

地球一括計上

課題名	環境変動と森林施業に伴う針葉樹人工林のCO ₂ 吸収量の変動評価に関する研究		
担当研究機関	独立行政法人森林総合研究所		
研究期間	平成16－20年度	合計予算額 (当初予算額 ベース)	121,266千円（うち20年度 21,261千円）
研究体制	<p>研究体制</p> <p>(1) スギ・ヒノキ林の光合成生産と環境応答に関する研究（独立行政法人森林総合研究所）</p> <p>(2) 林分成長に及ぼす水分環境の影響評価（独立行政法人森林総合研究所、一部を九州大学へ研究委託）</p> <p>(3) 高齢林の成長動態の解明と立地条件の効果（独立行政法人森林総合研究所、一部を神戸大学および京都府立大学へ研究委託）</p> <p>(4) 長期成長動態調査による間伐効果の検証（独立行政法人森林総合研究所）</p> <p>(5) 針葉樹林動態モデルによるCO₂固定量の再評価（独立行政法人森林総合研究所）</p>		
研究概要	<p>研究概要</p> <p>1. 序（研究背景等）</p> <p>温室効果ガス削減に向けた第1約束期間が2008年にスタートした。一方、京都議定書3条4項で規定されている森林管理によるCO₂吸収量について、第2約束期間（2013年以降に始まる）における吸収源評価の運用ルールに対して科学的根拠をどのように設定するかが今後の課題である。森林によるCO₂吸収を促進可能な要因としては、適切な森林管理に期待される部分と、気温上昇など環境条件による自然増に期待される部分とがある。そのため、間伐などの森林管理による人為的な吸収量の増加分と、気温上昇や大気中CO₂濃度の上昇等に起因する非人為的要因による増加分とを切り分ける（ファクタリング・アウト）ことが求められ、それを科学的に解明する必要に迫られている。日本の森林についても、非人為的要因によるCO₂吸収量の増加と人為的要因(森林管理)による増加とを峻別するための科学的根拠を早急に提示して、CO₂排出削減交渉に臨む必要がある。</p> <p>我が国の森林によるCO₂吸収の大部分はスギおよびヒノキ人工林で占められる。こうした針葉樹人工林に関しては、数十年以上に及ぶ長期成長動態調査地が全国各地に設定されており、過去の成長経過が分析可能な状況にある。また、近年急速に進展してきた光合成等の生理的諸過程を分析する機器の利用やモデル化手法の開発に見通しが得られ、樹木の生理プロセスと気象観測データとの統合化によるモデル開発が現実的諸問題を解決するツールとして有効となってきた。したがって、上述したファクタリング・アウトを視野に入れたCO₂吸収量の評価も可能となっている。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>第2約束期間以降の吸収源の科学的な運用ルールを視野に、日本の森林のCO₂吸収の大部分を占めるとされるスギ・ヒノキ人工林を対象として、光合成速度の環境応答に関して予測性能が優れている生化学プロセスによる評価を行い、環境要因との相互作用を組み込んだ人工林におけるCO₂収支の生理的応答プロセスモデルを開発する。さらに森林構造に基づく森林動態モデルとの統合化により、間伐方法や伐期齢の延伸等による森林管理がCO₂吸収量に及ぼす効果と、非人為的要因による効果とを判別可能とするCO₂収支モデルを開発する。このモデル開発によって、ファクタリングアウトは勿論、間伐方法を異にする人工林の成長およびCO₂吸収量を予測することが可能となり、日本が第2約束期間へ向けた国際交渉を進める上で、透明性・検証可能性・公平性を具備した科学的根拠を提示することが本研究課題の目標である。</p> <p>本研究ではこの目的を達成するため以下の手順で研究を進める：(1)光合成等の生理的応答機構、および(2)水分環境等に対するストレス応答を解明するとともに、従来の研究で未解明であった(3)高齢人工林の成長機構を明らかにして、(4)生理的・構造的な統合モデルを構成して、(5)スギ・ヒノキ人工林の長期成長動態試験地のデータ解析によって、ファクタリングアウトを可能とする理論的根拠を提示・検証する。</p>		

3. 研究の内容・成果

(1) 間伐に伴う光合成の環境応答

林分の光合成生産に影響する光、養分、水分等の環境条件との関係を定量的に解明するとともに、間伐等の森林施業が光合成生産におよぼす効果を評価するため、本サブ課題では、間伐による光合成特性の変化と林冠構造の変化を明らかにし、複数の環境因子が関与する生理的応答機構の定量化を行った。

間伐による光環境等の変化に応じた光合成の応答特性を明らかにするため、林冠が閉鎖した27年生スギ人工林（林分密度1500本/ha）において、隣接木を伐倒して林冠を疎開した個体の樹冠の発達と光環境の経年変化を調べた。閉鎖状態の樹冠長は約4m、最大樹冠半径は1.5mで、隣接個体同士の樹冠が接触し始める約1m下方で葉の枯れ上がりが認められた。樹冠直下の相対光強度は3%以下であった。サンプル木の周囲を疎開により樹冠下部の相対光強度は20%程度に上昇した。疎開後3年で樹冠長は約5m、最大樹冠半径は約1.8mになった。相対光強度が5%程度となる樹冠内部では、疎開後も枝の枯れが発生した。以上のように間伐による林冠疎開は樹冠下部の光環境を改善するが、樹冠内部の関しては閉鎖林冠時と同様に光環境が向上するわけではなく、内部での葉の枯死が継続することが確認された。

間伐前後における個葉光合成の変化を明らかにするため、10年生ヒノキ人工林（林分密度3000本/ha）において本数間伐率50%の処理を行い、樹冠内の深度別の光強度と、光合成パラメータならびに窒素濃度の対応関係を分析した。間伐3ヶ月後には樹冠下部の針葉で光合成パラメータの上昇が確認され、間伐4年目秋まで高い値を維持した。間伐による光合成能力の増加は樹冠下部だけではなく、間伐2年目以降は樹冠上部でも認められた。光合成能力の増加は樹冠内の光環境の改善によって、葉内窒素が再分配することに起因していると考えられ、光-葉内窒素-光合成の相互関係を定量化することができた。また、地上部、細根現存量は、無間伐区より間伐区では小さかった。間伐が地上部、細根生産速度や細根消失速度の経時変動パターンに与える影響が小さかった。細根現存量から単木レベルの1年間の細根生産速度を算出した結果、間伐後数年間は地下部への同化産物分配が僅かに増加する可能性を示している。

(2) 林分成長に及ぼす水分環境の影響

主たる造林樹種であるスギおよびヒノキの生育適地の違いは、林木の成長そのものに影響するという意味でも、人工林としての炭素固定能に大きく影響する要因である。両樹種の生育適地は水分環境に対する耐性に依存していると考えられるが、水分環境に対する影響を予測するための乾燥耐性の機作については不明な点が多い。そこで、(1)スギとヒノキの水分特性値の比較、(2)水分特性値を組み込んだ光合成モデルによる水分環境変動の影響評価、(3)斜面位置を異にする立地環境に生育するスギ、ヒノキの成長差と立地環境および葉の生理機能との関係について、解明を進めた。

スギとヒノキの樹体全体の通水抵抗を比較した結果、土壌水分が十分な状況、乾燥した状況のいずれにおいてもヒノキはスギよりも通水抵抗が大きく、樹体内の水移動に不利な形態を持つ樹種であることが明らかになった。一方、土壌乾燥に伴う光合成速度の維持機構については、ヒノキの方がスギよりも低い木部圧ポテンシャルまで光合成を維持できる種であり、乾燥に有利な特性を有することが示された。

スギとヒノキの水分特性を組み込んだ光合成モデルにより水分環境（大気飽差、土壌水分）の影響を評価した。ヒノキはスギよりも大気飽差の増大にともない光合成が大きく低下した。このことから、温度上昇に伴って生じる大気飽差の増大の影響はヒノキで大きくなると予想された。これは、ヒノキがスギよりも大きな通水抵抗を有することが大きな原因であると考えられた。

斜面位置の立地環境を比較した結果、斜面上部は斜面下部に比べて土壌の乾燥が強いなど、恒常的な水分不足にさらされていた。成長については、斜面上下ともにスギの個体サイズが大きく、また斜面上下間の差もスギで大きかった。斜面上部では下部よりも日中の光合成速度が低く、斜面上部の樹体サイズの小ささの一因として水分不足による光合成速度の低下が示唆された。作成した光合成モデルから、野外条件での樹冠頂部における光合成速度などを精度良く再現することができた。このモデルによって樹冠全体での光合成速度を推定したところ、斜面上下でのスギとヒノキの成長差と対応した結果が得られた。

(3) 高齢林の成長動態と立地条件の関係

人工林の中でも高齢林に関する成長動態については情報が少なく、林分構造や立地条件がどのよ

うに成長や炭素収支に関与しているのか不明な点が多い。傾斜が急峻な林分では斜面系列における成長の違いが見られることから、その要因を明らかにするとともに、若齢級から高齢級に至る人工林の炭素固定量を解明する上でも、高齢林の成長を規定する要因を解明する必要がある。

調査地には、比較的高頻度で間伐作業が行われた高齢林として比叡山90年生ヒノキ林を、無間伐高齢林として京都府立大学大野演習林の90年生ヒノキ林を設定した。比叡山ヒノキ林では、斜面下部から上部に向かい樹高が低下し、立木密度は逆に斜面上部から下部にかけて減少していた。4年間の個体成長量は斜面下部でやや大きかったものの、斜面位置による違いは顕著ではなく、林分密度が低下しているために、斜面位置による成長量差が小さくなっているものと考えられた。一方、大野演習林の無間伐ヒノキ林では、斜面上部では長期間に渡り立木密度が高い状況下にあるため、全体的に生育不良の共倒れ型の林分構造を呈していた。斜面下部では早い段階で自己間引が起これ、成長に顕著な個体間差がみられた。

比叡山ヒノキ林の土壤養分環境は、斜面位置による違いよりも、微地形や植生等の違いによる空間分布に大きな偏りを生じていた。またヒノキ葉の窒素濃度については他地域に比べても高く、窒素不足でないと考えられ、本林分では土壤と樹体養分との密接な関係は見いだせなかった。比叡山ヒノキ林では、斜面位置による成長差がそれほど顕著でなかったが、土壤の養分環境の分析結果は、林木の成長差が顕著でないことにも対応していると考えられる。

斜面位置で大きな成長差が認められる大野演習林の無間伐ヒノキ林で、水分生理特性を斜面で比較したところ、斜面上部に生育するヒノキは、斜面下部に比べてキャビテーションを起こしやすい傾向にあり、水不足に対して気孔を閉じることで樹体からの水分損失を抑制していることが明らかになった。このように斜面上部に生育するヒノキは水不足に対して浸透調節等の積極的な対応を行わず、水不足を回避するために蒸散を抑制することを優先しているために、CO₂の吸収量・固定量が少なく、斜面下部に生育するヒノキとの成長に大きな差が生じたと考えられた。

(4) 長期成長動態調査による間伐効果の検証

人工林の炭素固定量に関するファクタリングアウトを実効あるものとするためには、様々な森林作業を実施された実際の人工林の成長経過と炭素固定量の変化を明らかにして、立地条件や森林管理の違いとの関係性を解明しておく必要がある。こうした分析結果は、ファクタリングアウトを目指して開発される針葉樹林動態モデルの検証と精度向上にも不可欠である。

森林総合研究所が継続調査してきた人工林の収穫試験地は、地域、地位、間伐強度を異にする各地に設定されており、それらの成長動態を解析した。ヒノキの間伐比較試験地における30年間の試験経過の解析により、弱度ないし中程度の間伐が炭素固定に対して有利と判断された。また本州各地の広域に及ぶスギ人工林41箇所を検討した結果、初回間伐から収穫時に至るまでの累積間伐率10~30%の林分で、平均成長量（炭素固定）が顕著に大きかった。

人工林の成長には間伐履歴だけではなく、生育環境が大きく影響する。そこで、地位の違いを反映しやすい上層木を対象にスギおよびヒノキについて平均材積の成長を様々な立地で比較した。スギの成長は地位が良好なほど早い段階で減退するのに対して、ヒノキではそうした成長量の減退は認められなかった。スギとヒノキの成長量を比較するとスギが2倍以上大きく、地位の違いと成長量の関係は、林齢や樹種によって異なることが明らかになった。

地上部バイオマスについてみると、平均純成長量は一般に若齢期から壮齢期にかけてピークを持つ曲線となるが、スギではそのピークの大きさが地位指数に依存し、地位指数が良好なほど大きかった。間伐の実施によってピークの高さが変化することはなかったが、ピーク林齢を遅らせるように作用していた。ヒノキでも、ピークの高さと地位指数との関連はスギと同様だったが、間伐の実施による影響は認められなかった。

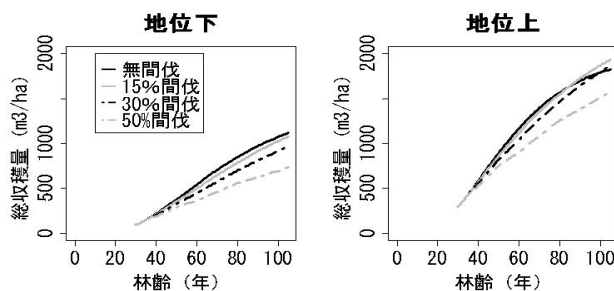


図1 回帰モデルから推定した地位別・間伐強度別の総収穫量の推移

間伐強度が弱いほど総収穫量（総炭素固定量）が大きい。地位が良好な高齢林では、弱度間伐が炭素固定に有利である。

スギのバイオマスについて回帰式を用いた成長モデルを構成してシミュレーションを行った。そ

の結果、強度間伐よりも弱度間伐や無間伐で総成長量が大きくなった。地位が高い場合には、高齢になると無間伐より弱度間伐の総成長量が大きくなる。以上の解析結果から、適切な間伐が実行できない場合には、短伐期で皆伐・更新するのが炭素固定にとって有利であると言える。また伐期を延長して高齢林化を図るのであれば、適度な間伐を繰り返すことが有効と考えられた。以上の結果は、ファクタリングアウトを目的に階発された針葉樹林動態モデルのパラメタリゼーションおよび予測性能の向上に反映された。

(5) ファクタリングアウトに向けた針葉樹林動態モデルの開発

針葉樹人工林の炭素固定能に対して影響すると考えられる要因として、温暖化等の環境変動だけではなく、間伐等森林管理の効果が考えられる。これらの要因を区別して森林の炭素固定量を評価する「ファクタリングアウト」に関する科学的な根拠を提示することが本課題の目的である。採用したファクタリングアウトの手順は次の2つである。第1の方法は、林分構造をもとに人工林動態モデルを構成して間伐による林分構造への影響を加味して炭素固定量を評価するものである。第2の方法は、ある林分構造に対して光合成および呼吸の生理的プロセスモデルを適用することによって炭素固定量への環境影響を評価するものである。

間伐施業の効果を組み込んだ人工林成長モデルには、自然間引きに関するモデルも搭載しており、間伐の有無や強度が材積収穫や各器官のバイオマス成長を再現でき、各サブ課題で得られる分析結果との整合性を比較検討し、種々の間伐施業による炭素固定量を再現できることが確認された。また葉・枝・幹の相互関係に基づいた樹形モデルを応用することによって、人工林の各生育段階における葉群や木部表面積等を推定する手法を開発した。光合成や呼吸に関する生理プロセスのパラメータ等は本プロジェクトを通じた連携によって調整し、これらモデルを統合することによって森林の炭素固定量に対する環境応答を評価できるようになり（図2）、本研究の目的である森林のCO₂固定量に関するファクタリングアウト手法が開発された。

様々な間伐施業の違いや気象条件に対する炭素固定の応答特性（図3）については、今後、集約作業を進めていく。現時点で明らかになった知見としては、林冠の葉群構造（間伐効果を反映）によってCO₂収支は変化するが、気温や相対湿度等の環境変化による林冠光合成への影響はさほど大きくなく、むしろ間伐や林分の発達段階によって変化する林分構造や林分密度による炭素固定能への効果のほうが大きいと考えられた。

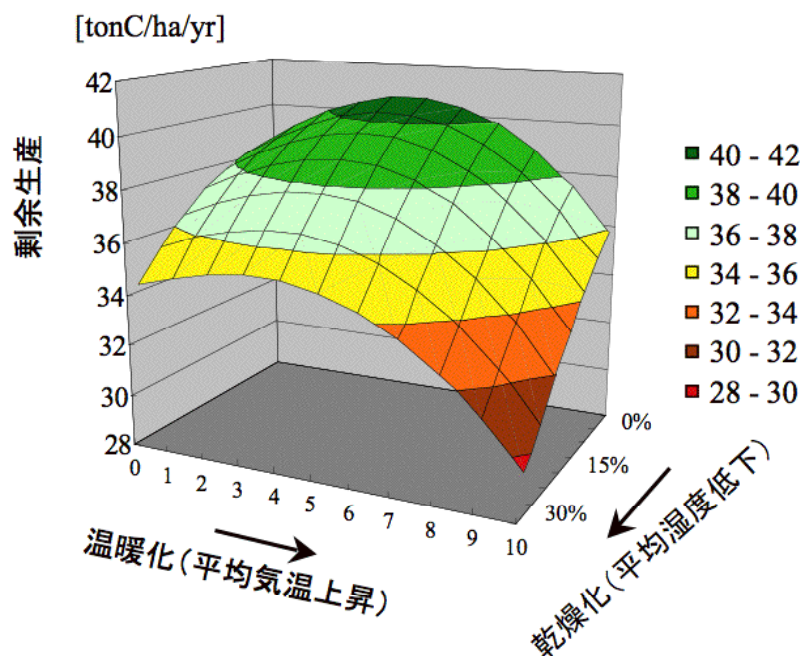


図2 温暖化および乾燥化を想定した林冠光合成シミュレーション

平均気温の上昇（温暖化）および平均相対湿度の低下（乾燥化）を想定して、剰余生産（=総光合成-葉群呼吸）が気候変動によってどのように変動するかシミュレーションを行った。

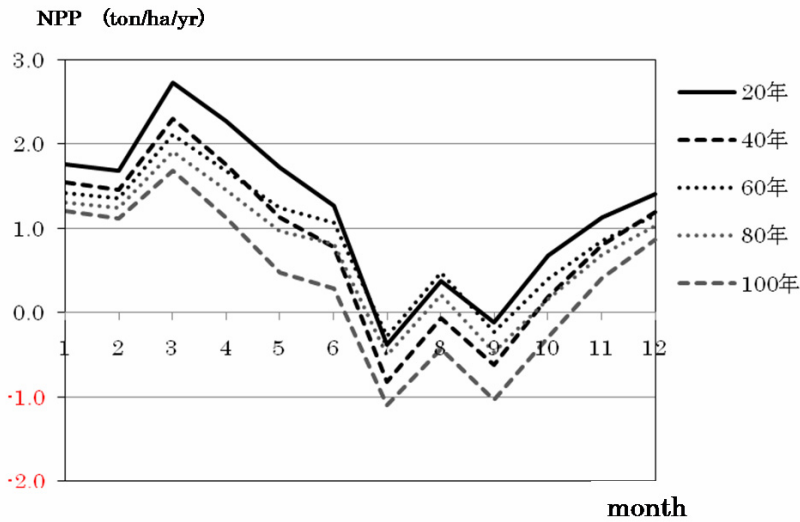


図3 林齢ごとの炭素固定量(NPP)の季節変化シミュレーション
通常間伐を実施する林分のNPP季節変化を20年ごとにシミュレートした。

本プロジェクトの最終目的であったファクタリングアウトの技術的裏付けとなる光合成および呼吸の生理的な環境応答を定量的に解明して、林分スケールの炭素収支を評価するモデルが確立したことから、温暖化のみならず大気乾燥化をふくめた気候変動が森林群落の動態に及ぼす影響と炭素固定能の変動を予測できるようになった。