



Title	融雪期における林内放射収支量の推定
Author(s)	中林, 宏典; NAKABAYASHI, Hironori; 石川, 信敬 他
Citation	低温科学. 物理篇, 52, 15-24
Issue Date	1994-03-15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18627
Type	departmental bulletin paper
File Information	52_p15-24.pdf



融雪期における林内放射収支量の推定

中 林 宏 典

(北海道大学大学院地球環境科学研究科)

石川 信敬・兒玉 裕二

(低温科学研究所)

(平成5年11月受理)

Abstract : As the first step in the estimation of energy for snowmelt in a mountainous region, a method to calculate net radiation in a forest during snowmelt season has been proposed. Radiation observations were carried out in deciduous forest and at an open site in the Moshiri Experimental Watershed, in the northern part of Hokkaido Island, Japan, from snowmelt season to the summer season when the deciduous forest grew dense in 1992. The relationship between canopy density and incident shortwave and longwave radiation to the forest bed was obtained, and net radiation at a snow covered forest floor was estimated using this relationship, global radiation, atmospheric radiation, and albedo at the open site and air temperature in the forest. The calculated values for the net radiation in April 1992 were in agreement with the daily mean observed values with a standard error of 8.8 W/m^2 for both coniferous and deciduous forests.

要旨：山地流域の融雪量を見積る第一段階として、落葉樹の着葉過程において林内外で放射観測を行った。着葉に伴う樹冠密度の変化と林床に入射する日射、長波放射量の変化を対応づけ、林外で測定した日射量、大気放射量、アルベド、及び林内の気温を用いて、融雪期の任意の林内における放射収支量を推定した。その結果、92年4月の融雪期に針葉樹林、非着葉状態の落葉樹林という樹種、樹冠密度の異なる2つの林内で得られた放射収支量の実測値は、日平均値に関して標準誤差 8.8 W/m^2 で再現できた。

Key words : Canopy density, net radiation

キーワード：樹冠密度、放射収支量

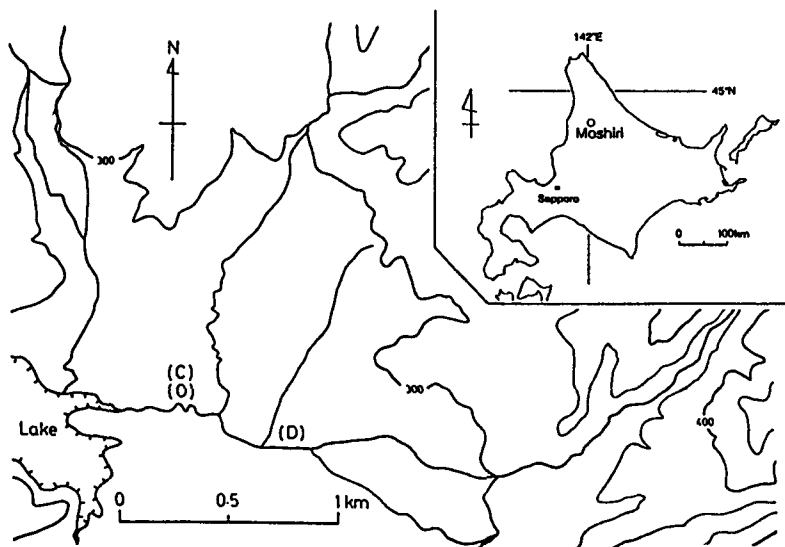
I. 緒 言

冬期に積雪として山地流域に貯留される水は貴重な水資源となる一方、急激な融雪によっては洪水や地滑り等の災害要因にもなる。そこで水資源の有効利用や防災の面からも融雪の予測が要請される。融雪量の推定法として Degree-day 法等、気温のみを指標とする簡便な方法がある。しかしこのような方法では、標高に対して一様に融雪が進行するという観測結果¹⁾を再現するのは困難である。融雪は積雪表面の熱収支で決まるため、流域全体の熱収支を求めれば流域内の融雪量を算出できる。特に流域が森林に覆われている場合、林内で風速が弱められ、顕熱、潜熱伝達量が抑制されることから、融雪熱量に占める放射収支量の割合は一般に大きくなる²⁾。よって流域全体の融雪量を推定するに先立ち、林内の放射特性を把握し、林内放射収支量の推定法を確立することが不可欠である³⁾。そこで本研究では、落葉樹の着葉過程に林内外で日射量、下向き長波放射量を測定し、着葉状態と林床への入射放射量を対応づけ、融雪期の任意の林内における放射収支量を推定する。

II. 観測の概要

II-1. 観測地点・期間・項目

観測は北海道幌加内町母子里の気象観測露場(O)、露場から南東方向に約500m離れた落葉樹林内(D)、及び放射収支量推定法の妥当性を確かめるために、露場に隣接する針葉樹林内(C)の3地点で行った(第1図)。露場の面積は約400m²、落葉樹林は東西約140m、南北約90m、針葉樹林は東西約70m、南北約20mの規模を持つ。各観測点は標高差のない平地に位置しているため、放射に対する地形的な影響を無視でき、樹木の影響のみを評価できる。第2図a)、



第1図 観測地点。O：気象観測露場，D：落葉樹林，C：針葉樹林

第1表 観測項目

	気温	湿度	風速	日射	反射	長波放射	放射収支	表面温度
露場	○	○	○	○	○	○	○	○
落葉樹林	○	○	○	○	—	○	○	—
針葉樹林	○	○	○	○	—	○	○	—

b)はそれぞれ92年4月に魚眼レンズを用いて撮影した落葉樹林、針葉樹林の全天写真である。

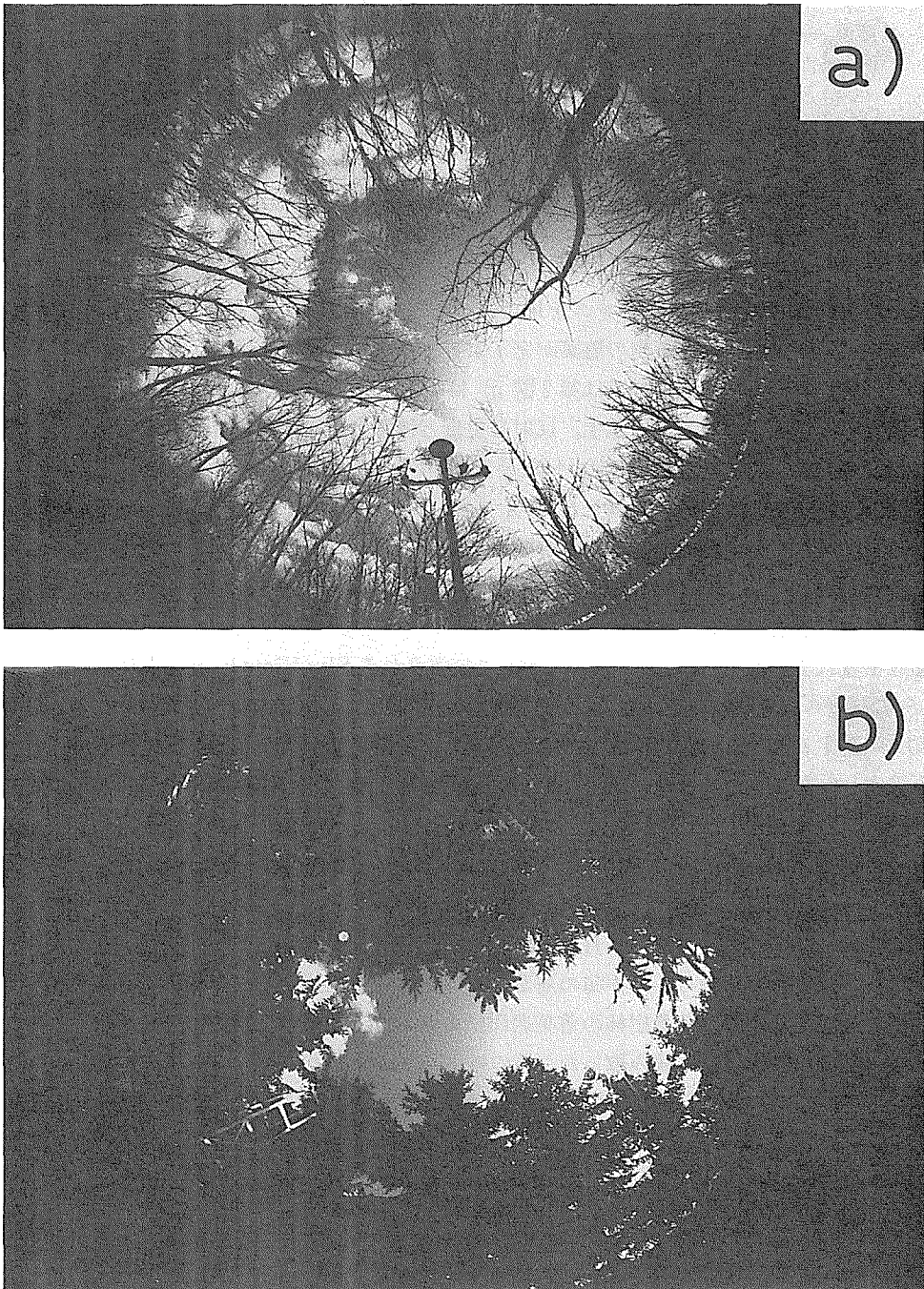
観測期間は融雪期から落葉樹の着葉が完了するまで、92年4月9日から6月30日の83日間である。着葉後の落葉樹林の様子は第2図c)に示した。

各地点の観測項目は第1表に示す。反射日射量と積雪表面温度は露場のみで測定した。3地点の放射各成分、露場、針葉樹林内の気象要素は30分平均値を収録した。しかし落葉樹林内の気象要素は正時毎の瞬間値を収録したため、収録インターバルを挟む2つの正時値の平均値を1時間平均値とし、3地点の比較は1時間平均値について行った。

II-2. 樹冠密度の算定

樹冠密度(CD)は、全天に空の占める割合で定義される Sky View Factor ; P^4)を用いると、 $1-P$ で与えられる。全天日射は太陽から直接地表に到達する直達日射と、大気や雲などに散乱されて到達する散乱日射から構成される。雲量10の曇天日に全天から等方的に入射する散乱日射を仮定し、散乱日射は枝葉によって完全に遮蔽されるとすれば、林床に到達した日射量の露場の値に対する割合、すなわち曇天日の林の日射透過率は P とおける。92年4月の曇天日に観測した日射量から、針葉樹林、及び非着葉状態にある落葉樹林の P として、それぞれ0.36、0.65を得た。

第3図は92年5月10日から6月30日における落葉樹林の日射透過率を表す。曇天日の値は Δ で示した。5月中旬から6月中旬の着葉に伴い、林床に到達する日射量の割合が次第に減少していることがわかる。落葉樹林の着葉過程における P は、曇天日の値(Δ)を滑らかに結んだ図中の破線から1日毎に読み取った。その結果、落葉樹林の P は、5月上旬の非着葉状態から完全に着葉した6月下旬にかけて、0.65から0.22まで変化しているため、樹冠密度は0.35から0.78まで変化することになる。なお針葉樹林の樹冠密度は、92年4月に行った日射観測の結果から0.64が得られる。以下、樹冠密度を指標に林内の放射収支量を一般化する。

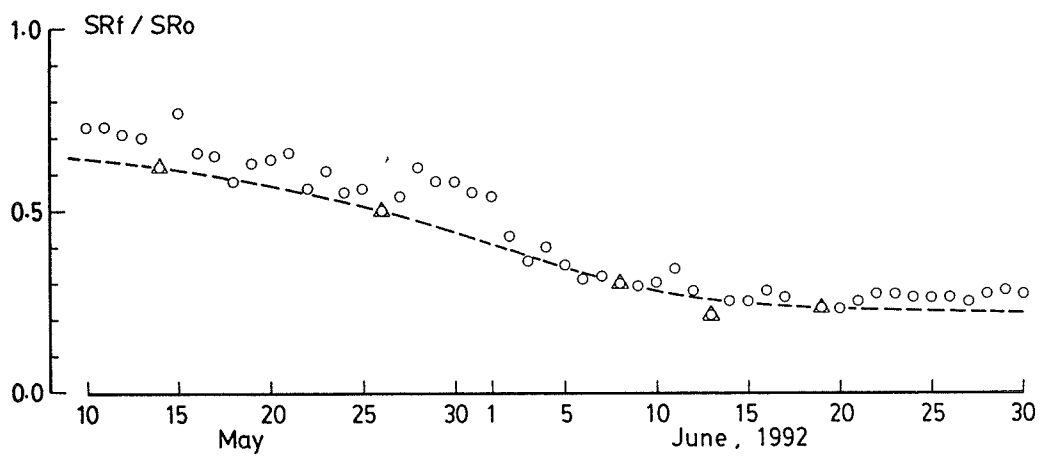
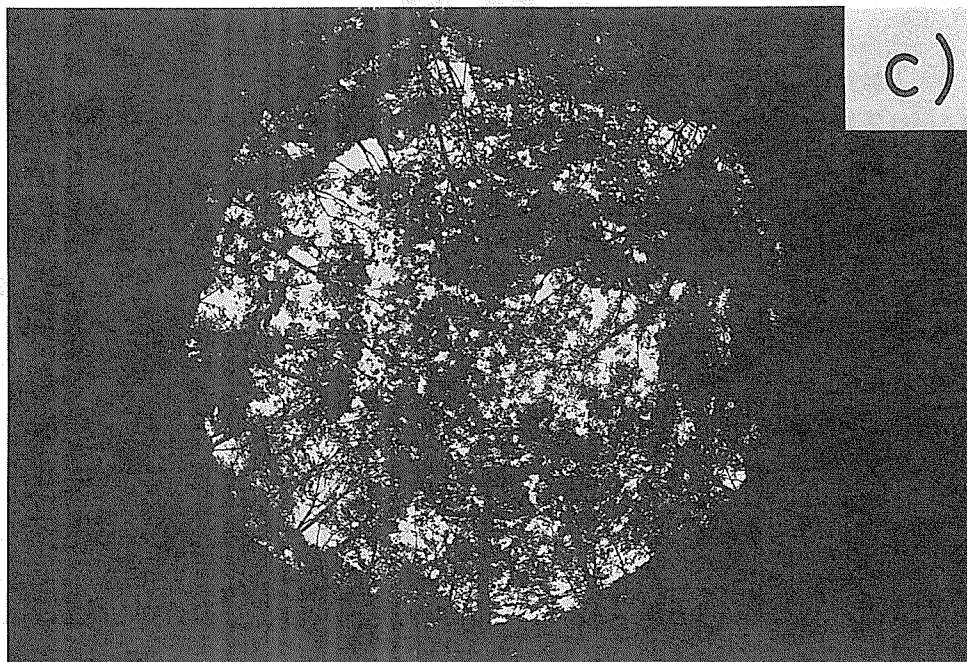


第2図 林床部から天空方向を撮影した林の全天写真

a) 落葉樹林 (92年4月27日撮影)

b) 針葉樹林 (92年4月27日撮影)

c) 落葉樹林 (92年7月16日撮影)



第3図 着葉過程における落葉樹林の日射透過率の変化。△は曇天日の値を表す

III. 結果・考察

III-1. 入射放射量の樹冠密度依存性

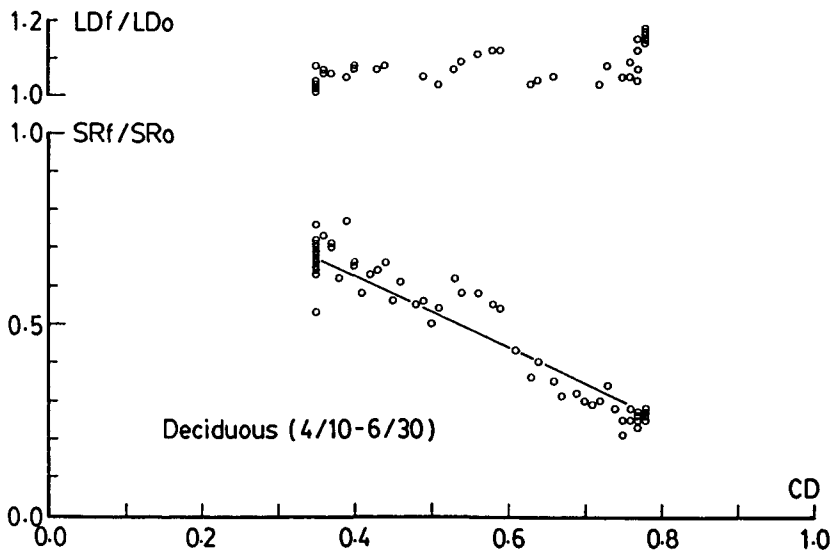
第4図は落葉樹林の日射透過率 ($SR_f/SR_0 \equiv t$), 及び林内下向き長波放射量の露場に対する割合 (LD_f/LD_0) を, 着葉過程における樹冠密度に対して示したものである。

第4図から, 樹冠密度の増大に対して林床に到達する日射量は減少していることがわかる。全天日射 (SR_0) は直達日射 (SR_{dir}) と散乱日射 (SR_{dif}) の和である。散乱日射の透過率は P で与えられているので, 直達日射の透過率を Q とすると, 林の日射透過率は次式のようになる。

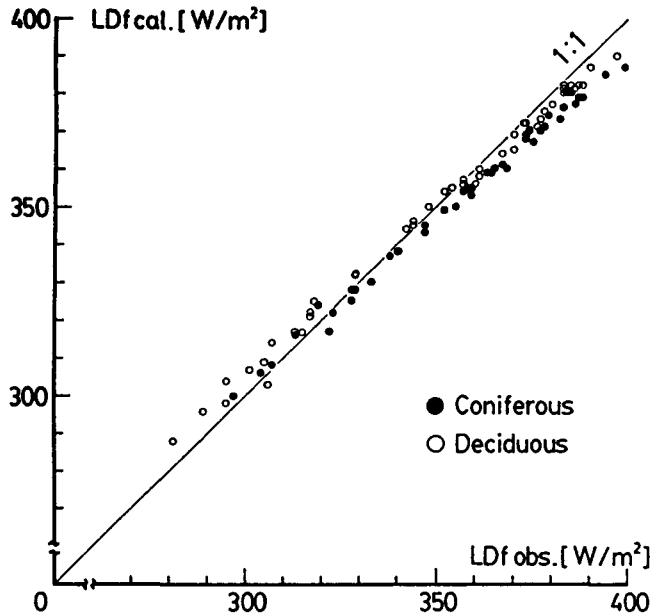
$$\begin{aligned} \frac{SR_f}{SR_0} &= \frac{Q \cdot SR_{dir} + P \cdot SR_{dif}}{SR_{dir} + SR_{dif}} \\ &= P + (Q - P) \frac{SR_{dir}}{SR_{dir} + SR_{dif}} \end{aligned} \quad (1)$$

(1) 式より, 直達, 散乱日射に対する林の透過率が等しい ($P=Q$) とき, 林床に到達する日射量の割合は日射の成分構成によらず P で一定となる。しかし $P > Q$ のように直達日射に対する遮蔽効果が強いときには, 全天日射に占める直達日射成分の割合が大きいほど, 林の日射透過率は P より小さくなる。逆に $P < Q$ のときには, 直達日射成分が増えるほど日射透過率は P より大きくなることがわかる。

以上のように林の日射透過率は P と Q の大小関係, 全天日射の成分構成に依存するため, P をもって一義的に決定できるものではない。しかしここでは, 落葉樹の着葉過程 (5/10~6/16) における樹冠密度 (CD) と日射透過率 (t) の関係を, 最小二乗法から (2) 式で与えて第4図に実線で示した。



第4図 樹冠密度 (CD) と林の日射透過率 (SR_f/SR_0), 及び林内下向き長波放射量の露場に対する割合 (LD_f/LD_0). 実線は (2) 式



第5図 林内下向き長波放射量の実測値，推定値の比較。●：針葉樹林，○：落葉樹林

$$t = 1 - 0.93 CD \tag{2}$$

(2) 式を用いることで，任意の林内における日射量は林外の値から推定可能となる。

林内の下向き長波放射量については，全般に露場の値よりも大きくなっている（第4図）。Male and Granger⁵⁾によると，林内の下向き長波放射量 (LD_f) は樹冠を透過してきた大気放射と，樹冠を起源とする長波放射の和として次式で表される。

$$LD_f = P \cdot LD_0 + (1 - P) \sigma T_a^4 \tag{3}$$

P は Sky View Factor, LD_0 は林外の下向き長波放射量(大気放射量), T_a は林内の気温, σ は Stefan-Boltzmann 定数である。樹冠起源の放射は林内気温の黒体放射と仮定している。第5図では，92年4月15日から6月30日に針葉，落葉の各林内で実測した下向き長波放射量を，(3)式から得られた値と日平均値について比較した。図中の●は針葉樹林内，○は落葉樹林内の値を表す。落葉樹林の P は，非着葉状態の0.65から完全に着葉した状態の0.22まで変化しているが，(3)式は実測値をよく再現している。よって林内の下向き長波放射量は， P 値，大気放射量，気温から推定できることがわかった。

III-2. 放射収支量の推定

前節を踏まえ，露場で実測した日射量，下向き長波放射量を用いて，任意の林内における放射収支量を推定する。林内の放射収支量 (NR_f) は次式のようにになっている。

$$\begin{aligned}
 NR_t &= SR_t - SU_t + LD_t - LU_t \\
 &= (1 - \alpha_t) t \cdot SR_0 \\
 &\quad + [P \cdot LD_0 + (1 - P) \sigma T_a^4] - \sigma T_s^4
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

ここに SR, SU はそれぞれ全天日射 (短波放射) 量, 反射日射量, LD, LU はそれぞれ下向き, 上向き長波放射量, α はアルベドで, 添え字 f で林内の値, 0 で露場の値を表す。林内の日射量は (2) 式の日射透過率をもとに推定できる。林内の反射量は放射収支の残差として次式で求められる。

$$SU_t = SR_t + LD_t - LU_t - NR_t \tag{5}$$

(5) の反射量から林内のアルベド (α_t) を計算したところ, 針葉, 落葉樹林内とも露場に比べてやや低くなっていたが, 林内のアルベドは露場における日中の実測値 (α_0 ; 11-13 h の平均値) とした。下向きの長波放射量は (3) 式から得られる。上向き長波放射量は積雪表面温度 (T_s) をもとに次式で与えた。

$$LU_t = \varepsilon \sigma (T_s + 273.2)^4 \tag{6}$$

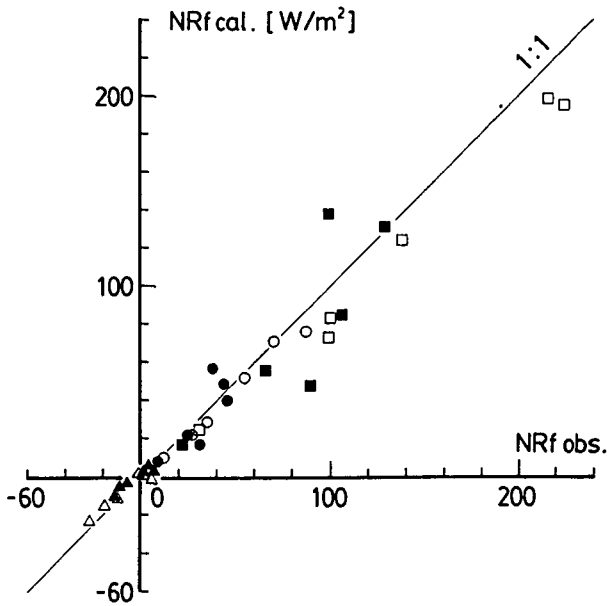
ε は雪面の射出率で $\varepsilon = 1$ とした。両林内とも表面温度は実測していないため, 92 年 4 月の露場における気温 (T_a) と表面温度の関係式

$$\begin{aligned}
 T_s &= -0.9 + 1.2 T_a \quad (T_a < 0.8^\circ\text{C}) \\
 &= 0.0 \quad (T_a \geq 0.8^\circ\text{C})
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

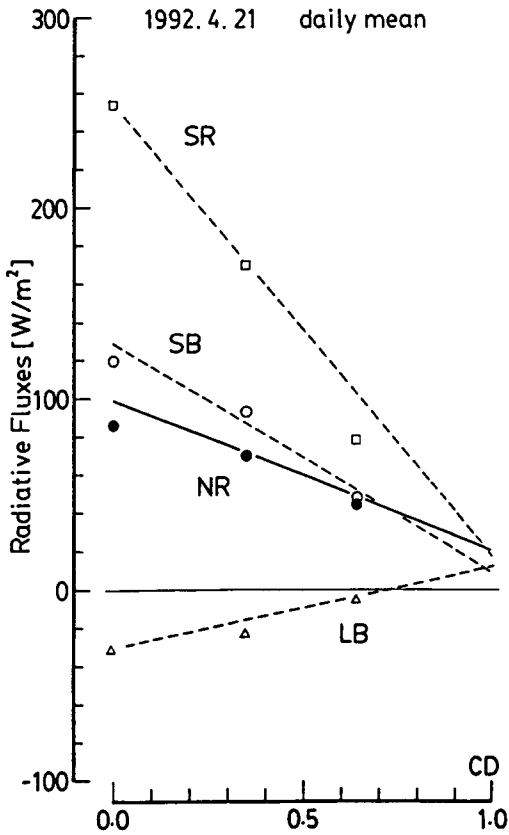
から推定した。

第 6 図は, 92 年 4 月 19 日から 24 日に針葉, 落葉樹林内で実測した放射収支量の日中 (09-17 h; □), 夜間 (20-04 h; △), 1 日 (00-24 h; ○) の平均値を, (4) 式から得られた結果と比較したものである。それぞれの記号で黒塗りは針葉樹林内, 白抜きは落葉樹林内の値を表す。推定値は針葉, 落葉樹林内の実測値を再現しており, 特に夜間においてよく一致している。これは長波放射収支量に関する推定が妥当であることを示す。放射収支量が大きくなる日中では, 落葉樹林内の推定値に過小評価する傾向が見られる。しかし日平均値に関する推定値の標準誤差は 8.8 W/m^2 , 日総量に直すと約 0.8 MJ/m^2 で, 2 mm の融雪量に換算される程度である。また落葉樹林に比べて, 針葉樹林の推定値は日中のばらつきが大きい。これは林内の日射量を見積る際, 直達, 散乱日射の遮蔽効果を独立に評価していないためと推測されるが, 明らかではない。

第 7 図には, 92 年 4 月 21 日の放射各成分の日平均値と樹冠密度 (CD) との関係を示した。破線はそれぞれ日射量 (SR), 短波放射収支量 (SB), 長波放射収支量 (LB) の推定値, 実線は放射収支量 (NR) の推定値を表す。日射量は樹冠密度の増大に伴い減少し, 短波放射収支量もそれに準じて減少している。長波放射収支量による放熱量は樹冠密度の増大に対して次第に減少し, 樹冠密度が 0.75 以上の林では吸熱に転じている。図中の記号は露場, 落葉樹林内, 針葉



第6図 林内放射収支量の実測値，推定値の比較。日中（09-17h；□），夜間（20-04h；△），1日（00-24h；○）の平均値について，それぞれ白抜きは落葉樹林，黒塗りは針葉樹林の関係を表す



第7図 樹冠密度と放射各成分の関係（1992年4月21日の日平均値について）

樹林内の放射各成分 (□: *SR*, ○: *SB*, △: *LB*), 放射収支量 (●: *NR*) の実測値を表し, それぞれの地点の樹冠密度に相当する位置 (露場: 0.00, 落葉樹林: 0.35, 針葉樹林: 0.64) に示した。3地点の放射収支量は実線で示した推定値とよく一致している。しかし針葉樹林では, 日射量を過大評価しているにも関わらず放射収支量が再現されたことになる。これは針葉樹林内のアルベドが推定値よりも高かったことを示唆し, 日射量の過大評価に見合う日射吸収量がなかったことを表す。今後, 林内の放射収支量をより正確に見積るためには, 林床アルベドの把握, さらに日射量の推定にあたっては, 直達, 散乱日射それぞれに対する遮蔽効果を考慮することが課題として挙げられる。

IV. ま と め

森林が存在する山地流域の融雪熱量を推定する第一段階として, 全天に樹木部分の占める割合で定義される樹冠密度を指標に, 林内放射収支量を一般化した。落葉樹の着葉に伴う樹冠密度の変化と, 林床に入射する日射, 下向き長波放射量の変化を対応づけ, 林外の日射, 大気放射量, アルベド, 及び林内の気温を用いて, 融雪期の林内における放射収支量を推定した。その結果, 針葉樹林, 及び非着葉状態の落葉樹林という樹種の異なる2つの林で得られた実測値は, 日平均値について標準誤差 8.8 W/m^2 で再現できた。

本研究をまとめるに際し, 北海道大学低温科学研究所・融雪科学部門の小林大二教授, 石井吉之助手には数々の助言を頂きました。また北海道大学雨竜地方演習林母子里作業所の皆様には, 観測期間中数々の協力を頂きました。ここに記して厚くお礼申し上げます。なお本研究経費の一部は, 文部省科学研究費 (課題番号 03455001, 04201104) による。

文 献

- 1) 山田知充・西村 寛・水津重雄・若浜五郎 1978 大雪山旭岳西斜面における積雪分布と堆積・融雪過程, 低温科学, 物理篇, **37**, 1-12.
- 2) Esko Kuusisto 1984 Snow Accumulation and Snowmelt In Finland, Vesihallitus-National Board of Waters, Finland, 149pp.
- 3) 太田岳史 1992 森林内外における積雪表面上の純放射量推定と表層融雪量, 水文・水資源学会誌, **5**, 19-26.
- 4) Wilson, R.G. and D.E. Petzold 1973 A Solar Radiation Model for Sub-Arctic Woodlands, *J. Appl. Meteorol.*, **12**, 1259-1266.
- 5) Male, D.H. and R.J. Granger 1981 Snow Surface Energy Exchange, *Water Resour. Res.*, **17**, 609-627.