

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月27日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22403001

研究課題名（和文）沿岸性海底熱水噴出の実態解明と海洋酸性化・肥沃化への影響評価

研究課題名（英文）Shallow water submarine hydrothermal activity: a case study in the assessment of ocean acidification and fertilization

## 研究代表者

張 勁 (ZHANG, JING)

富山大学・理工学研究部（理学）・教授

研究者番号：20301822

研究成果の概要（和文）：沿岸性海底熱水活動（SWH）は、その周辺海域に酸性化と鉄供給をもたらし、生物基礎生産の観点からは相反する効果が予想される。本研究では、最近、台湾北東沿岸域で見いだされた SWH 域を、生物基礎生産への影響の検証に絶好の実験フィールドとして SWH が環境に及ぼす影響を評価することを目的とした。熱水や熱水噴出口周辺海水の地球化学特性により、高温（80-110℃）かつ強酸性（pH, 2.1-3.5）の SWH はマントル起源の火山ガス噴出に伴い、1km 四方の海洋表層水に影響を及ぼしている；また、通常海水に比べ、有光層に SWH から高濃度の Si と P、特に Mn と Fe が供給され、同緯度海域に比べ数十～数百倍高いクロロフィル分布をもたらすことを明らかにした。SWH は天然の「海洋酸性化」と「栄養塩・微量元素供給」として、複合的に周辺海域の一次生産に大きく寄与していることが自然界において初めて発見された。また、薩摩硫黄島など日本周辺比較海域や台湾東沖における広域海洋観測により、SWH に伴う物質供給と周辺環境への影響について実態解明が進んだ。

研究成果の概要（英文）：Most natural Shallow Water submarine Hydrothermal activates (SWH) along coastlines are related to hydrothermal eruptions involving heating of groundwater with volcanic gas. These SWHs supply nutrients to the euphotic zone, contributing to the overall natural fertility and primary productivity of coastal waters. However, SWHs also disperse toxic materials such as mercury and arsenic, and affect the acidification. We evaluate the impact of "nutrient supply" and "ocean acidification" on the primary production over the last three years in a coastal marine environment, at a SWH area discovered off Gueshanda Island, northeast Taiwan. The two types of hydrothermal vents are differentiated by color, yellow hot spring water with higher temperature >110 °C ejected from sulfur chimneys of various sizes, and colorless water with lower temperature ~80 °C ejected directly from the crevices of the andesitic bedrock. The ratios N<sub>2</sub>/Ar and <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He suggest that these volcanic gases are mantle-derived. Hydrothermal fluid with pH between 2.1-3.5 erupts from the vents and affects ocean surface waters up to 1 km way. Relative to normal seawater, water around the SHW site has higher concentrations of nutrients Si and P, and micro nutrients Mn and Fe. Chlorophyll a shows high values of several tens to hundreds times greater than normal. We find for the first time in nature that SHW enhances the growth of phytoplankton and contributes to the primary productivity of the surrounding waters.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2011年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2012年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000

年度			
年度			
総計	13,800,000	4,140,000	17,940,000

研究分野：数物系科学A

科研費の分科・細目：環境動態解析

キーワード：沿岸性海底熱水 海底湧水 海洋酸性化 海洋肥沃化 台湾亀山島

### 1. 研究開始当初の背景

海洋酸性化に伴う海洋表層生物活動の非活性化により、地球温暖化に拍車がかかることが懸念されている。一方、海洋の生物学的炭素循環の原点となる植物プランクトンの光合成には、窒素とリン等の栄養塩の他に、微量栄養素である鉄が極めて重要である。現在、海洋酸性化や鉄散布海洋肥沃化など、海洋環境変化に伴う諸問題の解決が、強く求められている。

一般的に、浅海域において噴出する沿岸性海底熱水 SWH の大部分は、陸上の地下水系と連動し、火山ガスとの相互作用によって加熱され噴出したものと考えられる。SWH は強酸性のものが多く、鉄(通常海水の～百万倍)などの重金属を大量に含んでいるとともに、沿岸海底地下水 SGD と同じく高栄養塩の性質も持っている。SWH の噴出は、天然の肥沃源としてリン・窒素及び鉄等の微量栄養素を絶えず有光層に供給して、沿岸の基礎生産に貢献する。しかし、その一方で、周辺海域の酸性化促進やヒ素・水銀など有害元素の散布という負の影響を及ぼす側面も有しており、その実態解明が急務である。

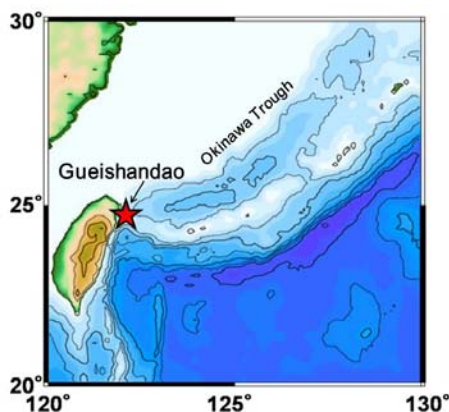


図1. 台湾亀山島

台湾本島北東部の沖合い 9.76km に、周囲約 10km の亀山島がある。亀山島周辺の水深 10~30m に 40 個近い噴出口があると報告されている。そのうち水深 13m にある高さ 7m 級チムニーから、温度 92~116°C, pH1.52 (世界で最も低い) の黄色い熱水が 158 トン/時の勢いで噴出している。SWH は局所的でありながら、水深十数mの海底から高温・高濃度の

熱水が噴出しているため容易に海洋表層に達し、拡散速度も高く、広範囲にその影響を及ぼす可能性がある。このように、SWH はその周辺海洋環境に酸性化負荷を増す反面、鉄などの供給によって基礎生産を促進している可能性もあることから、広範囲の海洋環境における SWH の影響評価は極めて意義が大きい。本研究は、台湾北東沿岸で観測された SWH 噴出域をモデルフィールドとして、天然の「海洋酸性化」と「鉄供給」の両面が環境に及ぼす影響を評価しようとするものである。

### 2. 研究の目的

地球規模で顕在化する気候変動に関連し、海洋の酸性化が大きな問題としてクローズアップされており、酸性化に伴う植物プランクトンや珊瑚類等の減少は、海洋の CO<sub>2</sub> 吸収能力を著しく低下させ、地球温暖化に拍車がかかることが懸念されている。また近年、海洋での生物生産に関して鉄が制限要素となっていることが指摘され、海洋での鉄散布実験が注目を集めている。一方で、天然海域においてしばしば観測される沿岸性海底熱水活動は、その周辺海域に酸性化と鉄供給をもたらし、生物基礎生産の観点からは相反する効果が予想される。本研究では、最近、台湾北東沿岸域で見いだされた SWH 域を、生物基礎生産への影響の検証に絶好の実験フィールドとしてとらえ、天然の「海洋酸性化」と「鉄供給」が環境に及ぼす影響を評価する。同時に、それを地球規模でみたとき、沿岸性熱水活動が地球温暖化に及ぼす影響を見積もることを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究は、台湾亀山島東方沖の特異な沿岸性海底熱水噴出域をモデル海域として、海底熱水の起源と噴出メカニズムを明らかにし、有光層における窒素・リンなどの主要栄養塩や鉄の分布・変化の実態を把握すると同時に、広域での現場海洋観測で得られたクロロフィル分布を組み合わせ、沿岸性海底熱水噴出の実態解明と海洋酸性化・肥沃化の学際的な影響評価を目的としている。具体的に以下3つのケーススタディーを遂行した。

ケーススタディー1：

台湾北東沿岸域の SWH 熱水噴出口周辺の水塊構造や海水の化学特性のモニタリング；

ケーススタディー 2：

台湾北東沖 SWH 海域における「海洋酸性化」と「栄養塩・微量元素供給」の実態と、周辺海洋環境に及ぼす影響の把握；

ケーススタディー 3：

日本周辺比較海域や台湾東沖における広域海洋観測により、SWH に伴う物質供給と周辺海洋環境への影響評価；

#### 4. 研究成果

台湾亀山島東方沖の沿岸性海底熱水活動及びその周辺海域を中心に、観測調査から次の結果が得られた。

① SWH は個々の噴出口で温度が異なり、目視により黄泉 (>110°C)・白泉 (>80°C)・ガス泉の 3 種類に分類でき、噴出口付近では単体硫黄の豆石が一面に堆積していた (図 1；表 1)；

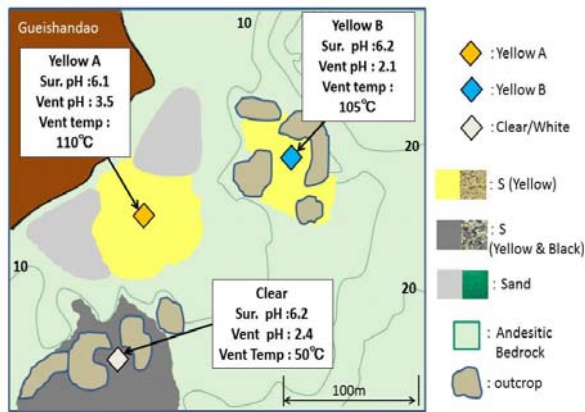


図 2. 熱水噴出口周辺のマッピング

② ビデオカメラにより、単体硫黄流体が噴出に伴って海底近くまで上昇し、海水により冷却され凝固される映像が撮影できた；また、③ 間欠泉のような突発的大規模爆発が調査中に観測された。噴出口内熱水及び周辺の海

Vent	Yellow A	Yellow B	Clear
Photo			
Depth	8 m	13 m	17 m
Temp	110 deg C	105 deg C	50 deg C
Vent pH	3.5	2.1	2.4
sediment			

表 1. チムニーと噴出物の特性

水の水温・pH や酸素・水素・塩素・硫黄同位体組成、主要化学成分、及び主要ガス成分 (N<sub>2</sub>/Ar など)・希ガス (<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He) 同位体組成分析の結果から、熱水に伴い噴出する単体硫黄は、海底深部マグマ起源であることが示唆された。

また、④ 熱水噴出域で採取した海水試料は、周辺海域に比べて栄養塩(ケイ素・リン)やクロロフィル a 濃度が高く、熱水は、噴出口周辺海域の基礎生産に寄与していることが実測で示された；⑤ 1km 四方の観測海域に pH 値の低い表層・中層海水が広く分布し、Li, Mn, Fe 等が高い値を示すことが分かった。

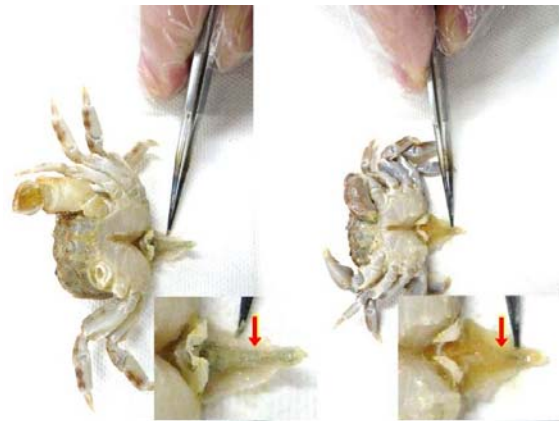


図 3. 熱水噴出口周辺に生息するカニ (矢印は肛門)

更に、⑥ 噴出口付近で採取したカニの鰓から、硫黄酸化細菌や深海底生物外部共生菌が確認された。これは、有光層にある熱水噴出口周辺に棲息するカニが、硫黄・硫化水素に富む棲息環境に適応して細菌を共生させていると推測した。

最終年度は台湾亀山島周辺海域の台湾政府による管制制度が変わり、東方沖の沿岸性海底熱水活動及びその周辺海域は調査が困難になった。そこで、これまで観測した台湾亀山島東方沖の他に、比較海域として薩摩硫黄島・鹿児島湾若尊カルデラなどで、学術研究船「淡青丸」KT-12-12 次航海に参加し、観測を行った。その結果、熱水域周辺の水塊構造や海水の化学特性をモニタリングし、熱水の周囲海水への混合・拡散状況を把握した。

具体的に、① CTD, pH センサーの観測結果から、塩分が低下している水塊と、各観測点において pH の低下が確認され、この海域へ温・低塩分かつ低 pH 海水の移流が判明した；また、② CTD フレームに取り付けている粒度分布計 LISST-100X (Sequoia Scientific 社) の結果より、粒子径が 35.41 μm から 500 μm の粒子が水深 140~200 m まで多く分布し、同密度面に沿って移流していることがわかった (図 4)。薩摩硫黄島に温泉 (硫酸酸性、低塩分) が多数存在することから、海底においても性質に近い温泉水の湧出が示唆され

た。海水密度差より湧出水深を概算し、ADCPと海底地形データと合わせて湧出海域が推

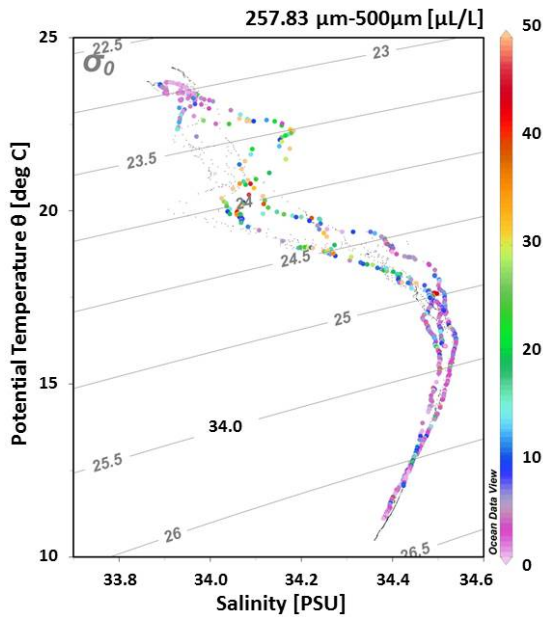


図4. 薩摩硫黄島周辺の塩分・水温分布図

測できた (図5)。

③ 採取された海水試料中のアルカリ度を分析し、調査海域の二酸化炭素分圧、溶存無機炭素量を算出した；海底温泉による低 pH 水の周囲海水への混合・拡散とその変動を明らかにし、海底温泉起源水塊の影響は広範囲に

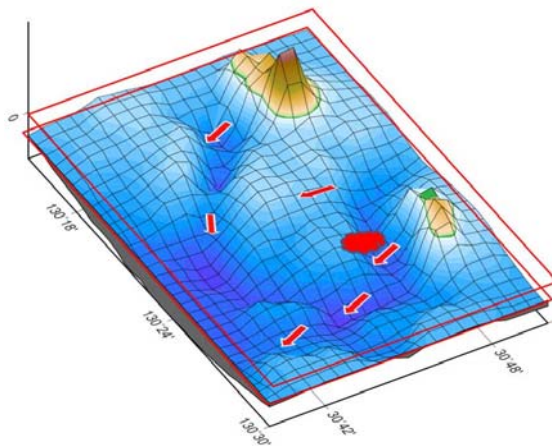


図5. 薩摩硫黄島周辺の海流 (水深140m) と海底温泉湧出域 (赤色) の推測

及んでいる可能性が示唆された。

更に、国立台湾大学海洋研究所の研究船「海研1号」を用いた台湾東沖における広域海洋観測で、黒潮表層水、黒潮熱帯水、黒潮中層水の3つの水塊が確認でき、台湾亀山島沿岸海水の上流海域での基礎データと海水試料の入手ができた。台湾亀山島沿岸海水の下流域での観測調査結果と比較し、今後、広域におけるSWHに伴う物質供給・循環と周辺

海洋環境への影響についてデータ蓄積とモデル解析が期待される。

## 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13件)

- ① M. Hatta and J. Zhang, Temporal changes and impacts of submarine fresh groundwater discharge to the coastal environment: A decadal case study in Toyama Bay, Japan, *J. Geophys. Res: Oceans*, 0, 2013, in press, (査読有)
- ② Asai, K., Zhang, J., Asai, K., Mogi, K., Wilson, Y. F., and Mandal, A. K., Development of an in situ sampler of submarine springs for the analysis of CFCs and SF6, *Geochem. J.* 2013, in press, (査読有)
- ③ Mst. S. Nahar and J. Zhang, Recovery of trace metal isotopes in seawater samples using multifunctional Neem (*Azadirachta indica*) biosorbent: a comparison with monofunctional NOBIAS-Chelate-PA1 resin, *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 1(5), 488-495, 2013 (査読有)
- ④ J. Zhang and A. K. Mandal, Linkages between submarine groundwater systems and the environment., *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4, 219-226, 2012 (査読有)
- ⑤ Mst. S. Nahar and J. Zhang, Impact of natural water chemistry on public drinking water in Japan, *Environ. Earth Sci.* 69 (1), 127-140, 2012 (査読有)
- ⑥ Mst.S. Nahar and J. Zhang, Assessment of sources variation in potable water quality including organic, inorganic and trace metals, *Environmental Geochemistry and Health, Environ. Geochem. Health*, 34, 141-150, 2012 (査読有)
- ⑦ Agata, S., Ishiki, M., Sakihama, H., Tokuyama, A., Satake, H. and Zhang, J., Characteristics of the chemical composition of groundwater on Tanegashima, Yakushima, and Nakanoshima islands, *J. Groundwater Hydro.*, 4(4), 191-206, 2012 (査読有)
- ⑧ A. K. Mandal, J. Zhang, and A. Kazuyoshi, Stable isotopic and geochemical data for inferring sources of recharge and groundwater flow on the volcanic island of Rishiri, Japan, *Applied Geochemistry*, 26, 1741-1751,

- 2011 (査読有)
- ⑨ A. K. Mandal and J. Zhang, Climate change and the future of freshwater resources of the island: A case study on the Rishri Island, Japan, Environmental Earth Sciences, Doi 10.1007/s12665-011-1340-1, 08.31, 2011, (査読有)
- ⑩ Mst. S. Nahar and J. Zhang, Concentration and distribution of organic and inorganic water pollutants in Eastern Shizuoka, Japan, Toxicological and Environmental Chemistry, 93, 1946-1955, 2011 (査読有)
- ⑪ S. Agata, H. Satake and J. Zhang, Isotopic characteristics of hydrogen and oxygen for groundwater of nansei islands, Japan, Radioisotopes, 60(5), 203-213, 2011 (査読有)
- ⑫ P.-O. Persson, P.-S. Andersson, J. Zhang and D. Porcelli, Determination of Nd isotopes in water: A chemical separation technique for extracting Nd from seawater using a chelating resin, Analytical Chemistry, 83, 1336-1341, 2011 (査読有)
- ⑬ S. Agata, Y. Ishizumi, M. Noto, D. Handa, T. Arakaki and J. Zhang, Water chemistry associated with the formation of Tufa along the Fumida River, Ishigaki Island., J. speleo. Soc. Japan, 36, 38-60, 2011 (査読有)

[学会発表] (計18件)

- ① 張勁, 藤城義久, 亜表層クロロフィル極大層(SCM)の東シナ海全体の基礎生産に対する寄与, 九州大学応用力学研究所共同利用研究集会 東シナ海の循環と混合に関する研究, 2013年2月, 福岡
- ② Mst. S. Nahar and Zhang, J., Natural Sources and Thresholds of Taste and Health in H<sub>2</sub>-rich Drinking Water, Ninth International Conference on Environmental, Cultural, Economic and Social Sustainability, Conference, Jan. 2013, Hiroshima
- ③ J. Zhang, K. Yoshida, T. Hagiwara, K. Nagao, M. Kusakabe, B.-J. Wang, C.-T. A Chen, Shallow water submarine hydrothermal activity - A case study in the assessment of ocean acidification and fertilization, 2012 AGU Fall Meeting, Dec. 2012, San Francisco.
- ④ J. Zhang, Possible origins of nutrients in the bottom water on the outer shelf of East China Sea., The 6th Program of the East Asian Cooperative Experiments(PEACE) Ocean Science Workshop and the 9<sup>th</sup> Korea-Japan Workshop on Ocean Color (K JWOC), Nov. 2012, Nagoya.
- ⑤ Y. Fujishiro, J. Zhang, T. Matsuno, J. Ishizaka, An assessment of dissolved oxygen concentration in the East China Sea, The 6th Program of the East Asian Cooperative Experiments(PEACE) Ocean Science Workshop and the 9<sup>th</sup> Korea-Japan Workshop on Ocean Color (K JWOC), Nov. 2012, Nagoya.
- ⑥ K. Jiang, J. Zhang, The relationship between nutrients in pore water and low dissolved oxygen concentration in bottom water in the East China Sea, The 6th Program of the East Asian Cooperative Experiments(PEACE) Ocean Science Workshop and the 9<sup>th</sup> Korea-Japan Workshop on Ocean Color (K JWOC), Nov. 2012, Nagoya.
- ⑦ 藤城義久, 張勁, 松野健, 石坂丞二, 最近10ヶ年の東シナ海現場観測結果からみる Chl. Max 水塊の分布と基礎生産の推定, 2012年度地球化学会年会, 2012年9月, 福岡
- ⑧ J. Zhang, A. K. Mandal and MS. Nahar, Global Nutrient and Carbon Fluxes and Linkages Between Submarine Groundwater Systems and the Environment., 2012 ASLO Aquatic Sciences Meeting, Jul. 2012, Shiga.
- ⑨ Mst. S. Nahar and Zhang, J., Toxic Trace Metals Isotopes Sources: A Case Study from Natural Water Sources, Eastern Shizuoka, Japan, WET 2012, Water and Environment Technology, Jun. 2012, Tokyo
- ⑩ 太田朋子, 張勁, 稲村修, 伊串祐紀, 藤島裕, 富山湾沿岸海底湧水の栄養塩供給による基礎生産への影響, 2012年度日本海洋学会春季大会, 2012年3月, つくば.
- ⑪ 張勁, 宗林由樹, 国際 GEOTRACES 計画の動向, 2012年白鳳丸クリーン観測による微量元素, 同位体研究の現状と展望 (GEOTRACES 計画), 2012年3月, 千葉
- ⑫ 張勁, 藤城義久, 松野健, 最近10ヶ年の東シナ海観測結果からみる低酸素水塊及び Chl<sub>a</sub>-max 水塊の挙動, 東シナ海の循環と混合に関する研究, 九州大学応用力学研究所共同利用研究集会, 2012年2月, 福岡
- ⑬ 太田朋子, 張勁, 稲村修, 伊串祐紀, 富山湾沿岸海底湧水の基礎生産への寄与 - 片貝川扇状地におけるケーススタディー, 2011年度日本地球化学会年会, 2011

- 年9月, 札幌
- ⑭ 丹下佑美子, 木下真孝, 成田尚史, 張勁, 富山麓湧水の水質について, 2011年度日本地球化学会年会, 2011年9月, 札幌
  - ⑮ J. Zhang, L.-L. Bai, and S. Kagaya, Fluxes of trace elements in fresh submarine groundwater discharge in the coastal environment using the CM-PEHA resin preconcentration method., International Congress on Analytical Sciences 2011 (ICAS2011), May, 2011, Kyoto
  - ⑯ Zhang, J., Role of suspended sediments and bottom boundary layer: chemical and biological role of the suspended particles., Workshop on the vertical processes in the shelf region of the East China Sea”, Feb. 2011, RIAM, Kyushu University, Fukuoka
  - ⑰ Zhang, J., Bai, L.-l., and Matsuno T., High-nutrient/low-salinity water in the East China Sea and its possible Source., 5th PEACE Workshop, 2010., May, 2010, Korea
  - ⑱ Mst. S. Nahar, J. Zhang, Assessment of Sources Variations in Potable Water Quality Model Including Organic, Inorganic and Trace Metals Constituents, 17<sup>th</sup> Asian symposium on eco-technology, Nov. 2010, Kurobe

[図書] (計1件)

- ① 張勁, 海底湧水 (Submarine groundwater discharge), 「地球と宇宙の化学事典」, 朝倉書店, 2011

[その他]

番組紹介, 「水を追って」, 「とやま水・文化の財団 Presents」, 富山テレビ, 放送日: 2012年3月24日 16:27-16:54

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

張 勁 (Zhang, Jing)  
富山大学・大学院理工学研究部 (理学)・教授  
研究者番号: 20301822

### (2) 研究分担者

日下部 実 (Kusakabe, Minoru)  
富山大学・大学院理工学研究部 (理学)・客員教授  
研究者番号: 20015770

### (3) 連携研究者

石橋 純一郎 (Ishibashi, Junichiro)

九州大学・理学研究科・准教授  
研究者番号: 20212920

石坂 丞二 (Ishizaka, Joji)  
名古屋大学・地球水循環研究センター・教授  
研究者番号: 40304969

郭 新宇 (Guo, Xinyu)  
愛媛大学・沿岸環境科学研究センター・准教授  
研究者番号: 10322273