A-0801　グローバルな森林炭素監視システムの開発に関する研究
（６）植生攪乱と陸域生態系モデルに関する研究

独立行政法人国立環境研究所
地球環境研究センター　伊藤昭彦

〈研究協力者〉　国立環境研究所　地球環境研究センター　安立美奈子

平成20～22年度累計予算額：20,300千円（うち、平成22年度予算額：6,300千円）
予算額は、間接経費を含む。

［要旨］森林減少・劣化に伴う炭素放出量を広域推定するには、衛星リモートセンシングに基づく森林面積の増減データが基本となるが、土壌を含めた総炭素収支を長期的に評価するには主要な生物地球化学的プロセスを包含した生態系モデルを開発する必要性がある。特に、森林からアブラヤシ・プランテーションなどへの土地利用改変が急速に進行する発展途上国地域では、現地でのバイオマス・土壌炭素動態に関する情報が乏しく、インベントリ的手法による推定（例えばIPCC Good Practice GuidanceのTier-1による推定）の信頼性が低いことが問題となる。そこで、陸域炭素動態をシミュレートする生態系モデルを拡張することで、人為的土地利用改変を撹乱の一種として扱えるよう高度化したモデルを開発することを本サブテーマの目的とした。特に、地上・衛星観測から検出することが難しい地下部の炭素収支を扱うことで、他サブテーマに対して補完的な役割を果たすことを重視した。モデル高度化を進めるため、マレーシアのパソー熱帯多雨林、タイのサケラート季節性常緑樹林で土壌炭素動態に関する現地データを収集した。土壌表面からのCO_2放出速度（土壌呼吸）を天然林とプランテーションで測定し、各サイトにおける土壌特性と環境要因と関連づけた。土地利用改変に伴い、植生から供給される有機物が質・量の面で変化すること、そして植被による表土保護の効果が低下することで、土壌特性には大きな変化が見られた。それは土壌水分の保水性と通導性を変化させることで、長期的な土壌炭素収支の応答に強い影響を与える因子であることが明らかにされた。その結果を踏まえ、陸域生態系モデルにおける土壌水分収支スキームの改良を図った。従来では経験的なバケツモデルで推定されていた土壌水分動態を、より物理的なダルシー則に基づくスキームで推定することで、より現実的な表現が可能となった。このような研究を経て、森林減少・劣化に伴う炭素収支変化を推定するモデルのプロトタイプ開発を達成した。

［キーワード］撹乱プロセス、生態系モデル、地上検証、土壌炭素、土地利用改変

１．はじめに

森林の減少と劣化に伴い、バイオマスや土壌有機物としての炭素貯留能力が大幅に低下することは、森林構造の景観からも明らかである。しかし、その定量化および時間変化の追跡・再構築・予測は非常に困難であり、特に東南アジア域といった広域での評価を直接的な計測によって行う

ことは不可能に近い。そこで、撹乱に伴う植生遷移の進行とバイオマス蓄積、土壌炭素の分解・流亡による喪失と回復・定常化の主要プロセスを取り込んだ生態系モデルによるシミュレーションと評価が不可欠な手法となる。

森林減少・劣化に伴う炭素貯留量の変化は、地上部については計測が比較的容易であり、衛星観測によるモニタリングも有望視されている。つまり、地表面より上にある樹幹・枝・葉などの植生バイオマスについては、生態学的・測樹学的方法により非破壊的方法で直接計測を行うことができ、衛星観測による光学的データや合成開口レーダーによる散乱データと関連づけることが可能である。一方、地下部については、特に森林では厚い樹冠の下にあるだけでなく、地表からは表面しか観察することができないため情報が極めて限られる。植物の根や土壌有機物を直接観測するには、穴を掘って土壌断面を見る、ライゾトロンなどの施設を埋設するなどの破壊的方法を採ることになり、通常大きな空間代表性は期待できず、時間変化を追うことも難しい。しかし、これまでの研究では、地上部に匹敵するかそれ以上の炭素が地下部には貯留されており、その森林減少・劣化による収支変化が極めて重要な意味を持つことが示唆されている。例えば、自然の森林における枯死や森林伐採により、幹や枝からは粗大有機物（CWD: Coarse Woody Debris）と呼ばれるC/N比が高くリグニン質を多く含んだ分解性の低いリターが生成されることが知られている。しかし、枯死立木や倒木の動態を長期観測した例は非常に少ないため、その生成・分解は生態系全体の炭素収支計算に含まれていないことが多く、不確実要因の一つとなっている。

森林の破壊や劣化が起こると、林冠や地表面におけるエネルギー・水収支といった物理条件が劇的に変化する。特に、地表に到達する日射が増加して温度上昇を引き起こすことや、スルーフォールの増加と蒸散量の低下による土壌水分への影響は、土壌有機物の分解を通じて炭素収支にも無視できない影響を及ぼす。それだけでなく、植被とスルーフォールの変化は地表における土壌流出の増加を招き、土壌の物理性をも変化させる。具体的には、粒子の細かい粘土成分が洗い流されて結果的に砂が残り、土壌の保水性が低下する。また孔隙率が低下して比容重が増大する。一般に粘土含量が低下すれば、土壌構造が保持されにくくなり、土壌有機炭素を安定的に貯留する能力が低下すると考えられる。このような物理性の変化は徐々に、かつ一定でない速度で進行するが、それが土壌炭素動態に与える影響についてはモデルでほとんど考慮されてこなかった。そこで、本年度の陸域生態系炭素動態モデル高度化の指針として、森林減少・劣化に伴う土壌物理性の変化を介した土壌炭素動態への影響の取り入れを目指した。

２．研究目的

森林減少・劣化に伴う炭素収支の変化を、広域的に評価するためのモデルを構築することが本サブテーマの目的である。既存の陸域生態系モデルVISITをベースとし、撹乱に伴うバイオマスや土壌有機物など炭素収支変化に影響を与える諸プロセスを検討して高度化を図る。その際、現地データやインベントリ情報を活用して定量的な信頼性を向上させる。また、MODISやALOS/PALSARの衛星情報に基づいて広域展開を図ることを視野に入れ、広域に取得可能な情報に基づいて推定を行う手法を検討する。国際的なコミュニティに炭素アカウンティング手法として提示していくため、他国などで開発されている手法との比較検討も進める。その一方で、熱帯林における炭素循環・温室効果ガス収支に関する基礎的理解を深化させ、主にモデルシミュレーションの手法で撹乱を含む長期的動態に関する研究を行い学術論文にまとめる。そのために必要な現地情報があ

れば、適宜実測を行ってデータを採集する。

３．研究方法

撹乱に伴う長期的な森林炭素収支をシミュレートするため、土壌炭素動態に焦点を当ててモデル高度化を進めた。そのため、代表的な熱帯林サイトにおける調査およびVISITにおける地下部プロセスの検討と高度化を実施した。

（１）代表的な熱帯林サイトにおけるデータ収集

高温多湿な赤道地域に成立する熱帯多雨林は、生産力・バイオマスともに地球の生態系の中で最大規模であり、グローバル炭素循環や生物多様性の中で重要な位置を占めていると考えられる。代表的な熱帯林サイトを選定し（図1）、マレーシア・パソー（2°58’N、102°18’E）の熱帯多雨林サイト（RF）および周辺のアブラヤシ園（OPP）において土壌のサンプリングと土壌呼吸速度の測定を実施した。マレーシア側のカウンターパートはForest Research Institute of Malaysia (FRIM)であり、これまでも土壌調査やタワーフラックスの観測が実施されてきた。また、モンスーンの影響で降水量に明瞭な季節性が見られる熱帯季節林の情報を取得するため、タイ・コンケン（14°30’N、101°55’E, DEF）においても同様な調査を実施した。このサイトは産業総合技術研究所などによって渦相関法によるタワーフラックス観測サイトとして管理運営されてきた。加えて、カリマンタン島など湿潤熱帯に分布する熱帯泥炭林も重要な炭素ストック・ソースと考えられるので、インドネシア・パランカラヤ（2°21’S、114°02’E）を視察した。ここは、北海道大学などによって土壌調査およびタワーフラックス観測が実施されている。

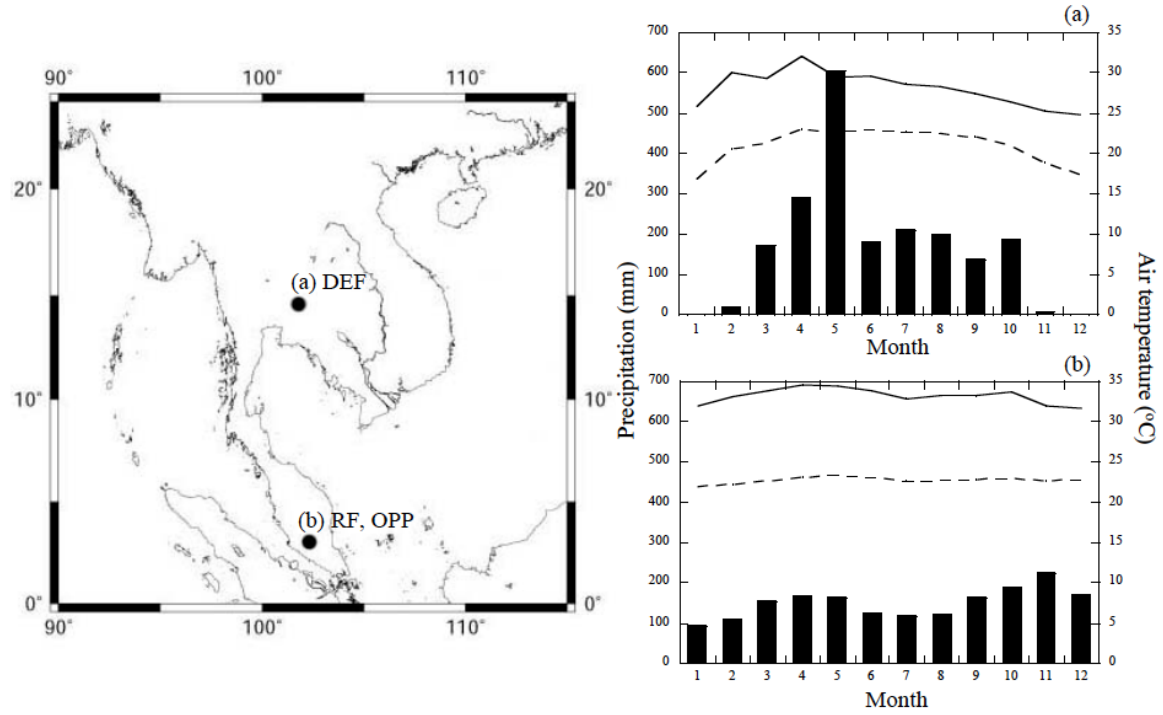

図1：研究対象サイトの位置と気象条件．RF：パソー熱帯林、OPP：パソー周辺のアブラヤシ・プランテーション、DEF：サケラート季節性熱帯常緑林.

（２）VISITにおける地下部プロセスの検討と高度化

陸域生態系モデルVISIT（図2）は、大気-陸域間の微量ガス交換を総合的に扱うために炭素循環と窒素循環の生物地球化学的プロセスをシミュレートするモデルである[1)]。その炭素循環スキームは、生態学的調査やフラックス観測が行われた様々なサイトに適用されて実効性が検証されている[2)3)]。

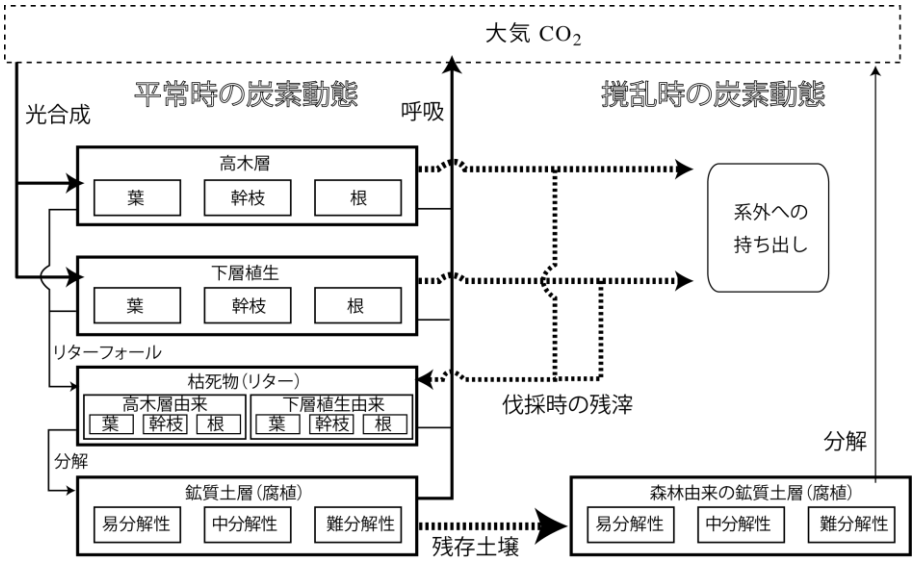

図2：森林減少・劣化に伴う炭素放出を推定する生態系モデル（VISITベース）の構造.

このモデルは地点だけでなく全球スケールのシミュレーションを想定して開発されており、気温・降水量などの気象条件や植生・土壌に関するグローバルなデータセットから取得可能な入力データを使用する。そのため、モデルの一般性やスケール拡張性は高いものの、個別サイトでの炭素収支を詳細に再現するには地点特有の改良を行うことが必要な場合がある。熱帯林における過去の観測的知見に基づき、VISITの地下部スキーム（図3）の改良指針を検討した。基のモデルでは土壌炭素と土壌水分は2要素（リターと腐植、上層と下層）に分けられ、地下部の垂直的な不均質性はある程度考慮されているが、土地利用変化に伴う土壌特性（砂/シルト/粘土組成、比容重、pHなど）の変化は考慮されておらず、例えばパソーサイトの熱帯多雨林とアブラヤシ園におけるシミュレーションでは同じパラメータ値が使用されていたという問題点があった。

開発したモデルを試験的にマレーシア・パソー（北緯2.97°、東経102.3°、標高100m）の熱帯林に適用した。この地域は、1970年代に実施された国際生物学事業計画（IBP）において世界的に希少な熱帯林のバイオマス・生産力調査[4)]が実施されており、現在まで渦相関法によるフラックス観測が実施されて環境省推進費S1課題の対象サイトの一つとなるなど、東南アジア地域では有数のデータ蓄積があるサイトである。さらに、このサイト周辺はかつて熱帯林で覆われていたが、最近数十年間に広大な面積がアブラヤシ・プランテーションに転換されており、土地利用変化による影響を対比するシミュレーションや、衛星データを用いた広域拡張のサンプルサイトとしても適している。今回、入力する気象データはNCEP/NCAR再解析による最近傍格子点の日別の日射・温度・降水値を使用した。

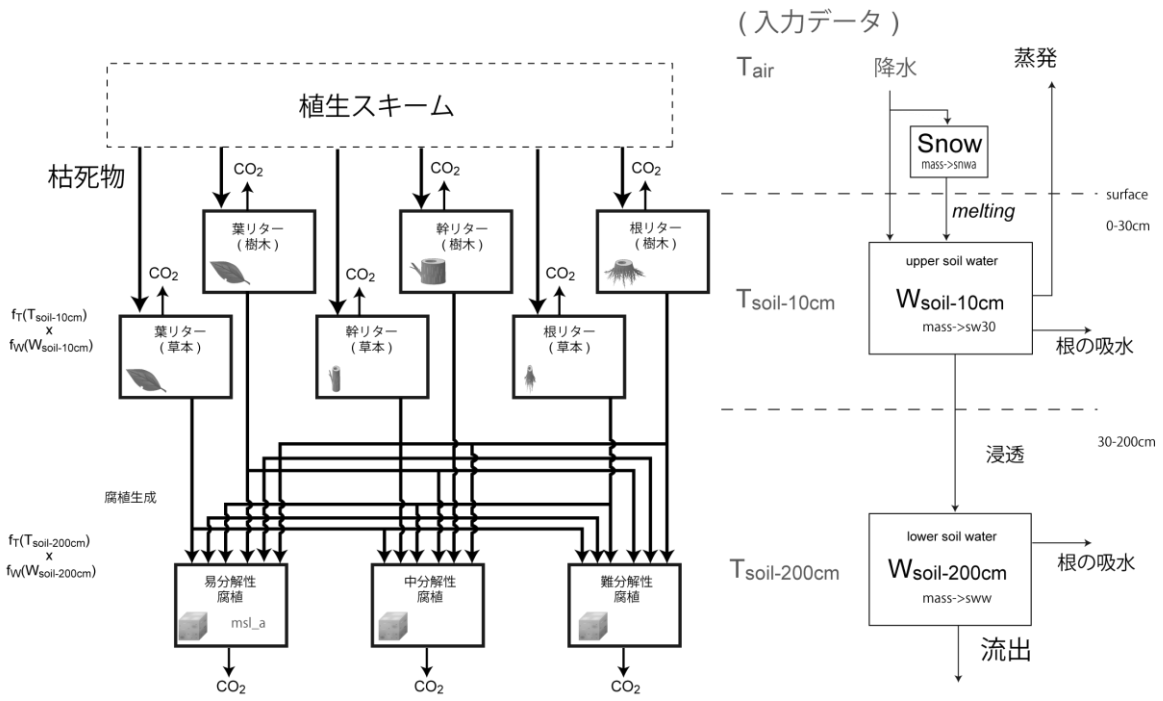

図3：陸域生態系モデルVISITにおける地下部プロセスの模式図．左側が炭素動態、右側が水収支のスキーム（改良前の原型モデル）を示す．リター分解と腐植化は上層の地温・土壌水分を参照し、腐植の分解は下層の地温・土壌水分を参照する．

４．結果・考察

（１）現地調査

2009年10月にマレーシア・パソー、2009年7月、11月および2010年1月にタイ・サケラート、2009年12月にインドネシア・パランカラヤにおいて調査を実施した。今回の現地調査では、土壌のサンプリングとクローズドチャンバー法により土壌呼吸に関するデータを補強した。パソーサイトでは生態学的調査が実施されている熱帯林サイトと近隣のアブラヤシ園で土壌特性の比較を行った（表1、図4、5）。

表1：パソーおよびサケラートサイトにおける土壌物理特性．

Site	Sakaerate, Thailand	Pasoh, Malaysia	
Vegetation	Dry evergreen forest	Evergreen forest	Oil palm plantation
Bulk density	1.05[1]	0.74[3]	1.06[3]
pH (H_2O)	4.85[2]	3.8[4]	4.7[4]
Sand content (%)	61.2[2]	16.6[1]	67.2[1]
Clay content (%)	24.9[2]	57.8[1]	21.0[1]

パソーサイトでは、過去の研究により熱帯林からアブラヤシ園に転換されることで、粘土含量低下、比容重の増加、pHの上昇が起こることが示唆されている[5)]。サケラートは常緑樹林であるも

ののモンスーン気候下での乾季が明瞭であり、定期的に土壌乾燥化が生じることが、有機物分解が進んだパソーのアブラヤシ園に近い物理性を示す要因だと考えられる。

図4：パソーサイト付近の植生．左）天然林、右）アブラヤシ園．

図5：パソーサイト付近の土壌．左）天然林、右）アブラヤシ園．土壌コア円筒の直径は50mm．

（２）熱帯林サイトでのモデル検証

熱帯多雨林は、温度・水分条件が好適なことから世界で最も生産力が高くバイオマス貯留が大きい生態系の一つと考えられている。実際に、パソーで実施された生態系調査は森林の総一次生産と地上部バイオマスについてそれぞれ33 t C/ha/yr、202 t C/haという値を得ている。本研究で実施されたVISITによるシミュレーション（表2）では、平均総一次生産が35 t C/ha/yr、植生バイオマス（地上部）が181 t C/haと推定されており、実測に近い状態が再現されていた。一方、高温かつ多湿な環境は微生物による有機物分解を促進するため、土壌中の有機物貯留量は枯死物（リター）を含めて70 t C/ha程度であった。シミュレーションでは年間1.5 t C/ha/yr程度の正味吸収が生じていたが、これは初期化（2000年の繰り返し計算）が不十分なためではなく、エロージョンおよびDOC流出による系外への炭素輸送を加味すれば定常状態になっているためである。大気CO_2濃度上昇による施肥効果も吸収を生じさせる要因の一つだが、気象要因による年々変動が大きいために経時的な拡大傾向は明らかではなかった。

表2：熱帯林サイトにおける炭素収支の観測とモデル推定の比較.

	DEF site			RF site			OPP site		
tC ha^{-1} y^{-1}	VISIT[1]	Field data	Year of field data	VISIT[1]	Field data	Year of field data	VISIT[1]	Field data	Year of field data
GPP	31.5	35.6[2]	2002	35.1	32.6[4]	2003	nd	nd	
	34.8	39.6[2]	2003	35.5	32.8[4]	2004	nd	nd	
	nd	nd	nd	35.0	32.0[4]	2005	nd	nd	
NEP	0.3	−1.8[2]	2002	1.50	−0.4[4]	2003	−0.80	1.06[7]	5 yr old
	2.8	0.9[2]	2003	1.70	2.4[4]	2004	nd	nd	
	nd	nd	nd	1.20	2.8[4]	2005	nd	nd	
SR	18.23	nd	2001	18.3	18.1[5]	2001	12.9	14.4[5]	2001
AGB	145.5	226.3[3]	1993	180.9	201.5[6]	1998	34.0	33.9[8]	27.5 yr old

独立した検証として、衛星観測による生態系パラメータとの比較も実施した。TerraおよびAqua衛星に搭載されたMODISセンサーによる観測プロダクト（米国Oak Ridge National Laboratoryのサイトより入手）を用いて、パソーサイトにおける日々の総光合成速度をモデル推定結果と比較した（図6）。サケラートおよびパソーの熱帯林においては、衛星観測と同等レベルの総光合成がモデルで再現されていた（衛星データに見られる大きなばらつきは雲影響が残されているものと考えられる）。一方、アブラヤシ・プランテーションを設定したシミュレーション（図6のOPP）では、モデル推定では若いアブラヤシの低い総光合成速度を計算したのに対し、衛星観測は熱帯林と大差ない規模の総光合成を示していた。

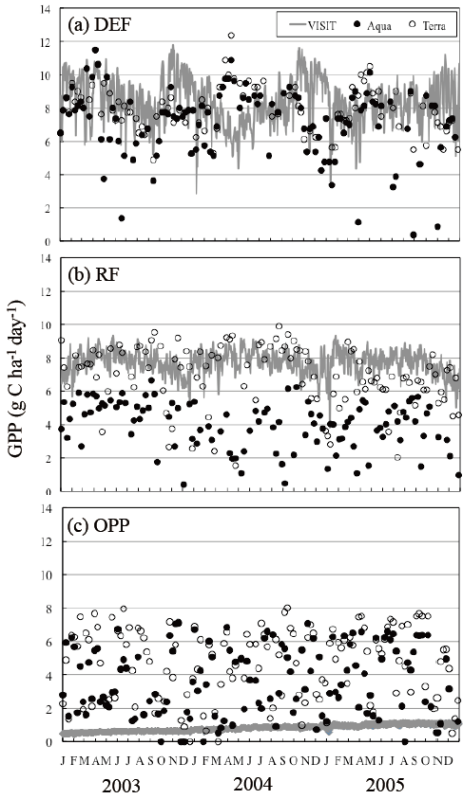

図6：パソーサイトの総一次生産（総光合成）に関するVISITモデル推定と衛星観測（TerraおよびAqua衛星搭載のMODIS）との比較.

（３）撹乱影響に関するシミュレーション

原生状態において、代表的な熱帯林サイトであるパソーでは約300 Mg C/haの炭素が貯留され、年間の炭素収支は均衡に近い状態にあった。しかし、皆伐とそれに続くアブラヤシ園への転換によって炭素収支は劇的な撹乱を受けることがモデルシミュレーションから示された（図7）。ここでは、伐採されたバイオマスの一部が残滓となって枯死物プールに移行することで、一時的な土壌有機炭素の増加が生じるが、それが急速に分解されることで数年にわたり総炭素貯留量を低下させていることが分かる。撹乱前の森林に由来する残存土壌有機物（residual soil）は、鉱質土層にあるため比較的滞留時間が長く、撹乱後30年以上かけて徐々に分解され炭素放出源になることも示された。アブラヤシは、葉面積指数や純一次生産力は森林に匹敵するが、固定された炭素の一部（年間約3.3 t C/ha/yr）が収穫によって系外に持ち出されることや、個体密度が低く樹体が小さいことから、バイオマスへの貯留は森林状態の半分程度に留まっている。

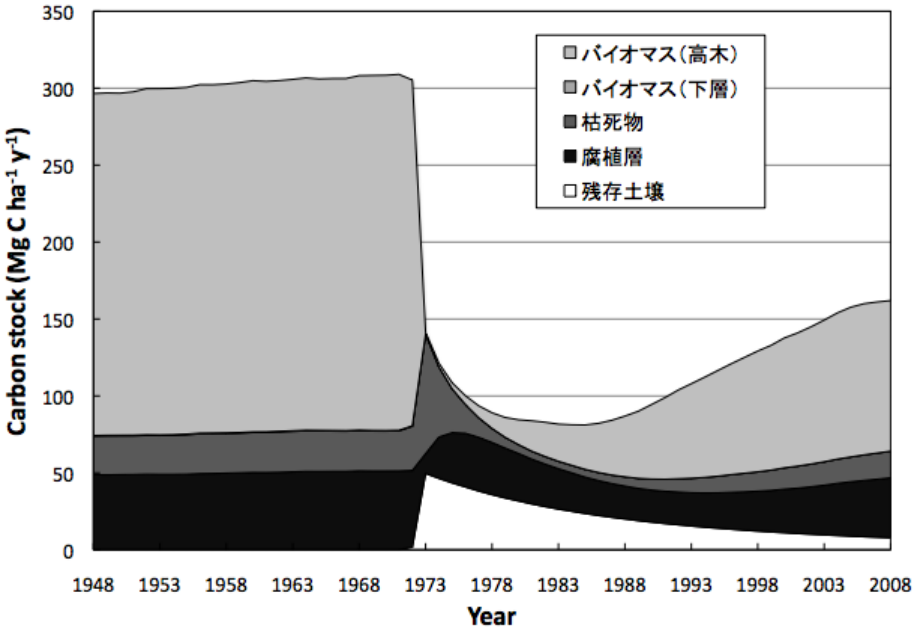

図7：パソーサイトでシミュレートされた熱帯林炭素貯留量の撹乱を含む時間変化.

土地利用変化に伴う炭素収支の時間変化を推定できるか否かは、撹乱時に既存植生のバイオマスがどのように扱われるかに大きく依存すると考えられるが、それに関する情報は現段階では十分に得られていない[6]。そこで、本研究では撹乱時のバイオマスにおける系外持出しと残滓としての現場廃棄の割合を数通りに変化させ、発生し得る炭素放出パターンの幅を示すこととした。図8に示されるように、正味CO_2収支（NEP）は、定性的には撹乱後に強い放出を示した後で数年後に吸収に転じ、徐々に低減しながら数十年間継続する影響を見せている。しかし、その最大放出強度や吸収に転じる時期、そして数十年後の吸収強度は撹乱発生様式に大きく依存している。また、伐採後に放棄して二次林を発生させた場合（植生パラメータは撹乱発生前と同じ）と、アブラヤシ・プランテーション化させた場合では、直後の放出強度には大差ないが、植生回復に伴う吸収の時間変化に差が生じることが示された。具体的には、二次林化した場合の方が吸収に転じるまでの期間が短く、成長最盛期のCO_2吸収も強い傾向がある。

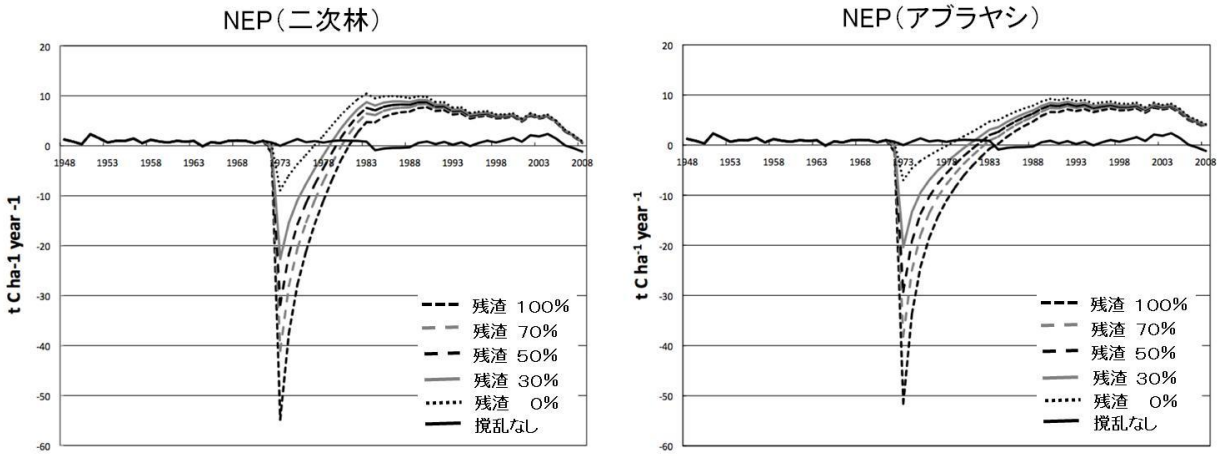

図8：撹乱に伴う正味CO_2収支（NEP）の時間変化．VISITモデルをパソーサイトに適用．

図9に示すように、既存植生バイオマスが撹乱時に残滓として枯死物プールに移行する割合を変化させることで、その後の土壌有機炭素貯留量は大きく変化している。特に、植生バイオマスのほとんどを系外に持ち出す場合には、10年以内に土壌有機炭素貯留猟は数分の1まで減少し、30年経過後も撹乱前のレベルに回復していない。

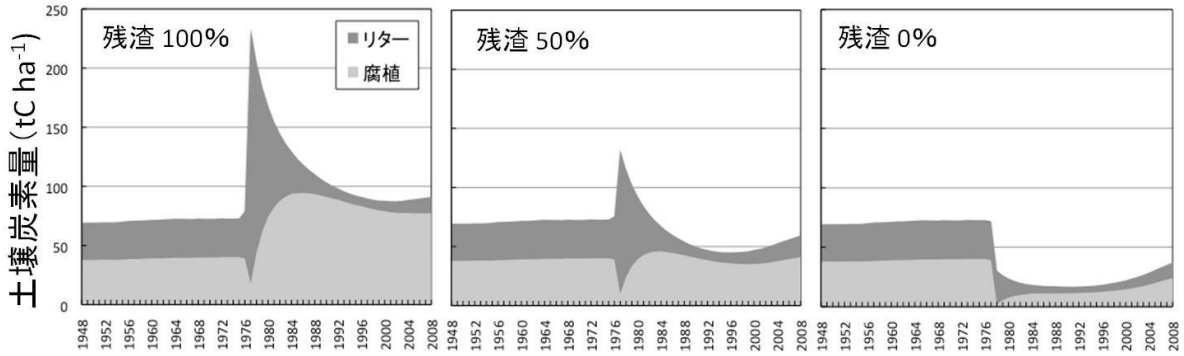

図9：伐採時の残滓発生率を変化させた場合の土壌有機炭素貯留量の時間変化．

森林から農地への土地利用転換に伴う土壌パラメータの変化が、炭素収支に与える影響を調べるため、簡単な感度実験を実施した。土地利用転換後も森林と同様の土壌パラメータを使う実験と、アブラヤシ園に相当する粘土含量や比容重に変化させた実験を行い、炭素収支に関するシミュレーション結果を比較した（図10）。土壌パラメータが天然林から変化しないと仮定した場合、土壌の保水力が維持されるため、アブラヤシの成長がよく、土壌炭素も2000年代までに森林に相当する以上に回復していた（図10a）。しかし、アブラヤシ園の土壌パラメータに変化させた場合、土壌水分が低下してアブラヤシの生長が低下し、土壌炭素量の回復も鈍かった（図10b）。この土壌パラメータ変化を取り入れることにより、土壌呼吸の過大評価は抑えられ、観測結果に近づくことが分かった。つまり、森林の土地利用変化に伴う炭素収支の長期変化を現実的にシミュレートするには、植生の置換だけでなく、土壌特性の変化も重要であることが示唆された。

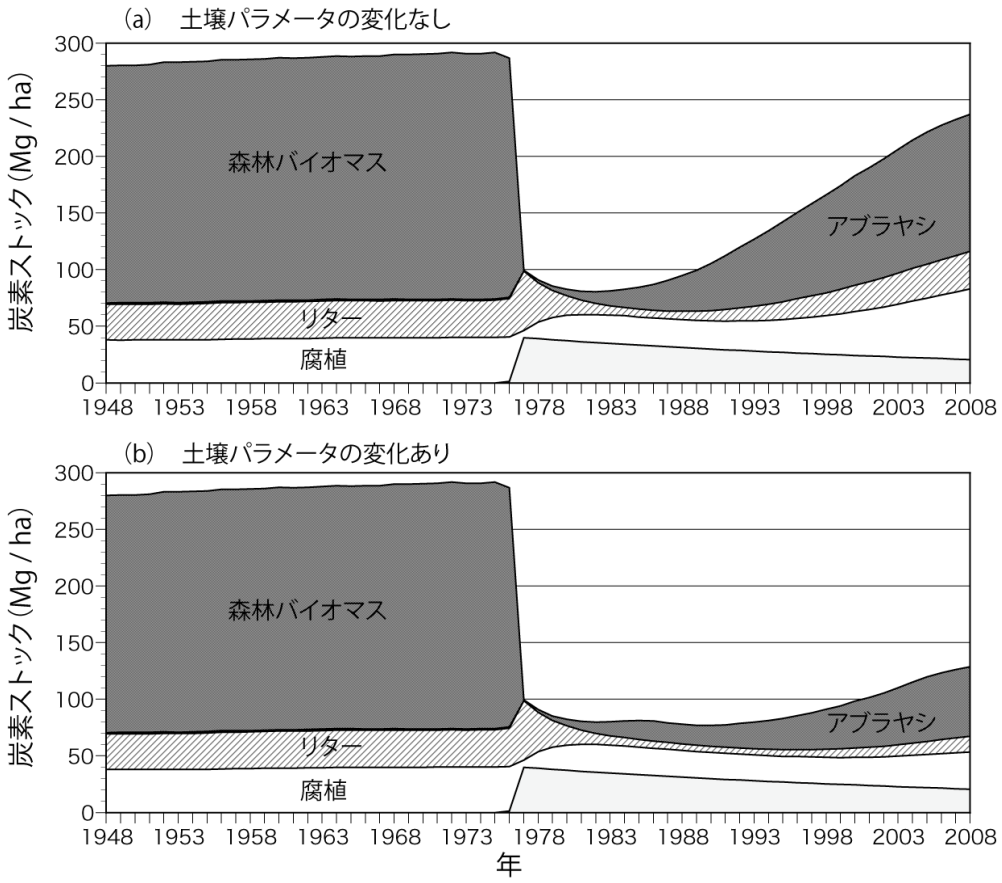

図10：パソーサイトにおける炭素ストックの時間変化に関するモデルシミュレーションの結果. 1976年に森林からアブラヤシ園に転換. (a) 土壌パラメータの変化なし、(b) 土壌パラメータの変化あり.

（４）土壌モデルの高度化

過去に実施された調査により、熱帯雨林では温度変化が少ないため土壌分解の温度依存性は顕著ではなく、代わりに土壌水分の変化がCO_2発生速度に強い影響を与えることが示唆されている。そのため、土壌水分の高精度な推定が重要となるが、本サブテーマのモデル検討により、基のVISITでは土壌水分動態が非常に簡便な方法で扱われていることが問題となった。図2に示されたように、VISITでは降水・地表面蒸発・流出・植生による遮断蒸発・吸水と蒸散といった水収支に関する基本的なプロセスは取り入れられている。しかし、土壌内での孔隙を通じた移動は陸面プロセスモデルで用いられる簡便法（バケツモデル）で扱われており、不飽和状態での水ポテンシャル勾配に沿った移動などは考慮されていない。また、過去の研究や本サブテーマの観測で明らかとなった、森林から農耕地への土地利用転換に伴う土壌特性の変化は扱われていなかった。そのため、天然林では観測された土壌呼吸速度をよく再現できたが、アブラヤシ園ではややモデルが過大評価をする傾向があった（図11）。その原因の一つとして土地利用転換後の土壌特性の変化による土壌水分の低下を従来のモデルでは正しく再現できていない可能性が考えられた。

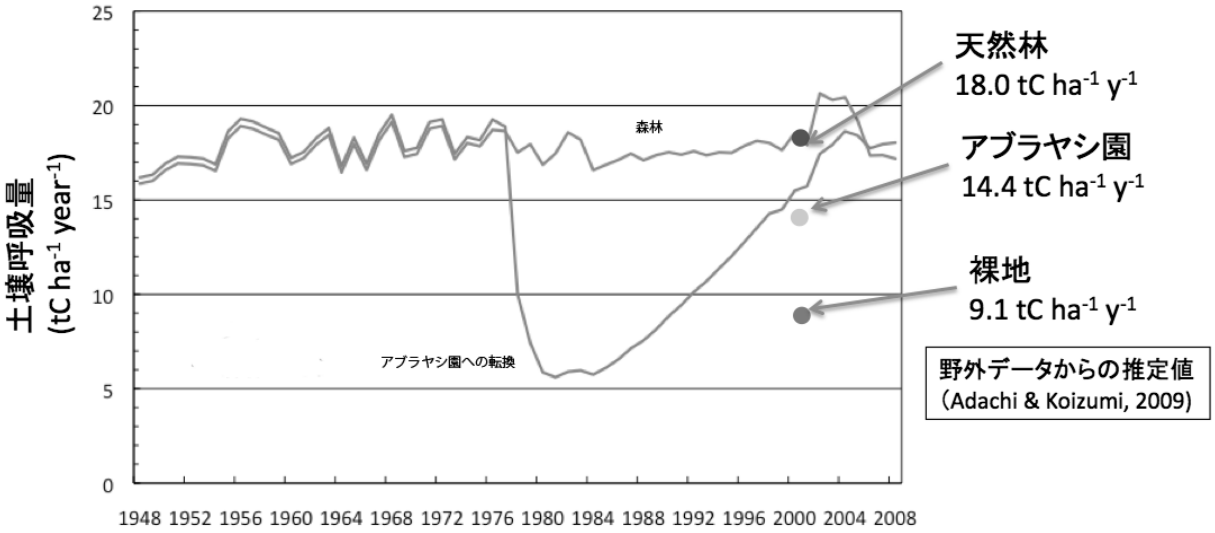

図11：パソーサイトにおける土壌呼吸のVISITモデル推定結果と観測データとの比較.

そこで、簡便法に代わる新しい方法として下記のダルシー則に基づく水分移動（浸透）を導入することを検討した。

$$Q = k\frac{\Delta H}{\Delta x} \qquad (1)$$

ここでQは水分の移動フラックス、kは透水係数、ΔHはポテンシャル差、Δxは移動距離である。これまでの方法では所与の圃場容水量のみを使用していたが、ダルシー則を適用することで土壌特性の変化を透水係数の変化によって表現することが可能となる（図12参照）。例えば、透水係数を砂/粘土組成から与えることで、土地利用変化に伴う土壌特性の変化を表現することができる。

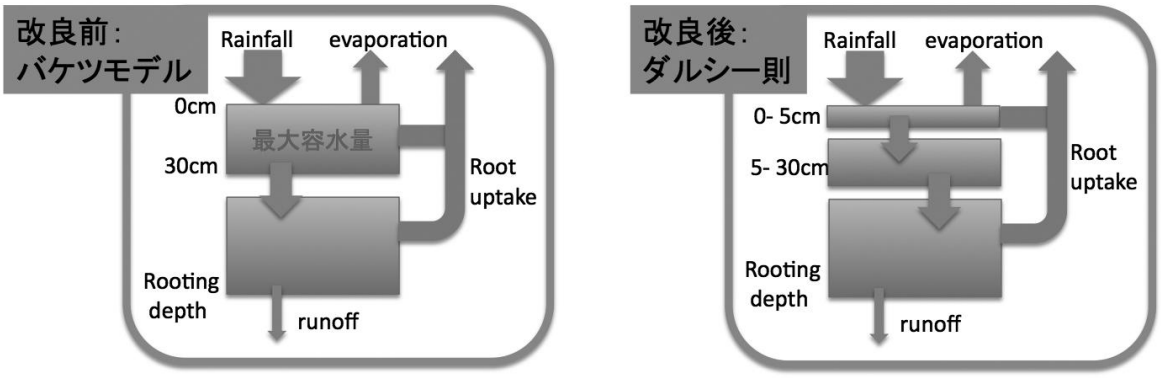

図12：陸域モデルにおける土壌水分動態スキーム改良の概念図.

このような改良を行った結果、土壌呼吸に関する推定結果は約2 Mg C/ha/yr増加した。要因としては、土壌固相率変化とそれに伴う透水係数の変化を明示的に扱えるようになったことが結果に強く影響を及ぼしていた（図13）。撹乱発生後は、植被が失われることで土壌が雨滴に曝され、粘土質が流出して砂組成率が上昇する。これが土壌水分動態、そして撹乱後の炭素収支に影響を与えることが示された（図14）。このような過程は従来のモデルでは再現できなかったため、今

回のモデル高度化によって森林減少に伴う炭素収支推定がより高い精度で可能になると期待される。

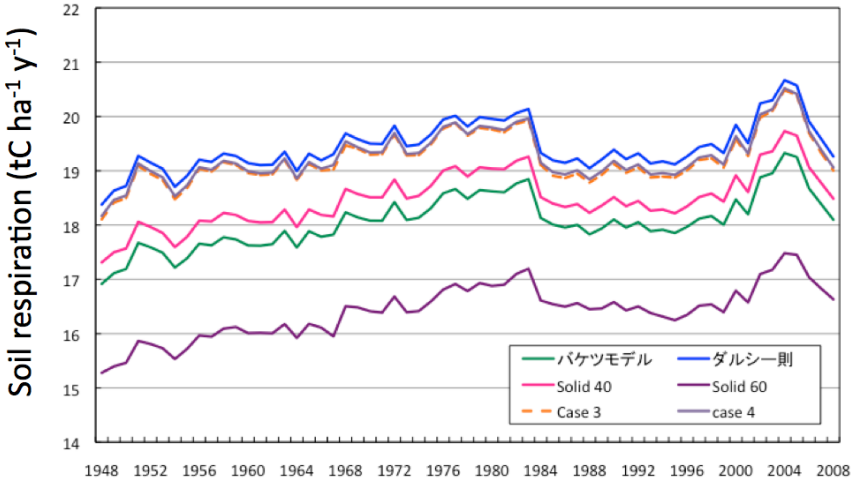

図13：パソーサイトの土壌呼吸速度に関するモデル推定結果. 使用する土壌水分スキーム（バケツモデル、ダルシー則）や土壌特性（固相率（40～60%）、土壌タイプ）を変化させた場合.

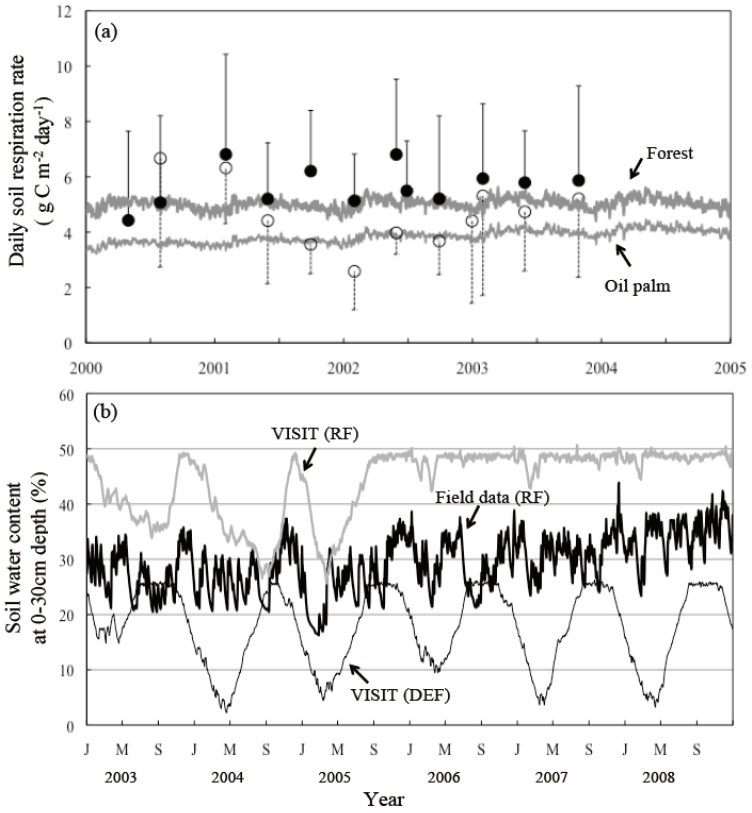

図14：熱帯林およびアブラヤシ園における（a）土壌炭素、(b)土壌水分のシミュレーション結果とその観測データとの比較.

（５）考察

これまでに行われたモデル高度化と検証を通じて、撹乱・森林減少・劣化に伴う熱帯林の炭素

収支における変動を長期・広域に推定するシステムのためのモデル・プロトタイプが構築されたと言える。様々なタイプの熱帯林における現地データを参照し検証に用いることで、定量的な精度を高めることができた。今後も衛星観測による森林分布の時系列データを用いた広域推定（予備的な解析は本課題で実行済み）を継続していく必要がある。一方で、基礎的なモデル高度化を継続する必要性ももちろん残されている。継続的な研究により、土壌内の物理環境スキーム改良を完成させる必要がある。それによって土壌水分の時間変化や空間分布をより現実的に再現でき、結果的に土壌有機物の分解やターンオーバーの推定精度向上が見込める。また、大径木の択抜といった森林構造の変化を伴う劣化をモデル内で取り込むための改良が必要である。そのため、樹木の総バイオマスだけでなく個体サイズ分布を考慮するなどの対応が考えられる。

森林の減少・劣化に伴い、炭素収支だけでなくメタンや亜酸化窒素などの温室効果ガス、さらにその他の微量ガスの交換量も変化するはずである。アブラヤシ園などの農地では、多量の施肥によって供給された窒素が亜酸化窒素となって放出される可能性がある。また、カリマンタン島などに分布する泥炭林ではメタン放出が重要な場合もある。泥炭地には膨大な炭素が貯留されており、エルニーニョなど異常気象に伴う乾燥年には大規模な火災が発生し、強い炭素放出源となる可能性が示されている。今後は、炭素収支だけでなく各種の微量ガス交換を介した気候変動への正味の効果を考えていくべきであろう。

もう一つの検討課題は、森林減少・劣化が生態系サービスに与える影響である。その中には、遺伝子資源の供給源となる生物多様性に関する検討も含まれる。本研究では気候調節サービスの一つである炭素収支に焦点を当てたが、森林の持つ様々な公益的サービスへの影響を加味した総合的な評価を今後試みていく必要性がある。

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

撹乱が森林生態系の構造や機能に本質的な影響を与えることは、これまでの生態学的な研究により森林をはじめとする多くの生態系で定性的に観察されてきたが、植生の転換を含む大規模な撹乱による長期的な炭素収支を定量的に評価することは困難であった。本研究は、従来の陸域モデルを高度化することで森林減少に伴う炭素収支変化がシミュレーションを可能とした。これは、以前のモデル研究で用いられた経験的方法や、IPCC GPG-LULUCFによる簡易推定（サブテーマ１参照）と比較して、現地データに基づいて生態学的関係から導出された信頼性の高い手法といえる。モデルで用いられるパラメータは基本的に生理生態的な意義付けがあり、つまり経験的な調整パラメータが少ないことにより、多様な生態系への適用が可能となっている。さらに、このモデル推定はメッシュ気象データなどを用いることで広域展開が容易であり、アジア地域の炭素収支評価にも重要な貢献を為すものと期待される。

（２）環境政策への貢献

撹乱に伴う森林炭素収支の変化は、グローバルな気候影響だけでなく、各国や地域の森林吸収源と深く関係しており、気候変動に関する国際交渉や抑制策にも影響を与える可能性が高い。今後、GEOSS-FCTによるグローバルな森林炭素監視活動を通じ、UNFCCCのREDDプラス（途上国における森林減少・劣化の防止および植林活動）などの環境政策に貢献していく。生態学的モデルを用

いることで、REDD活動の評価に必要なベースラインの設定が高い信頼度で可能になると期待される。また、IGBP-GLPなどの国際プロジェクト参加を通じ、成果の広報・普及に努める。

６．引用文献

1) Ito A. & Oikawa T. (2002) A simulation model of the carbon cycle in land ecosystems (Sim-CYCLE): A description based on dry-matter production theory and plot-scale validation. Ecological Modelling 151: 147-179.
2) Inatomi, M., Ito, A., Ishijima, K. & Murayama, S. (2010) Greenhouse gas budget of a cool temperate deciduous broadleaved forest in Japan estimated with a process-based model. Ecosystems, 13: 472-483 doi:10.1007/s10021-010-9332-7.
3) Ito, A.(2008) The regional carbon budget of East Asia simulated with a terrestrial ecosystem model and validated using AsiaFlux data. Agricultural and Forest Meteorology, 148:738-747.
4) Kira, T.(1987) Primary production and carbon cycling in a primeval lowland rainforest of Peninsular Malaysia,in Tree Crop Physiology, M.K. Sethurat & A.S. Raghavendra, Editors.Elsevier, Amsterdam. p.99-119.
5) Adachi M., Bekku Y. S., Rashidah W., Okuda T., Koizumi H. (2006) Differences in soil respiration between different tropical ecosystems. Applied Soil Ecology, 34: 258-265.
6) McGuire, A.D., Sitch, S., Clein, J.S., Dargaville, R., Esser, G., Foley, J., Heimann, M., Joos, F., Kaplan, J., Kicklighter, D.W., Meier, R.A., Melillo, J.M., Moore III, B., Prentice, I.C., Ramankutty, N., Reichenau, T., Schloss, A., Tian, H., Williams, L.J., & Wittenberg, U. (2001) Carbon balance of the terrestrial biosphere in the twentieth century: analysis of CO_2, climate and land use effects with four process-based ecosystem models. Global Biogeochemical Cycles, 15: 183-206.

７．国際共同研究等の状況

地球観測システム（GEOSS）のForest Carbon Tracking（FCT）に参加し、GEOSS-FCT国際会合などで東南アジアにおける森林炭素監視システムの適用例を提示した。

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

<論文（査読あり）>

１）Yamagata, Y., Takeuchi, W., Bagan, H., Ito, A. & Adachi, M. (2010) “Forest Carbon Mapping using Remotely Sensed Disturbance History in Borneo” Earthzine, published on-line, September 21.
２）Adachi, M., Ito, A., Ishida, A., Rashidah, W., Ladpala, P. & Yamagata, Y. (2011) “Carbon budget of tropical forests in southeast Asia and the effects of deforestation: An

approach using a process-based model and field measurements" Biogeosciences Discussions, 8, 3051-3079, doi: 10.5194/bgd-8-3051-2011.

〈その他誌上発表（査読なし）〉
特に記載すべき事項はない

（２）口頭発表（学会等）

1) Ito, A. & Yamagata, Y. "Estimation of carbon release after land-use change using an ecosystem model and ALOS data for the Forest Carbon Monitoring System", *The 29th* Asian Conference *on* Remote Sensing, Colombo, 2008年11月.
2) Ito, A., & Yamagata, Y. "Ecosystem carbon study for the society: system approach and forest carbon monitoring system", AsiaFlux Workshop 2008, Seoul, South Korea, 2008.
3) 伊藤昭彦「陸域の温室効果ガス交換モデルと観測連携」地球観測連携拠点（温暖化分野）平成20年度ワークショップ-統合された地球温暖化観測を目指して-温暖化影響観測の最前線-、東京都、2008年12月.
4) Ito, A. "Ecosystem modeling for global carbon monitoring" 3rd GEOSS-Asia Pacific Symposium, Kyoto, Japan, 2009年2月.
5) Ito, A. "Modeling the carbon cycle of tropical rain forest" Workshop on Monsoon Asia Tropical Forest Carbon Dynamics and Sustainability, Mekong Institute, Thailand, 2008年8月.
6) Ito, A., Adachi, M. & Yamagata, Y. "Preliminary report on forest carbon mapping by utilizing PALSAR and ecosystem model" 2nd GEO Forest Monitoring Symposium: From Research to Operations, Thailand, 2009年7月.
7) 安立美奈子、伊藤昭彦、Wan Rashida、山形与志樹「生態系モデルVISITによる土地利用変化が炭素動態に与える影響評価」 日本生態学会57回大会,東京都, 2010年3月.
8) 伊藤昭彦「企画集会T15生態系サービスの総合的指標化：モデルによる生態系指標のマッピング」日本生態学会第57回大会, 東京都, 2010年3月.
9) Ito, A., Inatomi, M., Adachi, M. & Yamagata, Y. "Data-model fusion for evaluating ecosystem services under climate change and land-use change" Global Land Project Open Science Meeting (GLP2010), Phoenix, Arizona. USA, 2010年10月.
10) Ito, A., Adachi, M. & Yamagata, Y. "Simulation on CO_2 Flux by Ecosystem" 4th Technical Roundtable on MRV ″Key Workshop on MRV and REDD+″, Tokyo, Japan, 2010年10月.
11) Adachi, M., Ito, A., Ishida, A., Rasidah, W., Ladpala, P. & Yamagata Y. "Carbon budget of tropical forests in Southeast Asia and the effects of deforestation: approach from a process model and field measurements" American Geophysical Union 2010 Fall meeting, San Francisco, USA, 2010年12月.
12) 安立美奈子、伊藤昭彦、石田厚、中野隆志、吉村謙一、Wan Rasidah、Phanumard Ladpala、Samreong Panuthai、山形与志樹「異なる熱帯林の土壌呼吸量の推定：モデルと実測の検証」日本生態学会第58回大会, 札幌市, 2011年3月.

（３）出願特許

特に記載すべき事項はない

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない

（５）マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

（６）その他

特に記載すべき事項はない