

研究目的

1. 研究目的・要旨

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 (CO₂)、水蒸気 (H₂O)、メタン (CH₄)、亜酸化窒素 (N₂O)、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。

2. 学術的背景

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CO₂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CO₂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。CO₂交換について数年にわたる乱流フラックスの連続観測にもとづいて報告した例は、南米アマゾン熱帯雨林のTapajos (Seleska et al, Science, 2003) および東南アジア熱帯雨林のPasoh (Kosugi et al, Agric.For.Met., in press) の2サイトしかない。そのうちの1つが本研究のサイト（半島マレーシア・パソ森林保護区）であり我々が2002年より長期タワー観測によるCO₂収支の評価を行ってきた。現在までの調査により、乱流フラックス観測上の様々な問題点を勘案するとCO₂収支がゼロに近いことなどが明らかになってきた。しかしながら、森林樹冠のCO₂交換は微気象条件や各種の生物活動が複雑に関係する動的なプロセスであり、シンク/ソースおよびその結果としての収支の決定メカニズムの詳細は、まさに当該分野において解明されるべき最先端の課題として残されている。

また、森林と大気環境の間ではCO₂のみならずH₂O、CH₄、N₂O、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。

H₂O交換すなわち蒸発散過程は、気孔を通じた蒸散・光合成によってCO₂交換過程と密接に連動している。樹高の高い森林においては土壌-植物-大気連続体における吸水・蒸散過程が森林のCO₂交換過程をも律速することが考えられ、また同時に蒸発散による熱・水交換過程は気象・気候システムに直接影響することからもその理解は重要であるが、熱帯雨林においてどのようにH₂O、CO₂交換過程が連動し決定されているのかについての長期観測に基づいた情報は少ない。

CH₄は第2の温室効果ガスであり、産業革命以降の急激な濃度上昇が懸念されている (IPCC,2001)。現在、森林土壌はそのメタン酸化能が評価され、若干の吸収源として機能すると見積もられている (Le Mer and Roger, Eur.J.Soil Biol., 2001)。しかしながら、全球での概算が先行するなか、熱帯雨林は果たしてCH₄の吸収源なのか放出源なのか、このような単純な問いに対する観測例すら、皆無に等しいのが現状である。また、N₂Oは第3の温室効果ガスであり、土壌圏より脱窒や硝化の過程で放出され、森林生態系における窒素循環と密接に関連している。両者の土壌圏フラックスは生成・消費・放出の複雑なメカニズムが連動し大きな不均一性を有するため生態系レベルでの収支推定は非常に難しい問題を抱えている。さらに、近年樹木を含む植物葉がCH₄を放出しており、その量を試算すると特に熱帯林において無視できない量であるという報告 (Keppler et al, Nature, 2006) がなされ、大きな話題となっているが、その実態は土壌圏でのフラックス以上にまったくなにも分かっていない。また森林葉群はイソプレンなどのBVOCを放出している。BVOCは大気中でオゾンやラジカルと短時間に反応して最終的には1/2程度がCO₂に変換される。全球での年間放出量は炭素換算で1.2PgCとも見積もられており (Guenther et al, Chemosphere, 2002)、CO₂収支における大気中増加量やミッシングシンクに対しても無視できない量である。いずれも熱帯雨林における動態はいまだ十分に把握されておらず、また複数のガス態物質が複雑に連動するメカニズムにまで踏み込んだ研究例は皆無に等しい。

3. 研究期間内に何をどこまで明らかにしようとするのか

本研究では、一東南アジア熱帯雨林において、CO₂、H₂O、CH₄、N₂O、BVOCなどのガス態物質の放出/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。その際、各物質のシンク/ソースの

場所と強度、変動パターン、メカニズム、および様々な物質間の連動に焦点を当てる。BVOCについては全放出量の50%を占めるとされ(Guenther et al, J.Geo.Res., 1995)、光合成過程との連動も注目される(Sharkey and Yeh, Ann.Rev.Plant Physiol., 2001) イソプレンを主に取り扱う。また水蒸気に関連して、熱・水交換過程と吸水過程を取り扱う。また、数値モデルを用いた統合解析により多点・広域推定を行う上で組み込むべき要因とその寄与度について詳細に考察するとともに、多点・広域において生態系ガス交換に関する情報を取得するための最新手法についても検証する。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のプロセスを通じて大気環境と相互作用する様子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。

4. 学術的な特色・独創的な点

本研究は、IBP以来長期間にわたって炭素動態に関する生態学的調査が行われてきた上に、東南アジア熱帯雨林の数少ないタワーサイトの一翼として我々が5年間フラックス観測を展開してきたサイトにおいて、十分な準備状況、現地カウンターパートとの連携、多くの利用可能な関連情報のもと、それぞれの研究分野において最先端の構想と手法を展開する能力を有する若手を中心とした研究者らが集まり、相互に連携し情報を提供しあうことで、複数のガス態物質の動態に関する集中的かつ多面的な観測と解析を行おうとするものである。それぞれの観測自体が最先端の研究課題である上に、分野横断的な観測と連携により、複数のガス態物質のガス交換、複数の物理・生態プロセスを同時に同地点で観測し、相互の連動に注目し統合的にみていくことで、熱帯雨林の機能を明らかにしようとする全体構想も非常に独創的なものである。ガス交換という新しい融合領域的視点のもと、研究分野、対象スケール、および組織を横断した戦略的連携により行われる本海外学術調査は、世界的にも例をみない独創的かつ挑戦的な内容を持つものである。

5. 予想される結果と意義

地上部・地下部ともに莫大なバイオマスと複雑な生態系構造をもつ熱帯雨林において、収支は莫大なシンク/ソースによるフローの結果にすぎず、これらを支配するメカニズムの理解なくしては熱帯雨林の在り様、機能、そして存在意義について知ることはできない。いかにしてゼロなのか、あるいは放出系、吸収系となるのかの疑問に答え、系全体が複数のガス態物質の動態に対してどのように機能しているのかを描き出すことこそが、未来の姿「いかに在るべきか」を考える上での欠くべからざる情報である。それゆえ、統合的な観測によって情報を得、ガス交換に関連する生態系の営みを統合的に理解することは極めて重要な意義を持っており、本研究により、ガス交換という視点からみた熱帯雨林の新しい姿が描き出されることが期待される。

今日東南アジアの熱帯雨林は伐採・焼畑などの人為攪乱により面積が激しく減少し断片化が進んでいる。また地球温暖化の進行による降雨パターンの変動・乾燥化・高温化による衰退の可能性も懸念されている。全球規模の数値実験などにより伐採や気候変動の影響を評価することは非常に重要であるが、現状ではこれらの数値実験に使われているモデルは生態系ガス交換機能の詳細を十分反映したものとはなっていない。本研究は、これらの上位スケールモデルに対しても極めて有用な情報を与えるものと言える。

研究計画・方法

1. 研究計画・方法の概要

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・CO₂・CH₄・N₂O について樹冠上フラックスを、熱・水・CO₂・CH₄・BVOC について「葉群」領域での過程を、また、熱・水・CO₂・CH₄・N₂O 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。特に熱・水・CO₂については、統合解析に多層モデルを用いることで、葉群や土壌圏過程がどのように積みあがって樹冠上フラックスを決定するかについて詳細に考察する。

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。これらの指標は、上述のガス交換観測によって得られた情報と比較検証される。樹冠のガス交換の場である葉群の生理活性や環境応答を分光指標によって光学的に推定し、一方で、ガス交換過程において生じる同位体分別効果を指標として抽出することにより、複雑なメカニズムを内包し評価の難しい生態系のガス交換特性を、新しい手法により多点・広域において評価する可能性と、その際に必要不可欠となる基礎情報を提示する。

2. 研究サイトおよび旅行経路

調査地として、半島マレーシア **Pasoh (パソ) 森林保護区** (北緯2度59分、東経102度19分) を予定している。本調査地はマレーシア国クアラルンプールの南東約70km、ネグリセンビラン州シンパンペルタン村に位置し、KLIA国際空港より車で約2時間の旅程である。本保護区の中心部650ヘクタールは、多種のフタバガキ科樹種によって構成される低地原生林(熱帯雨林天然林)である。Pasoh森林保護区は1970年のIBP以来長期間にわたって生態学的調査が行われてきたサイトであり、またタワーが52mに延伸された1995年以降、気象観測とともにボーエン比法をもちいた樹冠上熱・水フラックスの連続観測や、CO₂を含む乱流フラックスの短期間での観測が行われてきた。このような背景をふまえて、Pasoh森林保護区におけるガス交換特性およびCO₂動態を明らかにするため、我々(研究代表者および分担者の一部)は2002年より樹冠上乱流フラックスおよび微気象の連測観測システムをたちあげCO₂動態に関する長期観測体制を整えた。現在まで約5年間にわたり、微気象および乱流変動法による熱・水・CO₂フラックス観測を継続中である。

3. 研究計画・方法の詳細および研究計画を遂行するための研究体制

研究の遂行にあたって、まず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する(表1参照)。研究の遂行にあたっては、あえて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**(図1)を取る。すべてのテーマは、主担当者(表1)のほか複数名が参加し共同で遂行するよう計画されている。その上で主担当者が取りまとめを担当する。これにより代表者・分担者・研究協力者間の連携を活性化し、またメンバーの一部に現地調査が困難な時期が発生した場合でもあらかじめ計画された観測が他のメンバーにて遂行可能になるよう計画している。また樹冠上フラックス・葉群・土壌圏の各領域内において、複数のガス状態物質での観測手法・時期・プロット等を連動させることで、観測・解析双方での各研究テーマ間の連携とデータの相互利用とを促進し、一サイトをスーパーステーションとして人力および財力を投入することのアドバンテージを最大限引きだすことを目指している。また遠隔地における観測体制の維持にあたって、サイトの貸与や定期的な測器類のメンテナンスやデータ回収なども含め、現地カウンターパートであるマレーシア森林研究所の協力を仰ぎ十分な協議のもと円滑に進める予定である。

基盤1.	タワー観測システムの構築と維持(責任者:小杉)
乱流変動法による熱・水・CO ₂ フラックス連続観測と同時に、降雨量、気温、湿度、放射各成分、分光放射スペクトル、風速、CO ₂ 濃度の鉛直プロファイル、地中貯熱変化量、地温、土壌体積含水率および圧力水頭等の微気象環境条件の連続観測システムを構築し維持する。	
基盤2.	インフラ管理・現地カウンターパートとの連携(責任者:谷、現地カウンターパート: Abdul Rahim Nik(研究協力者・マレーシア森林研究所))
タワーシステム・基盤設備の管理、および現地カウンターパートとの共同研究体制を維持する。	
テーマ1.	樹冠上熱・水・CO₂フラックス(小杉・高梨・大久保晋治郎(研究協力者・京都大学))
現在までの観測に引き続き2011年まで9年間の連続タワー観測データを取得し、樹冠上熱・水・CO ₂ 交換過程の日・季節・年々変動パターン・収支を明らかにする。またエネルギー収支や濃度プロファイル、林内風特性、チャンバー法による生態系呼吸の観測を併行し、インバランス問題の実態にも迫る。	
テーマ2.	樹冠上CH₄・N₂Oフラックス(小杉)
森林樹冠上のメタンおよびN ₂ O濃度プロファイルを定期的に観測し、微気象学的手法による樹冠上フラックスの算定を行う。	
テーマ3.	葉群からのCH₄およびBVOCフラックス(小杉・奥村智憲(研究協力者・京都大学))
チャンバー法によって樹冠各層の葉群からのCH ₄ およびBVOCフラックスを測定し、葉からの放出量や日変動特性、葉面環境や光合成をはじめとする生理生態との関係について考察する。+中川×2	
テーマ4.	葉群からの熱・水・CO₂フラックス: 個葉光合成・蒸散・呼吸過程(小杉)
樹冠および林床構成葉において個葉光合成・気孔コンダクタンス・呼吸特性、電子伝達系特性や気孔開閉の不均一性を観測し、日・季節・年々変動パターンを把握する。	
テーマ5.	土壌圏CH₄・N₂O・CO₂動態(伊藤、尾坂兼一(研究協力者・農業環境技術研究所))
タワー周辺一帯に設営した共同プロットにおいて、土壌からのCH ₄ ・N ₂ O・CO ₂ フラックスおよび土壌	

中の濃度プロファイルを定期的に観測し、土壌圏における生物地球化学的プロセスが $\text{CH}_4 \cdot \text{N}_2\text{O} \cdot \text{CO}_2$ フラックスをどのように制御しているかについて考察する。+檀浦・兼光・(牧田・上村?)	
テーマ6.	土壌圏炭素および窒素動態 (山下)
テーマ5と同じく共同プロットにおいて、土壌圏の SOM 有機物量、根系分布、土壌化学特性および窒素動態を定期的に観測し、土壌圏における炭素 (有機物) および窒素動態を把握する。	
テーマ7.	土壌圏水分動態 (野口)
テーマ5と同じく共同プロットにおいて、土壌圏過程に大きな影響を与えられとされる土壌水分の時空間分布を鉛直分布も含めて観測する。また土壌物理特性等の測定を併行し、決定要因を考察する。	
テーマ8.	個葉生理生態過程が樹冠上熱・水・CO_2 交換に及ぼす影響評価 (高梨)
多層モデルをツールとして微気象および個葉ガス交換についての観測結果を積み上げることで、個葉生理生態過程が樹冠上熱・水・ CO_2 交換に及ぼす影響を評価する。	
テーマ9.	吸水深度が樹冠上熱・水・CO_2 交換に及ぼす影響評価 (田中)
テーマ8と同じく多層モデルをツールとして、本サイトの樹冠構成樹種の吸水深度を推定し、吸水過程が樹冠上熱・水・ CO_2 交換に及ぼす影響を評価する。	
テーマ10.	個葉ガス交換を反映する炭素・酸素安定同位体指標の検証 (松尾)
個葉光合成および気孔コンダクタンス特性の指標となる葉有機物の炭素・酸素安定同位体比を測定し、熱帯雨林樹木のガス交換戦略について考察する。	
テーマ11.	$\text{CH}_4 \cdot \text{CO}_2$ の放出源 (ソース) を反映する炭素安定同位体指標の検証 (伊藤)
土壌・大気およびフラックスチャンパー中の $\text{CH}_4 \cdot \text{CO}_2$ およびソース源である有機物の $\text{d}13\text{C}$ を測定し、ガス交換過程における同位体分別効果を指標とした CH_4, CO_2 放出源特定の可能性を検証する。	
テーマ12.	樹冠上 CO_2 交換特性を反映するリモセン分光植生指標の検証 (中路)
タワー上に分光放射計による植生指標連続測定システムを設営し、数種の分光植生指標の連続観測を行い、樹冠上 CO_2 交換や、さらには個葉光合成過程や熱放散現象との関係を明らかにする。	

表 1. 2つの基盤および12の研究テーマ

	CO_2	H_2O	CH_4	N_2O	BVOC
領域 1 : 樹冠上フラックス	T1	T1	T2	T2	
領域 2 : 葉群	T4	T4	T3		T3
領域 3 : 土壌圏	T5 T6 T7	T7	T5 T6 T7	T5 T6 T7	
統合モデリング	T8 T9	T8 T9			
生態系ガス交換指標の開発	T10 T11 T12	T10	T11		

(数字はテーマ番号を表す。斜線はシンク・ソースが想定されていないこと、空白は本研究で取り扱わないことを表す。)

表 2. 研究計画・方法の概要と12の研究テーマとの関連

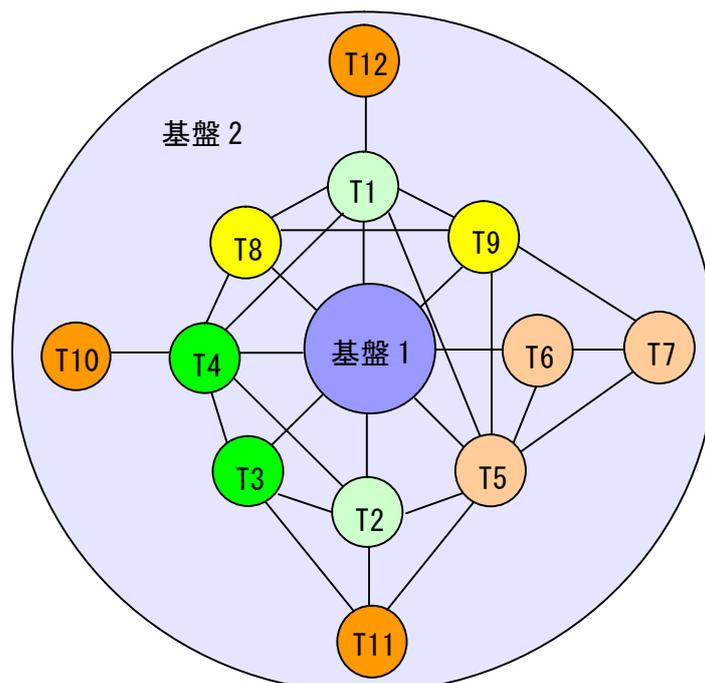


図 1. 曼荼羅方式による2つの基盤および12の研究テーマの相互関係と連動プラン