

平成21年3月31日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19612001

研究課題名（和文）若尊海底火山に伴う熱水活動の経時変動

研究課題名（英文）Time series change of hydrothermal activity in the Wakamiko submarine crater, south Kyushu, Japan

研究代表者

石橋 純一郎（ISHIBASHI JUN-ICHIRO）

九州大学・大学院理学研究院・准教授

研究者番号：20212920

研究成果の概要：

鹿児島湾北部の水深 200m の海底に若尊海底火山に伴った熱水活動がある。本研究で実施した広域探査によって 200°C の熱水が噴出する活動を新たに発見した。火口底全域にわたって地殻熱流量測定を実施し、熱水噴出孔を中心とした火口底北西部の海底下に高温領域が分布していることを明らかにした。この領域から採取された堆積物中の熱水変質反応および有機物熱変性反応を地球化学的に解析し、堆積層内での熱水の上昇・移動があることを確認した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：資源地球化学

科研費の分科・細目：地球システム変動

キーワード：鹿児島湾、浅海熱水循環系、海底下地温勾配、熱水変質鉱物、間隙水、有機熱変性反応、グアニン・シトシン含量

## 1. 研究開始当初の背景

研究代表者および分担者は、鹿児島湾北部で 2003 年度までに行われた潜航調査によって、若尊海底火山の火口底にゆるやかな熱水噴出があることを見出した。さらに、これに引き続く 2005 年の潜航調査で探査域を広げた結果、熱水変質に起因すると思われる変質鉱物の分布域を新たに発見した。

これら 2 つの熱水活動域において採取された表層堆積物から抽出した間隙水の化学組成を明らかにし、堆積層の深部に高温 (150

～200°C 程度) の熱水帯水層が存在し、そこから熱水が上昇していることを推定した。また間隙水から推定される熱水成分の水素・酸素同位体比組成から、熱水の起源として地下水の寄与が大きいことを示唆した。

このような研究開始までの地球化学的研究の結果から、若尊火口の浅海熱水循環系はかなり大規模であることが期待されていた。

## 2. 研究の目的

本研究の第一の目的は、地球化学的解析に加えて、地球物理学的解析と分子微生物学的

解析を行い、若尊火口の海底下の温度分布構造を明らかにすることである。測点を火口底全域に展開して堆積層内の温度構造を明らかにすることで、熱水循環系の規模や構造を詳しく解明するための制約条件を得ることになる。

本研究の第二の目的は、異なる手法を組み合わせて得た温度情報から、堆積層内の温度分布構造の経時変動を推定する試みである。例えば、熱水変質鉱物や有機熱変性物質はその形成に比較的時間がかかるので、その間の平均的な温度情報を反映すると考えられる。時定数の異なる手法によって得られる温度情報が食い違いを見せれば、それは温度構造が比較的最近に変動したこと、すなわち熱水活動の強さが経時変動したことの兆候を捉えたと推定することができる。

### 3. 研究の方法

#### (1) 調査航海の実施

鹿児島湾を調査海域とする潜航調査は、2007年6月に行われたNT-07-09調査航海と2008年8月に行われたNT-08-17調査航海において、JAMSTECの無人潜水艇ハイパードルフィンを用いて実施された。これらの潜航調査では、温度プローブSAHFによる海底下温度勾配計測と、プッシュコア類を用いた表層堆積物試料の採取を行った。

また調査船を用いた航海として、2008年5月に淡青丸によるKT-08-09調査航海が実施された。この航海ではピストンコアラによる海底下3mに達する堆積物試料の採取と、大型温度プローブを用いた海底下温度勾配計測を行った。

また本研究で行われる研究手法の確立を目的として、伊豆小笠原弧の水曜海山で2007年5月に行われたNT-07-08潜航調査航海にも参加した。水曜海山熱水系は、海洋性島弧の海底火山活動に伴う熱水系であり、若尊海底火山に伴う熱水系と成因としては同じものと考えられる。ただし、水曜海山は陸から遠い深海底（水深1300m）に位置するのに対し、若尊火山は陸に囲まれた水深200mの浅い海底に位置する点が異なっており、両者の比較対象も興味深い。

#### (2) 地球物理学的解析

温度プローブを海底に突き刺して堆積層内の多点での温度測定を行い、その結果から地温勾配を算出する。採取された堆積物を用いて熱伝導率を別に求め、温度勾配から海底地殻熱流量を計算する。若尊火口は水深が浅く底層水温度の変動が大きいため、この影響を除くための補正を行う必要がある。

#### (3) 無機化学的解析

堆積物試料に含まれる鉱物を、主にXRD

を用いて同定した。多くの変質鉱物は粘土鉱物であるため水ひ法により $2\mu\text{m}$ 以下の粒子を集めた後に定方位試料を作成した。未処理での測定と合わせて、エチレングリコール処理、塩酸処理などの必要な処理を行って変質鉱物の同定を確認した。一部の試料についてはEPMAにより化学組成の分析を行った。

#### (4) 有機化学的解析

堆積物試料よりトルエン・メタノール混合溶媒（体積比3:1）にて超音波抽出を行い、得られた抽出物をシリカゲルカラムクロマトグラフィーにより4画分（脂肪族炭化水素、芳香族炭化水素、ケトン、極性成分）にわけた。脂肪族および芳香族画分についてGC-FIDおよびGC-MS分析を行ない、目的化合物の同定、定量を行った。

#### (5) 分子微生物学的解析

採取された堆積物試料からアーキアの遺伝子を抽出した。アーキアの系統解析用遺伝子であるリボソームRNA遺伝子をPCR増幅しPCR産物を大腸菌に組み込みクローン・ライブラリーを構築した後、各PCR産物の塩基配列を決定した。塩基配列を基にG+C含量を算出し、以前の研究で提唱した換算式に代入して、アーキアの至適生育温度を推算した。

#### (6) 間隙水試料・熱水試料の化学分析

堆積物は回収後24時間以内に船上で圧搾し間隙水を抽出した。抽出した間隙水試料について、比色分光法、原子吸光法、ICP発光分光法、イオンクロマトグラフィーなどによって、主要成分の化学分析を行った。熱水噴出孔から直接採取された熱水試料や、海水試料についても同様の化学分析を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 高温熱水噴出活動の発見

本研究における最初の調査航海であるNT-07-09潜航調査において、 $200^{\circ}\text{C}$ の高温熱水を噴出する熱水活動を発見した。水深200m以下の浅海熱水系で、このような沸点に近い高温の熱水が海底から直接噴出していることを確認した例は世界的にも少ない。

本研究開始前の間隙水の地球化学的特徴から推定されていた高温熱水の化学組成と、熱水噴出孔から直接採取された熱水の化学分析の結果はおおむね一致していた。熱水噴出孔を構成する熱水性沈殿物に含まれる鉱物を同定したところ、タルク、ドロマイト、さらに輝安鉱が見いだされた。

本研究の計画に基づいて、未探査海域に潜航調査の範囲を広げたことが、高温熱水噴出活動の発見につながった。その意味では、この発見は本計画にとっては嬉しい誤算とも

言うべきものであった。この発見により、研究計画の主対象を、当初予定していたガス噴出が顕著な熱水活動サイトから、高温熱水噴出孔の周辺サイトに移すことになった。

## (2) 地殻熱流量の分布

火口全域にわたる150点以上の測点における地殻熱流量測定結果をまとめたところ、 $10000\text{mW/m}^2$ を越える非常に高い熱流量を示す領域が火口底の中心より北西部にかけて広がっていることが明らかになった(図1)。

また各測点の温度プロファイルを詳しく見ると、直線性を示さないものが熱水活動域の周囲ではしばしば見られ、こうした領域で熱水の上昇あるいは海水の吸い込みに起因する間隙水の移動フラックスがあることが示唆された。

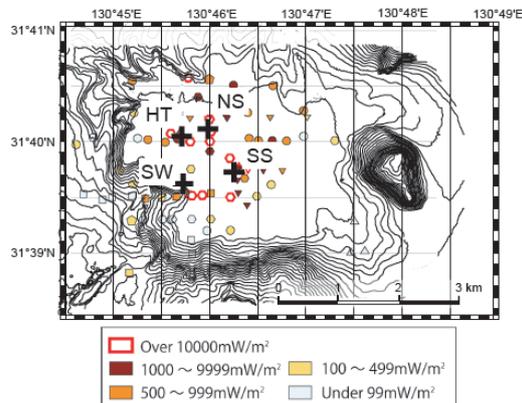


図1. 若尊火口底で確認された熱水活動サイトと地殻熱流量の分布. 高熱流量を示した測点(赤色)と熱水活動サイト(+印)は、北西部に集中している。高温熱水噴出孔は図中HTのサイトで発見された。

## (3) 熱水変質反応の解析

高温熱水噴出孔のごく近傍(図1 HT)で全長3mに達するピストンコア試料の採取に成功し、このコアの深度270-300cmで強い熱水変質の指標となるサポナイト(3八面体型スメクタイト)を見出した。この上下の層の変質鉱物の産状と合わせて考察すると、まず全層にわたって火山ガラスからモンモリロナイト(2八面体型スメクタイト)への変質が起こり、次の段階で高温(200°C程度)条件下の熱水変質によりサポナイトが形成されたと考えられる(図2)。サポナイトの形成には海水からMgが供給されることが必要であり、熱水活動の活発化によって熱水の浸入面が上昇してきた証拠を考察することができる。

火口底北西部にあるこの他の熱水活動サイト(図1 SW, NS)から採取された堆積物か

らはイライトが見出され、高温の熱水変質反応を経験していることを強く示唆した。これらの堆積物の間隙水組成も熱水成分の組成の浸入を示していた。

これに対して研究開始までに主に研究されていたサイト(図1 SS)は、海底からのガス噴出がさかんに見られることが特徴的である。この付近で採取されたプッシュコアおよびピストンコアの解析では、比較的低温(100°C以下)で形成されるモンモリロナイトが多量に見出されている。ピストンコア試料では深度160cm以深の深度で間隙水中のMg濃度上昇が見られており、以前形成されたモンモリロナイトが熱水活動の減衰に伴い分解している可能性が示唆された。

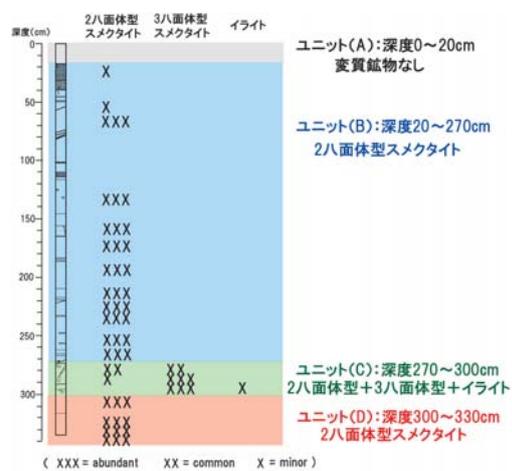


図2. 高温熱水噴出孔近傍で採取された堆積物に見出された熱水変質鉱物。EPMAによる化学分析の結果と合わせて、2八面体型スメクタイトはモンモリロナイト、3八面体型スメクタイトはサポナイトと同定した。

## (4) 有機物熱変性反応の確認

南西部の変色海域(図1 SW)で採取されたコア試料(全長約20cm)から、熱変性反応を被った有機化合物を検出した。堆積物から抽出された脂肪酸炭化水素画分に顕著に見られるステラン類、ホパン類の構造異性体のエピ化度を熟成度(堆積物が経験した最高温度)の指標として堆積物の温度環境を推定した。C30ホパンから推算したエピ化度は、いずれの深度でもほぼ終点に達していると考えられ、その熟成度を見積もると表層で120°C程度から最底層で150°C程度と推定できる。一方、C27ステランから推算したエピ化度は、すべての深度で終点には達していないと考えられるが、底層に向かってエピ化がより進んでいる傾向は見られた。

これらの結果は、コア最底部に相当する深度で温度プローブにより120°Cの温度が実測されたことと傾向が一致している。ただし、

ステラン類のほうがホパン類より早くエピ化が進行するという実験的研究が知られており、本研究ではこれとは逆の結果となっている。また同じ堆積物試料中の熱水変質鉱物の同定からは、比較的低温（100°C以下）で形成されるモンモリロナイトしか見出されていない。測定温度と熱成温度がやや一致しないことと合わせて、温度の経時変動があったことを示している可能性がある。

#### (5) 分子微生物学的解析

鹿児島湾で採取された堆積物試料について解析を試みたところ、堆積物中に多量に含まれる有機物が PCR 解析の妨害となっていることが判明した。

事前に行われた水曜海山で採取された試料の解析では、温度測定では 40°C を記録した低温熱水から採取されたアーキアについて、G+C 含量から棲息温度が 70-90°C と推定されるものが多数検出された。これまで水曜海山の熱水系は、海水の浸透が激しいために 100°C 付近の温度の熱水は形成されにくいとされてきたが、本研究によりそうした温度環境も地下のある領域には広がっていることが示唆された。

#### (6) 堆積層内の温度構造とその経時変動

若尊火口全体に渡るスケールで海底下の温度構造を見ると、火口の北西部に高温域が集中する分布が明らかになった（図 1）。このことは、地球物理学的解析（地殻熱流量測定）によって示されたものであるが、地球化学的な解析結果も強く支持する証拠となっている。これに対して、火口底のそれ以外の地域はおおむね 100°C 以下の低温であることがわかってきた。本研究の開始前まで主に研究されていたサイト（図 1 SS）は、地形的には火口底の中心に見えるが熱水活動の中心から外れた位置にあることが本研究により明らかになった。

高温域の温度構造をさらに詳しく見ると、高温変質鉱物や熱変性有機化合物は必ずしも熱水噴出孔の直近（図 1 HT）だけに出現するのではなく数百 m 離れたサイト（図 1 SW, NS）でも見出されている。また熱水噴出孔の近傍（図 1 HT）で採取されたコアに見出された高温変質鉱物も 3m の深度で見出されている。これらの反応の地球化学的な解析から推定される温度が、熱水噴出孔で実測された熱水温度（200°C）に近いことを合わせて考えると、火口底北西部の海底下では堆積層内に熱水の上昇や水平移動があることで高温域が広がっていると結論づけられる。

海底火山活動に伴う浅海熱水循環系の温度構造とそれを支える熱水の動きをこれほど明確にした研究は他に例をみない。これは無人潜水艇を用いた複数回の調査を展開で

きたことと合わせて、地球物理学的解析と地球化学的解析を平行して実施することで、複数の証拠を比較しながら検討できたことによると考えている。本研究の第二の目的であった熱水活動の経時変動については、不確かな兆候をいくつか捉える段階にとどまったが、他の観測手段を導入することで解明を進める目処を得ることができた。

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 2 件）

- Ishibashi, J.-I., M. Nakaseama, M. Seguchi, T. Yamashita, S. Doi, T. Sakamoto, K. Shimada, N. Shimada, T. Noguchi, T. Oomori, M. Kusakabe, T. Yamanaka (2008) Marine shallow-water hydrothermal activity and mineralization at the Wakamiko crater in Kagoshima bay, south Kyushu, Japan. *J. Volcano. Geotherm. Res.*, 173, 84-98, doi:10.1016/j.jvolgeores.2007.12.041.
- Nakaseama, M., J.-I. Ishibashi, K. Ogawa, H. Hamasaki, K. Fujino, T. Yamanaka (2008) Fluid sediment interaction in a marine shallow-water hydrothermal system in the Wakamiko submarine crater, south Kyushu, Japan. *Resour. Geol.*, 58, 289-300, doi: 10.1111/j.1751-3928.2008.00062.x.

〔学会発表〕（計 25 件）

- 前藤晃太郎, 千葉仁, 杉山拓, 岡村慶, 木村浩之, 中島美和子, 石橋純一郎, 山中寿朗. 鹿児島湾若尊海底火山火口底に確認された活発な高温熱水噴出活動の地球化学. 日本地球化学会年会, 2007/09, 岡山
- 中島美和子, 石橋純一郎, 二宮知美, 高下将一郎, 清川昌一, 藤野恵子, 山中寿朗. 鹿児島湾若尊火口熱水地帯における間隙水化学組成. 日本地球化学会年会, 2007/09, 岡山.
- Nakaseama, M., J.-I. Ishibashi, T. Yamanaka, K. Fujino. Hydrothermal fluid-sediment interaction in the Wakamiko submarine crater, south Kyushu, Japan. *Cities on Volcano 5 Conference*. 2007/11, Shimabara.
- 藤野恵子, 山中寿朗, 石橋純一郎, 中島美和子, 江原幸雄, 木下正高, 山野誠. 始良カルデラの熱流量分布. 日本地熱学会学術講演会, 2007/11, つくば市.
- Yamanaka, T., J.-I. Ishibashi, K. Maeto, M. Nakaseama, K. Okamura, T. Sugiyama, K. Fujino, H. Kimura. Active shallow-

- water submarine hydrothermal venting and occurrence of chimney-like mineral deposits from Northern Kagoshima Bay, South Kyushu, Japan. American Geophysical Union Fall Meeting, 2007/12, San Francisco, USA.
- Kimura, H. Selective phylogenetic analysis of hyperthermophilic archaea in the deep-subsurface hot biosphere. ISEB18 Environmental Biogeochemistry at the Extremes, 2007/11, Taupo, New Zealand.
- 藤野恵子, 山中寿朗, 江原幸雄. 始良カルデラ内の熱流量分布. ブルーアースシンポジウム, 2008/03, 横浜市立大学金沢八景キャンパス.
- 山中寿朗, 前藤晃太郎, 千葉仁, 岡村慶, 杉山拓, 木村浩之, 石橋純一郎, 中島美和子, 藤野恵子, 山本智子, 三宅裕志, 藤原義弘, 佐藤孝子, 窪川かおる, 浦環, NT07-09 乗船研究者一同. 鹿児島湾若尊火口内を埋める堆積層内での熱水循環系解明 -NT07-09 航海概要報告. ブルーアースシンポジウム 08, 2008/03, 横浜市立大学.
- 赤司裕紀, 山中寿朗, 石橋純一郎, 土岐知弘, 伊藤道裕, 川口慎介, 木村浩之, 高井研, 中川聡. 海底熱水系における溶存有機物の地球化学. ブルーアースシンポジウム 08, 2008/03, 横浜市立大学.
- 前藤晃太郎, 千葉仁, 山中寿朗, 岡村慶, 杉山拓, 石橋純一郎, 佐藤孝子, NT07-09 乗船研究者一同. 鹿児島湾湾奥部若尊火口底から湧出する熱水の地球化学. ブルーアースシンポジウム 08, 2008/03, 横浜市立大学.
- 藤野恵子, 山中寿朗, 江原幸雄. 始良カルデラ内の熱流量分布. 地球惑星科学連合大会, 2008/05, 千葉.
- 山中寿朗, 前藤晃太郎, 千葉仁, 藤野恵子, 石橋純一郎, 中島美和子, 岡村慶, 杉山拓, 木村浩之. 鹿児島湾若尊火口内を充填する未固結堆積層内に発達する熱水循環系の地球化学的研究. 地球惑星科学連合大会, 2008/05, 千葉.
- 木村浩之, 山中寿朗, 石橋純一郎, 花田智. 微生物分子温度計による地下圏微生物の探索. 地球惑星科学連合大会, 2008/05, 千葉.
- Ishibashi, J., M. Nakaseama, K. Maeto, H. Chiba, T. Yamanaka, T. Sugiyama, K. Okamura. Geochemical studies of shallow-water submarine hydrothermal activities within the Wakamiko crater in Kagoshima bay, south Kyushu Japan. Asia Oceania Geosciences Society 5th Annual Meeting, 2008/06, Busan, Korea.
- Fujino, K., T. Yamanaka, S. Ehara. Heat flow distribution in Aira Caldera. Asia Oceania Geosciences Society 5th Annual Meeting, 2008/06, Busan, Korea.
- Akashi, H., T. Yamanaka, J.-I. Ishibashi, M. Sunamura, H. Kimura, T. Toki, S. Nakagawa, K. Takai. Characteristics of dissolved organic matter in the hydrothermal fluids and the associated water samples obtained from arc-backarc systems. Goldschmidt Conference, 2008/07, Vancouver, Canada.
- Yamanaka T., K. Maeto, H. Akashi, M. Yokoyama, H. Chiba, J.-I. Ishibashi, M. Nakaseama, K. Okamura, T. Sugiyama, K. Fujino. Unique shallow-water hydrothermal system associated with submarine volcanism in the Aira caldera, South Kyushu, Japan. Goldschmidt Conference, 2008/07, Vancouver, Canada.
- Kimura, H., S. Hanada. Detection of thermophilic and hyperthermophilic archaea derived from the subsurface hot biosphere. The 12th International Symposium on Microbial Ecology (ISME 12), 2008/08, Cairns, Australia.
- 三好陽子, 石橋純一郎, 松倉誠也, 中島美和子, 大村亜希子, 前藤晃太郎, 山中寿朗, 千葉仁. 鹿児島湾若尊火口熱水域における堆積物中の熱水変質反応. 日本地球化学会年会, 2008/09, 東京大学駒場キャンパス.
- 前藤晃太郎, 山中寿朗, 石橋純一郎, 三好陽子, 松倉誠也, 大村亜希子, 横山未来, 岡村慶, 杉山拓, 千葉仁. 鹿児島湾若尊火口熱水域における堆積物の間隙水化学組成. 日本地球化学会年会, 2008/09, 東京大学駒場キャンパス.
- 山中寿朗, 島村翔, 井上聡, 前藤晃太郎, 木村浩之, 藤野恵子, 木下正高, 石橋純一郎. 海底熱水湧出域における高地温勾配に伴った有機物の熟成度変化. 日本地球化学会年会, 2008/09, 東京大学駒場キャンパス.
- 藤野恵子, 江原幸雄, 山中寿朗. 始良カルデラの熱構造. 日本地熱学会学術講演会, 2008/10, 金沢大学.
- Kimura, H., T. Yamanaka, J.-I. Ishibashi, S. Hanada. Culture-independent estimation of growth temperature of archaea in subsurface habitats based on G+C percent of 16S rRNA gene sequences. 7th International Symposium for Subsurface Microbiology. 2008/11, Shizuoka, Japan.
- 三好陽子, 石橋純一郎, 松倉誠也, 桑原義博, 大村亜希子, 前藤晃太郎, 千葉仁, 山中寿朗. 鹿児島湾若尊火口熱水域における堆積物中の熱水変質反応. ブルーアースシンポ

ジウム, 2009/03, 立教大学.  
山中寿朗, 前藤晃太郎, 赤司裕紀, 三好陽子,  
平尾真吾, 石橋純一郎, 岡村慶, 杉山拓,  
上嶋正人, 田中明子, 大村亜希子, 窪川か  
おる, NT08-17 乗船研究者. 鹿児島湾若尊火  
口底における熱水活動域の分布と熱水性  
沈殿物の特徴 (速報). プルーアースシン  
ポジウム, 2009/03, 立教大学.

[その他]

○プレス発表

本研究を実施した調査航海中に、鹿児島湾  
若尊海底火山において高温熱水噴出孔を発  
見した件について、2007年9月20日に、岡  
山大学、東京大学、九州大学他連名でプレス  
発表を行った。

翌9月21日付の新聞報道として、毎日新  
聞、朝日新聞、および時事通信の配信により  
日本経済新聞、日本工業新聞、さらに南日本  
新聞などの地方紙に多数掲載された。これに  
加え、2007年10月19日NHK放送総合チ  
ャンネル「お元気ですか日本列島」内での放  
映もあった。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石橋 純一郎(ISHIBASHI JUN-ICHIRO)  
九州大学・大学院理学研究院・准教授  
研究者番号：20012920

(2) 研究分担者

山中 寿朗(YAMANAKA TOSHIRO)  
岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授  
研究者番号：60343331

江原 幸雄(EHARA SACHIO)  
九州大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号：10002346  
(2007年度のみ)

木村 浩之(KIMURA HIROYUKI)  
静岡大学・理学部・助教  
研究者番号：30377717  
(2007年度のみ)

(3) 連携研究者

江原 幸雄(EHARA SACHIO)  
九州大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号：10002346  
(2008年度のみ)

木村 浩之(KIMURA HIROYUKI)  
静岡大学・理学部・助教  
研究者番号：30377717  
(2008年度のみ)

(4) 研究協力者

藤野 恵子(FUJINO KEIKO)  
九州大学・大学院工学府・大学院学生

中島 美和子(NAKASEAMA MIWAKO)  
九州大学・理学部・博士研究員