帯状伐採地における光環境の簡単な推定モデル

井上昭夫^{*1}・高岡華子^{1,2}・溝上展也³・太田徹志³・作田耕太郎³・山本一清⁴

帯状伐採地における光環境の簡単な推定モデルを誘導した。光環境を表す測度として天空率を用いた。モデルを誘導するために、以下の四つの仮定を設けた。1) 伐採帯の方向は斜面に対して平行である。2) 伐採帯の幅は一定、長さは無限である。3) 傾斜角は一定である。4) 保残林分の樹高に等しい高さの壁が伐採帯の両側に直立している。天空率の推定に必要な変数は、帯幅、保残林分の樹高、伐採帯内での位置および傾斜角であった。六つの帯状伐採地において、モデルによって推定した天空率と全天空写真によって実測した天空率とを比較した。六つのうち四つの帯状伐採地において、天空率の推定値と実測値との間に有意な差はみられなかった。しかし、他の二つの帯状伐採地では過小推定であった。これは保残林分の樹冠を通して伐採帯内に光が入射しないことを仮定したためと考えられた。モデルによるシミュレーションの結果、帯状伐採地の光環境を推定する上で、傾斜角は無視できない変数であることがわかった。ここで提案したモデルは、帯状伐採地における光環境を簡便に推定することを可能にするので、帯状複層林施業の指針を作成する上で有用である。

キーワード：帯幅、傾斜角、全天空写真、天空率、保残林分

Akio Inoue,^{*1} Hanako Takaoka,^{1,2} Nobuya Mizoue,³ Tetsuji Ota,³ Kotaro Sakuta,³ Kazukiyo Yamamoto⁴ (2013) A Simple Model for Estimating Light Environment in Strip Clear-cutting Stands. *J Jpn For Soc* 95: 245-252 A simple model that estimates the light environments within a strip clear-cutting stand was derived. The sky factor was used as a measure of light environment. In order to derive the model, we assumed that: 1) the direction of the strip was parallel to the incline; 2) the strip width and length were constant and infinite, respectively; 3) the inclination angle was constant; and 4) walls, the height of which was equal to the mean height of residual stands, were erected on both sides of the strip. Driving variables in the model included the strip width, height of residual stands, position within the strip and inclination angle. In six strip clear-cutting stands, the sky factor estimated by the model was compared with that measured with hemispherical photography. In four of the six stands, there was no significant difference between estimated and measured sky factor. However, the sky factor in the other two stands was underestimated, since the model assumed that no light penetrated into the strip through the canopy of residual stands. Model simulation demonstrated that the inclination angle should be taken into account when estimating light environment in strip clear-cutting stands. The model presented here provides a simple means for estimating light environments in a strip clear-cutting stand, and thus it will be beneficial as a tool for developing a guideline for the strip clear-cutting.

Key words: hemispherical photography, inclination angle, residual stands, sky factor, strip width

I. は じ め に

わが国は国土の約 2/3 を森林によって覆われており、その約 40% が人工林によって占められている（林野庁 2012）。これらの人工林は、主に戦後の拡大造林によって造成された針葉樹の同齢単純林であり、その多くが間伐あるいは主伐の必要な齢級に達している。しかし、林業労働力の不足と木材価格の低迷により、適切な間伐あるいは主伐が行われずに荒廃した人工林が増加し、森林からの水や土砂の流出が問題となっている（恩田 2008）。また、一般に人工林は構造が単純であり、植物種の多様性が低下することも指摘されている（長池 2000）。これらの問題を解決するための技術的方策の一つとして、近年、帯状複層林施業に対する注目が集まってきている（溝上 2007）。帯状複層林施業とは、林分の樹高と同程度の幅で帯状に伐採され

た跡地に苗木を植栽する施業方法である。複層林施業のもつ下刈り作業の省力効果を活かしつつ、伐出作業の容易さを重視した施業方法であるが（藤森 1992）、その実施例は少なく、より多くの事例の蓄積が求められている。

わが国における帯状複層林に関する研究では、光環境（飯盛 1983；竹内ら 1992；竹内・川崎 1995；井上ら 1996b；久保田ら 1996；谷口 2002；作田ら 2009）、下木（帯状伐採地に植栽された樹木）の成長（竹内・川崎 1995；井上ら 1996b；久保田ら 1996；溝上ら 2002；谷口 2002）、下刈り作業の省力効果（竹内ら 1992；竹内・川崎 1995；井上ら 1996a, b）、生物多様性（Ito *et al.* 2004；谷口ら 2006；作田ら 2009）、降雨流出特性（Shimizu 1994；Shimizu *et al.* 1994）、収益性（荒木ら 2007）が報告されている。これらの報告を整理すると、下木の成長、下刈り作業の省力効果および生物多様性は、伐採帯内における光環境の影響

* 連絡先著者（Corresponding author）E-mail: iakio@pu-kumamoto.ac.jp

¹ 熊本県立大学環境共生学部 〒 862-8502 熊本市東区月出 3-1-100 (Laboratory of Forest Ecology, Faculty of Environmental and Symbiotic Sciences, Prefectural University of Kumamoto, 3-1-100 Tsukide, Higashi-ku, Kumamoto 862-8502, Japan)

² 現在：株式会社ヤマックス 〒 862-0950 熊本市中央区水前寺 3-9-5 (Yamax Corporation, 3-9-5 Suizenji, Chuo-ku, Kumamoto 862-0950, Japan)

³ 九州大学大学院農学研究院 〒 812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1 (Faculty of Agriculture, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaeki, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581, Japan)

⁴ 名古屋大学大学院生命農学研究科 〒 464-8601 名古屋市千種区不老町 (Graduate School of Bioagricultural Sciences, Nagoya University, Furocho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan)

(2013 年 4 月 29 日受付, 2013 年 7 月 25 日受理)

を直接的に受けている。また、降雨流出特性は下層植生の有無や下木の成長に影響されるであろうし、収益性については、下木の成長と下刈り作業の省力効果に左右されるため、伐採帯内における光環境の影響を間接的に受けていると考えられる。したがって、带状複層林施業を実施する上で重要なことは、いかにして下木の健全な成長や下刈り作業の省力化、生物多様性の維持のために必要な光環境を带状伐採によって創り出すのかという光環境の制御に集約できる。

带状伐採地における光環境は、緯度、経度、標高、斜面方位、傾斜角、保残林分の林況、伐採帯の幅（帯幅）などの様々な要因によって変化する。もし、これらの要因と光環境との関係を定式化できれば、どのくらいの帯幅で伐採すれば良いのかを事前に検討することが可能になる。このような観点から、これまでにいくつかの光環境の推定モデルが提案されている（例えば、飯盛 1983；久保田ら 1996；Fujishima *et al.* 2011）。しかし、これらのモデルでは、太陽軌道を考慮するための緯度、経度、斜面方位および季節（時刻）のような情報あるいは葉量分布のような通常の森林調査において測定されない情報が必要であるため、光環境を詳細に推定できる反面、作業が煩雑にならざるをえない。実際の施業への応用を考えた場合、光環境の推定に必要な情報はできるだけ少なく、かつ容易に得られるものが望ましい。

建築環境工学の分野では、天空率という測度を用いることによって、建物の位置や大きさと光環境との関係を幾何学的に定量する方法が採られている（例えば、日本建築情報センター 2006）。井上ら（2000）は、この方法を応用することによって、林道における光環境の推定モデルを誘導している。このモデルでは、推定に必要な変数が林道の幅員と林道に隣接する林分の樹高という比較的容易に得られる二つの因子だけである。また、幅員と隣接林分の樹高を帯幅と保残林分の樹高にそれぞれ変えることで、林道だけでなく带状伐採地における光環境の推定にも応用できる可能性がある。しかし、井上ら（2000）のモデルでは、林道の路肩部分における光環境を推定することを目的としていることに加え、推定の際に傾斜角が考慮されていない。小島・石塚（1999）も建築環境工学的な方法によって、円形と方形の林冠ギャップ内における光環境の推定モデルを作成し、そのモデルをもとに林冠ギャップの光環境管理図を調製している。しかし、このモデルでは、林冠ギャップの中心における光環境を推定することを目的としていることに加え、傾斜角による影響も考慮されていない。带状伐採地における光環境は伐採帯内の位置によって変化し、伐採帯中央部付近と林縁部付近とは大きく異なる（例えば、井上ら 1996b）。このような伐採帯内での光環境の違いが、下木の成長（竹内・川崎 1995；井上ら 1996b；久保田ら 1996；谷口 2002）や侵入広葉樹の組成（竹内ら 1992；井上ら 1996a, b；作田ら 2009）に影響を与える。このため、带状伐採地における光環境の推定モデルとしては、伐採帯

内での任意の地点における光環境を推定できることが望ましい。また、わが国における林業は急傾斜地で営まれる場合が多い（後藤 1982）、傾斜角を考慮する必要性も考えられる。したがって、井上ら（2000）と小島・石塚（1999）のモデルは、どちらも带状伐採地における光環境の推定に応用するには改良の余地がある。

そこで本研究では、带状伐採地における光環境の簡単な推定モデルを誘導し、その適合度を検証することを目的とした。このモデルは、井上ら（2000）のモデルを伐採帯内での任意の地点における光環境を推定できるように、また、傾斜角による影響を考慮できるように改良したものである。まず、井上ら（2000）と同様、光環境を表現する測度として天空率を用い、建築環境工学的な手法によって、带状伐採地における光環境を推定するモデルを誘導した。次いで、大分県内に造成された六つの带状伐採地を対象として、モデルによって推定した天空率と全天空写真によって実測した天空率とを比較し、その適合度を検証した。そして、誘導したモデルを用いたシミュレーションによって、モデルの変数としての傾斜角の必要性について議論した。さらに、誘導したモデルを用いた带状複層林施業の指針作成に向けた課題についても考察した。なお、本研究では、带状に伐採された部分を伐採帯、伐採帯とそれに隣接する保残林分を带状伐採地、そして下木の植栽された带状伐採地を带状複層林として定義する。

II. モデルの誘導

本研究では、光環境を表す測度として天空率を用いた。天空率とは、天空要素に関する立体角投射率として定義されており、以下のように説明できる（岡村ら 1995；Inoue *et al.* 1996）。図-1 に示すように、点 P を中心とする半径 1 の半球を描き、点 P から望まれる天空要素を S、点 P から S を包絡する錐面が半球を切り取る球面上の図形を S' とする。そして、S' を半球の底面上に正射影した図形を S₀ とすれば、この S₀ の底面積 π に対する百分率が天空率と

図-1. 天空率の概略

点P、天空率の測定地点；S、点Pから望まれる天空要素；S'、点PからSを包絡する錐面が半径1の半球を切り取る球面上の図形；S₀、S'を半球の底面上に正射影して得られる図形。

表-1. 調査林分の概要

	A		B		C		D		E		F	
帯幅 (m)	14.9		16.2		16.3		17.0		18.9		19.0	
傾斜角 (°)	25		36		36		31		32		35	
林齢 (年)	39		57		57		57		57		39	
樹高 (m)**	15.6±1.2	13.7±1.2	18.4±2.1	18.2±2.9	16.9±2.0	16.2±2.5	15.2±3.4	16.8±2.5	17.7±3.0	16.9±2.6	15.2±1.4	14.1±1.2
胸高直径 (cm)**	24.6±4.3	22.3±4.1	30.6±10.1	30.6±8.1	25.7±5.2	23.6±6.2	22.6±6.7	24.8±5.6	29.0±8.4	30.0±9.6	24.1±4.5	22.8±2.6
枝下高 (m)**	11.5±1.1	9.2±1.3	12.8±3.1	13.6±2.5	13.7±1.7	13.1±2.0	12.7±2.7	13.6±2.1	12.7±2.3	11.4±2.2	10.3±1.4	9.9±1.7
本数密度 (本 ha ⁻¹)**	1924	2091	1126	1535	1575	2720	1838	2428	1198	1463	1975	2569
測定本数 (本)***	41	33	34	38	23	34	52	35	31	36	28	20

* 平均±標準偏差。 ** 樹高, 胸高直径, 枝下高および本数密度については, 保残林分ごとの値を示す。 *** 樹高, 胸高直径および枝下高を測定した本数であり, 保残林分ごとで調査した面積が異なるため, 本数密度とは大小関係が必ずしも対応しない。

が植栽された。以降, これらの帯状伐採地をプロット A~F と記す。調査プロットの概況を表-1 に示す。

2. 調査方法

まず, 各プロットにおいて, 伐採帯の平均傾斜角と保残林分に生存している上木の樹高, 胸高直径, 枝下高および林分密度を調査した。次いで, 伐採帯と直交するような形で伐採帯内に約 10 m の間隔で 2 本のラインを設定した。これらのラインは, いずれも上木を調査した範囲に含まれている。そして, 一方の林縁から反対側の林縁にかけて各ライン上を 1 m 間隔で移動しながら全天空写真を撮影した。全天空写真はデジタルカメラ (Coolpix 4500 あるいは 990, Nikon, 東京) と専用の魚眼レンズ (Fish-eye converter FC-E8, Nikon, 東京) を用い, 地上高 1.2 m で曇天かつ無風時に撮影した。Yamamoto *et al.* (2010) にしたがって, まず, カメラを Auto モードに設定し, 伐採帯中央部付近においてレンズの光軸を鉛直上向きにして全天空写真を撮影し, その際のシャッタースピードと露出を記録した。次いで, カメラの設定を Manual モードに変更し, シャッタースピードと露出を Auto モードで記録した値に固定し, 全天空写真を撮影した。写真の画質は, どちらのカメラについても Normal に, 画像サイズは Coolpix 4500 では 2,272 × 1,704 pixel, Coolpix 990 では 2,048 × 1,536 pixel にそれぞれ設定した。Inoue *et al.* (2004b) は, 全天空写真による光環境の推定におけるカメラ機種の影響を報告している。しかし, Coolpix 4500 と 990 との間では影響の大きさが不明であるため, 本研究では機種の違いによる影響は無視した。撮影の際には, 植栽されている下木が遮蔽物として写真に写り込まないように注意した。六つのプロットにおいて撮影した全天空写真は全部で 220 枚であった。

3. 解析方法

撮影した全天空写真をコンピュータ (VAIO SLV24118FJB, Sony, 東京) に取り込み, 画像解析ソフト LIA32 (山本 2013) を用いて解析した。Otsu (1979) の教師なし判別分析を画像の Blue 成分の濃度ヒストグラムに適用し, 全天空写真を二値化した (Inoue *et al.* 2011)。Inoue *et al.* (2004a) の方法にしたがって, 魚眼レンズの画角と歪みを補正した上で, 岡村ら (1995) と Inoue *et al.* (1996) のアルゴリズムに基づいて, 二値化した全天空写真から天空率を算出した。

次いで, 現地調査で得られた平均傾斜角, 帯幅, 保残林分の平均樹高および伐採帯内での位置を誘導したモデルに代入し, 各プロットにおける写真撮影地点ごとでの天空率を推定した。推定の際には, 全天空写真の撮影高 (= 1.2 m) を両側の保残林分の平均樹高からそれぞれ減じた。式 (2) は解析的に解けなかったため, 実際の計算においては, 井上ら (2000) と同様, 偏角 0° を起点として 1° 刻みで数値積分を行った。ただし, 仮定 4 より積分区間が閉じていないことに注意し, 偏角 ϕ が -90° あるいは +90° となる部分を含む区間については, それぞれ -89.999° あるいは +89.999° となるようにして天空率を計算した。モデルによって推定した天空率と全天空写真によって実測した天空率を逆正弦変換した後, Wilcoxon の符号付順位検定によって比較した。比較の際には, 撮影地点ごとに 2 本のライン上で測定した天空率を平均した値を用いた。また, 推定した天空率の誤差を表すための測度として, 平均誤差, 相対平均誤差, 二乗平均平方根誤差 (RMSE) および相対 RMSE をプロットごとに求めた。

そして, 誘導したモデルを用いて, 帯幅と保残林分の樹高の値を変化させながら, 傾斜角 α を考慮しない場合 ($\alpha = 0^\circ$) と考慮した場合 ($\alpha = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ および 40°) における天空率をシミュレートし, 計算された値を比較した。なお, 今回のシミュレーションでは, 帯幅については 10~50 m の範囲を 2.5 m 間隔あるいは保残林分の樹高と帯幅の比を 0.10 間隔で, 保残林分の樹高については 10~40 m の範囲を 5 m 間隔でそれぞれ変化させながら天空率を計算した。また, 帯状伐採地における光環境は伐採帯内の位置によって異なるが (例えば, 井上ら 1996b), このシミュレーションでは, 天空率の最も高くなる伐採帯中央部と最も低くなる林縁部の 2 カ所を対象とし, 両側の保残林分における樹高は等しいと仮定した。傾斜角を考慮しない場合と考慮した場合における天空率の違いを定量するための測度として, 考慮した傾斜角ごとに相対偏差を求めた。統計処理では有意水準を 5% とし, 統計ソフト R2.15.1 (R Development Core Team 2013) を用いた。

IV. 結 果

誘導したモデルによって推定した天空率と全天空写真によって実測した天空率との関係ならびに各プロットにおいて撮影された全天空写真の一例を図-3 に, また, 推定し

図-3. モデルによって推定した天空率と全天空写真によって実測した天空率の比較ならびに各プロットにおいて撮影した全天空写真の例

図中の○は全天空写真による天空率の実測値、実線はモデルによる天空率の推定値、網掛け部は保残林分をそれぞれ示す。写真の上側が斜面下部である。林冠の空隙の多くみられるプロットAとCでは、天空率の実測値と推定値との間に有意な差がみられたが、その他のプロットにおいてはみられなかった。

表-2. モデルによって推定した天空率の誤差

	A	B	C	D	E	F
平均誤差 (%)	-4.8	1.4	-7.5	-1.3	-0.3	0.2
相対平均誤差 (%)	-9.0	4.5	-15.5	-2.0	0.7	1.9
二乗平均平方根誤差 (%)	6.0	3.3	7.7	3.0	3.4	3.7
相対二乗平均平方根誤差 (%)	12.6	8.9	15.9	6.8	7.6	7.7

た天空率の誤差を表-2にそれぞれ示す。いずれのプロットにおいても、天空率の実測値は林縁部において低く、伐採帯中央部に近づくにつれて高くなった。モデルによる天空率の推定値も同様の傾向を示し、伐採帯内における光環境の水平分布を良く再現していた。

Wilcoxon の符号付順位検定によって天空率の実測値と推定値とを比較した結果、六つのうち四つのプロットでは有意な差は認められなかったが、プロットAとCでは過小推定であった。有意差のみられたプロットAとCでは、相対平均誤差がそれぞれ-9.0%と-15.5%、相対RMSEが12.6%と15.9%となり、他のプロットと比べ、相対平均誤差で2~20倍、相対RMSEで1.4~2.3倍大きかった。

傾斜角を考慮しない場合と考慮した場合について、誘導したモデルによる天空率の計算値を比較した結果を図-4に示す。なお、図には傾斜角を20°と40°とした場合の結果のみを示し、傾斜角を10°と30°とした場合については、結果が同様であったので省略している。伐採帯中央部と林縁部のいずれにおいても、天空率あるいは傾斜角の値が大きくなるほど、傾斜角を考慮した場合において天空率が低くなった。傾斜角を考慮しない場合 ($\alpha=0^\circ$) の天空率に対する傾斜角を考慮した場合の天空率の相対偏差は、伐採帯中央部では傾斜角20°の場合には平均値で-1.2%、最大値で-4.2%、40°の場合には平均値で-2.9%、最大値で-13.7%となった。また、林縁部における相対偏差は、傾斜角20°の場合には平均値で-2.3%、最大値で-4.0%、40°の場合には平均値で-7.9%、最大値で-13.2%となった。

V. 考 察

1. 推定値と実測値との比較

本研究では、帯状伐採地における光環境を推定するモデルを誘導し、全天空写真によって実測した天空率と比較した。光環境をモデル化する際、相対照度との相関の高い天空率 (Inoue *et al.* 1996, 2002; Yamamoto *et al.* 2010) を光環境の指標として用いており、林木の成長に対して、より直接的に影響する光量子束密度を用いていない。しかし、相対照度と相対光量子束密度との相関が高いことから (例えば, Muraoka *et al.* 2001), 天空率と相対光量子束密度と

図-4. 傾斜角を考慮した場合と考慮しなかった場合での天空率の計算値の比較

図中の○と▲は、傾斜角を20°と40°にした場合を、図中の点線は1:1をそれぞれ示す。

の間にも相関が予想できる。したがって、光量子束密度を光環境の指標として用いていないことは、本研究において誘導するモデルの有用性を必ずしも否定しない。

天空率の推定値と実測値は、いずれも林縁部において低く、伐採帯中央部付近において最も高くなった。この結果は、帯状伐採地において光環境を実測した既存の報告(竹内ら 1992; 竹内・川崎 1995; 井上ら 1996b; 久保田ら 1996; 谷口 2002; 作田ら 2009)に矛盾しない。なお、推定した天空率の値が、伐採帯の中央を対称軸として線対称にならなかったのは、両側の保残林分で平均樹高が異なっていたためである(表-1)。

天空率の実測値と推定値とを比較した結果、六つのうち四つのプロットでは有意な差は認められなかったが、プロット A と C では過小推定であった(表-2)。本研究において誘導したモデルでは、保残林分の樹高に等しい高さの壁が伐採帯の両側に直立していること、すなわち保残林分の林冠を通して伐採帯内に光が入射してこないことを仮定している(仮定 4)。しかし、本研究において撮影した帯状伐採地の全天空写真(図-3)をみると、保残林分における林縁木の梢端を連結したスカイラインよりも下部において、林冠の空隙が認められる。このような林冠の空隙から入射する光を無視しているために、誘導したモデルでは天空率が過小推定されるものと考えられる(久保田ら 1996)。また、誘導したモデルでは、同じ仮定 4 より、林縁木の伐採帯内方向への枝張りの影響を無視して光環境を推定していることになる。これに対し、全天空写真による測定では、伐採帯内方向への枝張りによって上方からの光が遮られ、この影響は林縁部付近において強く現れる。すなわち、誘導したモデルでは、林縁木の枝張りが無視されるために、特に林縁部付近において天空率が過大推定されるものと考えられる(小島・石塚 1999)。このことは、図-3 に示す天空率の推定値と実測値との比較において、林縁部の天空率が過大推定されている場合が多いことから確認できる。

このように、保残林分の林冠を通して伐採帯内に入射する光の影響と林縁木の枝張りによって遮蔽される光の影響の大小関係によって、天空率の推定誤差は決まっているものと考えられる。本研究において撮影した全天空写真(図-3)をみると、天空率が過小推定であったプロット A と C において、他のプロットに比べてスカイラインよりも下部における林冠の空隙が相対的に多くみられる。これら二つのプロットでは、保残林分の林冠を通して入射する光の影響が、林縁木の枝張りによって遮蔽される光の影響よりも大きかったため、天空率の推定値が過小となったのであろう。なお、過小推定されたプロット A の林縁部付近においてのみ過大に推定されたのは、林縁部の枝張りによる影響の方が、保残林分の林冠を通して入射する光の影響よりも強く現れたためだと予想できる。一方、他の四つのプロットにおいては、これらの影響が相殺されたため、天空率の推定値と実測値との間に有意差がみられなかったのかも知

れない。

以上の結果は、帯幅だけでなく、保残林分の林況を人為的に調整する(例えば、間伐によって保残林分の本数密度を低下させる)ことによっても、帯状伐採地における光環境を制御できる可能性を示唆している。保残林分の管理による帯状伐採地の光環境への影響を考慮するためには、誘導したモデルに保残林分の林況に関する情報を組み込むことが必要である。小島・石塚(1999)は、Monsi and Oshima(1955)の理論をもとにして、円形と方形の林冠ギャップ内に保残林分の林冠を通して入射する光を推定する方法を示している。しかし、この方法では、ギャップ形成前の林内相対照度がわかっていなくてはならない。本研究において対象とした帯状伐採地では、伐採前における相対照度を測定していないため、この方法の有効性を検証できない。小島・石塚(1999)による方法のモデルへの組み込みとその有効性の検証については、今後の課題としたい。また、保残林分における林縁木の枝張りによる影響を考慮するためには、樹冠に関する情報をモデルに組み込むことが必要となり、結果として推定の作業が煩雑となる。したがって、小島・石塚(1999)のモデルと同様、林縁木の枝張りによる影響を強く受ける林縁部付近については、光環境を推定する範囲から除外して取り扱う方が良いのかも知れない。これまでの帯状複層林施業に関する議論では、伐採幅をどのくらいに設定するのかという問題が重視されており、保残林分の取り扱いについては、あまり関心が払われていなかった。保残林分の取り扱いについても、今後、積極的に検討していくべきであろう。

2. 傾斜による影響

誘導したモデルによると、伐採帯内における光環境は、帯幅、保残林分の樹高、伐採帯内での位置および傾斜角によって推定できる。もし、傾斜角を考慮しない場合と考慮した場合とで光環境の計算値に違いがなければ、井上ら(2000)ならびに小島・石塚(1999)のモデルと同様、傾斜角を無視しても実用上は差し支えないと判断できる。そこで、傾斜角を考慮しない場合と考慮した場合で、天空率の計算値を比較した(図-4)。その結果、伐採帯中央部と林縁部のいずれにおいても、天空率の値が高くなるほど、また、傾斜角が大きくなるほど、傾斜角を考慮した場合には天空率が低くなることがわかった。この原因としては、傾斜が急になるにつれて、林地斜面によって遮光される割合が高まり、受光空域が狭くなっていくことが影響していると考えられる。加えて、帯幅が広がる、あるいは保残林分の樹高が低くなるほど、林地斜面による影響をより強く受けるようになることも考えられる。すなわち、誘導したモデルでは、光環境の計算値は傾斜角の影響を受けてだけでなく、その影響は一定ではなく、帯幅と保残林分の樹高によって変動するのであろう。加えて、傾斜角を考慮しない場合と考慮した場合における天空率の相対偏差は、過小推定であったプロット A と C を除くと、モデルによる相対平均誤差と同程度かそれ以上の大きさであった

(表-2)。以上のことは、帯状伐採地における光環境を推定する際に、傾斜角が無視できない変数の一つであることを示している。わが国における林業は急傾斜地で営まれる場合が多いので(後藤 1982)、今後、帯状複層林施業の指針を検討していく上で、光環境の推定における傾斜角の影響には注意を払う必要がある。

3. 帯状複層林施業の指針作成に向けた課題

最後に、本研究において誘導したモデルの帯状複層林施業の指針作成への応用方法について述べる。このモデルを用いて光環境を推定するためには、まず、地形図あるいは現地調査によって帯状複層林を造成しようとする林分の傾斜角を測定する。次いで、現地調査によって、林分の平均樹高を測定する。この際、現地調査を行わなくても、航空機 LiDAR による観測データがあれば、効率的に林分の平均樹高を把握できる(例えば, Yamamoto *et al.* 2011)。そして、小島・石塚(1999)の応用によって、保残林分の林冠を通して伐採帯内に入射する光の影響も考慮するためには、林内相対照度も測定しておく必要がある。さらに、下木の健全な成長や下刈り作業の省力化、生物多様性の維持のために必要な天空率の目標値を決めれば、誘導したモデルによって目標とする天空率を得るために必要な帯幅を推定できる。この際、相対照度と天空率との関係式(Inoue *et al.* 2002; Yamamoto *et al.* 2010)が帯状複層林についてもわかっていれば、相対照度と下木の成長や植生量との関係を調べた先行研究の知見(例えば、藤森 1989)を天空率の目標値を決める際に活用できるのかも知れない。今後、帯状複層林施業の指針を作成していくためには、光環境の推定モデルの適合度を高めることと同等に、上述のような光環境の目標値を明確にしていくことも重要である。

また、帯状複層林における光環境は、上木と下木の樹高成長にともない変化する。上木よりも下木の樹高成長が大きければ、上木と下木での樹高差が小さくなるために、林内の光環境(下木の梢端部における光環境)は明るくなる。逆に、下木の樹高成長の方が小さければ、樹高差が大きくなるために暗くなる。上木の樹高成長については、地位指数曲線のような樹高成長モデルによって推定できる(例えば, Mitsuda *et al.* 2007)。下木についても、上木による光環境の制限を反映した樹高成長モデル(尾方ら 1983; 松本 1993)が適用できれば、光環境と樹高成長のモデルを組み合わせることによって、帯状複層林における光環境を動的に推定できるようになるとともに、下木の収穫予測も可能になるかもしれない。図-3からもわかるように、帯状複層林における光環境は、伐採帯内の位置によって大きく異なる(例えば、井上ら 1996b)。このような光環境の違いが下木の毎年の成長に累積されていくため、下木のサイズは伐採帯中央部付近では大きくなるが、林縁部付近では小さくなる(井上ら 1996b; 久保田ら 1996; 谷口 2002)。帯状複層林における下木の収穫予測を試みるには、このような伐採帯内での下木サイズのばらつきを考慮する必要がある、そのためには伐採帯内での任意の位置におけ

る光環境の推定モデルが必要となる。この点においても、井上ら(2000)と小島・石塚(1999)のモデルは、林縁部あるいは伐採帯中央部での光環境しか推定できないため、帯状伐採地における光環境の推定モデルとしては不十分だと言わざるを得ない。以上のように、本研究において誘導したモデルは、帯状複層林施業における収穫予測を可能にし、具体的な施業指針を作成する際の判断材料を提供できる可能性が高い点において有用だと考える。

VI. おわりに

本研究では、帯状伐採地における光環境の簡単な推定モデルを誘導した。このモデルは、井上ら(2000)による林道における光環境の推定モデルを改良したものであり、推定に必要な変数が帯幅、保残林分の樹高、伐採帯内での位置および傾斜角の四つと少なく、帯状伐採地における光環境を容易に推定できる点において有用である。しかし、保残林分が疎な場合、このモデルでは保残林分の林冠を通して伐採帯内に入射する光が無視されるために過小推定となる。この点については、今後、小島・石塚(1999)を参考にしながら、モデルをさらに改良していく必要がある。また、モデルのシミュレーションを通して、帯状伐採地の光環境を推定する際には、傾斜角を考慮する必要があることを明らかにした。この知見は、モデルによる光環境の推定結果をもとに、帯状複層林施業の指針を検討していく上で重要だと考える。今後は、誘導したモデルをさらに適合度の高いものへと改良していくとともに、帯状複層林施業の具体的な指針についても検討していきたい。

最後に、本研究を行うにあたり、大分県農林水産部森林整備室には、調査地をご提供いただくとともに、調査にあたり種々ご便宜を図っていただいた。熊本県立大学環境共生学部居住環境学科の辻原万規彦准教授には、天空率に関する有益な文献を多数ご紹介いただいた。九州大学農学部森林計画学研究室の学生諸氏には、現地調査において多大なご協力をいただいた。本研究の一部は科研費24580217(代表: 山本一清)の助成を受けて実施した。ここに深甚なる謝意を表する。

引用文献

- 荒木実穂・溝上展也・村上拓彦・吉田茂二郎(2007) 帯状複層林造成における生産性の評価. 九州森林研究 60: 163-166
- 藤森隆郎(1989) 複層林の生態と取扱い. 林業科学技術振興所
- 藤森隆郎(1992) 複層林マニュアル 施業と経営. 全国林業改良普及協会
- Fujishima M, Naramoto M, Mizunaga H (2011) Simulation of strip-gap arrangement in cedar plantations to regulate the light environment and competition between dwarf bamboo and beech seedlings. Forestry 84: 505-515
- 後藤純一(1982) 山岳林施業に対する数値地形図の応用. 高知大演報 9: 1-13
- 飯盛 功(1983) 帯状伐採区での陽光把握の方法. 林試研報 323: 41-46
- Inoue A, Yamamoto K, Mizoue N (2011) Comparison of automatic and interactive thresholding of hemispherical photography. J For Sci 57: 78-87
- 井上昭夫・柳本干城・黒川泰亨(2000) 林道における光環境の簡単な推定モデル. 森林学誌 15: 155-160
- Inoue A, Yamamoto K, Mizoue N, Kawahara Y (2002) Estimation of relative illuminance using digital hemispherical photography. J For

- Plann 8: 67-70
- Inoue A, Yamamoto K, Mizoue N, Kawahara Y (2004a) Calibrating view angle and lens distortion of Nikon fish-eye converter FC-E8. *J For Res* 9: 177-181
- Inoue A, Yamamoto K, Mizoue N, Kawahara Y (2004b) Effects of image quality, size and camera type on forest light environment estimates using digital hemispherical photography. *Agric For Meteorol* 126: 89-97
- Inoue A, Okamura A, Mizoue N, Tearaoka Y, Imada M (1996) Estimation of relative illuminance in forests using hemispherical photographs. *J For Plann* 2: 125-129
- 井上昭夫・田淵隆一・川崎達郎・酒井 武・竹内郁雄 (1996a) 下刈りを省いた帯状更新地におけるスギ・ヒノキ下木と侵入広葉樹との競合. *日林九支研論* 49: 19-20
- 井上昭夫・岩神正朗・田淵隆一・川崎達郎・酒井 武・竹内郁雄 (1996b) 下刈りを省いた帯状更新地におけるスギ・ヒノキ下木の成長. *高知大演報* 23: 1-10
- 気象庁 (2013) 気象統計情報. <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (2013 年 4 月 25 日取得)
- 小島 正・石塚森吉 (1999) 林冠ギャップの光環境管理図. *日林関東支論* 50: 61-64
- 久保田典子・藤本浩平・西村武二 (1996) 帯状伐採地における日射環境と植栽木の成長量について. *高知大演報* 23: 11-24
- Ito S, Ishigami S, Mizoue N, Buckley GP (2006) Maintaining plant species composition and diversity of understory vegetation under strip-clearcutting forestry in conifer plantations in Kyushu, southern Japan. *For Ecol Manage* 231: 234-241
- 松本光朗 (1993) 複層林における下木の樹高成長モデル. *日林九支研論* 46: 41-42
- Mitsuda Y, Ito S, Sakamoto S (2007) Predicting the site index of sugi plantations from GIS derived environmental factors in Miyazaki Prefecture. *J For Res* 12: 177-186
- 溝上展也 (2007) 帯状・群状伐採方式の類型. (主張する森林施業論. 森林施業研究会編, 日本林業調査会). 176-187
- 溝上展也・伊藤 哲・井 剛 (2002) 宮崎県諸塚村における帯状複層林のスギ・ヒノキ下木の成長特性. *日林誌* 84: 151-158
- Monsi M, Oshima Y (1955) A theoretical analysis of the succession process of plant community, based upon the production of matter. *Jpn J Bot* 15: 60-82
- Muraoka H, Hirota H, Matsumoto J, Nishimura S, Tang Y, Koizumi H, Washitani I (2001) On the convertibility of different microsite light availability indices, relative illuminance and relative photon flux density. *Funct Ecol* 15: 798-803
- 長池卓男 (2000) 人工林生態系における植物種多様性. *日林誌* 82: 407-416
- 日本建築情報センター編 (2006) Jw_cad 日影・天空率完全マスター. エクスナレッジ
- 尾方信夫・上中作次郎・飯盛 功 (1983) 林分構成と下木の成長. *林試研報* 323: 111-114
- 岡村篤典・増谷利博・今田盛生 (1995) 間伐による林内光環境の変化. *九大演報* 72: 151-158
- 恩田裕一編 (2008) 人工林荒廃と水・土砂流出の実態. 岩波書店
- Otsu N (1979) A threshold selection method from grey-level histogram. *IEEE T Syst Man Cyb* 8: 62-66
- R Development Core Team (2013) The R project for statistical computing. <http://www.r-project.org/> (2013 年 4 月 25 日取得)
- 林野庁 (2012) 平成 23 年度 森林・林業白書. <http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/23hakusyo/index.html> (2013 年 4 月 17 日取得)
- 作田耕太郎・谷口 奨・井上昭夫・溝上展也 (2009) ヒノキ人工林における帯状伐採が林床の微気象と樹木種の多様性に与える影響. *日林誌* 91: 86-93
- Shimizu T (1994) Effects of contour-line strip-cutting on stream flow (II) Short-term runoff characteristics during the warm season. *J Jpn For Soc* 76: 492-499
- Shimizu T, Tsuboyama Y, Hosoda I (1994) Effects of contour-line strip-cutting on stream flow (I) Long-term runoff characteristics during the warm season. *J Jpn For Soc* 76: 393-401
- 竹内郁雄・川崎達郎 (1995) 低コスト育林の事例 (IV) 帯状更新地におけるスギ・ヒノキの成長. *日林関西支論* 4: 125-126
- 竹内郁雄・川崎達郎・森 茂太 (1992) 低コスト育林の事例 (II) 下刈りを省いた帯状更新. *日林論* 103: 457-458
- 谷口真吾 (2002) 帯状更新地におけるケヤキ, スギ, ヒノキの成長—植栽から 9 年目および 11 年目の結果—. *森林応用研究* 11(2): 43-47
- 谷口 奨・作田耕太郎・井上昭夫・溝上展也 (2006) ヒノキ人工林における埋土種子の発芽量と種構成. *九州森林研究* 64: 69-71
- 山本一清 (2013) LIA for Win32 (LIA32). <http://www.agr.nagoya-u.ac.jp/~shinkan/LIA32/index.html> (2013 年 4 月 25 日取得)
- Yamamoto K, Kobayashi K, Nonoda T, Inoue A, Mizoue N (2010) Effect of setting of digital fisheye photography to estimate relative illuminance within forest under low light conditions. *J For Res* 15: 283-288
- Yamamoto K, Takahashi T, Miyachi Y, Kondo N, Morita S, Nakao M, Shibayama T, Takaichi Y, Tsuzuku M, Murate N (2011) Estimation of mean tree height using small-footprint airborne LiDAR without a digital terrain model. *J For Res* 16: 425-431