

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 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		
課題代表者名	山本晋（岡山大学大学院環境学研究所）		
研究期間	平成14-18年度	合計予算額	940,707千円（うち18年度 147,032千円） *上記の予算額には間接経費217,131千円を含む
研究体制			
<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、信州大学、京都大学、神戸大学、岐阜大学、茨城大学、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) 陸域生態系の炭素収支のデータベース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>			
研究概要			
<p>1. 序（研究背景等）</p> <p>京都議定書が発効する中で、第一約束期間に我が国の二酸化炭素排出削減1990年比6%を実現するための具体的施策を講ずると共に、第二約束期間を見据えた地球温暖化防止対策の検討に資するため、科学的陸域炭素管理計画の検討が急務となっており、二酸化炭素の動態に対する陸域生態系の機能、とりわけ森林生態系が二酸化炭素の吸収側として機能しているのか、またその程度はどのくらいかということについての科学的知見が陸域生態系の炭素管理指針の策定の面から強く求められている。また、平成17年の第3回地球観測サミットで観測実施計画が決められた。この実施計画の中で、地球温暖化と炭素循環の観測・監視が重要な項目として位置付けられ、陸域生態系での二酸化炭素、水蒸気、エネルギーのフラックス、炭素収支、森林・土壌のバイオマス（有機物）などの長期モニタリングについての具体的内容が検討されている。</p> <p>本研究プロジェクトでは、二酸化炭素等の陸域における吸収/放出量推定値の精度を向上させるために科学的知見の集積を図る。さらに、気候変動と炭素収支の時空間変動を感度良く検出することをめざしたアジア域のモニタリング体制を整備し、国際協力によるデータ蓄積と利用・提供ネットワークの確立に貢献する。</p> <p>本研究テーマIではこのような背景の下、国際観測計画との連携を視野に入れて、炭素循環の観測・解析手法の確立と東南アジアから北東アジアにかけて分布する様々な陸域生態系の炭素収支の特徴と差異を把握し、陸域炭素収支モデル構築に資するための研究を進めている。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>本研究では、陸域生態系-大気間の二酸化炭素等の吸収/放出量を観測によって精度良く把握し、そのメカニズムの解明を通じた陸域生態系炭素収支のモデル化とモデル推定精度の向上に努める。ここでは欧州や米国には見られない、アジア特有のモンスーン気候下の多種多様な生態系を対象にしている。例えば北東ユーラシアの永久凍土上に成立する亜寒帯落葉針葉樹林、夏季・冬季ともにアジアモンスーンの影響を強く受ける温帯林、赤道付近の降水量変動の影響を受けて時に大規模な乾燥や火災を経験する熱帯林、そしてチベット高原に広がる高山草原、アジア独特の耕作地である水田を含む各種農耕地などである。このようなアジア地域の炭素収支の解明と時空間変動データの集積とをめざし、もって世界的な炭素動態研究、国際協力によるデータ利用と情報交換のネットワークの構築に貢献する。具体的には本研究ではシベリアから東南アジアに至るアジアの代表的な植物・土壌生態系を亜寒帯、温帯、熱帯別に選定し、微気象学的方法による森林・草地生態系のフラックス、チャンパー法による土壌呼吸・植物呼吸、光合成など主要な炭素循環プロセスを統一的方法で、原則通年観測する。図1に観測サイトマップを示す。また、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あわせて行う。</p>			



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。

本研究テーマIでは、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、上記の研究体制（サブテーマ構成）のもとで研究を推進している。サブテーマ1、2では森林生態系、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の集積と解析、サブテーマ3ではサブテーマ1、2と連携しつつ、土壌圏での炭素収支、有機物動態の調査と解析結果を集積し、土壌圏での炭素収支の定量的評価および時空間変動の機構解明を進めてきた。サブテーマ4において、観測データの品質管理とデータ共有を図り、また地上観測データの総合的解析を進める。さらに、研究テーマIの個別成果はもとより、本プロジェクトの他の研究テーマII、IIIとの連携、データの共有により、リモートセンシング、陸域生態系モデル研究と結合して、アジア陸域生態系の炭素収支を統合的に解明することを目指した。データの集積する中で、これらの調査、観測結果のデータベース化に着手し、研究テーマIVへのデータ提供を行った。

3. 研究の方法および結果

(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

1) 亜寒帯森林生態系における炭素収支

本研究テーマでは地球温暖化の影響を強く受けると予想されている亜寒帯落葉針葉樹林（カラマツ林）を対象に、炭素収支を生態学的手法と微気象学フラックス観測に基づく手法によって測定する。特に、気象条件の変化が炭素収支へ及ぼす影響を定量的に明らかにするとともに、各生態系において炭素収支を特徴づけるパラメータを求めることにより、気象変動に対する陸域炭素収支の感受度を求める。さらに、タワーフラックス観測による炭素の生態系純交換量(NEE)と、生態系炭素循環の構成要素の測定（生態学的手法）から得られる生態系炭素蓄積速度(NEP)のクロスチェックを行う。

[研究の方法]

a. 苫小牧、老山サイト、トゥラにおける二酸化炭素フラックス観測

北海道苫小牧のカラマツ林（苫小牧サイト）は、平坦な地形（傾斜1~2°）、一様なキャノピー（樹齢約45年のカラマツ）を持つ特徴がある。一方中国東北部のカラマツ林（老山サイト）は北から南へ下る斜面状地形の上に位置し、樹齢約40年のカラマツにシラカバなどの広葉樹が混入した生態系である。これらのサイトにおいて、微気象観測および樹冠上における二酸化炭素等のフラックス観測を継続し、生態系純生産量、光合成総生産量、生態系呼吸量などの季節変化と年々変化を求めた。

さらに、中央シベリア・トゥラのカラマツ成熟林（約100年生）にタワーを設営し、CO₂フラックス及びその解析に必要な微気象要素を2004年と2005年の成長期間（6~9月初旬）に観測した。

b. 生態学的手法による炭素蓄積量及び炭素収支の推定方法

老山では破壊調査プロットを設営し、カラマツと広葉樹について毎木調査を行い、胸高直径、樹

高、生枝下高を測定した。プロット内のカラマツを5本選び伐倒し、幹、枝、根のそれぞれからサンプルを得た。カラマツおよび広葉樹の幹、枝、葉は、プロットごとの相対成長式を用いて、毎木データから林分当たりの現存量と生産量を推定した。根の現存量、生産量は、サンプル木の地上部・地下部（根）への配分比(T/R)をプロット内の全個体に適用して求めた。

中央シベリア・トゥラでは4林分の測定と、林齢が異なる幾つかの林分（4～220年生林）を対象に、毎木、伐倒調査やリターフォールの測定等、現存量や純生産量(NPP)に関する調査を行った。これらのデータに基づき、現存量に蓄積した炭素量の推定、山火事更新後の林分発達に伴う炭素蓄積量やそのT/R比、NPPの変化について解析した。土壌呼吸はタワーから約500m離れた林分で、チャンパー法によって測定し、温度との関係から生育期間全体の土壌呼吸量を推定した。

[結果と考察]

a. フラックス観測の結果と考察

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。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)では平均的におよそ $320 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 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 $121-190 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ の幅をもつ結果が得られた。老山と苫小牧サイトの比較により、両サイトにおける炭素収支について、以下の特徴が明らかになった。(1) 両サイトにおける初夏(6月)の二酸化炭素吸収量は $168-183 \text{ g C m}^{-2} \text{ month}^{-1}$ とほぼ同程度であったが、落葉直前(10月)では苫小牧 $12 \text{ g C m}^{-2} \text{ month}^{-1}$ の吸収、老山サイト $32 \text{ g C m}^{-2} \text{ month}^{-1}$ の放出がみられ、(2) 平坦地形の苫小牧に比べ、複雑地形の老山では、夜間 CO_2 フラックスについて大気安定度依存性が強く現れることが確認され、(3) 大陸性気候の影響を受ける中国老山では、北海道に比べて夏季に乾燥(大気飽差)の影響が強く現れた。

トゥラサイトにおける CO_2 フラックス月毎の変化をまとめると、6月初旬から季節の進行に伴って急激に吸収(マイナス側)フラックスの絶対値が大きく日変化の谷が深くなっていき、7月中旬～下旬の最盛期を過ぎると吸収が徐々に減って日変化の谷が浅くなり、9月には日中に谷底となる明瞭な日変化はなくなり、日中の多くの時間帯でも放出側になった。連続永久凍土地帯の典型的カラマツ生態系における最大の吸収強度とその時期は、6月から7月中旬に見られ最大 $4-6 \mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった。フラックスの日別積算値を算定するため、品質不良な観測値を経験モデルによって補間した。補間処理後の積算吸収量は両年共に、一成長期約3ヶ月あたり $0.4-0.6 \text{ t C ha}^{-1}$ であった。

北東アジアのカラマツ林3サイトで観測された生態系純生産量(NEP)の季節変化を比較解析した(後出の図12参照)。中央シベリア(トゥラ)、中国東北部(老山)、北海道苫小牧で観測されたNEPは、年平均気温が $-9 \text{ }^\circ\text{C}$ (トゥラ)から $+8 \text{ }^\circ\text{C}$ (苫小牧)と高くなるにつれて、森林の生育期間($\text{NEP} > 0$ の期間)が長くなり、またNEPの最大値が高くなることが明瞭に示された。

b. 生態学的手法による炭素蓄積量及び炭素収支の推定

老山サイトでは地上部及び地下部現存量に蓄積した炭素は、それぞれヘクタールあたり 94 t C となった。幹現存量は全体の74%を占め、枝、葉はそれぞれ8%、2%となった。一方、根は全体の15%を占め、地上部と地下部の現存量比率(T/R比)は5.5となった。老山サイトは壮齢林であるため、一次生産量は比較的大きな値を示した。幹の成長に配分された割合が約40%を占め、根、枝、葉の順にそれぞれ25, 20, 15%の配分になっていた。土壌呼吸速度推定のためトレンチによる根系切断は2001年秋実施した。根の呼吸速度が土壌呼吸速度に占める割合は38～45%と推定された。老山におけるカラマツ林土壌の有機炭素集積量は、林床の堆積腐植層に1ヘクタールあたり $3.6-7.5 \text{ t C}$ (平均5.2)、深さ1m迄の鉱質土壌に $43-73 \text{ t C}$ (平均63)が集積していた。

トゥラサイトにおける4林分の平均は、地上部と地下部に集積した炭素がそれぞれヘクタールあたり $6.5, 3.5 \text{ t C}$ であった。地上部/地下部比率は1.8であり、地下部への集積割合が高いことを示していた。林床の粗大有機物を含む堆積腐植層に集積した炭素はヘクタールあたり 15 t C 、土壌有機炭素は 97 t C であった。永久凍土地帯のカラマツ林生態系では、数十年から百数十年間隔で、大規模な森林火災によって一斉更新している。森林の現存量を火災後の経過年数に沿って推定した結果、地上部合計、根、葉ともに約30年年生までは顕著に増加し、その後地上部現存量はほぼ頭打ちになり、そのうちとくに葉量は急激に減少した(図2)。地上部/地下部比率は、30年生以下の若齢林では4～6と高い値を示したが、100年生以上では1～3に低下した。現存量の増分とリターフォール量の合計で推定したNPPは、約30年年生まで急激に増加し $4 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 前後のピークに達し、その後林齢とともに低下し、 CO_2 フラックスの観測サイトを含む100年生以上の成熟林になると、 $1-2 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ の範囲で推移した(図3)。以上の結果から、1) 30年生ぐらまでの比較的若い段階に葉量とともにNPPがピークに達し、その後は急激に生産力が低下すること、2) 光合成産物の配分も林齢とともに変化し、林分が成熟するにつれて地上部から根へ偏っていくことがわかった。これらのことは、永久凍土地帯に生育するカラマツは、山火事更新後の地温や養分等土壌条件が良い段階

では比較的高い生産力を維持できるが、その後凍土面の上昇に伴い土壌条件が悪化して生産力が低下し始めると、制限された土壌資源の獲得を補うために同化産物をおもに根の成長や根系の発達へ投資することを示唆している。

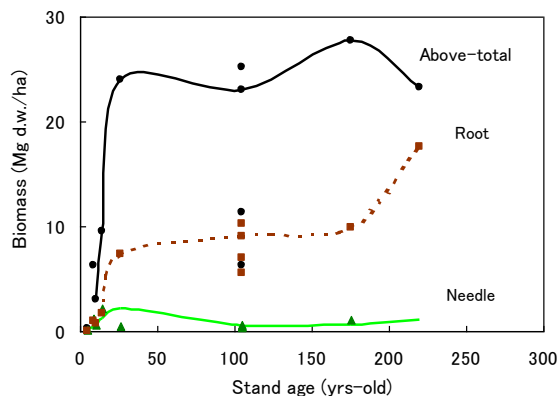


図2 中央シベリア・トゥラのカラマツ林における林齢と地上部合計、根及び葉の現存量の関係（曲線はフリーハンド）

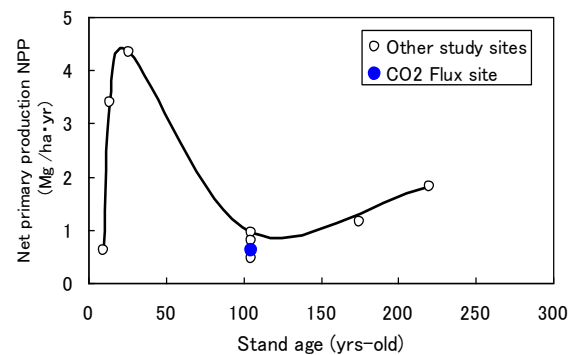


図3 中央シベリア・トゥラのカラマツ林における林齢と純生産量の関係（曲線はフリーハンド）

c. 老山とトゥラで得られた炭素循環・収支の結果

これまでに老山とトゥラで得られた炭素循環、炭素収支に関連した測定値及び推定値を、炭素の蓄積量とフローに分けて、模式的な生態系炭素循環図式に当てはめると老山とトゥラ（S1プロジェクト概要報告（全体）参照）の炭素循環・収支は次のようになる。

老山におけるタワーフラックス観測に基づく炭素収支は、シンク側に年間ヘクタールあたり1.2 t Cであった。一方、生態学的手法で求めたNPPは地上部・地下部リターと現存量増加分であるから13 t C ha⁻¹ yr⁻¹である。このNPPから従属生物の呼吸(Rh)を差し引いたのがNEPとなる。老山の土壌呼吸に占める根呼吸の割合は平均40%であり、NEP = NPP - Rh = 8.6となる。これはタワーフラックス観測による1.2と大きな開きがある。二つの手法による推定値に乖離が生じた原因には、老山のカラマツ林が壮齢林のため旺盛な成長をしていること、枝リターなどの大型リターは年によって強風の多い年に生じること等が考えられる。

トゥラにおけるタワーフラックス観測から推定した炭素収支は、シンク側に年間ヘクタールあたり0.5 t C、生態学的手法で推定したNPPは0.48 t Cであった。トゥラでは、土壌呼吸の根呼吸は分離測定していないので、老山と同じ割合と仮定してNEPを推定すると、NEP = NPP - Rh = 0.48 - 0.78 = -0.3 t C ha⁻¹ yr⁻¹となり、さらにDOCの系外流失を加えると-0.4のソース側になる。

老山とトゥラでは、生育する樹種は同じ*Larix gmelinii*でありながら、生育環境（永久凍土の有無）の違いによって、生態系の炭素蓄積量の分布、炭素蓄積量とフローのレジムに大きな違いが認められた。

2) 温帯森林生態系における炭素収支

高山（冷温帯落葉広葉樹林）、富士吉田（冷温帯常緑針葉樹林）、桐生（暖温帯常緑針葉樹林）の3カ所の温帯森林サイトにおいてタワーフラックス観測を継続実施し、日本の温帯森林生態系の炭素収支を定量的に評価するとともに、それに関わる森林の機能を総合的に解明する。

〔研究の方法〕

渦相関法によるタワーフラックス観測を継続し、データのQuality controlや摩擦速度によるデータ選択・補完を通じて解析精度の向上を図りながら、生態系純生産量(NEP)データを蓄積した。並行して、土壌呼吸速度、樹体の呼吸特性、個葉のガス交換特性、生態学的生産量などの測定を実施し、群落スケールでのモデリングや複数の手法間の比較を行うためのデータを得た。観測結果を相互利用に供し、本プロジェクトのリモートセンシング、モデル研究グループと連携するとともに、温帯森林生態系研究グループ内では、微気象学的方法によるNEPのサイト間比較を実施した。

〔結果と考察〕

3サイトで観測された年生態系純生産量は、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。また、高山サイトにおける過去12年間の観測から、このサイトの年間純生産量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。また、微気象学的な測定における誤差に関する解析から、貯留フラックスと鉛直流・移流フラックスの重要性が示された。各サイトにおいて、生態学的アプローチによる群落内炭素動態の解明が行われ、斜面系列における土壌呼吸速度の違い、森

林構成樹種の光合成能および呼吸特性、安定同位体比測定による森林炭素動態の解析等が行われ、群落炭素収支のパラメタリゼーション向上につながる成果が得られた。

タワー観測の総合的比較事例として、温帯森林生態系3サイト（富士吉田：FJY；桐生：KEW；高山：TKY）で観測された、2001年～2004年の光合成有効放射量(PPFD)、気温(T_{air})、群落純生産量(NEP)、および、パラメタ化により求めた群落総生産量(GPP)と群落呼吸量(RE)の月別値を図4に示す。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ようである。1) 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。高山の2002年の年間NEPとGPPが2000-2005年の中で最も高いことの主要な原因となったと考えられる。2) 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。この偏差は2003年夏季に長期間停滞した活発な梅雨前線によりもたらされた。影響は富士吉田、高山に顕著に表れ、両サイトとも光合成有効放射量と平均地上気温は平年に比べて低下した。その結果、GPPの減少とREの減少が同時に生じたが、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ともなうGPPの低下が明瞭で、これにより富士吉田の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が他の年に比べて顕著に低下したことの直接的な原因となった。3) 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

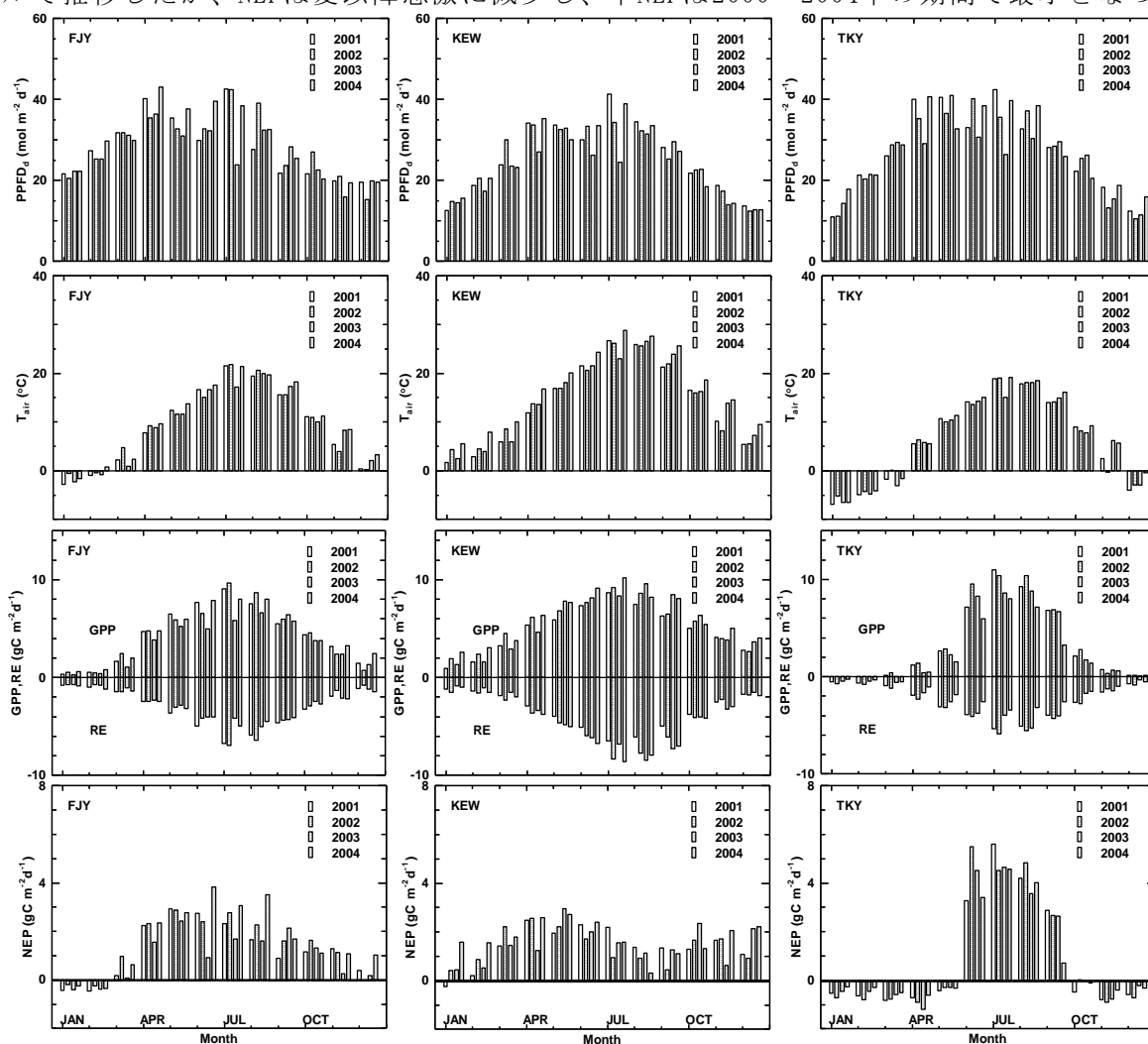


図4 富士吉田(FJY)、桐生(KEW)、高山(TKY)サイトで観測された、下向き光合成有効放射量(PPFD; $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$)、気温(T_{air} ; $^{\circ}\text{C}$)、生態系純生産量(NEP; $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$)、およびパラメタ化により求めた群落総生産量(GPP; $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$)と生態系呼吸量(RE; $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$)。2001年～2004年各年の月別平均値を示す。

季に度重なる台風の襲来を受けたことによる葉の脱落が、原因として考えられた。桐生サイトにおける乱流フラックスにおいて、湿潤年は乾燥年に比較してNEPが大きくなる傾向が確認された。以

上の結果は、統合的炭素収支解析（サイト間比較）によってとりまとめられ、アジア広域炭素収支の変動に関する知見とデータの蓄積に貢献した。

3) 熱帯森林生態系における炭素収支

熱帯地域には、巨大なエマージェント樹木を持った常緑降雨林や乾季に葉を落とす落葉季節林があるが、光合成による炭素吸収と呼吸による放出がともに大きい特徴があり、炭素収支を評価するには精度の良いフラックス観測と生態学的調査のクロスチェックが特に重要である。このために、半島マレーシアのPasoh熱帯降雨林とタイのSakaerat熱帯常緑季節林においてタワーにおけるフラックス連続観測、生態系調査を継続して行い、両サイトにおいてクロスチェックを行い、熱帯森林生態系における炭素収支測定精度を評価する。

[研究の方法]

Pasoh森林保護区(2° 58′ N, 102° 18′ E)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熱帯低地フタバガキ林のサイトである。乱流変動法による熱・水・二酸化炭素フラックスの連続観測、ガス輸送に関わる土壌呼吸速度や個葉ガス交換等の集中観測を行っている。あわせて、光合成や樹木各部の呼吸量の測定値を、CO₂の輸送動態を再現可能な多層モデルに代入して樹冠上における観測フラックスと比較チェックする。また、1970年以降続けられてきた貴重な資産を受け継ぎ、毎木調査、地下部現存量調査、林木の枯死分解と再生から炭素収支の変動を推定する調査など、総合的な調査を実施している。Sakaerat環境研究ステーション(14° 30′ N, 101° 55′ E)は、12月から2月にかけて明瞭な乾季を持ち、熱帯モンスーン気候下にある。タワー乱流変動法によるフラックス連続観測、地上バイオマスと大型木質遺体(CWD)に注目した炭素貯留量の変動調査を行っている。これら2サイトのデータを詳細に解析して、炭素収支測定の誤差要因を解明する。

[結果と考察]

Pasohでは、日中のCO₂フラックスはほとんど季節変化を持たず午後に低下すること、生態系呼吸量としての夜間放出量は土壌乾燥期に減少するため、森林全体としてのCO₂吸収量は乾燥期にむしろ増大する傾向が明らかになった。また、個葉ガス交換や群落内のCO₂動態測定結果を基に炭素多層モデルによる解析を行い、午後における光合成の大きな低下に対して、吸水阻害などに起因すると思われる葉の不均一な気孔閉鎖がかかわっていることがわかった。これらのCO₂動態の詳細な観測と解析によって、年間では少量の炭素吸収を示すことが明らかになった。生態学的調査では、地下部の掘り取り調査を含む2回の現存量調査、細根バイオマスおよび細根の回転率調査、大面積プロットにおける倒木調査を実施した。その結果、近年の倒木の発生によって、枯死材集積とその炭素放出が炭素収支において長期間にわたり大きな役割をもち、NEPのマイナス傾向が基調になるが、これには大きな空間変動があって、NEPがプラスになる場所や期間も現れることがわかった。

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、生態系呼吸、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。NEPの季節変化は後出の図12に示した。夜間におけるCO₂放出量の過小評価を補正するため、比較的風の強い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動態がより重要であることが指摘された。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

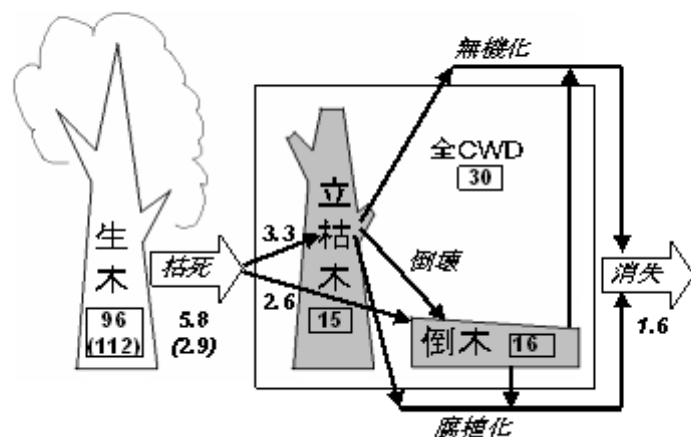


図5 Pasoh 50ha調査地での2000-2005年における枯死材の動態を通じた炭素代謝。四角形で囲まれた数値は集積量 (Mg ha⁻¹)、イタリックの数値は流量 (Mg ha⁻¹ yr⁻¹)。括弧内の数値は最近20年間の平均値。

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、時空的変動性に注目する必要があると、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 $2.9 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 、最近5年間では平均値の2倍($5.8 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)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 $1.6 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ と推定された(図5参照)。2005年での枯死材集積量は 30 Mg C ha^{-1} で地上部現存量の31%に相当し、Pasohの森林生態系の炭素代謝において大きな炭素のプールとなっていることが示唆された。この枯死木の調査により、調査対象雨林の枯死木の分解による炭素の放出率(無機化率)は、更新する樹木の成長による炭素の固定率(成長率)より10倍以上大きく、この差が、大径木の枯死地点で、枯死後5-15年間に於いて炭素放出過多現象を発生させ、熱帯雨林内でのNEPの空間的変動性の一原因になっていることがわかった。また、この森林で胸高断面積合計の10%程度が枯死した場合、NEPは $3-8 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ の炭素放出過多が数年間発生すると試算できた。

このように生態系調査からは、Pasoh熱帯雨林では、近年の倒木の発生によって、枯死材集積とその炭素放出が炭素収支において長期間にわたり大きな役割をもち、NEPのマイナス傾向の原因になると推定される。しかし、これには大きな空間変動があつて、NEPがプラスになる場所や期間も現れる。タワーのフラックス観測結果からは、雨季乾季の変化をともしないながら、年間ではわずかなNEPのプラス傾向が指摘されたが、空間変動の中に位置づけられるものと考えられる。このように、Pasohの総合的な調査から、熱帯雨林における炭素収支の微妙な環境応答・時空間変動特性を初めて捉えることができた。

Sakaeratではフラックス観測によると非常に大きな炭素吸収が推定されたが、夜間の CO_2 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はいるが、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

本研究には以下の三つの目的がある。まず、*Kobresia*草原生態系を対象に、生物気象環境・ CO_2 ・ H_2O とエネルギーフラックスの長期観測を行い、典型的な高山草原生態系の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明する。つぎに、異なる草原生態系の炭素フラックスや土壌炭素プールサイズを調査し、青海・チベット高原における広範囲の炭素蓄積特性と炭素フラックスの空間パターンを把握する。さらに、上記の観測・調査結果および既存の気象・衛星データを利用し、モデリングの手法を使って、当該高山草原全体の炭素動態と温暖化の影響を解明する。

[研究の方法]

温帯高山草原生態系において、渦相関法による CO_2 ・ H_2O 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する。さらに、炭素蓄積速度を把握するため、二つの時間断面の土壌炭素蓄積量調査データを利用した。すなわち、1980年から1989年までの青海・チベット高原における土壌調査、2001年から2004年まで青海・チベット高原で北京大学と協力して実施した大規模の土壌炭素蓄積量の調査を行った。これらの土壌調査データから、土壌炭素密度(単位面積当たりの土壌有機炭素量)、地上部植生のバイオマスを算出した。上記二回の土壌調査、それぞれの時期の衛星データから土壌有機炭素と衛星データ間の回帰モデルを構築し、1980年代と2000年初期について、広域の土壌炭素蓄積量を求める。

[結果と考察]

青海・チベット高山草原の炭素収支を把握するため、まず、渦相関法で青海海北地区の*Kobresia*(ヒゲハリスグ属)草原の炭素・水・エネルギーフラックスの時間変動を観測した。その結果、当該草原の正味炭素吸収速度(NEE)は年平均およそ $120 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ であり、日NEEの最大値は冬から夏にかけて約 $-2 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ から $4 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ までの変動があること、NEEの短期変化は温度環境とくに昼夜の温度差からもっとも大きな影響を受けていることがわかった。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NEE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、上記のヒゲハリスグ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)は、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、植物根の乾燥重量とくに土壌中10cmまでの植物根の乾燥重量に非常に高い相関が示された。

また、草原植物地上部(葉と茎)の現存量のもっとも高い時期(7月~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もっとも低く、高山湿地草原がもっとも高いことがわかった。さらに、青海・チベット高原全体の炭素蓄積量と炭素収支を把握するため、広範囲の土壤炭素調査を行い、衛星データや気象データを利用し、草原土壤炭素蓄積量と蓄積速度の推定を行った。その結果、チベット高原の土壤炭素蓄積密度は平均 4.25 kg m^{-2} で、1980年代からの20年間、平均 $23.2 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ から $32.6 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ の速度で土壤炭素が蓄積されていることが示された。

主要な結果の一例として異なる草原生態系の炭素吸収速度の解析結果の一例を紹介する。青海・チベット高原は、地形が極めて複雑で、気象環境も空間的不均一性が非常に高い。そのため、草原植生の分布やそれぞれ植生の炭素収支が空間的に大きく異なることが容易に想像できる。高山草原全体の炭素収支と炭素蓄積量を正確に評価するため、草原の炭素収支の空間的特性を把握する必要がある。そこで、本研究は、数年前から異なる草原植生の炭素収支を測定できるシステムを開発し、これまで異なる空間スケールにおける炭素収支の測定と評価を行った。まず、海北の*Kobresia*草原で植物種多様性やバイオマスの空間的变化が生態系の光合成・呼吸に及ぼす影響を評価した。その結果、直径30cmの草原群落の光合成活性は植物の種組成に大きく依存し、イネ科の多い群落では群落光合成速度が高いことがわかった。一方、生態系呼吸は、地下部バイオマス、とくに地下10cmのバイオマスに高い相関が示された。つぎに、広い範囲の異なる植生の炭素交換特性を把握するため、約2000kmの道路に沿って青海・チベット高原の代表的な草原植生について生態系光合成の測定を行った。その結果、草原群落光合成活性、生態系呼吸、正味炭素吸収量は、いずれも過放牧によって退化した草原ではもっとも低く、高山湿地草原ではもっとも高い値が示された(図6)。前者の光合成速度は後者の約6分1しかなかった。このような植生タイプによって炭素交換特性の違いはそれぞれの植生の気候環境や放牧条件に大きく依存することが示唆されている。

2) 青海・チベット高原の土壤炭素蓄積量に及ぼす温暖化影響のモデリング評価

青海・チベット高原の土壤炭素蓄積量に及ぼす温暖化影響のモデリング評価を行うため、高い標高地域の気候条件・土壤窒素・植生タイプ・植物生長が土壤炭素蓄積量に及ぼす影響を解明する。

[研究の方法]

チベット高原中央部の広い緯度と経度をカバーする地域で、植生に関連するパラメータや土壤炭素、窒素などの調査が2000年に実施された。植物の完全展葉期間中の7月と8月に、葉寿命、各種植物群落の地上または地下部の乾燥重量あたりの葉炭素と窒素濃度、地上バイオマス、根バイオマス、葉面積指数、推定された純生産力、葉の窒素含有量に関連するパラメータ、更に上記の調査地域に採取した植物の最大根圏深度内の土壤有機炭素、窒素濃度などの測定を行った。

[結果と考察]

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、土壤炭素蓄積量に及ぼす気候的、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壤有機炭素量は、降水量の増加に伴い増加するが、気温の変化との明瞭な相関が見られなかった。しかし、森林生態系では、土壤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はないことがわかった。さらに、土壤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。これらの結果から、青海・チベット高原の土壤有機炭素蓄積量は、温暖化に伴う温度の上昇による降水環境の変化に注目する必要がある。また、高原全体の土壤炭素蓄積量に及ぼす諸要因の中で、過放牧や森林伐採による地上部バイオマスの減少や、温暖化に伴う植物群落の遷移の影響を再評価する必要がある。

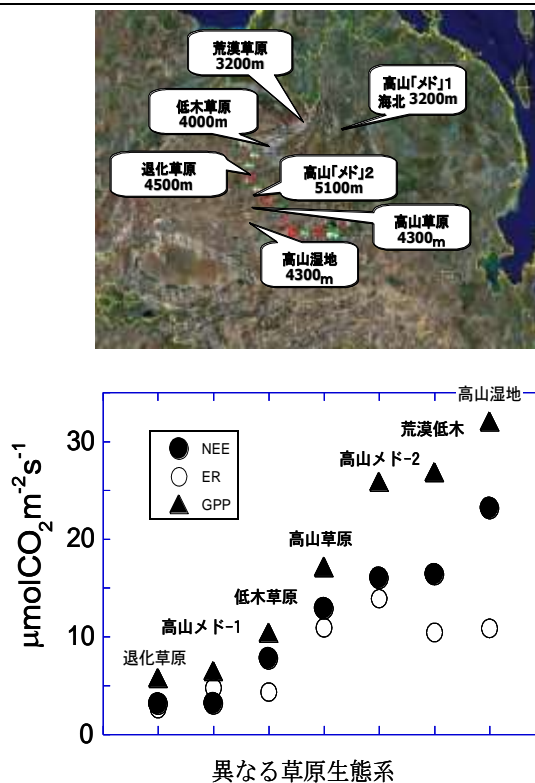


図6 2006年青海・チベット高原における異なる植生の炭素収支特性。上図：調査経路、下図：異なる植生の群落光合成(GPP)、生態系呼吸(RE)、生態系正味炭素吸収量(NEP)を示す(Tang et al. 未発表)。

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

青海・チベット高原の最も広い典型的な草原における光利用効率(LUE)の変動特性と変動要因を解明し、精度の高いLUE-GPPモデルを構築する。つぎに、高い被覆率の植生における地上バイオマスを正確に推定する方法を見いだすことである。

[研究の方法]

2003年からの2年間の渦相関フラックスデータを使い、LUEの推定を行った。同時に、散乱光合成有効放射と直射光合成有効放射を算定し、吸収光合成有効放射を経験モデルで推定した。また、バイオマスとスペクトルの測定は海北高山草原で行った。これらの結果を利用し、地上バイオマス推定を行う。

[結果と考察]

広範囲の植物現存量を推定するためには、衛星データを利用することは有効な手段である。しかし、このような推定を行うためには、植生の分光反射率と地上部バイオマスの関係を解明する必要がある。そのため、(1)衛星計測データを利用した生産力推定モデルの推定精度を向上するため、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。(2)植生の被覆率が高くなると、分光反射率からの推定結果が悪くなるが、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

草原は世界の陸地面積の1/3、モンスーンアジアの16%を占め、年間0.5 Pg Cの正味の炭素シンクとして機能している。森林に比べて非同化器官を維持するコストが少ない草原の方が光合成の効率という点では優れているという指摘もあり、地球規模の環境変化に対するアジア陸域生態系全域における応答を精度よく評価するためには、草原における炭素動態を正確に把握する必要がある。本研究では大気CO₂の炭素安定同位体比を利用して、光合成および呼吸に対するC3/C4植物それぞれの寄与率とその季節変化を推定する手法を、長期にわたるバイオマス調査結果を活用して確立する。

[研究の方法]

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する。具体的には、1)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する、2)草原全体の植生と大気間のCO₂フラックス観測および大気CO₂の $\delta^{13}\text{C}$ 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する、3)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 $\delta^{13}\text{C}$ 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する。

[結果と考察]

本研究では、光合成回路や生理特性が異なるC3/C4植物が混生する温帯草原において、従来の手法に炭素安定同位体比($\delta^{13}\text{C}$)を用いる手法を併用して炭素動態の解析を行った。対象とした草原における植生調査の結果、LAI・地上部バイオマスとともに、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 $\delta^{13}\text{C}$ 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。 ^{13}C のような化学的トレーサーによる手法は、生態系内部におけるプロセスの推定に有効であり、環境変動に対して複雑な応答を示すC3/C4混生草原の炭素動態に関して、植生間の競合を含めたより詳細な解析が可能となる。また、生態系内部の素過程を記述するプロセスモデルの妥当性検証に貢献できる。

<NEE・GPP・REの季節変化および年々変化>

NEEは5月から7月まで正の値を示す一方、8月以降は $1 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 以下となった。2003年は8月には、草原がCO₂の吸収源から放出源に移行した。GPPは植生の増加とともに増加し、7月下旬から8月上旬にピーク($18\sim 22 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)に達した。本草原では、光合成有効放射量の増加にしたがってGPPが増加する期間には、REも気温上昇にしたがって増加した。本C3/C4混生草原サイト(Tsukuba)のGPPは、同じ日本のTakayamaの森林や中国のQinghai-Tibetanの高山草原よりLAIが大きく、GPPは3~5倍程度であった。またTsukubaサイトは、C3植物と高温での光合成速度の大きいC4植物が混生しているため、生長期間が長期化すると同時に生産力がおおきくなったと考えられる。

<GPP・REに対するC3/C4寄与率の季節変化>

2003年に観測された $\delta^{13}\text{C}_{\text{GPP}}$ および $\delta^{13}\text{C}_{\text{RE}}$ 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C3/C4植物の寄与率はそれぞれ52.3%, 47.7%と推定された(図7)。

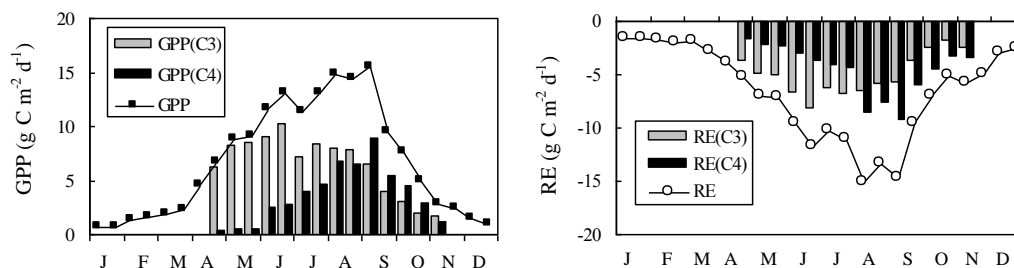


図7 C3/C4植物のGPP(左)およびRE(右)に対する寄与率の季節変化(2003年)

5) 農耕地生態系における炭素収支の定量的評価

東アジアは耕作強度が高い地域である。北緯20°~60°、東経100°~170°の範囲に含まれる陸地面積のうち、24.7%は耕作地であり(森林は31.7%)、なかでも、モンスーンアジアを代表する農耕地生態系である水田は106万km²(10.2%)と最大の面積を占める。また、農林水産省の統計によれば、2005年時点で、日本国内の水田の耕地面積は25,560 km²(国土面積の12.4%)を占め、畑地(合計で21,360 km²)のなかでは牧草地が約30%を占める。IPCCで検討されているフルカーボンアカウンティングに対応するためには、このようにモンスーンアジアを代表する農耕地生態系であり、わが国でも広い作付面積を占める農耕地生態系の炭素収支を定量化する必要がある。

農耕地の炭素収支上の特徴は、収穫や施肥等の農作業にともなう炭素の流出・流入があること、植物量(葉面積や乾物重)の季節変化が大きいことである。本課題では、このような農耕地の炭素収支の特徴に留意しながら、水田と牧草地に設置したフラックス観測サイトで、炭素フラックスと関連する要素のデータを長期的に蓄積し、炭素収支構成要素の季節変化や年々変動を明らかにする。また、平坦で均一性が高く、草高が低いというフラックスの計測に好適な農耕地サイトの特徴を活かして、フラックス測定に基づく炭素収支の評価精度の検証を行う。

[研究の方法]

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(NEE)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NEE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)、稲体の炭素含有量から推定した。以上の要素を総合し、水田の年間炭素収支を定量化した。

[結果と考察]

上記3つのサイトで長期観測を実施し、気象条件や管理方法が異なる環境での炭素収支を定量化した。イネ単作田の純生態系生産量(NEP)は100~300 g C m⁻² 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)~-90 g C m⁻² 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。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。

水田では、地下部を含む稲体を定期的に採取して全乾物重を測定することにより、純一次生産量

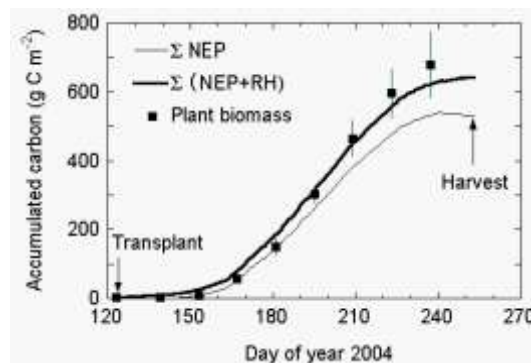


図8 フラックス測定に基づくNPPの積算値と乾物重変化から求めたNPPの積算値との比較(MSE、2004年)

(NPP)の積算値の経時変化を実測することができる。NPPは渦相関法で測定した純生態系生産量(NEP)にチャンバー法で測定した土壌有機物の分解量(微生物呼吸量、RH)を加えたものである。水稻の生育期間について、この二つの方法で推定したNPPは、乾物重測定のばらつきの範囲内で一致した(図8)。図8の結果は、水稻の一生育期間(約140日間)という時間スケールでの、フラックス測定に基づくNPP推定の信頼性を示している。水稻の生育期間の炭素収支を構成要素に分離した結果によれば、RHがNPPに占める割合は約18%であった。水田は水稻の生育期間に湛水状態となり、土壌呼吸に伴うCO₂放出が抑制されたため、RHがNPPに占める割合が低いと考えられる。

(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二酸化炭素(CO₂)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。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、炭素フローの広域変化は甚大であると予想される。これらから、温暖化問題に関連して、土地利用変化や環境変動が広域スケールのSOCの動態におよぼす影響を解析し評価する研究が注目されている。ここでは、環境条件と有機炭素の分解過程を記述する数理モデルが利用され、土地利用、環境変化による影響の解明、評価、その対策あるいは緩和策などの検討が行われている。

1) 土壌炭素フラックスの時空間変動の定量的評価

土壌圏を含む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。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炭素循環に重要な役割を果たしている。本研究では、1)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、2)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の影響の定量的評価を行う。

[研究の方法]

<生態系の時間変化(遷移)に伴う土壌炭素収支の経年変化の解析>

二次遷移に伴う土壌圏の動態を明らかにするために、本研究では岐阜県と長野県の冷温帯に分布する遷移段階の異なる生態系を対象とした。具体的には1)ミズナラの優占していた冷温帯落葉広葉樹林を伐採した直後の生態系(高山)、2)草本期の代表的な植生であるススキ草原(菅平)、3)草本期の後に出現する40年生のアカマツ林(菅平)、その後出現する4)ミズナラを中心とし60年生の落葉広葉樹林(高山)、そして5)ミズナラを中心とした110年生の落葉広葉樹林(荘川村)である。土壌中の炭素収支は地上部植生から土壌へと供給される有機物である枯死・脱落量(リター量)と土壌有機物の分解速度とのバランスによって決定される。それぞれの生態系において植物の現存量(炭素蓄積量)と成長量(炭素固定量)を測定した。地上部の枯死・脱落量は、各調査サイトにリタートラップを複数設置して毎月1回回収し、各器官に仕分けした後に乾燥重量を測定した。土壌呼吸量を推定するために、密閉チャンバー法を用いて、約1ヶ月に毎に測定を行った。

また、富士北麓地域は年代の異なる様々な噴火堆積物の上に成り立っており、また同一地質年代の立地でも人間による森林利用の歴史的な違いなどによって、遷移段階の異なる様々な植生タイプが存在する。このような中から富士北麓地域の標高約1000mの下部山地帯地域において遷移段階の異なるアカマツ、ヒノキ・ツガ、落葉広葉樹林生態系を調査地として抽出し、一次遷移に伴う土壌炭素収支の経年変化の解析をした。

<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>

本研究の調査地は岐阜大学流域圏科学研究センター高山試験地から北に約2 kmにある冷温帯落葉広葉樹林である。伐採と材の持ち出しは1999年の冬から2000年の夏にかけて行なわれ、その面積はおよそ70 ha、標高約1170 mである。伐採が行なわれる前の植生の概況はブナ林の伐採跡地に成立したダケカンバとミズナラを主体とする樹齢50年の落葉広葉樹林の二次林であった。植生などが代表的と思われ、より斜面のなだらかな地点に一辺20 mのコドラートを設置し、調査区とした。土壌呼吸速度(土壌表面からのCO₂放出速度)、リター直下の土壌温度、リターを除いた地表面から深さ5 cmの土壌温度、深さ10 cmの土壌水分をそれぞれ測定した。

[結果と考察]

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になった。特に、草原-森林移行期における土壌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壌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。

以下に結果の一部を紹介する。図9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。二次遷移では、土壤炭素の動態は遷移に伴う、はっきりとした傾向は見られなかった。強調すべき点として、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。これは草本植物と木本植物の生活形の違いが原因と考えられた。つまり、草本植物は地上部を毎年作り替えるが、木本植物は毎年地上部を増大させるので、木本のステージでは土壤への炭素供給量が減少する。一方で、ススキの時に増加した土壤炭素はアカマツに遷移した直後はやや減少するが、やがて再び増加した。このことより、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壤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分かった。

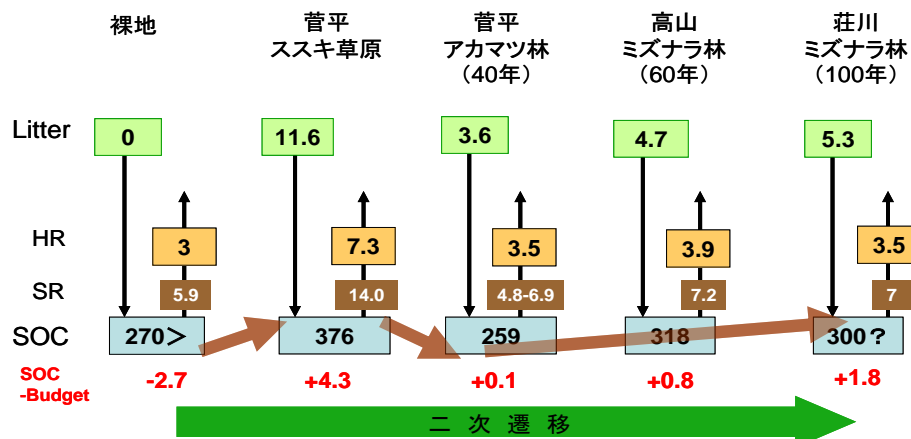


図9 冷温帯地域の二次遷移に伴う土壤への炭素フラックスとSOCプールの変化

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、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。

[研究の方法]

タワー観測と土壤炭素フラックスが同時測定されている苫小牧（カラマツ林）、高山（ミズナラ林）、富士吉田（アカマツ林）のサイトにおいて、得られたデータからNEP、GPP、Re、Rs（土壤呼吸）、Rp（植物呼吸）、Ra（植物の地上部呼吸）、Rh（従属栄養生物呼吸）の年間量を求め、炭素循環プロセスのサイト間比較を行った。また、土壤圏グループの調査サイトのうち、5サイト・7生態系でHR/SR比を測定した結果を報告する。なお、HR=Rh、SR=Rsである。従属栄養生物呼吸HRの推定方法として二つある。一つは、土壤呼吸と根呼吸を測定して、両者の差から従属栄養生物呼吸を求める方法である。もう一つは、トレンチ法で根呼吸をゼロにしたときに測定される呼吸である。

さらに独立行政法人農業環境技術研究所の圃場において、5種類の土壤呼吸測定手法を用いて土壤呼吸の同時測定を行った。比較対象とした手法は、通気法、自動開閉チャンバー法、携帯式光合成測定器、オープントップチャンバー、および密閉法である。

[結果と考察]

総一次生産は植物呼吸との間に相関が見られたが、従属栄養生物呼吸との間には相関が認められ

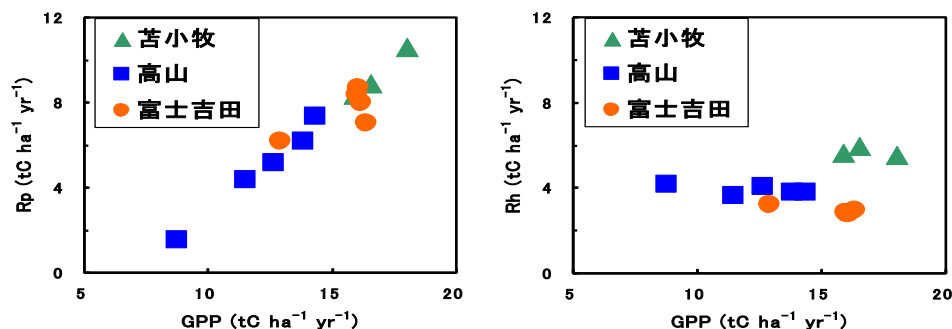


図10 苫小牧、高山、富士吉田での年間GPP、Rp、Rh間の関係

なかった。日本における複数の生態系において測定した結果から、土壤呼吸に対する従属栄養生物呼吸の比は0.4から0.85の範囲となった。現時点で有効な土壤呼吸測定手法としては、通気法、オープントップチャンバー法、LI6200法が挙げられた。世界的によく利用されているLI6400法は過大

評価となりやすいことが明らかとなった。これらの手法にはそれぞれ長短があり、使用時には注意が必要である。結果の一例として、年間GPPとRpおよびRhとの関係を見たのが図10である。この結果から、GPPの年変動に対して、年間Rpとは正の相関があり、Rh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。以上より、植物呼吸は総一次生産に依存するが、従属栄養生物呼吸は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。

3) 土壌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

本研究は、サブサブテーマ1) 土壌炭素フラックスの時空間変動の定量的評価、2) 土壌炭素収支におけるプロセスの相互作用と時空間変動における観測、実験結果に基づき、土壌内における炭素動態過程の記述に焦点をあてたプロットスケールの機構的モデルを構築すること、センサーの性能が年々向上している衛星情報と普及の進む地理情報システム(GIS)を利用して、広域的な土壌炭素貯留量の推定手法を開発し、これを用いた土壌炭素分布図を提示すること、を目的とする。

[研究の方法]

<土壌炭素動態の機構的モデル>

土壌有機炭素(SOC)は一般に、環境条件に依存した微生物による分解・集積過程を経て、一部は微生物の呼吸(HR)として土壌表面からCO₂ガスとして放出される。これらの諸過程は数多くの中間産物状態を経由し、かつ滞留時間もさまざまである。このため、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。RothCはSOCの分解・集積過程に対応した5つの炭素プールを持つ標準的なコンパートメントモデルであり、月別の平均気温、降水量および蒸発散量を環境要素の入力とする。ほかに、土壌の粘土含量、対象とする深さまでの土壌に含まれる単位面積あたりの全有機炭素量および土壌に入力される炭素量(植生からの落葉、落枝、枯死根、施肥など)が必要である。RothCは、プロセスモデルとしてはパラメータも必要とする入力データも少ないために、冷温帯から熱帯までの耕地、森林、草地など広い地域、土地利用形態の場で適用され、モデルの妥当性が検証されている。ここではモデルの改良を進め、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。

<広域的土壌蓄積量分布推定手法の確立>

広域的な土壌炭素貯留量の推定手法を開発するために、岐阜県高山市の岐阜大学高山試験林およびこれを含む小流域を対象として以下の測定および実験を行なった。

- (1)冷温帯林土壌炭素の詳細調査：冷温帯落葉広葉樹林の土壌圏における炭素の分布を明らかにするため、1haの試験林を100区(10m×10m)に細分して、それぞれ深さ2mまたは母岩までの土壌、根系、粗大有機物、リター中の炭素量を計測し、全土層中の炭素量に関する悉皆詳細調査を行った。
- (2)特徴土層の検出：調査時間と労力を大幅に削減するために、ある場所の全土層を代表する特定土層を検出した。
- (3)広域推定手法の開発：高山市を流れる大八賀川流域圏の土壌炭素分布を明らかにするために、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箇所の土壌サンプルを採取し、その土壌炭素量を計測した。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。

[結果と考察]

土壌炭素動態モデルは、5つのコンパートメントを持ち、高山サイト(冷温帯落葉広葉樹林)、菅平サイト(ススキ草原)および日本各地の農耕地において土壌フラックスデータならびに土壌炭素長期動態データに適用し、検証と改良を行った。また、GISと衛星データを援用し、簡易な現地調査を組み合わせて小流域スケールにおける土壌炭素貯留量の空間分布を推定する手法を開発し、岐阜県高山市郊外の大八賀川流域をモデルケースとして、有効性を確かめた。これにより、植生遷移、土地利用、有機物管理などによる土壌への有機物の入力に変化した場合に土壌炭素収支がどのように変化するかを予測する基盤システムが構築された。

図11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)で測定された土壌フラックスとRothCによるモデルの計算値を比較したものである。こちらにも季節変化は再現されており、とくに草が枯れる冬季には絶対値についてもよく一致している。なお、夏季に見られるフラックスの実測値と計算値との差は、植物根による呼吸に由来するものと考えられる。このことから、植物根の呼吸量を逆にモデルから推定することができる。

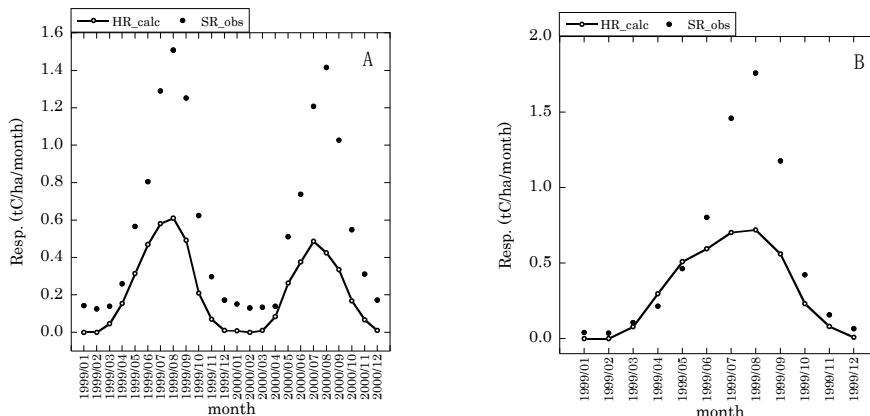


図11 菅平スキ草原 (A) と高山落葉広葉樹林 (B) における土壌フラックスの季節変化、SRは実測値、HRは計算値

次に、土壌炭素動態の広域評価について紹介する。ここでは、水田を対象として、水田での有機物分解を記述できるように改良したRothCモデルを用いる。水田では、水稻の作付期間中、土壌は湛水状態にあり、土壌有機物動態が畑地とは大きく異なる。すなわち、嫌氣的な条件が有機物の分解を阻害し、結果として水田の土壌有機物含量は畑よりも高くなっている。既存のSOCの分解過程を記述するモデルのほとんどは畑状態における好氣的有機物分解を想定しているため、そのままでは水田土壌へ適用できない。ここでは湛水期間と非湛水期間のそれぞれにおいて、畑地状態で決められた分解率を変化（減少）させて、SOCの時間変化が実測に最も近くなるように分解率を新たにチューニングした。水田のSOC用に改良したモデルを用いて、織田らの地力保全基本調査・代表断面データベースに基づいて作成した日本全国の土壌炭素量分布を初期条件として、収穫残渣の処理を異なる3つのシナリオで変えた場合の炭素蓄積量変化のシミュレーションを行った。稲ワラも持ち出すシナリオ1(control)の場合、全国総計で18 Mt C 減少するが、環境保全型農業で推進されると考えられる有機肥料の利用増加を想定したシナリオ2(organic)では10 Mt C 増加した。それに対して、シナリオ3(BAU: business as usual)の場合はそれらの中間で、SOC総量はほぼ一定と推定された。シナリオ1と2の差28 Mt Cは、日本の年間総CO₂排出量372 Mt C (2005年) の7.5 %、農業セクターから排出される年間CO₂ (7.6 Mt C) の3.7倍に相当する。

(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では、シベリアから東アジア、東南アジアに分布する15のタワーフラックス観測サイトで、二酸化炭素、水蒸気、顕熱の各フラックスや、微気象、土壌呼吸量、生態学的調査の結果などの地上観測データが長期間にわたって収集される。各サイトのデータを集積したデータベース(S1-DB)を構築・活用して、サイト間比較や統合解析を展開する。この場合に問題となるのは、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である。本研究では、サイト間比較や統合解析に耐えるデータベースを構築するため、研究テーマIに参画している各観測サイトのフラックス観測手法の状況を把握し、観測手法の差異がフラックス値に及ぼす影響を文献調査とテストデータを用いた比較実験によって明らかにするとともに、データ処理の各段階のなかで特に問題となる品質管理の標準化手法と、複数サイトの年間収支比較のための簡便な欠損データ補完法を開発し、S1-DBの構築や統合解析に貢献することを目的とする。また、本プロジェクト研究テーマIVと連携しながら、フラックス、微気象、土壌呼吸量、生態学的調査のデータを登録するためのS1-DB用データフォーマットを作成し、研究テーマIに参画する各サイトのデータを収集する（研究テーマIVの報告を参照）。

[研究方法]

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、協力サイトも含めて16サイト(森林9サイト、草原・農耕地7サイト)から回答が得られた。その結果を集計し、分析を行った。

また、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した。さらに、サイトによるデータ処理法の比較実験を行った。テストデータとして、カラマツ林サイト(苫小牧フラックスリサーチサイト、TMK)の着葉期と落葉期、水田サイト(真瀬、MSE)の耕作期と休耕期について、それぞれ約1ヶ月分の渦相関原データ(10Hzで取得されたデータ)と、フラックスの計算に必要な微気象データを準備した。森林サイト担当のグループにはTMKのテストデータを、草原・農耕地サイト担当のグループにはMSE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、その結果を比較した。

＜渦相関法データの品質管理手法の検討＞

渦相関原データに対する品質検査、定常性の検査、乱流強度検査など各種の品質検査を、MSEのオープンパス型による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した。また、各種の品質検査の結果に基づいて、データの品質を総合的に判定する方法を検討した。

＜オープンパス型とクローズドパス型によるCO₂フラックスの比較＞

オープンパス型とクローズドパス型の両計測システムを併用しているMSEとTMKの1年間分のデータセットを用いて、オープンパス型とクローズドパス型で測定した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、差異の原因を解析した。品質検査を通過して比較に用いられたデータ数の年間データ数に占める割合は、MSEが35% TMKが26%であった。

＜サイト間比較研究に有効な欠損データの簡易補完法の検討＞

簡便かつ推定値の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(MI法)をとりあげた。森林のフラックスデータの補完にMI法を試験的に適用し、妥当な結果が得られたことが報告されているので、本研究では森林とはフラックスの大きさやその季節性が異なる水田サイト（MSEおよび岡山市八浜、HCH）のデータを用いて、MI法の有効性や使用上の留意点について検討した。

〔結果と考察〕

テーマI参画サイトに対して実施した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、同一の計測システムであっても、サイト間の計算手法の違いにより、潜熱およびCO₂のフラックスの1ヶ月間平均値に10～15%の差が生じる可能性があるため、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。また、水田とカラマツ林で観測されたCO₂フラックスの年間データを用いて、オープンパス型とクローズドパス型渦相関法の比較を行い、両者に系統的な差異があり、その主な要因は超音波風速温度計の温度信号を用いた密度変動補正項の過大・過小評価にあることを明らかにした。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

データベースの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) 各種生態系または気候帯ごとに炭素収支の観測データをまとめたサイト間比較解析、(2) 高山、富士吉田、苫小牧、パソなどのサイトにおいて微気象学的方法と生態学的方法による炭素フローと貯留量の相互比較を実施した。

〔研究の方法〕

本研究テーマでは森林サイト8サイト：北海道苫小牧・中国東北部・中央シベリアのカラマツ林3サイト、日本温帯森林生態系である高山・富士吉田・桐生の3サイト、熱帯地域の半島マレーシアの熱帯降雨林・タイの熱帯常緑季節林などの2サイト、草原サイト2サイト：中国高山草原・筑波大学草地、水田2サイト：茨城真瀬・岡山八浜などを解析対象とした。さらに、同一サイトで植物体現存量調査、土壌圏調査などを行い、生態学的手法によって推定した炭素収支推定値（炭素蓄積量とフロー）と二酸化炭素フラックス連続観測の結果とのクロスチェックを行った。

〔結果と考察〕

＜各種森林生態系での渦相関法によるNEPの総合的解析＞

各種森林生態系での渦相関法によるNEP（生態系純生産量）の年間値測定結果によると、NEPは気象条件と生態系の差異によって0から6 t C yr⁻¹と広範囲にわたっている。年平均気温・降水量とNEPおよび光合成総生産量(GPP)の関係の解析から、GPPは気温とともに直線的に増加し、NEPは低温の領域では気温とともに増加するが、20℃程度より高温の領域では気温の上昇に対して減少する傾向が見られる。高温の領域でNEPが減少する原因は、気温が高くなるにつれて土壌有機物などの分解速度が上昇するためと考えられる。さらに各種生態系における渦相関法によるNEPの季節変化のサイト間比較を行った。図12に森林8サイト、中国高山草原、茨城真瀬水田のNEPの季節変化を示す。これから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る。

＜微気象学的方法と生態学的方法によるNEPの相互比較＞

本研究では、数多くのサイトにおいて微気象学的方法（渦相関法）による正味の炭素吸収量(NEP_M)と生態学的方法（植物体現存量調査）による吸収量(NEP_B)の両者の結果を相互比較して手法の信頼性の検証を行っている。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、

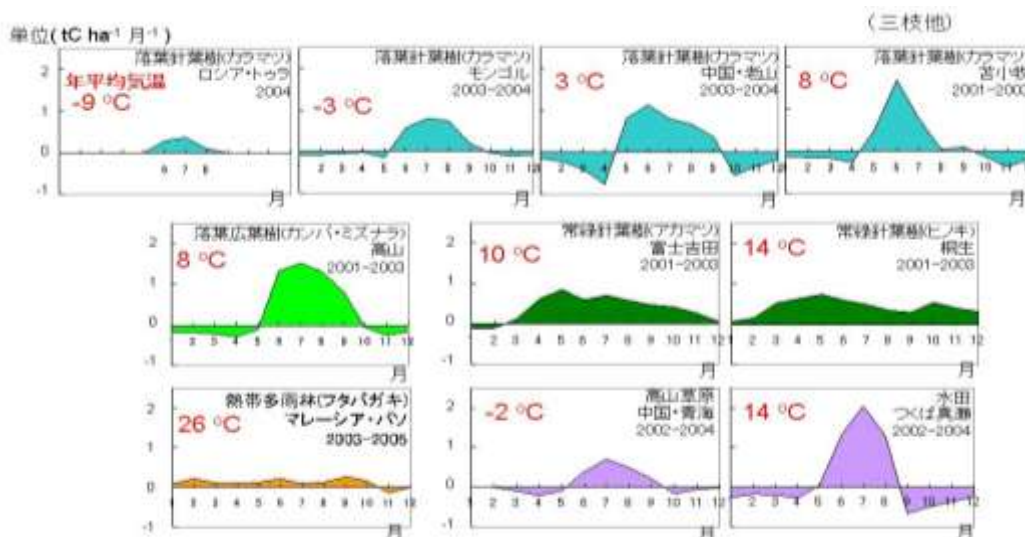


図 12 森林 8 サイト、高山草原、真瀬水田の NEP の季節変化

かなり高い一致度となっている。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、特に熱帯林では著しい。両手法に含まれる未解決の問題としては、 NEP_M における夜間の測定誤差、 NEP_B における地下根系の炭素収支の見積もり誤差、枯死木の分解の不確定性などが指摘されており、これら誤差要因の解明が必要である。

< 森林生態学的調査による炭素蓄積量とフロー >

生態系の炭素蓄積量については、地上部・地下部炭素集積量、下層植生炭素集積量、林床有機物層・鉍質土層炭素集積量を集計し、炭素の流れ（フロー）については、地上部リターフォール、細根枯死量、現存量増加分、土壌呼吸、溶存態 (DOC) 流失量のうちで測定されている項目の数値から推定した。地上部と地下部に集積した炭素量については、現存量の 50% が炭素と仮定して推定しているが、地上部と地下部の現存量比率 (T/R 比) は、緯度に沿って南から北に小さくなっている。これは、植物生育にとって環境条件が厳しくなるにつれて地下部への分配比率が高くなることを示しており、地下部の炭素集積量推定を広域に行う際に過大評価/過小評価の鍵となる重要な知見である。4つの観測サイト：永久凍土地帯(トゥラ)のカラマツ林、中国東北部(老山)のカラマツ林、日本(高山)の冷温帯落葉広葉樹林、マレーシア(パソ)の熱帯雨林で推定した炭素蓄積量と炭素フローの結果 (S1プロジェクト概要報告(全体)参照) から分かるように、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る。

4. 考察

本研究テーマ I では、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 CO_2 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、リモセン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。

また、データの集積する中で、これらの調査、観測結果のデータベース化に着手し、研究テーマ IV へのデータ提供を行った。さらにデータベースの公開を目指し、その整備を図った。

陸域生態系における炭素収支のより正確な評価の行う上で、今後に残された課題として、以下があげられる。

- 1) 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。
- 2) 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。

- 3) 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。
- 4) 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。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

1) 森林生態系における炭素収支の定量的評価

- a. 研究の空白域であり、かつ面積の大きい落葉針葉樹林（カラマツ林）生態系で、炭素収支と炭素循環に関する系統的な測定値と推定値が得られた。特に永久凍土の連続分布域にも成立するカラマツ林生態系において、炭素蓄積レジムと収支レジムが解明されたことは、世界で初めてである。
- b. 東南アジアの熱帯雨林と熱帯季節林におけるCO₂フラックス継続観測が本研究ではじめて実行された。生態学的調査でも、地下部の堀取り調査からバイオマス現存量を推定するなど、新しい成果を基にして、炭素収支推定のクロスチェックを行った。熱帯林では炭素収支の空間不均質性が大きく、長期短期の時間変動もともなうという、炭素収支推定上のむずかしさがあるが、炭素循環にかかわる素過程を詳しく調べ、炭素収支を評価するというみちすじが得られた。
- c. 本研究によって得られた知見および観測・解析手法の進展は、森林生態系の炭素吸収量と環境変動との関係の定量的評価の高精度化に大いに貢献するものである。とりわけ、NEPの観測データ、およびサイト間比較解析によるNEPの時空間変動に関する知見は、衛星リモートセンシングや陸域生態系モデルを用いた広域炭素収支量評価手法開発と検証に利用される。

2) 草原・農耕地生態系における炭素収支の定量的評価

- a. 青海・チベット草原は、これまで生態学的知見が極めて少なかった。本研究により、チベット高原の草原生態系には比較的高い土壌炭素が蓄積されていること、比較的湿潤地域の草原は現在でも大気から炭素を正味吸収していることが分かった。ここでの成果は、世界的に見ても極めて特殊な高山草原生態系の炭素循環プロセスとメカニズムを解明するもので、生態学分野の地域的ギャップが埋められたことは大変意義深い。
- b. 炭素動態解明への新しい手段として、従来の生態学的手法・微気象学的手法に加えて、化学的トレーサー（炭素安定同位体比）による手法を活用した。これによって、異なる光合成回路や生理特性を持つ植生が混在するために環境変動に対して複雑な応答を示すことが予想される温帯草原の炭素動態に関して、植生間の競合を含めたより詳細な解析が可能となった。
- c. 水田農耕地を対象とした長期のフラックス観測に基づくものとしてはじめて、イネ単作田の年間炭素収支とその年次変動を明らかにし、フラックスの計測に好適な条件を生かして、フラックス観測に基づく生態系炭素収支の推定精度の検証を行った。

3) 土壌圏における炭素収支の定量的評価

- a. 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分かった。さらに、一次遷移のSOCプールへの蓄積は、土壌呼吸量の変化に依存していること、今後地下部の純生産量と、根の呼吸量の割合について詳細な検討が必要であることが明らかとなった。
- b. 土壌呼吸測定手法の比較検討や土壌呼吸に対する従属栄養生物呼吸の割合の測定などの成果は、今後の研究の発展に寄与するものと期待される。
- c. 土壌有機物動態モデルRothCは比較的簡単な構造を持ちながら、土壌フラックスの見積りおよびSOC動態の広域評価に十分に利用できることを示し、さらに、オリジナルモデルに改良を加えることで、黒ボク土壌、水田土壌にも適用可能となった。

4) 陸域炭素収支のデータベースの構築と総合的解析

- a. 渦相関法という「共通」の観測手法に内在するサイト間の差異がフラックス値にどのような影響を及ぼすかを明らかにするとともに、汎用性のあるデータの品質管理法や、簡便な欠損データの補完法という、フラックスデータの品質の標準化に有用な手法を提供した。
- b. アジア亜寒帯から熱帯に至る15地点の地上観測データがデータベースにとりまとめられ、アジアで最初の炭素収支データベースの構築と共有の基盤データを集積した。さらに、そのデータを利用したフラックス観測と生態系調査結果の総合的解析はアジアで最初の試みである。同時に、陸域炭素循環モデルと衛星リモートセンシングにデータ供用を行い、広域炭素収支マップ高精度化の道筋（システムアプローチ）の確立に貢献した。

(2) 地球環境政策への貢献

1) 森林生態系における炭素収支の定量的評価

近年、北東アジアの落葉針葉樹林生態系が、森林資源の供給地となる可能性が出てきているが、カラマツ林生態系は生育環境によって非常に大きな炭素蓄積量の幅を持っており、利用できる木材資源としては慎重な利用方法が望まれる。また、熱帯林の炭素収支に関する科学的に信頼性の高い研究データが得られ、気候変動に対応した熱帯林の炭素収支変動の将来予測に貢献するとともに、これら結果は国際的な炭素管理計画の策定、政府間レベルの協議の基盤的知見になる。

2) 草原・農耕地生態系における炭素収支の定量的評価

本研究で得られた青海・チベット高原における広範囲の炭素蓄積特性と炭素フラックスの知見は、高山草原における温暖化はじめ環境変化が炭素動態に与える影響の定量的評価に活用される。さらに本研究で得られた水田・牧草地の観測結果は、我が国のフルカーボンアカウンティングに対応する農耕地生態系の炭素管理手法を検討するうえで重要なデータとなる。

3) 土壌圏における炭素収支の定量的評価

伐採や土地利用形態などの人為的インパクトと遷移に伴う土壌炭素収支の経年変化の解析に基づき、広域的な炭素分布、とりわけ土壌中の炭素量推定手法のプロトタイプを示すことができた。これらの成果を炭素収支モデルに組み込むことにより、より確かな土壌圏を含む炭素収支予測シミュレーションが可能となり、その結果は炭素管理長期施策の検討に供される。

4) 陸域炭素収支のデータベースの構築と総合的解析

本研究の成果は、今後、AsiaFluxの活動を通じて、我が国及びアジア地域の陸域炭素収支に関する研究、環境施策の基盤データとなる。また、地球観測サミットで決められた地球観測実施計画の陸域生態系長期モニタリングの具体的内容の策定に貢献する。

6. 研究者略歴

課題代表者：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

主要参画研究者

(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研究室長

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

1、2) : 三枝信子

1965年生まれ、東北大学大学院理学研究科博士課程修了、理学博士、

現在産業技術総合研究所環境管理技術研究部門主任研究員

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

(2)

1、2、3) : 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

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主任研究員

(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主任研究員

(4)

- 1) 宮田明：(同上)
- 2) 山本晋：(同上)

7. 研究成果発表状況

(1) 森林生態系における炭素収支の定量的評価

- 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) Prokushkin AS, Kajimoto T, Prokushkin SG, McDowell WH, Abaimov AP, Matsuura Y: Canadian Journal of Forest Research 35, 2130-2140 (2005)
“Climate factors influencing fluxes of dissolved organic carbon from the forest floor in a continuous-permafrost Siberian watershed”
- 3) H. Wang, N. Saigusa, Y. Zu, S. Yamamoto, H. Kondo, F. Yang, W. Wang, T. Hirano, and Y. Fujinuma: Phyton, 45, No. 4, 339-346 (2005)
“Response of CO₂ Flux to Environmental Variables in Two Larch Forest Ecosystems in East Asia”
- 4) N. Saigusa, 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”
- 5) H. Muraoka and H. Koizumi: Agricultural and Forest Meteorology, 134, 39-59 (2005)
“Photosynthetic and structural characteristics of canopy and shrub trees in a cool-temperature deciduous broadleaved forest: implication to the ecosystem carbon gain”
- 6) S. Takanashi, Y. Kosugi, Y. Tanaka, M. Yano, T. Katayama, H. Tanaka, M. Tani: Ecol. Res., 20, 313-324 (2005)
“CO₂ exchange in a temperate Japanese cypress forest compared with that in a cool-temperate deciduous broad-leaved forest”
- 7) M. Kawasaki, N. Ohte, M. Katsuyama M.: Ecol. Res., 20, 347-358 (2005)
“Biogeochemical and hydrological controls on carbon export from a forested catchment in central Japan”
- 8) Y. Mizoguchi, Y. Ohtani, T. Watanabe: J. Agric. Meteorol. 60(5) (2005)
“Influence on soil temperature and soil moisture on forest floor CO₂ efflux - Clarification of the effect of soil moisture using field data”
- 9) Y. Ohtani, N. Saigusa, S. Yamamoto, Y. Mizoguchi, T. Watanabe, Y. Yasuda, S. Murayama: Phyton 45, 73-80 (2005)
“Characteristics of CO₂ fluxes in cool-temperate coniferous and deciduous broadleaf forests in Japan”
- 10) Y. Yasuda, T. Watanabe, Y. Ohtani, Y. Mizoguchi, M. Mano: J. Agric. Meteorol., 60(5), 777-780 (2005)
“Quality Control for Flux Data Measured above a Deciduous Forest”
- 11) S. Takanashi, Y. Kosugi, M. Tani, N. Matsuo, T. Mitani: Phyton, 45, 61-66 (2005) “Characteristics of the gas exchange of a tropical rain forest”
- 12) Wang W, Endo I, Watanabe Y, Ji DH, Koike T: Photosynthetica 44, 345-348 (2006)
“Seasonal change in the photosynthetic capacity of cones at the canopy of Japanese larch trees”
- 13) 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”
- 14) A. Ito, H. Muraoka, H. Koizumi, N. Saigusa, S. Murayama and S. Yamamoto: Ecological Research, 21, 137-149 (2006)
“Seasonal variation in leaf properties and ecosystem carbon budget in a cool-temperate deciduous broad-leaved forest: simulation analysis at Takayama site, Japan”
- 15) S. Konishi, M. Tani, Y. Kosugi, S. Takanashi, Mohd Md sahat, Abdul Rahim Nik, K. Niiyama, T. Okuda: Forest Ecology and Management 224, 19-25 (2006)
“Characteristics of spatial distribution of throughfall in a lowland tropical rainforest, Peninsular Malaysia”
- 16) Y. Kosugi, 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”
- 17) S. Ohkubo, Y. Kosugi, S. Takanashi, T. Mitani, M. Tani: Agric. Forest Meteorol., 142, 50-65 (2007)
“Comparison of the eddy covariance and automated closed chamber methods for evaluating nocturnal

CO₂ exchange in a Japanese cypress forest”

- 18) Kajimoto T, Osawa A, Matsuura Y, Abaimov AP, Zyryanova OA, Kondo K, Tokuchi N, Hirobe M: Journal of Forest Research 12, 103-112 (2007)
 “Individual-based measurement and analysis of root system development: case studies for Larix gmelinii trees growing on the permafrost region in Siberia”
- (2) 草原・農耕地生態系における炭素収支の定量的評価
- 1) S. Gu, Y. Tang, X. Cui, M. Du, T. Kato, Y. Li, and X. Zhao: Phytion-Annales Rei Botanicae, 45, 4, 361-370 (2005)
 “Effects of temperature on the CO₂ exchange between the atmosphere and an alpine meadow”
- 2) M. Hirota, Y. Tang, Q. Hu, T. Kato, S. Hirata, W. Mo, G. Cao, and S. Mariko: Atmos. Environ., 39, 5255-5259 (2005)
 “The potential importance of grazing to the fluxes of carbon dioxide and methane in an alpine wetland on the Qinghai-Tibetan Plateau”
- 3) Y. Zhang, 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”
- 4) L. Zhao, Y. Li, S. Gu, X. Zhao, S. Xu, and G. Yu: Journal of Integrative Plant Biology, 47, 3, 271-282 (2005)
 “Carbon dioxide exchange between the atmosphere and an alpine shrubland meadow during the growing season on the Qinghai - Tibetan Plateau”
- 5) X. Zhao, Y. Li, L. Zhao, G. Yu, Y. Tang, S. Xu, and G. Cao: Phytion-Annales Rei Botanicae, 45, 371-376 (2005)
 “CO₂ fluxes of alpine shrubland ecosystem on the north-eastern Tibetan Plateau”
- 6) S. Shimoda, 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”
- 7) K. Ohba, A. Maruyama, Y. Kurose, K. Nakamoto : Journal of Agricultural Meteorology, 60(5), 765-768 (2005)
 “Seasonal variation of CO₂ and energy fluxes on forage crops in temperate humid region”
- 8) M. Saito, A. Miyata, H. Nagai, T. Yamada: Agric. Forest Meteorol., 135, 93-109 (2005) “Seasonal variation of carbon dioxide exchange in rice paddy field in Japan”
- 9) A. Miyata, 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”
- 10) X. Cui, H. Niu, J. Wu, S. Gu, Y. Wang, S. Wang, X. Zhao, and Y. Tang: Environmental and Experimental Botany, 58, (1-3), 149-157 (2006)
 “Response of chlorophyll fluorescence to dynamic light in three alpine species differing in plant architecture”
- 11) M. Hirota, Y. Tang, Q. Hu, S. Hirata, T. Kato, W. Mo, G. Cao, and S. Mariko: Ecosystems, 9, 673-688 (2006)
 “Carbon dioxide dynamics and controls in a deep-water wetland on the Qinghai-Tibetan Plateau”
- 12) T. Kato, 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”
- 13) Y. Zhang, 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”
- 14) Z. Li, G. Yu, X. Xiao, Y. Li, X. Zhao, C. Ren, L. Zhang, Y. Fu; Remote Sensing of Environment, (2006), doi:10.1016/j.rse.2006.10.003.
 “Modeling gross primary production of alpine ecosystems in the Tibetan Plateau using MODIS images and climate data”
- 15) H. Noda, H. Muraoka, Y. Tang, and I. Washitani: Journal of Plant Research, DOI 10.1007/s10265-006-0066-8 (2007)
 “Phenological changes in rate of respiration and annual carbon balance in a perennial herbaceous plant, *Primula sieboldii*”
- (3) 土壌圏における炭素収支の定量的評価
- 1) Adachi M., Bekku Y., Okuda T. and Koizumi H. : Forest Ecology and Management, 210, 455-459 (2005)
 “Required sample size for estimating soil respiration rates in large area of two tropical forests and of two types of plantation in Malaysia”
- 2) Kondo M., Muraoka H., Uchida M., Yazaki H. and Koizumi H. : Agricultural and Forest Meteorology 134110-121 (2005)

“Refixation of respired CO₂ by understory vegetation in a cool-temperate deciduous forest in Japan”

- 3) Lee M.-S., Nakane K., Nakatsubo T. and Koizumi H.: Agricultural and Forest Meteorology 134, 95-101 (2005)
“The importance of root respiration in annual soil carbon fluxes in a cool temperate deciduous forest”
 - 4) Mo W., Lee M.-S., Uchida M., Inatomi M. and Koizumi H.: Agricultural and Forest Meteorology, 134, 81-94 (2005)
“Seasonal and annual variation in soil respiration in a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in Japan”
 - 5) Muraoka H. and Koizumi H.: Agricultural and Forest Meteorology 134, 39-59 (2005) “Photosynthetic and structural characteristics of canopy and shrub trees in a cool-temperate deciduous broadleaved forest”
 - 6) 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”
 - 7) Shirato Y and Yokozawa M: Soil Science and Plant Nutrition, 51, 405-415 (2005) “Applying the Rothamsted Carbon Model for long-term experiments on Japanese paddy soils and modifying it with simple tuning of decomposition rate”
 - 8) S. Jia, and T. Akiyama: Agricultural and Forest Meteorology, 134, 70-80 (2005)
“A precise, unified method for estimating carbon storage in cool-temperate deciduous forest ecosystems”
 - 9) Adachi M., Konuma H. and Koizumi H.: Applied Soil Ecology, 34, 258-265 (2006) “Differences in soil respiration between different tropical ecosystems”
 - 10) Lee M.-S., Mo W., and Koizumi H.: Ecological Research, 21, 828-839 (2006)
“Soil respiration of forest ecosystems in Japan and global implications.”
 - 11) Satomura T., Hashimoto Y. and Koizumi H.: Ecological Research, 21, 741-753 (2006) “Effect of evergreen understory bamboo on the seasonal pattern of fine root demography in a cool-temperate deciduous forest in central Japan”
 - 12) Shirato Y and Yokozawa M: Soil Biology and Biochemistry, 38, 812-816 (2006)
“Avoid hydrolysis to partition plant material into decomposable and resistant fraction for use in the Rothamsted carbon model”
 - 13) Ohtsuka T., Mo W., Satomura T., Inatomi M. and Koizumi H. s: DOI: Ecosystem 10.1007/s10021-007-9017-z (2007)
“Biometric based carbon flux measurements and net ecosystem production (NEP) in a temperate deciduous broad-leaved forest beneath a flux tower”
- (4) 陸域炭素収支のデータベースの構築と総合的解析
- 1) S. Yamamoto, H. Koizumi: Agricultural and Forest Meteorology, 134, 1-3 (2005) “Long-term carbon exchange at Takayama site, a cool-temperate deciduous forest in Japan (Foreword of Special Issue)”
 - 2) S. Yamamoto, N. Saigusa, M. Gamo, Y. Fujinuma, G. Inoue and T. Hirano, Journal of Geographical Sciences, 15, 142-148 (2005)
“Findings through AsiaFlux network and view toward the future”
 - 3) N. Saigusa, S. Yamamoto, T. Ohtsuka, S. Murayama, H. Kondo, and H. Koizumi: Phytion, Vol. 45, 81-88 (2005)
“Inter-annual variability of carbon budget components in a cool-temperate deciduous forest in Japan (Takayama, AsiaFlux)”
- (上記の論文リストにおいては2002年—2004年の発表、日本語・中国語による発表などはスペースの関係で割愛している、詳しくは「詳細報告版」を参照されたい)