

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月17日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008-2011

課題番号：20255010

研究課題名（和文） ガス交換的視点による東南アジア熱帯雨林の機能評価

研究課題名（英文） Gas exchanges of Southeast Asian tropical rainforest

研究代表者

小杉 緑子 (KOSUGI YOSHIKO)

京都大学・農学研究科・助教

研究者番号：90293919

研究成果の概要（和文）：本研究は、東南アジア熱帯雨林が温室効果ガスのシンク/ソースとしてどのように機能しているかを評価したものである。CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、BVOC について「樹冠上フラックス（生態系全体）」「葉群」および「土壌圏」領域における挙動をみるとともに、分光植生指標および同位体指標の挙動についても調査を行った。東南アジア熱帯雨林では、降雨パターンの変動が微気象環境の季節・年々変動を生み出しており、また蒸発散、光合成、生態系呼吸などがこれらの様々な微気象環境に複雑に反応することにより、結果として、広範囲の気象条件下において極めて安定的なガス交換特性が維持されていることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：This research evaluated the function of a Southeast Asian tropical rainforest as the sink/source of several greenhouse gases. We mainly focused on the flux observation of the gas exchange of CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, and BVOC at the scale of leaf, plant, soil, and also at the scale of whole canopy. We also tested the two kinds of expectative gas exchange indexes, i.e., the vegetation indexes using spectroradiometric observations, and indexes using stable isotopes. In this forest, variability in rainfall pattern resulted in seasonal and inter-annual variability in micrometeorology; evapotranspiration, photosynthesis, and ecosystem respiration responded to these changes, and compensated for each other and/or other components of micrometeorology, resulting in rather stable annual evapotranspiration and NEE, even during a considerably dry year.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	9,700,000	2,910,000	12,610,000
2009年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
2010年度	8,600,000	2,580,000	11,180,000
2011年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
年度			
総計	34,900,000	10,470,000	45,370,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：森林科学

キーワード：CO<sub>2</sub> フラックス、蒸発散、個葉ガス交換、CH<sub>4</sub> フラックス、N<sub>2</sub>O フラックス、BVOC フラックス、分光植生指標、炭素動態

## 1. 研究開始当初の背景

IPCC第4次評価報告書で温暖化の原因と断

定された温室効果ガスの吸収源として、陸域生態系（特に森林）の果たす役割が期待され

ている。中でも莫大なバイオマスを有する熱帯雨林は、「地球の肺」として最大の温室効果ガスであるCO<sub>2</sub>の吸収などの重要なガス交換的機能を担うことが期待されている。だが一方で、熱帯雨林が実際のところガス交換上どのような機能を有しているかについて観測に基づき評価した例は、驚くほど少ない。

FLUXNETなどの観測網が構築され近年タワーサイトが飛躍的に増加しているCO<sub>2</sub>においてすら、連続観測を長期に継続して維持し、なおかつ交換速度とそのメカニズムについての研究を発信するに至る拠点サイトは、特に熱帯雨林生態系においてわずかである。

また、森林と大気環境の間ではCO<sub>2</sub>のみならずH<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、BVOCなどの多くのガス態物質が交換されており、森林と周囲の大気、ひいては地球規模での大気環境との相互作用はこれらのガス交換を通じて行われているが、熱帯雨林におけるこれらの様々なガス態物質の動態や相互に連動するメカニズムについては、さらに研究は立ち遅れている。

## 2. 研究の目的

本研究は、樹冠空間および土壌圏を含む森林全体としての一東南アジア熱帯雨林が、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)、水蒸気(H<sub>2</sub>O)、メタン(CH<sub>4</sub>)、亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O)、生物起源揮発性有機化合物(BVOC)などの温室効果ガスおよび大気化学に影響力をもつガス態物質のシンク/ソースとしてどのように機能しているのかを、ガス交換の地上観測に基づいて評価することを目的としている。

本研究では、一東南アジア熱帯雨林において、これらガス態物質の放出/吸収速度および収支を地上観測に基づいて統合的に把握する。その目的は、単に収支の把握にとどまらず、熱帯雨林生態系が生物物理的および生物地球化学的プロセスを通じて大気環境と相互作用する様を多面的に描き出し、ガス交換過程からみた熱帯雨林の在り様と機能について洞察しようとするものである。

本研究は、一東南アジア熱帯雨林サイトをスーパーステーションとし複数のガス態物質の動態を知ること为目标としているが、一システムに対する真の理解こそが、広域システムの理解へと繋がるものと考えている。

## 3. 研究の方法

本研究では「樹冠上フラックス(生態系全体)」「葉群」「土壌圏」の3つの領域を設定し、各物質の交換過程についてそれぞれの領域における挙動をみていく。具体的には、熱・水・CO<sub>2</sub>・CH<sub>4</sub>・N<sub>2</sub>Oについて樹冠上フラ

ックスを、熱・水・CO<sub>2</sub>・CH<sub>4</sub>・BVOCについて「葉群」領域での過程を、また、熱・水・CO<sub>2</sub>・CH<sub>4</sub>・N<sub>2</sub>Oについて「土壌圏」領域での過程をみていく。これらの情報をベースとして、3つの領域それぞれにおいて複数のガス態物質の交換過程の相互連動について解析する。このことによりガス交換を支配する生物物理および生物地球化学プロセス、すなわち、ガス交換からみた東南アジア熱帯雨林生態系の在り様と機能を明らかにしていく。

また同時に、三つの領域をつなぐ統合的な視点でも各ガス態物質の放出/吸収速度および収支の把握を試みる。本研究ではまた、ガス交換を支配する生態系の生物物理および生物地球化学プロセスに関する情報を内包する二つの生態系ガス交換指標、リモセン分光指標および同位体指標の開発にも取り組む。研究の遂行にあたって、まずタワー観測システムの構築と維持およびインフラ管理・現地カウンターパートとの連携の2つの基盤を整備・維持する。その上で取り組むべき先端課題として12の研究テーマを設定し、棲み分け型の組織的体制を避けて、2つの基盤と12の研究テーマを相互に関連づける**曼荼羅方式**を取った。

## 4. 研究成果

### (1) 樹冠上フラックス

樹冠上熱・水・CO<sub>2</sub>フラックス(=交換速度)について、7年間にわたる連続観測データを解析した結果、観測された範囲の環境変動に対して、NEE・蒸発散ともに驚くべき安定性を保っていることが明らかになってきた。一方で、タワーデータからインバース法(Kosugi et al, Agric. For. Met., 2005)により樹冠スケールでの気孔開閉・光合成に関する情報を抽出し、また素過程観測によって得られた情報とも併せて予備解析を行ったところ、蒸発散については、1)表層50cmまでの土壌水分量変動では少雨期の蒸発散を説明できないことから、少雨期にはより深部からの水の供給が蒸発散を支えていること、2)年間約1,300mmという安定的な蒸発散は気孔開閉の制御によって調整された結果であること、3)少雨年に僅かながら蒸発散の減少傾向が見られたことから、より極端な乾燥下では平衡が崩れる可能性があること、が示唆された。またNEEについては、4)樹冠光合成が光環境の変動では説明できず、多雨期少雨期を問わず不均一な気孔閉鎖を伴う光合成の日中低下が起こっていること、5)生態系呼吸量および生態系総光合成量(GPP)がともに少雨期に若干減少するため、両者が相殺し乾燥下で

も安定的な NEE となっていること、などが示された。

これらの結果はいずれも、「安定的」であることが、即ち「静的」であることを意味するものではないことを表しており、現在までに得られているデータよりほんの少し幅広い環境変動、例えば ENSO (エルニーニョ・南方振動) に伴う強乾燥など、に対しては平衡が崩れる可能性があることを強く示唆する結果となった (論文④⑥、学会発表⑪⑬⑱)。

## (2) 葉群過程

個葉スケールでのガス交換特性の鉛直分布を明らかにした (論文①)。また個葉スケールで大気乾燥とともに不均一な気孔閉鎖による光合成低下が起こっており (論文⑤⑦)、これが樹冠スケールでの CO<sub>2</sub> 吸収能にも影響を与えていることが明らかになった (学会発表⑨)。また、葉群からの CH<sub>4</sub> および BVOC フラックスについて調査したところ、CH<sub>4</sub> の放出は見られなかった (論文③)。BVOC については、目だったイソプレンの放出は見られず、塩化メチルおよびモノテルペン類の放出が見られた (論文⑧、学会発表④⑧)。

## (3) 土壌圏過程

土壌圏における CO<sub>2</sub>・CH<sub>4</sub>・N<sub>2</sub>O の放出ないし吸収速度について調査し、それぞれのフラックスの時空間変動と土壌水分の時空間変動 (学会発表①) との関係を示した。CO<sub>2</sub>・CH<sub>4</sub>・N<sub>2</sub>O とともに土壌水分の影響を受けてフラックスが変動するが、その変動特性は時間的に見た場合と空間的に見た場合で異なるなど、複雑な関係をとることが明らかになった。このため、熱帯雨林土壌圏からのこれらの温室効果ガスの放出速度について、十分な地上観測に基づかず単純な相関からモデル化・予測を行うことは避けるべきであると考えられた。また生態系呼吸の各成分について大掛かりな抜倒試験および呼吸フラックスの集中観測を実施し、その特性を明らかにした (論文②、学会発表③⑤⑥⑫⑯)。

## (4) 分光植生指標・炭素安定同位体指標

分光反射スペクトルの地上連続観測を行い、分光植生指標とフラックスとの関係を明らかにした (学会発表⑩)。炭素安定同位体指標を用いて、吸水深度の解析 (学会発表⑬⑰) や、樹冠各層における葉のガス交換特性の解析 (学会発表⑦⑳㉓) を行った。これらの結果をもとに、熱・水・CO<sub>2</sub> および安定同位体指標の変動を予測できる SVAT 多層モデ

ルを構築した (学会発表⑭⑲㉑㉒)。

## (5) まとめ

熱帯域では、降雨パターンが気候および植生を決定する重要な環境要因である。調査を行った半島マレーシア熱帯雨林では、一見したところ、気候変動に対して非常に安定したガス交換特性を取ることが諸観測から明らかになった。が、その一方で、少雨期には土壌深部からの水の供給が安定した蒸発散を支えており、また同時に、気孔閉鎖による調整が行われ、光合成量および生態系呼吸量とともに小さくなる結果、このような安定した値となっていると考えられた。一般に、熱帯雨林においては、降雨は十分にあり、CO<sub>2</sub> 吸収量などに対して降雨パターンの影響は小さいと考えられがちである。しかしながら、アマゾン熱帯雨林などでは比較的降雨の少ない少雨期と多雨期がはっきりと存在しており、両者の期間で CO<sub>2</sub> 交換特性が大きく異なることが指摘されている。東南アジア熱帯雨林においても、境界域に位置する半島マレーシア熱帯雨林などでは、これと同様の兆候が見られることが、解析から明らかになった。安定したガス交換を支えているのは深い吸水深度であると考えられ、さらに強度の気候変動に対してどのように熱帯雨林が反応するかを知るためには、今後特に土壌内の水分変動と諸フラックスの関係に着目し調査研究を行っていく必要がある。CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、BVOC 中のイソプレンなどについては、調査対象とした熱帯雨林天然林は目立ったソースにはなっていないと考えられた。これらの微量ガスの動態を明らかにするためには、更なる調査が必要である。

## 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 8 件)

- ① Kosugi, Y., Takanashi, S., Yokoyama, N., Philip, E., Kamakura, M.: Vertical variation in leaf gas exchange parameters for a Southeast Asian tropical rainforest in Peninsular Malaysia, *Journal of Plant Research*, in press, 2012, DOI: [10.1007/s10265-012-0495-5](https://doi.org/10.1007/s10265-012-0495-5) (査読あり)
- ② Makita, N., Kosugi, Y., Dannoura, M., Takanashi, S., Niiyama, K., Abdul Rahman K., Abdul Rahim N.: Patterns of root respiration rates and morphological traits in 13 tree species in a tropical forest, *Tree Physiology*, in press, 2012, DOI: [10.1093/treephys/tps008](https://doi.org/10.1093/treephys/tps008) (査読あり)

- ③ Kamakura, M., Kosugi, Y., Nakagawa, R., Itoh, M.: Methane flux of leaves in a tropical rainforest and a temperate conifer forest, *Journal of Agricultural Meteorology*, 68, 25-33, 2012, DOI: 10.2480/agrmet.68.1.3 (査読あり)
- ④ Kosugi, Y., Takanashi, S., Tani, M., Ohkubo, S., Matsuo, N., Itoh, M., Noguchi, S., Abdul Rahim N.: Influence of inter-annual climate variability on evapotranspiration and canopy CO<sub>2</sub> exchange of a tropical rainforest in Peninsular Malaysia. *Journal of Forest Research*, 17, 227-240, 2012, DOI: 10.1007/s10310-010-0235-4 (査読あり)
- ⑤ Kamakura, M., Kosugi, Y., Takanashi, S., Matsumoto, K., Okumura, M., Philip, E.: Patchy stomatal behavior during midday depression of leaf CO<sub>2</sub> exchange in tropical trees. *Tree Physiology*, 31, 160-168, 2011, DOI: 10.1007/s10310-010-0235-4 (査読あり)
- ⑥ Takanashi, S., Kosugi, Y., Ohkubo, S., Matsuo, N., Tani, M., Abdul Rahim, N: Water and heat fluxes above a lowland dipterocarp forest in Peninsular Malaysia, *Hydrological Processes*, 24, 472-480, 2010, DOI: 10.1002/hyp.7499 (査読あり)
- ⑦ Kosugi, Y., Takanashi, S., Matsuo, N., Abdul Rahim, N: Midday depression of leaf CO<sub>2</sub> exchange within the crown of *Dipterocarpus sublamellatus* in a lowland dipterocarp forest in Peninsular Malaysia, *Tree Physiology*, 29, 505-515, 2009, DOI: 10.1093/treephys/tpn041 (査読あり)
- ⑧ Saito, T., Yokouchi, Y., Kosugi, Y., Tani, M., E. Philip, and T. Okuda, Methyl chloride and isoprene emissions from tropical rain forest in Southeast Asia, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L19812, 2008, DOI: 10.1029/2008GL035241 (査読あり)
- [学会発表] (計 2 3 件)
- ① Noguchi, S., Adachi, N., Kosugi, Y., Abdul Rahim, N., Abdul Rahman, K., Spatial distribution of surface soil moisture in a tropical rain forest -A case study of Pasoh Forest Reserve, Malaysia-, 第 123 回日本森林学会大会, 2012/3/27, 宇都宮大学 (栃木県)
- ② Yoshifuji N, Igarashi Y, Kosugi Y., Tantasirin C, Suzuki M, Effect of leaf morphological and photosynthetic characteristics on canopy carbon and water fluxes of a teak plantation in northern Thailand, The 5th EAFES International Congress, 2012/3/20, 龍谷大学 (滋賀県)
- ③ Majima K, Kosugi Y., Takanashi S., Noguchi S., Nakaji T., Makita N, Dannoura M, Tani M., Tanaka K., Abdul Rahman K, Decomposition of and Respiration from Coarse Woody Debris in Pasoh Forest Reserve, Malaysia, The 5th EAFES International Congress, 2012/3/20, 龍谷大学 (滋賀県)
- ④ Okumura, M., Kosugi, Y., Takanashi, S., Kamakura, M., Matsumoto, K., Nakagawa, K., Tani, A., Tohno, S., Philip, E., Biogenic Volatile Organic Compound Emissions from Tropical Tree Species in Malaysia, The 5th EAFES International Congress, 2012/3/20, 龍谷大学 (滋賀県)
- ⑤ Makita N, Kosugi Y., Dannoura M, Takanashi S., Niiyama K, Abd Rahman K, Abdul Rahim N, Patterns of root respiration rates and morphological traits in 13 tree species in a tropical forest, AsiaFlux Workshop 2011, 2011/11/10, Johor Bahru (マレーシア)
- ⑥ Dannoura M, Kosugi Y., Takanashi S., Makita N, Kanemitsu S, Tanaka K., Haruta T, Niiyama K, Abdul Rahman K, Abdul Rahim N, Measurement of autotrophic respiration of tree in Pasoh -from leaves to roots, AsiaFlux Workshop 2011, 2011/11/10, Johor Bahru (マレーシア)
- ⑦ Takanashi S., Kosugi Y., haruta T, Dannoura M, Makita N, Tanaka K., Niiyama K, Abdul Rahman K, Abdul Rahim N, Vertical profile of leaf photosynthetic characteristics in a tropical lowland dipterocarp forest at Pasoh, Peninsular Malaysia, AsiaFlux Workshop 2011, 2011/11/10, Johor Bahru (マレーシア)
- ⑧ Okumura M, Kosugi Y., Takanashi S., Kamakura M, Matsumoto K, Tohno S, Philip E, Biogenic Volatile Organic Compound Emissions from Thirty Eight Tropical Tree Species in Malaysia, AsiaFlux Workshop 2011, 2011/11/10, Johor Bahru (マレーシア)
- ⑨ Kamakura M., Kosugi Y., Takanashi S., Philip E., The effect of patchy stomatal behavior on leaf- and canopy-scale CO<sub>2</sub> flux of a tropical rainforest in Peninsular Malaysia, Pasoh, AsiaFlux Workshop 2011, 2011/11/10, Johor Bahru (マレーシア)
- ⑩ Nakaji T., Kosugi Y., Takanashi S., Oguma H, Abdul Rahim Nik, Relationship between LUE and tower-observed spectral vegetation indices in a tropical rainforest at Pasoh, Peninsular Malaysia, AsiaFlux Workshop 2011, 2011/11/10, Johor Bahru (マレーシア)
- ⑪ Kosugi Y., Takanashi S., Tani M., Ohkubo S, Matsuo N., Itoh M, Noguchi S., Abdul Rahim Nik, Impact of climate change on canopy CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O exchange of a tropical rainforests in Peninsular Malaysia, Pasoh, AsiaFlux Workshop 2011 (招待講演),

- 2011/11/10, Johor Bahru (マレーシア)
- ⑫ 檀浦正子、小杉 緑子、牧田 直樹、兼光 修平、高梨 聡・新山 馨、田中 克典、春田 岳彦、樹木独立栄養呼吸に占める根呼吸の役割、第 122 回日本森林学会大会、2011/3/26、静岡大学 (静岡)
- ⑬ 春田 岳彦、松尾奈緒子、高梨聡、小杉緑子、熱帯樹木のガス交換特性の鉛直プロファイルと吸水源・光環境の関係、日本生態学会第 58 回大会、2011/3/9、札幌コンベンションセンター (北海道)
- ⑭ 高梨聡、小杉緑子、気孔開閉の不均一性が  $H_2O/^{13}CO_2$  交換特性に与える影響、日本生態学会第 58 回大会、2011/3/9、札幌コンベンションセンター (北海道)
- ⑮ Kosugi, Y., Takanashi, S., Tani, M., Ohkubo, S., Matsuo, N., Itoh, M., Noguchi, S., Abdul Rahim N., Influence of inter-annual climate variability on evapotranspiration and canopy  $CO_2$  exchange of a tropical rainforest in Peninsular Malaysia, PASOH INTERNATIONAL SYMPOSIUM 2010 (招待講演), 2010/11/11, Kuala Lumpur (マレーシア)
- ⑯ Makita N., Kosugi Y., Dannoura M., Takanashi S., Niiyama K., Abdul Rahim Nik, Root respiration rates depend on root morphology in a tropical rainforest at Pasoh, Peninsular Malaysia, Symposium on the usage of new techniques to understand gas exchange and carbon dynamics in the forest ecosystem, 2010/11/1, 京都大学 (京都府)
- ⑰ Haruta T., Matsuo N., Kosugi Y., Takanashi S., Vertical profile of the gas exchange traits of tropical trees estimated from the carbon and oxygen isotope composition in leaf organic matter, Symposium on the usage of new techniques to understand gas exchange and carbon dynamics in the forest ecosystem, 2010/11/1, 京都大学 (京都府)
- ⑱ Takanashi S., Measurement and modeling of gas exchange processes at a forest, K-JAPAN WORKSHOP on Forests and Climate Change (招待講演)、2010/8/26、英国大使館 (東京都)
- ⑲ 小杉緑子・高梨聡・谷誠・大久保晋治郎・松尾奈緒子・伊藤雅之・野口正二・Abdul Rahim, Nik、半島マレーシア Pasoh 熱帯雨林において気候の年々変動は蒸発散・樹冠上  $CO_2$  交換・および Big-Leaf パラメータにどの程度影響を与えるか、農業気象学会、

2010/3/18、名城大学 (愛知県)

- ⑳ Kosugi Y., An Overview of the Studies using Stable Isotopes at KEW and Pasoh, Second mini symposium on the use of stable isotopes in tree physiology and forest ecology(招待講演), 2009/7/3, Nancy (フランス)
- ㉑ Takanashi S., Kosugi Y., Matsuo N., Ohkubo S., Simulations of carbon-isotope discrimination above and within a forest canopy, AsiaFlux Workshop 2009, 2009/10/26、札幌 (北海道)
- ㉒ Takanashi S., Simulations of carbon-isotope discrimination above and within a forest canopy using a multi-layer micrometeorological model, Second mini symposium on the use of stable isotopes in tree physiology and forest ecology, 2009/7/3, Nancy (フランス)
- ㉓ 小杉緑子、陸域生態系モデルにおいて特に考慮すべき熱帯雨林のガス交換特性とは、気象学会シンポジウム第 6 回統合的陸域圏研究連絡会 (招待講演)、2009/5/3、つくば (茨城県)

[その他]

ホームページ

<http://www.bluemoon.kais.kyoto-u.ac.jp/pasoh/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小杉 緑子 (KOSUGI YOSHIKO)  
京都大学・農学研究科・助教  
研究者番号：90293919

### (2) 研究分担者

谷 誠 (TANI MAKOTO)  
京都大学・農学研究科・教授  
研究者番号：00314245  
高梨 聡 (TAKANASHI SATORU)  
森林総合研究所・気象環境研究領域・研究員  
研究者番号：90423011  
野口 正二 (NOGUCHI SHOJI)  
森林総合研究所・東北支所・チーム長  
研究者番号：90343780  
中路 達郎 (NAKAJI TATSURO)  
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：40391130  
田中 克典 (TANAKA KATSUNORI)  
海洋研究開発機構・地球環境変動領域・主任研究員  
研究者番号：803442274  
山下 多聞 (YAMASHITA TAMON)  
島根大学・生物資源科学部・准教授  
研究者番号：30263510

松尾 奈緒子 (MATSUO NAOKO)  
三重大学・生物資源学研究科・講師  
研究者番号：00423012

(3)連携研究者