

平成22年 5月31日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19540510

研究課題名（和文） 同位体と岩石熱力学を融合した花崗岩の成因解析

研究課題名（英文） Isotopic and geothermodynamic studies of the granitic plutons

研究代表者

壺井 基裕（TSUBOI MOTOHIRO）

関西学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：60411774

研究成果の概要（和文）：西南日本領家帯白亜紀神原トーナライトについて、アパタイトの Sr 同位体測定により岩体内での Sr 初生値の不均質性を明らかにした。この不均質は領家帯変成岩類の同化に起因し、母マグマと壁岩の混合比は天龍岩体で 3 : 7、下山岩体で 8 : 2 であった。天龍岩体は 0.15-0.40 GPa の圧力下で変成岩類を様々な程度に同化した可能性が高く、下山岩体では 0.16-0.44 GPa の圧力下で花崗岩マグマが変成岩をおおよそ 20% 程度同化し、均質化した後、定置したと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Strontium isotopic analysis of apatite was carried out for the Cretaceous Kamihara Tonalite, Ryoke belt, southwestern Japan. It provides direct evidence of SrI heterogeneity in the Kamihara Tonalite. The SrI heterogeneity was caused by the assimilation of high SrI country metamorphic rocks of the Ryoke belt. The original magma and the wall rocks were estimated to be mixed in the ratio 3:7 for the Tenryu area and 8:2 for the Shimoyama area. The effect of assimilation is more significant in the Tenryu area. The Kamihara Tonalite in the Shimoyama area was emplaced after the assimilation of wall metamorphic rocks to an extent of 20% and subsequent complete homogenization. These emplacements occurred under a pressure ranging from 0.15 to 0.44 GPa.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
2009年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：数物系科学

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：地殻・マントル・核・花崗岩

### 1. 研究開始当初の背景

地球科学、特に地質学や岩石学分野において、未解決の重要な問題として、大きさが数 km から 100 km におよぶ巨大な酸性火成岩体（花崗岩）の成因と、その周囲に分布する高温／低圧型広域変成岩類の上昇機構がある。本研究課題は、従来とは異なった視点から花崗岩の成因と変成帯の上昇機構を解明するために、花崗岩をターゲットとして代表者が独自に開発した「アパタイト Sr 初生値解析」と、これまで花崗岩にはほとんど適用されてこなかった「岩石熱力学解析」をリンクさせるという野心的な試みである。

### 2. 研究の目的

西南日本の領家帯は、典型的な高温低圧型の変成帯であるが、同時に大量の花崗岩類を伴う。これらの花崗岩類については、貫入相互関係と固結年代が詳しく研究されており、世界でも有数の花崗岩研究のフィールドである。個々の花崗岩体については、貫入相互関係と固結年代について詳しく研究がなされているが、花崗岩マグマの成因に関する研究や定置プロセスに関する研究例は非常に少ない。とくに、年代が決定されている花崗岩体の固結圧力を決定できれば、花崗岩定置プロセスの解明に重要なデータを提供できるだけでなく、周囲にある変成帯の「上昇機構」に「圧力と年代の制約条件」を与える。そこで、形成年代が詳しく分かっている中部地方の領家花崗岩類を年代のトレーサーとして、アパタイト Sr 初生値解析と固結圧力解析を行うことにより、領家花崗岩類のマグマ起源物質の時空変化と変成帯上昇機構に花崗岩が果たした役割を明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 野外調査ならびに試料採取

中部地方領家帯花崗岩類の神原トーナライトを対象として、野外調査ならびに試料採取を行った。また、比較対象として、同じ領家帯の花崗岩類である天龍峡花崗岩、市田花崗岩、太田切花崗岩、武節花崗岩、伊奈川花崗岩についても野外調査ならびに試料採取を行った。採取した試料は、偏光顕微鏡による岩石組織の観察や蛍光エックス線分析法による全岩主成分・微量成分化学組成測定、電子線プローブマイクロアナライザ(EPMA)による鉱物組成の測定を行った。アパタイト Sr 同位体分析用の花崗岩試料は、粉碎した後、水簸法ならびにアイソダイナミックセパレ

ータを用いてアパタイトを分離した。分離したアパタイトは陽イオン交換カラムにより Sr を分離した後、名古屋大学大学院環境学研究科に設置されている表面電離型-磁場型質量分析計 VG-SECTOR で  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  を測定した。

#### (2) 花崗岩定置圧力解析

EPMA による鉱物化学組成のデータならびに顕微鏡による鉱物組織観察から「地質学的温度圧力計」の適用を試みた。この方法により、神原トーナライト各岩体の圧力を解析した。この圧力を野外調査の結果と比較し、得られた圧力の妥当性について検討した。

### 4. 研究成果

#### (1) 地質ならびに岩石記載

神原トーナライトは白亜紀領家帯の東部に位置し、領家帯に伴う花崗岩類の中で最も古い年代を示すもののひとつである。長野県天龍地域（天龍岩体）から、愛知県下山地域（下山岩体）、幡豆地域（幡豆岩体）にかけて、数 km 以下から十数 km の小規模な岩体として不連続に点々と分布する（図 1）。

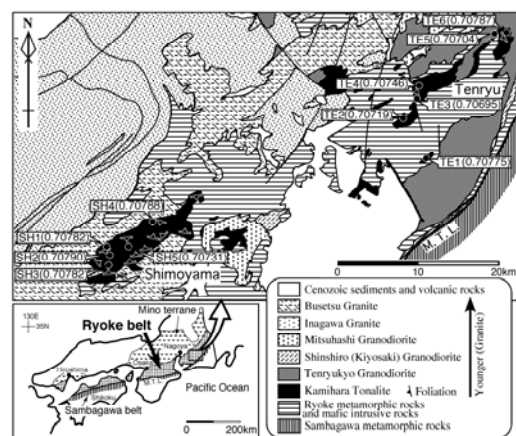


図 1. 神原トーナライトの地質図と試料採取地点。括弧内の数値はアパタイトの  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  同位体比を示す。地質図は地質調査所(1972)を一部改変。Tsuboi and Asahara (2009) Fig.1 より抜粋。

神原トーナライトは CHIME モナザイト年代で  $94.9 \pm 4.9$  Ma と  $94.5 \pm 3.1$  Ma (Nakai and Suzuki, 1996)、K-Ar 黒雲母年代で 67 Ma (Kawano and Ueda, 1966) が報告されている。神原トーナライトのうち、特に大規模に分布する天龍地域と下山地域における貫入形態は、下山地域ではストック状であるのに対し、天龍地域では周囲の領家変成岩類に指交的である。また、神原トーナライトは清崎花

崗閃緑岩、天竜峡花崗閃緑岩、武節花崗岩に貫入される。岩相は中粒のトーナライトで、よく発達した有色鉱物の定向配列によるフォリエーションに特徴付けられる。しばしば苦鉄質の包有物を含み、それぞれの包有物はフォリエーションに調和的に伸長する。下山岩体では、フォリエーションは岩体の外形に沿って、盆状構造を形成する。主要構成鉱物は、斜長石、石英、黒雲母、Ca角閃石、カリ長石である。また副成分鉱物として、イルメナイト、チタナイト、ジルコン、アパタイトなどを含む。

### (2)全岩化学組成

波長分散型蛍光エックス線分析法により測定した全岩化学組成は、下山岩体においてSiO<sub>2</sub>含有量は58.7から62.8wt%、天龍岩体において57.8から67.7wt%の範囲である(その他の全岩化学組成のデータはTsuboi and Asahara (2009) Table 1に記載)。全岩化学組成において下山岩体と天龍岩体に明瞭な差は認められない。各元素をハーカー図上にプロットすると、SiO<sub>2</sub>の増加とともにNa<sub>2</sub>OとRbは増加し、TiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeO、MnO、MgO、CaO、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>は減少、K<sub>2</sub>Oはほぼ一定である。

### (3)鉱物化学組成

角閃石は明瞭な累帯構造を示さず、粗粒結晶と長石に包有される細粒結晶の間に大きな組成差は認められない。幡豆地域の角閃石は、エデン閃石・ホルンブレンドからパーガス閃石(平均Si=6.4-6.5 pfu)であるのに対し、下山・天龍地域の角閃石は、よりSiに富む(アクチノ閃石質)ホルンブレンドである。地域間で黒雲母の組成に大きな違いは認められない(幡豆岩体: Si=2.7-2.8 pfu, Mg#[=Mg/(Mg+Fe)]=0.37-0.50, 下山岩体: Si=2.8 pfu, Mg#=0.45-0.50, 天龍岩体: Si=2.7-2.8 pfu, Mg#=0.41-0.50)。斜長石は試料ごとにAn10~15程度の組成変化を示し、平均Anは幡豆岩体 41-44, 下山岩体 34-44, 天龍岩体 42-49である。緑れん石族鉱物は、緑泥石とともに角閃石や黒雲母を置換し二次的に形成されたFeに富むグループ(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=16-18wt%, CaO=21-22wt%)と、半自形の独立結晶として斜長石中の包有物として産するグループに分けられる。後者はその周囲を幅 5-20μmのNa長石(An15-30)に縁取られることがあるが、変質を示す明瞭な組織は認められない。また、カリ長石を包有することがある。そして、マグマ起源とされる緑れん石と類似の累帯構造を示し、同一試料中に産する二次的緑れん石と比べるとFeに乏しい組織を有する(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=0.5-13wt%, CaO=23-24wt%) (榎本・榎並・壺井 (2007)として報告したものを引用)。

### (4)Sr 同位体分析

全岩、斜長石、角閃石、黒雲母から求めたRb-Sr全岩鉱物アイソクロン年代は、65.2±2.7 Ma, SrI=0.70794±0.00008である(図2)。この年代はCHIMEモナザイト年代である約95 Ma(Nakai and Suzuki, 1996)に比べて若い。K-Ar黒雲母年代(Kawano and Ueda, 1966)と調和的である。このサンプル(SH3)について、全岩鉱物アイソクロン年代から求めたSrI値 0.70794±0.00008 とアパタイトの<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比(0.70782±0.00003)は調和的であることから、神原トーナライトにおいてアパタイトの<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr同位体比は、Sr初生値を保持していると考えられる。同様に、他のサンプルにおいても、(SH1,2,4,5; TE1-6) 65 Maに補正した全岩<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr値とアパタイトの<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比が一致している。アパタイトの<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比は、天龍岩体で0.70695から0.70787, 下山岩体で0.70782から0.70790の範囲である(岩体中心部試料のSH5: 0.70731を除く)(図1)。アパタイトの<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比は天龍岩体では幅広い範囲を示すのに対し、下山岩体では比較的均質である。

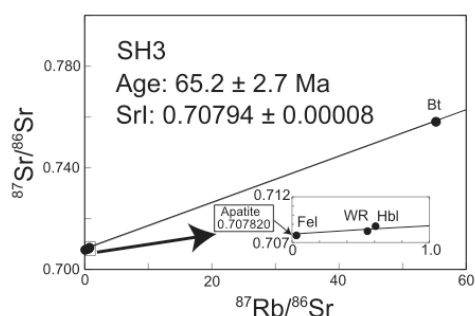


図2 .Rb-Sr 鉱物全岩アイソクロン図 Tsuboi and Asahara (2009) Fig.3 より抜粋。

### (5)定置圧力解析

電子プローブマイクロアナライザ分析による鉱物化学組成データから、連続反応  $Ed+4Qtz=Tr+Ab$ ,  $Ed+Ab=Ri+An$  (Holland and Blundy, 1994),  $Tr+Phl+2An+2Ab=2Prg+6Qtz+Kfs$  (Mäder and Berman, 1992)を用いて固結温度を見積もり、各岩体について以下の結果を得た。  
 幡豆岩体: 0.73 GPa/735°C - 0.77 GPa/750°C  
 下山岩体: 0.16 GPa/610°C - 0.44 GPa/650°C  
 天龍岩体: 0.15 GPa/610°C - 0.40 GPa/670°C (榎本・榎並・壺井 (2007)として報告したものを引用)

### (6)議論

#### ①同位体からみた起源マグマ

神原トーナライトにおいて、自形をしたアパタイトは黒雲母や角閃石に包有されており、マグマから直接晶出した初生鉱物である

と考えられる。よって Tsuboi and Suzuki (2003) や Tsuboi (2005) で用いられたアパタイト Sr 初生値解析法と同じく、神原トーナライトのアパタイトの Sr 同位体比はマグマの  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比を保持し、Sr 初生値を示すと考えられる。天龍地域では、アパタイトの  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比が大きく変化することから、Sr 初生値の不均質が起こったと考えられる。よって神原トーナライトと天龍峡花崗岩に報告された Rb-Sr 全岩年代である 110-265 Ma (Kagami, 1973) はエラークロン年代である可能性が高い。Sr 初生値の不均質の原因は母マグマ自体の不均質や壁岩の同化が考えられる (e.g., Schärer et al., 1984)。図 3 に神原トーナライトと壁岩である領家変成岩類 (65 Ma に補正) の  $\text{SrI}-1000/\text{Sr}$  プロットを示す。天龍岩体で SrI 値は (1000/Sr) 値の増加に伴い、領家変成岩類の値へ向かって直線的に増加することから、天龍岩体における SrI 値の不均質は壁岩である領家変成岩の同化による可能性が極めて高い。全岩化学組成の結果もこの可能性を支持する。

一方、下山岩体は Sr 初生値がやや高く ( $\text{SrI}=0.7079$ ) かつ均質であることから、花崗岩マグマが領家変成岩類を一部同化し完全に均質化した後に定置した可能性がある。単純な 2 成分の混合モデルにおいて、母マグマの SrI 値を 0.7069、Sr 含有量を 390 ppm、領家変成岩の SrI 値を 0.7174、Sr 含有量を 170 ppm と仮定すると、母マグマと変成岩の混合比は天龍岩体で 3 : 7、下山岩体で 8 : 2 となった。

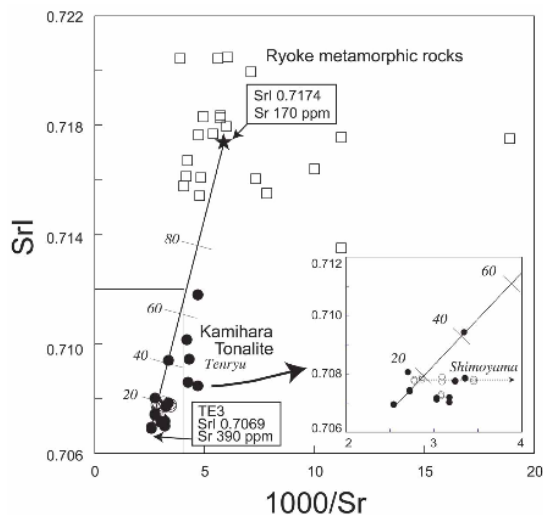


図 3. 神原トーナライトと領家変成岩における  $1000/\text{Sr}-\text{SrI}$  図 Tsuboi and Asahara (2009) Fig.5 より抜粋。

## ② 固結圧力条件の検討

圧力条件についてはさらなる検討を要するが、天龍岩体と下山岩体はほぼ同じような固結圧力条件 (0.15–0.44 GPa) を示し、同じような環境下で形成した可能性が高い。一方、幡豆岩体が、天龍・下山岩体に比べて、高い圧力条件を示すことはマグマ起源と考えられる初生的緑れん石が存在することと調和的である。幡豆岩体は、天龍・下山岩体とは異なった機構を経て定置した可能性が高い。

## (7) まとめ

中部地方領家帯神原トーナライトのマグマプロセスについて以下のことが明らかになった。(i) 神原トーナライトは大きく分けて幡豆、下山、天龍の 3 岩体として存在するが、定置圧力は幡豆岩体が最も高く (0.73-0.77 GPa)、下山と天龍岩体は大きな差が認められない (下山: 0.16-0.44 GPa 天龍: 0.15-0.40 GPa) こと、(ii) 領家変成岩類を様々な程度に同化した可能性が高いこと、(iii) 母マグマと変成岩の混合比は天龍岩体で 3 : 7、下山岩体で 8 : 2 であること、(iv) 下山岩体では Sr 初生値が母マグマより高く、かつ岩体内でほぼ均質であることから、花崗岩マグマが変成岩類をほぼ 20% 程度同化し、均質化した後定置した可能性が高いこと。また、領家帯花崗岩類における先行の同位体研究との比較から、Sr 初生値の岩体内不均質はほぼ普遍的に存在しており、その原因として (i) 起源マグマ自体の同位体不均質 (ii) マグマ混合 (iii) 変成岩類の同化の 3 種存在する。

## (8) 参考文献

- Holland, T. and Blundy, J. (1994) *Contrib. Mineral. Petrol.*, 116, 433-447.
- Kagami, H. (1973) *J. Geol. Soc. Japan*, 79, 1-10.
- Kawano, Y. and Ueda, Y. (1966) *J. Japan. Assoc. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, 56, 191-211.
- 榎本洋輔, 榎並正樹, 壺井基裕, (2007) 日本地質学会第 114 年学術大会講演要旨, 161.
- Mäder, U. K. and Berman, R. G. (1992) *Geol. Surv. Canada Paper*, 92-1E, 393-400.
- Nakai, Y. and Suzuki, K. (1996) *J. Geol. Soc. Japan*, 102, 431-439.
- Schärer, U., Hamet, J. and Allègre, C.J. (1984) *Earth. Planet. Sci. Lett.* 67, 327-339.
- Tsuboi, M. (2005) *Chem. Geol.*, 211, 157-169.
- Tsuboi, M. and Suzuki, K. (2003) *Chem. Geol.*, 199, 189-197.
- Tsuboi, M. and Asahara Y. (2009) *J. Mineral. Petrol. Sci.*, 104, 226-233.

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3件)

- ① Motohiro Tsuboi and Yoshihiro Asahara, Heterogeneity of initial  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio within the Kamihara Tonalite, Ryoke belt, southwest Japan: evidence from strontium isotopic study of apatite, *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 査読有, 104, 2009, 226-233.
- ② Takashi Agata, Mamoru Adachi and Motohiro Tsuboi, Greenstones in the Mino Paleozoic-Mesozoic terrane of the East Takayama area, central Japan: evidence for magmatism evolution from normal ridge to plume volcanism, *Journal of Geology*, 査読有, 117, 2009, 415-427.
- ③ Atsushi Miyamoto, Masaki Enami, Motohiro Tsuboi and Kazumi Yokoyama, Peak conditions of kyanite-bearing quartz eclogites in the Sanbagawa metamorphic belt, central Shikoku, Japan, *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 査読有, 102, 2007, 352-367.

[学会発表] (計16件)

- ① 西垣貴史, 壺井基裕, 京都府北部丹後地域における宮津花崗岩の地球化学的研究, 日本地質学会第116年学術大会, 2009年9月6日, 岡山理科大学
- ② 壺井基裕, 浅原良浩, 中部地方領家帯神原トーナライトにおけるSr同位体初生値の不均質と同化作用, 日本地質学会第116年学術大会, 2009年9月5日, 岡山理科大学
- ③ Yumiko Kimura, Motohiro Tsuboi, Shigeyuki Wakaki, Daisuke Katoh, Yoshihiro Asahara and Tsuyoshi Tanaka, Radiogenic and stable isotope systematics of strontium within a single granitic pluton, 19th V.M. Goldschmidt conference, 2009年6月23日, Davos, Switzerland
- ④ Syahputra Rio and Motohiro Tsuboi, Spatial distribution of elemental concentrations in the stream sediments around the Ikuno mine, southwestern Japan, 19th V.M. Goldschmidt conference, 2009年6月22日, Davos, Switzerland

- ⑤ 壺井基裕, 兵庫県南東部の地球化学図, 日本地球惑星科学連合 2009年大会, 2009年5月16日, 幕張メッセ国際会議場
- ⑥ シャプトラリオ, 壺井基裕, 西南日本生野鉱山周辺の河川堆積物からみた元素分布, 日本地質学会第115年学術大会, 2008年9月21日, 秋田大学,
- ⑦ 木村祐美子, 壺井基裕, 大阪府北部剣尾花崗岩の全岩化学組成, 日本地質学会第115年学術大会, 2008年9月20日, 秋田大学
- ⑧ 榎並正樹, 壺井基裕, 西井彩, 瀬戸佑衣, 愛知県設楽地域の安山岩脈中のFeに富むカンラン石, 日本鉱物科学会2008年年会, 2008年9月20日, 秋田大学
- ⑨ Motohiro Tsuboi, Kenta Imamura, Yasuhiro Kagawa, Masahiro Okabe, Kenta Okauchi, Shosuke Osaki, Harunobu Shibata, Masaki Tanaka, Yuichi Togo and Hisashi Yamamura, Geochemical mapping in Kobe area, southwest Japan: Elemental behaviors and controlling factors, 18th Annual V.M. Goldschmidt Conference, 2008年7月14日, Vancouver, Canada
- ⑩ 西垣貴史・壺井基裕, 京都府北部丹後地域に分布する宮津花崗岩の全岩化学組成, 2008年度 日本地質学会 近畿・西日本・四国三支部合同例会, 2008年6月29日, 兵庫県立人と自然の博物館
- ⑪ 光岡基樹・東昇・壺井基裕・木村祐美子・西垣 貴史・新澤 英之・池羽田 晶文・尾崎 幸洋, 遠紫外分光法による兵庫県下の湧き水中溶存イオンの定量分析, 日本分析化学会第69回分析化学討論会, 2008年5月16日, 名古屋国際会議場
- ⑫ 壺井基裕, 澤田慎二郎, 甲山安山岩の全岩化学組成, 日本地質学会第114年学術大会, 2007年9月10日, 北海道大学
- ⑬ 西垣貴史, 壺井基裕, 京都府北部丹後地域における宮津花崗岩の全岩化学組成, 日本地質学会第114年学術大会, 2007年9月10日, 北海道大学
- ⑭ 加川泰久, 今村謙太, 岡部将大, 岡内賢太, 大崎祥介, 芝田晴信, 田中政輝, 藤後雄一, 山村永, 壺井基裕, 阪神地域における地球化学図, 日本地質学会第114年学術大会, 2007年9月10日, 北海道大学

⑮榑本洋輔, 榑並正樹, 壺井基裕, 中部地方  
領家帯に産する神原トーナライトの固結  
深度の推定, 日本地質学会第 114 年学術大  
会, 2007年9月9日, 北海道大学

⑯ Motohiro Tsuboi,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  of Mafic  
Microgranular Enclaves in the Inagawa  
Granite, Ryoke Belt, Southwest Japan, 17th  
Annual V.M. Goldschmidt Conference, 20  
07年8月23日, Cologne, Germany

[図書] (計1件)

①尾崎幸洋, 高橋 功, 田辺 陽, 山口 宏,  
松田祐介, 壺井基裕, 未来を拓く人と環境  
にやさしいサイエンス (尾崎幸洋 編)「地  
球の歴史から地球環境を探る」, 82-95,  
(株)アドスリー (編集), 丸善 (出版), 東  
京, 2008年3月

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

壺井 基裕 (TSUBOI MOTOHIRO)  
関西学院大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 60411774

### (2)研究分担者

浅原 良浩 (ASAHARA YOSHIHIRO)  
名古屋大学・大学院環境学研究科・助教  
研究者番号: 10281065  
(H20～連携研究者)