

学 位 論 文 題 名

カラマツ林における大気

－生態系間の二酸化炭素交換過程に関する研究

学位論文内容の要旨

1. 1997 年 12 月の気候変動枠組条約締約国会議（COP3）で、温室効果ガス削減の数値目標達成に森林生態系による二酸化炭素（ CO_2 ）の吸収を勘案することが決定され、2001 年 11 月のモロッコ・マラケッシュの COP 7 ではその具体的な運用ルールが決定された。しかし、地球規模の炭素収支における森林生態系の役割については科学的に解明されていない点が多く、森林による CO_2 吸収を定量的に評価することが国際的な課題となっている。そのため、1990 年代後半以降、様々な森林生態系において微気象学的方法（渦相関法）による CO_2 フラックス（生態系と大気間の CO_2 交換速度）の長期、連続観測が行われるようになった。北東ユーラシアには、落葉針葉樹であるカラマツの森林が広大に分布している。この森林は地球規模の炭素循環に大きな役割を果たしていると考えられているが、科学的知見は十分でない。また、COP3 および COP6 の採択により、植林地の炭素固定機能の重要性が増している。そのため、本研究では、北海道苫小牧市のカラマツ人工林に整備されたタワーにおいて、渦相関法（以下、EC 法）を用いてカラマツ林の CO_2 収支を 2001～2003 年の 3 年間、連続観測した。さらに林床空間においても EC 法を適用し、土壌および林床植生の CO_2 収支を連続観測した。得られた実測値をもとに、カラマツ林の炭素吸収量の定量評価を行ない、炭素吸収量の季節変化および年次変動を明らかにした。また、林分レベルの光合成および呼吸の環境応答特性や、森林生態系の CO_2 収支に与える林床植生の役割についても定量的に解析し、カラマツ林と大気との間の CO_2 交換過程を明らかにした。

2. 対象とした研究サイト（カラマツ人工林）は、平坦な地形に広がるほぼ均質な森林（面積 100 ha）であり、EC 法の適用には理想的な場所であった。この恵まれた観測条件を利用して、EC 法の有効性に関する検討を行った。観測されたエネルギー収支が良く閉じることや、乱流のスペクトル解析の結果から判断すると、EC 法で観測された CO_2 フラックスの妥当性が高いことが示唆された。また、積雪条件において不自然な CO_2 吸収が観測されることや、観測高度によって CO_2 フラックスが異なるなど、EC 法における問題点を示した。

3. カラマツ林の正味の CO_2 吸収量を意味する純生態系生産量（NEP）は、生態系の総光合成量を意味する総生態系生産量（GEP）と生態系呼吸量（RE）の差として表すことができる。EC 法を用いて森林上で観測された CO_2 フラックスに森林空間における CO_2 貯留変化を加えたものが NEP であり、NEP と GEP は符号が負のとき大気への CO_2 放出を意味する。NEP の実測値（30 分平均値）にモデル（Lloyd & Taylor 式、

非直角双曲線)を適用し、地温や光合成有効光量子束密度 (PPFD) から GEP と RE を推定した。GEP の季節変化は、気象条件、キャノピーの葉面積指数 (LAI) , および最大光合成速度 ($P_{\max}$) によって支配された。一方、RE は主に地温によって変化した。GEP にとって最も重要な環境要因は PPFD であったが、強光条件においては、空気が乾燥すると気孔閉鎖により GEP が減少する傾向がみられた。しかし、本サイトではそのような乾燥条件になることは少なかった。 $P_{\max}$ は、ほぼ LAI に対応した季節変化を示したが、秋期よりも春期の方が値は大きかった。これは光合成の生理的能力の違いによると考えられる。

4. 2001~2003 年における CO_2 交換量の年積算値は、NEP で 472, 503, 525 $\text{gC m}^{-2} \text{y}^{-1}$, GEP で 1575, 1543, 1667 $\text{gC m}^{-2} \text{y}^{-1}$, RE で 1103, 1040, 1143 $\text{gC m}^{-2} \text{y}^{-1}$ と推定された。3 年間の平均 (±標準偏差) は、NEP, GEP, RE でそれぞれ 499 ± 26 , 1595 ± 65 , 1095 ± 52 $\text{gC m}^{-2} \text{y}^{-1}$ となった。また、RE が GEP に占める割合は 67~70% の範囲であった。このように、 CO_2 交換量の年積算値における年次間差は比較的小さかったが、それらの季節変化には大きな違いが認められた。特徴的なのは、2002 年の GEP であった。この年は冬から春にかけて気温が高かったため、融雪と展葉が他の 2 年より 2 週間ほど早く、森林の光合成も早く始まった。しかし、2002 年の夏期は $P_{\max}$ が小さく、PPFD も低かったため、GEP が他の年より小さくなった。結果として、成長期間が長いにもかかわらず 2002 年の GEP は他の年より小さくなった。2002 年における $P_{\max}$ の低下の原因として、多雨による Rubisco の損失や早期の開芽による窒素利用効率の減少が考えられる。なお、2003 年 7 月の気温は他の年より 2~3° C 低かったが、GEP が減少することにはなかった。低温は大気飽差を低下させ、大気の乾燥を緩和するため、間接的に GEP を増大させることとなった。成長期間中の土壌水分は 0.2~0.4 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ で推移していたが、土壌水分の変化が GEP や RE に大きな影響を与えることはなかった。カラマツ人工林は、北海道や世界の他の森林と比べて高い炭素固定能力を示した。これは、冷温・湿潤・多雨な気候により、カラマツの持つ高い生産能力が維持されるためであることが示唆された。

5. 森林上と林床空間で観測した CO_2 フラックスをもとに、キャノピーと林床 (林床植生+土壌) の CO_2 交換量の季節変化を解析した。5 月上旬は、キャノピーの展葉が十分でなく林床に光がよく届いたため、林床植生の光合成が活発に行われた。また、地温が低く土壌呼吸量が小さかった。そのため、林床植物の光合成量が土壌呼吸量を上回り、昼間は小さいながら林床が CO_2 のシンクとなった。しかし、7 月上旬になりキャノピーが閉じると林床植生の光合成が低下し、土壌呼吸量が光合成量を上回り、昼間でも林床は CO_2 のソースとなった。11 月は、落葉のため林床の光環境が改善されたが、下層植生の老化が進み、光合成能力が低下したため CO_2 のシンクとはならなかった。キャノピーの CO_2 吸収量のピークは 6 月で、林床の CO_2 放出のピークは 8 月だった。森林全体の NEP が 8 月に大きく減少するのは、林床からの CO_2 放出量の増大が原因と考えられた。

6. 2003 年 4 月下旬~11 月の無積雪期間におけるカラマツ林における CO_2 収支について、キャノピーと林床の分離評価を行なった。この期間にキャノピーが吸収した CO_2 量 (1322 gC m^{-2}) の 52% が林床から、48% が大気から供給された。また、森林全体の GEP (1633 gC m^{-2}) に対して、キャノピーと林床の寄与はそれぞれ 93%, 7% だった。また RE (1021 gC m^{-2}) に関しては、それぞれ 21%, 79% だった。このことから、キャノピーが吸収する CO_2 の約半分が林床から供給され、林床植生と土壌が森林全体の NEP に大きな影響を及ぼしていることが確認できた。さらに、林床

植生の GEP は森林全体の GEP の 7% を占め、林床植生の CO_2 固定量は無視できないことが明らかとなった。これは、林床植生が繁茂する、降水量の豊富な東アジアの森林における CO_2 収支の特徴のひとつといえる。

学位論文審査の要旨

主 査	助 教 授	平 野 高 司
副 査	教 授	浦 野 慎 一
副 査	教 授	小 池 孝 良
副 査	助 教 授	谷 宏

学 位 論 文 題 名

カラマツ林における大気

－生態系間の二酸化炭素交換過程に関する研究

本論文は5章からなり、図33、表5、引用文献116を含む120ページの和文論文で、参考文献6編が添えられている。

1997年の気候変動枠組条約締約国会議（COP3）で、温室効果ガス削減の数値目標達成に森林による二酸化炭素（CO₂）吸収を考慮することが決定し、2001年のCOP7では具体的な運用ルールが決まった。しかし、地球規模の炭素収支における森林生態系の役割については解明されていない点が多く、森林によるCO₂吸収の定量評価が国際的な課題となっている。北東ユーラシアには、カラマツ属の森林が広大に分布しており、地球規模の炭素循環に大きな役割を果たしていると考えられているが、科学的知見は十分でない。また、COP7にともない植林地による炭素固定の重要性が増している。本研究では、カラマツ林における大気と生態系間のCO₂交換過程を明らかにするために、北海道苫小牧市の平坦な地形に広がる面積100haの均質なカラマツ人工林において、純生態系生産量（NEP、正味生態系CO₂吸収量）を渦相関法により2001～2003年の3年間、連続測定した。また、実測したNEPから、非線形回帰モデルを用いて総生態系生産量（GEP、生態系光合成量）と生態系呼吸量（RE）を推定した。

GEPの季節変化は、主に光合成有効放射、葉面積指数（LAI）、および最大光合成速度（ $P_{\max}$ ）の変化によって生じた。しかし強光条件では、飽差の増大により気孔閉鎖が起これ、GEPが減少する傾向がみられた。 $P_{\max}$ はほぼLAIに対応した季節変化を示したが、秋季よりも春季の方が値は大きかった。一方、REは主に地温の変化にともなって季節変化した。

2001～2003年におけるCO₂交換量の年積算値の平均（±標準偏差）は、NEP、GEP、REでそれぞれ499±26、1595±65、1095±52 gC m⁻² y⁻¹となった。また、REがGEPに占める割合は67～70%であった。このことは、光合成で吸収されたCO₂の7割程度が呼吸によって大気へ放出されたことを示している。このように、CO₂交換量の年次差は比較的小さかったが、季節変化に

は大きな違いが認められた。特徴的なのは、2002 年の GEP であった。この年は冬から春にかけて気温が高かったため、融雪と開葉が他の年より 2 週間ほど早く、光合成も早く始まった。しかし、夏季は $P_{\max}$ が小さく、日射量も小さかったため、GEP が他の年より小さくなった。その結果、成長期間が長いにもかかわらず、2002 年の GEP は他の年より小さくなった。2002 年の $P_{\max}$ の低下は、多雨による光合成酵素 (Rubisco) の損失や早期の開葉による窒素利用効率の低下が原因であると考えられた。

2003 年には林床空間にも渦相関法を適用し、林床 (林床植生 + 土壌) の CO_2 交換量を評価した。その結果をもとに、林冠と林床の CO_2 交換量の季節変化を解析した。5 月上旬は、林冠の展葉が十分でなく林床に光がよく届いたため、林床植生の光合成が活発に行われた。また、地温が低く土壌呼吸量が小さかった。そのため、林床植物の光合成量が土壌呼吸量を上回り、昼間は小さいながら林床が CO_2 のシンクとなった。しかし、7 月上旬に林冠が閉じると、林床植生が繁茂していたにもかかわらず、土壌呼吸量が光合成量を上回り、昼間でも林床は CO_2 のソースとなった。11 月は、落葉のため林床の光環境が改善されたが、下層植生の光合成能力が低下したため、 CO_2 のシンクとはならなかった。

2003 年 4~11 月におけるカラマツ林の CO_2 収支について、林冠と林床の分離評価を行なった。この期間に林冠が吸収した CO_2 量の 52% が林床から、48% が大気から供給された。また、森林全体の光合成量に対して、林冠と林床の寄与はそれぞれ 93, 7% だった。また呼吸量については、それぞれ 21, 79% だった。このことは、林冠が吸収する CO_2 の約半分が林床から供給され、林床植生と土壌が森林全体の CO_2 収支に大きな影響を与えることを示している。さらに、林床植生の CO_2 固定量は無視できないことが明らかとなった。これは、林床植生が繁茂する東アジアの森林における CO_2 収支のひとつの特徴といえる。

以上のように、本論文はカラマツ林の炭素吸収量の定量評価を行ない、炭素吸収量の季節変化および年変動を明らかにした。また、林分レベルの光合成および呼吸の環境応答特性や、森林生態系の CO_2 収支における林床植生の役割を解析し、カラマツ林と大気との間の CO_2 交換過程を明らかにした。得られた成果は学術的に貴重なものであり、北東アジアに広く分布するカラマツ生態系の環境機能を評価するための重要な科学的知見となる。よって、審査員一同は平田竜一が博士 (農学) の学位を受けるに十分な資格を有するものと認めた。