

ブナ林での施業の影響を評価できる光合成量予測モデルの開発

Process-based modelling of canopy photosynthesis for evaluating the effect of silviculture

飯尾 淳弘、静岡大学農学部 博士研究員

Atsuhiko Iio. Post-doctor, Department of forest resources science, Shizuoka University

研究の概要

日本の森林の大部分は人工林や2次林であり、そのような森林のCO₂削減効果を高い水準で維持するには、間伐や植栽などの森林管理が必要であるといわれている。しかし、従来の管理は木材生産を主とした経験的なものが多く、CO₂削減に対する具体的な効果はわかっていない。例えば、間伐は森林の構造を変化させて太陽エネルギーの獲得効率や光合成能力を高めるが、過度の間伐は光ストレスを引き起こし、光合成を低下させる危険性がある。反対に、不十分であると被陰部分が多く、光合成は十分に増加しない。森林のCO₂削減効果を高める方法を考えるうえで、管理方法の違いがCO₂収支に与える影響を知ることは重要である。そこで本申請では、施業による構造の変化が、内部光環境や光合成量に及ぼす影響を予測できるシミュレーションモデルを開発する。モデルを利用して、ブナ林の光合成量の予測と、それを高い水準で維持する施業方法について検討する。

Abstract

To evaluate effect of silviculture on forest carbon gain, detail description of stand structure and light transfer process within canopy is necessity. Although several models describing detail three-dimensional structure and light distribution within canopy have been proposed, extensive parameterization requirements limit application of the fine-detailed schemes to larger scales such as stand and landscape level. Thus, structural description for light harvesting must be simplified to scale up in larger scale. However, such a model simplification has not been conducted especially for large trees. In this project, I develop a method describing detail structure and light environment of *Fagus crenata* canopy from simple structural parameters easy to measure, such as tree height, diameter of breast height and crown shape. Main study site is located at second-growth beech forest 70 years of age at an altitude 900 m above sea level on the eastern slope of Mt. Naeba in Niigata prefecture. Ten *F. crenata* at different height ranging from 5m to 25m are selected as sample trees and the canopy space is divided as an array of cubic, the one side of which is 20cm. I measure leaf area density of all cubic with point quadrant method and analyze the relationship between leaf clustering pattern and the structural parameters. Finally, I reproduce virtual *F. crenata* stand and simulate effect of silviculture such as thinning on light environment within canopy and canopy photosynthesis.

研究目的

温室効果ガスであるCO₂の吸収源としての森林への期待から、森林のCO₂固定能力の評価が求められている。こうした背景から、渦相関法や自動開閉チャンバーなどを利用したCO₂フラックスのモニタリング研究が盛んに行われている。しかし、森林のCO₂固定能力の評価には現状のモニタリングだけでは不十分である。なぜなら、人工林や2次林を健全な状態に保つには、間伐などの森林施業が必要であり、それは森林のCO₂固定能力に大きな影響を与えるからである。林分構造と環境の変化の影響を予測する手段が必要であるが、そのような方法を開発した研究は少ない。森林のCO₂収支は光合成（CO₂吸収；主に葉）と呼吸（CO₂排出；樹皮や根、土壤微生物など）から計算されるが、本研究では特に光合成に注目した。

樹木の光合成量は主に葉の光合成能力と面積、吸収する光の量によって決定されるが、その時間的、空間的多様性の大きさから、それらは非常に単純に扱われてきた。特に葉群構造に関してはアクセスと労力の問題からそれが顕著であった。しかし、様々な伐採パターンに柔軟に対応し、その光合成に対する影響を高い精度で予測するには、葉群構造の詳細な再現が欠かせない。

本研究の目的は、ブナ人工林の葉群構造を詳細に調べ、内部の光環境と光合成能力の空間変異を詳細に再現した光合成量予測モデルを構築することである。上層木を伐採すると当然のことながら林分全体の光合成量は低下する。しかし、モデルを利用して残存木や植栽木の光合成量が最も高くなる伐採方法を考えれば、光合成量の低下を最小限に抑え、次の間伐と植栽までの時間を短くできる可能性がある。モデルを利用した間伐方法の合理化によって、森林の成長とCO₂固定を促進できると考えた。

研究経過

試験地は新潟県苗場山の標高1100mにあるブナ

人工林である（北緯36.88、東経138.74）。林内に20m×20mのプロットを2008年7月に設置し、樹冠アクセス用の鉄塔（高さ16m、幅6m×7m）を建設した。林分密度と優占木の平均樹高はそれぞれ3750本/ha、約14mである。鉄塔内の空間を幅25cm×25cm高さ20cmの立方体（セル）に区切り、ブナ13個体の葉分布を簡易式ポイントコドラート法で2008年8月に調べた。簡易式ポイントコドラート法とは、長さ1m、直径5mmの棒をセルに4回突き刺して棒に触れた葉の総数を測定し、別途測定された葉数と葉面積の関係（R² = 0.84、n=52）からセル内の葉面積を推定する方法である（藤井、水永2002）。また、樹冠のさまざまな場所の合計50本の枝の着生角度を測定した。さらにタワー内の4個体を対象として、地上高21m、16m、10mで長さ60cmのシュートを採取し、シュートの受光効率SPARをSmolander（1994）の方法で測定した。葉面積密度、SPAR、枝の着生角度、太陽角度から、Beer-Lambert則をもとに全セルの直達成分と散乱成分の光透過率を計算し、樹冠外で測定されている光量子束密度（PPFD）からすべてのセルのPPFDを30分間隔で予測した。

光環境の予測値を検証するために、9箇所のセル表面に光センサー（小糸；IKS-25）を設置し、PPFDを7月から10月まで30分間隔で測定した。光センサーの位置は1ヶ月ごとに変更し、合計36セルの検証データを得た。

光合成速度、蒸散速度とPPFDの関係（Lightカーブ）を、地上高15m、13m、11m、9m、7mから切り枝を採取してLI-6400で2008年8月中旬に測定した。

セルの光合成速度はPPFDとLightカーブから計算し、葉面積を乗じて光合成量を計算した。

研究成果

葉分布：鉄塔内の個体の地上高別葉面積合計を図1Aに示す。試験地には高木だけでなく亜高木も多く存在するため、葉面積は13.2~13.6mと8.6mにピークをもつ二山型の分布を示した。ポイ

ントコドラート法とリタートラップ法によって得られた試験地の葉面積指数はそれぞれ4.88、4.48 m^2/m^2 であり、おおむね一致した。これまで樹木構造の詳細に再現には個々の葉の3次元座標や傾斜角度の測定が必要であり、その適用範囲は稚樹や枝に限られていた。簡易式ポイントコドラート法は従来の方法に比べて労力が少ないので樹冠や林分レベルに適用できる。本研究の成果は、より大きなスケールでの詳細な葉群構造の解析や光合成の推定に役立つと期待できる。図1Bに、葉面積の最も大きかった13.2mにおける葉密度(LAD)の水平分布を示す。LADの低い(4 m^2/m^3 以下)セルの頻度が高く、LADの高いセルの周囲を囲むようにして分布していた。この傾向は地上高に関わらず同じであった(データ非表示)。

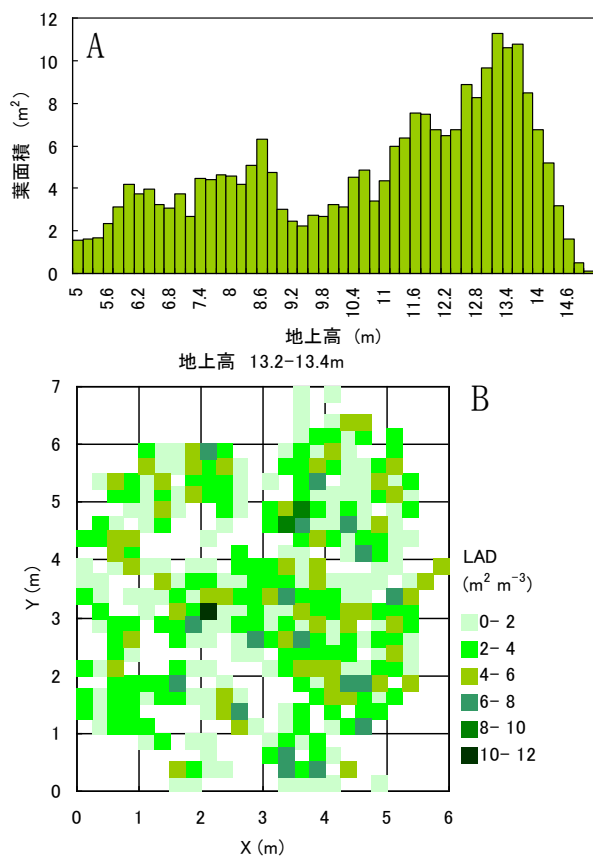


図1：鉄塔内における(A)階層別葉面積合計と(B)13.2mにおける樹冠の横断面図(LAD;セルの葉面積密度)

光環境の予測と検証；晴天日と曇天日について、セルの日積算PPFDと光センサーで実測された日積算PPFDの関係を図2Aに示す。季節や天候に関

わらず、予測値と実測値はほぼ正比例の関係にあり、モデルは日積算PPFDを高い精度で予測できることがわかった。図2BにセルのPPFDと実測されたPPFDの日変化パターン(30分間隔)を示す。樹冠ギャップからの直達光の入射時刻やその強度に若干のずれがあるものの、モデルはPPFDの日変化パターンをよく再現している。樹冠内部の光環境の時空間変化を詳細に再現できるモデルが構築された。

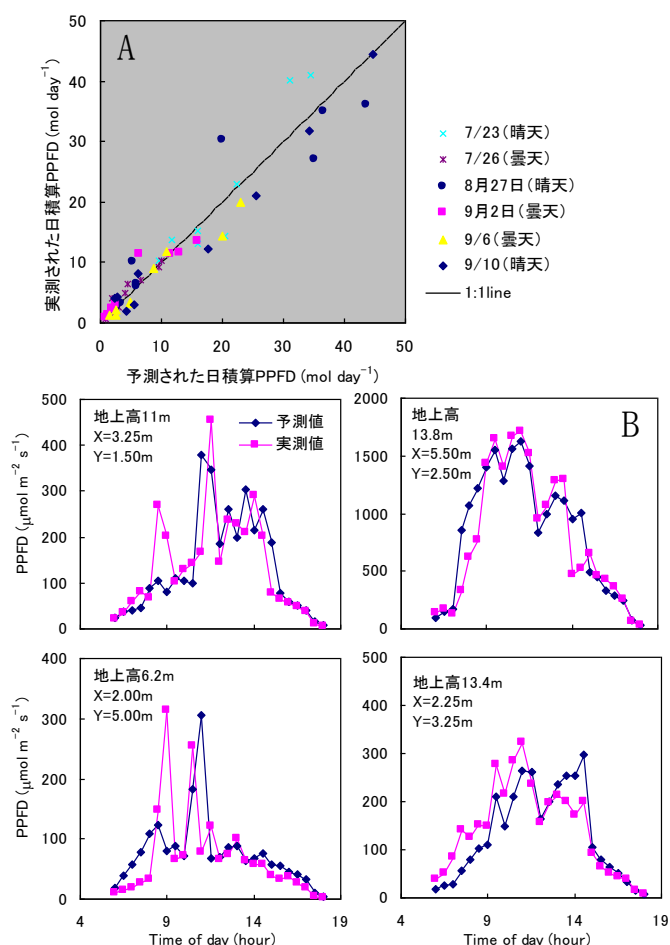


図2：予測された光環境の検証 (A)日積算PPFDの比較、(B)日変化パターンの比較(8/27)

間伐シミュレーション；試験地では樹高8~12mの下層木が全個体数の約45%を占めており、それらは上層木(13~15m)を伐採した際の後継木として期待できる。そこで、モデルの森林施業への応用例として、上層木の間伐によるギャップの拡大が下層木の光環境と光合成量に与える影響を予測した。図3Aに対象下層木と上層木の位置関

係を示す。個体C、D、Bを順番に伐採し（それぞれI～III）、最後に周辺の上層木全て（A-E）を伐採した場合（IV）の対象木の光合成量の変化を予測した。これまでの研究で、相対PPFD（セル表面のPPFD/樹冠外PPFD；rPPFD）が20%以下の環境に生育する陰葉では、伐採前後のrPPFDの差が20%以上になると、光飽和時の光合成速度（ P_{max} ）が大きく低下することがわかっている（飯尾、今泉2007）。光合成量の計算の際に、このような強光ストレスの影響を考慮した。気象データは9/10快晴日を利用した。

図3B、Cに間伐にともなう対象木の樹冠内光環境と光合成量の変化を示す。ギャップが大きくなるに従って光環境と個体光合成量は上昇し続けた。しかし、II以降では、光合成の光飽和に達したセルが増えるために、増加量はほぼ一定値で推移した。また、IVでは光ストレスによる光合成量の低下の影響が大きくなることが予想された。

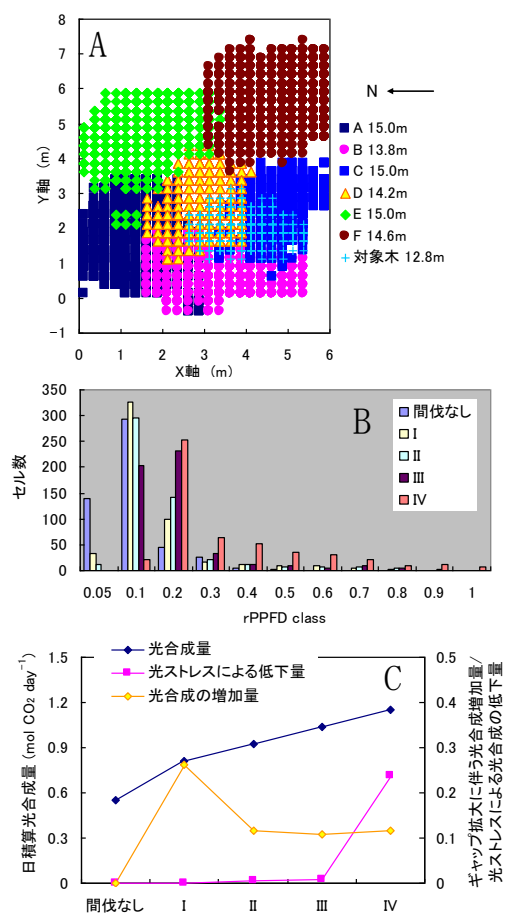


図3：(A) 樹冠投影図、間伐による対象木の(B) 光環境（rPPFD）の変化と(B) 光合成量の変化

今後の課題と発展

本報告では調査範囲（鉄塔内）での光合成量や施業の影響評価に留まったが、葉分布パターンを各個体の樹冠サイズや形状など測定容易なパラメータで整理できれば、林分全体の葉分布を予測可能になる。リモートセンシング（航空機からのレーザ測量など）を利用すれば、さらに大きなスケールにも拡張できる可能性がある。

光環境に関しては、おおむね良好な結果が得られたものの、枝や幹の側では誤差が大きくなる傾向もみられた（36箇所の中の7箇所）。非同化器官の空間分布をモデルに考慮する必要がある。また、各セルの光環境を平均値で代表したが、実際には大きなバラツキがあり（未発表データ）、それは光合成量の予測に大きく影響する。葉の自己被陰効果などの影響も考慮する必要がある。

光合成速度に関してはPPFDの影響のみを考慮したが、温度や湿度、土壌水分の影響も無視できない。また、伐採によるギャップの発生は光合成の光阻害だけでなく、葉温や枝温度を上昇させて呼吸量や蒸散量を増加させる。蒸散や呼吸プロセスの影響も考慮し、より現実的な森林の機能評価を目指したい。

このモデルは樹冠内だけでなく林床の光環境も予測可能であり、天然更新や稚樹の植栽適地の診断などにも利用できる。また、仮想林分をコンピュータ上に再現すれば、密度やギャップの形状、階層構造の違いなどが林分光合成量に与える影響も評価できる。このように本研究で開発されたモデルは様々な用途への利用が期待できる。

研究成果の発表

ATSUHIRO IIO, HIROMI MIZUNAGA, YOSHITAKA KAKUBARI. A 3D beech canopy model used to evaluate the effect of tree architecture and density on photosynthesis. The 6th IUFRO Uneven aged silviculture Workshop. Shizuoka, Japan, October 2008