

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20380090

研究課題名（和文） 気候変動が東南アジア熱帯雨林・季節林生態系の水循環に与える
インパクト研究課題名（英文） Impact of climate change on hydrologic cycle in Southeast Asian
tropical rainforest and seasonal forest

研究代表者

熊谷 朝臣（KUMAGAI TOMOOMI）

九州大学・大学院農学研究院・准教授

研究者番号：50304770

研究成果の概要（和文）：カンボジア熱帯季節林において、外来樹種は郷土樹種より光合成能力が高いが、乾季に気孔を閉じ気味になること、一方、郷土樹種は乾季も地中深くまで伸ばした根のおかげで雨季に貯えられた地下水を利用して気孔を開け気味にできること、が分かった。東南アジア熱帯雨林の主要樹種であるリュウノウジュを対象として降水遮断実験を行った。樹体内の通水分布を考慮した精密な樹液流計測により単木～個葉スケールの蒸散速度を算定することができ、蒸散と環境因子との対応関係から、乾燥条件の気孔開閉に及ぼす影響を考察した結果、リュウノウジュは乾燥に対して極端に気孔開閉による水利用の節約を行わないということがわかった。

研究成果の概要（英文）：In the Cambodian tropical seasonal forest site, exotic plant species' photosynthetic ability and sensitivity of stomatal control to drought were higher than domestic plant species' ones, and further, these were due to root system extended to deep water table. In the Malaysian tropical rainforest site, through-fall exclusion experiments reveals that Dipterocarpaceae trees, major tree species in Southeast Asian tropical rainforests, have little response of water use to drought condition by stomatal control.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	9,300,000	2,790,000	12,090,000
2009年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：生物環境物理学

科研費の分科・細目：森林学・森林科学

キーワード：マレーシア、カンボジア、熱帯雨林、熱帯季節林、蒸発散、樹液流計測、
土地利用、気候変動

1. 研究開始当初の背景

熱帯林域は主に雨林域と季節林域により構成される。雨林域では、降雨に季節性が乏しく、年間を通じて湿潤である。一方、季節林域には明確な雨季・乾季が存在する。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第4次評価報告書にも見られるように、気候変動は

気温上昇だけでなく降水パターンの変化を伴う。雨林域における降水量の年々減少、季節林域においては、雨季の始まりが遅れることによる少雨傾向が東南アジア湿潤熱帯では既に顕在化している。このような乾燥条件は、エルニーニョの発生時に一層拍車がかかる。東南アジア熱帯雨林は、世界で最も湿潤

な気候条件にあり、そこに生育する樹木はめったに強い乾燥条件に遭遇しない。申請者は、ボルネオ熱帯雨林において通常年に生じるような乾燥条件下では蒸散・光合成が抑制されないことを発見し、この結果を利用して温暖化シナリオでのシミュレーションを行った。その結果、気候変動条件下でも、森林蒸散量・パターンが変わらないことが示された。また、東南アジア熱帯季節林は、世界で最も強いモンスーン条件にあり、樹木は現況の乾燥強度・期間に適応して生存している。タイ熱帯季節林においては、乾季においても雨季の蓄積である地下水を利用することで森林蒸散が抑制されないことを示されている。以上の成果は、現況の気候条件で生じるような乾燥環境では、東南アジア湿潤熱帯の森林生態系の生産・水利用は頑健である可能性を示唆している。しかし、例外的な強い乾燥条件は、エルニーニョ時のように数年以上の間隔を持って起こる。そのため、現在の気候条件下だけでなく、温暖化に伴う気候変動条件下において乾燥の頻度・強度が大きくなった場合に対してこれら地域の森林生態系の生産・水利用がどのように反応するのかを予測するための資料は取得が困難であり、これまでほとんど取得されていない。よって、温暖化進行時の極端な乾燥条件における森林生態系の反応は想像の域を超えることができず、現時点では、気候変動が東南アジア湿潤熱帯の森林水循環に与えるインパクトの評価は外挿にならざるを得ない。強い乾燥といった極端現象出現に対して東南アジア熱帯の森林生態系がどのように反応するのかについて、基礎情報を取得することで、その環境許容力を評価し、影響予測を試みることは極めて重要である。

2. 研究の目的

本研究では、まず、熱帯雨林・季節林域としてマレーシア、カンボジアにおける現地観測をもとに、「極端な乾燥条件に対して、東南アジア湿潤熱帯の樹木の生産性・水利用はどう反応するのか？」を示す観測データを取得・解析する。そして、この結果を用いて、水利用量変動や蒸散調節機能を明らかにして水循環予測モデルを構築する。また、気候・気象学的視点から、熱帯雨林・季節林域それぞれの現況、さらには気候変動条件下での、降雨の時空間変動の特性を明らかにする。この降雨特性と水循環予測モデルを併せて利用することで、気候変動や土地改変が熱帯雨林・季節林を含む東南アジア湿潤熱帯の森林生態系の水循環に及ぼす影響を評価することを目指す。

近年、東南アジアでは成長速度が大きく伐期の早い早生樹を植林する早生樹林業が盛

んである。その際、郷土樹種からなる天然林からアカシア・ユーカリといった外来早生樹種の人工林への転換が進められる。しかし、現況の乾燥強度・期間に順応している郷土樹種が、水利用量が大きい可能性のある外来樹種に置き換えられた場合、気候変動条件下で流域水資源にどのような影響があるのか判断する資料は、ほとんど無い。そこで、本研究の目的の実用的な面として、「強い季節性（雨季・乾季）を持つ熱帯季節林域に導入された外来樹種と郷土樹種とで水利用・成長の環境応答はどう違うのか？」を把握することで、両地域の外来樹種導入による人工林造成の影響評価を行い、また、気候変動条件下での脆弱性を予測し、熱帯林業マネジメントに対して科学的情報を提供することをも目指す。

3. 研究の方法

本研究で利用する試験地は、熱帯雨林サイトとしてマレーシア・サラワク州のランビル国立公園（LB）、熱帯季節林サイトとして、カンボジア・カンボンチュナム州のコミュニティフォレスト（KC）である。

（1）LB：高さ90 mの林冠クレーンが設置されている。林冠クレーンにより、大気-森林境界（林冠）、森林内に自由にアクセスすることができ、林冠における生物学的・物理的プロセスを直接観測することができる。以上のタワー・クレーンでは、乱流変動法観測により森林-大気間の熱・水・炭酸ガス交換過程を量（森林がどれだけ炭素を吸収しているのか、どれだけ水蒸気を放出しているのか）・質（熱帯環境にどのように反応して交換過程は生起しているのか）の両方の観点から観測が行われている。これらのデータを利用して、森林生態系プロセスモデルが構築される。また、常に湿潤である熱帯雨林生態系サイトとしてのLBには、降雨遮断・強制乾燥実験装置（実験中は、この骨組みにビニールシートを付けて、降雨を遮断する）を設置し、短期乾燥が展葉・開花、樹木内の栄養塩・水収支の動態、食葉性昆虫の動態、送粉共生系の変化、種子-種子捕食者関係の変化、土壌分解系に与える影響を見る。申請者は、特に、熱帯雨林樹木の強乾燥条件下での水分生理特性を検出することを目指している。

（2）KC：KCには、郷土（天然林）樹種としてフタバガキ科樹木2種、外来（人工林）樹種としてアカシア・ユーカリが混在するサイトであり、このサイトにおいて水収支観測を行うことにより、熱帯季節林における天然林と人工林の水利用の差異を検出することができる。その結果、熱帯季節林地域において土地改変・森林転換が行われた場合の、地域

の水循環がどのような影響を受けるのか評価するための基礎情報が得られる。

以上のデータを利用し、次の研究段階「気候変動や土地改変が東南アジア熱帯雨林・季節林それぞれの水循環に及ぼす影響の評価」へ移行する。つまり、申請者により開発された確率過程を用いた環境因子の変化による水循環の変動予測手法（を以下の問いに答えるために利用する。（1）気候変動により強度乾燥条件におかれた場合の熱帯雨林・季節林の水循環がどう変わるのか？（2）天然林から人工林に転換され、さらに、気候変動により季節性が変わった場合、熱帯季節林の水循環はどう変わるのか？

4. 研究成果

2007年度：熱帯季節林サイトであるカンボジア・カンポンチュナム試験地には郷土（天然林）樹種としてフタバガキ科樹木2種、外来（人工林）樹種としてアカシア・ユーカリが混在する。熱帯季節林における天然林と人工林の水利用の差異を検出することを目的として、今年度は、各樹種それぞれの水利用特性、基本的気象特性の観測を開始した。また、個葉レベルの生理（光合成・気孔開度）特性の観測も開始した。土壌水分環境の記述は、研究対象となる生態系におけるエネルギー・物質循環の記述の基本である。そこで、明らかな降雨パターンの違いを持つマレーシア熱帯雨林とタイ熱帯常緑季節林の2つの研究サイトにおいて、降雨の季節変動と年々変動のそれぞれが土壌水分動態に与える影響を調べた。降水現象を確率過程と考え、過去の長期降水資料により確率密度関数パラメータを決定した。水文素過程（蒸発散・流出・貯留）を精密に記述した水収支式に降水確率分布を代入、整理して土壌水分確率分布を解析解として得た。水文素過程を表現するモデルは、両研究サイトにおけるこれまでの成果により構築され、また、そのモデルパラメータが決定された。まず、降水の確率パラメータの解析により、マレーシア熱帯雨林サイトでは少雨とエルニーニョの生起に密接な関係が認められた一方、タイ熱帯季節林ではエルニーニョと乾燥に有意な関係が見られないということ、タイ熱帯季節林では長期乾燥傾向が見られるということ、が明らかになった。モデル計算によると、降水の年々変動を考慮すると土壌水分乾燥域の生起確率が増加した。これは、降水の年々変動は生態系に一定のリスクを与えるという意味でもある。様々なモデルパラメータを用いて、このような確率計算を行うことで、主に植物にとって利用可能水分に関する生態系の頑健さは、マレーシア熱帯雨林では土壌物理性、

タイ熱帯季節林では植物の根系深度と湿潤季から乾燥季に持ち越される水分に起因することが明らかとなった。

2008年度：カンボジア・カンポンチュナム試験地において、今年度も昨年度に引き続き、各樹種それぞれの水利用特性、基本的気象特性の観測を行っている。また、個葉レベルの生理（光合成・気孔開度）特性の観測も継続している一方、個葉の形態や樹幹の通水特性の解剖学的計測も開始した。今年度の観測により、外来樹種は郷土樹種より光合成能力が高いが、乾季に気孔を閉じ気味になること、一方、郷土樹種は乾季も地中深くまで伸ばした根のおかげで雨季に貯えられた地下水を利用して気孔を開け気味にできること、が分かった。マレーシア・ランビル国立公園では降雨遮断・強制乾燥装置により乾燥条件下におかれるプロットと降雨遮断されない対照プロットを一組として計6組設定した。今年度は東南アジア熱帯雨林の主要樹種であるリュウノウジュを対象として降水遮断実験を行った。樹体内の通水分布を考慮した精密な樹液流計測により単木～個葉スケールの蒸散速度を算定することができた。蒸散と環境因子との対応関係から、乾燥条件の気孔開閉に及ぼす影響を考察した。結果、リュウノウジュは乾燥に対して極端に気孔開閉による水利用の節約を行わないということがわかった。

2010年度：マレーシア・ランビル国立公園では、これまで通りの一般気象観測項目（降水量、温湿度、放射収支、風向・風速、土壌水分）のデータを取得した。乱流変動法によるフラックス観測システムを完成させ、長期観測体制を確立した。過去2年間の降雨遮断・強制乾燥装置によるデータの解析により、ランビル国立公園の代表的樹種である *D. Aromatica*、*S. Becariana* はともに、乾燥条件に対し、水利用の節約を行わないことが明らかになった。特に、*D. Aromatica* は極端に乾燥に対する気孔の反応が鈍く、気候変動に伴う乾燥化により枯死といった強烈な影響を受ける可能性が示唆された。林冠クレーンを利用し、対象木の個葉レベルの光合成・蒸散特性計測、林冠構造解析、水ポテンシャル計測、葉のサンプリングを行った。サンプリングされた葉・枝から化学・同位体分析により、窒素利用効率・水利用効率・吸水深度を調べた。これらは、これからさらに続く関連研究のベースラインデータとして極めて重要である。カンボジア・カンポンチュナム試験地では、これまでの樹液流計測による個体スケールの生理生態学的計測に加え、個葉レベルの精密な計測により、4樹種（郷土種2樹種、外来種2樹種）の水を介した共存・競

争プロセスの検討を行った。カンボジアは乾季と雨季の違いが世界で最もはっきりと現れる場所であり、樹木の乾季における水利用様式に注目していたが、今回、郷土種の乾燥に対する気孔開閉の感度は世界で例を見ないほどの強烈な鋭敏さが観測され、郷土種の強い乾季中の生存戦略が示唆された。

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19件)

1. Kume, T., Tanaka, N., Kuraji, K., Komatsu, H., Yoshifuji, N., Saitoh, T. M., Suzuki, M. and Kumagai, T. (2011) Ten-year evapotranspiration estimates in a Bornean tropical rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, In press. [査読有]
2. Miyazawa, Y., Tateishi, M., Komatsu, H., Kumagai, T. and Otsuki, K. (2011) Are excised leaves available for modeling diurnal patterns of gas exchange of intact leaves? *Hydrological Processes*, In press. [査読有]
3. Yoshifuji, N., Komatsu, H., Kumagai, T., Tanaka, N., Tantasirin, C. and Suzuki, M. (2011) Interannual variation in transpiration onset and its predictive indicator for a tropical deciduous forest in northern Thailand based on 8-year sap-flow records. *Ecohydrology*, 4(2), P225-235. [査読有]
4. Xue, B.-L., Kumagai, T., Iida, S., Nakai, T., Matsumoto, K., Komatsu, H., Otsuki, K. and Ohta, T. (2011) Influences of canopy structure and physiological traits on flux partitioning between understory and overstory in an eastern Siberian boreal larch forest. *Ecological Modelling*, 222(8), P1479-1490. [査読有]
5. Tsuruta, K., Kume, T., Komatsu, H., Higashi, N., Umebayashi, T., Kumagai, T. and Otsuki, K. (2010) Azimuthal variations of sap flux density within Japanese cypress xylem trunks and their effects on tree transpiration estimates. *Journal of Forest Research*, 15(6), P398-403. [査読有]
6. Komatsu, H., Onozawa, Y., Kume, T., Tsuruta, K., Kumagai, T., Shinohara, Y. and Otsuki, K. (2010) Stand-scale transpiration estimates in a Moso bamboo forest: II. Comparison with coniferous forests. *Forest Ecology and Management*, 260(8), P1295-1302. [査読有]
7. Komatsu, H., Hashimoto, H., Kume, T., Tanaka, N., Yoshifuji, N., Otsuki, K., Suzuki, M. and Kumagai, T. (2010) Modeling seasonal changes in the temperature lapse rate in a northern Thailand mountainous area. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(6), P1233-1246. [査読有]
8. Tateishi, M., Kumagai, T., Suyama, Y. and Hiura, T. (2010) Differences in transpiration characteristics of Japanese beech trees, *Fagus crenata*, in Japan. *Tree Physiology*, 30(6), P748-760. [査読有]
9. Kume, T., Tsuruta, K., Komatsu, H., Kumagai, T., Higashi, N., Shinohara, Y. and Otsuki, K. (2010) Effects of sample size on sap flux-based stand-scale transpiration estimates. *Tree Physiology*, 30(1), P129-138. [査読有]
10. Kumagai, T., Aoki, S., Otsuki, K. and Utsumi, Y. (2009) Impact of stem water storage on diurnal estimates of whole-tree transpiration and canopy conductance from sap flow measurements in Japanese cedar and Japanese cypress trees. *Hydrological Processes*, 23(16), P2335-2344. [査読有]
11. Kumagai, T., Yoshifuji, N., Tanaka, N., Suzuki, M. and Kume, T. (2009) Comparison of soil moisture dynamics between a tropical rainforest and a tropical seasonal forest in Southeast Asia: impact of seasonal and year-to-year variations in rainfall. *Water Resources Research*, 45, W04413, doi:10.1029/2008WR007307. [査読有]
12. Fisher, J. B., Malhi, Y., Bonal, D., da Rocha, H. R., de Araujo, A. C., Gamo, M., Goulden, M. L., Hirano, T., Huete, A. R., Kondo, H., Kumagai, T., Loeschner, H., Miller, S., Nobre, A. D., Nouvellon, Y., Oberbauer, S., Panuthai, S., Rouspard, O., Saleska, S., Tanaka, K., Tanaka, N., Tu, K. P. and von Randow, C. (2009) The land-atmosphere water flux in the tropics. *Global Change Biology*, 15(11), P2694-2714. [査読有]
13. Shinohara, Y., Kumagai, T., Otsuki, K., Kume, A. and Wada, N. (2009) Impact of climate change on runoff from a mid-latitude mountainous catchment in central Japan. *Hydrological Processes*, 23(10), P1418-1429. [査読有]
14. Katayama, A., Kume, T., Komatsu, H., Ohashi, M., Nakagawa, M., Yamashita, M.,

- Otsuki, K., Suzuki, M. and Kumagai, T. (2009) Effect of forest structure on the spatial variation in soil respiration in a Bornean tropical rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(10), P1666-1673. [査読有]
15. Kumagai, T., Tateishi, M., Shimizu, T. and Otsuki, K. (2008) Transpiration and canopy conductance at two slope positions in a Japanese cedar forest watershed. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(10), P1444-1455. [査読有]
16. Ohashi, M., Kumagai, T., Kume, T., Gyokusen, K., Saitoh, T. M. and Suzuki, M. (2008) Characteristics of soil CO₂ efflux variability in an aseasonal tropical rainforest in Borneo Island. *Biogeochemistry*, 90(3), P275-289. [査読有]
17. Kume, T., Manfroi, O. J., Suzuki, M., Tanaka, K., Kuraji, K., Nakagawa, M., Komatsu, H. and Kumagai, T. (2008) Estimation of vertical profiles of leaf drying times after rainfall within a Bornean tropical rainforest. *Hydrological Processes*, 22(18), P3689-3696. [査読有]
18. Kume, T., Manfroi, O. J., Kuraji, K., Tanaka, N., Horiuchi, T., Suzuki, M. and Kumagai, T. (2008) Estimation of canopy water storage capacity from sap flow measurements in a Bornean tropical rainforest. *Journal of Hydrology*, 352(3-4), P288-295. [査読有]
19. Tateishi, M., Kumagai, T., Utsumi, Y., Umebayashi, T., Shiiba, Y., Inoue, K., Kaji, K., Cho, K. and Otsuki, K. (2008) Spatial variations in xylem sap flux density in evergreen oak trees with radial-porous wood: comparisons with anatomical observations. *Trees - Structure and Function*, 23(1), P23-30. [査読有]

[図書] (計3件)

1. Kumagai, T. (2011) Transpiration in forest ecosystems. (In: *Forest Hydrology and Biogeochemistry: Synthesis of Past Research and Future Directions*. Ecological Studies Series No. 216, Eds. Levia, D. F., Carlyle-Moses, D. E. and Tanaka, T., Springer-Verlag, Heidelberg, Germany). In press.
2. 熊谷朝臣 (2008) 森と水の関係, (『エコ

ロジー講座 森の不思議を解き明かす』日本生態学会 編/矢原徹一 責任編集, 文一総合出版, 東京). P26-35.

3. 熊谷朝臣 (2007) 幹の中を流れる水から森林の蒸散を考える, (『森林水文学 森林の水のゆくえを科学する』森林水文学編集委員会 編, 森北出版, 東京). P110-130.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

熊谷 朝臣 (KUMAGAI TOMOOMI)
九州大学・大学院農学研究院・准教授
研究者番号: 50304770

(2) 研究分担者

大槻 恭一 (OTSUKI KYOICHI)
九州大学・大学院農学研究院・教授
研究者番号: 80183763

溝上 展也 (MIZOUE NOBUYA)
九州大学・大学院農学研究院・准教授
研究者番号: 00274522

市栄 智明 (ICHIE TOMOAKI)
高知大学・農学部・准教授
研究者番号: 80403872

(3) 連携研究者

なし