

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01477

研究課題名(和文) 東南アジア熱帯林全域の炭素貯留能力を解明する

研究課題名(英文) Carbon balance over Southeast Asian tropical forests

研究代表者

熊谷 朝臣 (Kumagai, Tomo'omi)

東京大学・大学院農学生命科学研究科(農学部)・教授

研究者番号：50304770

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,800,000円

研究成果の概要(和文)：当初、東南アジア熱帯林全域に多数の観測点からなる森林簿ネットワークを構築し、森林炭素収支の統合解析を行おうとした。しかし、今般の新型コロナウイルス感染拡大により、ほとんどの観測点の構築が頓挫した。そのような環境下で、(1)ベトナムの高地針広混交林サイトの設定に成功した。(2)ミャンマーの森林炭素収支において、違法伐採の影響は大きく、その評価の成否が極めて重要であることが明らかになった。(3)日本の総森林炭素蓄積の再評価を行い、これまでの推定の2倍以上の蓄積を明らかにした。(4)全球スケールに適用可能な革新的な個体ベース森林動態シミュレータの開発を進めることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気候変動を引き起こす温暖化の最大要因は大気中CO<sub>2</sub>濃度の上昇である。現在気候のメカニズム把握と将来気候予測のためには、熱帯林における炭素貯留能力を知ることが極めて重要であることが分かってきた。その中でも、東南アジア熱帯林域は、世界で最も森林破壊が進み、重大なCO<sub>2</sub>放出源として認識されている。それにもかかわらず、東南アジア熱帯林炭素収支に関するデータは他の熱帯林域に比べ圧倒的に不足している。本研究が目指した、東南アジア熱帯林全域における信頼に足る森林炭素収支の推定は、学術的にも科学的事実の空白地帯を埋めることを意味し、また、社会的には、脱炭素社会の実現に多大に寄与するものである。

研究成果の概要(英文)：The original plan was to develop the forest inventory network with numerous plots over Southeast Asian tropical forests and conduct synthesized forest carbon balance analyses. However, we did not complete most of the plan because of the worldwide covid situation. Under such a situation, we (1) were successful in arranging some highland mixed forest plots in Vietnam, (2) clarified that the effects of illegal logging are critical in evaluating the total forest carbon balance in Myanmar, (3) suggested twice more total forest carbon stock than the previous estimation via revisiting the total Japanese forest inventory data, and (4) successfully developed an individual-based forest dynamics model, which can be applied for the global-scale simulation.

研究分野：生物地球科学

キーワード：炭素循環 温暖化 気候変動 熱帯林 二酸化炭素

## 1. 研究開始当初の背景

IPCC 第 5 次評価報告書(2013)は、地球温暖化は疑う余地が無く、その原因は人間活動の影響である可能性が極めて高く、そして、この人為的影響の最大要因は大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の上昇である、と結論付けている。よって、将来気候予測のためには将来の大気中 CO<sub>2</sub> 濃度を適切に予測・設定することが必要不可欠である。このことは、CO<sub>2</sub> が、どこで・どのくらい発生して、大気中にどのくらい留まるのか、そして、どこへ・どのくらい吸収されるのか、を知ることが重要であると言う意味でもある。Booth et al. (2012) は、陸上生態系の炭素循環が大気中 CO<sub>2</sub> 濃度にフィードバックをかけることが可能な全球気候モデルを利用して、IPCC が設定した CO<sub>2</sub> 放出シナリオによる 2100 年時点の大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の変動幅よりも陸上植物の光合成能力の扱い次第で変わる大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の幅の方が大きいことを示した。また、Huntingford et al. (2013) は、陸上生態系モデルの中で森林の炭素貯留量予測を左右するのは、気候変動予測値ではなく、モデル中の植物生理学サブモデルであることを指摘している。つまり、将来気候予測の枢要は、森林がどのように・どのくらい CO<sub>2</sub> を吸収するのかを知ることにあると言っても過言ではない。

1990 年代の研究では、人間活動により放出された CO<sub>2</sub> の内、約 25% の行く先が分からず(ミッシング・シンク) おそらく陸上生態系で吸収されているのだらうと推測されていた(Popkin, 2015)。現在では、地球規模の森林簿の充実により、このミッシング・シンクは森林による吸収であることが実証されている(Pan et al., 2011)。加えて、最近の森林簿を用いた多くの研究が、森林蓄積速度の限界は森林学者がこれまで想定してきたよりも遥かに大きいことを示している(例えば、McMahon et al. (2010))。特に、代表的な世界の熱帯林森林調査簿研究ネットワークである AfriTRON(アフリカ熱帯林)と RAINFOR(アマゾン熱帯林)のデータは、天然性熱帯林の炭素蓄積能力には限りがないようであると報告し始めた(Popkin, 2015)。一方で、熱帯林破壊は依然として重大な CO<sub>2</sub> 放出源であり、特に東南アジア熱帯林からの CO<sub>2</sub> 放出はアマゾン熱帯林を超えていると推定されている。

まとめると、将来気候予測のために熱帯林の炭素貯留能力を正確に把握しなければならないこと、そのためには森林調査簿のような直接的な手法が望ましいこと、そして、東南アジア熱帯で進行中の森林動態を特に注視しなければならないこと、が喫緊の要事となる。ところが、Pan et al. (2011) も Popkin (2015) も、その他の多くの先行研究も、「東南アジア熱帯林の森林調査簿データは全く足りていない」と指摘している。Malhi and Grace (2000) から Pan et al. (2011) に至る研究から分かるように、全球森林炭素収支を推定する際の東南アジア熱帯林の部分は、少ないデータによる内挿にならざるを得ないのが実情である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、以上をまとめた問いに対する回答として、東南アジア熱帯林全域に多数(観測点数 100 レベル)の観測点からなる森林簿ネットワークを構築し、信頼に足る森林炭素収支を推定することを最終目的とした。

## 3. 研究の方法

研究開始当初の方法は、毎木調査こそが最も信頼に足る森林バイオマス量測定法であるという思想の下、東南アジア熱帯林全域において毎木調査による森林簿を作成することが至上の方法であった。そして、森林簿の作成を基本としながら、リモートセンシング・タワーフラックスのデータと全球森林動態モデル(DGVM)の計算結果によるクロスチェックを行い、広域森林バイオマス量の推定をより確かなものにする。年間森林炭素貯留速度の算出とその気候因子への依存性を導き、これを DGVM へフィードバックすることによって東南アジア熱帯林域全体の炭素貯留能力の未来予測を行う、ということを用意していた。

しかし、今般の新型コロナウイルス感染拡大により、ほとんどの観測点の構築が頓挫した。そのような環境下でも以下の項目は完遂できると考え、本研究資源の集中投資を行った。(1)非常に貴重な、熱帯地域における針葉樹林の観測点の構築を行う。(2)広大な森林を有し、巨大な森林蓄積を持つことが明らかであるが、ほとんどデータが無いミャンマーの観測を完遂する。また、東南アジア熱帯ではないが、今般の状況による海外渡航の困難性と森林炭素蓄積に関する研究としての共通点を考え、(3)日本の総森林炭素蓄積の再評価を行った。そして、当初の予定通り、(4)革新的な DGVM の開発を進めた。

## 4. 研究成果

(1)ベトナムの内陸に向かう地域には山岳地・高地が広がり、この地域を抜けると(多くはカンボジアの領域)低地が広がる。高地であるので、冷涼な気象条件を持ち、植生も熱帯でありながら極めて貴重な天然性の針葉樹が分布している。この熱帯天然性針葉樹は広範囲に分布しており、そのバイオマスは全く無視することができないが、これまで、そのデータは、ほとんど取得されたことが無い。本研究では、新型コロナ感染が(初期においては)軽度であり、また、現地カウンターパートとの協力体制が強固であったベトナムにおいて、針広混交林サイ

トの設定に成功した。毎木調査は順調に継続されており、今後の観測結果の集計に大きな期待が寄せられている。

(2) ミャンマーの現地カウンターパートと極めて強固な協力体制にあり、自身も多大な研究実績と強力な研究遂行能力を誇る九州大学グループにより、ミャンマー全域の森林蓄積量の全貌が明らかになった (Khai et al. 2016, 2020)。そして、その森林炭素収支において、違法伐採の影響は大きく、その評価の成否が極めて重要であることが明らかになった。

(3) 近年整備が進んできた日本全国に渡る 15000 点に近い毎木調査点の結果を、これまで日本の森林蓄積量を評価してきた収穫表による結果と比較した (Egusa et al. 2020)。その結果、新

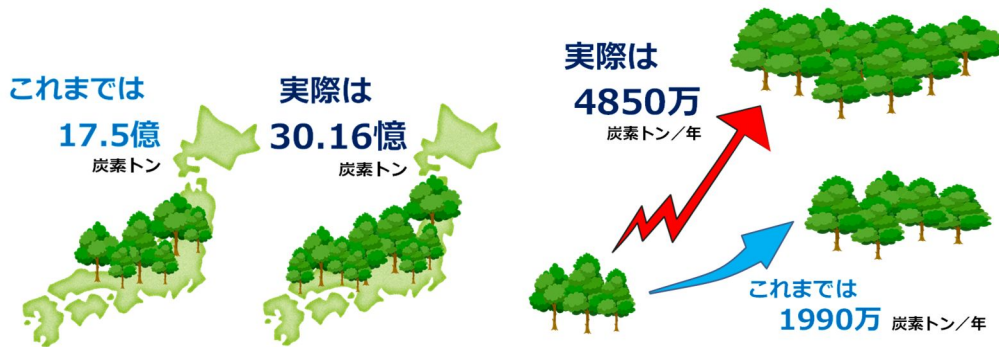


図 1 .(右) 森林炭素蓄積量 (炭素換算) は、今回 30.16 億トンと推定され、これまでの推定値の 17.5 億トンの 1.72 倍となった。(左) 年あたりの森林炭素吸収速度 (炭素換算) は、今回 4850 万トンと推定され、これまでの推定値の 1990 万トンの 2.44 倍となった。

しく算出された森林炭素蓄積量・炭素吸収速度は、炭素換算で 30.16 億トン・4850 万トン毎年となり、これまで発表され正しいと信じられていた値の、それぞれ 1.72 倍・2.44 倍となった (図 1)。これら新しい値は、我が国のこれからの森林管理政策に多大の影響を及ぼすだろう。

(4) 詳細な植物生理学サブモデルを組み込み気象因子等の物理環境による駆動メカニズムを強化した DGVM の開発を行った。この DGVM の正当性確認には、マレーシア・ボルネオ熱帯雨林のデータが使われ、良好なパフォーマンス結果が得られた (図 2)。さらに、この DGVM を用いて、未来の熱帯雨林バイオマスの予測と、森林の生存戦略の違いによりバイオマスがどのように変化するかを試す数値実験を行った (図 2)。このような数値実験は個体レベルから森林動態メカニズムを徹底的に表現しようとする本 DGVM にして初めて可能なものであり、本 DGVM の今後の活躍が大いに期待できる。

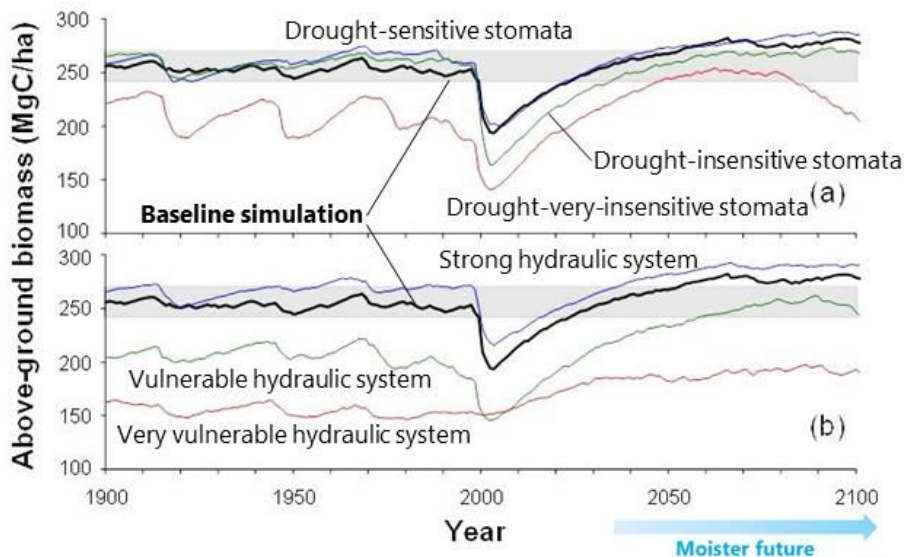


図 2 . 新型 DGVM によるマレーシア・ボルネオ熱帯雨林のバイオマスの再現計算 (Baseline simulation; 灰色部が実測データの範囲)、(a) 気孔開閉環境応答を乾燥条件に対して「鈍感」～「非常に敏感」まで変化させたときのバイオマス、(b) 幹内通道路を乾燥条件に対して「強い」～「非常に脆弱」まで変化させたときのバイオマス、を試す数値実験。

<参考文献>

- IPCC 第5次評価報告書 (2013)
- Booth et al. (2012) *Environ. Res. Lett.* 7: 024002
- Huntingford et al. (2013) *Nature Geosci.* 6: 268
- Popkin (2015) *Nature* 523: 20
- Pan et al. (2011) *Science* 333: 988
- McMahon et al. (2010) *PNAS* 107: 3611
- Malhi and Grace (2000) *Trends Ecol. Evol.* 15: 332
- Khai et al. (2016) *Global Ecol. Conserv.* 7: 132
- Khai et al. (2020) *Global Ecol. Conserv.* 24: e01214
- Egusa et al. (2020) *Sci. Rep.* 10: 7895

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 19件／うち国際共著 8件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Mrad, A., Katul, G. G., ...Kumagai, T., et al.	4. 巻 117
2. 論文標題 Peak grain forecasts for the U.S. High Plains amid withering waters	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America	6. 最初と最後の頁 26145-26150
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Levia, D. F., Creed, I. F., ... Kumagai, T., et al.	4. 巻 13
2. 論文標題 Homogenization of the terrestrial water cycle	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Geoscience	6. 最初と最後の頁 656-658
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Ueyama, M., Ichii, K., Kobayashi, H., Kumagai, T., et al.	4. 巻 15
2. 論文標題 Inferring CO2 fertilization effect based on global monitoring land-atmosphere exchange with a theoretical model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Environmental Research Letters	6. 最初と最後の頁 84009
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Egusa, T., Kumagai, T. and Shiraishi, N.	4. 巻 10
2. 論文標題 Carbon stock in Japanese forests has been greatly underestimated	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 7895
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Egusa, T., Kumagai, T. and Shiraishi, N.	4. 巻 10
2. 論文標題 Carbon stock in Japanese forests has been greatly underestimated	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 7895
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ueyama, M., Ichii, K., Kobayashi, H., Kumagai, T., et al.	4. 巻 15
2. 論文標題 Inferring CO2 fertilization effect based on global monitoring land-atmosphere exchange with a theoretical model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Environmental Research Letters	6. 最初と最後の頁 84009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Momiya, H., Kumagai, T. and Egusa, T.	4. 巻 499
2. 論文標題 Model analysis of forest thinning impacts on the water resources during hydrological drought periods	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Forest Ecology and Management	6. 最初と最後の頁 119593
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ohashi, M., Makita, N., Katayama, A., Kume, T., Matsumoto, K., Kumagai, T., Endo, I. and Kho, L. K.	4. 巻 436
2. 論文標題 Characteristics of root decomposition based on in-situ experiments in a tropical rainforest in Sarawak, Malaysia: Impacts of root diameter and soil biota	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plant and Soil	6. 最初と最後の頁 439-448
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Egusa, T., Kumagai, T., Oda, T., Gomi, T. and Ohte, N.	4. 巻 55
2. 論文標題 Contrasting patterns in the decrease of spatial variability with increasing catchment area between stream discharge and water chemistry	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Water Resources Research	6. 最初と最後の頁 7419-7435
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Momiya, H., Kumagai, T. and Egusa, T.	4. 巻 24
2. 論文標題 Reproducing monthly evapotranspiration from a coniferous plantation watershed in Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Forest Research	6. 最初と最後の頁 197-200
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kanamori, H., Kumagai, T., Fujinami, H., Hiyama, T. and Yasunari, T.	4. 巻 19
2. 論文標題 Effects of long- and short-term atmospheric water cycles on the water balance over the Maritime Continent	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Hydrometeorology	6. 最初と最後の頁 1413-1427
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kurita, N., Horikawa, M., Kanamori, H., Fujinami, H., Kumagai, T., Kume, T. and Yasunari, T.	4. 巻 32
2. 論文標題 Interpretation of ENSO-related precipitation anomalies in northwestern Borneo using isotopic tracers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Hydrological Processes	6. 最初と最後の頁 2176-2186
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 McDowell, N., Allen, C., ..., Kumagai, T., et al.	4. 巻 219
2. 論文標題 Drivers and mechanisms of tree mortality in moist tropical forests	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 New Phytologist	6. 最初と最後の頁 851-869
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Miyazawa, Y., Du, S., Taniguchi, T., Yamanaka, N. and Kumagai, T.	4. 巻 38
2. 論文標題 Gas exchange by the mesic-origin, arid land plantation species Robinia pseudoacacia under annual summer reduction in plant hydraulic conductance	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Tree Physiology	6. 最初と最後の頁 1166-1179
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ohashi Mizue, Makita Naoki, Katayama Ayumi, Kume Tomonori, Matsumoto Kazuho, Kumagai Tomo'omi, Endo Izuki, Kho Lip Khoon	4. 巻 436
2. 論文標題 Characteristics of root decomposition based on in situ experiments in a tropical rainforest in Sarawak, Malaysia: impacts of root diameter and soil biota	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plant and Soil	6. 最初と最後の頁 439-448
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11104-018-03929-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kanamori Hironari, Kumagai Tomo'omi, Fujinami Hatsuki, Hiyama Tetsuya, Yasunari Tetsuzo	4. 巻 19
2. 論文標題 Effects of Long- and Short-Term Atmospheric Water Cycles on the Water Balance over the Maritime Continent	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Hydrometeorology	6. 最初と最後の頁 1413-1427
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JHM-D-18-0052.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -



1. 著者名 McDowell Nate, Allen Craig D., ... Kumagai Tomo'omi, et al.	4. 巻 219
2. 論文標題 Drivers and mechanisms of tree mortality in moist tropical forests	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 New Phytologist	6. 最初と最後の頁 851-869
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/nph.15027	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kurita Naoyuki, Horikawa Mayumi, Kanamori Hironari, Fujinami Hatsuki, Kumagai Tomo'omi, Kume Tomonori, Yasunari Tetsuzo	4. 巻 32
2. 論文標題 Interpretation of El Nino-Southern Oscillation-related precipitation anomalies in north-western Borneo using isotopic tracers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Hydrological Processes	6. 最初と最後の頁 2176-2186
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/hyp.13164	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Miyazawa Yoshiyuki, Du Sheng, Taniguchi Takeshi, Yamanaka Norikazu, Kumagai Tomo'omi	4. 巻 38
2. 論文標題 Gas exchange by the mesic-origin, arid land plantation species Robinia pseudoacacia under annual summer reduction in plant hydraulic conductance	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Tree Physiology	6. 最初と最後の頁 1166-1179
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/treephys/tpy032	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

#### 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	溝上 展也  (Mizoue Nobuya)  (00274522)	九州大学・農学研究院・教授    (17102)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中静 透 (Nakashizuka Tohru)  (00281105)	総合地球環境学研究所・研究部・特任教授  (64303)	
研究分担者	彦坂 幸毅 (Hikosaka Kouki)  (10272006)	東北大学・生命科学研究所・教授  (11301)	
研究分担者	平野 高司 (Hirano Takashi)  (20208838)	北海道大学・農学研究院・教授  (10101)	
研究分担者	佐藤 保 (Sato Tamotsu)  (20353708)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等  (82105)	
研究分担者	村岡 裕由 (Muraoka Hiroyuki)  (20397318)	岐阜大学・流域圏科学研究センター・教授  (13701)	
研究分担者	檜山 哲哉 (Hiyama Tetsuya)  (30283451)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授  (13901)	
研究分担者	佐藤 永 (Sato Hisashi)  (50392965)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(北極環境変動総合研究センター)・研究員  (82706)	
研究分担者	市榮 智明 (Ichie Tomoaki)  (80403872)	高知大学・教育研究部自然科学系農学部・教授  (16401)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	小杉 緑子  (Kosugi Yoshiko)  (90293919)	京都大学・農学研究科・教授     (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関