森林の3次元構造を用いた林内下向き放射量と林内融雪量の空間代表性

(1) 推定方法

Spatial Representativeness of the Downward Radiation and Snowmelt Rates in a Forest Based on the Three Dimensional Forest Structure

(1) Estimation Method

橋本 哲*

Tetsu HASHIMOTO

(岩手大学大学院連合農学研究科)

(The United Graduate School of Agricultural Sciences, Iwate University)

太田岳史**・中村 勉**

Takeshi OHTA・Tutomu NAKAMURA

(岩手大学農学部)

(Faculty of Agriculture, Iwate University)

We proposed procedures for estimating the hourly value of the global solar radiation, downward long-wave radiation and snowmelt rates at any position in a forest, using the three dimensional distribution of the foliage density in about one hectare. The three dimensional distributions were reconstructed with the fisheye photographs. Results of the estimations are as follows: The estimated values of the global solar radiation in forests agreed well with the observed values under the leafless conditions. Under the leafed conditions, the direct solar radiation through gaps of the canopy was not reproduced satisfactorily. Estimated values of the downward long-wave radiation and snowmelt rates in the forests were close to the observed values. And we could conclude that the spacial variability of the daily global solar radiation, hourly downward long-wave radiation and daily snowmelt rates in the forests estimated by the procedures had good reproducibilities.

Key words: Forest, Three dimensional distribution of foliage density, Global solar radiation, Downward long-wave radiation, Snowmelt rates on a forest floor

全天空写真から推定した約1haの森林の葉群密度の3次元分布を用いて、林内任意の位置での全天日射量、下向き長波放射量および融雪量を1時間単位で推定する方法を示し、その妥当性を検討した。全天日射量の推定値の再現性は、落葉状態では良好であった。着葉状態では林冠の隙間から入射する直達日射による大きなピークが再現できない傾向が現われた。下向き長波放射量の推定値の再現性は良好であった。融雪量の経時変化は良好に再現された。日融雪量の再現性も良好であった。また、この推定手法による林内における全天日射量、下向き長波放射量および融雪量の空間変動量は、全天日射量と融雪量については日値で、下向き長波放射量については時間値で再現できることが結論づけられた。

キーワード：森林、3次元葉群密度分布、全天日射量、下向き長波放射量、林内融雪量

I. はじめに

積雪山地流域からの融雪水は貴重な水資源である

一方、融雪地すべりなどの誘因となる。水資源の有効利用や防災対策のためには広域における融雪量分布を的確に推定してゆく必要がある。

*岩手大学大学院連合農学研究科 〒020 盛岡市上田3-18

現在、名古屋大学大気圏科学研究所COE研究員 〒464 名古屋市千種区不老町

The United Graduate School of Agricultural Sciences, Iwate University Ueda, Morioka, 020

The Institute for Hydrospheric-Atmospheric Sciences of Nagoya University Hurou-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464

**岩手大学農学部 〒020 盛岡市上田3-18

Faculty of Agriculture, Iwate University Ueda, Morioka, 020

日本の積雪流域は多様な森林に覆われている。これまで、森林が融雪量に与える影響について、林内外や森林状態の異なる林内を対象に融雪量と雪面熱収支の比較観測やモデルによる検討が行われてきた。その結果、林内融雪量は無林地の融雪量より少なくなり(小池ら, 1985; 橋本ら, 1992; 石井ら, 1992), 森林状態により変化する(Price and Dune, 1976; Yamazaki and Kondo, 1992; Hashimoto *et al.*, 1994; 鈴木ら, 1994)ことが指摘されている。

従って、広域山地流域における融雪量分布を的確に推定するためには、森林状態分布を考慮した熱収支法により融雪量分布を推定する必要がある。そのためには、ある森林状態での林内融雪量の空間平均値を熱収支法により推定する手法を確立しなければならない。

上に述べた森林による融雪量の変化は、主に、森林による全日射量(太田ら, 1990; 石井ら, 1992), 下向き長波放射量(石井ら, 1992; Hashimoto *et al.*, 1994; 鈴木ら, 1994), 純放射量(橋本ら, 1992)および風速(橋本ら, 1992; Hashimoto *et al.*, 1994)の変化により生じている。林内融雪量に寄与する純放射量の割合は93%(Price, 1988), 76%(橋本ら, 1992), 94%(石井ら, 1992), 72%(鈴木, 1995), 50%(小池ら, 1995)と非常に高い。したがって、林内融雪量の空間平均値の推定にとって、林内純放射量の空間平均値の推定が重要となる。

林内純放射量の推定には、まず、林内全日射量の推定が必要となる。林内全日射量は森林が密なほど小さくなる。一方、林内下向き長波放射量は無林地に対して増加し(石井ら, 1992; 中林ら, 1993, Hashimoto *et al.*, 1994), 森林が密なほど大きくなる(鈴木ら, 1994; Hashimoto and Ohta, 1997)。つまり、林内全日射量が小さくなるほど、林内下向き長波放射量は増加する傾向にある。このことは、森林状態による純放射量の変化を全日射量の変化よりも小さくし、森林状態による林内融雪量の違いが全日射量の違いほど大きくなる原因の1つとなっている(石井ら, 1992; 鈴木ら, 1994)。また、Hashimoto *et al.* (1994)の観測結果のように、林内全日射量の小さな森林内での融雪量の方が林内全日射量の大きな森林内での融雪量よりも多くなった主因となっている。つまり、林内融雪量の空間平均値の推定においては、林内全日射量だけでなく林内下向き長波放射量の推定も重要となる。以後、全日射量と下向き長波放射量をまとめて述べるときに

は、下向き放射量という。

林内における下向き放射量および融雪量の空間平均値の推定手法に対する検証データとして、実際的には林内1点または数点での測定値を用いることになる。しかし、これまで、林内1点における空間代表性についての検討例は全日射量のみであり(例えば, Gay *et al.*, 1971; Reifsnyder *et al.*, 1971; Mukammal, 1971), 下向き長波放射量と融雪量については検討されていない。林内下向き放射量の空間分布は、林内融雪量の空間分布に強く影響すると考えられ、これらの空間代表性を同時に検討できる手法が必要である。林内下向き放射量の空間分布は森林の3次元構造により形成される。

そこで本研究では、森林構造の3次元分布を推定し、この推定結果を用いて、林内下向き放射量と林内融雪量の空間分布を計算し、これらの空間代表性を検討する。本報告では、まず、約1haの森林を対象に全天空写真を用いて森林構造の3次元分布を推定する。そして、林内任意の位置における下向き放射量と融雪量を推定する方法を提示し、その妥当性を検討する。

II. 全天空写真の撮影および気象要素と融雪量の観測

1. 観測場所

岩手山の南麓にあるカラマツ・アカマツ人工林内には、図-1に示すように立木密度の調整されたA区からD区の試験林(39° 48'N, 140° 58'E, 標高約600m)が設けられている(大石, 1995)。立木密度の最も疎なA区内と最も密なD区内に図-1のように110m×110mのプロットを設け、本研究の研究対象林分とした。A区は処理区であり、カラマツ・アカマツからなる上層木は処理前の約50%が伐採され、中下層木はほとんど伐採されている。A区では着葉期でも林冠は閉鎖しない。D区は無処理区で、上層木であるカラマツ・アカマツと中下層木の3層からなる。中下層木は落葉広葉樹である。A区内のプロットをP1地点、D区内のプロットをP2地点と呼ぶ。両地点ともにほぼ平坦地である。立木密度は、P1地点で411本/ha, P2地点で1,433本/haである。上層木の平均樹高は、両地点ともに約16mである。本研究では、P1地点とP2地点において新葉の展開が完了した着葉状態(6月中旬～9月下旬)および落葉が完了した落葉状態(11月下旬～5月上旬)を対象とした。図-2に両地点の着葉状態と落葉状態の中心点での全天空写

図一 1 研究対象林分 (P1地点とP2地点) の位置

図一 2 P1地点とP2地点の中心で撮影した全天空写真

真をゼロックスコピーしたものを示す。

また、森林上への下向き放射量を得るために、無林開地に観測地点を2点設けた。1点は、P1地点の北側に隣接する平坦な開地である。ここでは融雪期での観測を行った。この観測地点をP3地点とよぶ。もう1点は標高約490mに位置する平坦な開地である。この開地とP1、P2地点との水平距離は約1.7kmである。ここでは無積雪期での観測を行った。この観測地点をP4地点とよぶ。

2. 全天空写真の撮影

研究対象林分の3次元構造を推定するために、P1、P2地点の林床上の中心点と10m格子点(図一3の△印と●印)で、着葉状態と落葉状態の全天空写真を撮影した。撮影はハレーションを防ぐため完全曇天時や日没直後に行った。魚眼レンズ(Fisheye Nikkor 8mm f/2.8S, Nikon製)をカメラに装着し三脚に鉛直上向きに固定して撮影した。全天空写真上で方位を把握するために魚眼レンズの縁の北側にマークを取付け全天空写真の水平線の円付近に写るようにした。

ネガ上の全天空画像は濃淡値にデジタル化した。そして、全天空を樹体と空に分けるために濃淡画像を天神ら(1979)の方法で二値化した。天神(1979)らの方法は、まず、画像内に分割領域を半分重なるように設置し、各分割領域毎に判別分析によりしきい値を求める。このしきい値を各分割領域の中心の画素のしきい値とする。この結果、しきい値の決まった画素が格子点として存在することになる。他の画素のしきい値は、その画素を囲む通常4つの格子点のしきい値から格子点との距離に反比例した重み付けによる線形加重和によりもとめる。この方法は、画像中の場所により平均的な濃度が変化している場合に有効である。また、判別分析と幾何学的計算によりしきい値を計算するので分割領域の大きさ以外に任意性がない。

3. 気象要素と融雪量の観測

観測期間は1993年7月から1995年11月である。各年も積雪期は12月上旬から4月中旬である。

P1～P4地点における観測期間と観測項目を図

図一3 研究対象林分内における全天空写真の撮影位置および気象要素と融雪量の観測位置

一4に示す。また、表一1に気象要素の観測測器を示す。

1993年の観測は、P1地点とP2地点の中心点(図一3の△印)およびP4地点で行われた。地表面温度はサミスター温度計を地表面から少し見える程度に地表に挿入して測定した。全日射量が0で、かつ降水により純放射計が濡れていないと判断された時間帯を対象に各点の下向き長波放射量を純放射量と地表面温度から算出した。この観測期間における各地点の下向き長波放射量は夜間のみを対象に算出されており、場所による地表面温度の違いが下向き長波放射量の算定値に与える影響は小さいと考える。

1994年と1995年の融雪期(3月下旬～4月中旬)には、P1、P2地点およびP3地点において、気象要素、表層融雪量および雪面蒸発量を測定した。林内における観測位置は図一3に示されている(気象要素は△印)。

気温と相対湿度のセンサー部は強制通風された。P1、P2地点の下向き長波放射量の測定は5日～10日間隔で交互に行った。融雪期では、下向き長波放射量の測定時間は全日である。

図一4 各地点での観測項目と観測期間

測定期間の前後に記された数字は、測定の開始と終了の月/日

表層融雪量は水平に張った水糸上の20cm間隔の5点と雪面との距離を1mm単位の物差しで1時間毎に測定する雪面低下法により測定した。

雪面蒸発量は蒸発パン(表面積214cm²、深さ7.5cm)の重量変化を1時間または2時間毎に測定した。そして、無次元バルク係数を算定するために、2時間毎の蒸発量の実測値と雪面蒸発のバルク式におけるバルク係数以外の値の積とをプロットして、原点を通る回帰直線の傾きを求めた。この結果、回帰直線の傾きはP1地点で0.0034、P2地点で0.0044、P3地点で0.0021となった。各プロットデータ毎にバルク式から逆算したバルク係数に対する回帰直線の傾きの平均相対差を算出すると、P1地点で0.61、P2地点で0.53、P3地点で0.64となった。回帰直線に対するデータプロットのばらつきは比較的大きいと判断される。このようなばらつきは、実際のバルク係数の時間変動および蒸発量と気象要素の測定誤差によると考えられる。回帰直線の傾きをバルク係数とすることは、測定誤差によるバルク係数の推定誤差を小さくしていると考えられる。ここでは、バルク係数の時間変動については考慮せず、平均的なバルク係数として回帰直線の傾きを各地点のバルク係数として採用した。

1994年10月～1995年11月の無積雪期にはP1、P2地点において図一3に示した格子点上の16点(○印)と中心点(△印)で全日射量を測定した。測定は1～2週間間隔で両地点で交互に行った。また、P4地点では全日射量と散乱日射量を測定した。

表一 1 気象要素の観測に用いた測器

観測項目	測 器	観測地点
全天日射量	シリコンフォトダイオード日射計（自作）＊ ネオ日射計（MS-42, 英弘精機）	P 1, P 2, P 3, P 4** P 4**
散乱日射量	精密全天日射計（MS-800, 英弘精機） SHADOW BAND (MB-11, 英弘精機)	P 4** P 4**
日射反射量	シリコンフォトダイオード日射計（自作）＊	P 1, P 2, P 3
下向き長波放射量	精密赤外放射計（MS-200, 英弘精機）	P 1, P 2, P 3
純放射量	示差式純放射計（CN-11, 英弘精機）	P 1, P 2, P 3, P 4
気温と相対湿度	温湿度プローブ（VH-L-Z1, グラント インスツルメンツ）	P 1, P 2, P 3
風速	光電式三杯微風速計（AC750, 牧野）	P 1, P 2, P 3
地表面温度	サーミスタ温度計（CM-U-F3, グラント インスツルメンツ）	P 1, P 2, P 4

＊ ネオ日射計で検定したもの

** P 4 地点においては、1993年にはシリコンフォトダイオード日射計により全天日射量を測定し、1994年と1995年にはネオ日射計と精密全天日射計により全天日射量と散乱日射量を測定した。

以上の気象要素の観測高度は地面上または積雪面上約1.3mである。各気象要素は5分間隔で瞬間値がデータロガーにより測定・記録された。

Ⅲ. 森林の3次元構造の推定

本研究では、研究対象林分の3次元構造の推定にあたって、Koike(1985)が提示した葉群密度の2次元分布の推定手法を3次元に拡張した。Koike(1985)によれば、葉群密度とは単位長さ当りの線分が葉に接触する回数である。ここでは、葉だけでなく他の群落構成要素(枝や幹など)に接触する回数も含める。以後、葉群密度の3次元分布を葉群密度空間分布という。

1. 推定原理

Koike(1985)による推定原理を以下に述べる。推定対象空間を分割し、各分割空間内の葉群密度を一樣と仮定する。この仮定により、群落構成要素の傾きの分布はランダムであることを仮定していることになる。図一5は推定対象空間の分割例である。ここでは各分割空間の番号を $j(j=1, 2, 3, \dots,$

$N_P)$ とする。 N_P は推定対象空間の分割数である。推定対象内の任意の地点から合計 N_V 本の射線 $V_i(i=1, 2, 3, \dots, N_V)$ を上向きに発生させる。

射線 V_i の群落構成要素への接触数 D_i は、次式で表される。

$$D_i = \sum_{j=1}^{N_P} L_{ij} \cdot F_j \quad (i=1 \sim N_V) \quad (1)$$

ここで、 i は射線番号、 j は分割空間番号、 N_P は推定対象空間の分割数、 L_{ij} は射線 V_i が分割空間 j を通過した距離、 F_j は分割空間 j における葉群密度、 N_V は射線の総数である。射線 V_i が通過しない分割領域の L_{ij} は $L_{ij}=0$ となる。一方、 D_i は、射線 V_i の方向にギャップがあり射線が群落構成要素に接触しない確率 P_i を用いて、

$$D_i = -\ln P_i \quad (i=1 \sim N_V) \quad (2)$$

と表される。(1)式と(2)式から

$$-\ln P_i = \sum_{j=1}^{N_P} L_{ij} \cdot F_j \quad (i=1 \sim N_V) \quad (3)$$

となる。 P_i を射線 V_i の発生位置で撮影した全天空写真からもとめ、 L_{ij} を幾何学的計算からもとめれば(3)式は、 N_P 個の未知数 F_j をもつ N_V 元連立一次方程式

図一五 葉群密度空間分布の推定原理の説明図

となる。各分割領域内を少なくとも1本の射線が通過し、 $N_v \geq N_F$ であれば(3)式をすべての F_j について解くことが可能となる。

2. 研究対象林分の葉群密度空間分布の推定

1) 推定方法

本章1で述べた推定原理を用いてP1, P2地点それぞれの着葉状態と落葉状態の葉群密度空間分布を推定した。推定空間は両地点ともに水平方向に110m×110m, 鉛直方向に16mとした。

分割空間の大きさは次のように決定した。本研究では、全天空写真を林床面のみで撮影したため、鉛直方向の分割は2層にとどめた。水平方向の分割空間の大きさは、初期の大きさを全天空写真の撮影格子点の大きさである10m×10mとして、順次半減させて計算し、連立方程式の解が計算できた最小の大きさを分割空間の大きさとした。この結果として、分割空間の水平方向の大きさは、P2地点着葉状態以外については5m×5m, P2地点着葉状態では10m×10mとなった。

射線は全ての全天空写真の撮影点から発生させた。1点から発生する射線は、射線が各分割空間を通過するように全天空写真の撮影点から上層の分割空間の上面の中心を通るように発生させた。

(3)式中の P_i は、射線 V_i の通過する上層の分割空間領域の上面の正方形を全天空画像上に写しこの範囲内の全画素数に対する空の画素数の割合(以後、ギャップの割合)とした。

連立方程式は、解が非負となる拘束条件付き最小二乗法(笹木ら, 1983)を用いて解いた。

2) 推定結果

本研究では葉群密度を測定していないので、着葉状態と落葉状態での葉量の違いおよびP1地点とP2

P1NL : P1地点落葉状態
P2NL : P2地点落葉状態
P1L : P1地点着葉状態
P2L : P2地点着葉状態

図一六 推定した葉群密度空間分布の平均値と標準偏差

地点の立木密度の違いが、推定結果に現われているかどうかを検討する。

図一六に、推定した葉群密度の平均値と標準偏差を示す。まず、平均値についてみると、両地点ともに着葉状態から落葉状態になることで減少している。また、平均値は、着葉状態と落葉状態ともに、P1地点よりP2地点の方が大きくなっている。このように、落葉による葉量の減少やP1地点よりもP2地点の方が立木密度が大きいことが推定結果に現われている。

次に、標準偏差についてみると、両地点ともに着葉状態から落葉状態になることで減少している。これは、落葉することで葉量(ここでは、幹、枝も含む)の空間差が減少したためと考えられる。また、標準偏差は、着葉状態ではP1地点の値がP2地点の値より大きくなっている。この理由として、P1地点の着葉状態では樹木の部分とギャップの部分の葉量の差が大きくなる一方で、P2地点の着葉状態では中下層木が存在しほぼ閉鎖しているため葉量の空間変動が小さくなっていることが考えられる。

IV. 葉群密度空間分布を用いた林内任意の位置での下向き放射量と融雪量の推定方法

ここでは、葉群密度空間分布を用いて林内任意の位置における下向き放射量と融雪量を1時間単位で推定する方法を示す。本研究では、推定対象林分内の任意の位置を林床面上に限定した。ここでは、推定対象林分内の林床面上の任意の位置を点 (x, y) で表す。

1. 林内下向き放射量の推定方法

群落構成要素は短波放射についても長波放射についても黒体であると仮定した。また、森林上の散乱日射量と大気長波放射量は等方的であると仮定した。

1) 推定式

点 (x, y) における林内全日射量の推定式は、

$$S_f(x, y) = X_s(x, y) S_0 + X_h(x, y) S_d \quad (4)$$

とした。ここで、 $S_f(x, y)$ は点 (x, y) での林内全日射量、 $X_s(x, y)$ は点 (x, y) での直達日射量の林内透過率、 S_0 は森林上の直達日射量、 $X_h(x, y)$ は点 (x, y) での散乱日射量の林内透過率、 S_d は森林上の散乱日射量である。 S_0 と S_d には実測値を用いた。

点 (x, y) における下向き長波放射量の推定には、ある時刻での群落構成要素の表面温度が空間的に等しいと仮定して次式を用いた。

$$L_{df}(x, y) = X_h(x, y) L_{do} + [1 - X_h(x, y)] \sigma T_p^4 \quad (5)$$

ここで、 $L_{df}(x, y)$ は林内の点 (x, y) での下向き長波放射量、 L_{do} は大気長波放射量、 σ はステファンボルツマン定数、 T_p は群落構成要素の表面温度(K)である。 L_{do} には実測値を与えた。 T_p は林内気温に等しいと仮定して、実測値を用いた。

2) 直達日射量と散乱日射量の林内透過率の推定方法

(4)式と(5)式における、森林上の下向き放射量の林内透過率は葉群密度空間分布から次のように求めた。

まず、点 (x, y) における全天空を図-7(1)のように分割する。ここでは、全天空の各分割領域を、天頂角方向の番号 m ($m=1, 2, 3, \dots, N_m$)と水平角方向の番号 n ($n=1, 2, 3, \dots, N_n$)により、 (m, n) で表す。 N_m は天頂角方向の分割数、 N_n は水平角方向の分割数である。本研究では $N_m=5$ 、 $N_n=2 \cdot (2m-1)$ とした。 N_n が m の関数になっているのは、分割面積を等しくしたためである。

次に点 (x, y) における全天空の各分割領域の

(1) 全天空の分割

射線は分割小領域内の●点を通る

(2) 全天空の分割領域内の9点を通る射線

図-7 林内推定対象点における全天空の分割と分割領域内を通る射線

ギャップの割合を次のように求める。図-7(2)のように各分割領域内を通る射線を点 (x, y) から N_K 本発生させる。各分割領域におけるギャップの割合を、 N_K 本の射線の群落構成要素への接触数の平均値から(3)式を用いて次式から求める。

$$-\ln p(x, y, m, n) = \sum_{K=1}^{N_K} \left(\sum_{j=1}^{N_n} L_{Kj} \cdot F_j \right) / N_K \quad (6)$$

ここで、 $p(x, y, m, n)$ は点 (x, y) における全天空上の分割領域 (m, n) でのギャップの割合、 L_{Kj} は N_K 本中のある射線 K が推定対象林分の分割空間 j を通過したときの通過距離である。本研究では、図-7(2)に示したとおり $N_K=9$ とした。

直達日射量の林内透過率 $X_s(x, y)$ は次のように求める。全天空上の太陽が位置する分割領域 (m, n) でのギャップの割合 $p(x, y, m, n)$ をその時刻での直達日射量の林内透過率とする。そして、各時刻の林内透過率を1時間平均したものを $X_s(x, y)$ とする。ここでは、太陽の位置を5分毎に落とした。

散乱日射量の林内透過率 $X_h(x, y)$ は次式で表される。

$$X_h(x, y) = 2 \int_0^{\pi/2} X_\theta(x, y) \cos\theta \sin\theta d\theta \quad (7)$$

ここで、 $X_\theta(x, y)$ は点 (x, y) における天頂角 θ での林内透過率である。 $X_\theta(x, y)$ は、 θ が天頂角方向の分割領域 m 内にあるとき、分割領域 m における $p(x, y, m, n)$ の平均値とする。そして、シンプソン公式を用いて $X_h(x, y)$ を求める。このとき、 θ の分割数は90とした。

2. 林内融雪量の推定方法

林内融雪量の推定にはKondo and Yamazaki (1990)による1次元積雪層熱収支モデルを用いた。このモデルでは、積雪層内の温度の鉛直分布を直線で近似しており、地面からの熱量を見捨ればバルク式を用いた積雪層および雪面での熱収支から融雪量と雪面温度が推定される。計算に必要な気象要素は、全天日射量、雪面アルベド、下向き長波放射量、気温、湿度、風速である。また、計算に必要な積雪物理量は、積雪密度、積雪層内の融雪水の重量含水率、積雪層の熱伝導率である。

林内任意の点 (x, y) における融雪量は、このモデルにおいて全天日射量と下向き長波放射量にそれぞれ、本章1の方法で推定される林内の点 (x, y) における $S_f(x, y)$ と $L_{dr}(x, y)$ を与えることで推定される。林内における他の気象要素については空間的に一様と仮定し、実測値を与えた。

潜熱輸送量と顕熱輸送量の無次元バルク係数には両者は等しいとして、IIで述べた各地点のバルク係数を与えた。また、積雪密度には、融雪期における積雪表層密度の測定結果から 400kgm^{-3} を与えた。積雪層内の融雪水の重量含水率と雪面射出率にはKondo and Yamazaki (1990)と同様にそれぞれ、0.1と0.97を与えた。積雪の熱伝導率は、近藤(1987)の提案した次式から求めた。

$$\Omega_s = 4.187 \times (1.17 + 20\rho_{sn} + 35\rho_{sn}^2) \times 10^{-2} \quad (8)$$

$$\rho_{sn} = \rho_s / \rho_i \quad (9)$$

ここで、 Ω_s は積雪層の熱伝導率($\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}\text{K}^{-1}$)である。 ρ_{sn} は積雪の無次元密度、 ρ_s は積雪密度、 ρ_i は水の密度である。

V. 林内下向き放射量と林内融雪量の推定方法の妥当性の検討

IVで述べた方法を用いて研究対象林分内の下向き放射量と融雪量の各観測点の値を推定し、推定結果を実測値と比較した。

1. 全天日射量の推定結果

林内全天日射量の推定値の検証対象期間は、着葉状態についてはP4地点での観測が行われた1995年の6月から9月を対象とし、落葉状態については降雪が少なかった1994年の11月後半とした。森林上の直達日射量と散乱日射量にはP4地点の実測値を与えた。

図-8に各森林状態での1時間全天日射量の推定結果の代表例を示す(図-8において、いずれの図も最北列の測定点であり、(1)は西から2番目、(2)は西から3番目、(3)は西から4番目、(4)は西から1番目の測定点である)。図-8の全体的な経時変化を見れば、P1地点とP2地点の落葉状態の再現性は比較的良好である。しかし、どの森林状態においても樹冠の大きなギャップからの直達日射量の入射によって生じるスパイク状のピークが再現しきれていない。この傾向は、特に着葉状態で顕著である。この原因は葉群密度の推定単位空間が大きすぎたことにある。落葉状態に比べて着葉状態の方が大きなピークの再現性が悪いのは、各分割空間内の実際の葉群密度の空間変動が落葉状態より着葉状態の方が大きいためと考えられる。各地点の検証期間の平均相対誤差は、P1地点着葉状態で0.47、P2地点着葉状態で0.37、P1地点落葉状態で0.31、P2地点落葉状態で0.27となった。

次に、全天日射量の空間変動量の再現性を検討するために、全天日射量の積算時間を1時間、3時間、6時間、12時間とし、快晴日と完全曇天日を対象に17点の全天日射量の標準偏差と変動係数の推定値を実測値と比較した。変動係数とは標準偏差を平均値で除したものである。完全曇天日として、P4地点における測定値をもとに、日積算全天日射量のほとんどが散乱日射成分である日を選んだ。

図-9と図-10は、それぞれ標準偏差と変動係数の推定結果の一例である。図-9、図-10では各積算時間について各時間の標準偏差または変動係数の平均値がプロットされている。図-9での17点の標準偏差は、P1地点の完全曇天日およびP2地点の快晴日と完全曇天日では、着葉状態と落葉状態ともに、

図-8 林内全日射量の推定結果

各積算時間において比較的良好に再現されている。一方、P1地点の快晴日では、着葉状態、落葉状態ともにP2地点より推定誤差が大きい。この理由は、次のように考えられる。

P1地点では林冠が閉鎖せず、快晴日の林内全日射量の空間変動は樹木間のギャップの影響を強く受ける。しかし、本研究での葉群密度の推定単位空間が大きすぎたために、推定された葉群密度は樹木も樹木間のギャップも含めて平均化された。このために、林内全日射量の空間変動に対する樹木間のギャップの効果が再現しきれなかった。しかし、12時間積算値を取れば、どの森林状態においても再現性は良好であると判断する。

図-10の変動係数の推定値はどの森林状態においても、快晴日では積算時間が長くなると小さくなる。また、完全曇天日では変動係数の推定値は積算時間

に関わらずほぼ一定の値をとる。これらの推定値の傾向は実測値と同じ傾向になっている。また、この傾向はReifsnyder *et al.* (1971)が観測値より求めた変動係数の傾向とも一致している。快晴日での変動係数の推定値は積算時間が短いと実測値との差が大きくなる場合があるが、12時間積算値での再現性はどの森林状態でも比較的良好である。完全曇天日においては変動係数は積算時間にかかわらず比較的良好に再現されている。以上の推定結果は、他の快晴日や完全曇天日についても同様であった。

2. 下向き長波放射量の推定結果

推定値の検証期間は、着葉状態については1993年7月～11月であり、落葉状態については1994年と1995年の融雪期である。検証時間は、着葉状態では夜間のみであり、落葉状態では全日である。大気長

図一9 林内観測点17点の標準偏差の推定結果

図一10 林内観測点17点の変動係数の推定結果

波放射量には、着葉状態ではP4地点の夜間の大気長波放射量を与え、落葉状態ではP3地点における実測値を与えた。

図一11に林内下向き長波放射量の推定結果を示す。P1地点とP2地点の着葉状態では、再現性は良好である。落葉状態では、両地点ともに昼間では、ばらついておりかつ過小評価の傾向にある。夜間の再現性は良好である。昼間で過小評価となったのは、本研究では群落構成要素の表面温度を林内気温に等しいと仮定したが、昼間では日射により群落構成要素の表面温度が林内気温よりも高くなったためと考えられる。

推定値の検証期間における平均相対誤差は、P1地点着葉状態で0.009、P1地点落葉状態で0.042、P2地点着葉状態で0.004、P2地点落葉状態で0.034となった。落葉状態でも推定誤差は小さいと判断される。

次に、葉群密度空間分布から得られる林内下向き長波放射量の空間変動量の再現性を検討する。(5)式によれば、林内下向き長波放射量の空間変動は X_i

図一11 林内下向き長波放射量の推定結果

図-12 林内融雪量の推定結果

(x, y)の空間変動により生じる。この $X_h(x, y)$ は、散乱日射量の林内透過率でもある。完全曇天日では、森林上の全天日射量の大部分が散乱日射量であるので、(4)式からわかるように、推定した林内全天日射量の空間変動は $X_h(x, y)$ の空間変動による。前項での検討から、完全曇天日では、推定される林内全天日射量の空間変動量は各積算時間で再現性を有していると判断される。従って、 $X_h(x, y)$ の空間変動量も再現性を有すると推察される。つまり、林内下向き長波放射量の再現性が良好であることを考えれば、葉群密度空間分布を用いて推定される林内下向き長波放射量の空間変動量は、積算時間に関係なく、本研究のどの森林状態においても再現性を有すると推察される。

3. 融雪量の推定結果

1994年と1995年の融雪最盛期を対象に林内融雪量の観測地点の値を推定した。融雪期では散乱日射量を測定しなかったため、森林上の直達日射量と散乱日射量を内嶋ら(1981)の次の経験式から求めた。

$$S_0 = yS_0 \quad (10)$$

$$S_d = (1 - y)S_0 \quad (11)$$

$$y = 0.86R_s^{1.3} \quad (12)$$

ここで、 S_0 は森林上の全天日射量、 R_s は日照率である。森林上の全天日射量 S_0 としてP3地点(開地)の測定値を用いた。日照率 R_s には最寄りの平石AMe-

図-13 林内日融雪量の推定結果
(1994年と1995年)

DASの1時間値を用いた。

図-12にP1, P2地点の1995年の推定結果を示す。両地点とも融雪量観測地点の推定値は実測値の全体的な経時変化を良好に再現している。図-13に1994年と1995年の日融雪量の計算結果を示す。日融雪量の再現性も両地点ともに比較的良好である。実測値が10mm以上のときの推定値の平均相対誤差は、P1地点で0.19, P2地点で0.20となった。

本章1, 2での林内全天日射量および林内下向き長波放射量の空間変動量の再現性についての検討から、

葉群密度空間分布から得られる林内融雪量の空間変動は日積算値ならば本研究のどの森林状態でも再現性を有すると推察される。

VI. まとめ

本研究では、下向き放射量および融雪量の林内空間分布を推定するために、まず、約1haの森林の葉群密度空間分布を林床上多点で撮影した全天空写真を用いて推定した。次に、葉群密度空間分布を用いた林内任意地点の下向き放射量と融雪量の1時間値の推定手法を示した。林内での下向き放射量と融雪量の観測点の値を推定し、推定結果を実測値と比較することでこの手法の妥当性を検討し、次の結果を得た。

1時間全日射量の推定結果は、どの研究対象林分でも樹冠の大きなギャップからの直達日射を再現しきれない傾向がみられた。この様な推定誤差は、着葉状態では顕著にみられたが、落葉状態では小さかった。葉群密度空間分布を用いた林内全日射量の推定値は、実際の葉群密度の空間変動量と葉群密度の推定単位空間の大きさに応じて誤差が生じると考えられる。着葉状態での林内全日射量をさらに精度良く推定するには、葉群密度空間分布の推定単位空間の大きさをより小さくする必要がある。そのためには、全天空写真をより細かい格子点で3次元的に撮影する必要がある。また、推定される林内全日射量の空間変動量は日積算値ならば再現性を有することが示された。

林内下向き長波放射量の再現性は比較的良好であった。昼間においては、若干の過小評価となったが、これは昼間では日射により群落構成要素の表面温度が林内気温より高くなることによると考えられた。また、林内下向き長波放射量の空間変動量は、積算時間にかかわらず再現されることが推察された。

林内融雪量の1時間値の経時変化は全体的傾向が良好に再現された。日積算値の再現性も比較的良好であった。林内融雪量の空間変動量は、日積算値ならば再現性を有することが推察された。

本研究を行うに際し、P1, P2地点の観測において、小岩井農牧(株)山林緑化部には多大の便宜を図っていただいた。また、本研究の一部は文部省科学研究費補助金(基盤研究(B)07306006, 代表: 太田岳史, 基盤研究(B)07556033, 代表: 太田岳史)および北海道大学低温科学研究所共同研究費(代表: 太田岳史)によった。

引用文献

- Gay, L.W., K.R. Knoerr and M.O. Braaten (1971): Solar radiation variability on the floor of a pine plantation, *Agric. Meteorol.*, **8**, pp. 39-50.
- 橋本 哲・太田岳史・石橋秀弘(1992): 落葉樹林が表層融雪量に与える影響に関する熱収支的検討, 雪氷, **54** (2), pp. 131-143.
- Hashimoto, T., T. Ohta, Y. Fukushima and T. Ishii (1994): Heat balance analysis of forest effects on surface snowmelt rates, *Snow and Ice Covers: Interactions with the Atmosphere and Ecosystems*, IAHS Publ. No. 223, pp. 247-258.
- Hashimoto, T and T. Ohta (1997): Characteristics of energy balance on snowmelt in forested areas forest effects on long-wave radiation Proceedings of International Workshop on Energy and Water Cycle in GAME-Siberia, 1995, Research Report of IHAS, No. 3, pp. 46-50.
- 石井吉之・鈴木啓助・児玉裕二・小林大二(1992): カナダ東部, 北方針葉樹林地における融雪水の流出 I, 低温科学, 物理篇, **51**, pp. 77-92.
- Koike, F. (1985): Reconstruction of two dimensional tree and forest canopy profiles using photographs, *J. Appl. Ecol.*, **22**, pp. 921-929.
- 小池俊雄・高橋 裕・吉野昭一(1985): 融雪量分布のモデル化に関する研究, 土木学会論文集, **363**, II-4, pp. 165-174.
- 小池正子・小池俊雄・早川典生・下垣 久(1995): 森林条件の違いによる雪面熱収支特性に関する比較研究, 水文・水資源学会誌, **8**(4), pp. 389-398.
- 近藤純正(1987): 積雪内の熱伝導と融雪水の流下, 東北地方の積雪・融雪期における水資源の定量的把握に関する基礎的・応用的研究(昭和61年科学研究費総合研究(A)研究成果報告書, 代表岸原信義), pp. 119-134.
- Kondo, J. and T. Yamazaki (1990): A prediction model for snowmelt, snow surface temperature and freezing depth using a heat balance method, *J. Appl., Meteor.*, **29** (5), pp. 375-384.
- Mukammal, E.I. (1971): Some aspects of radiant

- energy in a pine forest, Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B, 19, pp. 29-52.
- 中林宏典・石川信敬・兒玉裕二(1993): 融雪期における林内放射収支量の推定, 低温科学, 物理篇, 52, pp. 15-24.
- 大石康彦(1995): ヒトの活動環境としての森林環境の多角的評価—森林の空間構造・温熱環境とヒトの心身反応の関係—, 岩手大学学位論文, 146pp.
- 太田岳史・橋本 哲・石橋秀弘(1990): 表層融雪量に及ぼす森林の影響に関する基礎的検討, 雪氷, 52 (4), pp. 289-296.
- Price, A.G. and T. Dunne (1976): Energy balance computations of snowmelt in a subarctic area Water Resour. Res., 12 (4), pp. 686-694.
- Price, A.G. (1988): Prediction of snowmelt rates in a deciduous forest, J. Hydrol., 101, pp. 145-157.
- Reifsnyder, W.E., G.M. Furnival and J.L. Horowitz (1971): Spatial and temporal distribution of solar radiation beneath forest canopies, Agric. Meteorol., 9, pp. 21-37.
- 笹木敬司・河田 聡・南 茂夫(1983): 多変量解析手法の応用, インターフェース1983年2月号, pp. 286-294.
- 鈴木和良・太田岳史・児島 淳・橋本 哲(1994): 密度の異なる森林及び開地での表層融雪量観測, 東北の雪と生活, 9, pp. 15-17.
- 鈴木和良(1995): 森林状態の違いによる表層融雪量の変化に関する熱収支的検討, 岩手大学修士論文, 71pp.
- 天神美夫・尾上守夫・久野義徳(1979): 細胞診自動化における子宮腺がん細胞集塊の特徴抽出法, 医用電子と生体工学, 17 (6), pp. 440-447.
- 内嶋善兵衛・桜谷哲夫・奥山富子(1981): 関東地方南部の日射気候, 農技研報A, 27, pp. 91-145.
- Yamazaki, T. and J. Kondo (1992): The snowmelt and heat balance in snow-covered forested areas, J. Appl. Meteor., 31 (11), pp. 1322-1327.
- (受付: 1997年4月23日, 受理: 1997年7月11日)