

機関番号：35302

研究種目：基盤研究 (A)

研究期間：2008～2010

課題番号：20244087

研究課題名 (和文) 高圧・超高压変成岩の高精度高精度アルゴン年代学

研究課題名 (英文) Precise and reliable argon geochronology of high- and ultra high-pressure metamorphic rocks

研究代表者

板谷 徹丸 (ITAYA TETSUMARU)

岡山理科大学・自然科学研究所・教授

研究者番号：60148682

研究成果の概要 (和文)：高圧及び超高压変成岩の変成作用とその後の上昇冷却過程を明らかにするための基礎的な研究を実施した。そのために UV レーザープローブ Ar-Ar 法を用いた微小部年代測定装置の立ち上げを実施した。既存の装置と併用した分析から、太平洋型造山帯における高圧変成帯の地質構造-温度構造-白雲母年代の関係を明らかにした。その結果、二つの異なる上昇過程を見いだした。この違いは沈み込む海洋プレート境界の性質の違いに起因すると解釈した。

研究成果の概要 (英文)：Basic research was carried out to reveal the metamorphism and the subsequent exhumation process of high and ultra-high pressure metamorphic rocks. In a part of the achievement, we set up the micro-probe Ar-Ar facilities equipped with UV laser. With analyses using the new facilities and the conventional ones, we examined the relationships among geological structure, thermal structure and phengite ages of the high-pressure metamorphic belts in Pacific type orogenic belt. This approach revealed two different exhumation processes of the belts. We interpreted the differences are due to the natures of oceanic plate boundaries that subduct into the deeper part of subduction zone.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	30,500,000	9,150,000	39,650,000
2009 年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
2010 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
総計	38,800,000	11,640,000	50,440,000

研究分野：地質・岩石年代学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：高圧・超高压変成岩, 海洋性物質起源, 変成作用, 変形作用, 沈み込み帯, 上昇過程, 白雲母アルゴン年代学, アルゴン離散

1. 研究開始当初の背景

超高压変成岩類では過剰アルゴンの存在のために K-Ar (Ar-Ar) 年代に不一致が生じることが多かった。特に、超高压変成岩として世

界で初めて認知された西アルプス・ドラマイラ岩体では多くのアルゴン年代研究者が挑戦してきたが結局何も分からないままであった。三波川高圧変成帯では変成温度が高くなると

年代が古くなることや岩石の種類によって年代の不一致が生じることが知られていた。

研究代表者はかつて変成岩類などの年代に関する問題点を解説した邦文を発表した。その後共同研究者との連携で問題の一部はかなり理解が進んだ。西アルプスのピエモンテ帯チニャーニャ湖地域の海洋性物質起源の超高压変成岩は過剰アルゴンを持たないフェンジャイトを形成することを示した。その結果、ドラマイラ岩体問題はその原岩がアルプス変動以前に形成された大陸地殻断片が超高压変成作用を被ったが構成鉱物のフェンジャイトの K-Ar 系が完全にリセットしなかった点にあると結論された。

西南日本周防変成帯での横方向の年代変化に関しての研究は上昇時の変形作用の違いがフェンジャイトからのアルゴン離散の違いを生じさせる要因であることを議論した。しかしながら、未だ多くの問題が残っていた。

2. 研究の目的

高压及び超高压変成岩類は海洋プレートの沈み込み帯深部で形成されることは良く知られている。その変成岩類は海嶺の沈み込みに関連して上昇することも理解されてきた。これらの変成岩類のピーク変成作用の年代はジルコンの内部構造（包有物など）を詳しく検討した上での SHRIMP を用いた U-Pb 年代測定によって推定されてきた。その冷却年代は白雲母（フェンジャイト）のアルゴン年代測定によって議論されてきた。しかしながら、変成帯の沈み込み及び上昇過程の詳細は未だ充分理解されていない。本研究では高压及び超高压変成岩類の沈み込み及び上昇冷却過程を明らかにするための基礎的な研究を実施し、高压及び超高压変成岩類の高精度高確度アルゴン年代学を確立することを主目的とする。確立した手法を用いて、変成岩の累進変成作用時期から後退変成作用までの時間的推移を定量的に求め、且つ、変成帯の横方向及び縦方向の年代の違いを含めて変成帯のテクトニクスを明らかにする。

3. 研究の方法

過剰アルゴンを持たない海洋性物質起源の高压及び超高压変成岩類を採集し、ザクロ石に包有された白雲母（フェンジャイト）とマトリックスのフェンジャイトの Ar-Ar 点年代測定を実施する。それによって、上昇冷却時の変形作用によってフェンジャイトの見かけ上の閉止温度の低下（変形作用によるアルゴンの離散が原因）をもたらしことを証明す

る。

角閃岩類等の塩基性岩の角閃石組成累帯構造について EMP を用いた組成像（カラーマップ）で確認する。その上で、組成の異なる部分の点年代測定を実施し、累進変成作用から後退変成作用までの時間変化を捉える。

この種の点年代測定にはレーザービーム径が 5 ミクロン以下に絞れるパルスレーザー装置が必要である。しかしながら、5 ミクロンサイズのレーザーから抽出される測定アルゴンガス量は用いる質量分析計の検出感度限界ぎりぎりの可能性がある。そこで、累帯構造の同一組成を持つ部分を複数箇所照射してガス量を増やす工夫が必要となる。そのために、EMP によるカラーマップイメージとパルスレーザーを用いた点年代測定装置との画像を完全に同期させる技術の開発が必要となる。

ビーム径を 5 ミクロンまで絞れる UV レーザーアブレーションシステムを実際に分析試料に適用する場合困難な問題が生じることがある。それは既存の CCD カメラでの観察では 5 ミクロンの場所を正確に決めることが難しい点である。そこで、顕微鏡写真による組成累帯構造イメージや EMP によるカラーマップイメージをコンピューター画面で見ながら 5 ミクロンサイズのビームを目的とする分析位置に当てる装置を開発する必要がある。

4. 研究成果

1) UV レーザーアブレーションシステムによる微小鉱物の Ar-Ar 点年代測定

岩石薄片を使った分析を行う時、光学的拡大率が大きいためにいろいろな問題が生じる。光源の光量不足とコントラストの不足のためレーザーシステムの CCD カメラだけでは位置決めが非常に困難になる。

今回導入された UV パルスレーザーを使ったアブレーションシステムのブロックダイアグラムを図 1-1 に示す。

顕微鏡観察により基準点となる任意の 3 点 (x_{0i} , y_{0i} , z_{0i}) にレーザーでマーク（印）をつけ、これらの座標をエンコーダにより記録する。電子線マイクロプローブによる微小部分分析や岩石学的特徴により年代測定をする位置を決め、その位置をエンコーダによって読み取っていく。レーザーアブレーションシステムにセットされた薄片の 3 個の基準点の新しい座標の値 (X_{0i} , Y_{0i} , Z_{0i}) をパソコン画面上で読み取ることにより、エンコーダで記録した測定点の任意の座標値 (x , y , z) を新しい座標系での値 (X , Y , Z) に変換する行列 A を計

算することが出来る。

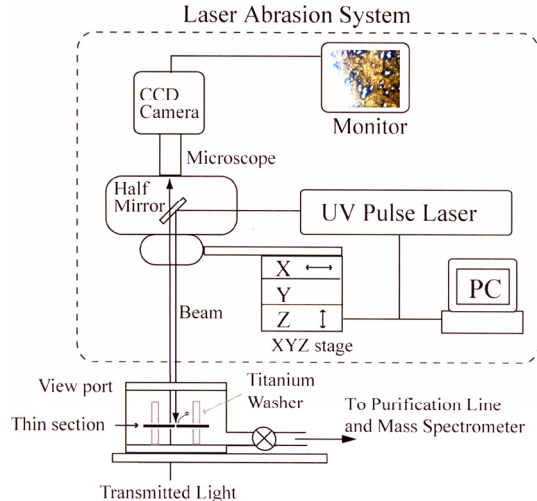


図 1-1 レーザーアブレーションシステムの概略図。ステージコントローラーは試料側でなく顕微鏡ヘッドが動くフローティングシステムになっている。

同じ方法で PC に取り込んだ画像の基準点を座標化することにより変換行列を計算し画像上の任意の点とレーザーシステムのステージを 1 対 1 対応で変換して連動させることができる。

穿孔されたレーザーピットの直径を $20\ \mu\text{m}$ 、深さを $10\ \mu\text{m}$ と仮定すると、熔融された角閃石の質量は約 $1 \times 10^{-14}\ \text{g}$ (100 ピコグラム) である。そこから得られる ^{40}Ar の量は約 $1 \times 10^{-20} \sim 10^{-22}\ \text{cm}^3\text{STP}$ である ($1 \times 10^{-6} \sim 10^{-8}\ \text{cm}^3\text{STP/g}$ を仮定)。通常の質量分析計では $1 \times 10^{-16}\ \text{cm}^3$ 前後が測定限界であるので、既存の質量分析計を使ってある程度の精度 (\pm 数%) で測定するためにはかなり感度を高めることが必要である。試料側の工夫としては穿孔の深さを増すことや累帯構造をもつ角閃石等の場合、成因が同じ部分を選んで多点分析として試料のサイズを増やすなどを実施している。

(2) 高圧及び超高压変成岩の白雲母年代学

まず、取り上げたのは西アルプス・ドラマイラ岩体での異常な不一致年代である。年代をコンパイルすると 25Ma から 630Ma であった。ドラマイラ岩体問題はその原岩がアルプス変動以前に形成された大陸地殻断片が超高压変成作用を被ったが構成鉱物のフェンジャイトの K-Ar 系が完全にリセットしなかった点にあるらしい。しかし、 600°C を超える変成作用を被った大陸地殻岩片の K-Ar 系が完全にリセットしなかったと思われぬ。そこで、ドラマイラ岩体から採集した超高压変成作用を被ったとされる変成花崗岩 (原岩

は Variscan 後期花崗岩とされている) の岩石学とアルゴン年代測定を実施した。

採取した変成花崗岩の構成鉱物は変成作用によって組成変化したと考えられる。カリ長石は火成岩組織を示している。そのカリ長石の K-Ar 年代は 43Ma であった。採取した原岩は Variscan の花崗岩 (300Ma) とされている。超高压変成岩のピーク年代 (35Ma) はジルコンの SHRIMP 年代による。それを信じれば過剰アルゴンが 2% あることになる。これはほとんど過剰アルゴンがないに等しい。今後は白雲母についても検討する予定である。

次に取り上げたのは西南日本白亜紀三波川高圧変成帯と三疊紀周防高圧変成帯である。ここでは白雲母 K-Ar 系年代と変成温度の相関を検討した結果、東西方向に 800km 以上離れた変成帯内では温度構造と年代の相関が逆転していることを見いだした。その主な要因として白雲母の塑性変形に着目し変成帯の横方向及び縦方向の年代と変成温度の相関を詳細に検討するとともに原岩の堅さによる違いを検討した。その結果、白雲母の塑性変形による動的再結晶作用と化学反応によって放射起源アルゴンが離散するプロセスを明らかにした。沈み込み帯深部で形成される高圧変成帯の上昇に伴って、変成岩は激しい塑性変形を経験し、白雲母も塑性変形を受ける。その結果、動的再結晶作用と化学反応が進行し、放射起源アルゴンは離散するプロセスが進行する。

変成帯全体の年代と温度の相関関係は低変成泥質片岩の脆性変形のスタートで決まる。脆性塑性境界温度は変成帯上昇時の変形歪速度に依存する。周防変成帯の西部に位置する石垣島に産する変成岩と東部に位置する錦町変成岩の変成温度と年代の関係から上昇冷却と白雲母 K-Ar 閉鎖系に関するモデル (図 2-1) が提案された。

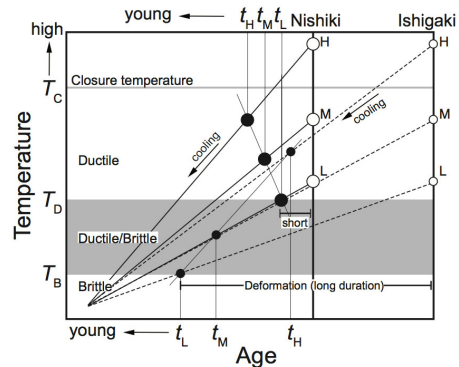


図 2-1 変成帯の上昇冷却と白雲母 K-Ar 閉鎖系に関するモデル

(3) 高压変成帯の上昇過程

最近、伝統的な三波川変成帯は二つの異なる高压変成帯（三波川高压変成帯と四万十高压変成帯）からなることが分かった。そこで、中部日本天竜地域三波川変成帯の白雲母 K-Ar 年代学を実施してきた。この地域は2つのユニット(Shirakura and Sejiri)に分けられている。2つのユニットから系統的に泥質片岩を採集し、その炭質物の XRD 解析と白雲母の K-Ar 年代測定を実施した。炭質物の XRD 解析結果から推測される変成温度と K-Ar 年代の関係を示したのが図 3-1 である。これによって、Shirakura ユニットと Sejiri ユニットは明らかに変成作用の年代は異なると言える。従って、前者は四国三波川高压変成帯に対比され、後者は関東山地四万十高压変成帯に対比される。

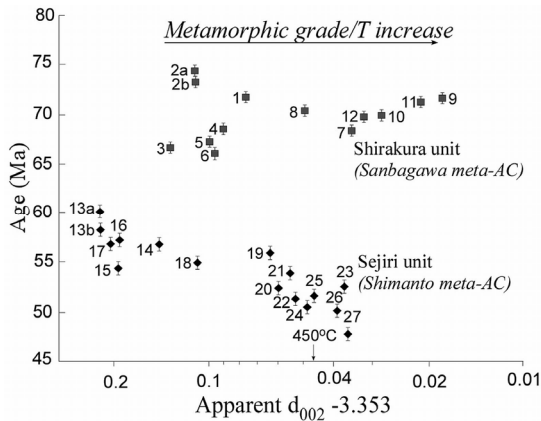


図 3-1 天竜地域の泥質片岩の温度と年代の関係

両者の地質学、岩石学、年代学的（上記の白雲母年代学を含む）な研究を整理すると次のような違いが見いだされた。両者の P-T-t 経路を纏めたのが図 3-2 である。前者の三波川高压変成帯では 300°C7Gpa から 700°C24 Gpa までの累進変成作用を被った。ピーク年代は 115-120Ma である。その後の上昇過程では沈み込み帯深部のエクロジヤイト相が優先的に上昇し、109-86M に後退変成作用を被った。さらに上昇過程ではより深部の高温変成岩が優先的に早く上昇した。この過程において激しい変形作用が 3100 万年以上も長く続いたことから白雲母からの放射起源アルゴンの離散が生じた。結果として変成温度と白雲母アルゴン年代との関係は正となった。一方、四万十高压変成帯では 200°C5Gpa から 550°C12Gpa までの累進変成作用を受けた。ピーク年代は 60-80 Ma であり、その後の上昇過程は速やかに進み、1300 万年間より短期間の変形作用で上昇が終了した。結果として、温度と年代の関係は負の構造を形成した。

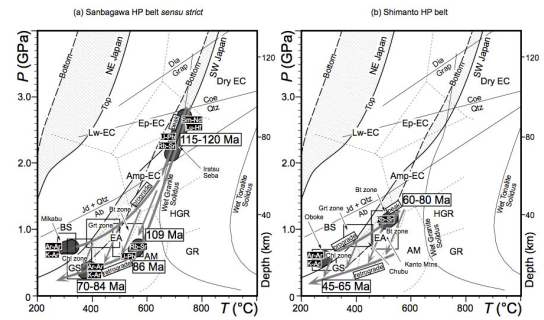


図 3-2 P-T-t 経路図

このような上昇過程のモデルを図 3-3 に示す。つまり、三波川高压変成帯と四万十高压変成帯は全く異なる上昇過程を経験している。先に述べたように、高压変成帯の上昇は海嶺（プレート境界）の沈み込みが起因する。このプレート境界の性質の違いが上昇過程を制御していると推測される。今後この問題を定量的に検討する必要がある。

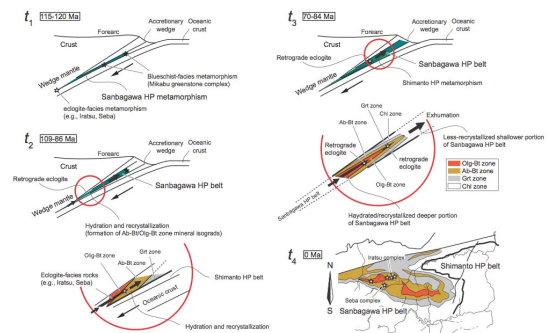


図 3-3 三波川高压変成帯の上昇モデル

(4) 過剰アルゴン波

東北日本の河川堆積物から藍晶石を分離し、そのアルゴン年代測定を実施した結果から驚異的な過剰アルゴンを検出した。年代計算すると 160 億年であり、宇宙の年代より古くなったのである。年代に意味は無いが、過剰アルゴン量としては $1.7 \times 10^{-3} \text{ccSTP/g}$ であった。

東チベットにおけるバロー型変成帯から系統的に採集した変成岩の白雲母アルゴン年代測定を実施した結果は図 4-1 のようになった。

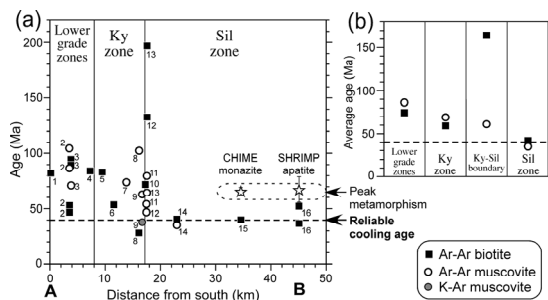


図 4-1 東チベットバロー型変成帯のアルゴン年代

図 4-1 から分かるように珪線石帯のアルゴン年代は約 40Ma であり、信頼のある冷却年代を示しているのに対してそれより低温側では年代がバラツキ且つ古い値を示す。これは西アルプスの Dora Maira 岩体に見られる過剰アルゴンによると思われる。しかし、藍晶石帯と珪線石帯との境界では異常に古い（冷却年代より 3 倍ぐらい）結果が検出された。何故、この狭い境界部分に異常な過剰アルゴンが存在するのかを検討した結果、図 4-2 に示すような過剰アルゴン波の発生が原因だとした。つまり、珪線石帯の白雲母が分解するときに保持していた放射起源アルゴンが離散し、過剰アルゴン波を発生したとした。その波が地表に向かって移動するときに変成帯全体の冷却に伴い、藍晶石帯と珪線石帯との境界付近の黒雲母にアルゴン波がトラップされたと解釈した。

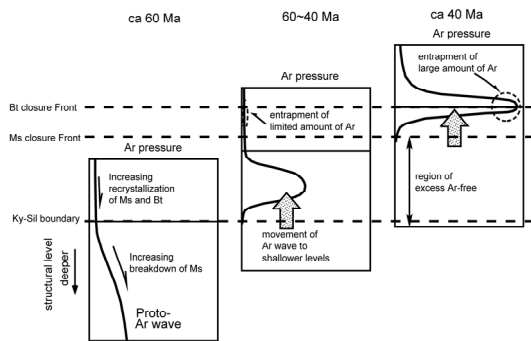


図 4-2 東チベットバロー型変成帯のアルゴン波発生と伝搬モデル

このような広域的なアルゴン波発生とその伝搬機構をモデル化したのは世界で初めてである。今後、変成帯のアルゴン年代学を実施するときはこの種のアルゴン波問題を考慮して取り扱う必要がある。

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 19 件)

(1) Maeda, J., Zeniya, R., Kuramoto, Y., Itaya, T. and Kagami, H. (2011) A procedure for calculating a consistent set of closure temperatures and cooling rate using Dodson's formula. *Journal of Geological Society of Japan*, 117 (2), 99-103.

(2) Nuong, N.D., Thanh, N.X., Gouzu, C. and Itaya, T. (2009) Phengite geochronology of the crystalline schists in the Sakuma-Tenryu district, central Japan.

Island Arc, in press.

(3) Itaya, T., Hyodo, H., Tsujimori, T., Wallis, S., Aoya, M., Kawakami, T. and Gouzu, C. (2009) Regional-Scale Excess Ar wave in a Barrovian type metamorphic belt, eastern Tibetan Plateau. *Island Arc*, 18, 293-305.

(4) Nuong, N.D., Itaya, T., Hyodo, H. and Yokoyama, K. (2009) K-Ar and $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ phengite ages of Sanbagawa schist clasts from the Kuma Group, central Shikoku, SW Japan. *Island Arc*, 18, 282-292.

(5) Nuong, N.D., Itaya, T. and Nishimura, Y. (2008) Age (K-Ar phengite) - temperature - structure relations: A case study from the Ishigaki high-pressure schist belt, southern Ryukyu Arc, Japan. *Geological Magazine*, 145, 677-684.

(6) Aoki, K., Itaya, T., Shibuya, T., Masago, H., Kon, Y., Terabayashi, M., Kaneko, Y., Kawai, T. and Maruyama, S. (2008) The youngest blueschist belt in SW Japan: Implication for the exhumation of the Cretaceous Sanbagawa high-P/T metamorphic belt. *Journal of Metamorphic Geology*, 26, 583-602.

[学会発表] (計 33 件)

(1) Itaya T and Tsujimori T (Invited): Geochronology of Sanbagawa metamorphic belt. 地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ, 2011年5月23日

(2) Itaya T and Nuong ND: Different exhumation processes of Sanbagawa and Shimanto metamorphic belts.

地質学会, 富山大学, 2010年9月

(3) Itaya T (Invited): Geochronology of Sanbagawa metamorphic belt.

地質学会, 岡山理科大学, 2009年9月

(4) 兵藤博信・板谷徹丸: レーザー加熱法による微小試料 $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ 年代測定 -段階加熱法と局所年代分析-

地質学会, 岡山理科大学, 2009年9月

(5) Thanh NX, Sajeew K, Itaya T.: Garnet - kyanite - staurolite gneiss in Pangong metamorphic complex, Ladakh Himalaya: New insights on tectonic setting. IAGR Annual Conference, Vietnam. October 2-6, 2009.

(6) Nakano N, Osanai Y, Owada M, Miyamoto T, Hokada T, Hayasaka Y, Minh NT, Adachi T and Itaya T.: Petrological and geochronological characteristics of Vietnamese metamorphic rocks. Precambrian

World 2009, Fukuoka, Japan. March 6-8, 2009.

(7) Itaya T (Invited): Metamorphic lithology with and without excess argon. Precambrian World 2009, Fukuoka, Japan. March 6-8, 2009.

(8) Nuong ND and Itaya T: Argon closure system of phengites in high-pressure schist belts, Japan: Implication of exhumation process.

AGU fall meeting, San Francisco, USA (December 15-19, 2008)

(9) Thanh XT and Itaya T: K-Ar age of Albite Porphyroblast from Basic schists in the Shyok suture zone, Ladakh Himalaya, NW India. 5th International Symposium on Gondwana to Asia & 2008 IAGR Annual Convension, Seoul in Korea, November 1-2, 2008

(10) Nuong ND, Thanh NX, Gouzu C and Itaya T: Phengite geochronology of Sanbagawa and Shimanto belts in Tenryu district, central Japan. 5th International Symposium on Gondwana to Asia & 2008 IAGR Annual Convension, Seoul in Korea, November 1-2, 2008

(11) Nuong ND and Itaya T: Phengite geochronology of the Sanbagawa and Suo metamorphic belts in SW Japan
鉱物科学会, 秋田大学, 2008年9月

(12) Nuong ND, Thanh NX, Imamura R and Itaya T: Phengite geochronology of Sanbagawa and Shimanto belts in Tenryu district, central Japan
地球惑星科学連合大会, 幕張, 2008年5月

(13) Itaya T and Nuong ND: Argon closure system of phengites in high - pressure schist belts, Japan: Implication for exhumation process

地球惑星科学連合大会, 幕張, 2008年5月

(14) Itaya T and Nuong ND (Invited): Argon closure system of phengites in high - pressure scshit belts, Japan. The 3rd COE-21 International Symposium, Misasa, Japan. March 2008.

[その他]

ホームページ等

<http://www.rins.ous.ac.jp/itaya/index.html>

<http://www.rins.ous.ac.jp/hyodo/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

板谷 徹丸 (ITAYA TETSUMARU)

岡山理科大学・自然科学研究所・教授
研究者番号: 60148682

(2) 研究分担者

兵藤 博信 (HYODO HIRONOBU)

岡山理科大学・自然科学研究所・教授
研究者番号: 50218749