

別府湾堆積物とその供給系 II

京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設

山田 圭太郎・竹村 恵二

要旨

本研究では別府湾に碎屑物粒子を供給する河川のうち別府湾南部に位置する大分川に着目し、ボーリングコア中の過去の河川堆積物を調査することで、本河川が供給する碎屑粒子の組成を明らかにした。その結果、大分川が供給する碎屑粒子には別府地域とは異なる特徴を持つ火山ガラスや由布川火砕流に起因すると考えられる雲母が多く含まれることが明らかとなった。これらの結果を考慮すると、供給される粒子組成に着目することで別府湾海底に記録されたタービダイトの給源は、境川や春木川を中心とする湾西縁地域、朝見川や大分川を含む湾南西地域、大野川を中心とする湾南東地域に分けられる可能性がある。

1. はじめに

別府湾は中央構造線(MTL)の西端に位置する盆地で、約 0.7 Ma 以降は MTL の活動に伴い沈降傾向にある地域である (e.g. Itoh et al., 1998; Itoh et al., 2014)。湾周辺には多くの活断層が分布するとともに、鶴見岳や伽藍岳などの活火山が分布している。その為、別府湾の堆積物には過去の火山活動や地震活動など(イベント)が高い時間解像度で記録されている可能性がある。特に地震活動記録に着目すると、Kuwaie et al. (2013)や Yamada et al. (2016)は別府湾海底堆積物中に地震の揺れに伴って流下した堆積物(地震性タービダイト)が含まれる可能性を指摘した。このような高い時間解像度を持つ海底堆積物中の地震性タービダイトは過去の地震活動時期や周期を高精度に推定する上で極めて重要な情報源となる一方で、その給源や活動した断層の推定には課題も多い。Yamada et al. (2016)は周辺地域の情報不足から別府湾海底に堆積したタービダイトの詳細な給源は不明とした。そこで本研究では別府湾及びその周辺地域におけるイベント履歴やその供給プロセスの解明に資する基礎情報の取得・蓄積のために、別府湾に注ぐ周辺河川が供給する再生物の構成を調査してきた。本稿では地震調査研究推進本部(2015)によって沿岸海底に重力崩壊地形が報告されている別府湾南部、特に大分川によって供給された碎屑物構成を報告するとともに、山田・竹村(2016)で報告された別府地域の碎屑物構成との違いについて比較検討する。

2. 調査地域及び方法

本稿で報告する大分川は別府湾に注ぐ 2 つの一級河川のうちのひとつで、由布岳南西麓に端を発し、主として第四紀の火砕流台地を侵食しつつ流下する。河口付近に当たる大分市周辺では大規模な沖積平野を形成している。現在の沿岸線は円弧状であるが、その大半は 1960 年代の総合開発に伴うもので、あまり原地形を留めていない。また、流域には芹川ダ

ム、大分川ダム(建設中)が存在しており、供給される碎屑物の構成はこのような人的活動の影響を受けている可能性が高い。そこで本研究では、人間活動の影響が少ないと考えられる大分川付近で掘削されたボーリングコア中の河川堆積物についてサンプリングを行い、得られた 5 サンプルについて分析を行った。なお分析には文部科学省研究開発局・国立大学法人京都大学大学院理学研究科(2016, 2017)によって掘削された KUO1, OFC19, OFC20 コアを使用した(図1)。分析したサンプルはそれぞれ KUO1 コアの深度 10.8-10.9 m, OFC19 コアの深度 6.85-6.90 m 及び 10.10-10.15 m, OFC20 コアの深度 4.40-4.45 m 及び 6.15-6.20 m から採取したものをを使用した。

分析では、得られたサンプルを過酸化水素水(10%)と超音波洗浄機を用いて分散させた後、水簾や使い捨ての篩であるメッシュクロスを用いて $<4\phi$, $3-4\phi$, $>3\phi$ に分画した。その後、特に $3-4\phi$ の粒子を用いて薄片を作成し、偏光顕微鏡を用いて構成粒子を鑑定・計数した。粒子は重鉱物(Hm)、軽鉱物(Lm)、火山ガラス(Vg)、不透明鉱物(Opq)、岩片(Rf)、その他(Ot)に分類した。また重鉱物については、斜方輝石(Opx)、単斜輝石(Cpx)、角閃石(Am)、橄欖石(Ol)、ジルコン(Zr)、燐灰石(Ap)、雲母(Bi)、その他(HOt)に分類した。

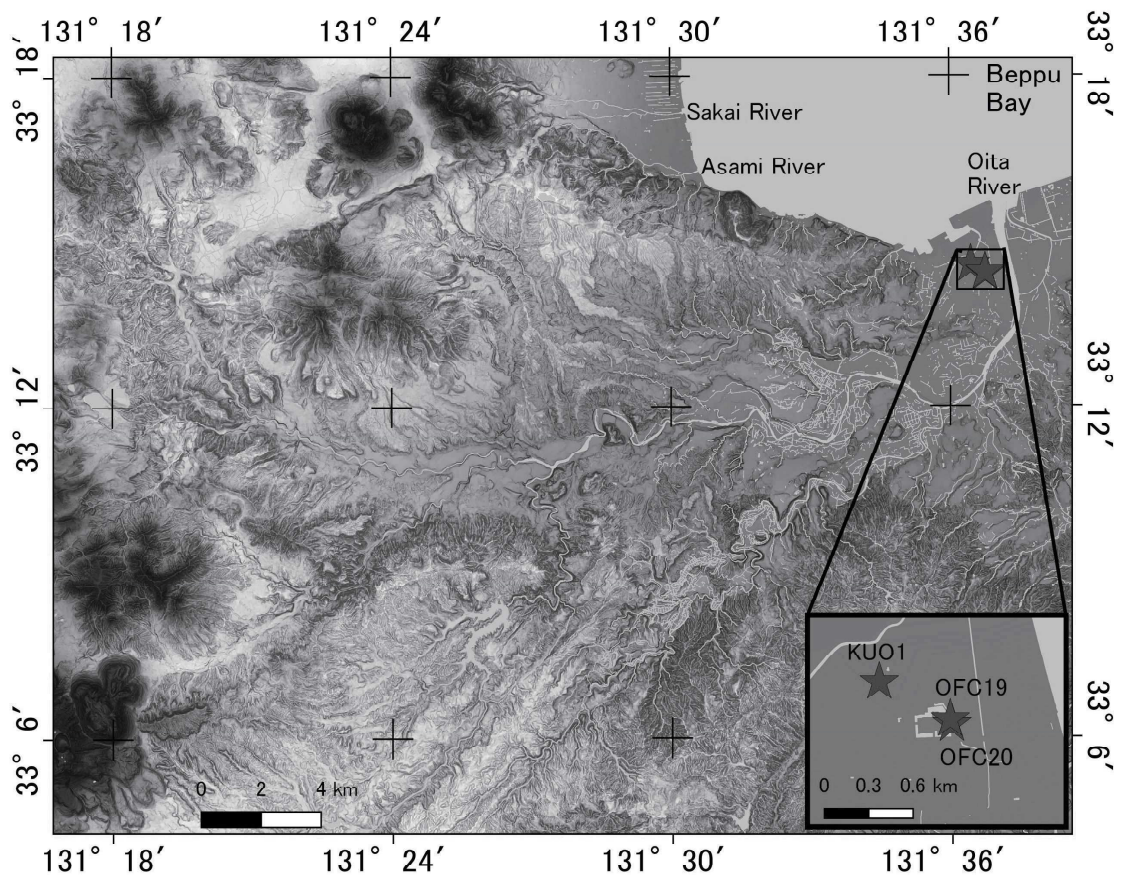


図1. 大分川流域とサンプリング地点。国土地理院 10 mDEM データに基づく。

3. 結果

計数結果を図 2 に示す。3-4φの極細砂サイズの全粒子組成について見てみると、主として火山ガラス、軽鉱物、重鉱物を含み、サンプル間で大きな傾向差は認められない。構成する火山ガラスは吉川(1976)の C 型~T 型を示し、別府を流下する朝見川や境川のサンプルに見られるようなマイクロライトを含む火山ガラスや広域テフラ(始良 Tn テフラや鬼界アカホヤテフラなど)由来の火山ガラスはほとんど含まれない。また微量ながら、プラントオパールや再結晶化した変成岩片なども観察される。

重鉱物に着目すると、各サンプル間に大きな差異はなく、Opx, Cpx, Am を顕著に含むほか、Bi も多く含まれる。朝見川で観察されたような熱水変質に伴う重鉱物は観察されない。

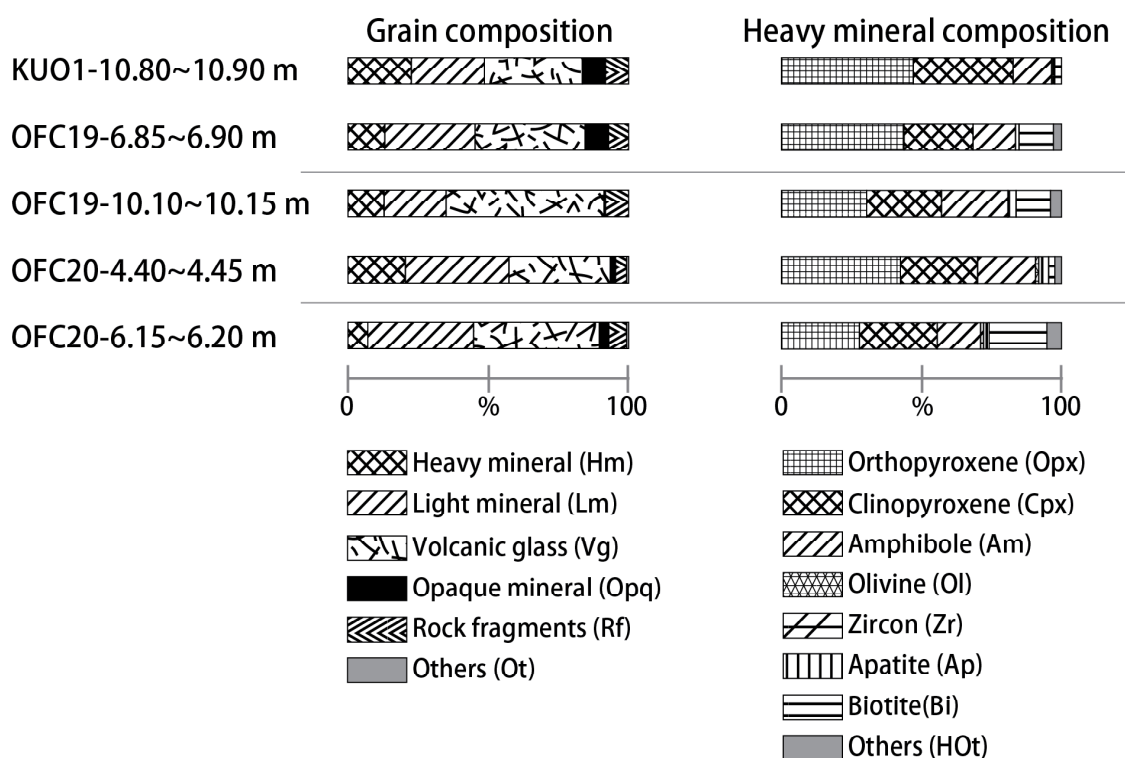


図 2. 大分川流域から得られたサンプルの粒子組成.

4. 考察

別府地域の河川と大分川が供給する堆積物粒子の大きな差として、多量のマイクロライトを含む火山ガラスが挙げられる。別府地域は鶴見・伽藍岳の火山山麓扇状地に位置しており、侵食に伴ってこれらの火山から多量の火山ガラスが供給されているためと考えられる。一方で大分川は由布川火砕流や阿蘇 4 火砕流を主体とする台地を流下してきており、火山ガラスの形態の差異は流域環境の違いを反映していると考えられる。その他、大分川のサンプルからは少量ながら再結晶化した変成岩片が認められるが、大分川流域には変成

岩はほとんど分布していないことを考慮すると、流域に三波川変成岩が分布する大野川が供給した岩片が混入した可能性がある。

また別府地域を流下する朝見川や境川が運搬する堆積物の重鉱物組成(山田・竹村, 2016)と比較すると、大分川周辺では単斜輝石や雲母が相対的に多く認められる。特に雲母は大分川流域や別府湾南西縁に分布する由布川火砕流に特徴的に含まれる鉱物であり(星住・鎌田, 1991), 大分川や朝見川に含まれる雲母は本火砕流から供給された可能性が高い。

本研究の結果及び山田・竹村(2016)の結果を考慮すると、境川、朝見川、大分川のそれぞれの流域は異なった特徴を持っており、重鉱物や火山ガラスの特徴に注目することで、理想的にはそれぞれの堆積物を識別できる可能性が示された。

5. まとめと今後の課題

本研究では別府湾に碎屑物粒子を供給する河川のうち別府湾南部に位置する大分川に着目し、ボーリングコア中の過去の河川堆積物を調査することで、本河川が供給する碎屑粒子の組成を明らかにした。その結果、大分川が供給する碎屑粒子には別府地域とは異なる特徴を持つ火山ガラスや由布川火砕流に起因すると考えられる雲母が多く含まれることが明らかとなった。これらの結果を考慮すると、供給される粒子組成に着目することで別府湾海底に記録されたタービダイトの給源は、境川や春木川を中心とする湾西縁地域、朝見川や大分川を含む湾南西地域、大野川を中心とする湾南東地域に分けられる可能性がある。加えて、熱水鉱物や火山ガラスなどに着目することで、湾南西地域は更に細分できる可能性があることが明らかとなった。ただし、大野川に関しては情報が不足しており、今後別府湾東部に関しても基礎情報を拡充していく必要がある。

引用文献

- 星住英夫, 鎌田浩毅, 1991. 由布川火砕流の噴出年代. 火山 36(4), 393-401.
- Itoh, Y., Kusumoto, S., Takemura, K., 2014. Evolutionary process of Beppu Bay in central Kyushu, Japan: a quantitative study of the basin-forming process controlled by plate convergence modes. *Earth, Planets and Space* 66, 1-14.
- Itoh, Y., Takemura, K., Kamata, H., 1998. History of basin formation and tectonic evolution at the termination of a large transcurrent fault system: deformation mode of central Kyushu, Japan. *Tectonophysics* 284, 135-150.
- Kuwae, M., Yamamoto, M., Ikehara, K., Irino, T., Takemura, K., Sagawa, T., Sakamoto, T., Ikehara, M., Takeoka, H., 2013. Stratigraphy and wiggle-matching-based age-depth model of late Holocene marine sediments in Beppu Bay, southwest Japan. *Journal of Asian earth sciences* 69, 133-148.
- 文部科学省研究開発局・国立大学法人京都大学大学院理学研究科, 2015. 別府一万年山断層帯(大分平野一由布院断層帯東部)における重点的な調査観測 平成26年度 成果報告書.

文部科学省研究開発局・国立大学法人京都大学大学院理学研究科, 2016. 別府一万年山断層帯(大分平野一由布院断層帯東部)における重点的な調査観測 平成 27 年度 成果報告書.

文部科学省研究開発局・国立大学法人京都大学大学院理学研究科, 2017. 別府一万年山断層帯(大分平野一由布院断層帯東部)における重点的な調査観測 平成 26 年度～28 年度 成果報告書.

Yamada, K., Takemura, K., Kuwae, M., Ikehara, K., Yamamoto, M., 2016. Basin filling related to the Philippine Sea Plate motion in Beppu Bay, southwest Japan. *Journal of Asian Earth Sciences* 117, 13-22.

山田圭太郎, 竹村恵二, 2016. 別府湾堆積物とその供給系. 大分県温泉調査研究会報告 67, 9-13.

吉川周作, 1976. 大阪層群の火山灰層について. *地質学雑誌*, 82(8), 497-516.

九重町の温泉の地化学特性と分布

秋田大学工学資源学部地球資源学科

網田 和宏・松田 健斗

京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設

大沢 信二

要旨

大分県玖珠郡九重町の温泉の地化学的な特性および分布を明らかにすることを目的に、GISを用いた空間解析を行った。調査の方針として「既存の情報を活用して、可能な限り有効な資源・環境評価のための資料作成を行う」ことに重点を置いたため、情報源としては温泉分析書を、また、解析ツールとしてはオープンソースのソフトウェアである QGIS を使用した。温泉分析書よりデータベース化した九重町内の 93 地点の温泉情報を使用して得られた解析図より、泉温や溶存成分などの情報が地域性に関して特徴的な分布を示していることが認められ、本地域の温泉の持つ地化学特性とその分布を把握する上で温泉分析書のデータの空間解析が有効であることを示すことができた。

1. はじめに

温泉分析書は、温泉井の所有者や住所の情報とともに、温泉の成分に関する分析結果が記されたものである。温泉法により、温泉施設内には温泉分析書を掲示することが義務づけられている。特に、温泉に含まれる可燃ガスによる爆発事故やレジオネラ菌による事故が発生したことなどを受け、2007 年以降は成分の再分析と掲示内容の更新を 10 年以内に 1 回は行うことが義務づけられるようになった。

温泉水の分析は各自治体の運営する衛生研究所や指定の分析機関によって行われており、分析書に記載される分析項目は、泉温、pH、陽イオン溶存量、陰イオン溶存量、非解離成分（メタケイ酸など）、溶存ガス成分など多岐に渡っている。溶存成分の同位体比に関連する情報こそ掲載されていないものの、温泉の基礎的な科学データが概ね示されているとあってよい。

このように温泉分析書は、温泉の科学データが記載された資料としての側面を有しているにもかかわらず、これまで多くの研究においては基礎資料としての位置付けを出るものではなかった。そこで本調査研究ではこれら温泉分析書をデータ群であるのみならず、情報源として活用した場合に、特定の地域における「温泉の化学的特性」や「分布」の把握に有効・有用な資料の作成が可能であるのか、という点について検討を行った。具体的には近年、空間解析ツールとしての利用が盛んに行われている GIS（Geographic Information System：地理情報システム）を使用し、温泉分析データの空間解析図の作成を行った。

既存の存在である温泉分析書の、調査資料としての利用可能性が示されれば、例えば、温泉を多く抱える自治体などで、新規に予算を割くことなく、温泉開発や環境影響評価に関する検討資料を作成することも可能となる。そのようなことも視野に入れ、本調査では「既存の情報や環境を活用して、低コストで可能な限り有効な評価・解析のための資料作成を行う」ことも方針とした。

2. 調査対象地域の概要

九重町は大分県の中央西部の豊肥地域に位置する人口約1万人、面積271.37 km³の自治体である。西日本火山帯の火山前線と別府―島原地溝帯の交差点に位置し、古くから地熱活動の活発な地域として知られてきた。そのため、旧来から地熱開発・地熱利用の盛んな地域であり、地熱発電としては日本最大の出力を誇る八丁原地熱発電所（1977年～）や日本初の熱水分離型地熱発電所である大岳発電所（1967年～）などの発電所が建設されてきた。また、筋湯温泉、壁湯温泉、九酔溪温泉などに代表される多くの温泉が、町の中心街から山間部に至るまで広く点在しており、平成26年度には年間で約400万人の観光客が訪れている。

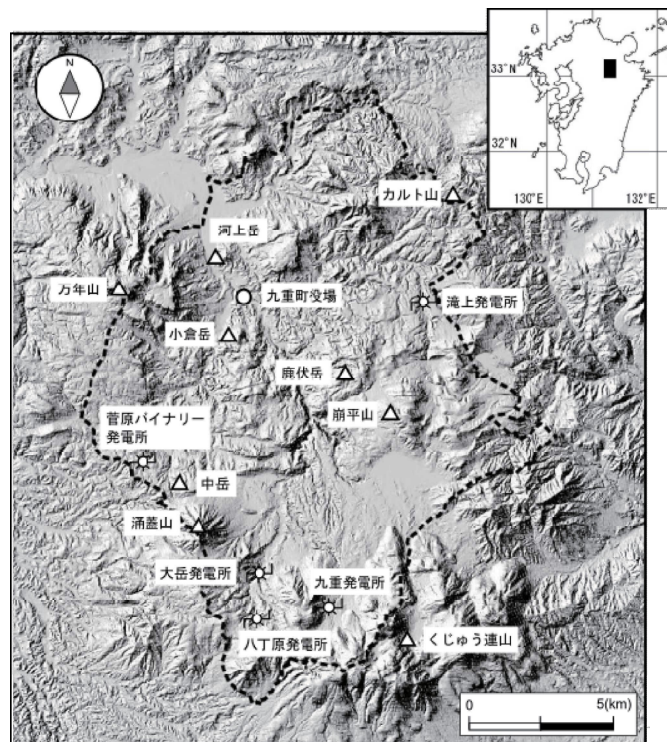


図1 九重町の概略図

国土地理院の基盤地図情報を基に作図した地形図に加筆して作成。黒い点線は九重町の行政境界を示す。

このように従来型大規模地熱発電所と温泉観光業とが共存してきた九重町であるが、近年では小規模地熱発電、いわゆる“温泉発電”を行うための適地としても注目を集めるようになってきた。現在は月数件以上のペースで新たな開発計画の申請が提出さ

れるなど、地元自治体もその対応に追われている状況である。以上の事から、九重町は「データ解析および検討を行う上で十分な数の温泉分析書が得られる」ことに加え、「地熱開発に関する環境影響評価に有用な資料の作成を行うことの意義が大きい自治体である」と考え、本調査研究を行う対象地域とした。図1には町内に建設されている主だった地熱発電所の位置とともに、九重町の所在を示した。

3. 調査方法

3-1 温泉分析書のデータベース化

検討に使用したデータは、1958年～2015年の期間に発行された温泉分析書より入手した。大分県鉱泉誌1970、大分県鉱泉誌2006第2巻、大分県温泉調査報告温泉分析書第58号～第66号に記載されている温泉の中から、九重町の温泉に関わる記述部分を検索し、それらをデータベース化（電子情報化）した。データベース化した温泉分析書の総数は295枚であり、総源泉数は218箇所となった（いくつかの源泉については、複数の年代で分析が行われているなど、同一源泉でデータの重複があったため）。データベース化の対象とした情報は、温泉湧出地住所、調査年月日、泉温、pH、各種陽イオン、各種陰イオン、遊離成分、溶存ガス成分、密度、蒸発残留物、流量、掘削深度である。以上のデータ入力は全て手作業で行い、市販されている表計算ソフトを用いて電子化情報ファイルを作成した。

3-2 GISソフトを用いた解析図の作成

本調査では、解析に使用するGISソフトウェアとしてオープンソース・ソフトウェアであるQGIS（Quantum GIS）を選択した。QGISの一番の特徴は、汎用性の高さである。ラスターデータ、ベクタデータの違いを問わずにデータ運用ができ、外部ツールとの連携もスムーズに行える。また、数多くのプラグインが開発されており様々な解析も可能である。以上のように、オープンソースであるにもかかわらず多機能性を有するQGISは、「新規の予算を使うことなく、既存の情報を活用して有効な評価・解析のための資料作成を行う」とした本調査研究の主旨に合致するものであると考え、本プログラムを用いて解析を進めることとした。

基本的な解析の流れとしては、データベース化された温泉分析書の各種情報を基に空間解析図を作成していく事になるが、温泉分析書より得られる位置情報は「住所」の形式であるため、そのままではGIS上で扱うことができない。そこで解析の準備作業としてデータのジオコーディングを行った。ジオコーディングとは、データベース内に格納されている各種の情報を、関連する地理座標（緯度・経度）に付加する作業の事である。

温泉分析書のジオコーディングを行うにあたり、まずQGIS付属のプラグインである「MMQGIS」を使用し、住所情報と緯度・経度のマッチングを行った。これによりジオコーディングできたのは、全295地点の温泉の内、重複を含めて126地点となった。全ての地点に対してジオコーディングができなかったのは、プラグインが地方の住所まで完全にはサポートできていないことが主な原因である。同じ源泉で分析書の重複がある地点の情報については、今回は調査年月日が新しいものを代表値として採

用することにした。その結果、63 源泉の緯度・経度情報を決定することができた。

MMQGIS プラグインで緯度・経度情報の特定ができなかった残りの源泉については、市販されている地図の情報や観光案内図、あるいは Google ストリートビューなどを活用しながら探索を行い、位置が確認できたものについては地図上にプロットした位置情報より緯度・経度を求めた。この作業により、さらに 30 地点の情報を加えることができ、最終的に、重複を含まない計 93 地点の温泉湧出地の緯度・経度情報を得ることができた。残りの地点の緯度・経度情報については、現在も調査を継続中であるが、今回の報告では予察的な結果として、これら 93 地点のデータより作成した空間解析結果を用いて検討を行うことにした。

4. 解析結果

ここからは解析結果について示していくが、今回は結果の一例として泉温分布図、総溶存物質濃度分布図、Na-K-Ca 地化学温度計による温度分布図、および地温勾配分布図について示すことにした。なお、温泉の分布の無い領域における空間補間は、逆距離加重法にて行った。データの出力形式は約 10m メッシュとし、空間補間により発生したラスタデータから、一定間隔で同値のセルを抽出することで、等値線（コンター）を描画させている。

図 2 に泉温分布図を示す。図中、温泉の位置は白丸で示し、低温な温泉ほど暗く、また高温の温泉ほど明るく表示するように段階的に配色した。泉温分布図より、町の北東部や西部、南部など、地熱発電所が建設されている地域の周辺に高温の温泉が多く分布していることがわかる。一方、町の東部から北西部にかけては、比較的低温の温泉が分布しており、泉温の分布にある程度の地域性が認められることが分かった。

次に、総溶存物質濃度分布図を図 3 に示した。この図では温泉に溶存する成分の総

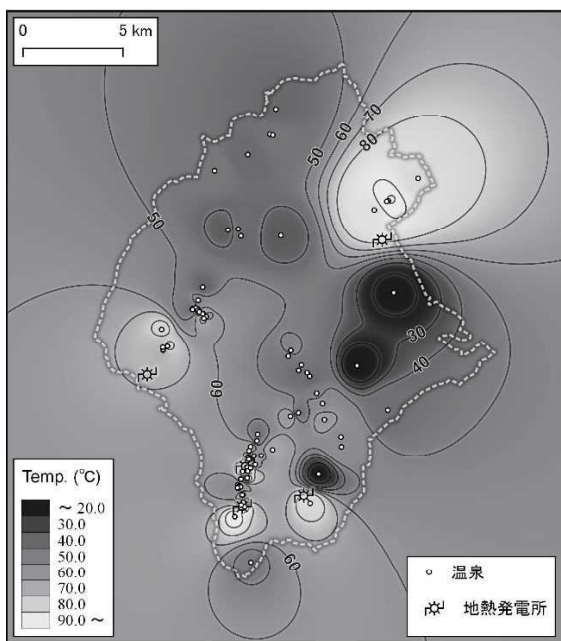


図 2 泉温分布図

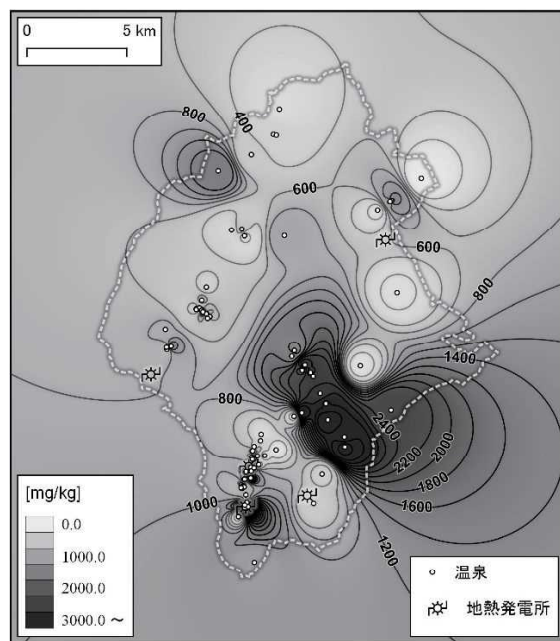


図 3 総溶存成分濃度分布図

量が多いものほど暗くなるように表示している。図より、総溶存物質濃度分布から得られる等値線は、泉温分布で得られたそれとは受ける印象が大きく異なっていることが分かり、町の南東部を中心とした高濃度領域があることが示されている。一方で、泉温分布では高温の温泉があることが示されていた北東部や西部、南西部の温泉に関しては地域内では（相対的には）溶存成分濃度の高い温泉ではないことがわかる。

図 4 に Na-K-Ca 地化学温度計による温度分布図を示した。ここで用いたのは Mg^{2+} 濃度による補正を施した Na-K-Ca 温度計（Fournier and Potter, 1979）であり、地下における温泉の温度を推定する方法としてよく用いられている地化学温度計の一つである。なお、図 4 は地化学温度計の適用条件を満たした温泉のみを反映させて作成した図となっている。また、図 2 の泉温分布図と同様に高温になるほど明るく、低温になるほど暗くなるように表示した。図より、地化学温度計によって推定された温度は、概ね $100^{\circ}C$ を超えるものとなっており、湧出の際に沸騰していない温泉の多くが、地下では高い温度を有していたことが想定された。また町の北東部や南西部に、本地域内における高温領域が広がる、といった泉温分布と似た特徴が認められた一方で、町の中心地域の幾つかの温泉で高い温度が推定されるなど、地化学温度計を用いたことで明らかとなった関係性がよく表現された解析図となっていることがわかる。

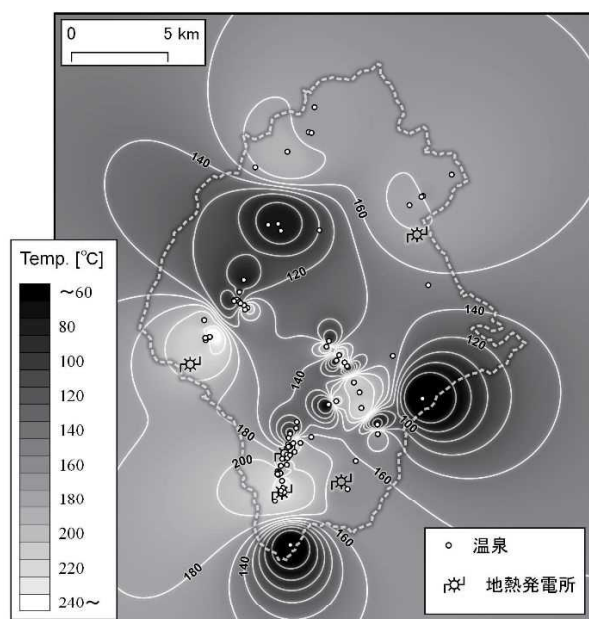


図 4 Na-K-Ca 温度計温度分布図

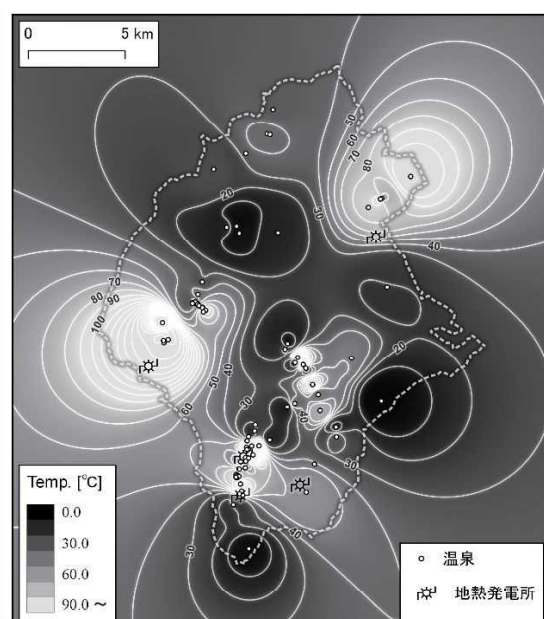


図 5 地温勾配分布図

最後に、九重地域の地温勾配分布を求め、図示した解析図を図 5 に示した。この図は、地化学温度計によって推定された温度と地表温度（ $14^{\circ}C$ ；気象庁玖珠観測地点 30 年平均 [1981-2010] より推定）との差を掘削深度（温泉分析書に記載）で除算したものを地温勾配とし、約 10m メッシュのラスタのセルごとに演算を行った結果を描画さ

せたものである。一般的に、非地熱地域での平均地温勾配は約 $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ と言われているが、地熱地帯である九重地域では、数 $10^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 以上の温度勾配を示す領域が広く分布しており、場所によっては $100^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 以上の温度勾配を有する地点があることがわかる。また、地化学温度の分布図で高温を示していた地域であっても、中程度の温度勾配が示される場合があるなど、掘削深度の違いによる影響も見て取ることのできる解析図となっている。

以上、温泉分析書に記載されている情報を基に GIS の空間解析を行い、得られた結果の一例を提示した。どの図も、それぞれ温泉分析書（データ）の段階では認知しにくい関係性を見て取ることができるものとなっていたことから、温度や濃度といった単体の情報を地理情報として視覚化するだけであっても、地域の地化学特性を伺い知ることのできる解析図を作成することができたものとする。

5. まとめ

大分県玖珠郡九重町に湧出する温泉のもつ地化学特性と分布を把握することを主な目的として、温泉分析書より得られるデータを基にした GIS による空間解析を行った。その結果、得られた解析図より、泉温や溶存成分などの情報が地域性に関して特徴的な分布を示していることが確認された。また、地化学温度を用いて算出した地温勾配の解析図からは、地下の潜在熱性に関する推定図を作成することができた。本文中でも触れたが、本調査研究による解析作業は現在も継続中であり、今後、新たに位置情報が明らかとなった温泉データが加わっていくことで、より情報密度の高い解析図が得られることが期待される。以上のことから、温泉分析書のデータを用いた空間解析によって、地域の地化学特性を把握することは十分可能であり、また有効な手法の一つであることを示すことができたものとする。

謝辞

本調査研究を行うにあたり、九重町商工観光・自然環境課 自然環境グループの方々には調査の趣旨をご理解いただき、ご協力していただきました。ここに記して謝意を示します。

参考文献・参照 web ページ

今木洋大・岡安利治 編著 (2015) : QGIS 入門【第2版】、古今書院、270p.

Fournier, R.O. and Potter, R.W. (1979) : Magnesium correction to the Na-K-Ca chemical geothermometer, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43, 1543-1550.

大分県：温泉の研究 — 大分県ホームページ

<<http://www.pref.oita.jp/site/onsen/onsen-kenkyu.html>>

【2016年、閲覧およびダウンロード】

「大分県鉱泉誌 1970」

「大分県鉱泉誌 2006 第2巻」

「大分県温泉調査報告 温泉分析書第 58 号～第 66 号」 をダウンロードして使用

国土交通省国土政策局国土情報課：「国土数値情報ダウンロードサービス」,

<<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>>

【2016 年，閲覧およびダウンロード】

国土地理院：「基盤地図情報ダウンロードサービス」,

<<http://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>>

【2016 年，閲覧およびダウンロード】

気象庁：過去の気象データ検索

<<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>>

【2016 年および 2017 年，閲覧およびダウンロード】

九重町：平成 27 年版 九重町統計書，

<<http://www.town.kokonoe.oita.jp/resource/file/pdf/kikaku/H27kokonoematitoukei.pdf>>

【2016 年，閲覧】

