

課題名	S-1 21世紀の炭素管理に向けたアジア陸域生態系の統合的炭素収支研究		
課題代表者名	及川武久（筑波大学大学院生命環境科学研究科）		
研究期間	平成14-18年度	合計予算額	1,924,340千円（うち18年度 370,459千円） ※上記の予算額には、間接経費444,022千円を含む
研究体制			
テーマⅠ ボトムアップ(微気象・生態学的)アプローチによる陸域生態系の炭素収支解析に関する研究			
<p>(1) 森林生態系における炭素収支の定量的評価に関する研究 （独立行政法人産業技術総合研究所、独立行政法人森林総合研究所、独立行政法人国立環境研究所、北海道大学、京都大学、茨城大学、神戸大学、信州大学、岐阜大学、島根大学、鹿児島大学、龍谷大学、山梨県環境科学研究所、財団法人自然環境研究センター）</p> <p>(2) 草原・農耕地生態系における炭素収支の定量的評価に関する研究 （独立行政法人国立環境研究所、独立行政法人農業環境技術研究所、独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構、筑波大学、岡山大学、財団法人自然環境研究センター）</p> <p>(3) 土壌圏における炭素収支の定量的評価に関する研究 （岐阜大学、独立行政法人国立環境研究所、独立行政法人農業環境技術研究所、筑波大学、茨城大学、都留文科大学、玉川大学）</p> <p>(4) 陸域炭素収支のデータベースの構築と総合的解析に関する研究 （独立行政法人農業環境技術研究所、独立行政法人産業技術総合研究所、岡山大学）</p>			
テーマⅡ トップダウン(大気観測)アプローチによるメソスケールの陸域炭素収支解析			
<p>(1) 大気観測ネットワークによる二酸化炭素のメソスケールの分布とその変動の観測 （独立行政法人国立環境研究所）</p> <p>(2) メソスケールのインバースモデルの開発による二酸化炭素収支分布の推定 （独立行政法人国立環境研究所、独立行政法人海洋研究開発機構）</p>			
テーマⅢ アジア陸域生態系の炭素収支変動予測と21世紀の炭素管理手法の検討			
<p>(1) 陸域生態系吸収・放出の近未来予測モデルの開発 （筑波大学、国土交通省気象研究所、独立行政法人海洋研究開発機構）</p> <p>(2) 陸域炭素循環モデルの国際比較と高度化 （独立行政法人国立環境研究所）</p> <p>(3) 二酸化炭素収支のモデルによる予測のための情報基盤整備 （北海道大学、独立行政法人産業総合研究所、筑波大学）</p> <p>(4) 21世紀の陸域炭素管理オプションの総合評価と炭素収支の統合予測モデルの開発 （独立行政法人国立環境研究所）</p>			
テーマⅣ プロジェクトの統合的推進と情報の共有 （筑波大学、独立行政法人国立環境研究所）			
研究概要			
<p>1. 序</p> <p>IPCC第4次評価報告書(2007)でも指摘されているように、人為的な二酸化炭素(CO₂)等の温室効果ガスの排出による地球温暖化はすでに進行しつつある。この地球温暖化を抑制するための国際的枠組みである京都議定書が、2005年2月に発効し、第一約束期間である2008年～2012年における排出削減目標の達成に向けて、議定書を批准している先進国は積極的に対策を進めている。しかし、この地球温暖化問題への取組みは、京都議定書の短期的な取組みのみで片が付くような容易な問題ではなく、途上国も含めたすべての国について、第2約束期間以降における中長期的な炭素管理への取組みを検討する必要がある、将来を見据えた科学的な検討を今から準備しておくことは重要である。平成14年度から5年計画で始まった環境省初の戦略研究課題である本研究課題は、アジア地域における陸域生態系の炭素収支に関連して、正にその狙いを持って開始された研究プロジェクトとして位置づけられるものである。</p>			

2. 研究目的

本プロジェクトは、推進費における初の戦略研究プロジェクト（S課題）として、平成14年度からの5年計画（第I期、平成14～16年度：第II期、平成17～18年度）として始まったものである。この研究プロジェクトの大きな狙いは地球温暖化の主因である大気CO₂濃度上昇の抑制を目指して、特にアジア陸域生態系における炭素収支変動の実態を統合的に明らかにすることにある。本プロジェクトでは、下記4つのテーマのもとに研究を推進してきた。

- ・テーマI 「ボトムアップ（微気象・生態学的）アプローチによる陸域生態系の炭素収支解析に関する研究」

テーマリーダー：山本晋（岡山大学大学院環境学研究科）

- ・テーマII 「トップダウン（大気観測）アプローチによるメソスケールの陸域炭素収支解析」

テーマリーダー：町田敏暢（国立環境研究所）

- ・テーマIII 「アジア陸域生態系の炭素収支変動予測と21世紀の炭素管理手法の検討」

テーマリーダー：甲山隆司（北海道大学大学院地球環境科学研究科）

- ・テーマIV 「プロジェクトの統合的推進と情報の共有」

テーマリーダー：及川武久（筑波大学大学院生命科学研究所）

上記4つのテーマの内、I～IIIのテーマは野外での観測研究とリモートセンシングや陸域生態系モデル研究を有機的に統合化する課題となっている。

テーマIVでは、I～IIIのテーマで得られた研究成果を集積し、東アジア地域の陸域炭素収支の定量化に向けた統合的な解析を行う。解析にあたっては、地点観測による生態プロセスの情報と、大気観測によるトップダウンアプローチの解析結果を検証データとして併用し、これにリモートセンシングにより作成された高解像度・高頻度の情報を入力することで、陸域生態系モデルを最大限に高精度化した「システムアプローチ」を構築した。そのためには、各テーマ研究者間の情報共有が円滑に行われることが必須であり、S1プロジェクト参加研究者を対象としたS1プロジェクトデータベース（S1-DB）のハード・ソフト両面での整備を実施した。

3. 研究の方法及び結果

テーマI ボトムアップ（微気象・生態学的）アプローチによる陸域生態系の炭素収支解析に関する研究

東アジアは、シベリアの亜寒帯林から東南アジアの熱帯林まで多様な生態系を有している。亜寒帯、温帯、熱帯別にサイトを選定し、微気象学的方法による森林・草地・農地のCO₂フラックス観測と、チャンバー法による土壌呼吸・植物呼吸・光合成等の主要な炭素循環プロセスを、統一的手法かつ通年の観測を行った。これに加えて、重点観測サイトでは、植物現存量、枯死脱落量、年間成長量、炭素・酸素安定同位体比、分光測定によるフェノロジー変化などの調査を行った。

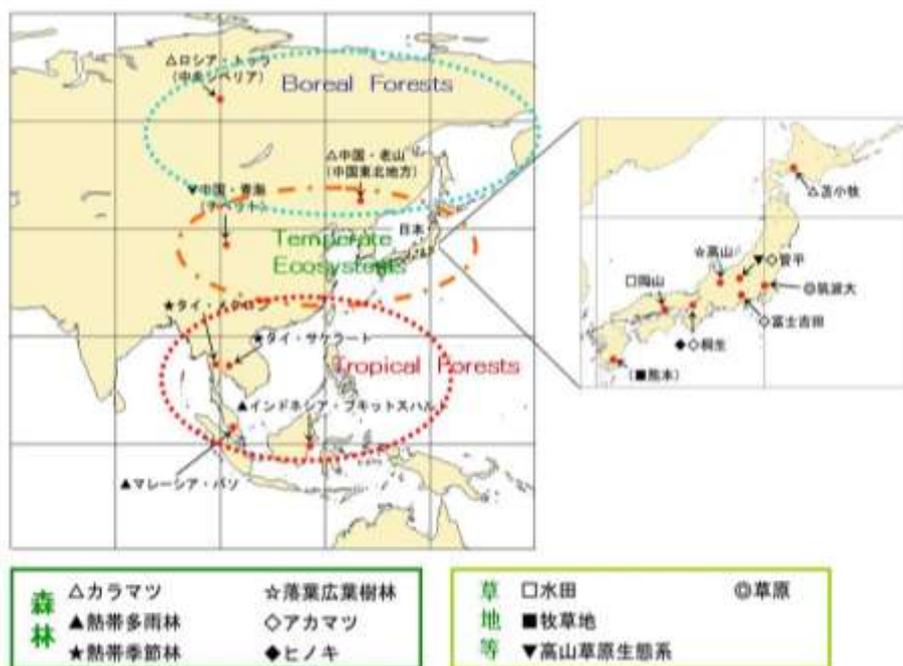


図1 本研究における観測のマップ
(落葉広葉樹林、落葉針葉樹林、常緑針葉樹林、草地、農耕地など15サイトが含まれる)

(1) 森林生態系における炭素収支の定量的評価に関する研究

サブサブテーマ1)では、亜寒帯林サイトとして、老山、トゥラ、苫小牧の3観測地点を対象とし、サブテーマ2)では、温帯林として、高山、富士吉田、桐生の3観測地点を対象とし、サブサブテーマ3)では、熱帯林として、Pasoh、Sakaeratの2観測地点を対象とした。これらのサイトでフラックス観測による炭素収支測定(生態系純交換量等)と、クロスチェックとして生態学的手法による生態系炭素蓄積速度の計測を行った(図1)。

1) 亜寒帯森林生態系における炭素収支

苫小牧サイトでは2000年夏から2004年9月まで、老山サイトでは2002年以降、微気象観測と各種フラックス観測を実施した(図2)。その結果、微気象学的方法により、苫小牧サイトにおける2001~2003年の生態系純生産量(NEP)は平均的におよそ $320 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ の炭素吸収があることがわかった。また、NEPの年々変動は、第一に夏季(7~8月)の日射量に左右される事がわかった。一方、老山サイトでは、2003年10月から2004年9月の1年間に得られた連続データから年間NEPを算出したところ、夜間のフラックス観測結果に対する補正方法の違いによって $121 \sim 190 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ の幅をもつ結果が得られた。老山では生態学的手法で求めたNPPは大きい値を示したため、NEPがフラックス観測結果から求めた値を大幅に上回った。一方、永久凍土上のカラマツ林生態系(トゥラ)では、収支、循環量とも小さかったが、生態学的手法で求めたNEPはマイナス、すなわちソース側になった。これは細根の枯死量を過小評価し、林床植生固定量が算入されていないことが原因と考えられる。永久凍土地帯のカラマツの年輪成長は5月下旬から6月上旬の気温と正の相関が高かった。炭素固定に影響する土壌窒素の動態は、厳しい環境下におけるアンモニア態窒素の卓越と不動化プロセスの卓越等の特徴が明らかになった。北東アジアのカラマツ林生態系は、環境条件によって大きく炭素集積量の分布が大きく異なっていた。

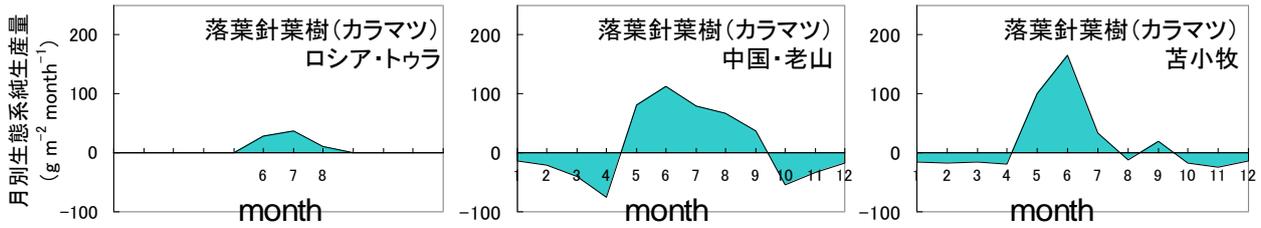


図2 中央シベリア・トゥラ、中国東北部・老山、および北海道・苫小牧で2003年から2004年にかけて観測された生態系純生産量(NEP)の季節変化

2) 温帯森林生態系における炭素収支

各サイトで観測された生態系純生産量(NEP)は、300~600 g C m⁻² yr⁻¹(富士吉田; 2000~2004)、400~700 g C m⁻² yr⁻¹(桐生; 2001~2004)、200~400 g C m⁻² yr⁻¹(高山; 2000~2004)の範囲にあった(図3)。

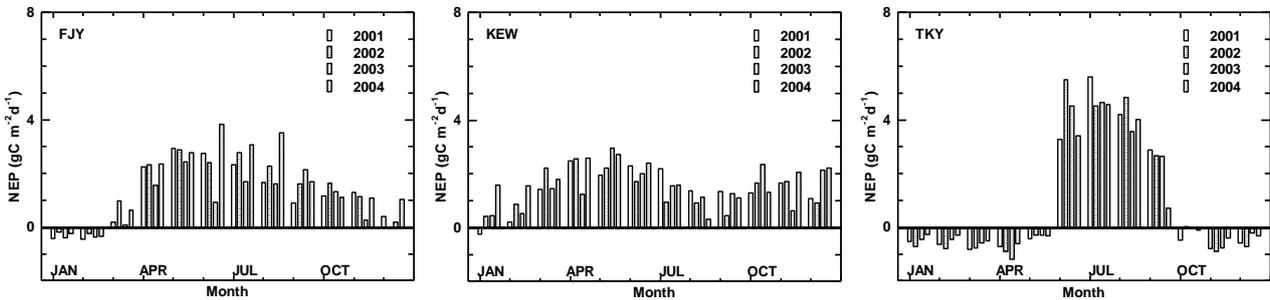


図3 富士吉田(FJY)、桐生(KEW)、高山(TKY)サイトで観測され生態系純生産量(NEP; gCm⁻²d⁻¹)。2001年~2004年各年の月別平均値を示す

高山サイトにおける過去12年間の観測から、このサイトの年間NEPの年々変動を引き起こす原因は、展葉開始時期を左右する4~6月の平均気温と、梅雨期の生産量を左右する6~7月の日射量の変動により大まかに説明することができた。2000年から2005年について、観測された気象条件の変動とNEP変動の特徴をまとめると以下の通りである。(i)2002年1~4月にかけて、日本から朝鮮半島、中国東北部にかけての東北アジアの広い領域で、平年に比べて地上気温の高い偏差が観測された。この高温偏差に応答して、高山の2002年の展葉開始は平年に比べて10日程度早く進行した。これは、高山の2002年の年間NEPとGPPが2000~2005年の中で最大値を示したことの、主要な原因として考えられる。(ii) 2003年6~8月にかけて、日本の本州地方、特に九州から関東地方にかけての帯状の地域で、平年に比べて日射量が顕著に低い偏差が観測された。この影響は富士吉田、高山ともに光合成有効放射量と平均地上気温は平年に比べて顕著に低下した。その結果、GPPもREも減少が同時に減少したが、GPPの減少が上まわった。とりわけ富士吉田では日射量の減少によるGPPの低下が明瞭で、2003年の年NEPは2000~2004年の期間での最小値を示した。また高山でも、2003年7月のGPPの低下を顕著にもたらした。(iii) 2004年は年間を通じて全国的に気温が高く経過した。富士吉田では夏~冬、桐生では冬~春、秋~冬のNEPが大きく、これにより両サイトとも2004年の年NEPは2001年~2004年の期間での最大値を示した。2004年の高山では、暖候季の日射量は例年と変わらないレベルで推移したが、NEPは夏以降急激に減少し、年NEPは2000~2004年の期間で最小となった。暖候季に度重なる台風の襲来を受けたこと

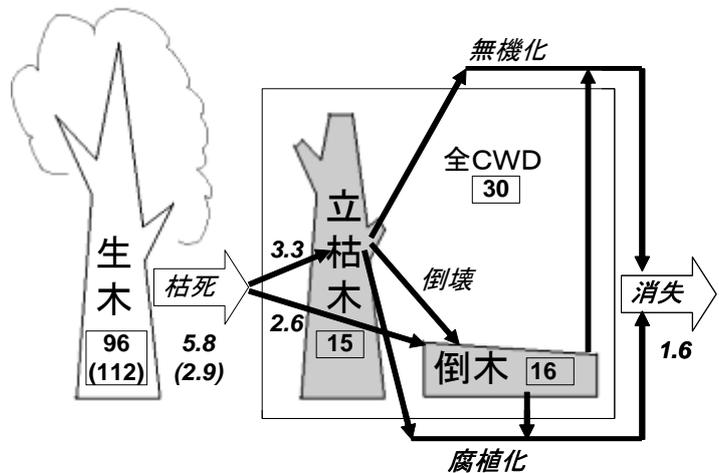


図4 Pasoh 50ha調査地での2000-2005年における枯死材の動態を通じた炭素代謝。四角形で囲まれた数値は集積量 (Mg ha⁻¹)、イタリックの数値は流量 (Mg ha⁻¹ yr⁻¹)。括弧内の数値は最近20年間の平均値。

による葉の脱落が、原因として考えられた。

3) 熱帯森林生態系における炭素収支

PasohにおけるCO₂動態の把握に基づき、2003～2005年における年間の炭素収支を推定した結果、土壌呼吸(RS)、生態系呼吸(RE)、光合成総生産量GPP、正味の炭素吸収を表す純生態系生産量NEPは、それぞれ、15.60、31.19、32.43、1.24 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹と推定された。なお、夜間におけるCO₂放出量の過小評価を補正するため、温帯森林では風が比較的強く、摩擦速度の大きい期間を利用する手法が温帯森林では一般に適用されてきたが、Pasoh熱帯雨林の場合、こうして補正したCO₂放出量が土壌呼吸程度の量にしかならず、幹・枝・葉の呼吸、地上堆積枯死木分解の合計に見合う量にならないことがわかり、熱帯林での炭素収支推定には、これにかかわる群落内CO₂動態からの組み立てがより重要であることが指摘できた。さらに、長期の生態学的調査から炭素収支における枯死木の役割の重要性が明らかになってきた。そこで、枯死木の分解過程についての詳細な調査も行った。その結果、容積密度をもって分解過程を把握可能であること、分解初期には無機化が、後期では腐植化・碎片化が主体であること、風倒枯死木の発生による炭素放出傾向が炭素収支にかなりの影響を与えることなど、炭素収支における枯死木の役割の重要性が明らかになってきた。そこで、さらに、時空的変動性に注目する必要があるとあり、50haの大面積を対象とした枯死木動態の実態調査を実施した。胸高直径30cm以上の樹木の枯死による大形枯死材(CWD)の供給速度は、最近20年間の平均で2.9 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹、最近5年間では平均値の2倍(5.8 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹)という高い値を示した。1985～90年の枯死木は、すでに83%の重量が消失し、最近5年間の枯死木でも38%が消失していた。これら消失率に基づく2005年の集積枯死材からの炭素消失速度(無機化+腐植化)は1.6 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹と推定された(図4)。

Sakaeratではフラックス観測によると過大な炭素吸収が推定されたが、夜間のCO₂放出を補正することによりかなり改善される結果を得た。生態学的調査では、森林の更新動態による年々変動を示しているが、炭素収支がほぼ安定平衡状態にあることがわかった。以上のように、熱帯林の炭素収支は平衡状態に近いが、空間的な不均質性によって、あるいは気候条件の年々変動や倒木発生などの時間変動を受けて、炭素の放出吸収が変動する実態が明らかにされた。

(2) 草原・農耕地生態系における炭素収支の定量的評価に関する研究

1) 温帯高山草原生態系における炭素の吸収、放出及び蓄積の総合評価と温暖化影響の解明

渦相関法によるCO₂・H₂Oとエネルギーフラックスの長期観測を行い、炭素動態の時間変動、およびそれに及ぼす環境要因の影響を解析した。

その結果、当該草原の正味炭素吸収速度(NEP)は年平均およそ120 g C m⁻² yr⁻¹であり、日NEPの最大値は冬から夏にかけて約-2～4 g C m⁻² d⁻¹までの変動があること、NEPの短期変化は温度環境、特に昼夜の温度差の影響が最も大きいことがわかった。つぎに、青海・チベット高山草原炭素収支の空間的不均一性を把握するため、高原環境に適したNEPチャンバーを開発し、異なる草原植生の生態系光合成・呼吸の測定を行った。その結果、ヒゲハリスゲ草原では、植物種多様性や葉群の構造(針葉と広葉の比など)が、草原生態系の光合成活性に大きく影響し、針葉の多い群落は光合成活性が高いことがわかった。一方、植物や微生物の呼吸を含めた生態系呼吸は、植物根の乾燥重量、特に土壌中10cmまでの植物根の乾燥重量に非常に高い相関が認められた。また、草原植物地上部(葉と茎)の現存量の最も高い時期(7～8月)に、青海・チベット高原中央部の7つの典型的な草原で生態系光合成と呼吸を測定した結果、生態系の正味炭素吸収速度、生態系の呼吸速度は、草原植生によって大きく異なり、放牧量の多い退化草原が最も低く、高山湿地草原が最も高いことがわかった。

2) 青海・チベット高原の土壌炭素蓄積量に及ぼす温暖化影響のモデリング評価

チベット高原の高山草原群落、低木群落と亜熱帯森林群落を含めた地域の現地調査データを利用し、土壌炭素蓄積量に及ぼす気候的要因と生物的要因との関係を究明した。その結果、まず、チベット高原における草原と低木群落の土壌有機炭素量は、降水量の増加に伴い増加するが、気温の変化とは明瞭な相関が認められなかった。しかし森林生態系では、土壌有機炭素の蓄積量は気温の低下に伴い増えるが、降水量の変化の影響が小さいことがわかった。つぎに、土壌有機炭素の蓄積量は、草本群落の葉の平均寿命とは明瞭な関係が見られなかったが、森林群落では葉面積指数とともに高くなる傾向があることが示された(図5)。さらに、土壌有機炭素の蓄積量は、すべての植物群落において、年間気温と降水量より、葉群の平均寿命と葉面積指数との相関が高いことがわかった。

3) 青海・チベット高原草原の炭素吸収速度の即時・広域推定

衛星リモートセンシングデータを用いた広範囲の草原の植物現存量を推定するため、植物の分光反射率と地上部バイオマスの関係を解明するため、生態系の光利用効率 (LUE) の推定向上を図った。青海草原のCO₂フラックス計測データを使って、散乱光と直射光の貢献を考慮し、調整した反射光合成有効放射とLUEを求め、生態系のGPPを高い精度で推定できるモデルを構築した。また、MODIS衛星の撮影時間の調整LUEと一日の平均LUEとの相関を調べ、衛星データから草原生態系の生産力をより高い精度で推定することも可能にした。また、植物の被覆率が高い地域における地上バイオマスを高精度で推定するためには、より多くの波長域、特に上記のレッドエッジ (クロロフィルの吸収帯)、近赤外エッジ (水分の吸収帯) およびグリーンエッジの波長域を利用することが有効であることが示唆された。

4) 安定同位体比を用いたC3/C4混生草原における炭素動態の解析

C3/C4植物が混生する温帯草原における両植生の動態と、それがCO₂フラックスに及ぼす影響を解明した。具体的には、(i)長期的なバイオマス調査に基づき、対象とした草原におけるC3/C4植物の季節的な動態を定量的に把握、(ii)草原全体の植生と大気とのCO₂フラックス観測および大気CO₂のδ¹³Cの測定に基づき、草原全体のCO₂フラックスに対するC3/C4植物の寄与率を推定、(iii)対象とした草原に成立している特徴的な群落において、土壌呼吸フラックスの推定と土壌CO₂のδ¹³Cの測定を行い、草原全体の土壌呼吸に対する各群落およびC3/C4植物の寄与率を推定した。

植生調査の結果、LAI・地上部バイオマスともに、生長初期にはC3植物の方が大きいのに対し、後期にはC4植物の方が大きくなるという、優占種の逆転現象が見られた。植生-大気間のCO₂交換および土壌呼吸に対するC3/C4植物の寄与率を評価するため、従来のフラックス観測手法にδ¹³Cを併用して解析を行ったところ、植生調査の結果と同様、光合成・生態系呼吸・土壌呼吸に主に寄与する植生がC3植物からC4植物へと季節的に移行していることが明らかになった。また、光合成有効放射量の増加にともなってGPPが増加する期間には、REも気温上昇にともなって増加した。このため、各年の日中NEP約5%の差しかなく、夜間NEPの差はほとんどなかった。また2003年に観測されたδ¹³C_{GPP}およびδ¹³C_{RE}は、生長期間が進むにつれてとも徐々に増加し、9月には約19‰で最大に達した。この傾向はC4植物起源のCO₂フラックス割合の増加を反映しており、バイオマス・LAIにおけるC4植物の占める割合の季節変化におおむね一致した。実験草原における成長期間 (4月中旬~11月上旬) のGPPへのC3/C4植物の寄与率はそれぞれ63.7%、36.3%、REへの寄与率はそれぞれ52.3%、47.7%と推定された (図6)。

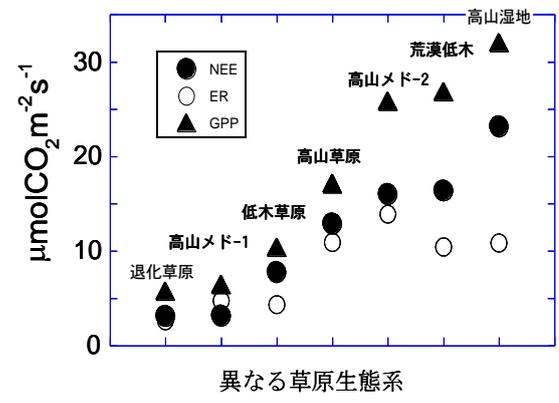


図5 2006年青海・チベット高原における異なる植生の炭素収支特性。上図：調査経路、下図：異なる植生の群落光合成 (GPP)、生態系呼吸 (RE)、生態系正味炭素吸収量 (NEP)を示す (Tang et al. 未発表)。

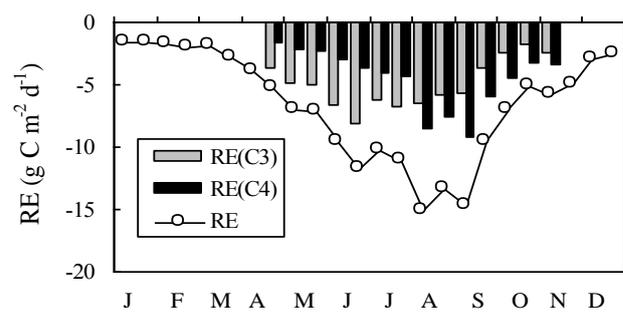
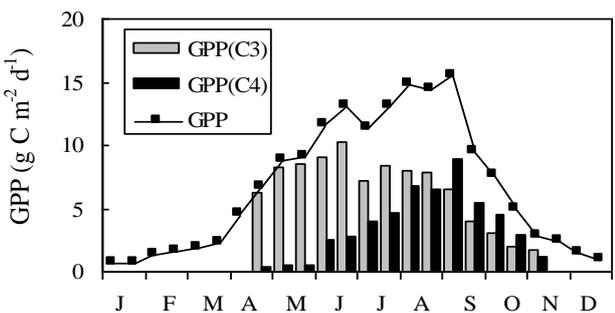


図6 C3/C4植物のGPP (左) の季節変化 (2003年)

5) 農耕地生態系における炭素収支の定量的評価

茨城県つくば市真瀬の水田 (MSE)、岡山県玉野市八浜の水田 (HCH)、熊本県合志市の牧草地 (KON) で観測を実施した。フラックスの計測には、各サイトとも、オープンパス型渦相関法を使用した。一般的に採用されている光合成・呼吸の分離法、すなわち夜間の純生態系交換量 (NEP) と温度との関係から日中の生態系呼吸量 (RE) を推定する方法を用いて、生育期間のNEPを総光合成量 (GPP) とREに分離した。MSEでは、チャンバー法 (イネの根の侵入を排除した通気式チャンバー) を用いて、微生物による土壌有機物の分解量 (RH) を測定するとともに、傾度法を用いてメタン放出量を測定した。収穫物の搬出に伴う炭素の流出量は、収穫前のイネの最終生育調査時の籾重、農家からの聞き取りによる収量 (精玄米重)、および稲体の炭素含有量から推定した。以上の要素を総合して、水田の年間炭素収支を定量化した。

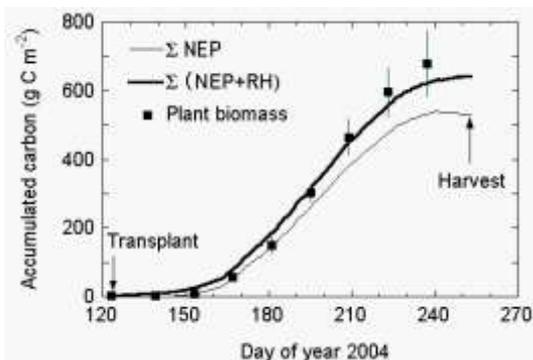


図7 フラックス測定に基づくNPPの積算値と乾物重変化から求めたNPPの積算値との比較 (MSE、2004年)

イネ単作田の純生態系生産量 (NEP) は $100 \sim 300 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ の範囲で年次変動がみられ、収穫物の搬出量やメタン放出量した年間炭素収支は $+30$ (水田への流入) $\sim -90 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ (水田からの流出) であった。NEP にチャンバー法による土壌有機物の分解量を加えて求めた純一次生産量は、定期的なイネのサンプリングで実測した稲体への炭素蓄積量とほぼ一致し、フラックス測定に基づく炭素収支の推定精度が検証された

(図7)。水田はイネの生育期間に湛水状態となるため、純一次生産量に対する分解量の割合は18%と低い値を示した。農耕地サイトにテーマIの2つの草原サイトを加えた計5サイトのデータに統一的な補完処理を施し、炭素収支のサイト間比較解析を行った。その結果、生育期間の日射量が総光合成量やNEPの年次間差・サイト間差に大きな影響を及ぼしていることや、刈り取った植物体を搬出しない草原サイトでは総光合成量に対する生態系呼吸量の割合が高いことが明らかになった。

(3) 土壌圏における炭素収支の定量的評価に関する研究

世界の陸上生態系に貯留されている土壌有機炭素 (SOC) の総量は、全球における大気中の CO_2 の約2倍、植生バイオマスの約3倍に相当する約 1500 Pg C と推計されている。すなわち、SOCは地球の炭素循環における最大のリザーバーとして機能し、極めて重要な役割を担っている。そして、SOCは土地利用や環境変化によって変動するが、その膨大な貯留量から局所的な環境応答は微小であっても、広域で引き起こされる炭素フローの変化は甚大であると予想される。

1) 土壌炭素フラックスの時空間変動の定量的評価

陸域生態系において、植生による炭素貯留量のうち約80%が森林植生に由来し、また全土壌炭素貯留量の40%が森林下の土壌に存在する。森林生態系の炭素固定および炭素収支は気候の違いや植生や遷移段階、土壌動物、攪乱 (皆伐、森林火災、攪乱後の経過年数など) の違いに影響される。森林の炭素貯留量に変化をきたす土地利用や気候の変化は、明らかに正味の炭素収支に影響する。特に、森林伐採や森林の再生および植林による炭素貯留量の変化は地球規模の炭素

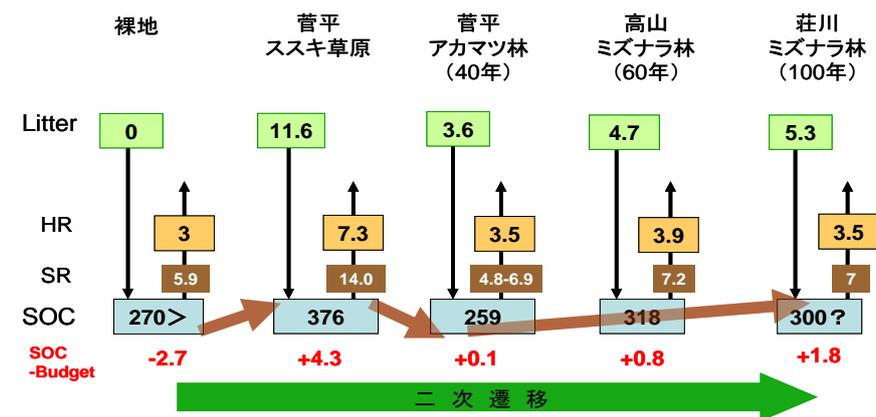


図8 冷温帯地域の二次遷移に伴う土壌への炭素フラックスとSOCプールの変化

循環に重要な役割を果たしている。本研究では、(i)生態系の時間変化 (遷移) を草本期から木本期への遷移、木本期における遷移に伴う土壌炭素収支の経年変化の解析から自然遷移の時間変動をパラメータ化するとともに、(ii)森林伐採が土壌炭素フラックスの時空間変動に与えるインパクトの解明により人為活動が時空間変動に及ぼす影響の定量的評価を行った。

生態系の遷移段階を対象にした調査では、遷移時間やバイオマスなどをさらに定量化することによって、各遷移段階における土壌炭素収支の特徴を定量的に評価することが可能であることが明らか

かになった。特に、草原—森林移行期における土壤炭素動態に着目すると、草本から木本のステージへの移行期において土壤炭素が減少することが明らかとなった。また、伐採直後にはSOCプールが大幅に減少することが示された。図8には長野県及び岐阜県の冷温帯地域で行った二次遷移の各遷移段階の植生で実測されたSOCと炭素フラックスの変動を時系列的に並べた。草原—森林移行期における土壤炭素動態に着目すると、草本から木本のステージへの移行期において土壤炭素が減少することが明らかとなった。

2) 土壤炭素収支におけるプロセスの相互作用と時空間変動

土壤圏における炭素循環を理解し、広域の土壤炭素動態の評価ならびに管理を行うためには、土壤圏内の炭素動態に関与する要素を精度良く測定するとともに各要素の関係を有機的につなげ、さらに土地利用、遷移に伴う生態系の炭素循環プロセスの相互作用とその時空間変動を解明する必要がある。本研究では、二次遷移系列の生態系を対象として、炭素循環プロセスの相互作用とその時空間変動を解明した。

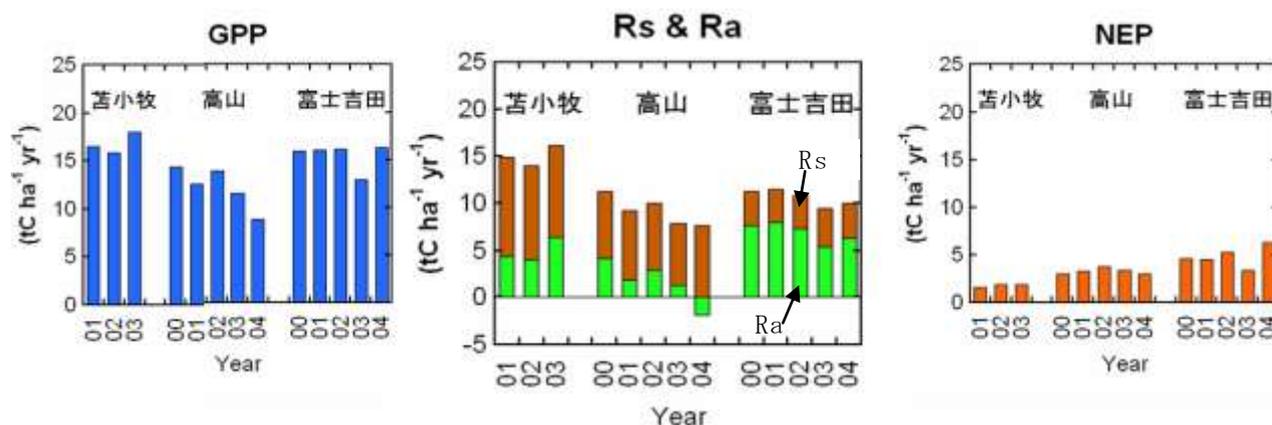


図9 苦小牧、高山、富士吉田での年間フラックス年変動

GPPは苦小牧と富士吉田で大きい値を示し、高山で小さい値を示した。Rs(土壤呼吸)は苦小牧と高山で大きい、富士吉田はそれらの二分の一以下であった。Raは富士吉田で最も大きく、次いで苦小牧、高山の順で小さかった。特に高山のRa(植物地上呼吸)は小さかった。これらの結果を反映して、NEPは富士吉田、高山、苦小牧で大きかった。また、GPPの年変動に対して、年間Rp(植物呼吸)とは正の相関があり、Rh(従属栄養生物呼吸)とは相関が見られないことである。また、これらの相関関係にはサイト間に差異が見られないことも明らかとなった(図9)。

以上より、RpはGPP依存するが、Rh総一次生産に依存しないことが明らかとなった。この理由として、気象の年変動に対して、GPPとRpはセンシティブであり、Rhはインセンシティブである可能性を指摘できるが、今後の確認研究が必要である。

3) 土壤炭素フラックスの時空間変動モデルの構築と広域推定手法の開発

SOC動態のモデルは、中間産物を時定数の異なる数種類の仮想的な炭素プールとして代表させた、いわゆるコンパートメントモデルが主流である。本研究では、Rothamsted Carbon Model (RothC)をベースとした。ここではRothCの改良を進め、オリジナルのモデルでは再現できなかった黒ボク土壌におけるSOCの動態を記述可能にした。また、広域的な土壤蓄積量分布を推定するため、高山市を流れる大八賀川流域圏を対象に、リモートセンシングとGISを使った解析を行った。そのため、まず高分解能衛星画像により精密な土地被覆図(植生図)を作り、水田、草地、落葉広葉樹林、常緑針葉樹林など14の土地被覆カテゴリを決めた。これらを元に対象流域圏で36地点159箇所の土壤サンプルを採取し、その土壤炭素量を計測した。その結果を土地被覆、傾斜角度、傾斜方位に反映させて、カテゴリ毎の炭素量を決めた。

図10は冷温帯ススキ草原(筑波大学菅平高原実験センター)および冷温帯落葉広葉樹林(岐阜大学高山試験地)で測定された土壤フラックスとRothCによるモデルの計算値を比較したものである。季節変化はよく再現されており、特に草が枯れる冬季には絶対値についても一致している。

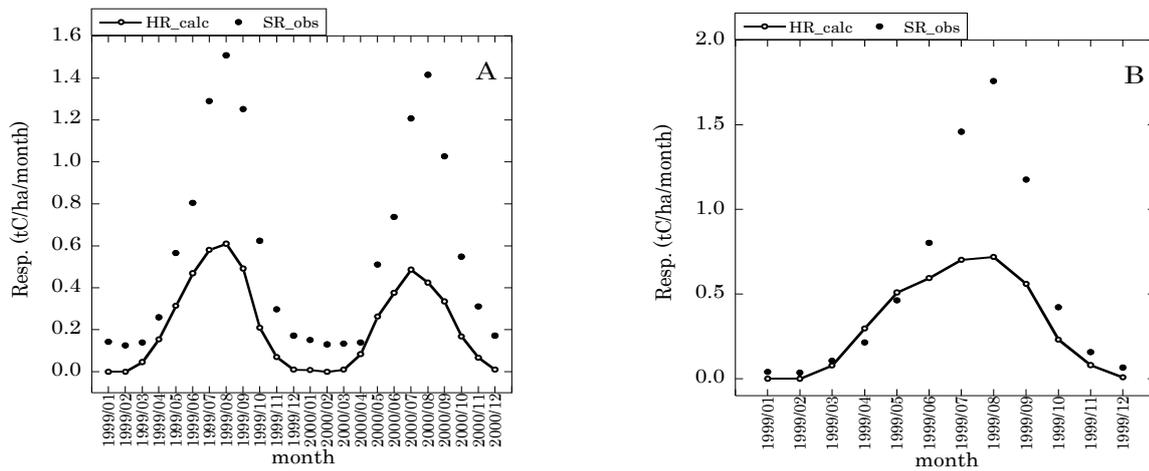


図 10 菅平スキ草原 (A) と高山落葉広葉樹林 (B) における土壌フラックスの季節変化、SRは実測値、HRは計算値

(4) 陸域炭素収支のデータベースの構築と総合的解析に関する研究

1) 東アジアフラックスデータベースネットワーク構築

研究テーマIで「共通の」フラックス観測手法として採用されている渦相関法で得られたデータの品質の統一として、(i)研究テーマIに参画しているタワーフラックス観測サイトのフラックス計測システムとデータ処理法の現状を把握するために、2004年2月にアンケート調査を実施し、16サイトの結果を集計・分析、(ii)既往の文献・資料の調査により、計測システムおよびデータ処理法の相違がフラックス値に及ぼす影響に関する結果を整理、(iii)森林サイト担当のグループには苦小牧データを、草原・農耕地サイト担当のグループには真瀬のテストデータを配布し、各サイトで採用している方法でデータ処理を実行してもらい、その結果を回収・比較、(iv)渦相関原データに対する品質検査、定常性の検査、乱流強度検査などの各種の品質検査を、真瀬のOPECによる2年間の観測データに適用し、それぞれの品質検査の特徴や適用上の留意点を整理、(v)OPECとCPECの両計測システムを併用しているMSEとTMKのそれぞれ1年間分のデータセットを用いて、OPECとCPECで測定したCO₂フラックス(貯留項は除外)を比較し、両システム間の差異を把握するとともに、差異の原因を解析、(vi)森林の欠損データの補完に妥当である多重代入法(MI法)を、水田サイトのデータに適用し、MI法の有効性や使用上の留意点について検討した(図11)。

観測手法の実態調査により、渦相関計測システムについてはオープンパス型とクローズドパス型が混在している点を除けば問題は少ないが、データ処理法についてはフラックス計算法や品質管理法に違いがあることが明らかになった。既往の文献・資料の調査や、テストデータを各サイトに配布して実施した比較実験により、サイト間でフラックスの定量的な比較を行う場合には、計算手法の違いによる影響を考慮した判断が必要なことがわかった。フラックスデータの品質管理については、渦相関原データの統計値の検査を基本として、これに定常性や乱流強度等の検査を付加することにより、適切な品質管理が行えることや、偶然誤差も定常性の検査として有効なことを示した。さらに、サイト間比較や統合解析への適用を目的とした簡便かつ誤差評価が可能な欠損データの補完法として多重代入法の有効性を確認し、テーマIの草原・農耕地サイトの炭素収支の比較研究に適用した。

2) 地上フラックス観測データの総合的解析

データベースにとりまとめられた各フラックスタワーの観測データとタワーサイトにおける土壌・植物生態学的観測データを集約して総合的な解析を行った。特に、(1)類似の生態系または気候帯ごとに炭素収支の観測データを取りまとめてサイト間比較解析、(2)高山、富士吉田、苦小牧、パソなどの観測サイトにおいて微気象学的方法と生態学的方法による生態系純生産量(NEP)の相互比較を実施した。さらに、長期観測データの集積を基礎に、複数の重点的観測サイトにおいて長期

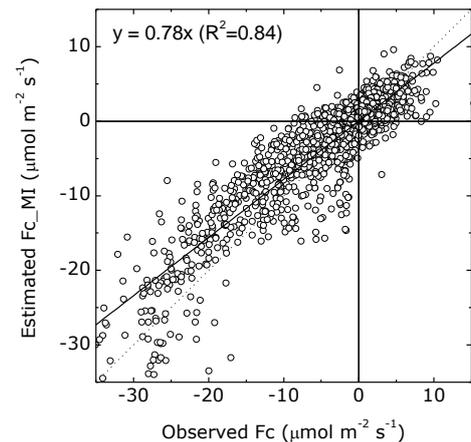


図 11 MI法による補完の検証実験の結果。MSEにおけるNEPの実測値とMI法による推定値の比較で、実線は線形回帰式(モデルI)、点線は1:1の直線を表す。

炭素収支変動を求め、気象変動・植生活動との関係について解析した。

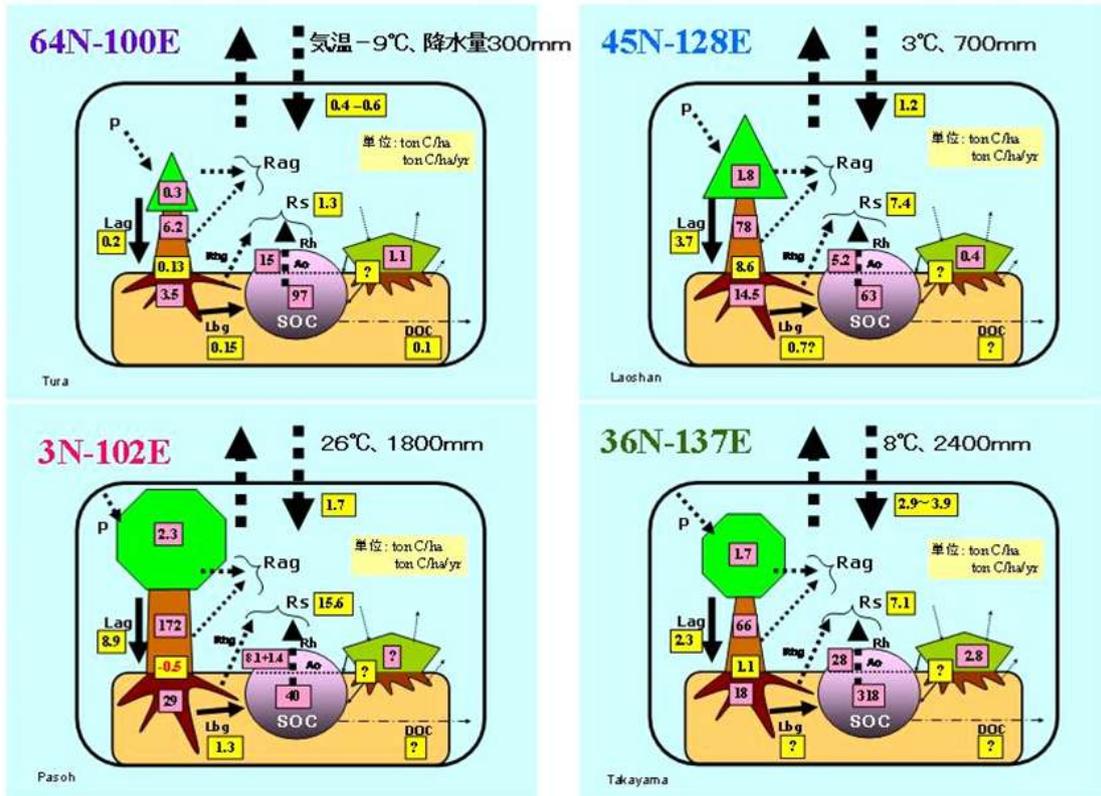


図 1 2 4つの観測サイト：永久凍土地帯(トゥラ)、中国東北部(老山)、日本(高山)、マレーシア(パソ)で推定した炭素蓄積量と炭素フロー

各種森林生態系での渦相関法によるNEPの年間値測定結果によると、NEPは植生の違い、気温、降水量季節変化の差異を反映してサイトごとに特色ある季節変化パターンとなっていることが分かった。本研究を通して、微気象学的方法と生態学的方法によるNEPの相互比較により森林生態系については日本の温帯林観測サイトでは本研究を通して、両手法の検証と改良が進み、かなり高い一致度となっていた。しかし、一般的にNEP_MがNEP_Bよりも大きいという傾向があり、特に熱帯林では差が著しいことがわかった。森林生態学的調査による炭素蓄積量とフローの検討により、気象条件と樹種の異なる4観測サイトの炭素蓄積の部位ごとの大きさの違い、フローの差異が確認された。また、フラックス観測によるNEPとの比較データが得られた(図12)。

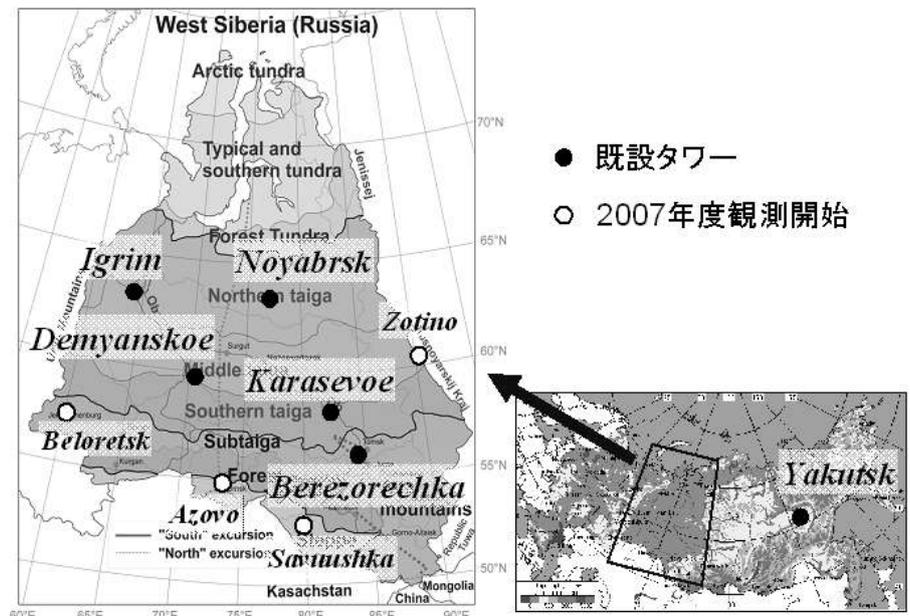


図 1 3 観測サイトの分布図

テーマⅡ トップダウン（大気観測）アプローチによるメソスケールの陸域炭素収支解析

（1）CO₂濃度観測システムの開発とタワーネットワークの構築

西シベリアにおいてCO₂濃度の詳細な変動を検出することを目的として、観測のインフラが不十分な場所で長期に安定的にしかも6地点でCO₂濃度を連続的に取得できる観測システムを新たに開発し、シベリアの気象条件下で必要な精度を発揮するシステムを作り上げた。（図13）

（2）西シベリアにおけるCO₂濃度の観測結果

CO₂濃度が下がる季節変化に着目すると、6サイト全てにおいて、5月初旬から顕著に低下が始まり、夏季の7～8月に最も濃度が低くなり、その後濃度が増加に転じる。この結果から、陸域生態系による光合成活動の季節変化を、正確に捉えていることが確かめられる。冬季になると日変動は極めて小さくなるが、有意な変動が認められた。このことはシベリアのような極寒の地でも冬季にもCO₂フラックスが存在していることを表している。また、冬季の変動に着目すると、隣接する

BerezorechkaとKarasevoeの両地で非常に良く一致していた。一方、Igrimはこの2地点とは異なる変動を示すが、詳しく見ると、その濃度変動が先行して生じた。これはIgrimで観測された大気塊が、時間を経て輸送され、Berezorechka、Karasevoeで同様に観測されたものである。この結果は、本観測が、数100kmスケールの空間を代表する濃度データとその変動を、正確に捉えているという事実を示唆するものである。一方、夏季のIgrimにおけるCO₂濃度は全体的にBerezorechkaやKarasevoeよりも高かった。これは、Igrimが西シベリア地域の高緯度側に存在するため、西シベリア南部のBerezorechkaやKarasevoeよりも、植物の光合成活動によるCO₂吸収量が低いことを示している。（図14）

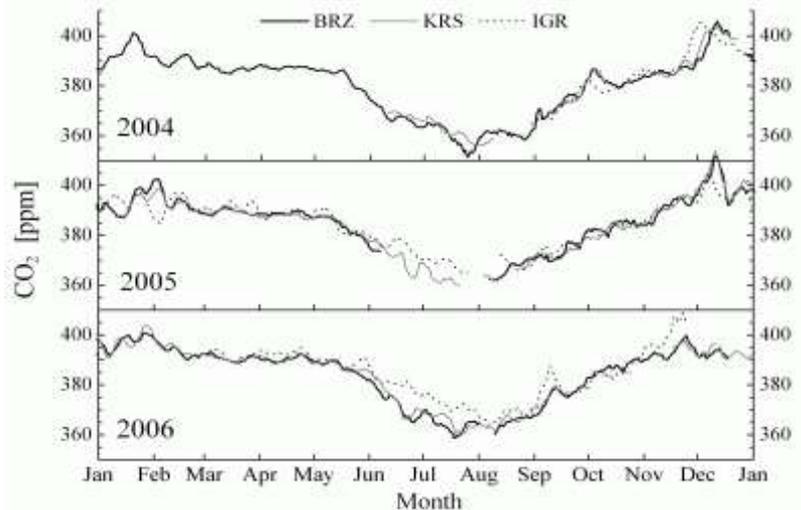


図14 7日間の移動平均処理を施した日中平均値の変動。観測期間の長いBerezorechka (BRZ)、Karasevoe (KRS)、Igrim (IGR) の3地点について示す

（3）インバースモデルを用いたCO₂収支の推定

本研究ではこれまでの64領域インバースモデルを基に、西シベリアをさらに2分割した領域を採用し、より詳細なCO₂収支を推定した。インバースモデルから推定されたCO₂フラックスは9月から4月にかけてほぼゼロかわずかに放出の傾向であるが、5月より吸収に転じ、6月に最大の吸収量である0.75 t C ha⁻¹ month⁻¹を示した。このフラックスをインバース解析の初期値に使ったCASAモデルのCO₂フラックスと比較すると、季節変動の傾向は似ているものの、インバース解析の結果は全体的に夏季の吸収量が大きくなっており、上記の観測結果がこの領域のCO₂フラックスを吸収方向に導いたことがわかる。西シベリア南部における2005年を通したCO₂の総吸収量は1.17 t C ha⁻¹であった。（図15）

Sim-CYCLEから推定された西シベリア南部におけるCO₂フラックスはインバース解析の結果と季節性が非常に良く似ているが、夏季における吸収量の絶対値はやや小さくなっている。これは

Sim-CYCLEモデルが、この領域の生態系のフェノロジーを正しく表現できていることを示していると考えられる。2005年1年間の西シベリア南部におけるCO₂の総吸収量

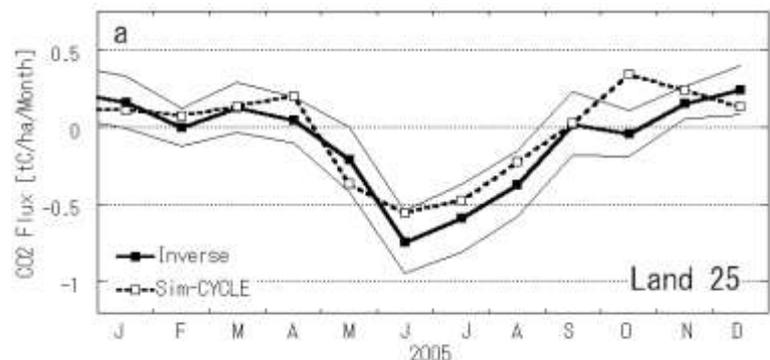


図15 インバースモデルによって推定された西シベリア南部における2005年のCO₂フラックスの季節変動とSim-CYCLEによる推定値との比較

は、インパース解析の推定結果が $1.17 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ であるのに対してSim-CYCLEは $0.32 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ である。この領域がネットで CO_2 を吸収しているという点で一致しているが、その積算値には3倍以上の差が存在していた。

テーマⅢ アジア陸域生態系の炭素収支変動予測と21世紀の炭素管理手法の検討

(1) 陸域生態系吸収・放出の近未来予測モデルの開発

気象研究所で開発されているBAIMは気候モデルに組込んで使用することを想定しており、大気-陸面の相互作用、特に物理的過程に重点を置いている。このモデルは気候-炭素循環の相互作用をシミュレートすることができ、例えば大気 CO_2 濃度の時空間分布を推定して観測と比較することが可能である。国立環境研究所・海洋研究開発機構・筑波大学で開発されたSim-CYCLEは生理生態および生物地球化学的過程に重点を置いたモデルであり、大気との CO_2 交換だけでなく生態系内での炭素動態を詳細にシミュレートすることを目的としている。国立環境研究所で開発されたTsuBiMoは数理生態的な手法で地点レベルの観測データに基づいてパラメータを調節し、広域的な炭素収支の評価につなげている。それぞれのモデルを用いて、日本周辺を中心とする東アジア地域について2000～2005年（TsuBiMoは2002年まで）の陸域炭素収支をシミュレートした。一部のモデルはテーマIで実施されたフラックス観測サイトで検証が行われた。各モデルでは使用した入力データや空間分解能は異なっているが、純一次生産力の空間パターン（図16は改良版Sim-CYCLEのもの）はよく類似していた。正味炭素収支は、生産力だけでなく土壌有機物分解の環境応答にも影響されるが、多くの期間・地域においてモデル間で共通する変動傾向が見られた。このように異なるモデルで共通した傾向が見られたことは、モデルアプローチが不確実性の幅を超えた信頼性のある結果を与えていることを示唆すると考えられる。一方、モデル間の差違点についてはモデル間の応答感度などに関するより詳細な検討を今後行う必要がある。

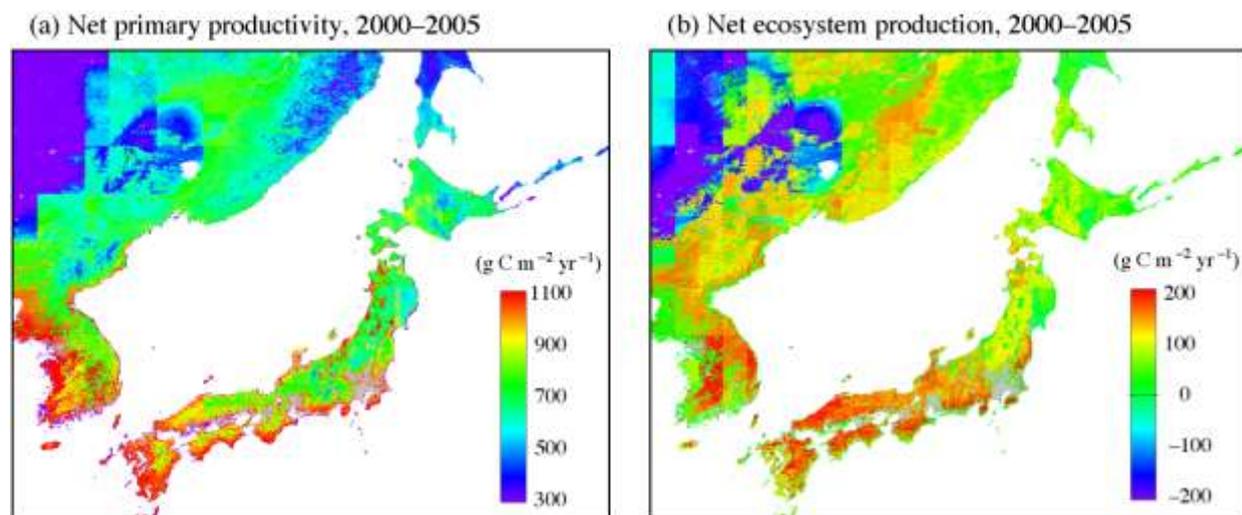


図16 生物地球化学的な陸域生態系モデルによる東アジア地域の (a) NPPおよび (b) GPP

(2) 陸域炭素循環モデルの国際比較と高度化

1) グローバルな炭素循環を推定する陸域生態系モデルの国際比較

陸域生態系モデルの情報を収集・整理を実施した。特に、入力データセットとして、どのような種類、時間・空間分解能が必要なかを明らかにし、入力データセットの整備について検討した。また、時間・空間分解能など適用要件の異なるモデルに対し、入力データセットを共通利用できるのか、さらに、入力データの種類が異なる中で、出力された結果を比較すること自体にどれほどの妥当性があるのかなどの検討を行った。陸域生態系のモデル間比較を行った例は少数であるが収集し、それに加えてモデル比較を行った結果、入力データ、特に日射データの精度が炭素収支の推定結果を大きく左右することを示唆され、高精度データ整備の重要性が示された。

2) 統合モデル国際比較のためのデータベース構築と国際モデル比較

「炭素-気候-人間システム統合モデル」を国際比較することにより、完成度が高いモデルを選出することを目的とし、統合モデルに関するデータを収集した。モデル利用（検証）、ないしモデル間での比較を行う際の基本情報として、モデルのロジック、入出力データの種類およびデータフォーマット、モデルから導き出された結果、関連文献などの情報を収集し整備した。収集したデータ

を用いて、炭素・気候・人間システムの3つのコンパートメントを含み、ローカルスケールからグローバルスケールを網羅する200以上のモデルを調査対象として、モデルの構成要素による分類と比較を実施した。

3) グローバルな炭素循環に関する最新の統合的な知見の集約

CO₂排出・吸収に関する情報を収集し、全球の炭素循環は下記の状況にあることが分かった。

- 2000～2005年は、1990年代と比較すると、排出は1～3%増加し、大気中CO₂濃度の増加率は1.5～3%になる。
- 大気中のCO₂濃度の増加の内8%は陸域生態系の吸収機能の低下による。
- 土地利用変化による排出は、1959～2005年は平均1.5 Gt C yr⁻¹であった。2000年以降はアジアと南米の熱帯林からの排出が大半を占め、アジア、南米共に0.6 Gt C yr⁻¹の排出となっている。

(3) 二酸化炭素収支モデルによる予測のための情報基盤整備

衛星重視型モデルである、陸域生物圏モデルBEAMSを用いて炭素収支の推定を試みた。BEAMSでは、植物が光合成を行うための光合成有効放射量(PAR)と、植生がどこにあるか(土地被覆図)、さらに、植物の生産性のポテンシャルを規定する重要なパラメータ

である植生季節変動の3つが入力情報としての衛星プロダクトとして特に重要となる。植生季節変動は、衛星データから得られる葉面積指数(LAI)と光合成有効放射吸収率 (fPAR)によって規定される。これら主要3パラメータのうちPARと土地被覆図について、高精度の新たなプロダクトを作成した(図17)。また、fPAR、LAIについては既存のデータセットの検証を行った。さらに、これらの

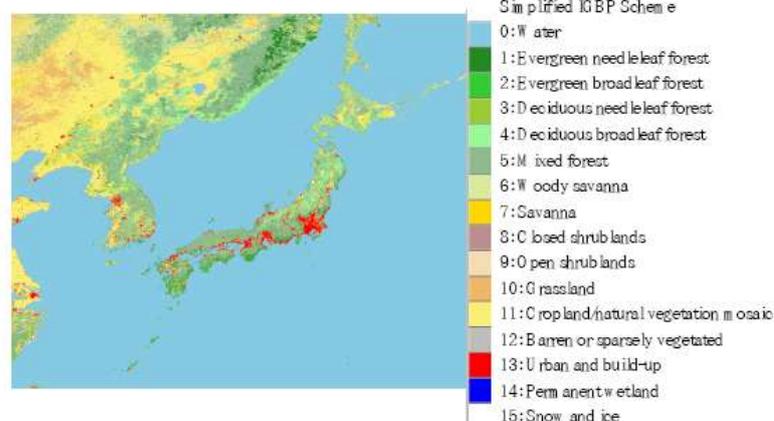


図17 新土地被覆図

のデータをモデルに入力し推定された炭素収支動態の季節変動について、テーマIで得られた地上検証と比較を行い、検証およびその要因について検討した。また、地上観測から衛星観測、モデル推定結果までの膨大でかつ、多種多様なデータを効率的に処理するための研究支援環境(GEO Grid)の開発も試みた。

テーマIで進めた陸域生態系のいくつかの観測サイトにおける詳細な生理・微気象フラックス観測を広域化し、生態プロセスの影響を評価して長期予測を可能にするために、東アジアの森林生態系の既存固定調査区データおよび伐採計測データを集約し、データベース構築を進め、公開を行った。調査区間の比較解析から、現存量、純一次生産量、樹木種多様性の地理的な変異パターンを抽出し、気象との相関関係について分析した。

(4) 21世紀の陸域炭素管理オプションの総合評価と炭素収支の統合予測モデルの開発

途上国を含むグローバルな陸域生態系では、土地利用変化、特に森林減少に伴う炭素排出が熱帯地域を中心にして継続している。今後のグローバルかつ中長期的な炭素収支の管理を検討する上では、土地利用変化の動態を把握し、土地利用変化に伴う炭素の排出を評価し、将来の予測と対策を検討することが重要となる。本課題では、土地利用変化活動に伴う炭素収支の変動を予測するため、陸域生態系モデルと土地利用モデルを組み合わせた、統合予測モデルの開発を行い、炭素の排出抑制ポテンシャルについて分析を行った。その結果、2030年までのグローバルな炭素排出抑制ポテンシャルは、平均すると約1.6 Gt C yr⁻¹の規模であることが分かった。なお、本課題で構築したモ

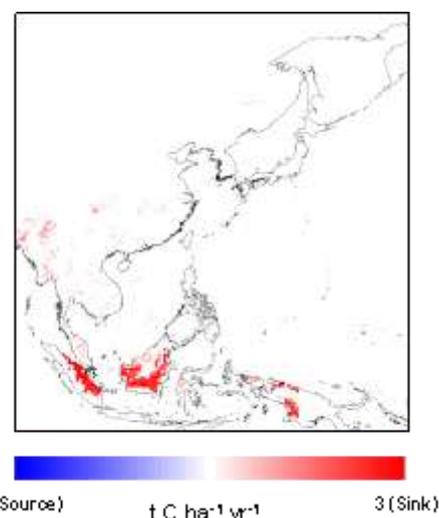


図18 土地利用変化による炭素動態の将来予測(2000～2030年の平均値)

デルでは、穀物の収量や将来的な経済発展シナリオに大きく影響を受けるため、その違いにより約0.3 Gt C yr⁻¹の吸収量が異なることがわかった。

図18には、2000～2030年の土地利用変化にともなう、地上部バイオマスの伐採、土壌中炭素等の大気中へのCO₂排出の予測を行った結果を示す。それによると熱帯地方からの排出が大きいことが分かった。

今回開発した統合予測モデルは、陸域生態系に対する人為的な影響を予測するもので、陸域生態系における炭素収支の変動要因や、将来予測を分析することが可能であり、今後の炭素管理に関する国際レジームの形成に際して、科学的なアセスメント手法の一つとしての役割を果たすことが期待される。

テーマIV プロジェクトの統合的推進と情報の共有

研究テーマIVの主要課題は、テーマIおよびIIで得られた観測データ、テーマIIIで得られた衛星観測およびモデルシミュレーションのデータを集積し、東アジア地域全体の炭素収支の定量化に向けた統合的な解析を行うことである。本プロジェクトの成果からポスト京都議定書などの温暖化政策に貢献を行うには、個別の研究成果を理解しやすく総括し明確な形で示すことが極めて重要である。最終年度に臨んで統合解析サブグループを結成し、各研究テーマの成果に基づく統合解析を実施した。そこでは「システムアプローチ」と呼ばれる、地点観測からのボトムアップ的推定と大気観測に基づくトップダウン的推定を併用し、さらに空間詳細な衛星観測データと陸域生態系モデルを最大限に活用する手法を開発した。フラックス観測や森林・土壌調査といった地点観測のデータは生態系モデルの高度化と検証に利用され、衛星観測からは信頼性の高い土地被覆などのモデル入力データが提供された。日本周辺を含む東アジア地域を対象にして、空間分解能1kmのモデルシステムを開発し、2000～2005年の炭素収支マッピングを実施した。また、テーマ間でのデータ共有を円滑に行うことを目的に、データベース構築を行った。

(1) システムアプローチによる炭素動態把握

1) 地上観測による炭素動態の解明

ロシア・中央シベリアから北海道にかけてのカラマツ林生態系を比較すると、年平均気温が高くなるにつれてNEPが正となる期間が長くなり、またNEPの最大値が高くなる結果が示された。また、落葉樹林と常緑樹林との違いを比較すると、落葉樹林には明瞭な季節変化がありNEP>0となる生育期間と、NEP<0となる非生育期間の区別がある一方で、常緑樹林のNEPの季節変化振幅は小さく、生育期間・非生育期間の区別は不明瞭であることがわかった。以上のようなアジアにおける各種生態系のNEPの季節変化パターンを亜寒帯から熱帯に至る広い緯度帯をカバーし多点でとりまとめた結果は、本研究課題による報告が最初である。

本研究課題および他の研究課題によってアジア各地で観測されたNEPの年間値を収集してまとめた結果、亜寒帯で年間1 t C ha⁻¹ yr⁻¹未滿、温帯から熱帯で最大5～6 t C ha⁻¹ yr⁻¹の炭素吸収が観測されていることが分かった。また、温帯の生態系で比較すると、生育期間の長い常緑林の方が落葉林に比べて年間吸収量が多いことがわかった。

2) 衛星リモートセンシングによるモデルへの入力データ作成

a. 光合成有効放射 (PAR) の高頻度・高分解能データ作成

2つの人工衛星に搭載されたセンサー (Terra/MODIS、Aqua/MODIS) の観測データを用いて、地上に到達する光合成有効放射 (PAR) を、これまで以上の高頻度 (毎日) ・高分解能 (500m) で定量的に推定することが可能となった。

b. 高精度土地被覆図の作成

既存の土地被覆図のうち、Global Land Cover2000、MODIS Land Cover (MOD12)、UMDの3プロダクトを統合する手法を新たに提案し、精度の高い新たな土地被覆図を作成し、陸域生態モデルに提供した。

3) 生態系モデルの高度化

観測データに基づいてモデルの構造や炭素フロー推定式を高度化することにより、炭素収支の推定精度が向上した。例えば、岐阜高山サイトでは、従来の日ステップの光合成モデルを使用した時に比べて、新たに導入した30分ステップの2層モデルを使用した時の方が、観測されたフラックス観測を精度良く再現することが可能となった (テーマIII (1) 詳細参照)。また、温帯落葉広葉樹林における個葉光合成の観測データに基づくパラメータの改良により、季節変化の特徴が上手く表現できるようになった。土壌モデルの高度化により、アジア地域に特徴的な火山灰土壌などへの適用が可能になり、観測された土壌呼吸の季節変化も妥当に推定された。

4) 相互検証

a. 生態学的炭素収支観測との検証

生態系モデルによるNPP推計値と生態調査による計測結果との関係調べたところ、0.5度（約50km分解能）のモデルによる結果では、非常にばらついた傾向を示した。しかし、1km分解能の生態系モデルではNPP推計値と生態調査による観測値との相関が高いことが示された。さらに一致度を高めるためには標高や降雨量などの環境条件、攪乱の影響を考慮する必要性が示唆された。

b. トップダウンアプローチと生態系モデルのクロスチェック

インバース解析における年間を通じたフラックスの年々変動および季節変動を考慮に入れた比較を行うために、Sim-CYCLE モデルから求められた同じ領域における CO₂ フラックスとの比較を行った。Land 27 においては夏から秋にかけての CO₂ 吸収の変動がその相対的な違いだけでなく、各月の絶対量も極めて良く一致している。しかし 1~2 月には、両者のフラックスに不一致が見られ、インバース解析の結果が「吸収」を示唆している。冬季のシベリア域は大気鉛直混合が抑制されることによって時として広い空間を代表しない CO₂ 濃度が観測される可能性が示唆された。

5) 生態系モデルによる東アジアの炭素動態把握

本研究によって市町村スケールあるいは小河流域スケールまで解像できるモデルが開発され、そのモデルをアジア地域に適用し、1kmメッシュという高空間分解能で炭素収支のマッピングを行った。その結果、東アジア陸域の平均的な光合成（純一次生産）は1.91 Gt C yr⁻¹であり、正味で0.057 Gt C yr⁻¹の吸収が生じていることが示唆された。また、2000~2005年の6年間の解析期間において、炭素収支には顕著な経年変動が見られた。NCEP/NCAR再解析データを用いて2000~2005年の東アジア地域における炭素動態のシミュレーションを実施したところ、東アジア陸域の平均的な光合成（純一次生産）は年間1.91 Gt Cであり、正味で年間0.057 Gt Cの吸収が生じていることが示唆された。解析期間6年間で炭素収支には顕著な経年変動が見られた。例えば、日本周辺で平年より高温で日照が多かった2002年には多くの地域で平均値以上の炭素吸収が生じており、これは実測による傾向と適合していた（図19）。

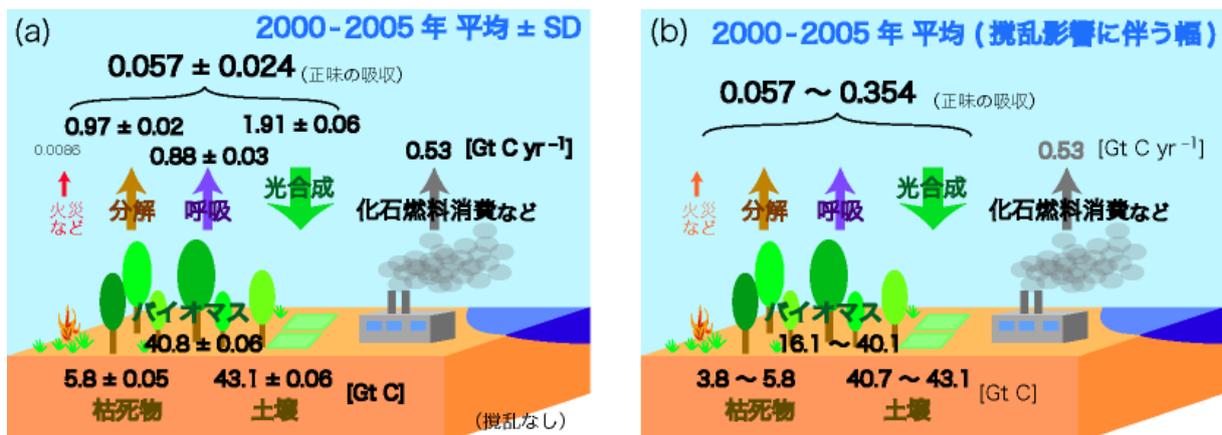


図19 陸域生態系モデルによって推定された2000~2005年の東アジア陸域の炭素収支。(a)攪乱の影響を含まない平均値。(b)攪乱の影響を最大限に考慮した場合に生じる不確定性の幅を加えたもの。

(2) システムアプローチによる統合研究推進のために構築されたデータベース

S1プロジェクトデータベース (S1-DB) の目的は、データ共有化を図ること、及びテーマ間あるいは観測サイト間でなされる比較・統合的解析の促進である。S1-DBは、欧米の炭素収支関連DBとの互換性を考慮したデータフォーマットの作成とそれに準じたデータセットの整備をすすめてきた。またS1の研究が進むに連れ、土壌研究グループ、生態研究グループ、モデル研究グループ、衛星観測グループからのデータ提供を受けてきた。アジア域の陸域炭素循環に関する多種多様なデータがある一定のフォーマットで収集されているのがS1-DBの特徴である。

4. 考察

テーマI ボトムアップ（微気象・生態学的）アプローチによる陸域生態系の炭素収支解析

7研究機関、13大学の陸域炭素動態の代表的研究機関参画のもと、森林生態系、草地・農耕地生態系におけるCO₂等タワーフラックス・気象条件調査、植物生態学・土壌学的調査のデータ、土壌圏での炭素収支、有機物動態の調査結果を集積し、アジアの陸域生態系での炭素収支の定量的評価

および時空間変動の機構の解析を進めてきた。さらに観測データの品質管理とデータ共有を図り、また観測サイト間の炭素収支比較、微気象学的手法と生態学的手法による結果のクロスチェックなどの地上観測データの総合的解析を進めてきた。

また、総合的な観測を行っている複数の地上観測サイトにおいて、陸域生態系モデルの確認や、衛星リモートセンシングデータ解析手法の検証に地上観測のデータが利用された。具体的には、リモートセンシングによる冷温帯落葉林の春の展葉時期、葉面積指数(LAI)、光合成有効放射(APR)の解析と複数地上サイトの観測結果との比較、熱帯林での少雨のLAIへの広域影響とNEP観測結果の比較解析などの事例があり、さらにはこれらの結果と陸域生態系モデルとの比較・検証が行われた。こうした統合的研究は、単にモデルやデータ解析手法の高度化に寄与しただけでなく、地上観測データの持つ不確実性や解決すべき問題を浮き彫りにするというフィードバックをもたらした。

今後に残された課題として、以下のものがあげられる。

- ・フラックス観測により各サイトのGPP、RE、NEPを算出する場合、夜間の観測結果からの生態系呼吸推定において、誤差を生じていると考えられる場合がある(特に熱帯地域において誤差が大きい)。この誤差は年間NEPを求める際に大きな課題である。
- ・生態学的手法によって地上部・地下部の成長量推定がかなり正確にできる。しかし、地下部細根の生産・枯死速度についての知見は乏しくNEP推定の誤差を生じる最大の要素である。
- ・一般に森林では、林床の有機物層が形成されている。そのため、林床有機物層、土壌中の植物体地下部、土壌有機物に分けて炭素蓄積量の変化をそれぞれ推定するべきであり、土壌呼吸測定研究との整合性をとる必要がある。
- ・生態系の現存量変化は長期モニタリングによって初めて、その傾向が解明される。長期データの集積によって、平均的な生態系の炭素蓄積/放出の傾向が明らかになるので、各種生態系での長期観測拠点の確立と拡充は今後の重要な課題の一つである。

テーマⅡ トップダウン(大気観測)アプローチによるメソスケールの陸域炭素収支解析

全く新しい観測システムの開発から、装置の設置、そして高精度の観測データの取得までを行い、西シベリアにおける詳細なCO₂濃度の変動を捉えることに成功した。観測されたCO₂濃度の1時間値から平均的な日変動を導出すると、冬季でも非常に小さいが日変動の存在が確認された。これは寒さの厳しいシベリアの冬季においても、大気中のCO₂濃度に影響を及ぼすほどの生態系の呼吸が存在していることを示唆している。CO₂濃度の1時間値は局所的な大気の安定度に大きく影響されていたが、日中値は数100kmスケールでの代表性を持っていることが確かめられた。この事実はモデルを使って予想した観測サイトの配置が妥当であったことを意味し、今後の似たような観測の展開にとって非常に有用な情報となった。また、高密度の観測値はフォワードモデルによるCO₂濃度のシミュレーションを評価することに非常に有用で、大規模な輸送や陸上生態系モデルの妥当性を議論できた。また総観規模の時間スケールの変動が定点観測結果に大きく影響していることも明らかになった。

インバースモデルによってCO₂フラックスの季節変動を推定することに成功し、その変動の形や月毎の値はほぼ妥当であることが確認されたが、1年を通したCO₂の総収支は陸上生態系モデルから推定された量と大きく離れていた。特に冬季のフラックスに不一致が見られ、インバース解析の結果が「吸収」を示唆していた。寒さの厳しいシベリア北部においてこの時期に有意なCO₂吸収があるとは考えにくいので、この不一致はインバース解析の結果に不具合があるものと考えられる。冬季のシベリア域は大気の鉛直混合が抑制されることによって時として広い空間を代表しないCO₂濃度が観測される可能性がある。このような事象が起こった際に大気輸送モデルが極めて薄い境界層の状態を正しく表現できていない場合には、現実とは違うフラックスを推定する可能性がある。冬季のフラックス推定をより正確にしていくことが今後のインバースモデルの改良に当たって1つの重要な課題であると言える。

テーマⅢ アジア陸域生態系の炭素収支変動予測と21世紀の炭素管理手法の検討

東アジア陸域生態系に関する3種類のモデルによるシミュレーションが実施された。これらのモデルは立脚点が気象学、生物地球化学、数理生態学と異なっているが、炭素収支を光合成と生態系呼吸の差として求める手法は共通している。空間的パターンとして緯度方向の温度・水分勾配にそって南から北へ生産力が低下し、内陸の乾燥域に低い生産力が見られる点は共通していた。時間的な経年変動は、概してモデル間の共通点が見られたが、例年より高温であった2002年の応答などはモデル間の差も見られた。地域-全球スケールでは観測データに基づくモデル検証は非常に困難であるが、モデル間の相互比較を行うことで共通点と差違点を明確にし、今後のモデル高度化で重点化すべき部分を特定することができた。

グローバルな炭素循環に関する最新の統合的な知見の集約により、大気中のCO₂濃度の増加の17%の内、経済活動における炭素強度の悪化が9%、自然の吸収源の減少が8%に及び、その他の83%が世界経済の発展によるものであることが整理された。また、土地利用変化にともなうCO₂排出は、1990年では南米の熱帯林からの排出が大半を占めていたが、2000年には三分の二に減少し、ほぼ横ばい状態の東南アジア地域からの排出量と同程度となった。このトレンドが続く限り、今後はアジア地域の排出抑制が重要になると考えられる。

東アジア地域において、衛星観測に基づくBEAMSを用いた5年間平均の年間積算NPP値を空間分布として推定した。東アジア地域のNPP平均値は595.6 g C m⁻² yr⁻¹であった。そのNPP空間分布パターンを見ると、北から南に向かって高くなり、平野部や高山地帯は森林・草地地帯と比較して低いNPP値を示した。これらの傾向は、都市化や森林限界等の影響によって植生密度が影響を受けていると考えられる。次に、地上観測と衛星観測、モデルを組み合わせ2003年冷夏の解析を行った。地上観測グループの結果では、複数の地上観測サイトで、2003年7月に日射量とGPPの減少傾向が観測された。この結果を衛星観測データやBEAMSのモデル推定結果と比較するため、例年7月と2003年7月との偏差を空間分布で推定した。まず、衛星観測データMODISから得られた日射量データでは、日本の東北地方から九州や韓国南部にかかる梅雨前線に沿った日射量の減少分布を示した。また、日射量に対応してBEAMSから推定されたGPPも減少分布のパターンが確認できた。つまり、地上観測結果を裏付けるような衛星観測・モデル結果が得られたことから、2003年冷夏時には梅雨前線の停滞によって日射量が減少し、植生活動が例年と比べて著しく抑制されたことで、結果として植生の炭素吸収量が減少したことがわかった。

詳細な炭素フラックス観測のデータを広域化、また予測化するためには、観測サイトの代表性の検討や植生動態をもたらす個体群過程のモデル化が必要である。そのために、既存の長期観測プロットデータを集積・整理できたことは意義深い。我々が始めて予測した、温暖化に伴う森林植生帯境界移動の遅れは、今後、改訂されたDGVMによって反映・確認されていくことになる。

要因分析を受けて開発した土地利用モデルにより、人為的な土地利用変化とともに生態系の変化により数Gt C yr⁻¹の排出が今後も増加し、特に熱帯地域からCO₂排出が顕著であることが分かった。これにより、熱帯地域のバイオマス推定や土壌中炭素蓄積量の現状把握やフラックス把握が、今後の温暖化に影響予測に大きく貢献すると考えられる。本研究で用いたモデルでは、全球のデータを用いているが、各国の統計データから得られた農地の面積とMODIS全球データセットで得られた農地との間には、国によっては大きな隔たりが見られた。今後は、統計データと人工衛星等を用いた土地被覆データとの整合性について検討する必要がある。

テーマⅣ プロジェクトの統合的推進と情報の共有

5年間のプロジェクトで集積したデータをデータベース化し、テーマを越えた研究者間で情報を共有するシステムを用い、システムアプローチによる東アジア地域の炭素動態の把握を行った。これによって、地点観測の情報と、そのサイト間比較により得られた知見を陸域生態系モデルに反映し、モデル自体の高精度化が実現された。加えて、リモートセンシンググループによって新たに作成された土地被覆、PARの高精度な情報を入力することで、過去に類例を見ない時空間精度での炭素動態の把握が可能となった。その結果、東アジア地域の生態系によるCO₂の吸収は、化石燃料起源のCO₂排出の11%に上ることが分かった。しかし、その推定精度は必ずしも十分では無く、伐採や森林火災等の攪乱情報の有無は、結果に大きく影響を与えることが、プロジェクト内の検証で判明した。

今後は、伐採や火災等の攪乱に関する過去の発生状況の情報や、その発生頻度の予測が重要となってくると同時に、攪乱を受けた生態系の応答に関する知見を集積することが重要と考えられる。

また、5年間にわたる戦略研究を統合的に締めくくるために、最終年度に立ち上げた統合解析サブグループが中心となって企画した、ワークショップ「システムアプローチで見えてきた東アジア陸域生態系の炭素動態」を2006年10月に早稲田大学・国際会議場で開催した。このワークショップには100名を超える参加者があり、大きな成果を挙げることが出来た。この統合解析が成功した陰には、本プロジェクト発足以来、周到に準備を進め、多大の労力を費やして構築してきた研究成果データベースシステムの寄与も大きな役割を果たした。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

モンスーン気候が支配し、熱帯から亜寒帯域に広がる多様な気候条件を含む東アジア地域を対象

として、北方針葉樹林から熱帯多雨林に至るまでの森林生態系、さらには青海・チベット高原や水田生態系などの特徴的な陸域生態系の炭素動態の実態と特性を微気象学的手法と生態学的手法、さらには衛星リモートセンシングや精密モデル開発を駆使して、統合的にかなりの程度明らかにすることが出来た。ここで得られた知見や開発された手法は、今後さらに世界各地で同様の研究が展開される際の基準として、大いに活用されるものと思われる。

(2) 地球環境政策への貢献

研究対象とした東アジア地域は、世界でも最も人口密度が高く、人間活動が活発な地域である。この地域からの人為起源のCO₂放出が今後加速されることが予測される中で、今回得られた科学的知見はこの地域の森林生態系を中心とした陸域生態系のCO₂のシンク機能に基づいた管理・保全策を立案する上での基礎資料として活用されるであろう。

6. 研究者略歴

課題代表者：及川 武久

1942年生まれ、東京大学大学院修了、理学博士、現在、筑波大学生命環境科学研究科教授

主要課題研究者

テーマ I 山本 晋

1945年生まれ、東北大学大学院理学研究科博士課程中退、理学博士、
現在岡山大学大学院環境学研究科教授

サブテーマ (1)

1) 松浦 陽次郎

1960年生まれ、京都大学大学院農学研究科博士課程退学、農学博士、
現在独立行政法人 森林総合研究所 土壌資源評価研究室 主任研究官

2) 大谷 義一

1954年生まれ、東京教育大学農学部林学科卒、
現在独立行政法人森林総合研究所気象環境研究領域長

3) 谷 誠

1950年生まれ、京都大学大学院農学研究科博士課程修了、農学博士、
現在京都大学大学院農学研究科教授

サブテーマ (2)

1) 唐 艶鴻

1959年生まれ、中国湖南師範大学大学生物学部卒業、筑波大学理学博士、
現在独立行政法人国立環境研究所主任研究員

2) 唐 艶鴻 (サブサブテーマ 1) に記載)

3) 唐 艶鴻 (サブサブテーマ 1) に記載)

4) 及川 武久 (課題代表者に記載)

5) 宮田 明

1959年生まれ、東京大学大学院理学系研究科修士課程修了、理学博士、
現在独立行政法人農業環境技術研究所地球環境部フラックス変動評価チーム長

サブテーマ (3)

1) 小泉 博

1948年生まれ、早稲田大学大学院理工学研究科博士課程修了、理学博士、
現在岐阜大学流域圏科学研究センター教授

2) 鞠子 茂

1957年生まれ、玉川大学大学院農学研究科資源生物学専攻、農学博士、
現在筑波大学生物科学系助教授

3) 横沢 正幸

1959年生まれ、東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了、学術博士、
現在農業環境技術研究所地球環境部主任研究官

サブテーマ (4)

1) 宮田 明 (サブテーマ (2) に記載)

2) 山本 晋 (テーマリーダーに記載)

テーマⅡ 町田 敏暢

1965年生まれ、東北大学大学院理学研究科修了、博士（理学）、
現在国立環境研究所地球環境研究センター室長

サブテーマ（1）

町田 敏暢（テーマリーダーに記載）

サブテーマ（2）

マクシュトフ シャミル

1957年生まれ、モスクワ工科大学卒業、PhD、
現在国立環境研究所地球環境研究センター主席研究員

テーマⅢ 甲山 隆司

1954年生まれ、東京都立大学理学部卒業、理学博士、京都大学・生態学研究センター・助
教授、現在北海道大学・大学院地球環境科学研究所・教授

サブテーマ（1）

及川 武久（課題代表者に記載）

サブテーマ（2）

ソバカル ダカール

1970年生まれ、東京大学工学部修了、博士（工学）

現在国立環境研究所・地球環境研究センター・NIESフェロー

サブテーマ（3）

甲山 隆司（テーマリーダーに記載）

サブテーマ（4）

山形 与志樹

1961年生まれ、東京大学教養学部卒業、博士（学術）、
現在、国立環境研究所・地球環境研究センター・主席研究員

サブテーマⅣ 及川 武久（課題代表に記載）

7. 成果発表状況

（1）査読付き論文

テーマⅠ

- 1) Matsuura, Y., Kajimoto T, Osawa A, Abaimov AP: PHYTON 45, 51-54 (2005)
“Carbon storage in larch ecosystems in continuous permafrost region of Siberia.”
- 2) Saigusa, N., S. Yamamoto, S. Murayama, and H. Kondo: Agricultural and Forest Meteorology, 134, 4-16 (2005)
“Inter-annual variability of carbon budget components in an AsiaFlux forest site estimated by long-term flux measurements”
- 3) Ohtani, Y., N. Saigusa, S. Yamamoto, Y. Mizoguchi, T. Watanabe, Y. Yasuda, S. Murayama: Phytion 45, 73-80. (2005)
“Characteristics of CO₂ fluxes in cool-temperate coniferous and deciduous broadleaf forests in Japan.”
- 4) Kajimoto, T, Matsuura Y, Osawa A, Abaimov AP, Zyryanova OA, Isaev AP, Yefremov DP, Mori S, Koike T: Forest Ecology and Management 222, 314-325 (2006)
“Size-mass allometry and biomass allocation of two larch species growing on the continuous permafrost region of Siberia.”
- 5) Kosugi, Y., S. Takanashi, H. Tanaka, S. Ohkubo, M. Tani, M. Yano, T. Katayama: J. Hydrol., 337, 269-283 (2007)
“Evapotranspiration over a Japanese cypress forest. I. Eddy covariance fluxes and surface conductance characteristics for three years.”
- 6) Zhang, Y., and Y. Tang: J. Geophys. Res., 110, G01007 10.1029/2005JG000021 (2005)
“Inclusion of photoinhibition in simulation of carbon dynamics of an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau”
- 7) Shimoda, S., W. Mo and T. Oikawa: SOLA, 1, 169-172 (2005)
“The effect of characteristics of Asian Monsoon climate on interannual CO₂ exchange in a humid temperate C3/C4 co-occurring grassland”
- 8) Miyata, A., T. Iwata, H. Nagai, T. Yamada, H. Yoshikoshi, M. Mano, K. Ono, G. H. Han, Y. Harazono, E. Ohtaki, Md. A. Baten, S. Inohara, T. Takimoto, M. Saito: Phytion, 45(4), 89-97 (2005)
“Seasonal variation of carbon dioxide and methane fluxes at single cropping paddy fields in central

and western Japan”

- 9) Kato, T., Y.Tang, S. Gu, M. Hirota, M. Du, Y. Li, and X. Zhao: *Global Change Biology*, 12, 7, 1285-1298 (2006)
“Temperature and biomass influences on interannual changes in CO₂ exchange in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau”
- 10) Zhang, Y., C. Liu, Y. Lei, Y.Tang, Q. Yu, and Y. Shen: *International Journal of Remote Sensing*, 27, 1, 129-152 (2006)
“An integrated algorithm for estimating regional latent heat flux and daily evapotranspiration”
- 11) Kondo M., Muraoka H., Uchida M., Yazaki H. and Koizumi H. *Agricultural and Forest Meteorology* 134:110-121. (2005) “Refixation of respired CO₂ by understory vegetation in a cool-temperate deciduous forest in Japan”
- 12) Muraoka H. and Koizumi H. (2005) *Agricultural and Forest Meteorology* 134: 39-59
“Photosynthetic and structural characteristics of canopy and shrub trees in a cool-temperate deciduous broadleaved forest”
- 13) Ohtsuka T., Akiyama T. and Koizumi H.: *Agricultural and Forest Meteorology*, 134, 27-38. (2005)
“Biometric based estimates of net primary production in a cool-temperate deciduous forest stand beneath a flux tower.”
- 14) Lee M.-S., Mo W., and Koizumi H.: *Ecological Research*, 21, 828-839. (2006)
“Soil respiration of forest ecosystems in Japan and global implications.”
- 15) Shirato Y and Yokozawa M: *Soil Biology and Biochemistry*. 38, 812-816 (2006)
“Acid hydrolysis to partition plant material into decomposable and resistant fraction for use in the Rothamsted carbon model”
- 16) Yamamoto, S., N. Saigusa, M. Gamo, Y. Fujinuma, G. Inoue and T. Hirano, *Journal of Geographical Sciences* vol.15, pp.142-148 (2005)
“Findings through AsiaFlux network and view toward the future”
- 17) Saigusa, N., S. Yamamoto, T. Ohtsuka, S. Murayama, H. Kondo, and H. Koizumi: *Phyton*, Vol.45, No.4, pp.81-88 (2005)
“Inter-annual variability of carbon budget components in a cool-temperate deciduous forest in Japan (Takayama, AsiaFlux)”

テーマ II

- 1) Gurney K. R., A. Scott Denning, P. Rayner, B. Pak, D. Baker, P. Bousquet, L. Bruhwiler, Y.-H. Chen, P. Ciais, I.Y. Fung, M. Heimann, K. Higuchi, J. John, T. Maki, S. Maksyutov, P. Peylin, M. Prather, and S. Taguchi : *Transcom 3 inversion intercomparison*, 18, GB1010, doi:10.1029/2003GB002111 (2004)
“Model mean results for the estimation of seasonal carbon sources and sinks, *Global Biogeochem. Cycles*”
- 2) Peregon A., S. Maksyutov, N. Kosykh, N. Mironycheva-Tokareva, M. Tamura and G. Inoue : *Phyton*, Special issue: "APGC 2004", v. 45, Fasc. 4, 543-550 (2005).
“Application of the Multi-Scale Remote Sensing and GIS to Mapping Net Primary Production in West Siberian Wetlands”
- 3) Patra, P. K., S. Maksyutov, and T. Nakazawa : *Tellus*, 57B, 357-365 (2005).
“Analysis of atmospheric CO₂ growth rates at Mauna Loa using inverse model derived CO₂ fluxes”
- 4) Patra, P.K., M. Ishizawa, S. Maksyutov, T. Nakazawa, and G. Inoue : *Global Biogeochem. Cycles*, v. 19, GB3005, doi:10.1029/2004GB002258 (2005).
“Role of biomass burning and climate anomalies on land-atmosphere carbon fluxes based on inverse modelling of atmospheric CO₂”
- 5) Ishizawa M., D. Chan, K. Higuchi, S. Maksyutov, C.-W. Yuen, J. Chen and D. Worthy : *Tellus*, 58B, 447-462, doi:10.1111/j.1600-0889.2006.00219. (2006).
“Rectifier effect in an atmospheric model with daily biospheric fluxes: impact on inversion calculation”
- 6) Baker, D., Law, R. M., Gurney, K. R., Denning, A. S., Rayner, P.J., Pak, B. C., Bousquet, P., Bruhwiler, L., Chen, Y.-H., Ciais, P., Fung, I. Y., Heimann, M., John, J., Maki, T., Maksyutov, S., Peylin, P., Prather, M., and Taguchi, S. : *Global Biogeochem. Cycles* 18, GB1010, doi:10.1029/2004GB00243 (2006).
“Model mean results for the estimation of seasonal carbon sources and sinks, *Transcom 3 inversion intercomparison*”

テーマ III

- 1) Mabuchi, K., Y. Sato and H. Kida : *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 80, 621-644

(2002).

“Verification of the Climatic Features of a Regional Climate Model with BAIM”

- 2) Ito, A., N. Saigusa, S. Murayama, and S. Yamamoto: Analysis of seasonal and interannual change, *Agricultural and Forest Meteorology*, 134, 122-134 (2005).
“Modeling of gross and net carbon dioxide exchange over a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in Japan”
- 3) Alexandrov GA, and Y. Yamagata : *Ecological Modelling*, 200, 189-192 (2007).
“A peaked function for modeling temperature dependence of plant productivity”
- 4) Canadell, J. G., M. U. E. Kirschbaum, W. A. Kurz, B. Schlamadinger, and Y. Yamagata : *Environmental Science and Policy*, in press (2007).
“Factoring out natural, indirect and direct human effects on terrestrial greenhouse gas sources and sinks”
- 5) Canadell, J. G., D. Pataki, R. M. Gifford, R. Houghton, Y. Q. Luo, M. R. Raupach, P. Smith, and W. Steffen, Saturation of the terrestrial carbon sink, Canadell JG, Pataki D, Pitelka L (eds) : *The IGBP Series*, Springer-Verlag, Berlin, 59-78 (2007).
“Terrestrial Ecosystems in a Changing World”
- 6) Iwao, K., K. Nishida, T. Kinoshita, and Y. Yamagata : *Geophys. Res. Lett.*, 33, L23404, doi:10.1029/2006GL027768. (2006).
“Validating land cover maps with Degree Confluence Project information”
- 7) Kohyama, T. : *Ecol. Res.*, 21, 346-355 (2006).
“The effect of patch demography on the community structure of forest trees”
- 8) Yamagata, Y., M. Cernovsky, C. Hepburn, M. Obersteiner : *Climate Policy*, 4 issue4, 347-357 (2005).
“Clashing Strategic Cultures and Climate Policy”
- 9) Benítez, P., I. McCallum, M. Obersteiner, and Y. Yamagata : *Geographical distribution, country risk and policy implications*, *Ecological Economics*, 60, 572-583 (2007).
“Global potential for carbon sequestration”

テ ー マ IV

- 1) N. Saigusa, S. Yamamoto, T. Ohtsuka, S. Murayama, H. Kondo, and H. Koizumi: *Phyton*, Vol.45, No.4, pp.81-88 (2005)
“Inter-annual variability of carbon budget components in a cool-temperate deciduous forest in Japan (Takayama, AsiaFlux)”
- 2) Ito, A., Inatomi, M., Mo, W., Lee, M., Koizumi, H., Saigusa, N., Murayama, S. and Yamamoto, S.: *Tellus* (2007)
“ Examination of model-estimated ecosystem respiration by use of flux measurement data from a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in central Japan”