

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H02229

研究課題名(和文) アブラヤシ農園拡大の環境リスク評価

研究課題名(英文) Evaluation of environmental risks caused by expanding oil palm plantation area in Malaysia

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) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：当初、マレーシア全域で、森林からオイルパーム農園への土地利用転換が及ぼす環境変化を評価しようとした。しかし、新型コロナウイルス感染拡大により、このような広域を対象とする研究は頓挫した。一方で、最高度の観測システムを有し、しかも、お互いに隣接するオイルパーム農園・天然林サイトの2つのサイトに、観測・解析を集中することになり、当初予定していたよりも高度な成果が得られた：両サイトにおける、(1)大気-群落間CO₂・H₂O交換速度の環境応答、しかも、(2)エルニーニョ・ラニーニャ時の環境応答の変化、を明らかにした上で、(3)土地利用転換後の、生態系スケールの水・炭素循環の長期変化の予測を行うことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ボルネオ熱帯雨林域植生の環境応答特性を解明するためには、エルニーニョ・ラニーニャと平常時を含む長期間の連続的なCO₂・H₂Oフラックス観測を行い、フラックス、気象因子それぞれの時系列データの比較・解析を行わなければならない。これまで、ボルネオ熱帯雨林域だけでなく世界の熱帯雨林域において、そのようなENSOの各フェーズを複数含むような長期フラックス観測が行われた事例は皆無であり、ましてや、土地利用変化との複合的影響の研究は存在しない。本研究は、学術的にも極めて新規性が高い上に、社会的にもボルネオ熱帯雨林域に成立する天然林がオイルパーム農園に転換された場合の環境リスク評価に多大に寄与する。

研究成果の概要(英文)：The original plan was to evaluate the environmental change by the land use change from forests to oil palm plantations over Malaysia. However, we did not conduct the "pan-Malaysia" plan because of the worldwide COVID situation. Under such a situation, instead, we were able to use the adjacent natural forest and oil palm plantation sites with high-quality flux observation systems: we obtained (1) environmental control on atmosphere-canopy CO₂/H₂O exchange, further (2) their change at El Nino and La Nina events, and (3) projections about long-term change in ecosystem-scale water and carbon cycling after the land use change.

研究分野：森林生物地球科学

キーワード：土地利用変化 水循環 炭素循環 東南アジア プランテーション

1. 研究開始当初の背景

常に増加し続ける世界の植物油需要に呼応するアブラヤシ農園の拡大は止む気配がない。世界のヤシ油総生産の80%以上をインドネシアとマレーシアの2国が担っている。両国のアブラヤシ農園面積は同程度であるが、農園造成に伴う土地利用変化で伐採される森林はマレーシアの方でより顕著である。この森林破壊は生物多様性喪失や局地環境の悪化に繋がっている。一方で、マレーシアにとってアブラヤシ農園は重要な収入源であり、地域にとっても社会経済的に重要な役を担っている。よって、アブラヤシ農園の拡大から生じるリスクを評価し、そのリスクを軽減するための森林保護から得られるベネフィットと、森林保護に起因するヤシ油生産減と地域社会システムの変化から生じるコストとの比較から、アブラヤシ農園経営と森林保護の均衡を保つ方策を見出す研究が必要である。そこで本申請の到達目標は、アブラヤシ農園拡大が引き起こすリスクの客観的評価を経営-保護均衡戦略に活かすために、アブラヤシ農園と森林の物質循環を比較し、その差異を明らかにすることである。

2. 研究の目的

経営-保護均衡戦略の策定には、オイルパーム（アブラヤシ）農園拡大が引き起こす環境悪化因子をあぶり出すことで森林保護活動のベネフィット面を客観的・科学的に評価することが大前提となる。そこで本研究の目的は、マレーシア全域の様々な環境条件下にあるオイルパーム農園と森林の物質循環過程の観測データを確保し、これらの比較により、アブラヤシ農園と森林の差異を明らかにすることであった。しかし、新型コロナウイルス感染拡大により、マレーシア全域を対象とする観測・解析は頓挫した。一方で、フラックス観測タワー施設を含む最高度の観測システムを有し、しかも、お互いに隣接するオイルパーム農園・天然林サイトの2つのサイトに、観測・解析を集中することになり、当初予定していたよりも精緻な成果を目的とした。両サイトにおける、(1) 大気-群落間 $\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 交換速度の環境応答、しかも、(2) エルニーニョ・ラニーニャ時の環境応答の変化、を明らかにした上で、(3) 土地利用転換後の、生態系スケールの水・炭素循環の長期変化の予測を行うこと、である。

3. 研究の方法

ボルネオ熱帯雨林域では、多くの天然林が1970年代以降に破壊や劣化を経験し、より経済的価値の高いオイルパーム農園へと置き換わりつつある。この急速な土地利用転換は、大気-植生間の物質交換特性の変化を通じて、局地～広域環境を大きく改変する恐れがある。そのため、天然林とオイルパームそれぞれの、特に樹冠 $\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 交換速度（フラックス）の環境応答特性を理解した上で、土地利用転換による大気陸面過程の変化を議論しなければならない。ボルネオ熱帯雨林域の気象条件は、通年でほぼ一定、つまり季節性に乏しい各気象因子、高放射エネルギー、高温多湿、多雨に特徴づけられる。一方、2～7年周期で発生するエルニーニョ・南方振動（ENSO）がこれら各気象因子の年々変動を引き起こす。よって、ボルネオ熱帯雨林域植生の環境応答特性を解明するためには、ENSOの各フェーズ（エルニーニョ・ラニーニャ）と平常時を含む長期間の連続的な $\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ フラックス観測を行い、フラックス、気象因子それぞれの時系列データの比較・解析を行う必要がある。

本研究では、ボルネオ熱帯雨林域に成立する天然林とオイルパームのフラックス環境応答特性を導き、両者の相違・共通点を明らかにすることを目的とした。そのために、ボルネオ島北部の天然林を擁する国立公園とオイルパーム農園において、渦相関法フラックス・気象観測、樹液流計測、土壤環境計測を長期間に渡り実施した。そして、機構論的モデルと機械学習モデルを時系列データ解析に援用して、フラックス環境応答特性を導いた。さらに、天然林からオイルパーム農園への土地利用転換により引き起こされる水・炭素循環の変化を精緻に検討した。

4. 研究成果

天然林の環境応答特性：対象地はボルネオ島北部沿岸に位置するランビルヒルズ国立公園内の主にフタバガキ科樹木で構成される天然生熱帯雨林である。エルニーニョ（ラニーニャ）の発生時、雲量の影響を受けて、気温は有意に増加（減少）し、降雨量とその結果である土壤水分量は有意に減少（増加）した。純生態系生産量は、エルニーニョ（ラニーニャ）時に有意に減少（増加）した。機械学習モデルの結果から、平常・ラニーニャ時には、純生態系生産量では光合成能力、蒸発散量では全天日射量が決定要因であった。一方、エルニーニョ時には、純生態系生産量、蒸発散量ともに、主に気孔開度を表現する群落輸送効率が主要の駆動因子であった。さらに、樹液流計測の結果から、天然林サイトにおいて、少数の巨木により生態系水利用量の大部分が占められていることや、エルニーニョ時の高温乾燥条件においても積極的な水利用を続けたことが分かり、乾燥に対する天然生ボルネオ熱帯雨林の脆弱性が示された。

オイルパームの環境応答特性：対象地は天然林サイトに隣接するランビルオイルパーム農園である。2019年のエルニーニョ時、少雨の影響により強い土壤乾燥条件にあった。そして、エルニーニョ期間中およびその直後に純生態系生産量の月積算値が負となった。また、光合成能力も同時期に大きく低下し、エルニーニョ前の水準に回復するまで3ヶ月程度の期間を要した。これは、乾燥により葉の光合成システムが損傷を受け、その影響が中期的に継続したと考えることができる。機械学習モデルの結果から、オイルパームの純生態系生産量、蒸発散量ともに全天日射量が主要な駆動因子であることが明らかになった。大気飽差が与える影響は限定的であるが、土壤乾燥はCO₂吸収速度を低下させた。このことは、エルニーニョ時の低水準の純生態系生産量を説明できると考えられる。一方、蒸発散量については土壤水分量の変化に対する感度は相対的に小さかった。また、樹液流計測から、オイルパームの蒸発散量に占める蒸散量の割合は一般的な森林と比較して小さいことが分かった。これらの結果から、オイルパームと大気との間のH₂O輸送は、蒸散よりも遮断蒸発や地表面蒸発により支配されており、気象因子に強く駆動されていることが示唆された。

天然林からオイルパームへの土地利用転換の影響：天然林サイトとオイルパームサイトで同時期に得られたCO₂・H₂Oフラックスデータを用いて両サイトの炭素・水循環構成要素の差異を検討することで、天然林からオイルパーム農園に土地利用転換が行われた場合、炭素・水循環がどのように変化するかを考察した(図)。土地利用転換により総一次生産量・生態系呼吸量は、増

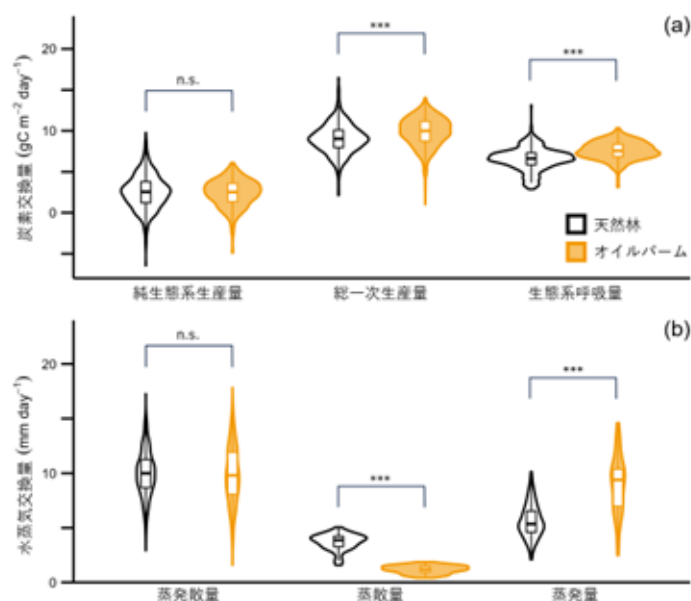


図 炭素・水循環要素の天然林・オイルパーム間比較
炭素(a)および水蒸気(b)の交換量のバイオリンプロットを箱ひげ図とともに示す。***と”n.p.”はそれぞれWilcoxonの順位和検定のp値が0.001未満または0.05以上であることを意味する。

加することが示唆された。オイルパームの葉量は天然林の3分の1程度であるにもかかわらず群落光合成量である総一次生産量で天然林を上回ったのは、高い個葉光合成能力を持っていることに加え、効率的に放射エネルギーを吸収できる樹冠構造を有しているためと考えられる。また、天然林と比較してオイルパームは葉量が小さく下層植生も発達していないため、林床まで日射が到達しやすく、オイルパーム農園の地表面温度は高くなり、土壤呼吸量・生態系呼吸量が大きくなる可能性が考えられる。オイルパーム農園における総一次生産量と生態系呼吸量の両方の増加傾向は、総一次生産量と生態系呼吸量の差である純生態系生産量に土地利用転換による影響が見られないという結果を引き起こした。対照的に、土地利用転換により蒸散量・蒸発量は、減少・増加することが示唆された。オイルパームの蒸散量の大幅な低下は、葉量の減少に対応していると考えられる。蒸発量の増加は、林床での放射エネルギーと風速の増加により蒸発効率が上昇したことが起因している可能性がある。これら蒸発量・蒸散量の増減が相殺された結果、土地利用転換に伴う蒸発散量に変化が見られないという結果となった。

以上より、天然林からオイルパームへの土地利用転換は、大気-森林間の炭素・水収支の内訳を変化させる一方で、全体としての炭素・水収支は大きく変化しないことが本研究により明らかになった。ただし、オイルパーム農園ではパーム油生産のため、定期的に果実収穫が行われている。果実収穫により林内から取り去られた炭素量を、純生態系生産量から差し引くと、オイルパームは炭素貯留源ではなく炭素放出源として機能していることが示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Fujime, N., Kumagai, T., Egusa, T., Momiyama, H. and Uchiyama, Y.	4. 巻 301-302
2. 論文標題 Importance of calibration in determining forest stand transpiration using the thermal dissipation method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Agricultural and Forest Meteorology	6. 最初と最後の頁 108356
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 Momiyama, 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 Hata, Y., Kumagai, T., Shimizu, T. and Miyazawa, Y.	4. 巻 477
2. 論文標題 Implications of seasonal changes in photosynthetic traits and leaf area index for canopy CO ₂ and H ₂ O fluxes in a Japanese cedar (<i>Cryptomeria japonica</i> D. Don) plantation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Ecological Modelling	6. 最初と最後の頁 110271
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 Kiyono, T., Noda, H. M., Kumagai, T., Oshio, H., Yoshida, Y., Matsunaga, T. and Hikosaka, K.	4. 巻 128
2. 論文標題 Regional-scale wilting point estimation using satellite SIF, radiative-transfer inversion, and soil-vegetation-atmosphere transfer simulation: A grassland study	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research -Biogeosciences	6. 最初と最後の頁 e2022JG007074
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 Nagai, S., Katsumata, C., Miura, T., Tsutsumida, N., Ichie, T., Kotani, A., Nakagawa, M., Khoon, K. L., Kobayashi, H., Kumagai, T., Tei, S., Pungga, R. a. S., Yamada, T., Kameda, A., Yanagisawa, M., Nasahara, K. N., Muraoka, H., Ichii, K. and Tokumoto, Y.	4. 巻 6
2. 論文標題 Perspective: Improving the accuracy of plant phenology observations and land-cover and land-use detection by optical satellite remote-sensing in the Asian tropics	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Frontiers in Forests and Global Change	6. 最初と最後の頁 1106723
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 Takamura, N., Hata, Y., Matsumoto, K., Kume, T., Ueyama, M. and Kumagai, T.	4. 巻 120
2. 論文標題 El Nino-Southern Oscillation forcing on carbon and water cycling in a Bornean tropical rainforest	5. 発行年 2023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 e2301596120
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 -

〔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	永井 信 (Nagai Shin) (70452167)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(地球表層システム研究センター)・主任研究員 (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門・教授 (16401)	
研究分担者	宮沢 良行 (Miyazawa Yoshiyuki) (80467943)	九州大学・キャンパス計画室・学術推進専門員 (17102)	

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
---------	---------