

林冠内の散乱光透過率の三次元分布

齊藤哲・壁谷大介・川崎達郎・飛田博順・梶本卓也 (森林総研)

要旨: 本研究は、シミュレーションモデルによる林冠内光環境の推測値を検証するために不可欠な林冠内における実際の光条件の三次元分布を明らかにすることを目的とした。若齢スギ林で林冠観測用鉄塔を利用し、高さ7, 8, 9, 10, 11mの水平面の合計200箇所の格子点で全天写真を撮影し、天頂が水平面方向の3倍明るい場合の各点の散乱光透過率(SOC)を求めた。SOCの平均値はその高さにおける幹断面積合計に応じて減衰した。ばらつきは中層の9mで大きかった。水平方向の空間自己相関をみると林冠閉鎖のみられた9mより上で葉群の集中がみられるのに対し、9mより下ではランダムに分布していた。同様に9mより高い階層では、ある点とその真上の点との相関も高いが、9m未満では明確な相関は見られなかった。中層では葉群と葉群のない空間が混在し、樹冠縁部では撮影点直上の僅かな葉の有無によりSOCが大きく異なると考えられた。下層では葉群内の僅かな空隙の量でSOCが決まり、明確な空間分布の規則性はみられなかった。中下層のSOCは樹冠の相対位置や枝葉の詳細な分布で決まり、林冠内の特定位置での精密な光環境推定は困難であると考えられた。

キーワード: 樹冠, Moran's I, シミュレーションモデル, SOC, 全天写真

Abstract: In this study, we aimed to clarify the characteristics of three-dimensional light environment within canopy of a *Cryptomeria japonica* stand. In total, we took 200 hemispherical photographs on different height plane and calculated transmittance ratio of indirect light under the standard overcast condition (SOC). Mean SOC decreased with increasing sum of stem sectional area. Standard deviations of the mean SOC were the large in middle layer (9m). Moran's I index showed that concentrations of distribution were found above 9m in height, but not below 9m. Clear correlations between planes were also found in upper layer, but not in lower layer. Lump of crowns and open space coexist in the middle layer. This would cause the great variation of SOC in the middle layer. In the edge of a crown, existence of a piece of leaf above the photograph point would also decrease SOC largely. On the other hand, SOC would be decided by small hole in the crown in the lower layer. This may cause the random distribution of SOC in the lower layer. In both layer, the SOC would be influenced by precise leaf distribution. So, it seems to be difficult to estimate the light environment at the certain point in the middle and lower layer.

Keywords: crown, hemispherical photograph, Moran's I, simulation model, SOC

I はじめに

林冠の光合成生産量を推定するためには林冠内の光環境を推定する必要がある。群落・林分スケールでみた場合、散乱光の相対値は林冠頂部からの深さの積算葉面積指数に応じて指数関数的に減衰することが知られている(3, 7)。林冠内が比較的均一な森林ではそうした手法で推定された光環境を用いて林分スケールの生産量が推定されてきた。

近年では、列状間伐や将来木施業のように森林管理も多様になってきた。樹冠が集中する空間と全くない空間が比較的まとまった大きさで分布する不均一な葉群分布を持つ林分もみられる。このような不均一な林冠においては、個体ごとの光環境や成長量も異なる。列状間伐の伐採列側など個体ごとの生産量および成長を推定するためには水平方向の複雑な状態を反映させた光環境の推定が必要となってくる。

そうした複雑な条件の樹木の成長差を表現するため、個体や枝葉を最小単位とした様々なシミュレーションモデルが提唱さ

れてきている(2, 4)。個体やモジュールベースのモデルではそれぞれの三次元的な相互配置により光環境が推定される。こうした推定法では林冠のある深さにおける水平面の光強度のばらつきも表すことが出来る。従って林冠が均一でない林分においては非常に有用と考えられる。しかし、より小さいスケールのモジュールから組み立てる場合、実際の樹冠を忠実に再現することは困難になる。モジュールの相互配置が異なれば推定される光環境も異なることになる。従って個体やモジュールベースのモデルで相互配置から推定された林冠内の光環境は精度の検証が必要である。

実際の林冠内では枝の成長に伴う光獲得競争の結果、現在の葉群配置が決まっていると考えられる。そのため光環境の空間分布も個体間競争が反映された特徴があると考えられる。モデルによる林冠内光環境の推定値の検証のためにも、そのような特徴を把握することは重要である。しかし、林冠層は一般的にアクセスが困難であるため、そのような林冠内光環境の三次元

分布を解析した例は少なく、その特徴が十分報告されてはいない。

本研究は林冠内の光環境や枝の成長を測定するために設置された林冠観測用の鉄塔を利用して、林冠内の散乱光透過率の三次元分布の特徴を把握することを目的とする。そして、個体やモジュールベースのシミュレーションモデルによる光環境推定値の検証に関して考察した。

II 調査および解析方法

本研究は、森林総合研究所千代田苗畑（茨城県かすみがうら市）のスギ人工林で行った（図-1）。対象林分は1995年に2年生苗木を植栽したもので、2010年時点で立木密度約2,500本/ha、平均樹高9.5m、平均胸高直径13.9cmであった。平均枝下高は1.9m、平均樹冠長率（樹冠長/樹高）は81%であった。

2011年に対象林分に林冠観測用の鉄塔を設置した。鉄塔は縦約10m、横約5m、高さ約25mの大きさで、8個体を囲むように設置し、この8個体の全ての枝葉にアクセスが可能となっている（図-1）。鉄塔を利用し、地上高7、8、9、10、11mのそれぞれの階層の水平面に縦1m間隔、横0.9m間隔で糸を張り40地点の格子点（4×10地点）を設定した。2013年7月にそれぞれの格子点において全天写真を撮影した。カメラはNikon Coolpix7100、魚眼レンズはフィット社製UWC-0195を用いた。いずれの撮影点でも全天周画像撮影用水平器（フィット社）を用い魚眼レンズが上向きで水平になるようにした。

撮影した全天写真を基に画像解析ソフトウェア CampOn2 (6) を用いて、各点の散乱光透過率（各点の散乱光/全天空の散乱光）を計算した。この際、全天空の散乱光成分は天頂が水平面方向の3倍明るいと仮定したSOC条件と仮定した（本研究では以降この散乱光透過率を単にSOCと称する）。

算出されたSOCを基に、まず階層ごとのSOCの平均値、標準偏差、変動係数を計算した。また、三次元分布の特徴を把握



図-1 タワーを設置した調査対象林分
Fig. 1. Photograph of a stand and tower in the study site.

するため、それぞれの点において隣接点との相関をあらわす空間自己相関を計算した。水平面の空間自己相関を表す指数としてMoran's Iを算出した。Moran's Iは-1から1の範囲の値をとり、値が大きいほど集中している、すなわち明暗のまとまりが明瞭であることを表し、小さいほど値が分散していることを表す指標である。垂直方向の空間自己相関は、ある点とひとつ真上の点との相関であり、ある点が明るくなおかつその真上の点も明るい傾向が強いとときに強い正の相関を示す。

III 結果

各階層における水平面のSOCの分布および樹冠の近似円を図-2に示す。高さ8mまでは樹冠が閉鎖していたが、高さ9m以上でそれぞれの樹冠の間に空間ができた。8個体中2個体は

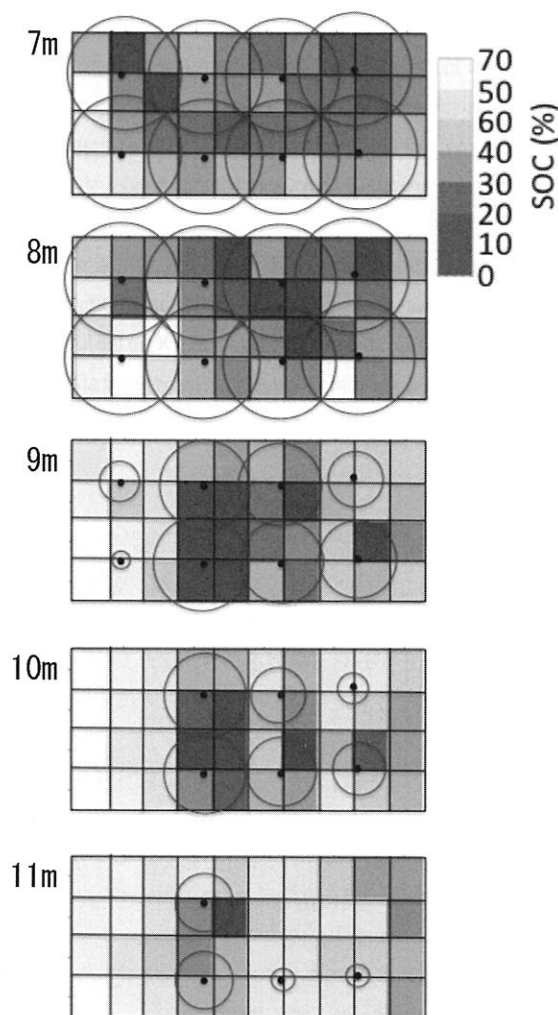


図-2. 各階層のSOCの平面分布。黒丸は主幹の位置。それぞれの樹冠断面を円形に近似してグレーで表示。

Fig. 2 Spatial distribution of SOC for each height. Dots show position of stems. Circles show simplified crowns of each tree for each height.

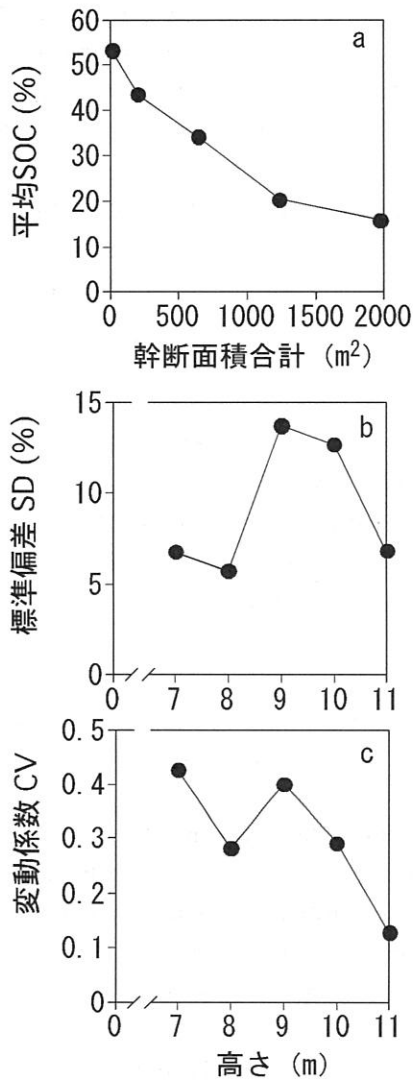


図-3. それぞれの高さの幹断面積合計とSOCの平均値の関係 (a), および各高さの標準偏差 (b), 変動係数 (c)。(a)は積算葉面積指数と幹断面積合計との間に強い相関があるというこれまでの知見を考慮して横軸に幹断面積合計を用い、その他の横軸には高さを用いた。

Fig. 3 The relationship between mean SOC and accumulated stem-sectional area for each height (a), Standard deviation of the mean SOC (b) and coefficient of variation (c).

樹高10m未満, 4個体は11m未満であった。SOCの平均値(分布幅)は下の階層から順に15.9(2.1~34.5), 20.4(9.8~32.2), 34.2(9.1~58.2), 43.6(14.9~63.7), 53.3(29.2~65.4)%であった(図-3a)。林冠直上でも鉄塔の足場などの影響でSOCは50%強であった。平均値の標準偏差は中層の高さ9m, 10mで12%以上と大きく, 下層(高さ7m, 8m)と上層(高さ11m)で7%以下と小さかった(図-3b)。高さ8mを除き, 変動係数は地上高が大きくなるとともに減少した(図-3c)。

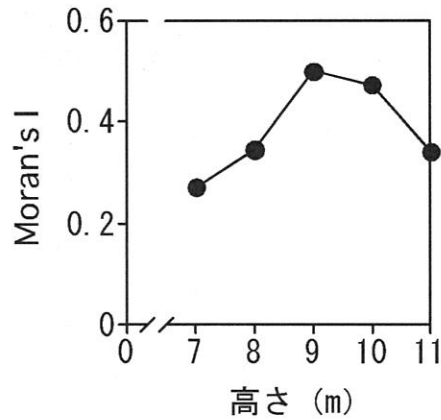


図-4. それぞれの高さの Moran's I.

Fig. 4 Moran's I for each height

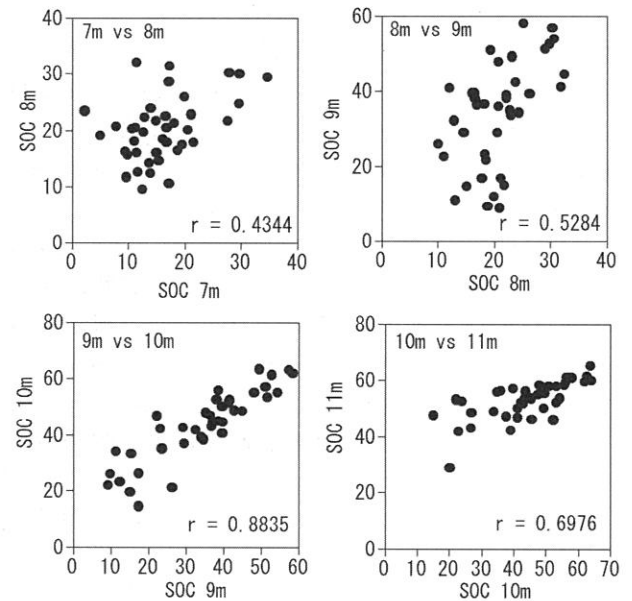


図-5. ある階層のSOCとひとつ上の階層の同じ位置のSOCとの散布図。rは相関係数。

Fig. 5 Scatter diagram of SOC between one layer and a layer just above it. The r shows correlation coefficient.

自己空間相関を表す係数 Moran's I は中層の高さ9m, 10mで0.45以上と大きかった。また, 下層(高さ7m, 8m)と上層(高さ11m)で0.35以下と小さかった(図-4)。

ひとつ真上の点との相関係数を高さごとにみると, 7mと8mおよび8mと9mの間ではいずれも0.53未満と小さいが, 9mと10mの間では0.883と急に大きくなった(図-5)。

IV 考察

平均値でみると, 高さごとのSOCは幹断面積合計の増加とと

もに指数関数的に減少していた(図-3a)。これは、幹断面積合計はそこから上層の葉面積指数と強い相対成長関係を示すため、相対光強度は積算葉面積指数に応じて指数関数的に減少する(3, 7)というこれまでの知見と一致する。一方、空間分布は階層によって大きく異なっていた。9mの層では、SOCが大きい値から小さい値まで幅広く分布し、ばらつき、変動が大きかった(図-2, 3b,c)。そして、9mの層の水平面では空間自己相関が大きくSOCの小さい部分は集中している傾向があった(図-2, 4)。本林分では高さ9m以下で林冠の閉鎖が始まり、それより上では樹冠の塊がある空間とない空間が混在していた(図-2)。そのため、9mの層では写真撮影点が樹冠の中にあるか外にあったかでSOCは大きく異なり、この層における大きなばらつき(図-3b,c)の一因になったと考えられる。樹冠縁部の写真撮影点では真上に葉があるかないかの僅かな違いで写真から計算されるSOCは大きく異なる。個体やモジュールベースのモデルでは枝葉の現実の配置まで忠実に再現することは困難であるため、樹冠縁部における特定位置の光環境を精密に予測することは困難である。しかし、樹冠の詳細な枝葉の再現は困難でも、樹冠のおおよその形状と近接樹冠との相対位置が再現できれば、個体レベルの樹冠表面の光環境は比較的精度良く推定できるであろう。

上層はSOCの大きい地点が多く、僅かに存在する樹冠頂部付近でSOCが小さかった。したがって、上層部の光環境の推定は比較的精度良く推定できると考えられる。一方下層では、図-4, 5が示すように水平面、鉛直方向とも空間自己相関は小さく、SOCの大小は特別な規則性もなく3次元空間にランダムに分布していた。下層の比較的大きいSOCは、葉群内の僅かな空隙に起因していると考えられる。スギの樹冠のなかでも葉が樹冠の縁部に集中するといわれ(5)、樹冠内の葉群の濃淡によって樹冠内のある地点から上方にみえる空隙は複雑なものとなる。撮影点の僅かなズレで写真に写る空隙の配置や量は大きく異なる。これがSOCの大小のランダムな空間分布の一因と考えられる。さらに林内の風環境によって中下層の空隙は動的に変動する。個体やモジュールベースのモデルではやはり葉群内の空隙を正確に再現するのは難しく、下層でも特定位置のSOCの精密な推定は困難である。しかし、下層ではその空隙量が僅かなためSOCの変動係数は大きくても、SOCの平均値や標準偏差の絶対値は小さい(図-3)。したがって下層で定点の推定は困難で、光環境推定値に誤差が生じたとしても、個体や群落の生産量推定に及ぼす影響は小さいと考えられる。

全天写真によるSOC計算値の3次元空間分布の解析から、個体やモジュールベースのモデルで中下層の特定位置の精密な光環境を推定することは困難であると考えられた(1)。個体や林分の生産量および成長の推定を目的とする場合は、個体ごとの生産量を正確に推定できればよい。そのため、個体やモジュールベースのモデルでは枝葉の精密な再現や中下層の特定位置の光環境の推定精度を上げるような方向を目指すよりも、個体レベルの生産量推定に影響する樹冠の形状や近接樹冠の相対位置の再現精度を上げるよう改善することが重要であろう。

謝辞

本研究を進めるにあたり、森林総合研究所交付金プロジェクト「人工林施業の長伐期化に対応した将来木選定の指針策定」、および科学研究費補助金基盤(C)No.23580202「地形と林分構造の複雑性が森林内風環境に及ぼす影響。施業シナリオへのCFDの応用」による援助を受けた。

引用文献

- (1) 壁谷大介・斎藤哲・右田千春・韓慶民・川崎達郎・飛田博順・梶本卓也(2013) 葉群クラスタを単位とした不均一な樹冠における光環境推定. 日本森林学会大会講演要旨集(CD-ROM) : 124, pp.238
- (2) KUBO, T. and KOHYAMA, T. (2005) *Abies* population dynamics simulated using a functional-structural tree model. *Ecol.Res.* : 20, pp.255-269
- (3) 黒岩澄雄(1990) 物質生産の生態学. 東京大学出版会, 東京, 147pp.
- (4) LO, E., WANG, Z. M., LECHOWICZ, M., MESSIER, C., NIKINMAA, E., PERTTUNEN, J. and SIEVANEN, R. (2001) Adaptation of the LIGNUM model for simulations of growth and light response in Jack pine. *For. Ecol. and Manage.* : 150, pp.279-291
- (5) MIZUNAGA, H. and UMEKI, T. (2001) The relationships between tree size and spatial distribution of foliage-mass within crown of Japanese cedars (*Cryptomeria japonica*) in young plantations. *For. Ecol. and Manage.* : 149, pp.129-140
- (6) 竹中明夫(2009) 全天写真解析プログラム CanopOn 2, <http://takenaka-akio.org/etc/canopon2/>, (2014年2月17日アクセス) .
- (7) 堤利夫(1989) 森林生態学. 朝倉書店, 東京, 166pp.