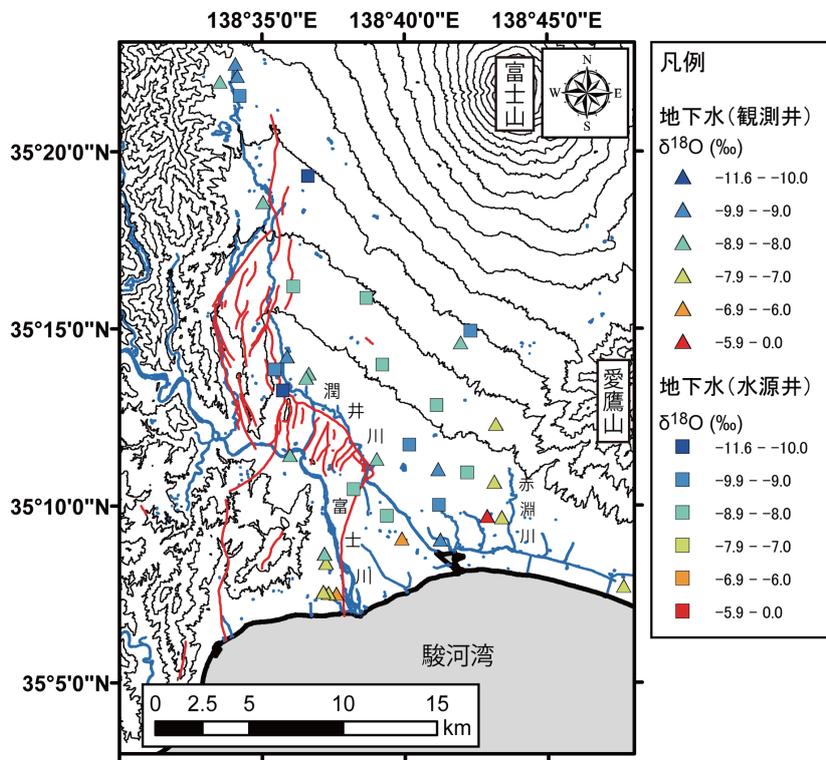


第 14 図 富士山東麓における $\delta^{18}\text{O}$ の空間分布

Fig.14 Spatial distribution of $\delta^{18}\text{O}$ in the southern foot of Mt. Ashitaka.

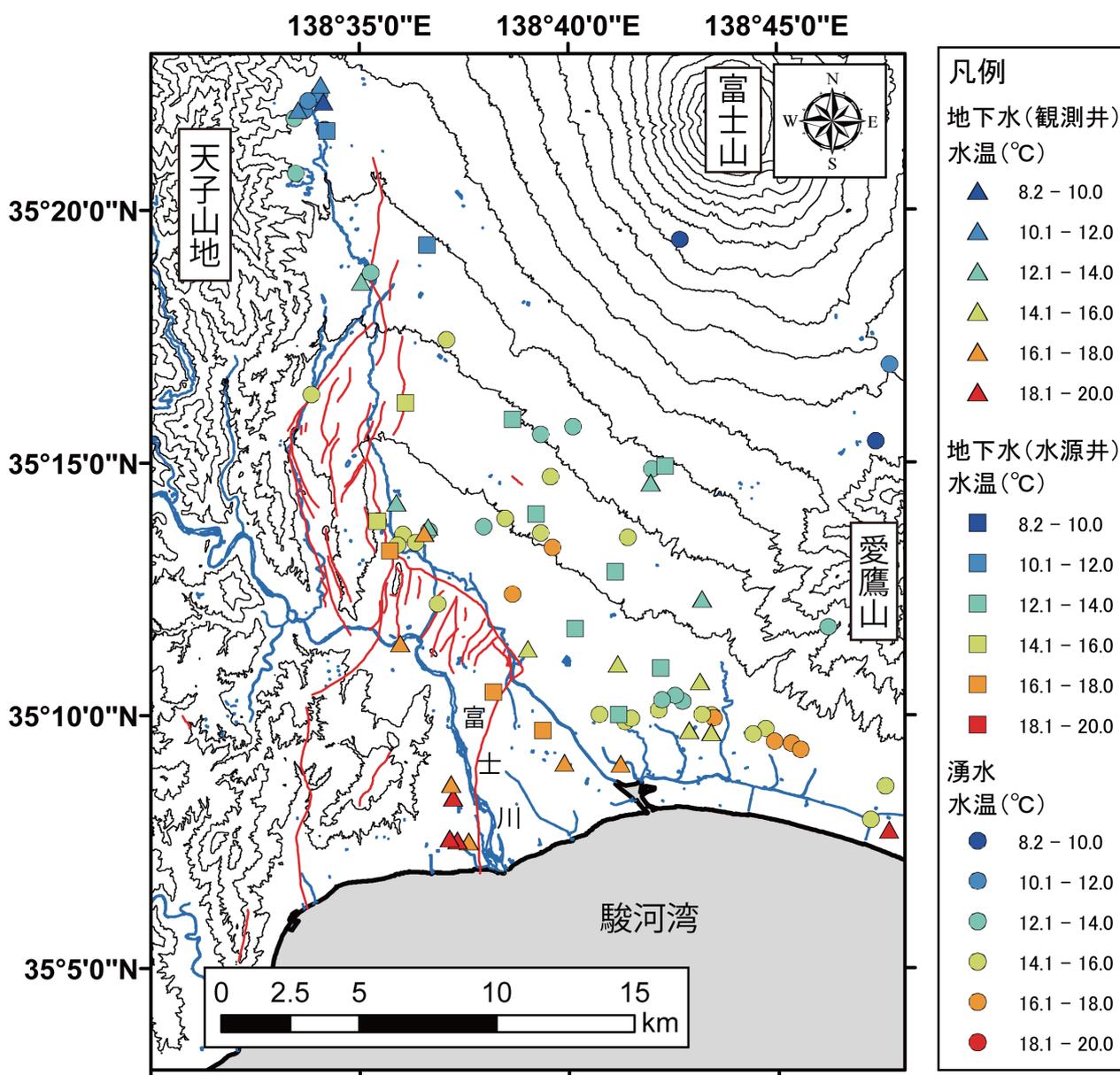


(a) 湧水



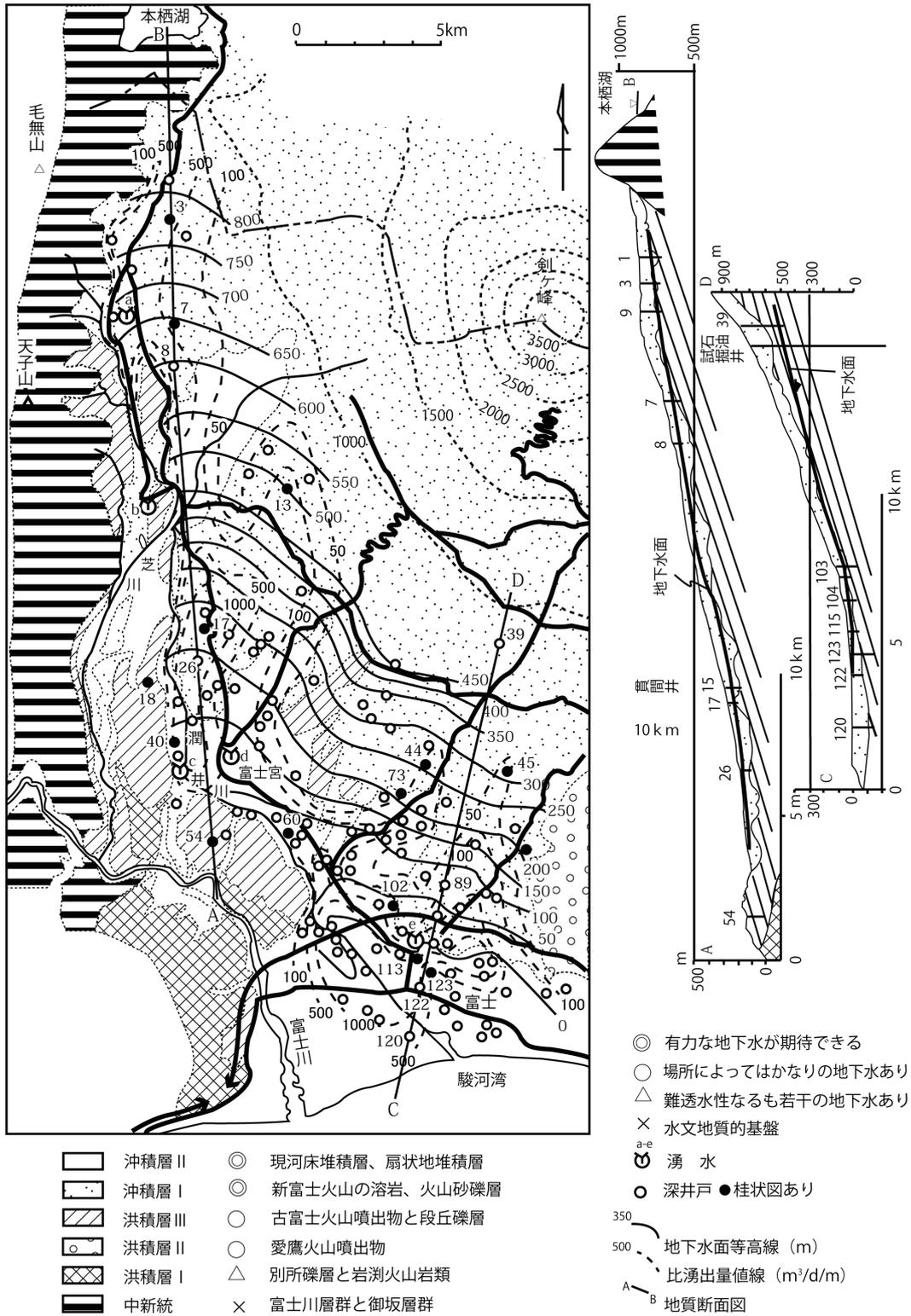
(b) 地下水

第15図 富士山西麓における $\delta^{18}\text{O}$ の空間分布
Fig.15 Spatial distribution of $\delta^{18}\text{O}$ in the western foot of Mt. Fuji.
(a)Spring water (b) Groundwater



第 16 図 富士山西麓における水温の空間分布

Fig.16 Spatial distribution of water temperature in the western foot of Mt. Fuji.



第 17 図 富士山西麓における水文地質図 (志村・佐藤, 1986c)

Fig.17 Hydrogeological map in the western foot of Mt. Ashitaka (Shimura and Sato, 1986c)

富士山周辺の水文調査

第1表 富士山流域における水文地質構造表 (志村・佐藤, 1986a, b, c 一部修正)

Table 1 Hydrogeological layer map in the catchment of Mt Fuji (modified after Shimura and Sato, 1986a, b, c)

東富士山麓			
		層序	帯水層能
第四紀	完新世	沖積層 (現河床堆積物や扇状地堆積物など)	△
		新期火山砂礫層および新期泥流	○
		新期溶岩類	○
		古期火山砂礫層	◎
更新世	更新世	古期溶岩類	◎
		古富士泥流	◎
		箱根古期外輪火山噴出物	○
		愛鷹山火山噴出物	○
新第三紀	鮮新世	足柄層群相当層	-
	中新世	丹沢層群相当層	×

南富士山麓			
		層序	帯水層能
第四紀	完新世	沖積層 (現河床堆積物や扇状地堆積物など)	○
		新期火山砂礫層および新期泥流	◎
		新期溶岩類	◎
		古期火山砂礫層	◎
更新世	更新世	ローム層	-
		箱根古期外輪火山噴出物	×
		愛鷹山火山噴出物	◎
		岩淵火山噴出物	△(一部のみ)
新第三紀	鮮新世	足柄層群相当層	-
	中新世	丹沢層群相当層	×

西富士山麓			
		層序	帯水層能
第四紀	完新世	沖積層 (現河床堆積物や扇状地堆積物など)	◎
		新期火山砂礫層および新期泥流	◎
		新期溶岩類	◎
		古期火山砂礫層	◎
更新世	更新世	古富士泥流	-
		愛鷹山火山噴出物	○
		別所礫層の砂礫,	○
		岩淵火山噴出物	△
新第三紀	鮮新世	別所礫層の砂礫,	×
	中新世	西八代層群・富士川層群の相当層	×