

暖候地と寒冷地における森林内外の融雪の熱収支解析

石井 琢哉・福嶋 義宏・大手 信人

Energy budget on snowmelt at forested area in the both
warm and cold temperature regions

Takuya ISHII, Yoshihiro FUKUSHIMA and Nobuhito Ohte

要 旨

暖候地の代表として京都府北部の芦生演習林と寒冷地の代表として北海道の雨龍演習林の森林内外で融雪の熱収支観測をした結果、以下の知見を得た。1) 暖候・寒冷地における融雪過程は、その活発な時期が数カ月ずれることによる太陽高度、アルベドの違いとして理解できる。2) 森林内の地表の融雪面で大きく変化する気象要素は全天日射量と風速であり、特に全天日射量は林相によって減少率が異なり、人工性スギ林では林外地の16%で、常緑針葉樹林では38%、落葉性広葉樹林では65%であった。3) 融雪熱量の大部分を占めるのは純放射量である。4) 日中の融雪量は無林地に対し森林内では減少するが、林相によって日射の遮断率が異なるため融雪量の減少率も異なる。5) 夜間の純放射量は樹冠からの長波放射量のため森林内のほうが大きい傾向がみられ、林内の夜間融雪量が無視し得ない場合もある。

1. は じ め に

近年、スキー場開発が盛んになり人間が山地流域で雪と接する機会が増し、融雪水の増大が原因の突発事故が増加している。そのため山地流域での融雪流出のハイドログラフを降雨流出と同様に精度よく、せめて時間単位で予測することが要求されるが、その目的にはまず融雪量を高い精度で評価する必要がある。そこで森林の地表閉鎖効果を含めた融雪現象の熱収支的理解を目的として森林内と無林地で融雪観測を行った。観測地に暖地性山地流域として京都大学芦生演習林、寒地性流域として北海道幌加内町母子里にある北海道大学雨龍演習林を選び、バルク法を用いて時間単位で熱収支解析を行った。ただし森林の樹冠上での降雪、融雪現象については今回考慮せず、森林内では林床に雪が堆積してからの融雪過程を扱う。本報告では森林内外での気象要素の測定結果を比較し、これらが融雪量に与える影響、さらに芦生と母子里での融雪現象を比較した結果を述べる。

2. 観測場所と観測内容

芦生演習林は京都府北東部に位置する由良川源流域である。観測場所は芦生演習林事務所近くの無林地（標高355m）、内杉谷（標高430m）のスギ人工林内地と林外地の3地点である（図1）。スギ人工林地の樹冠投影図を図2に示す。スギ人工林地は立木密度が0.18本/㎡、胸高断面積合

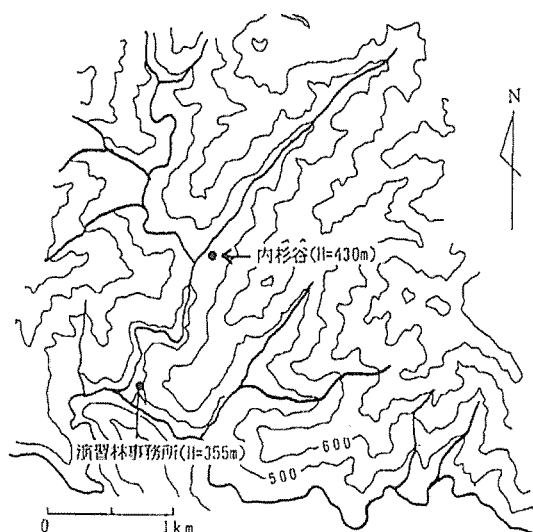


図1 芦生

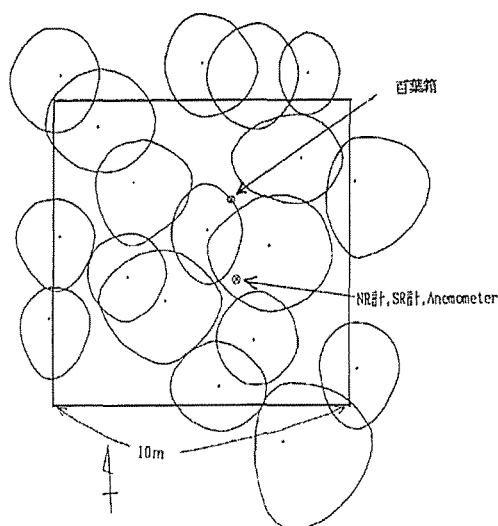


図2 芦生スギ人工林

計の面積当りの比が0.0009、平均樹高が約20mであった。観測期間は1991年2月25日～3月10日で、各場所の雪面上約1.3mにおいて気温、湿度、風速、日射量、純放射量をデータロガー（Grant社製）を用いて自記計測し、秤量法による融雪量、蒸発量、積雪深、積雪密度、アルベドを時間単位で計測した。それぞれの場所で使用した測器の一覧を表1に示す。秤量法では、アクリル製カップ皿の底に穴を開けたものと開けていないものを用意し、穴なしのカップ皿の重量変化から蒸発量、穴あきカップ皿からは蒸発量＋融雪量を求めた。夜間の時間融雪量は前日の夕方6時から翌日の朝8時までの平均とした。

以後芦生演習林の作業事務所近くの無林地を事務所、内杉谷スギ人工林内地をスギ林内地、内杉谷林外地を林外地と呼ぶ。

北海道北部の母子里に位置する雨龍演習林では標高444mの地点（図3）で常緑針葉樹林地と落葉広葉樹林地と、その両林分に挟まれた無林地において1991年4月24日～4月26日の期間に観測を行った。林地の樹冠投影図を図4-(1), (2)に示す。常緑針葉樹林地はトドマツが主体であるが落葉樹のダケカンバ、ナナカマドも混じっており、立木密度が0.093本/m² 胸高断面積合計の面積比が0.009である。落葉広葉樹林地はイタヤカエデ、ナナカマド、ハリギリを主体とし、立木密度が0.089本/m²、胸高断面積合計の面積比が0.00015であった。母子里での観測内容は芦生と同様である。

3. 研究の背景

雪面の熱収支

水平な単位面積当り単位時間に融ける雪の量は積雪表面に出入りするエネルギー束（フラックス）の収支によって決まる。エネルギー保存則から雪面での熱収支は次式で表される。

$$RN + QE + QH + Qr + Qg = QM \quad (1)$$

表1. 測定機器一覧

場所	測定項目	機器	
芦生事務所	純放射量	英弘製純放射計(CN11)	
	日射量	英弘製全天日射計(MS42)	
	風速	牧野製風杯型風速計(AG750)	始動風速0.3m/s
	気温, 湿度	ヴァイサラ製湿度, 温度計(HMP31UT)	精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, $\pm 2\% \text{RH}$
芦生スギ林内	純放射量	英弘製純放射計(CN11)	3月6日まで欠陥
	日射量	シリコンフォトダイオードを用いた簡易日射計	測定波長範囲0.4~1.1 μm
	風速	牧野製風杯型風速計(AC750)	始動風速0.3m/s
	気温, 湿度	ヴァイサラ製湿度, 温度計(HMP31UT)	精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, $\pm 2\% \text{RH}$
芦生林外地	純放射量	英弘製純放射計(CN11)	
	日射量	シリコンフォトダイオードを用いた簡易日射計	測定波長範囲0.4~1.1 μm
	風速	中浅製風杯型風速計(AC41)	始動風速0.5m/s
	気温, 湿度	ヴァイサラ製湿度, 温度計(HMP31UT)	精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, $\pm 2\% \text{RH}$
母子里無林地	純放射量	英弘製純放射計(CN11)	
	日射量	シリコンフォトダイオードを用いた簡易日射計	測定波長範囲0.4~1.1 μm
	風速	中浅製風杯型風速計	始動風速0.5m/s
	気温, 湿度	ヴァイサラ製湿度, 温度計(HMP31UT)	精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, $\pm 2\% \text{RH}$
母子里落葉樹林内	純放射量	英弘製純放射計(CN11)	
	日射量	シリコンフォトダイオードを用いた簡易日射計	測定波長範囲0.4~1.1 μm
	風速	中浅製風杯型風速計(AC41)	始動風速0.5m/s
	気温, 湿度	ヴァイサラ製湿度, 温度計(HMP31UT)	精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, $\pm 2\% \text{RH}$
母子里針葉樹林内	純放射量	英弘製純放射計(CN31)	
	日射量	シリコンフォトダイオードを用いた簡易日射計	測定波長範囲0.4~1.1 μm
	風速	牧野製風杯型風速計(AC750)	始動風速0.3m/s
	気温, 湿度	ヴァイサラ製湿度, 温度計(HMP31UT)	精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, $\pm 2\% \text{RH}$

ここで各項目の意味は次の通りである。

RN: 純放射量 QE: 潜熱交換量 QH: 顕熱交換量

Qr: 雨が雪に与える熱量 Qg: 地熱

QM: 融雪熱量

(1)式左辺の各項は、表面に向かう場合を正とする。QM正の場合融雪熱量を表す。地熱に関しては融雪水の浸透で地温は 0°C 近くなるため無視し得ると判断した。

純放射量は短波放射収支と長波放射収支の和として

$$\text{RN} = (1 - \alpha) \text{QS} + \text{L} \downarrow - \text{L} \uparrow \quad (2)$$

で表される。ここで

RN: 純放射量 α : アルベド (短波放射の反射係数)

QS: 日射量 (短波放射量)

$\text{L} \downarrow$: 大気からの下向き長波放射量

$\text{L} \uparrow$: 平均表面温度における長波放射量である。

芦生のスギ林内地では純放射量が計測されたのは3月7日~10日の期間のみであったため、他の期間の純放射量を推定する必要がある。日射量とアルベドは全期間計測されており、しかも雪温が 0°C とみなせば雪面からの上向き長波量を得るので、下向きの長波放射量さえ求められれば純放射量を算出し得る。林内においても下向き長波量は気温の4乗に比例するとみなし3月7日~10日の期間の下向き長波量と σT_a^4 との相関をとり、見かけ上の射出率 ϵ を求めた。図5は横

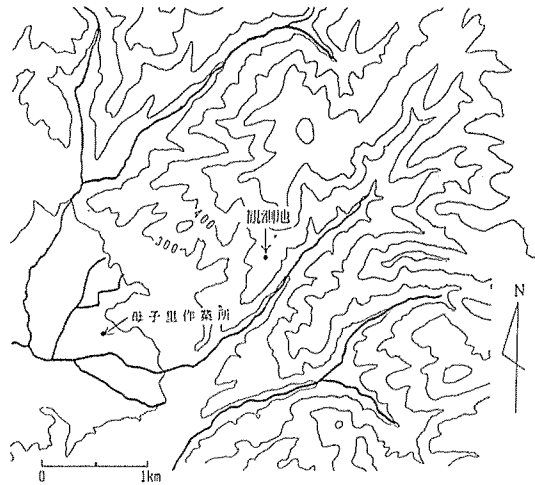
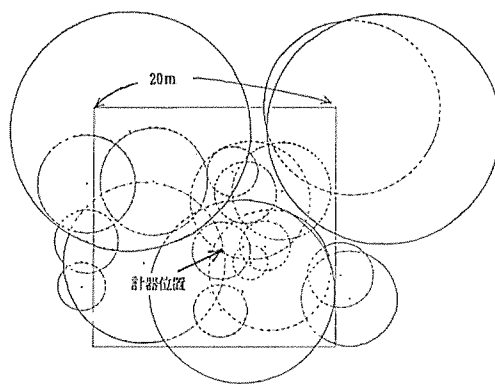
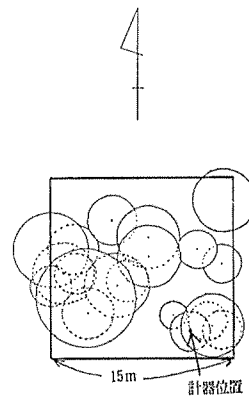


図3 母子里



母子里常緑針葉樹林

図4-(1)



母子里落葉広葉樹林

図4-(2)

軸に σT_a^4 , 縦軸に計測値から求めた下向き長波量のグラフである。傾きから求められた $\epsilon = 0.885$ を用いて欠測期間の純放射量を修復した。

顕熱, 潜熱フラックスは次の式によって表せる。

$$\text{顕熱量 } QH = \rho \cdot Cp \cdot Ch \cdot u \cdot (Ta - Ts) \quad (4)$$

$$\text{潜熱量 } QE = \rho Cp / \gamma \cdot Ce \cdot u \cdot (Ea - Es) \quad (5)$$

ρ : 空気密度 (1292g/m³) Cp : 空気の定圧比熱 (1.01J/g^{°C})

u : 風速 (m/sec) γ : 乾湿計定数 (mb/°C)

Ta : 高さ z での気温 Ts : 雪面の温度

Ea : 高さzでの水蒸気圧 (mb) Es : 雪面での飽和水蒸気圧 (mb)
 Ch : 顕熱のバルク係数 Ce : 潜熱のバルク係数

両バルク係数は分子運動が同じ過程を通じて関与していることから大きさは近似的に等しいものであり、両係数は等しいものとして扱うこととする。したがって測定し得た蒸発量、風速、水蒸気圧から潜熱のバルク係数が算出されれば顕熱量も求められる。

雨滴の温度は通常地上における湿球温度と等しいとされている。湿球温度は日中のアスマン式乾湿計の値を用いたが、その他の場合については気温で代用した。雨の与える熱量は次式で表される。

$$Q_t = P \cdot T \cdot 1000 / 0.2388 / 3600 \quad (\text{W/m}^2) \quad (6)$$

P : 雨量(mm/hr) T : 湿球温度 (°C)

4. バルク係数及び雪面粗度について

潜熱、顕熱交換量が融雪熱量に大きく占める場合には、バルク係数の重要性は高い。ここでは秤量法による観測値から時間単位の潜熱量を求め、次に式(6)の右辺のうち潜熱のバルク係数以外の $\rho C_p / \gamma \cdot U$ (Ea-Es) を求めたのちに回帰をとり、傾きからバルク係数を求めた。その時のグラフを図6の(1)～(6)に示す。その際、風速が0.5m/sec以上のときの値のみで回帰をとった。また雨の日は蒸発量の測定の誤差が大きくなるため降雨のある期間のデータも除外した。

求められたバルク係数を表2に示す。母子里では森林被覆のある程、バルク係数が大きくなる傾向が現れたが、芦生ではほぼ同じ値であった。いずれもオーダーとしては変わらなかった。

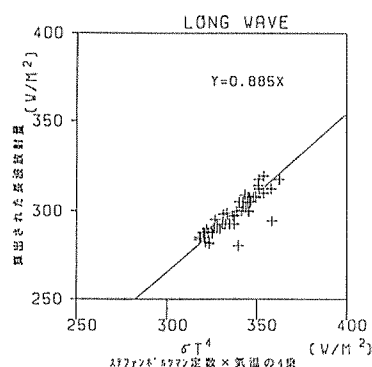


図5

5. 森林内と無林地とでの気象要素の違い

森林の被覆が存在するために気象要素の中には林内と無林地とで著しく変わるものがある。その程度を表す指標として各気象要素の林内値 (Xf) と林外値 (Xo) の相対比 (r) を考える。

$$X_f = r \cdot X_o$$

以下、各要素について係数 r の値について検討する。

1) 日射量

森林が日射を遮蔽するために林内では無林地よりも日射量は小さくなる。無林地と林内での値を比較したのが図7-(1), (2)である。芦生ではスギ人工林内での日射量に関する r は0.16の値を示した。母子里では常緑針葉樹林内での r は0.38, 落葉広葉樹林内での r は0.65であった。

2) アルベド

アルベドの変化のグラフ (図8) は、一日のうち10時から14時の値の平均を日毎にプロット

したものである。芦生の2月28日の夜に新雪があったので、3月1日にはすべての場所でアルベドが上がった。その後あまり変動なく融雪が進み、新雪の6日後の3月7日から林内では急速に減少している。他の場所の比べ、スギ林内で著しく減少した理由は林内では雪面にリターが増加したことが考えられる。芦生でのアルベドの値が全期間通してだいたい0.8~0.6であったのに対し、母子里では0.5~0.3という小さい値を示した。全体的に母子里の値が低いのは、

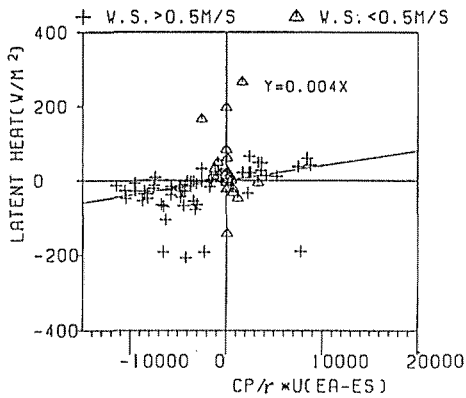


図 6-(1) 芦生事務所

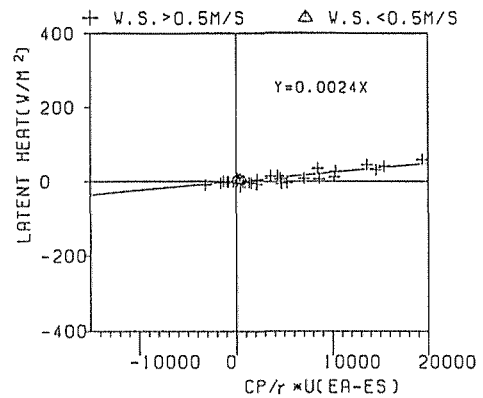


図 6-(4) 母子里無林地

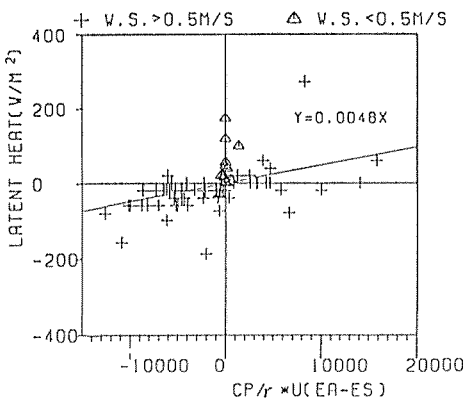


図 6-(2) 芦生林外地

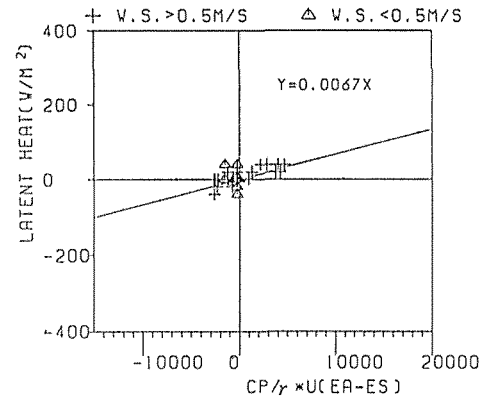


図 6-(5) 母子里落葉樹林内

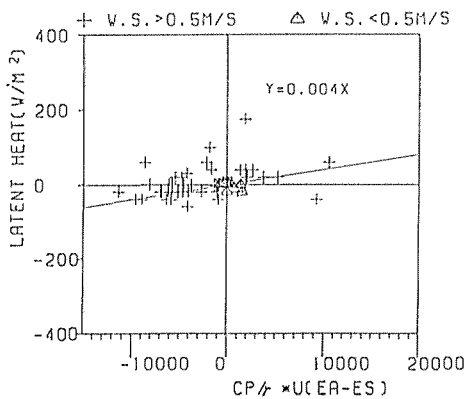


図 6-(3) 芦生スギ人工林内

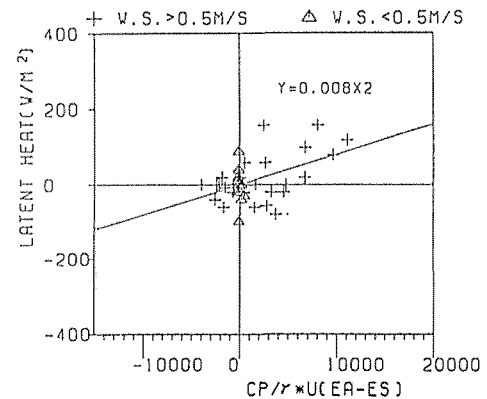


図 6-(6) 母子里常緑樹林内

芦生と違い母子里では新雪後かなりの日数が経っており雪面が汚れていたためである。母子里では3日間のアルベドの値しかないため日毎の変化はあまり見られなかったが、無林地、落葉広葉樹林地、常緑針葉樹林地の順にアルベドが小さいという結果であった。このことも森林の存在することでリターがたまり雪面のアルベドを下げていると解釈できる。

3) 風速

林内と林外での風速についてのグラフを図9-(1), (2) に示す。芦生ではスギ人工林内と林外との相対比 r は0.76であった。母子里については常緑針葉樹林内で0.92, 落葉広葉樹林内で0.72の値を示した。

4) 気温

林内外の気温の比較図を図10-(1), (2) に示す。芦生も母子里も林内と林外で気温はほとんど変わらない。すべての森林内で相対比は0.9~1.0であった。

6) 水蒸気圧

林内外の水蒸気圧の比較図を図11-(1), (2) に示す。水蒸気圧の相対比 r は気温同様に林内と林外とでほとんど差異はなかった。芦生スギ人工林内の r は0.98であり、母子里では常緑針葉樹林内、落葉広葉樹林内での α はそれぞれ1.0, 1.03の値を示した。

表2. バルク係数

観測場所		バルク係数
芦生	無林地(事務所)	0.004
	無林地(林外地)	0.0048
	スギ人工林地	0.0041
母子里	無林地	0.0024
	落葉広葉樹林地	0.0067
	常緑針葉樹林地	0.008

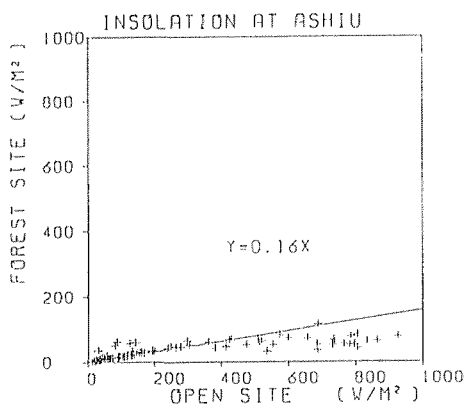


図7-(1) 芦生全日射量

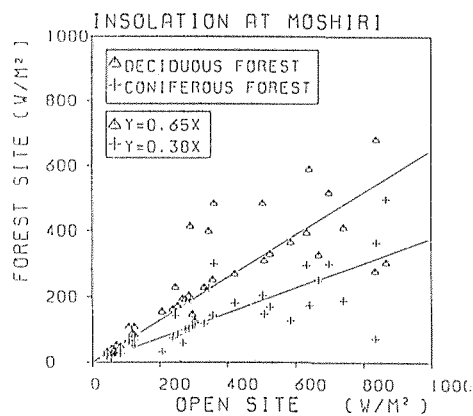


図7-(2) 母子里全日射量

以上の結果から相対比 α を表3にまとめた。森林の有無で大きく異なる気象要素は日射量と風速である。太田ら(1)による観測でもこの結果と同様であることが報告されている。また潜熱と顕熱を決定する要素のなかで林内と無林地とで異なるのは風速とバルク係数であり、この2要素を加味して相対比を求めた。

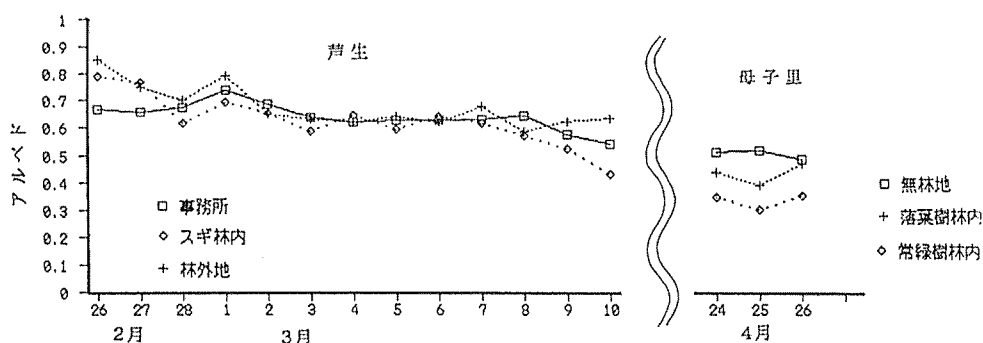


図8 アルベドの変化

6. 融雪熱量の実測値と推定値との比較

図12-(1)～(6)は、各場所での各時間の融雪熱量の実測値と計算値のグラフである。実測値の夜間は次の日の朝までの平均値をとった。

芦生ではどの場所においても計算値は良好に再現しており、特に日中はほぼ一致している。3月8日～10日に若干ずれがみられるのは、雨が降っていたために測定諸項目の誤差が大きくなったからである。

母子里においても芦生同様に再現はうまくできている。ただし常緑針葉樹林地の日中に計算値がやや大きめであったが、これは不均質性の強い天然性の林分であったため、林内での気象要素が一樣でなく特にサンスポットの効果も現れて、秤量法を行った場所と純放射計があった場所とで気象要素が異なっていたためであろう。その理由に林内でも日射量が一樣になる夜間には計算

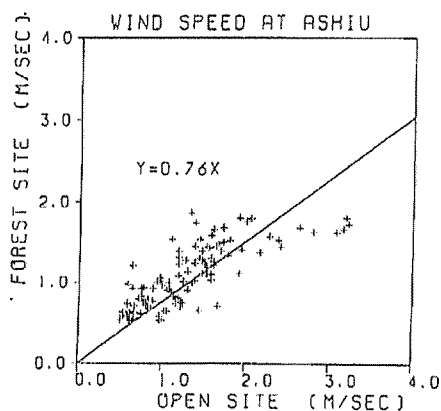


図9-(1) 芦生風速

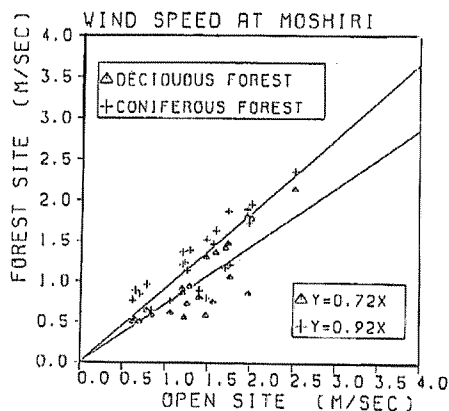


図9-(2) 母子里風速

値が良好に再現できていることからバルク係数自体には問題ないとした。また25日から26日にかけての夜間には融雪が生じている。

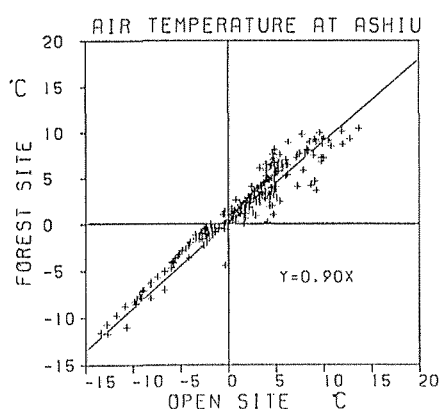


図10-(1) 芦生気温

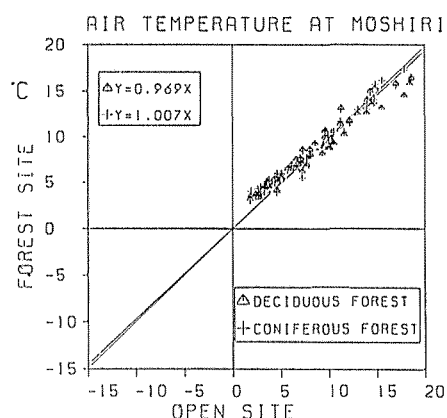


図10-(2) 母子里気温

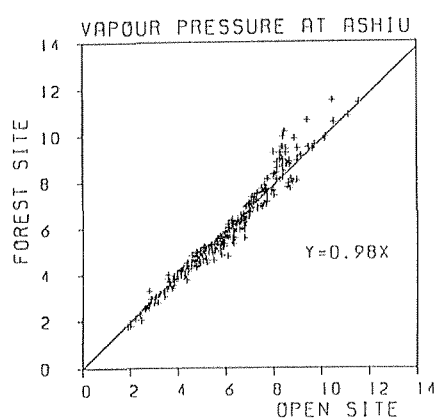


図11-(1) 母子里気温

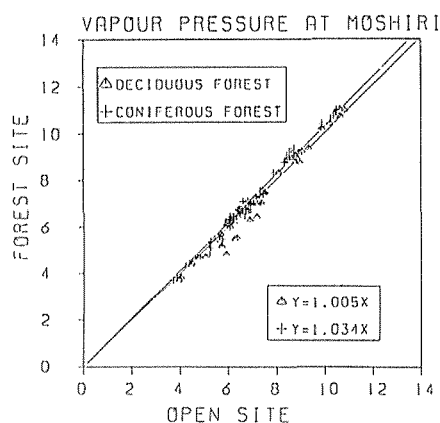


図11-(2) 母子里水蒸気圧

なお融雪量の観測値を積算したところ、林外地に対し芦生スギ人工林では40%、母子里落葉樹林内では70%、母子里針葉樹林内では70%という結果を得た。

7. 熱収支各項目の内訳

芦生の事務所とスギ林内、母子里の無林地と常緑樹林内での3日間の熱収支グラフを図13-(1)～(4)に示す。森林内での共通する特徴は無林地に比べ純放射量が小さいこと、潜熱量と顕熱量は無林地より大きいことである。母子里常緑樹林が無林地の融雪量とほぼ同じであったのに対し、芦生スギ林では無林地よりかなり小さくなった理由は二つある。第一に母子里常緑樹林内は芦生スギ林ほど純放射量が減少していないこと第二に母子里常緑樹林内で曇天日があり潜熱、顕熱量が大きかったことである。特に純放射量の違いは日射量の遮断率に起因している。

また母子里常緑樹林内では4月25日の夜から26日にかけて融雪が生じている。林内ではこの夜、

表3. 森林の内外での気象要素の違い

気象要素	芦生スギ林内	母子里落葉樹林内	母子里常緑樹林内
気温	0.9	0.97	1.0
水蒸気圧	0.98	1.0	1.0
風速	0.76	0.72	0.92
日射量	0.16	0.65	0.38
純放射量	(0.4)	0.6	0.6
潜熱(推)	0.7	2.4	3.7
顕熱(推)	0.7	2.4	3.7
融雪量(実)	0.4	0.7	0.7

純放射量が正の値であったことと曇天日で凝結が生じ潜熱が正の値を示したからである。純放射量が正であったのは樹冠からの長波放射が作用したためである。

母子里と芦生との無林地を比較すると純放射量の違いが融雪量に決定的な影響を与えている結果となった。

8. 結 論

以上得られた結果をまとめてみると、無林地と森林内地とで大きく異なる気象要素は全天日射量と風速であり、全天日射量は無林地に比べスギ林で16%, 落葉樹林で38%, 常緑樹林で65%に低下し、風速はスギ林で80%, 落葉樹林で70%に低下した。この結果、融雪量は無林地に比べスギ林で76%, 落葉樹林で72%, 常緑樹林で92%に低下した。

どの場所でも熱収支項目のなかで純放射量が最も大きな割合を占めた。

母子里と芦生での無林地を比較して母子里のほうが融雪量が多かったのは母子里の方が太陽高度が高いために日積算日射量が大きかったこととアルベドが低かったことが原因である。

また夜間にも林内で純放射量が正の値をとり融雪が生じることもあり、林内では夜間融雪量は無視し得ない。

謝 辞

芦生での観測では、中島皇先生を始め芦生の職員の方々にお世話になり、砂防研究室の院生、学生など多くの方々も協力してくださいました。また母子里の観測では雨龍演習林の松田彊演習林長、低温研究所の小林大二教授、石川信敬助教授が多くの便宜を図ってくださったおかげで観測を成功させることができました。特に低温研究所の児玉裕二先生にはプロット設定に御協力頂き、雨龍演習林の門松昌彦先生には観測プロットの樹種同定をして頂きました。これらすべての人に謝意を表します。

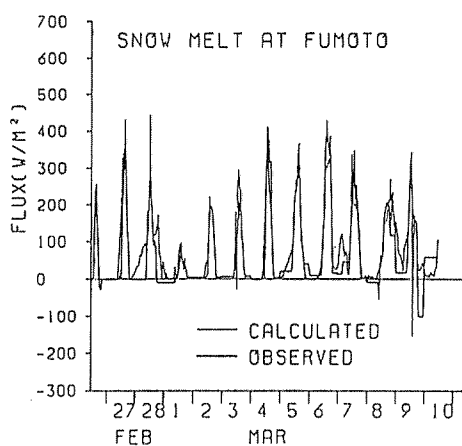


図12-(1) 芦生事務所

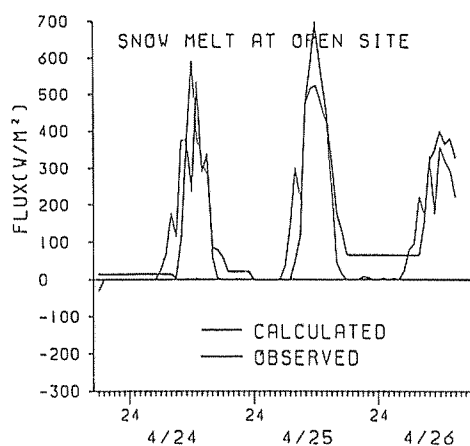


図12-(4) 母子里無林地

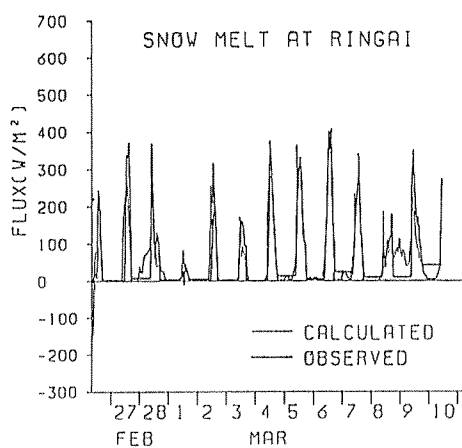


図12-(2) 芦生林外地

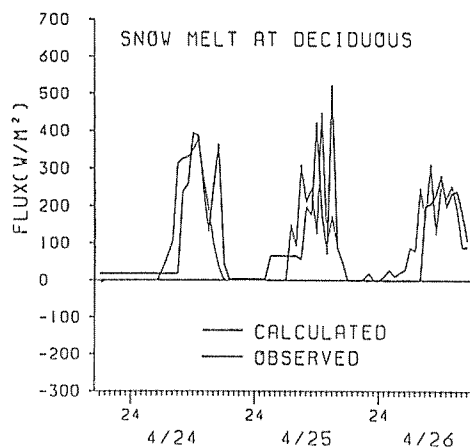


図12-(5) 母子里落葉樹林内

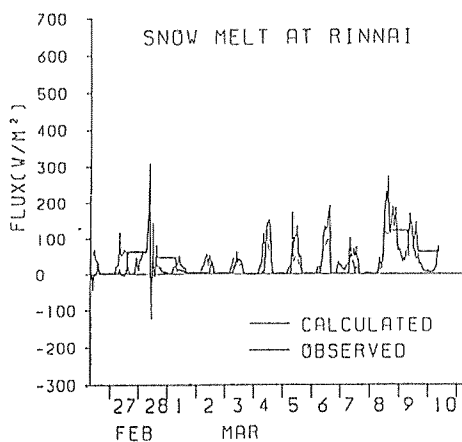


図12-(3) 芦生林内地

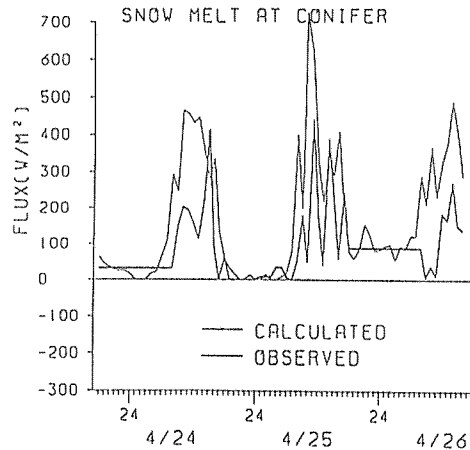


図12-(6) 母子里常緑樹林内

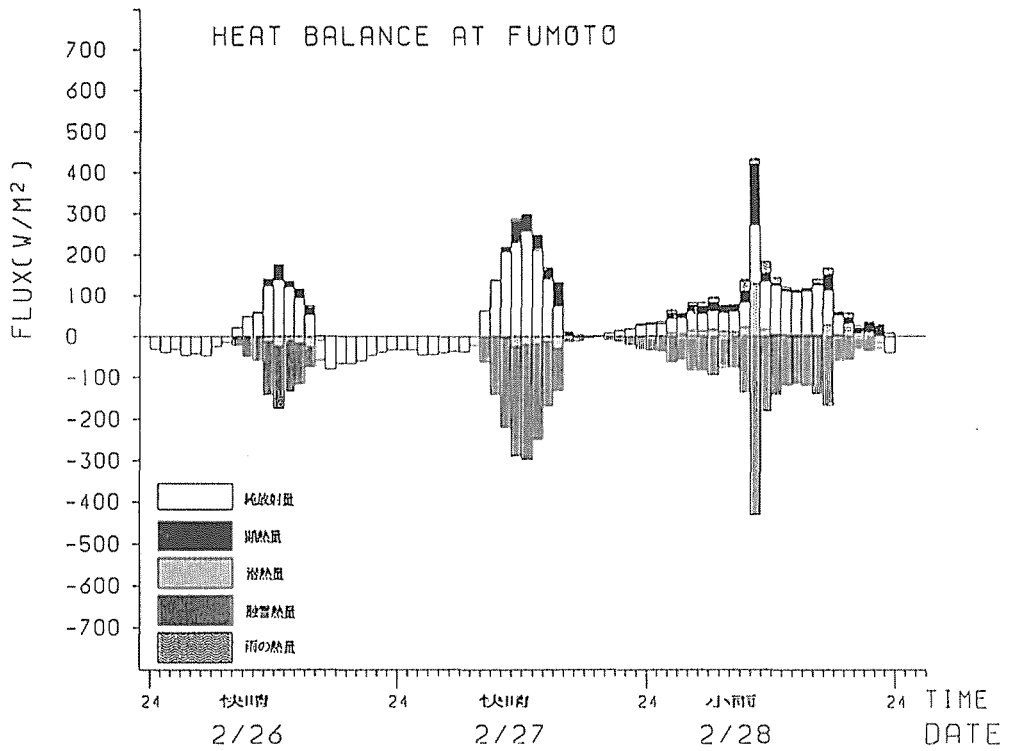


図13-(1) 芦生事務所

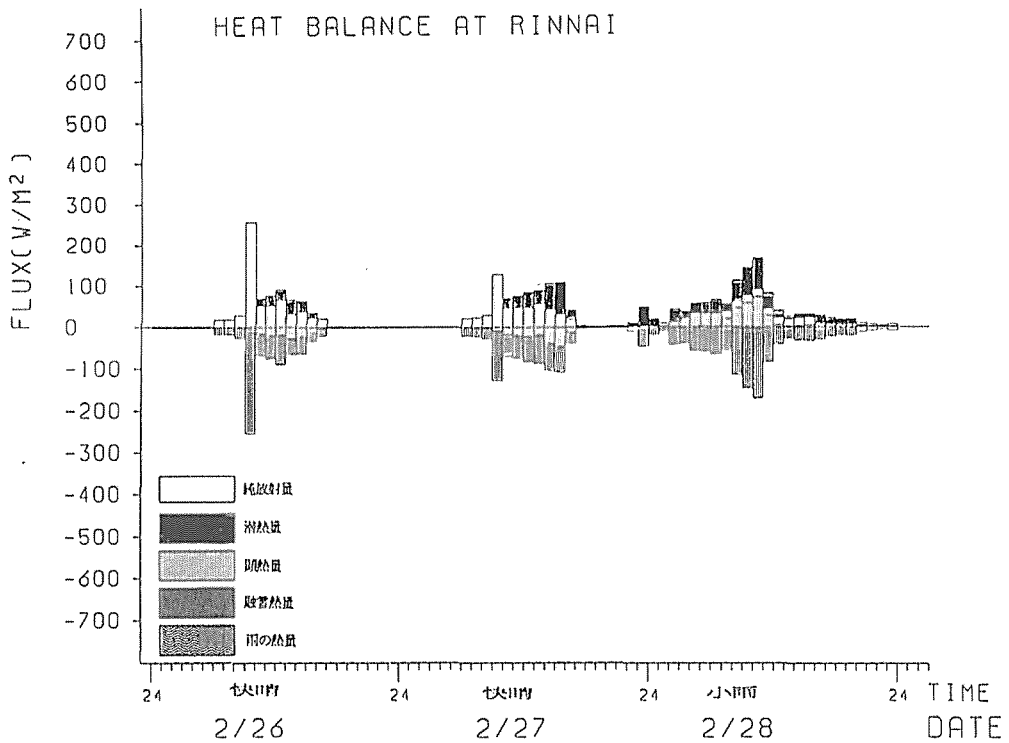


図13-(2) 芦生スギ林内地

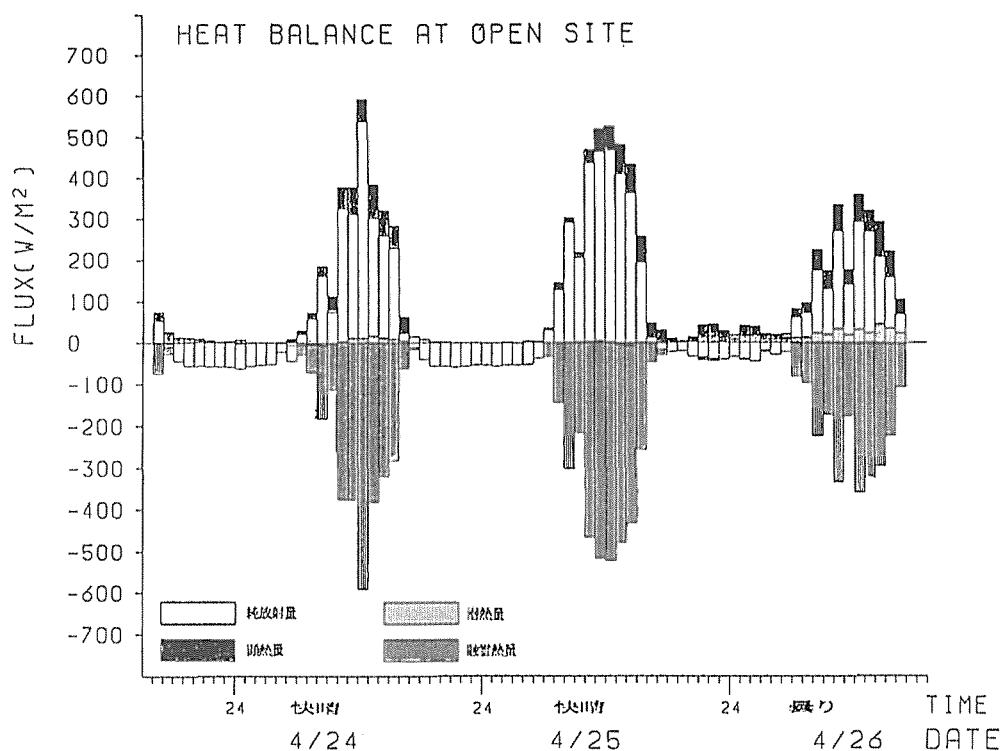


図13-(3) 母子里無林地

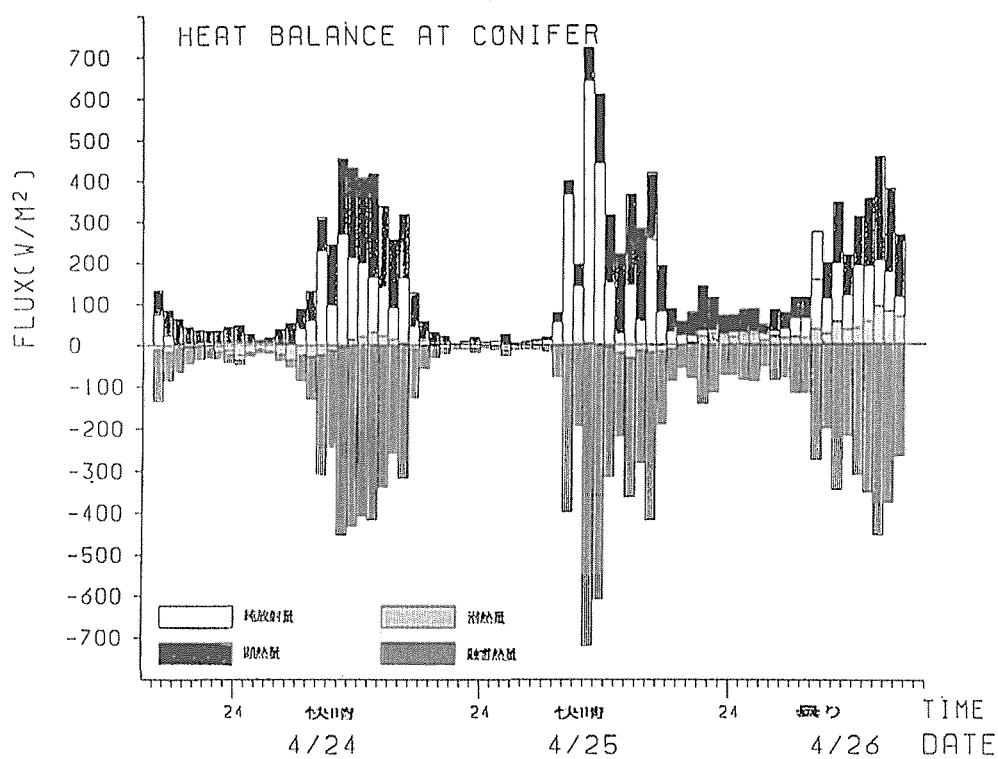


図13-(4) 母子里常緑林内

引用文献

- 1) 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巻4号. 289-296

Résumé

The energy exchanges at the snow-air interface were observed at the forested area and at the open area. The results show that 1) differences in snowmelt between warm and cold temperature regions are derived from sun's altitude and albedo 2) insolation and wind speed are more reduced than other meteorological factors in the forest and 3) net radiation is typically influential on snowmelt and 4) melted snow in the day time is reduced in the forest and rate of snowmelt is dominated by insolation which is different in various forests and 5) it sometimes occurs that melted snow in the night time is not negligible because of the net longwave radiative flux generated by the canopy.