

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 25 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25252026

研究課題名(和文) 気候変動下における森林窒素循環の急激変化を生じるホットモーメントの解明

研究課題名(英文) Study on hot moment inducing the abrupt change of ecosystem nitrogen cycle under climate change

研究代表者

柴田 英昭 (SHIBATA, Hideaki)

北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・教授

研究者番号：70281798

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、休眠期と成長期の端境期における土壌環境や生物季節の急激変化に着目し、冬から春期における窒素循環の短期的な急激変化のパターンを明らかにし、成長期の生物生産や養分保持、環境保全機能に及ぼす影響について解析した。冬期間の積雪減少は土壌の凍結融解サイクルを増幅し、土壌微生物バイオマスや土壌窒素無機化・硝化等の変化を通じて融雪期およびそれ以降の生態系窒素循環に影響を及ぼしていることが示された。

研究成果の概要(英文)：This research project aimed to clarify the pattern of abrupt changes of soil environment, vegetation process and dynamics on ecosystem nitrogen cycles during the period between dormant and growing periods, and analyze their impacts on the ecosystem processes and functions including primary productivity, nutrient retention and the environmental conservation functions of the ecosystem during the growing season. Our results indicated that soil freeze-thaw cycle was amplified due to the snowpack decrease in winter, causing the alteration of soil microbe biomass and soil nitrogen mineralization and nitrification. It was suggested that those environment changes in winter impacted to nitrogen cycles of the ecosystem during the growing season.

研究分野：生物地球化学

キーワード：窒素循環 凍結 - 融解サイクル 生物地球化学 土壌窒素無機化・硝化 土壌微生物 現地操作実験

1. 研究開始当初の背景

これまでの研究により、冬季の休眠期間であっても積雪減少による凍結 - 融解サイクルが増幅すると土壤微生物による窒素無機化速度が高まり、植生や微生物への養分供給、河川への窒素溶脱などに影響が及ぶことが示唆された (Shibata et al. 2011 など)。森林生態系の物質循環において、急激な時間変化を示す短期間を「生物地球化学的ホットモーメント」と呼び、その変化パターンやメカニズム解明について注目が集まっている (McClain et al. 2003; Groffman et al. 2009 など)。窒素循環のホットモーメントを解明することで、地球温暖化等に伴う経年的な緩やかな環境変化のみならず、短期間での極端な気象条件等 (寒波、干ばつ、猛暑) に対する生態系機能・サービス変化の科学的評価の精度が高まることが期待される。

これまで、冬季の休眠期から生育期の端境期は、温度・水分条件や植生フェノロジーが大きく変動する時期であるにも関わらず、窒素循環に急激変化を生じるホットモーメント (重要な瞬間) に焦点を当てた研究は、十分には行われていない。本研究では、これまでの現地観測や交換培養実験等の成果に基づき、年間を通じた窒素循環に劇的な変化をもたらす時期が存在するのではと着想し、その短期間を窒素循環の急激変化をもたらすホットモーメントと定義した (図 1)。生物活動が最も活発化する生育期のごく初期における、土壤窒素動態の急激変化パターンと成因を明らかにすることは、生育期全般における樹木成長や養分保持・循環、河川への養分溶脱を理解する上で非常に重要であると考えられる。

本研究では、森林生態系における窒素循環の時間変化を念頭に、短期間の急激変化によって生育期全般に影響を及ぼすような窒素動態ホットモーメントのパターンやプロセスとそのメカニズムを解明することを目的とした。特に土壤微生物による窒素無機化・硝化過程、植生による窒素吸収、土壤からの窒素溶脱に着目した。

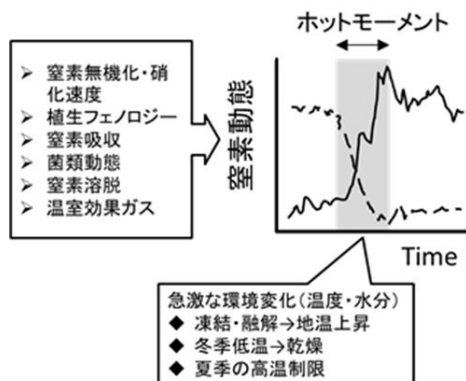


図 1. 窒素循環の急激変化をもたらすホットモーメントの概念図

2. 研究の目的

森林生態系の窒素循環は一次生産、養分保持、炭素固定、水質形成等に関わる重要な過程である。地球温暖化等の長期的で緩慢な環境変化と並んで、短期間で急速な環境変化は生態系の窒素循環や溶脱量を大きく改変することが予想されているが、その実態やメカニズムは十分には明らかになっていない。本研究では、休眠期と成長期の端境期における土壤環境や生物季節の急激変化に着目し、「冬から春期における窒素循環の短期的な急激変化が、成長期の生物生産や養分保持、環境保全機能に大きく影響するであろう」という仮説を立て、その成因やパターンについて全国各地での生態系レベルでの窒素循環観測、安定同位体窒素を用いた野外トレーサー実験、室内モデル培養実験、生態系プロセスモデルを用いた多角的な統合プロジェクト研究を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

全国各地に拠点サイトを設定し、以下に述べる実験や計測を行った。そのうち、積雪除去実験は北海道東部の標茶 (京都大学北海道研究林) をコアサイトとして実施した。標茶においては天然性のミズナラ - ササ群落の林分に研究プロットを設定し、12 プロットのうち半数について冬期間の積雪を除去する処理を施した (図 2)。

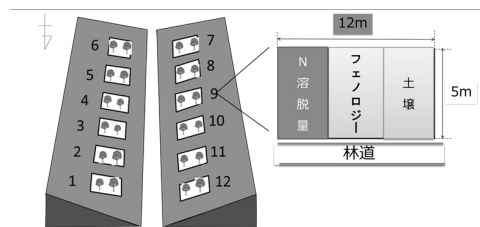


図 2. 現地実験区におけるプロット設定

(1) 森林窒素動態観測; 土壤溶液 (ライシメーター法) 窒素溶脱 (イオン交換樹脂法; 無機態・有機態窒素) リター分解 (リターバッグ法) 土壤窒素無機化・硝化速度 (バリードバッグ法) リターフォール (リタートラップ法) の計測を定期的に行った。また、計器による地温や土壤水分の連続観測を行った。

(2) 細根動態; 現地の土壤断面を細根観察用スキャナーで自動撮影することで、春先の季節変化を観測した。また積雪除去処理に伴う細根の変化と、土壤環境や地上部フェノロジーとの関係を解析した。

(3) 微生物群集動態; 窒素循環を駆動している土壤微生物群集に着目して以下の試験を行った。土壤から抽出した DNA を用いて、16S rRNA 遺伝子、18S rRNA 遺伝子を遺伝子マーカーとして、土壤中での各群集のサイズならびに構成の変化を調べた (Isobe et al. 2011)。また硝化・脱窒に関わる遺伝子を遺

伝子マーカーとして、硝化細菌/アーキア・脱窒細菌の群集のサイズならびに構成の変化を解析した。

(4) フェノロジー観測；積雪除去区および対照区において、ミズナラおよびササの生物季節の目視調査並びに成長量調査を行った。グラニエ法による樹液流動の観測も並行して実施した。

(5) 窒素トレーサー実験；各地のモデルプロット内において、¹⁵Nを窒素フローのトレーサーとして野外に添加し、一定期間後に植物体、リター、土壌、土壌微生物および土壌溶液に含まれる同位体比を測定することにより、¹⁵Nの移動先・分配、および吸収形態の季節変化を明らかにした。また、融雪時期から生育初期にかけての土壌窒素無機化・硝化速度の変化と比較することにより、土壌の可給態窒素のソースとシンクの関係を解析した。

(6) 生態系プロセスモデル；現地観測および既存研究資料に基づき、陸域窒素循環の生態系プロセスモデルのパラメタリゼーションを行い、季節変化データを用いたモデルの評価を行った。

4. 研究成果

本研究は厳冬期から春期、生育期にかけての窒素循環の短期的変化に着目し、現地での積雪除去処理による土壌内の凍結 - 融解サイクルの増幅インパクトについて、土壌窒素動態、土壌微生物活性、細根動態・フェノロジー、土壌動物群集を含む多角的な実験、現地観測により明らかにしようとするものであった。北海道東部の京都大学北海道研究林内のミズナラ ササ林分において 12 プロットを設定し、そのうち 6 プロットにおいて 2014 年冬季から 2015 年融雪期にかけて積雪除去処置を行った結果では、積雪処置によって土壌の凍結深さは有意に深まり、土壌表層の凍結 - 融解サイクルが増幅していることが観測された(図3)。その結果として、土壌表層の微生物バイオマスは厳冬期の 2 月に増加する傾向が検出され、その後の融雪期にかけて減少する傾向が認められた。土壌の凍結に伴い、土壌表層の液状水分率が低下する一方、氷画分を含む全土壌水分率が上昇したことから、積雪低下に伴う土壌凍結によって土壌下層から表層への水移動が生じていることが示唆された。

土壌表層での土壌凍結 - 融解サイクルの増幅は土壌微生物バイオマスの変化のみならず、厳冬期から融雪期にかけての溶存有機窒素(DOC)や溶存有機窒素(DON)、さらには無機態窒素の生成・変化にも影響を及ぼしていることが示唆された。また、樹液流、細根動態、植物フェノロジーおよび土壌動物群集へのインパクトも認められ、冬季気候変動は融雪期におけるホットモーメントを含むさまざまな経路を通じて森林生態系の窒素循環プロセスの変容をもたらしていることが明らかとなった。

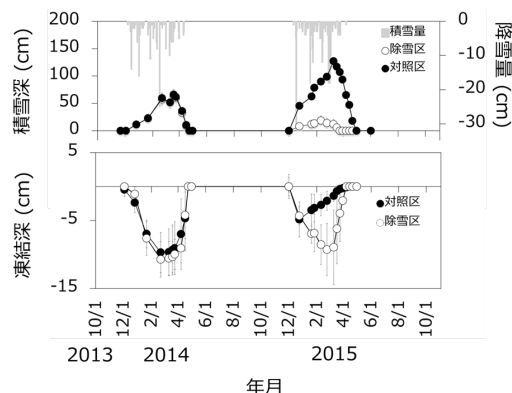


図3. 積雪除去実験における積雪深、土壌凍結深の変化

< 引用文献 >

- Shibata et al. (2011) *Journal of Forest Research* 16: 374-385.
 McClain et al. (2003) *Ecosystems* 4: 301-312.
 Groffman et al. (2009) *Biogeochemistry* 93: 49-77.
 Bardgett et al. (2005) *TRENDS in Ecology and Evolution* 20: 634-641.
 Isobe et al. (2011) *Journal of Forest Research* 16: 351-363.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 22 件)

- Urakawa R, Ohte N, Shibata H, Isobe K, Tateno R, Oda T, Hishi T, Fukushima K, Inagaki Y, Hirai K, Oyanagi N, Nakata M, Toda H, Kenta T, Kuroiwa M, Watanabe T, Fukuzawa K, Tokuchi N, Ugawa S, Enoki T, Nakanishi A, Saigusa N, Yamao Y, Kotani A (2016) Factors contributing to soil nitrogen mineralization and nitrification rates of forest soils in the Japanese archipelago. *Forest Ecology and Management* 361: 382-396, 査読有, doi: 10.1016/j.foreco.2015.11.033
 Shibata H (2016) Impact of winter climate change on nitrogen biogeochemistry in forest ecosystems: A synthesis from Japanese case studies. *Ecological Indicators* 65:4-9, doi:10.1016/j.ecolind.2015.10.063, 査読有
 Shibata H, Branquinho C, McDowell WH, Mitchell MJ, Monteith DT, Tang J, Arvola L, Cruz C, Cusack D, Halada L, Kopáček J, Máguas C, Sajidu S, Schubert H, Tokuchi N, Záhora J (2015) Consequence of altered nitrogen cycles in the coupled human and

ecological system under changing climate: The need for long-term and site-based research. *AMBIO* 44:178-193 DOI 10.1007/s13280-014-0545-4, 査読有

Yunting Fang, Keisuke Koba, Akiko Makabe, Chieko Takahashi, Weixing Zhu, Takahiro Hayashi, Azusa A. Hokari, Rieko Urakawa, Edith Bai, Benjamin Z. Houlton, Dan Xi, Shasha Zhang, Kayo Matsushita, Ying Tu, Dongwei Liu, Feifei Zhu, Zhenyu Wang, Guoyi Zhou, Dexiang Chen, Tomoko Makita, Hiroto Toda, Xueyan Liu, Quansheng Chena, Deqiang Zhang, Yide Li and Muneoki Yoh (2015) Microbial denitrification dominates nitrate losses from forest ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112: 1470-1474, 査読有, doi: 10.1073/pnas.1416776112

Wei Wei, Kazuo Isobe, Tomoyasu Nishizawa, Lin Zhu, Yutaka Shiratori, Nobuhito Ohte, Keisuke Koba, Shigeto Otsuka, Keishi Senoo (2015) Higher diversity and abundance of denitrifying microorganisms in environments than considered previously. *The ISME Journal* 9:1954-1965, 査読有, doi: 10.1038/ismel.2015.9

Takuo Hishi, Naoaki Tashiro, Yuka Maeda, Rieko Urakawa, Hideaki Shibata (2015) Spatial patterns of fine root biomass and performances of understory dwarf bamboo and trees along with the gradient of soil N availability in broad-leaved natural forests and larch plantations. *Plant Root* 9: 85-94, 査読有, doi: 10.3117/plantroot.9.85

Fukuzawa K, Shibata H, Takagi K, Satoh F, Koike T, Sasa K (2015) Roles of dominant understory Sasa bamboo in carbon and nitrogen dynamics following canopy tree removal in a cool-temperate forest in northern Japan. *Plant Species Biology* 30: 104-115 doi: 10.1111/1442-1984.12086, 査読有

Wei Wei, Kazuo Isobe, Yutaka Shiratori, Tomoyasu Nishizawa, Nobuhito Ohte, Yuta Ise, Shigeto Otsuka, Keishi Senoo (2015) Development of PCR primers targeting fungal nirK to study fungal denitrification in the environment. *Soil Biology Biochemistry* 81:282-286, doi: 10.1016/j.soilbio.2014.11.026, 査読有

Makoto K, Kajimoto T, Koyama L, Kudo

G, Shibata H, Yanai Y, Cornelissen JHC (2014) Winter climate change in plant-soil systems: summary of recent findings and future perspectives. *Ecological Research* 29:593-606. DOI 10.1007/s11284-013-1115-0, 査読有

稲垣善之、篠宮佳樹、野口享太郎、平井敬三、金子真司 (2014) 間伐がスギ人工林におけるリターフォール供給と土壌の炭素窒素蓄積量に及ぼす影響. *関東森林研究* 65: 115-118, <http://www.kantoforest.jp/journal.htm>, 査読有

Takuo Hishi, Rieko Urakawa, Naoaki Tashiro, Yuka Maeda, Hideaki Shibata (2014) Seasonality of factors controlling N mineralization rates among slope positions and aspects in cool-temperate deciduous natural forests and larch plantations. *Biology and Fertility of Soils*. 50:343-356, DOI 10.1007/s00374-013-0863-x, 査読有

Kazuo Isobe, Nobuhito Ohte (2014) Ecological Perspectives on Microbes Involved in N-Cycling. *Microbes and Environments* 29: 4-16, DOI: 10.1264/jsme2.ME13159, 査読有

Urakawa R, Shibata H, Kuroiwa M, Inagaki Y, Tateno R, Hishi T, Fukuzawa K, Hirai K, Toda H, Oyanagi N, Nakata M, Nakanishi A, Fukushima K, Enoki T, Suwa Y (2014) Effects of freeze-thaw cycles resulting from winter climate change on soil nitrogen cycling in ten temperate forest ecosystems throughout the Japanese archipelago. *Soil Biology & Biochemistry* 74:82-94, 査読有, DOI: 10.1016/j.soilbio.2014.02.022

岩月良介・堀口智也・戸田浩人・崔東寿 (2014) 北関東でのシカ採食圧排除によるミヤコザサの窒素保持・循環の回復. *日本緑化工学会誌* 39:353-359, 査読有, <http://www.jsrt.jp/publication.html>

Kazuo Isobe, Nobuhito Ohte, Tomoki Oda, Sho Murabayashi, Wei Wei, Keishi Senoo, Naoko Tokuchi, Ryunosuke Tateno (2014) Microbial regulation of nitrogen dynamics along the hillslope of a natural forest. *Frontiers in Environmental Science* 2:1-8, 査読有, doi: 10.3389/fenvs.2014.00063

磯部一夫・大手信人 (2014) 森林の窒素循環研究に対する微生物生態学的アプローチ. *森林立地* 56: 89-95, 査読有, doi: 10.1016/j.soilbio.2014.11.026

Xiaoqiang Lu, Hiroto Toda, Fangjun Ding, Shengzuo Fang, Wanxia Yang, Haigen Xu (2014) Effect of vegetation

types on chemical and biological properties of soils of karst ecosystems. *European Journal of Soil Biology* 61: 49-57, 査読有, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejsobi.2013.12.007>

Vihervaara P, D'Amato D, Forsius M, Angelstam P, Baessler C, Balvanera P, Boldgiv B, Bourgeron P, Dick J, Kanka R, Klotz S, Maass M, Melecis V, Petrik P, Shibata H, Tang J, Thompson J, Zacharias S (2013) Using long-term ecosystem service and biodiversity data to study the impacts and adaptation options in response to climate change: insights from the globalILTER sites network. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 5:53-66 DOI: [doi:10.1016/j.cosust.2012.11.002](https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.11.002), 査読有

福澤 加里部 (2013) 森林の炭素・窒素動態におけるササの役割, *森林科学* 69:13-17, 査読有, <http://www.forestry.jp/publish/ForSci/>

Fukuzawa K, Shibata H, Takagi K, Satoh F, Koike T, Sasa K. (2013) Temporal variation in fine-root biomass, production and mortality in a cool temperate forest covered with dense understory vegetation in northern Japan. *Forest Ecology and Management* 310:700-710, 査読有, DOI [10.1016/j.foreco.2013.09.015](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.09.015)

- ① Shibata, H, Hasegawa, Y, Watanabe, T, Fukuzawa, K. (2013) Impact of snowpack decrease on net nitrogen mineralization and nitrification in forest soil of northern Japan. *Biogeochemistry* 116: 69-82, DOI [10.1007/s10533-013-9882-9](https://doi.org/10.1007/s10533-013-9882-9), 査読有

- ② Ye Tian, Kiyomi Takanashi, Hiroto Toda, Kikuo Haibara and Fangjun Ding (2013) pH and substrate regulation of nitrogen and carbon dynamics in forest soil in a karst region of the upper Yangtze River basin, China. *Journal of Forest Research* 18:228-237, 査読有, DOI [10.1007/s10310-012-0341-6](https://doi.org/10.1007/s10310-012-0341-6)

〔学会発表〕(計 13 件)

渡辺恒大・柴田英昭・館野隆之輔・今田省吾・福澤加里部・磯部一夫・浦川梨恵子・小田智基・細川奈々枝・小林真: 積雪操作処理による冬期から春期の土壌微生物・窒素動態の変化パターン, 第127回日本森林学会大会, 日本大学生物資源学部(神奈川県藤沢市), 2016年3月28日

磯部一夫・岡裕章・渡辺恒大・浦川梨恵子・館野隆之輔・妹尾啓史・柴田英昭: 森林土壌における微生物の増殖・死滅と窒素動態, 第127回日本森林学会大会, 日本大学生物資源学部(神奈川県藤沢市), 2016年3月28日

黒岩恵・堺奎介・石川裕士・福原康平・磯部一夫・諏訪裕二・柴田英昭: 森林土壌に特徴的な硝化菌の分離~その意義とアプローチ, 第127回日本森林学会大会, 日本大学生物資源学部(神奈川県藤沢市), 2016年3月28日

福澤加里部・館野隆之輔・鶴川信・渡辺恒大・細川奈々枝・今田省吾・柴田英昭: 森林における土壌凍結が細根動態に及ぼす影響: 積雪除去作業によるアプローチ, 第127回日本森林学会大会, 日本大学生物資源学部(神奈川県藤沢市), 2016年3月28日

小田智基・渡辺恒大・館野隆之輔・佐藤貴紀・今田省吾・柴田英昭: 土壌の凍結融解が樹液流動態に与える影響, 第127回日本森林学会大会, 日本大学生物資源学部(神奈川県藤沢市), 2016年3月28日

菱拓雄・渡辺恒大・柴田英昭・館野隆之輔: 冬期の積雪操作処理が生育期における土壌性トピムシの群集構造に与える影響, 第127回日本森林学会大会, 日本大学生物資源学部(神奈川県藤沢市), 2016年3月28日

館野隆之輔・今田省吾・渡辺恒大・福澤加里部・柴田英昭: 積雪除去が森林生態系の純一次生産と養分吸収に与える影響, 第127回日本森林学会大会, 日本大学生物資源学部(神奈川県藤沢市), 2016年3月28日

佐々井崇博: 生態系モデル BEAMS を用いた日本全域の土壌窒素飽和率の評価, 第127回日本森林学会大会, 日本大学生物資源学部(神奈川県藤沢市), 2016年3月28日

館野隆之輔・今村志帆美: 北海道東部の天然林および人工林における樹木の窒素利用様式および窒素循環, 第126回日本森林学会大会, 北海道大学(北海道札幌市), 2015年03月27日~2015年03月28日

磯部一夫・大手信人: Does microbial ecology expand our understandings of nitrogen cycle in forests?, 地球惑星科学連合大会(招待講演), 2014年4月28-5月2日, 横浜パシフィコ(神奈川県横浜市)

館野隆之輔: 異なる無機化特性を持つ土壌に対する炭素・窒素添加およびpH調整が窒素無機化特性に与える影響, 第125回日本森林学会大会, 大宮ソニックシティ(埼玉県さいたま市), 2014年3月29日

福澤 加里部・浦川 梨恵子・菱 拓雄・
柴田 英昭・宮本 敏澄・館野 隆之輔，
土壤の窒素無機化の変化に対する細根
の養分吸収の応答 第39回根研究集会，
農研機構畜産草地研究所那須研究拠点
(栃木県那須塩原市)2013年11月9-10
日

Hideaki Shibata: ILTER initiative:
Socio-biogeochemistry of nitrogen
cascading and interactions. ILTER
Symposium commemorating 20th
Anniversary. October 7, 2013, Kookmin
University, Seoul, 韓国

〔図書〕(計 2 件)

柴田英昭 (2015) 森林集水域の物質循環
調査法，共立出版，ISBN
978-4-320-05749-4

Shimizu N, Tateno R, Kasai A, Mukai H,
Yamashita Y (eds) (2014) Connectivity
of hills, humans and oceans: Challenge
to improvement of watershed and
coastal environments. Kyoto
University Press. 283pp

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.resin-project.com/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

柴田 英昭 (SHIBATA, Hideaki)
北海道大学・北方生物圏フィールド科学セ
ンター・教授
研究者番号：70281798

(2)研究分担者

戸田 浩人 (TODA, Hiroto)
東京農工大学・(連合)農学研究科(研究
院)・教授
研究者番号：00237091

宮本 敏澄 (MIYAMOTO, Toshizumi)
北海道大学・(連合)農学研究科(研究院)・
講師

稲垣 善之 (INAGAKI, Yoshiyuki)
国立研究開発法人・森林総合研究所・四国
支所・主任研究員
研究者番号：00353590

福澤 加里部 (FUKUZAWA, Karibu)
北海道大学・北方生物圏フィールド科学セ
ンター・助教
研究者番号：10456824

鶴川 信 (UGAWA, Shin)
鹿児島大学・農水産獣医学域農学系・准教

授

研究者番号：30582738

磯部 一夫 (ISOBE, Kazuo)
東京大学・大学院農学生命科学研究科・助
教

研究者番号：30621833

菱 拓雄 (HISHI, Takuo)
九州大学・(連合)農学研究科(研究院)・
准教授

研究者番号：50423009

館野 隆之輔 (TATENO, Ryunosuke)
京都大学・フィールド科学教育研究センタ
ー・准教授

研究者番号：60390712

佐々井 崇博 (SASAI, Takahiro)
筑波大学・生命環境系・助教

研究者番号：70443190

諏訪 裕一 (SUWA, Yuichi)
中央大学・理工学部・教授
研究者番号：90154632

榎木 勉 (ENOKI, Tsutomu)
九州大学・(連合)農学研究科(研究院)・
准教授
研究者番号：10305188

(3)連携研究者

三枝 信子 (SAIGUSA, Nobuko)
国立研究開発法人・国立環境研究所・地球
環境研究センター・主任研究員
研究者番号：00251017

大手 信人 (OHTE, Nobuhito)
京都大学・大学院情報学研究科・教授
研究者番号：10233199

福島 慶太郎 (FUKUSHIMA, Keitaro)
首都大学東京・都市環境学部・特任助教
研究者番号：60549426