

京都大学理学部附属
地球物理学研究施設

BEPPU GEOPHYSICAL RESEARCH LABORATORY
FACULTY OF SCIENCE
KYOTO UNIVERSITY



1993

日本人は温泉好きの国民といわれる。全国で2,000有余を数える温泉地を訪ねて宿泊する人の数は、年間延べ1億人を超えており、国民のほとんどすべてが年に一度は温泉を楽しんでいる勘定になる。これほどまでに温泉は国民生活と深いつながりがあるにもかかわらず、その性状を科学的に研究する機関はきわめて少ない。京都大学理学部附属地球物理学研究施設は、温泉と地熱に関する諸現象を地球物理学的に研究してきたわが国で唯一の研究機関であり、世界的にもユニークな存在である。

別府温泉の概要

別府湾から九重・阿蘇を経て島原半島にいたる中部九州は、地盤が沈降し続ける地溝帯である。この地溝帯を中心に、おもに第四紀になって活発化した火山活動は、あちこちに地熱温泉活動をもたらした。

地溝帯の北東端に位置する別府温泉は、地熱発電が行なわれている九重地域と並んで、地熱温泉活動が最も活発な地域である。標高1,000mを超える鶴見火山群から海岸にいたる東西約5km、南北約8kmの範囲に、地熱温泉活動が展開している。その北縁と南縁は、それぞれ、ほぼ東西に走る断層によって境され、中央の陥没帯は、背後の山々から流出した土砂で埋められた扇状地である。掘削された温泉井は約3,000口、流出する温泉水と蒸気量は1日あたり約5万トン、熱量は約350MWに達する。

高地部では蒸気や熱水が噴出し、低地部ではさまざまな泉質の温泉が湧出する。このように、一つの地域内で活発な地熱活動から多様な泉質の温泉までが一望のもとに観察され、しかも、それらの分布状態に規則性のあることが別府温泉の特徴であり、一連の地熱温泉現象を研究するモデル地として最適の条件を備えている。

別府温泉の歴史

「神代の昔、大国主命と少彦名命の二柱の神が四国は伊予の国を訪れたとき、少彦名命が病を得て卒倒した。大国主命は嘆き悲しんだ。海の向こう大分の速見の国に、湯煙が見える。大国主命は、海底に長いパイプを敷いてその湯を運び、少彦名命を湯浴みさせた。不思議や霊験あらたかにも、少彦名命はよみがえりたもうた。以来、この地に温泉が湧き続け、病に悩む人々を癒している。」

この伝承は、8世紀の初め（奈良時代）に編まれた「伊予国風土記」の逸文に記されている。大国主命がもたらした温泉とは道後温泉のことであり、速見の湯とは別府温泉のことである。同じころに編まれた「豊後風土記」には、赤湯泉（血の池地獄）などの記述がみえる。

元禄7年(1694)の春、福岡の医学者貝原益軒が豊後路を旅した。彼が残した「豊国紀行」によれば、そのころすでに別府にはいくつかの温泉場があり、湯治客でにぎわっていたという。このように、別府温泉は古くから広く知られた温泉であった。

明治時代にはいると、「上総掘り」による温泉井の掘削がはじまった。明治44年(1911)には、別府と浜脇だけで576口もの掘削井があったと記録されている。別府全域では1,000口に近かったのではないと思われる。

その後の世界的な経済活動の衰退は、別府における温泉開発にも大きく影響した。第2次大戦直後における温泉井の数は1,000口余りで、明治末期のそれとほぼ同じでしかなかった。

戦後の社会状況の安定化と経済復興に伴い、昭和20年代の後半から温泉開発の勢いが増してきた。昭和30年代の後半から40年代の前半にかけての開発は、とくに急激であった。

一方では温泉源の枯渇が憂慮され、旧来の温泉域では掘削の規制が図られた。このことと市街拡大の傾向とがあいまって、温泉開発域は拡大し、現在のように、扇状地全域に温泉井が分布するまでになった。

昭和40年代の半ば以降、別府における温泉開発は飽和状態に近づいたようである。実際、新規掘削の余地はあまり残されていない。扇状地の中央部に残る温泉井の空白域は、温泉採取が比較的困難な地域である。



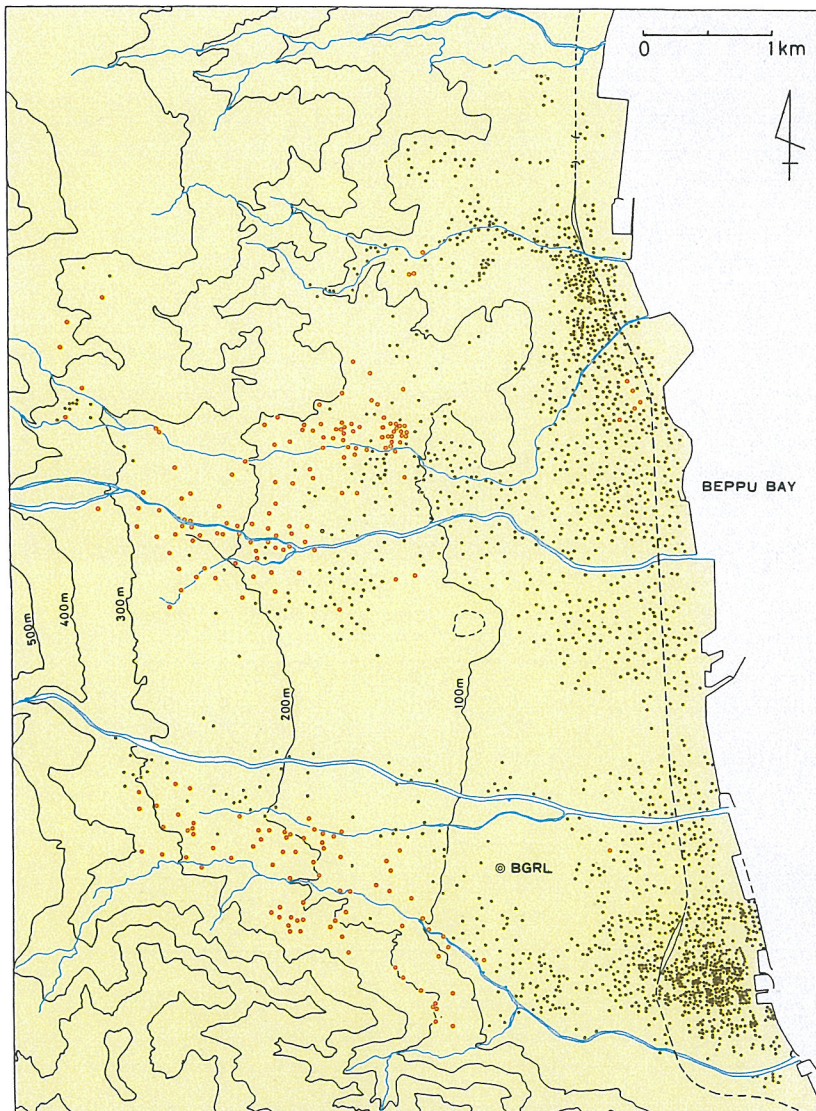
別府温泉の噴気 Steam plumes from wells in Beppu

Outline of Beppu Geothermal Field and Beppu Geophysical Research Laboratory

Bathing in hot springs has always been a pleasure in Japan. There are over 2,000 spas in Japan, which are visited every year by over 100 million people. That is to say, nearly everyone in Japan enjoys hot spring bathing at least once a year. In spite of the intimate relationship between the Japanese people and hot springs, there are very few institutes dedicated to research in hot spring sciences. In this regard, the Beppu Geophysical Research Laboratory of Kyoto University, established at its present site in Beppu City in October 1926, is unique because of its broad scope of scientific studies of geothermal phenomena. These studies include geophysical, geochemical, geological and hydrological research on geothermal systems in their natural and modified states. The Beppu Geophysical Research Laboratory has an ideal location at the Beppu geothermal system, which is one of the largest geothermal systems in Japan on the island of Kyushu, which is the southernmost of the four main islands of Japan. The surface thermal activity in Beppu varies from hot springs to superheated fumaroles and steaming ground on the volcanoes behind Beppu City. Beppu has a long history as a resort area for its onsen (hot spring baths) and its jigoku (literally "hells"; fumaroles and steaming ground). In order to enhance the flow of hot water, wells were drilled as early as 1880 using a flexible bamboo technique known as "Kazusabori". These may

be some of the earliest geothermal wells drilled anywhere in the world. Today there are over 3,000 wells in an area of 5 km (E-W) $\times$ 8 km (N-S), and the total flow of hot water and steam amounts to around 600 kg/s. The wells range down to 700 m in depth, and a temperature of 200 °C has been measured.

Kyoto University is presently expanding the scope of the Beppu Geophysical Research Laboratory to include research on geodynamic and tectonothermal processes in the earth's crust. Beppu City is situated in a zone of high seismicity at the northeast end of the Philippine-Kyushu volcanic arc. The City has been built on a large fan deposit on the lower flanks of the Tsurumi Volcanic Center. It is intended that future studies take advantage of this unique tectonic setting.



別府地熱地域の掘削井の分布
Distribution of wells drilled in Beppu Geothermal Field
BGRL: Beppu Geophysical Research Laboratory

沿革

大正12年（1923）12月	本館建物の竣工（大分県および別府町の援助による）
13年（1924）1月	研究および業務の開始
15年（1926）10月	開所式を挙行 名称：地球物理学教室附属地球物理学研究所
昭和9年（1934）10月	附属飯田観測所を設置（東京電灯株式会社の寄附による）
12年（1937）	本学官制の一部改正に伴い、火山研究所と統合 理学部附属火山温泉研究所別府研究所と改称
34年（1959）3月	文部省令により、理学部附属地球物理学研究施設（火山・温泉研究部門）として独立
62年（1987）4月	熱水環境研究部門および地熱形態研究部門（外国人客員研究部門）の2部門（10年時限）を増設し、現在にいたる

敷地

地球物理学研究施設（別府）	21,410 m ²
附属飯田観測所（飯田）	1,536 m ²

建物（別府）

煉瓦造二階建	建坪	512 m ²
	延坪	1,412 m ²
木造雑屋	建坪	40 m ²

工作物

温泉実験井	（深さ 300m：別府）
地下水位観測井	（深さ 40m：別府）
地下水位観測井	（深さ 50m：別府）
噴気井	（深さ 100m：飯田）
浸透量測定装置	（別府）
気象観測装置	（別府および飯田）

主要設備機器

液体シンチレーションシステム、蛍光X線分析装置、原子吸光分析装置、イオンクロマトグラフ、高周波プラズマ分析装置、X線回折装置、精密密度測定装置、粒度分析装置、電子顕微鏡、光学顕微鏡、地震観測システムなど



飯田観測所の噴気井
Steam well at Handa Station

Facilities

Observation wells for

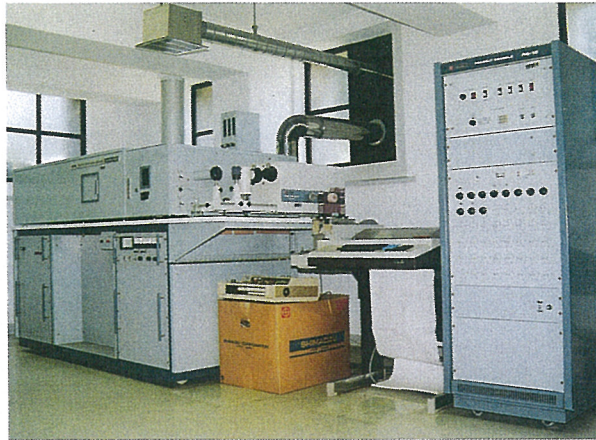
Thermal groundwater	(ϕ 50 mm, 300 m deep : Beppu)
Shallow groundwater	(ϕ 38 mm, 40 m deep : Beppu)
Shallow groundwater	(ϕ 100 mm, 50 m deep : Beppu)
Steam	(ϕ 200 mm, 100 m deep : Handa)
Observations of infiltration	(Beppu)
Meteorological observations	(Beppu and Handa)

Equipment

Liquid scintillation system, X-ray fluorescence spectrometer, Atomic absorption spectrometer, Ion chromatograph, Induced coupled plasma quantometer, X-ray diffractometer, Digital density meter for fluid, Grain size analyzer, Scanning electron microscope, Photographic microscope, Seismic observation system, etc.



蛍光 X 線分析装置
X-ray Fluorescence
Spectrometer(3030)



高周波プラズマ分析装置
Induced Coupled Plasma
Quantometer (ICPQ-100)



液体シンチレーションシステム
Liquid Scintillation
System(LSC-LBIII)



九重硫黄山における現地調査
Field surveys at an active volcano in Kuju mountains

職 員：平成 5 年(1993) 9 月現在

部 門	教 授	助 教 授	助 手	技 官	非 常 勤
火山・温泉研究部門	1	1	1	1	1
熱水環境研究部門		2		1	1
地熱形態研究部門	1				
合 計	2	3	1	2	2

研究報告

地球物理, Bulletin of the Geophysical Research Station,
京都大学理学部附属地球物理学研究施設報告(隔年発行, 既刊 Nos. 1-16)

地球内部の物質およびエネルギーは、地震・火山活動などの突発的な現象と地熱温泉活動や地殻熱流などの持続的現象を通じて輸送・発散される。地熱温泉活動は地球表層の固体圏と流体圏の接触する範囲における現象であり、水の流動が大きい役割を担う。この活動によって発散されるエネルギー量は、ある程度長期的にみると、地震・火山活動のそれに匹敵する。地下の水は、重力の影響のもとで、圧力勾配と摩擦力との兼ねあいで流動し、物質は水-岩石間の交換を絶えず起こして溶解・沈積する。したがって、地熱温泉現象は、地表水など上からの影響とともに、地下の地質および構造・その水理学的特性・応力分布などの影響を大きく受ける。地熱温泉の研究は、地殻表層におけるエネルギー・物質および水の輸送過程や、熱水の形成条件を明らかにすることであり、これを推進するには、地質や地下構造をはじめとするさまざまな地球科学的資料の収集と整備が必要である。

別府地熱系は、フィリピン-九州火山弧の北東端にあたり、また、西南日本を内帯と外帯に分ける中央構造線のすぐ北側に形成された東北東-西南西の地溝構造（別府-島原地溝）の東端に位置する。地球物理学研究施設では、このようなすぐれた立地条件を生かして、構造力学的ならびに構造熱学的な諸過程を含めた地殻表層における熱エネルギーと物質の供給と発散過程の解明をめざしている。

研究部門 Research Sections

火山・温泉研究部門（地熱流体研究部門）

地熱流体流動に関する流体力学的、地球化学的ならびに水文学的研究

- ポテンシャル流・熱対流・二相流
- 地熱流体の水文循環過程
- 地熱温泉現象のモデリング
- 別府および周辺地域における地熱温泉現象の観測

Geothermal Fluid Research Section

Physical, chemical and hydrological processes of geothermal fluid flow

- Potential flow
- Thermal convection
- Two-phase flow
- Isotope hydrology

熱水環境研究部門

地下熱水環境の特性とその形成過程に関する地球物理学的、地質学的ならびに岩石学的研究

- 地下構造・断層系の解析およびその発達過程
- 年代決定および地史の解析
- 岩石-熱水の相互作用
- 中部九州地域の火山活動史および構造発達史

Geothermal Structure Research Section

Characteristics and development of geothermal structure based on geophysical, geological and petrological methods

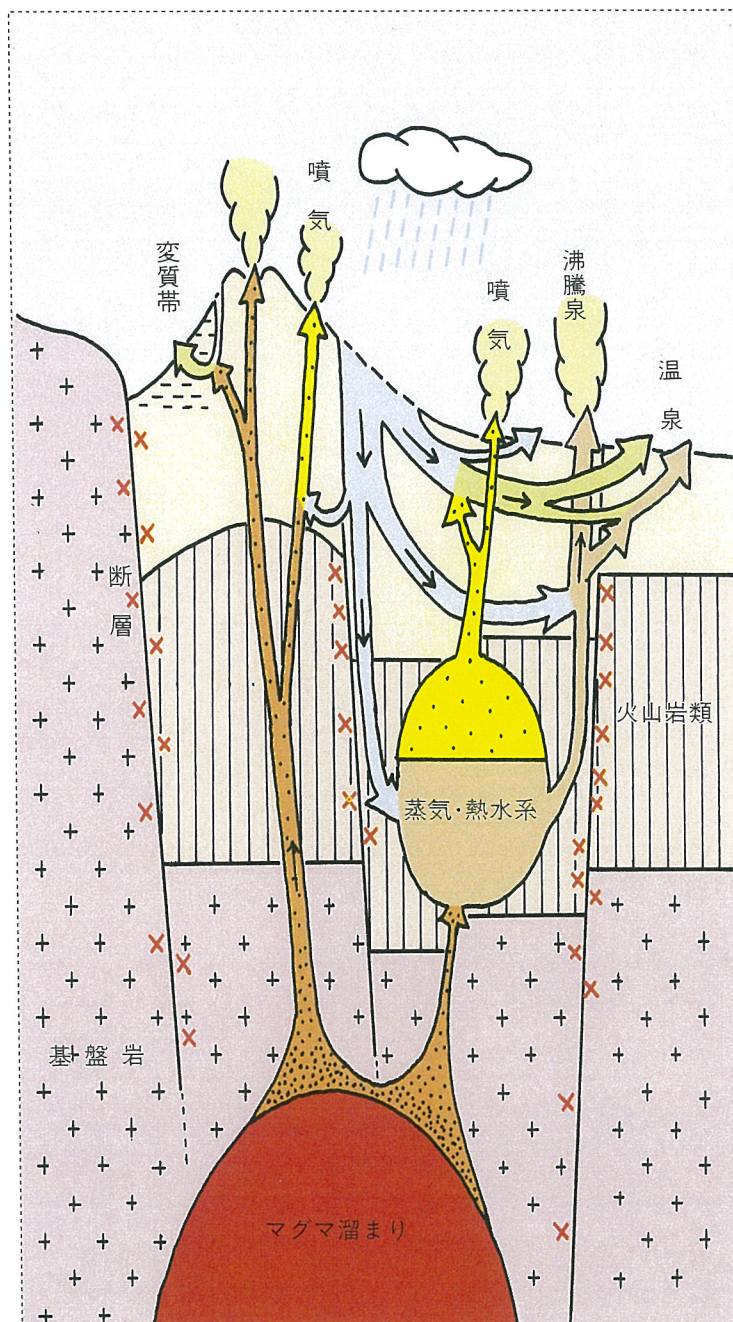
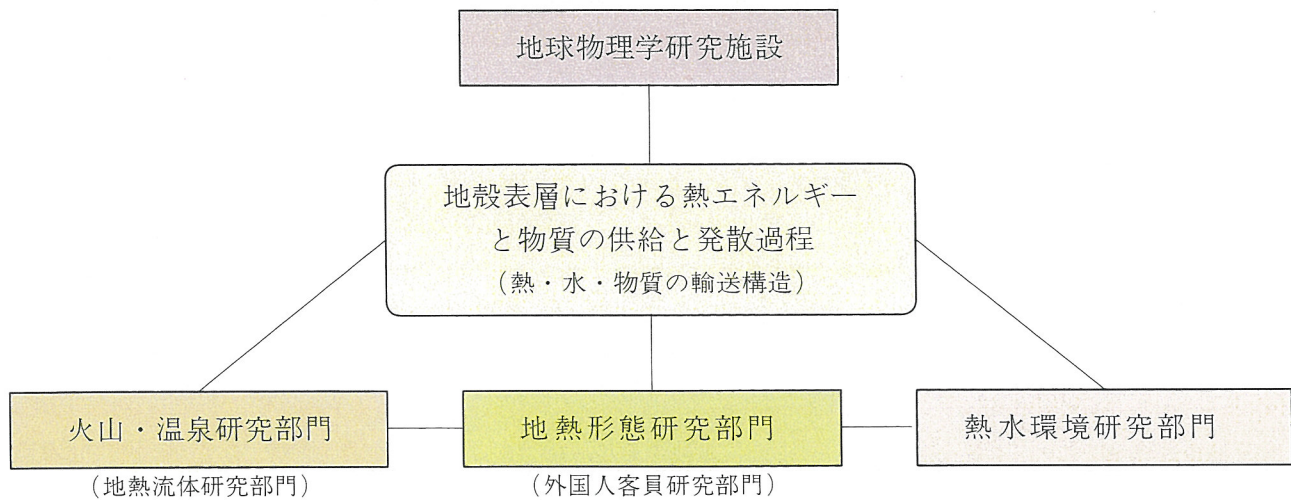
- Geophysical prospecting
- Deep drilling
- Chronology
- Water-rock interaction

地熱形態研究部門（外国人客員研究部門）

世界各地における地熱形態の比較研究および国際共同研究の推進

Geothermal Interdisciplinary Research Section

Open to foreign scientists in any disciplines related to geothermal phenomena



地熱温泉現象

- 水収支
- 流出熱
- 化学成分
- トリチウム
- 安定同位体

深層水循環

- ポテンシャル流
- 熱対流
- 二相流
- 循環速度

地熱流体の起源

- 熱・化学過程

地層特性

- 表層地質
- 断裂系
- 変質鉱物

地下構造

- 地震探査
- 重力探査
- 電磁気探査
- 深層掘削

火山地熱活動

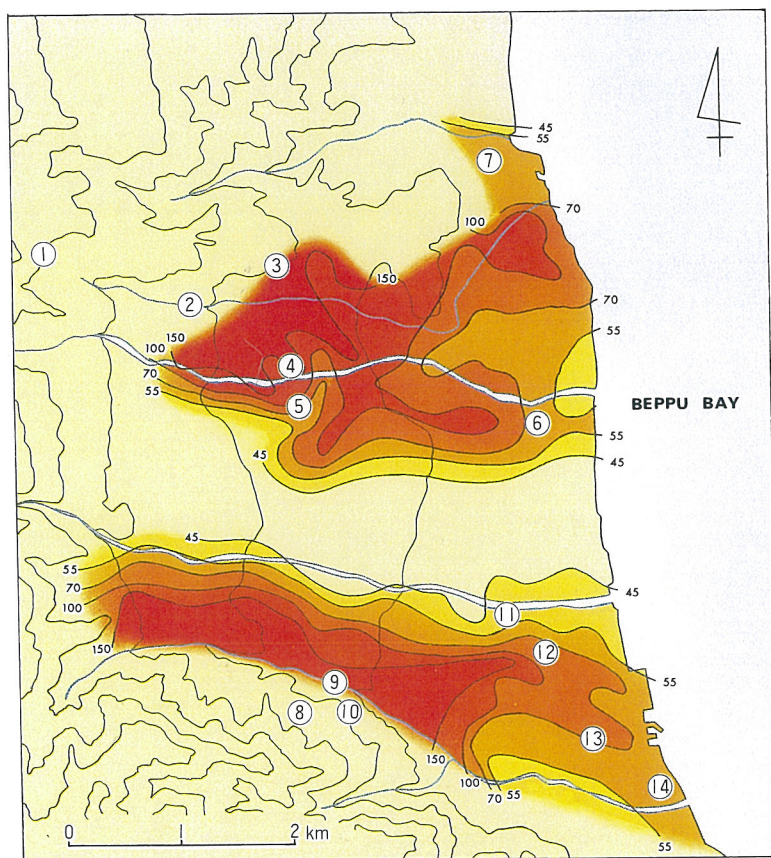
- 年代測定
- 温度履歴
- 化学組成

テクトニクス

別府温泉の地熱構造

Geothermal Structure in Beppu Geothermal Field

別府地域では、地下温度の高温域が南と北の二つに分かれて存在する。高温の地熱流体（食塩型の中性熱水および蒸気）が、それぞれ、比較的高地部で深部から断層に沿って上昇流出している。地熱流体が液体または気体の状態で浅層の地下水中に混入して熱水性温泉水（食塩型）や蒸気性温泉水（炭酸水素塩型、硫酸塩型）をつくる。別府地域には、こうした種々の水質をもつ温泉水が立体的かつ系統的に分布している。



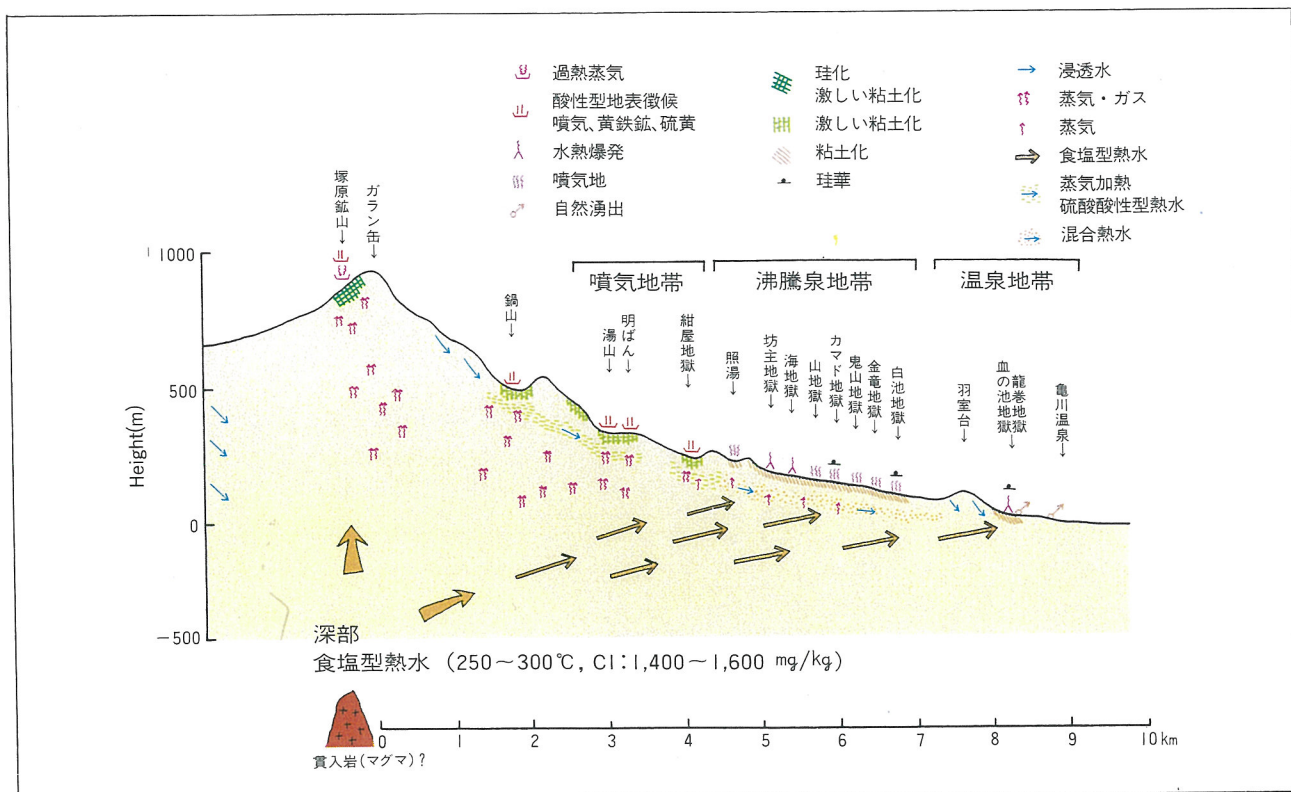
High temperature zones exist along two main faults, indicating that geothermal fluids of chloride water and steam ascend from the depths. Several kinds of hot waters can be formed through different processes of mixing between groundwater and deep geothermal fluids, (1) High temperature chloride water from the depths can flow out to the fan region while being subjected to dilution by shallow waters, (2) Shallow groundwater entering the active geothermal zone from higher elevations can be supplied with heat and gas constituents through mixing with steam derived from deep chloride water.

地下200mにおける地温(℃)の分布 (○印の数字は、「化学組成の例」の番号)
Subsurface temperature at a depth of 200 m (Numbers in the circle are listed in the examples of chemical composition)

化学組成の例 Examples of chemical composition (mg/kg)

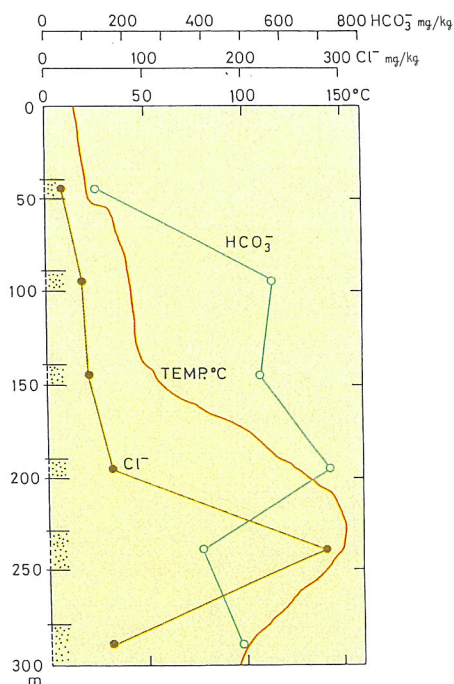
番号	泉温 ℃	pH	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
①	67.5	1.7	24.1	16.7	26.0	10.2	5.7	1649	0
②	b	8.0	151.1	40.9	121.0	13.0	12.0	623.8	44.8
③	b	3.65	1164	199.5	32.7	3.1	1724	464.5	0
④	b	8.23	1395	136.0	39.1	9.7	2213	131.7	39.8
⑤	61.0	8.4	62.2	9.5	20.0	4.2	5.1	27.8	213
⑥	49.5	8.1	742.8	54.7	70.1	7.0	1137	203.4	93.1
⑦	58.5	7.4	223	32.0	29.8	16.0	288	122	159
⑧	45.0	3.01	9.0	2.4	10.6	5.6	13.6	90.7	0
⑨	50.0	7.7	75.9	5.7	16.5	11.8	9.2	58.5	228.9
⑩	b	8.4	1153	119.0	46.1	0.83	1751	227.1	58.0
⑪	50.2	7.4	196.6	27.8	108.1	85.7	99.7	109.5	1077
⑫	66.0	8.0	683.9	35.1	44.2	6.6	996.4	91.1	273.6
⑬	56.1	7.0	118	15.6	61.2	37.0	87.7	64.8	503
⑭	44.5	7.1	2121	87.6	279.0	276.6	4163	517.6	344.7

b: 沸騰水 Boiling water



温泉水の成分・地熱表面徴候・変質帯の分布から推定された地下の地熱流体の流動：
別府地熱地域北部における模式的な東西断面

Geothermal fluid flow system inferred from the chemical composition of hot spring water,
the surface manifestation and the distribution of alteration zones: A schematic E-W cross
section of the northern part of Beppu Geothermal Field



地球物理学研究施設温泉実験井の地温(°C)
および化学成分(Cl⁻, HCO₃⁻)の深さ分布
Temperature and chemical components of
fluids from the geothermal observation
well at the Beppu Geophysical Research
Laboratory



変質火山岩の偏光顕微鏡写真(直交ニコル)

試料: 地球物理学研究施設温泉実験井の輝石安山岩
(深さ200m, 方解石と沸石が析出)

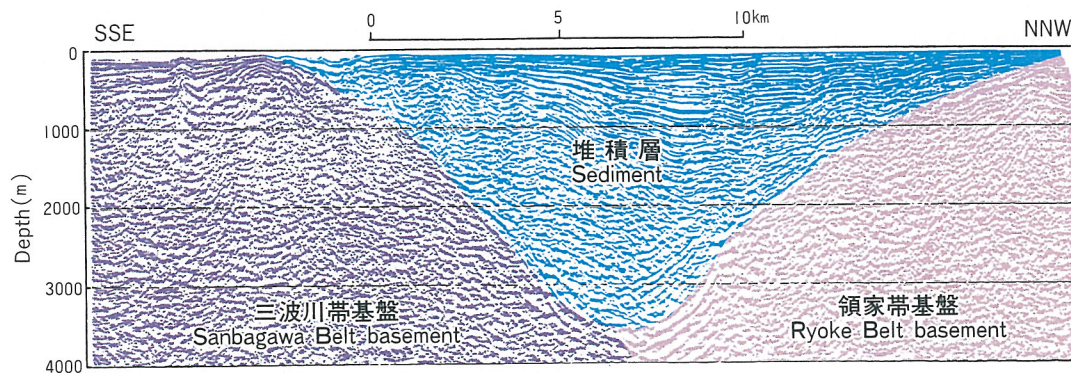
A photomicrograph of altered volcanic rock
(crossed nicols)
Sample: Pyroxene andesite from the geothermal
observation well of the Beppu Geophysical
Research Laboratory (Calcite and zeolite minerals
can be observed at the depth of 200 m)

別府地域の地下構造

Subsurface Structure beneath the Beppu Area

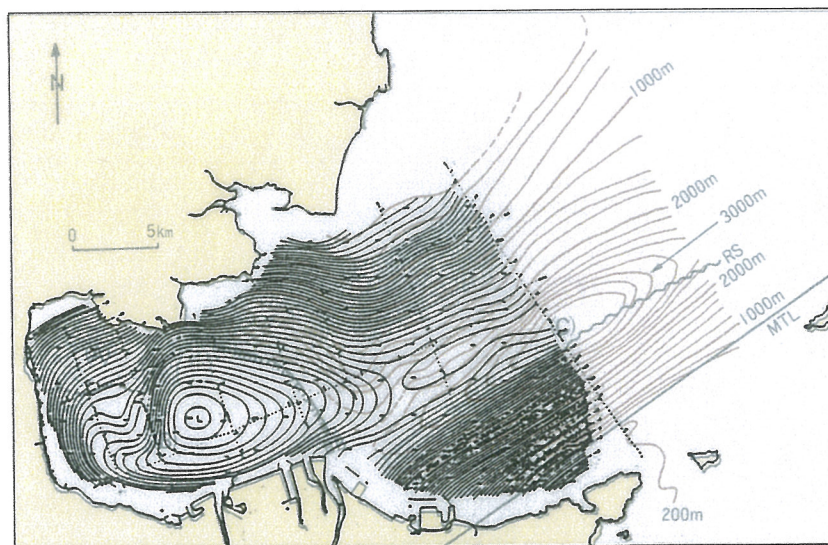
地熱活動の活発な別府地域の地下構造を明らかにするために、マルチ・チャンネル反射法地震探査や重力測定などの物理探査が試みられている。それによると、別府湾で、舟底状の深い地溝・低重力異常を伴う盆状構造・高度に発達した断裂や褶曲などが確認されたほか、領家帯基盤の下に三波川帯基盤が位置するという注目すべき結果が得られている。

Seismic reflection and gravity measurements conducted in Beppu Bay have revealed the graben and basin structures associated with low gravity anomalies, faulting and folding.



別府湾における反射法地震探査の例（舟底状の地溝が認められる）

An example of a seismic reflection profile from Beppu Bay



別府湾のブーゲー重力異常 (mgal) 下構造区分

Bouguer gravity anomaly (mgal) in Beppu Bay (C): 深い地溝の区域, BB: 別府湾横断構造線, MTL: 中央構造線, RS: 領家帯基盤の南限 (三波川帯基盤と領家帯基盤の会合線). コントアは、先第三紀基盤面までの深さ (m)

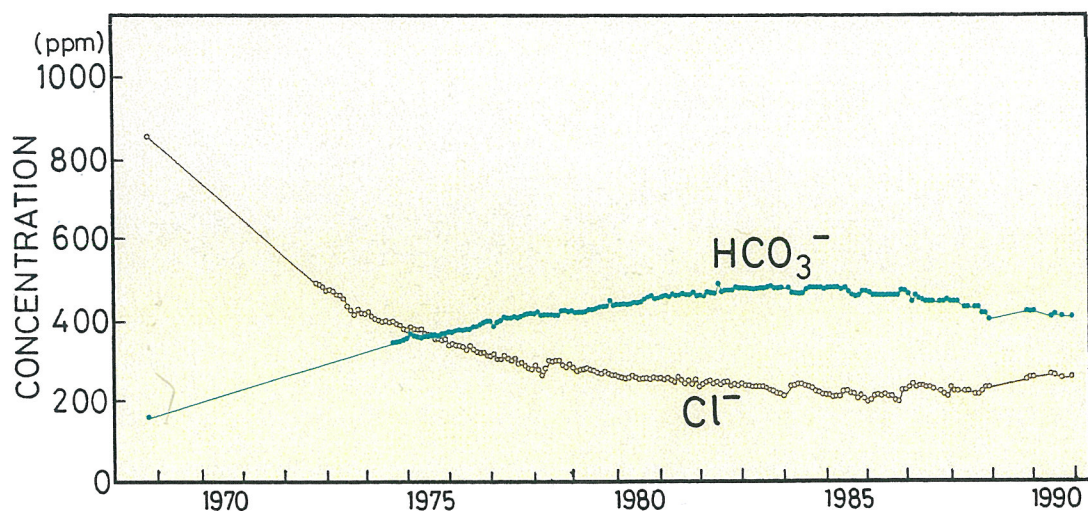
Subsurface structural regions beneath the Beppu Bay clarified by seismic prospecting

(A): Listric faulting region, (B): Deep basin region, (C): Deep graben region, BB: Beppu Bay Crossing Tectonic Line, MTL: Median Tectonic Line, RS: Margin of Ryoke Belt basement. Contours show depths (m) to Pre-Tertiary basement.

別府温泉のモニタリング

Monitoring of Geothermal Phenomena in the Beppu Geothermal System

明治時代以降の温泉開発に伴って、自噴域の縮小・海水浸入・泉質の変化などのさまざまな現象が生じている。地球物理学研究施設では、定期的に調査を実施して、別府温泉の長期モニタリングを行なっている。



低地部沸騰泉の主要陰イオン (Cl^- , HCO_3^-) 濃度変化
An example of time variations in the major anion concentrations

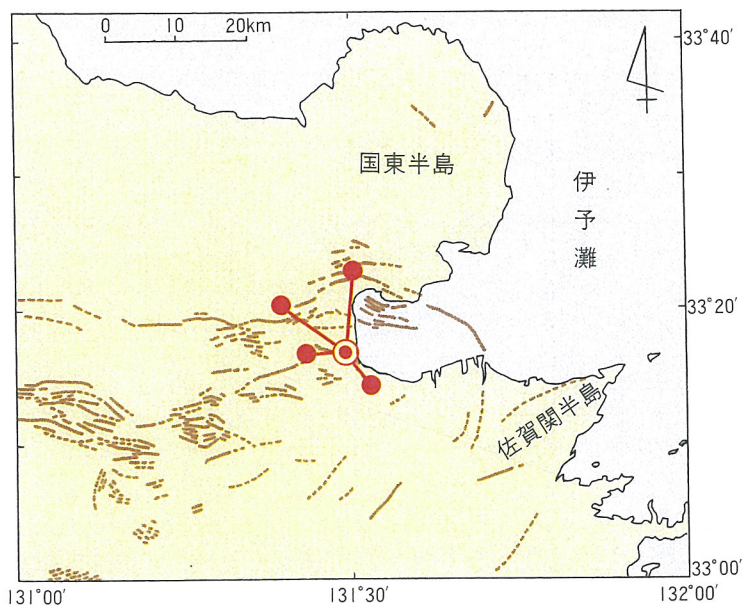
地震観測 Seismic Observations

火山・温泉研究部門（地熱流体研究部門）では、従来からすすめてきた地熱流体の生成・貯留・流動の研究をさらに深める。とくに、放射性および安定同位体をトレーサーとした地熱流体の深層循環過程の解明が重要課題である。

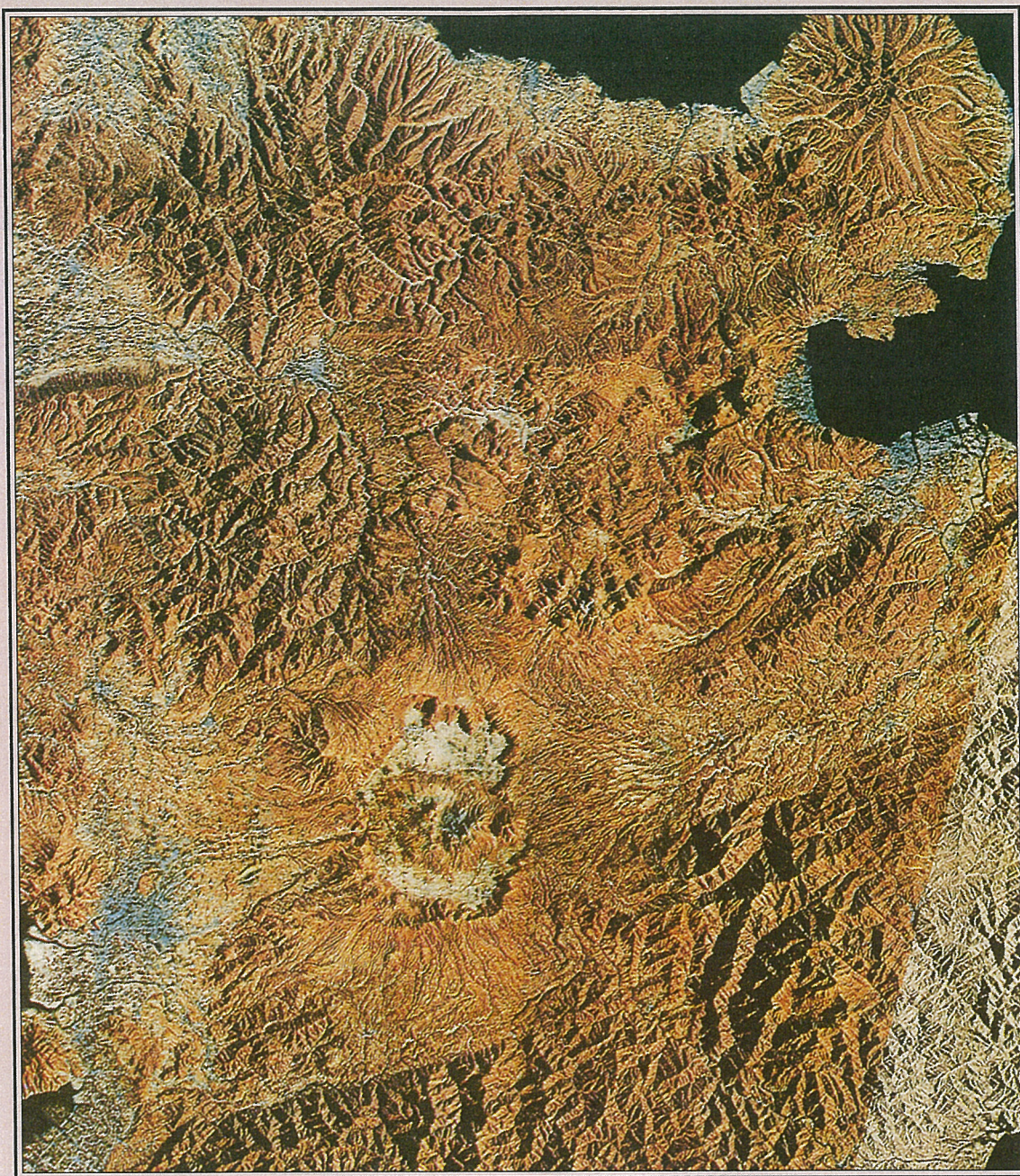
熱水環境研究部門では、別府地域を含む中部九州の地下熱構造をより詳しく調べるために、地球物理学的、地質学的ならびに岩石学的な研究を推進する。当面の重要課題は、地熱構造発達史の解明である。

これらの研究の基礎として、テクトニクスに関する資料の蓄積が不可欠である。そのために、平成4年度より、両部門が協力して、別府地域を中心にした高精度地震観測網を整備している。

さらに、将来は、高深度掘削を行なって、別府地域一帯の地熱構造発達過程に関する資料を収集する。



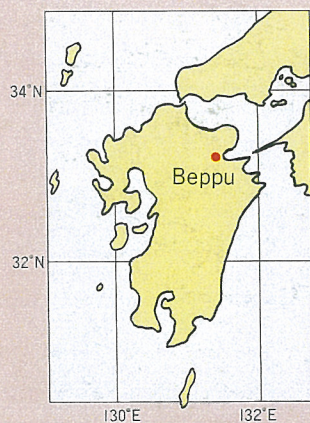
別府地域における地震観測網
(●:地震観測点, ⊙:中央制御局, ----:断層)
The network for seismic observations
(●:Observation station, ⊙:Central station, ----:Fault)



0 20km

九州中・北部のレーダー／ランドサット重合画像（NEDO 提供）

Radar/Landsat data composite image of central-north Kyushu (by the courtesy of NEDO)



京都大学理学部附属地球物理学研究施設

〒874 大分県別府市野口原

Tel 0977-22-0713 Fax 0977-22-0965

附属飯田観測所 〒879-49 大分県玖珠郡九重町湯坪

Beppu Geophysical Research Laboratory

Faculty of Science, Kyoto University

Noguchibaru, Beppu 874, JAPAN

Tel +81-977-22-0713 Fax +81-977-22-0965