

## Radiative characteristics in a forest during snowmelt season

(融雪に及ぼす森林の放射特性に関する研究)

## 学位論文内容の要旨

山地流域に堆積した積雪は貴重な水資源である一方、急激な融雪によっては洪水や地滑り等の災害要因となる。そのため流域融雪量の算定は、水資源の有効利用のみならず防災の面からも要請される。殊に我が国における積雪流域の多くは森林に覆われていることから、流域単位の融雪量を議論する上で森林内の融雪、熱収支特性の把握は不可欠であり、特に融雪熱量の主要な成分である放射に対し、森林が及ぼす影響の評価は重要な課題と言える。そこで本研究では森林流域の融雪量を熱収支的に算定するため、様々な森林における放射特性の解明を目的とした。まず、北海道幌加内町母子里にある北大雨龍地方演習林内の実験流域において融雪量、熱収支観測を行い、流域内の融雪量分布に及ぼす森林の影響、並びに森林内の熱収支特性を明らかにした。そして森林内外における観測を通して森林内の放射特性を解明し、被植状態に起因する放射各成分の相違を明らかにした。これに基づき、任意の森林に適用可能な放射収支量推定法を構築した。本手法によって森林流域全体の放射収支量、さらには融雪量に及ぼす森林の影響を評価できるようになった。

森林内の融雪量は被植状態によって大きく異なり、常緑針葉樹林内、非着葉状態にある落葉広葉樹林内の融雪量は、それぞれ同一標高の開地における融雪量の約 50、90%であった。しかし標高の異なる開地の融雪量には、系統的な標高依存性が認められなかった。従って流域内の融雪量分布は、森林の被植状態に大きく依存していると言える。融雪量は積雪表面の熱収支によって決定し、融雪熱量は主として放射収支量、顕熱伝達量、潜熱伝達量の 3 成分から構成される。森林内では開地に比べて風速が減衰し、顕熱、潜熱伝達量が抑制されることから、融雪熱量に対する放射収支量の寄与率は 90%以上と高い。また森林内外における融雪量の差は、主として放射収支量の差に起因していることを示した。よって森林流域の融雪量分布は、放射収支量分布に支配されると結論づけられた。そこで開地、針葉樹林内、落葉樹林内における放射観測に基づき森林の放射特性を解明した。

林床に到達する日射量は、樹木の遮蔽効果によって開地に比べて減少する。しかし森林内に透過する日射量の割合は、これまで森林に固有の値であるとされてきたが、同一の森林であっても天候に依存して変化することが明らかになった。この原因を究明するため、日射量を直達、散乱成分に分離し、それぞれの透過率を独立に評価した。全天に空の占める割合を全天開空率(P)と定義し、散乱日射の透過率とした。また観測地点の融雪期である 4 月を念頭に、4 月 1 日と 30 日の太陽経路、及び各日 09 時、15 時の太陽位置で囲まれる領域に占める空の割合を太陽経路開空率(Q)と定義し、直達日射の透過率とした。全天開空率 P、太陽経路

開空率  $Q$  は、林床部において魚眼レンズを用いて撮影した全天写真から求めることができる。全天日射に占める直達成分の割合が高い晴天日の日射透過率は、 $P < Q$  の森林では曇天日に比べて上昇し、 $P > Q$  の場合、逆に低下することが明らかになった。森林内の下向き長波放射量は密な森林ほど大きく、開地との差は大気放射量が少なく、気温の高いときほど大きい。下向き長波放射量は全天開空率  $P$  で透過した大気放射量、及び森林内の気温に応じて樹木部分から射出される長波放射量の和として表現できることを示した。なお実測の結果、森林内外の気温には大差なかったため、森林内の気温は開地の気温で代用できることがわかった。以上より、森林内の放射収支量は全天開空率  $P$ 、太陽経路開空率  $Q$ 、並びに開地で実測した日射量、大気放射量、気温を用いて算定可能となり、樹種の異なる針葉樹林、落葉樹林における実測値はともに良好に再現された。なお両森林とも、積雪表面アルベドには開地の実測値を与え、積雪表面温度は開地における気温との関係式を用いて推定した。

太陽経路開空率  $Q$  は、森林の被植状態のみならず、太陽の経路、すなわち季節や緯度によっても変化する。しかし全天開空率  $P$  は被植状態のみに依存するため、森林の指標として適切であると判断される。さらに全天開空率  $P$  は、太陽経路開空率  $Q$  に比べて簡便に求められることから、 $P$  と  $Q$  の関係を解明することは、広大な森林流域の放射収支量を求める際に有効な手段であると言える。そこで様々な森林で撮影した全天写真を解析した結果、いずれの森林についても  $0.15 < P \leq 0.86$  において  $Q$  を表す  $P$  の 1 次関数が得られた。なお  $P \leq 0.15$  の密林では  $Q=0.0$ 、 $P > 0.86$  の疎林では  $Q=1.0$  の一定値となった。また全天写真の射影方式に基づき森林モデルを作成し、針葉樹林、非着葉状態の落葉樹林における  $P$ - $Q$  関係を求めた。同一  $P$  に対する  $Q$  は針葉樹林に比べて落葉樹林で小さくなる結果が得られたが、実際の森林で得られた  $P$ - $Q$  関係は、森林モデルで想定される森林の  $P$ - $Q$  関係の範囲を包括的に表していることが示された。従って、太陽経路開空率  $Q$  は実際の森林で得られた関係式に基づき全天開空率  $P$  から与えられ、森林の被植状態は全天開空率  $P$  のみで表すことが可能になった。そして全天開空率  $P$  を指標に森林の被植状態と放射各成分を対応づけることにより、任意の森林に適用可能な放射量推定手法を確立した。

短波放射(日射)量は、 $P$  が小さく森林が密になるほど減少する。しかし密林、疎林では直達日射の透過量が一定となるため、被植状態による変化は小さい。一方、長波放射量は森林が密になるほど増加する。これは森林内に透過する大気放射が減少する反面、樹木を起源とする長波放射量が増加することに起因しており、放射の成分によって森林は逆の影響を及ぼすことが明らかになった。結果として短波、長波放射量の総和である放射収支量は、森林が密になるほど減少するが、密林や疎林ではほとんど被植状態に依存しなくなり、放射収支量の最大値は  $P=1.0$  の完全な開地ではなく、むしろ疎林( $P \sim 0.9$ )で得られることがわかった。なお森林内外における放射収支量の差は、曇天日に比べて晴天日に大きく、また積雪表面のアルベドが低くなるほどその差は大きくなることがわかった。これは日射量が少ない曇天日やアルベドが高い場合、森林による短波放射量の減少は、長波放射量の増大によって容易に補償されるためである。以上より、放射収支量に与える森林の影響は、融雪期の中でも変化することが明らかになった。積雪表面のアルベドが高く保持される融雪期の初期、放射収支量に及ぼす森林の影響は小さい。しかし融雪の進行に伴ってアルベドが低下する融雪期中期以降、森林内における短波放射量の減少量は、長波放射量の増大量を上回るようになる。そのため森林内外における放射収支量の差は大きくなり、森林による放射収支量の減少効果、す

なわち融雪抑制効果が顕著に現れるようになる。本研究で構築された放射収支量の推定法を実際の流域に適用することにより、融雪期における流域平均放射収支量を求めることが可能となった。放射収支量に及ぼす森林の影響を考慮することにより、流域全体の放射収支量、さらには融雪量の算定精度は改善されることが確認された。

# 学位論文審査の要旨

主査 教授 小林 大二  
副査 教授 大畑 哲夫  
副査 助教授 高橋 英紀  
副査 助教授 石川 信敬

## 学位論文題名

### Radiative characteristics in a forest during snowmelt season

(融雪に及ぼす森林の放射特性に関する研究)

森林流域の融雪量を算定するには、森林内の融雪量を見積もることが不可欠であり、特に融雪熱量の主要成分である放射に対し、森林の与える影響の解明は重要である。本研究では北大雨龍地方演習林内の実験流域において観測を行い、流域融雪に及ぼす森林の影響、並びに森林内の熱収支特性を明らかにした。そして森林の指標として開空率を導入し、放射各成分の開空率依存性を解明した。これに基づき任意の森林に適用可能な放射量推定法を構築し、種々の森林に覆われた流域の放射量を定量的に論じた。

融雪量は森林状態によって異なり、常緑針葉樹林内、非着葉状態の落葉広葉樹林内の融雪量は、それぞれ同一標高の開地における融雪量の約 50、90%であった。しかし標高の異なる開地の融雪量には、系統的な標高依存性が認められなかった。従って流域内の融雪量分布は、森林状態に依存すると言える。融雪量は積雪表面の熱収支によって決定づけられる。森林内では風速が減衰し、顕熱、潜熱伝達量が抑制されるため、放射収支量の寄与率が 90%以上と高く、放射収支量が森林内融雪の最も重要な因子となる。そこで開地、針葉樹林、落葉樹林内において放射観測を行い、森林内の放射特性を明らかにした。

森林内の日射量は開地に比べて減少する。しかし森林の日射透過率は森林固有の値ではなく、同一の森林であっても天候によって変化することがわかった。さらに日射透過率は針葉樹林では晴天日に低下、落葉樹林では上昇し、森林によって変化傾向は異なっている。本研究では日射を直達、散乱成分に分離してそれぞれの透過を考慮した。全天に空の占める割合を全天開空率(P)と定義し、散乱日射の透過率とした。また観測地点の融雪期である 4 月を念頭に、4 月 1 日と 30 日の太陽経路、及び各日 09 時、15 時の太陽位置で囲まれる領域に占める空の割合を太陽経路開空率(Q)と定義し、直達日射の透過率とした。なお P、Q の値は、魚眼レンズを用いて撮影した全天写真から求めることができる。直達成分の比率が高い晴天日の日射透過率は、 $P < Q$  の森林では上昇、 $P > Q$  の場合は低下することがわかった。下向き

長波放射量は、開地に比べて森林内で増加する結果を得た。本研究では下向き長波放射量を全天開空率  $P$  で透過した大気放射量、及び気温に応じて樹木部分から射出される長波放射量の和とした。以上より、森林内の放射収支量は全天開空率  $P$ 、太陽経路開空率  $Q$ 、及び開地で実測した日射量、大気放射量、気温を用いて算定可能となり、樹種の異なる針葉樹林、落葉樹林における実測値は良好に再現された。なお積雪表面アルベドには開地の実測値を与え、積雪表面温度は開地における気温との関係式を用いて推定した。

全天開空率  $P$  は太陽経路開空率  $Q$  に比べて簡便に求められるため、 $P$  と  $Q$  の関係を解明することは本推定法の簡略化のみならず、広域にわたる森林の放射量算定に有効である。そこで森林モデルを作成し、針葉樹林、非着葉の落葉樹林における  $P$ - $Q$  関係を求めた。針葉樹は地面に近い部分を全体的に遮蔽するが、落葉樹は地面から高い所を部分的に遮蔽するため、同一  $P$  に対する  $Q$  は針葉樹林に比べて落葉樹林で若干小さくなる結果を得た。しかし様々な森林で実測した  $P$ - $Q$  関係は、森林モデルによる  $P$ - $Q$  関係の範囲に対応し、いずれの森林も  $Q$  は  $0.15 < P \leq 0.86$  において  $P$  の 1 次関数として表すことができた。なお  $P \leq 0.15$  の密林では  $Q=0.0$ 、 $P > 0.86$  の疎林では  $Q=1.0$  の一定値となる。これより太陽経路開空率  $Q$  は全天開空率  $P$  から与え、森林状態は全天開空率  $P$  で表現できるようになった。そこで放射各成分の開空率依存性、すなわち森林状態による放射量の相違を解明した。

日射量は森林が密になるほど減少するが、密林、疎林では直達日射の透過量が一定となるため森林状態による変化は小さい。長波放射量は森林が密になるほど増加する。これは森林内に透過する大気放射が減少する反面、樹木からの放射量が増加するためである。日射、長波放射量の総和である放射収支量は、森林が密になるほど減少するが、開空率依存性は天候や積雪表面のアルベドによって異なる。放射収支量の開空率依存性は、晴天日や積雪表面のアルベドが低くなるほど強まることがわかった。これは融雪期の中でも放射収支量に与える森林の影響が変化することを示している。アルベドが高く保持される融雪期の初期、森林内外における放射収支量の差は小さい。しかし融雪の進行に伴ってアルベドが低下する融雪期中期以降、その差は大きくなり、森林による放射収支量の減少効果、すなわち融雪抑制効果が顕著に現れる。本研究で構築した放射収支量推定法は、流域全体の放射収支量、さらには融雪量の算定をも可能にするものである。

よって、著者は博士(地球環境科学)の学位を受けるに十分な資格を有すると判定した。