

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

(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

独立行政法人森林総合研究所

立地環境研究領域

松浦陽次郎

独立行政法人産業技術総合研究所

環境管理技術研究部門 大気環境評価研究グループ

山本晋(平成17年3月まで)

村山昌平・三枝信子

北海道大学 大学院農学研究院

小池孝良

信州大学 農学部

安江恒

京都大学 フィールド科学教育研究センター

徳地直子

神戸大学 大学院自然科学研究科

金澤洋一

龍谷大学 国際文化学部

大澤晃(平成17年4月から京都大学)

〈研究協力者〉 独立行政法人森林総合研究所

立地環境研究領域

森下智陽

九州支所

梶本卓也

気象環境研究領域

中井裕一郎

水土保持研究領域

大丸裕武

独立行政法人産業技術総合研究所

大気環境評価研究グループ

谷田部裕美・近藤裕昭

飯塚悟・王輝民

北海道大学

北方生物圏フィールド科学センター

笹賀一郎

岡山大学大学院環境学研究科

廣部宗

平成14～18年度合計予算額 240,865千円

(うち、平成18年度予算額 33,300千円)

※上記予算額には、間接経費 55,588千円を含む

[要旨] 北東アジアに広がる落葉針葉樹林(カラマツ林)生態系における炭素収支と炭素循環を、タワーフラックス観測と生態学的手法によって明らかにした。観測拠点は中国東北部の黒竜江省ハルビン市郊外の老山(45N-128E)と、中央シベリアのトゥラ(64N-100E)の2箇所に設けた。また、フラックス観測を北海道苫小牧国有林(苫小牧サイト)では2000年夏から2004年9月まで実施している。

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

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 $320 \text{ gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 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 $121-190 \text{ gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 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がかなりフラックス観測結果から求めた値を上回った。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、林床植生固定量が算入されていないことによると考えられた。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態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異なっていた。

[キーワード] 北東アジア、カラマツ林生態系、フラックス、炭素収支、NEP

1. はじめに

アジア陸域生態系の中で森林生態系が占める割合は大きく、特に植物の生育型による類型化でその分布面積をみると、落葉針葉樹(カラマツ)が優占する森林生態系が最も多くの面積を占めていることがわかる。これは、北欧やヨーロッパ北部、また北米大陸の北方針葉樹林帯が常緑針葉樹優占の森林生態系であるのに対して、北東アジア(ユーラシア北東部)には、落葉針葉樹であるカラマツが広大な森林生態系を形成し、さらに東・中央シベリアにかけては永久凍土上にカラマツ林が成立するという、地球上ではこの地域にしか見られない永久凍土上のカラマツ林生態系が広がっている。

この様なアジア北東部の特異性、カラマツ林生態系の広大さにもかかわらず、これまで生態系の総合的な研究は進んでいない。アジア陸域生態系の炭素収支を正確に推定し、土地利用変化に伴う生態系炭素収支予測には、カラマツ林生態系における炭素収支研究が必須である。

2. 研究目的

本サブサブ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、中国東北部、中央シベリア、北海道苫小牧に観測拠点を設け、陸域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ことにより、アジア/北東ユーラシア地域の炭素収支推定結果の精度向上をはかる。特にカラマツ林生態系において、気象条件の変化が亜寒帯生態系の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敏感度を求める。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目的としている。

3. 研究方法

カラマツ林生態系の観測拠点を、北海道苫小牧国有林及び北海道大学苫小牧研究林、中国東北部の黒竜江省ハルビン市郊外の老山実験林、中央シベリア・トゥラの3箇所にした。このうちフラックスの継続観測は老山とトゥラで行っている。また、北海道苫小牧国有林（苫小牧サイト）では2000年夏から2004年9月までフラックス観測を実施した。

（1）二酸化炭素フラックス観測

1）苫小牧、老山におけるフラックス連続観測

北海道苫小牧のカラマツ林（苫小牧サイト）は、日本で他に類を見ない広さ（100 ha）と平坦な地形（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的に行い、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ると同時に、林冠および林床植生の生産力や土壌炭素の観測に基づく生態学的方法による結果とのクロスチェックを実施するためのデータを提供した。

2）トゥラにおけるフラックス観測

タワーの森林樹冠上約13m地点で、乱流変動法による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。併行して、タワー観測期間外におけるCO₂フラックス推定のため、タワー設置地点から約25km離れたトゥラ市街地の露場において一般気象を2004年6月から2005年9月まで連続観測した。ロシア保安局の要求する機材移管手続きが遅延したため、2006年成長期のタワー観測、2005年9月以降の露場一般気象観測は機器の設置許可が下りず、実施できなかった。

（2）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

1）老山における生態学的調査

老山ではタワー観測地点から500m程離れた地点に、破壊調査プロットを選定した。プロット内の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。プロットからカラマツを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、プロットごとにD²H（D：胸高直径、H：樹高）と各部の量との相対成長式を得、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T/R比をプロット内の全個体に適用して求めた。下層植生は、1m×1mのサブプロットを設け、そこに含まれる植生の地上部を全て刈り取り調査し、現存量と生産量に換算した。

土壌呼吸は、携帯型光合成蒸散測定装置（LI-6400）を利用した。また、土壌に集積した炭素量推定については、老山演習林内のカラマツ林3箇所で行った土壌調査を行い、鉦質土壌深さ1mまでの土壌有機炭素集積量を推定した。

2）トゥラにおける生態学的調査

中央シベリア、トゥラでは、CO₂フラックス観測を行っている成熟林（約100年生）から約500

m離れた地点における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地上部・地下部（根）への配分比（T/R）、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、チャンバー法によって測定した。採取した空気試料はLI-820により二酸化炭素濃度を定量し、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。

永久凍土地帯のトゥラでは、カラマツ肥大成長の気候応答を検討した。カラマツ各30個体以上より年輪試料を採取し、軟X線デンシトメトリにより年輪幅、年輪内最大密度、年輪内平均密度の時系列を計測した。測定値の時系列を標準化した後、個体間の平均値を求めることによって生育地を代表する時系列変動であるクロノロジーを作成した。1928～1995年（n=68）を対象に、クロノロジーと気温及び降水量との相関関係を解析した。

炭素循環にかかわる凍土の栄養条件として、窒素動態を継続調査した。堆積腐植層と表層土壌を対象に、無機態窒素の移動量に関する調査を行った。

4. 結果・考察

（1）二酸化炭素フラックス

1) 苫小牧、老山における結果と考察

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)はそれぞれ345, 284, 323 $\text{gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ と見積もられ、平均的におよそ320 $\text{gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 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 $\text{gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ の幅をもつ結果が得られた(図1参照)。

苫小牧サイトで2000-2003年に観測した各種フラックスと気象要素から得られた生態系の反応に関する結果をまとめると以下のようなになる。

- (1) 積雪期(11-3月)を含む冬季、林冠上で0.3-0.7 $\text{gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ の安定した CO_2 放出が観測された。
- (2) 消雪直後、カラマツの展葉前にもかかわらず日中に明瞭な CO_2 吸収が始まった。これは林床植物の光合成の寄与と予想される。展葉前におけるNEPの日変化振幅は、消雪直後(2-3 $\mu \text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)から展葉直前(4-7 $\mu \text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)にかけて増加した。
- (3) 2002年1-4月、気温は他の年に比べて高く、その影響で展葉開始が2001、2003年より約2週間早かった。
- (4) 生態系レベルの量子収率と強光下でのNEPは6月に最大となった。これらの値は従来温帯林で得られた平均的な値に比べて極めて高い事がわかった。
- (5) 7月下旬から9月上旬にかけて、NEPは6月に比べて低下するとともに日によって大きく変動した。この原因には、[A]8月に霧が多発するために入力放射の変動が激しいこと、[B]気温・地温の上昇に伴い生態系呼吸が増加したこと、[C]6月から8月にかけて、同じ光条件下における光合成総生産が減少したこと、の3つの要因が関与したことが確認された。

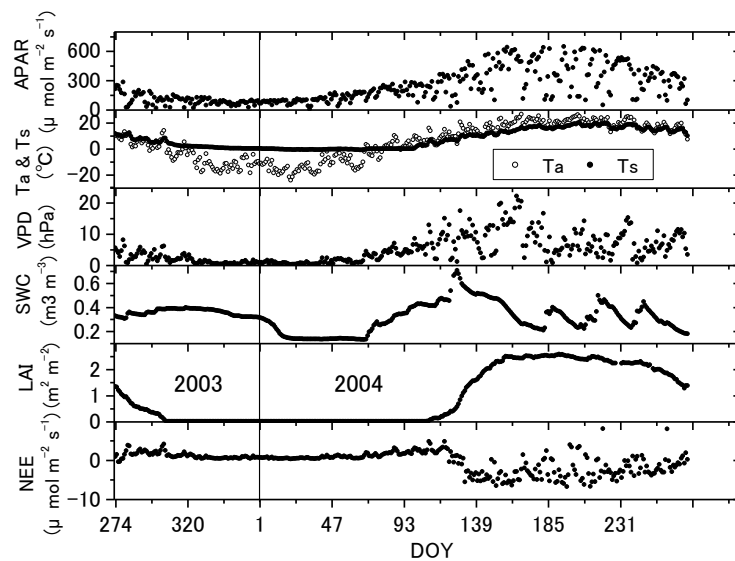


図1 老山サイトで2003年から2004年に観測された光合成有効放射の吸収量(APAR)、気温(Ta)、地温(Ts)、飽差(VPD)、体積含水率(SWC)、葉面積指数(LAI)および生態系純交換量(NEE)。

次に、老山と苫小牧の比較により、両サイトにおける炭素収支について下記の内容が明らかになった。

- (1) 両サイトにおける初夏(6月)の二酸化炭素吸収量は $168\text{--}183\text{ gC m}^{-2}\text{ month}^{-1}$ とほぼ同程度であったが、落葉直前(10月)では苫小牧 $12\text{ gC m}^{-2}\text{ month}^{-1}$ の吸収、老山サイト $32\text{ gC m}^{-2}\text{ month}^{-1}$ の放出となった。
- (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た。
- (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。

落葉性であるカラマツ林では、春の展葉のタイミング、着葉期間、夏季の降雨パターンなどが年炭素収支に影響するが、根呼吸の季節性、黄葉化のタイミングと針葉中の窒素濃度変化などに関する情報も必要であることが示唆された。

2) トウラにおける結果と考察

トウラにおける二酸化炭素のフラックス変化は以下ようになった(図2と図3)。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月中旬一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 $4\text{--}6\text{ micro mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ であった。

フラックスの日別積算値を算定するため、全30分観測値の約40%を占める品質不良な観測値をシンプルな経験モデル(入力要素は気温と日射量)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 $0.4\text{--}0.6\text{ t C/ha}$ であった。2004年は6月初旬からカラマツ開

葉とともにCO₂交換量NEEはマイナスつまり大気から地表への向きに生態系による吸収が増大し、6月下旬から7月中旬に最大の吸収を示した。その後、日射量や気温の低下とともに吸収は減少し、9月には放出に転じた。大気の乾燥度合いを示す日中最大の飽差は6月に1.5 kPaを越える大きな値を示したが、7月中旬以降は降水が頻繁であるため、小さい値を示した。2005年はタワー観測を開始した6月初旬の時点で展葉は完了しており、NEEは6月上旬に既に最盛期の吸収を呈した。その後はどちらかといえば吸収は徐々に減少し、8月下旬には放出側に転じた。図2と図3にはタワー観測前を含む露場気象観測による気温と日射量を用いたモデル計算値を示している。これによると、2005年は2004年よりも2から3週間程度、開葉後の生態系CO₂吸収の最盛期が早まっていることが推定される。なお、両図に示したようにタワーと露場での気温や日射量は良好な一致を見ており、露場観測データのみでも観測データの空白な中央シベリアではCO₂交換量の推定などに貴重な価値を有するものと考えられる。2005年は2004年よりも2〜3週間程度開葉〜生態系CO₂吸収の最盛期が早まっていることが推定される。

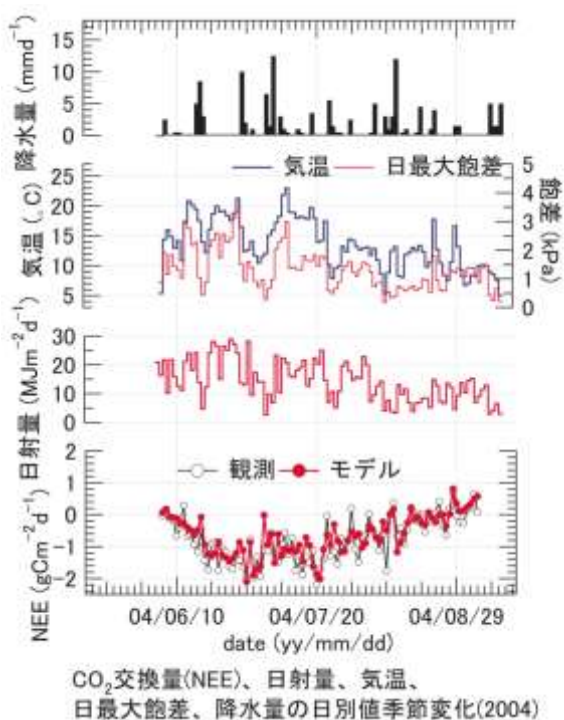


図2 トウラにおける2004年の観測結果

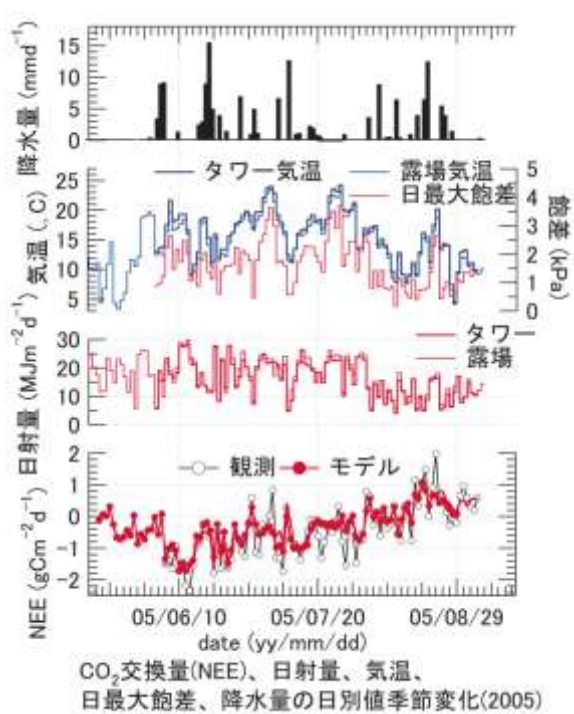


図3 トウラにおける2005年の観測結果

3) カラマツ林3サイトで観測された生態系純生産量の季節変化

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)の季節変化を比較した結果を図4に示す。ロシア・中央シベリア(トウラ)、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°C (トウラ)から $+8^{\circ}\text{C}$ (苫小牧)と高くなるにつれて、森林の生育期間(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。また、展葉開始前(4月)と落葉後(10月)のNEPを老山と苫小牧で比較すると、老山の4月と10月のNEPは苫小牧に比べて顕著に低い(炭素の放出である)ことがわかった。この違いを引き起こした原因として、土壌呼吸量や植物体の呼吸量の違いが寄与している可能性に加え、直接的な原因として、

苫小牧では中国東北部に比べて林床植物のバイオマスが大きく、カラマツの展葉前と落葉後に林床植生の光合成が活発に行われていることが関与していると予想された。吸収の開始から最盛期に向かう急激な増大はカラマツ展葉の進行によく同調していた。減少期についての生物学的な説明には未だ解明すべき点が多い。生態系の炭素吸収に重要なカラマツの開葉時期は活動層の表層融解や気温の経過などによって決まると推定されるが今後の長期観測継続を経て年々変動解析を必要とする。

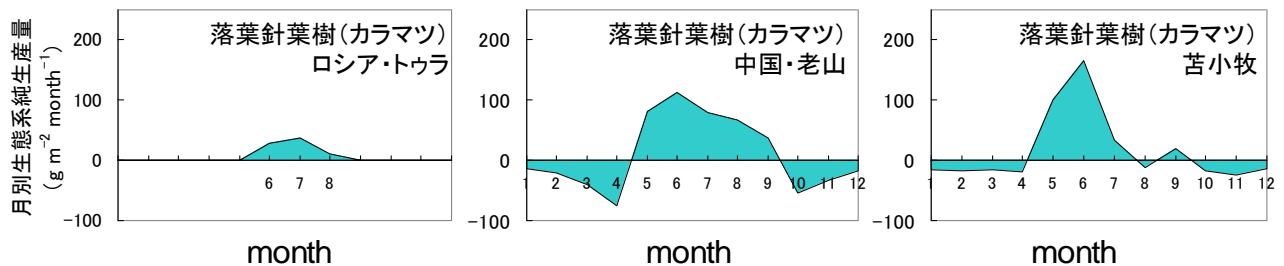


図4 中央シベリア・トゥラ、中国東北部・老山、および北海道・苫小牧で2003年から2004年にかけて観測された生態系純生産量(NEP)の季節変化

(2) 生態学的手法による炭素蓄積量及び炭素収支の推定

1) 老山における結果と考察

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94tonC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。これらは、これまでに北海道、中部地方および中国東北部に分布する若齢～壮齢林で得られた値¹⁾とほぼ似た値であった。一方、根は全体の15%を占め、T/R比は5.5となった。T/R比は北海道の林分で4.7²⁾、中部地方で3.8¹⁾、中国東北部で2.8¹⁾、3.5¹⁾との報告があり、本研究で得られた値はこれらよりやや大きい値であるが、シベリアのカラマツのT/R比が約1.3³⁾であることから、相対的に日本や中国東北部のカラマツ林とほぼ近い値である。広葉樹および下層植生の地上部合計現存量は、生態系全現存量の2%以下であるが、一次生産量では約7%と無視できない値を取ることが分かった。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。降水量が600～700mm/年と少ないことを反映して、土壌呼吸速度は、僅かにリター含水率と正の相関を示した。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3.6～7.5tonC(平均5.2)、深さ1m迄の鉾質土壌に43～73tonC(平均63)が集積していた。

2) トゥラにおける結果と考察

フラックス観測タワーから約500m離れた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、3.5tonC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15tonC、土壌有機炭素は97tonC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（図5）。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。一方、根の現存量は150～200年生以降も若干増加した。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 ton/ha/yr前後のピークに達した（図6）。その後林齢とともに低下し、CO2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 ton/ha/yrの範囲で推移した。

以上の結果から、1) 30年生ぐらい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、また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壤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壤条件が悪化して生産力が低下し始めると、制限された土壤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。

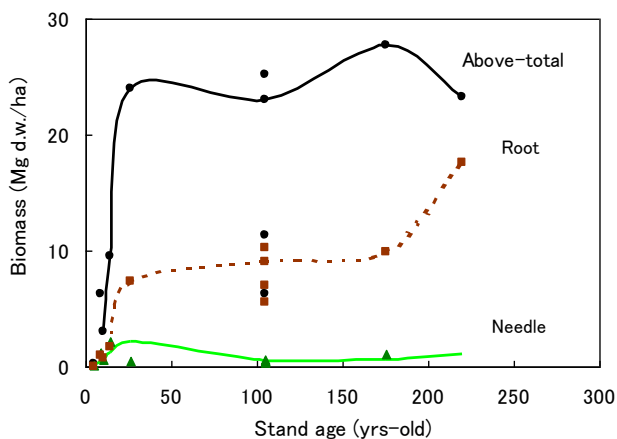


図5 中央シベリア・トゥラのカラマツ林における林齢と地上部合計、根及び葉の現存量の関係
(曲線はフリーハンド)

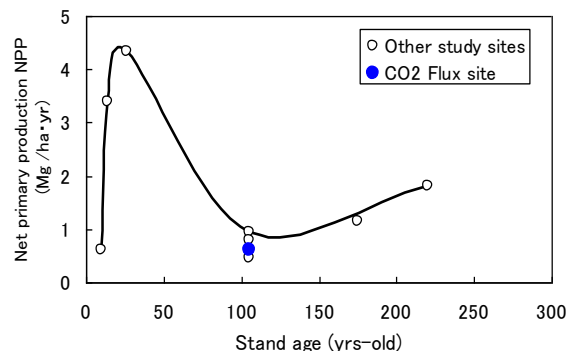


図6 中央シベリア・トゥラのカラマツ林における林齢と純生産量の関係
(曲線はフリーハンド)

1928年から1995年 (n=68) を対象に、クロノロジーと気温及び降水量との相関関係を解析した結果、生育地によらず年輪幅には5月下旬から6月中旬にかけての気温が正の影響を及ぼしていた。また、生育地によっては冬季及び5月の降水量との負の相関が認められた。従って、カラマツの年輪幅は成長開始時期の気温に主に制限されていると言える。積雪量も年輪幅を制限する重要な要因であるが、その影響は生育地の地形的要因によって左右されることが明らかになった。年輪内最大密度には主に7月の気温が正に寄与しておることが明らかになった。

年輪幅は主に分裂細胞数を、年輪内最大密度は主に細胞壁厚を反映していると考えられ、それぞれには別の気候要素が影響している。そこで炭素量固定を最も忠実に表している年輪実質成長

量（年輪幅と年輪密度の積にて算出）の気候応答を解析したところ、気温より冬季から春季の降水量との相関が顕著に認められた。このことから、春先や夏季の気温はそれぞれ細胞分裂数や細胞壁厚に影響を及ぼすものの、年間を通した炭素固定量へ影響としては相殺されてしまう可能性が考えられる。結果的に、春先の積雪がカラマツの炭素固定量の年変動に最も影響を及ぼしている可能性が高い。

植物生育に必須の窒素が、永久凍土地帯ではどのように律速条件になっているのかを明らかにするために、土壌中の無機態窒素現存量を調べた結果、土壌中の無機態窒素は80%以上がアンモニア態であり、その移動量は年間に約1~2 kgN/haであるという結果を得た。また、硝化率はきわめて低く、調査年次によらず同じ傾向を示した。ただし、土壌中の無機態窒素の現存量は、年ごと、地点ごとに大きな違いが生じていた。また、表層30cmまでの土壌層では、培養によっても無機態窒素は見かけ上生成されず、不動化が卓越しているという結果を得た。これは凍土地帯の根圏における窒素獲得に際しては、無機態窒素以外の形態が大きな比率を占めることを示唆しており、冷温帯までの常識的な窒素動態様式とは大きく異なっていた。

（3）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（矩形で囲んだ数値）とフロー（楕円で囲んだ数値）に分けて、以下の模式的な生態系炭素循環図式に当てはめると、老山（図7）とトゥラ（図8）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1.2tonC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13tonC/ha/yr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0.5tonC、生態学的手法で推定したNPPは0.48tonC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、 $NEP = NPP - Rh = 0.48 - 0.78 = -0.3$ tonC/ha/yr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。タワーフラックス観測による収支が正しいとすると、両者の差である0.9tonCが生態系内の他の構成要素によって固定されたことになる。本研究では永久凍土地帯のカラマツ林における林床植生、特に地衣・蘚苔類およびツツジ科灌木類の成長量を測定していないので、これらの構成要素による炭素固定速度はカラマツによる固定と同じオーダーで起こっている可能性もある。また、地下部の細根リターは推定値であり、細根の枯死速度は今回の推定値0.15tonC/ha/yrの数倍である可能性もある。これらの炭素循環の未測定プロセスを明らかにすることによって、両者の差は縮まるものと考えられる。

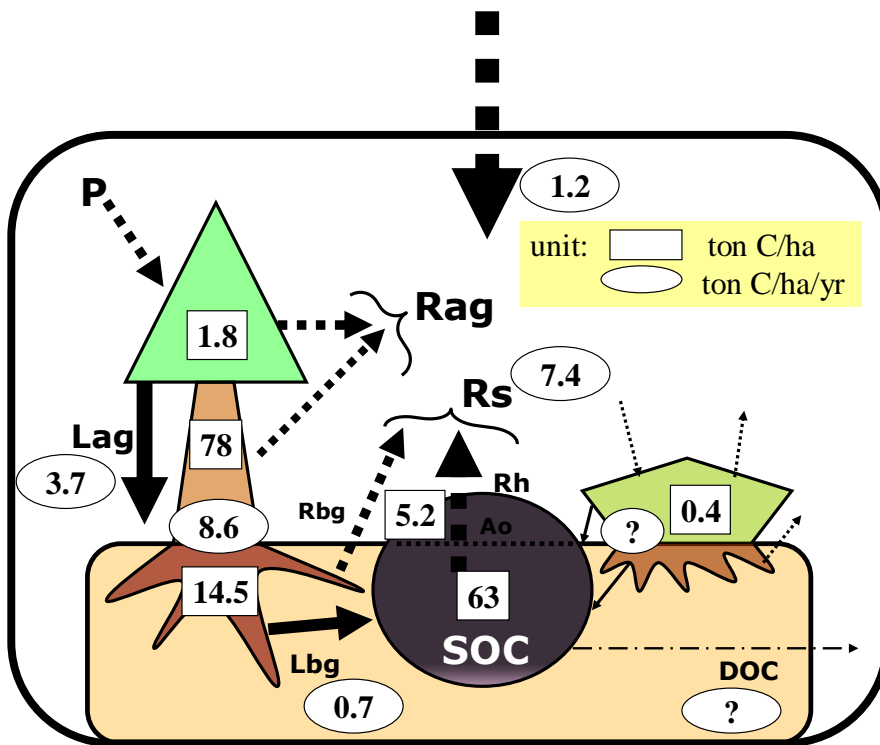


図7 老山における炭素循環・収支を模式的に表した図

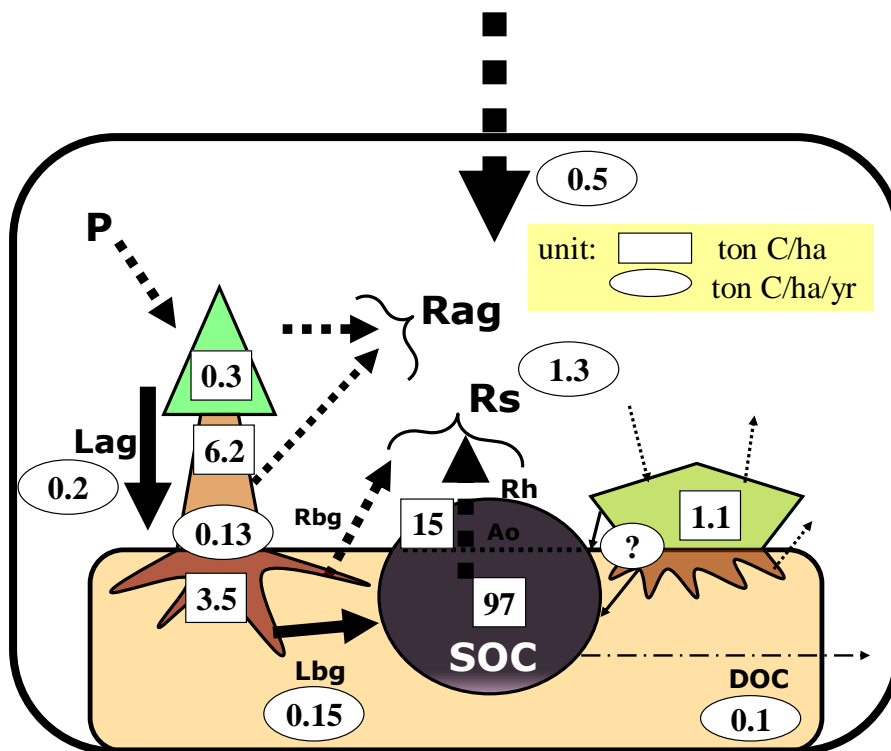


図8 トゥラにおける炭素循環・収支を模式的に表した図

生態系全体の炭素集積量が、老山ではヘクタールあたり約163tonCであり、そのうちの58%が地は39%が蓄積していた。同様の生態系全体の炭素分布がトゥラでは、植物体に9%、堆積腐植層に12%、鉍質土壌には79%が蓄積していた。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。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

これまで研究の空白域であった、アジア陸域生態系の森林域で最も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ラマツ林生態系において、その炭素蓄積レジムと収支レジムが明らかになったことは、世界で初めてである。また、長期連続的に生態系の二酸化炭素収支を測定することが困難であった北東アジアのカラマツ林生態系において、気象観測タワーを用いたフラックス連続観測の実施により、多点での二酸化炭素収支の同時観測と比較解析が可能になった。

(2) 地球環境政策への貢献

近年、極東ロシアや中ロ国境周辺に広がる北方林の森林資源量減少が報じられ、かつての東南アジアのように資源枯渇の可能性も出てきた。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、本研究で明らかになったように、カラマツ林生態系は生育環境によってひじょう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。本研究で明らかになったように、炭素蓄積の場として土壌の持つ役割が大きいことから、土壌保全を考慮した資源利用の政策決定が必要である。本研究の成果はそのような政策決定に科学的根拠を与えることができる。さらに本課題で得られたデータは、本プロジェクトで構築されたデータベースによって広く一般に公開され、観測点の乏しい北東アジアにおいて、陸域炭素循環の高精度評価をめざす陸域生態系モデルや衛星リモートセンシングの技術開発のために、貴重な検証データとして手法の検証と高度化に貢献する。

6. 引用文献

- 1) Shi F, Qu L, Wang W, Matsuura Y, Koike T, Sasa K: Eurasian Journal of Forest Research 5, 23-32 (2002)
“Aboveground biomass and productivity of *Larix gmelinii* forests in northeast China”
- 2) 佐藤大七郎, 「人工林の一次生産」研究班: 日本林学会誌 52 (5), 154~158 (1970)
「カラマツ植栽林の一次生産: JPTF-66 KOIWAIの調査結果のあらまし」
- 3) Kajimoto T, Matsuura Y, Sofronov MA, Volokitina VA, Mori S, Osawa A, Abaimov AP: Tree Physiology, 19, 815-822 (1999)
“Above- and belowground biomass and net primary productivity of a *Larix gmelinii* stand near Tura, central Siberia”

7. 国際共同研究等の状況

(1) 協力案件名：日中大学姉妹校提携

カウンターパート氏名：祖 元剛・王 文杰

所属：東北林業大学森林植物生態学国家重点研究室

国名：中華人民共和国

参加・連携状況：試験地にて長期モニタリングと生産力調査を実施し、その成果を文科省学術振興会の補助金を得て、王氏が博士号（論文博士）を取得した。

国際的な位置づけ：中国東北部の光合成生産に関する国際拠点形成に貢献した。

(2) 協力案件名：日露科学技術協力協定に基づく共同研究

カウンターパート氏名：Anatoly P. ABAIMOV(2006年7月逝去), Olga A. ZYRYANOVA

所属：ロシア科学アカデミー・スカチェフ森林研究所

国名：ロシア連邦共和国

参加・連携状況：中央シベリア・トゥラにおける現地調査を共同参加の形で進めている。

国際的な位置づけ：研究データの空白域に日露共同研究による長期観測の拠点が確立された。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) Kajimoto T, Matsuura Y, Osawa A, Prokushkin AS, Sofronov MA, Abaimov AP: Plant and Soil 255, 281-292 (2003)

“Root system development of Larix gmelinii trees affected by micro-scale conditions of permafrost soils in central Siberia”

- 2) Qu L, Kayama M, Akasaka M, Kitaoka S, Sasa K, Koike T: Eurasian Journal of Forest Research 7, 43-51 (2004)

“Micro- environmental analysis of natural regeneration of larch forests in northern Japan”

- 3) Matsuura Y, Kajimoto T, Osawa A, Abaimov AP: PHYTON 45, 51-54 (2005)

“Carbon storage in larch ecosystems in continuous permafrost region of Siberia”

- 4) Wang W, Zu YG, Wang HM, Hirano T, Takagi K, Sasa K, Koike T: Journal of Forest Research 10, 57-60 (2005)

“Effects of collar insertion and soil respiration in a larch forest measurement with a LI-6400 soil CO₂ flux system”

- 5) 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”

- 6) 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”

- 7) Wang W, Zu Y, Cui S, Hirano T, Takagi K, Watanabe Y, Koike T: *Tree Physiology* 26, 1363-1368 (2006)
 “Changes in CO₂ exchange during the development of larch (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) cones.”
- 8) Yanagihara Y, Shibata H, Matsuura Y, Koike T: *Eurasian Journal of Forest Research* 9, 79-95 (2006)
 “Effects of soil and vegetation types on soil respiration rate in larch plantations and a mature deciduous broadleaved forest in northern Japan.”
- 9) 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.”
- 10) 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”

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 松浦陽次郎：科学，74（3），335-340（2004）
 「周極域の森林保全」
- 2) Koike T, Kitaoka S, Ichie T, Lei TT, Kitao M: *In* Shiomi, M. and Kawahata, H. eds. *Global Environmental Change in the Ocean and on land*. TerraPub, Tokyo, 453-472 (2004)
 “Photosynthetic characteristics of mixed broadleaf forests from leaf to stand”

（2）口頭発表（学会）

- 1) Daimaru H, Matsuura Y, Kajimoto T, Zyryanova OA: *Proceedings of the 7th International Conference on Global Change: Connection to the Arctic (GCCA-7)*, p127-130, Fairbanks (2007)
 “Influence of slope landform on the ground thermal regime in Tura, central Siberia.”
- 2) Osawa A, Kajimoto T, Matsuura Y, Abaimov AP, Zyryanova OA, Tokuchi N, Hirobe M, Kondo K, Nakai Y, Daimaru H, Prokushukin AS, Volokitina AV, Sofronov MA: *Proceedings of the 7th International Conference on Global Change: Connection to the Arctic (GCCA-7)*, p208-211, Fairbanks (2007)
 “Age sequence of stand structure, carbon accumulation and allocation, and net primary production in permafrost larch (*Larix gmelinii*) ecosystems in Siberia: Current knowledge and future study.”
- 3) Tokuchi N, Hirobe M, Kondo K, Hobara S, Mizumachi E, Matsuura Y, Kajimoto T, Abaimov AP, Zyryanova OA: *Proceedings of the 7th International Conference on Global Change:*

Connection to the Arctic (GCCA-7), p213-216, Fairbanks (2007)

“Nitrogen cycling in larch forests on permafrost in central Siberia.”

- 4) Matsuura Y, Kajimoto T, Nakai Y, Osawa A, Morishita T, Zyryanova OA, Abaimov AP:
Proceedings of the 7th International Conference on Global Change: Connection to the
Arctic (GCCA-7), p258-261, Fairbanks (2007)

“Carbon budget in a larch (*Larix gmelinii*) ecosystem of continuous permafrost region
in central Siberia.”

- 5) Nakai Y, Matsuura Y, Kajimoto T, Zyryanova OA, Yamamoto S: Proceedings of the 7th
International Conference on Global Change: Connection to the Arctic (GCCA-7), p263-266,
Fairbanks (2007)

“Water and CO₂ exchange at a Gmelin larch forest on continuous permafrost of central
Siberia during growing seasons.”

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

「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」

2006年10月14日、於：早稲田大学・井深大記念ホール

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

平成18年度 日本森林学会賞受賞（小池孝良）