

# 多様な地被形態上でのエネルギー収支と空気力学的特性

中村 彰宏・福島 義宏・小橋 澄治

Energy budgets and characteristics of aerodynamic  
resistance over various surfaces

Akihiro NAKAMURA, Yoshihiro FUKUSHIMA and Sumiji KOBASHI

## 要 旨

地表面と大気の水、熱の交換過程を明らかにするため、森林、背丈の低い植生地、裸地、積雪の上で超音波風速温度計を用いた微気象観測を行い、エネルギー収支を推定した。エネルギー収支は、地被形態によって放射収支特性が異なることや、乱流輸送や土壌水分特性の相違によって変化することが明らかになった。また各地表面での空気力学的抵抗を算出するとともに、地表面での乱流輸送を支配する地被パラメータである粗度の推定を行った。

## 1 はじめに

地球表面は太陽からの放射エネルギーが熱エネルギーに交換される場所であり、この交換過程に気温や湿度などの気象要素が大きく支配されている。この過程は地被形態、土壌水分状態、植生地であれば植物の生理的要因によって異なり、大気に与える影響はそれぞれの場所で大きく異なる。近年、地被形態の変化により気候変動が懸念されているが、このような問題に対処するためにも、多様な地被形態上で、土壌水分などの異なる条件下におけるエネルギー交換過程を明らかにすることが重要である。そこで本研究ではエネルギー収支・乱流変動法を森林、背丈の低い植生地、裸地、積雪面に適用し、エネルギー収支を明らかにするとともに、測定した気象項目より地表面の空気力学的特性を明らかにした。

## 2 観測地および観測方法

### 2-1. 観測地

観測対象地として、森林、背丈の低い植生地、裸地、積雪面を選んだ。森林上として、滋賀県琵琶湖南東部に位置する桐生試験地のマツ、ヒノキ林（以後桐生と呼ぶ）、兵庫県赤穂市の海岸に位置する関西電力赤穂発電所周囲に設けられた環境保全緑地（赤穂）、東京都八王子市に位置する東京農工大学波丘地試験地のスギ林（波丘地）で行った。裸地面としては、中国内モンゴル自治区の南西部に位置する毛烏素沙地に設けられた東試験地内の乾燥した砂丘中腹（砂地）、同東試験地内の砂丘と砂丘の間に位置する地下水位の高い湿地（丘間低地）、茨城県筑波学園都市内の土木研究所の野球グラウンドの裸地（筑波）、滋賀県琵琶湖北部に位置する高月町の刈り取り後の水田（琵琶湖）である。背丈の低い植生地としては、毛烏素沙地、東試験地内に自生するヒノ

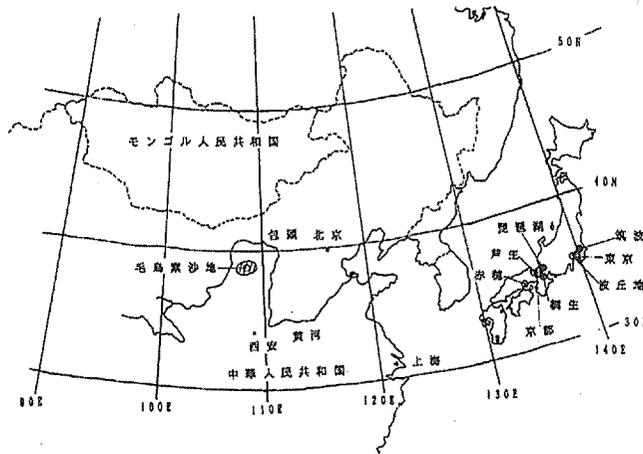


図1 観測地点の位置

キ科の常緑針葉樹である臭柏 (*Sabina vulgaris*) の植生上 (臭柏), また同東試験地内に植栽されたマメ科の飼料作物である楊柴 (*Hedysarum mongolicum*) の植生上 (楊柴) である。積雪面としては京都大学農学部芦生演習林事務所構内の観測圃場 (芦生) で観測した。本論文ではこれらの観測地をそれぞれ, 桐生, 赤穂, 波丘地, 砂地, 丘間低地, 筑波, 琵琶湖, 臭柏, 楊柴, 芦生とよぶ。観測地点の位置を図1に, 各観測地点の地被形態の特性を表1に示す。

表1 観測地点の地被形態

観測地	地被形態	地被構成物	平均植生高	備考
桐生	森林	マツ、ヒノキ	15m	
赤穂	〃	マツ、広葉樹	3m	
波丘地	〃	スギ	10m	
砂地 (毛鳥素)	裸地	砂 (乾燥)		
丘間低地 (毛鳥素)	〃	砂 (湿潤)	0.2m	イネ科等の草本が多少あり
筑波	〃	粘土 (湿潤)		
琵琶湖	〃	〃		稲の切り株あり
臭柏 (毛鳥素)	灌木	ヒノキ科臭柏	0.6m	
楊柴 (毛鳥素)	〃	マメ科楊柴	0.8m	
芦生	雪面	雪		積雪深およそ0.3m

## 2-2 観測方法

用いた測器は, 各観測地により若干異なるが, 基本的には以下に掲げるものである。

乱流観測として, 1次元または3次元超音波風速温度計 (Kaijyo製 DAT-100, DAT-310) によって風速, 温度変動を10Hzで, サンプリング時間を約7分または14分として, 日中は15分または30分で, 夜間は60分間隔で測定した。その他の気象項目としては, 日射量を日射計 (英弘精機製,

MS-42) で検定された自作シリコンフォトダイオードの簡易日射計で、純放射量を放射収支計 (英弘精機製, CN-11)、乾湿球温度をアスマン式通風型乾湿球温度計 (吉野計測製) またはサーミスタの乾湿球温度計で、水平風速を3杯式風速計 (牧野応用測器製, AC-750) で、表面温度を放射温度計 (タスコジャパン製, THI-500L) で、地温をサーミスタで測定した。これらは主としてデータロガー (GRANT社製, スカイラルメータ・ロガー) で1~10分間隔で測定した。また出力の備わっていない計測器については、60分間隔で正時にマニュアル測定を行った。

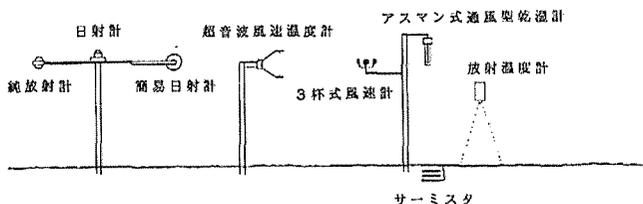


図2 使用観測の概要

### 3 解析手法

#### 3-1 地表面でのエネルギー収支

地表面では日中、短波放射として太陽からの放射エネルギーを受け、一部が反射され、残りが吸収される。また長波放射として大気や地表からの放射エネルギーを受け、地表の表面温度に応じた放射エネルギーを大気に射出する。それゆえ、地表面に正味吸収される放射エネルギーである純放射量 ( $R_n$ ) は、短波放射量 ( $S$ ) と長波放射量 ( $L$ ) の収支として表される。

$$R_n = S \downarrow - S \uparrow + L \downarrow - L \uparrow \quad (1)$$

ここで  $\downarrow$  は大気から地表へ入射される放射エネルギー、 $\uparrow$  は地表から大気へ射出される放射エネルギーを示す。短波放射量の反射の割合 ( $S \uparrow / S \downarrow$ ) はアルベドと呼ばれ、太陽高度や地表の土壌水分によっても変化するが、地表面の特性を示す。地表面で正味吸収される放射エネルギーは熱エネルギーに変換され、放射エネルギーと熱エネルギーの関係式はエネルギー収支式と呼ばれ、次式で示される。

$$R_n = H + lE + G + P \quad (2)$$

ここで  $H$  は顕熱フラックス、 $lE$  は潜熱フラックス、 $G$  は土壌や植物体、気層などの貯熱変化量、 $P$  は植物の光合成に使用されるエネルギーである。

#### 3-2 乱流変動法

乱流変動法 (または渦相関法) は、地表面でエネルギー交換され、乱流によって鉛直方向に運ばれる熱や水蒸気、二酸化炭素の輸送量を少ない仮定で直接求める手法である。本研究では超音

波風速温度計により顕熱フラックスの算出を次式で行った。

$$H = \rho C_p \overline{w' T'} \quad (3)$$

ここで $\rho$ は空気の密度、 $C_p$ は空気の定圧比熱、 $w'$ 、 $T'$ はそれぞれ鉛直風速、温度の変動である。(3)式は、一様な水平面上では運動量保存の法則により鉛直方向の平均風速は存在しないものとして導かれる。本研究の結果では、地形の影響のためか必ずしも鉛直風速の平均値がゼロではなかったが、本解析では(3)式で顕熱フラックスを算出した。

### 3-3 貯熱変化量の算出

貯熱変化は土壌面、植物体の温度変化、地表から樹冠層までの温度、水蒸気圧変化によって生じる。本研究ではこれらの項のうち土壌の温度変化によって生じた項が大きいものと考えて算出を行った。土壌の貯熱変化量を $G$ とすると、深度 $z$ での土壌の密度 $\rho(z)$ 、土壌の比熱 $C_p(z)$ 、単位時間当りの温度変化 $\Delta T(z)$ を用いて、

$$G = \int_0^h \rho(z) C_p(z) \Delta T(z) dz \quad (4)$$

ただし $h$ は、地温が日変化を生じる深度である。密度、比熱は土壌の固体、液体の体積比率によって大きく変化する。それゆえ土壌のサンプリングを行い、固体、液体の体積比率より密度、比熱を求めた。そして土壌を表層からほぼ地温の日変化の生じない深度までを数層に分割し、各層で測定した地温の変化より平均貯熱変化量を算出し、積算して求めた。なお、毛鳥素沙地での観測時には、温度測定を行った最高深度でも温度変化が大きかったため、この深度以下にも熱フラックスが生じていたと考えられるため、熱伝導理論により、温度変動のシュミレーションを行い、温度変動が1日でほぼゼロになる深度までの計算を行った。

## 4 結果および考察

表2には観測日、天候、日中の気象項目の平均値を示す。

### 4-1 放射収支計の補正

各地表面で放射収支計により測定された純放射量は日射量と比較した結果、過大に評価されていることが考えられた。それゆえ1992年8月に京都大学の屋上と1992年10月の琵琶湖での観測時

表2 観測時の日時、天候、日中の気象

観測地	日時	天候	平均気温 $^{\circ}\text{C}$	平均水蒸気圧hPa	平均風速m/s	土壌含水率%
桐生	1990. 9.12.	晴れ	29.8	27.7	1.6	10
赤穂	1991. 9.11.	晴れ	25.7	20.1	1.4	3
波丘地	1992. 9. 3.	晴れ	32.6	27.8	0.8	20
砂地 (毛鳥素)	1991. 6.17.	晴れ	21.0	8.2	1.2	3
丘間低地 (毛鳥素)	1991. 6.22.	晴れ	26.2	10.7	0.8	27
筑波	1992. 8.14.	晴れ	30.1	27.9	2.6	30
琵琶湖	1992.10.13.	晴れのちくもり	20.3	17.4	2.6	
臭柏 (毛鳥素)	1991. 6.27.	晴れのち雨	26.7	10.3	1.7	
楊柴 (毛鳥素)	1991. 7. 4.	晴れ一時雨	26.0	14.5	1.0	
芦生	1991. 3. 6.	晴れ	8.3	7.3	0.8	

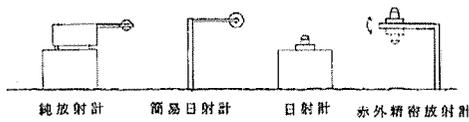


図3 純放射計の検定方法

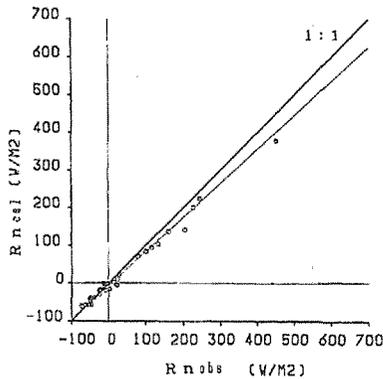


図4 計算純放射量と実測した純放射量の関係  
 $R_{ncal} = 0.9024 * R_{nobs} - 5.908$

に放射収支計の検定を行った。検定方法は図3に示すように、放射収支計（英弘精機製、CN-11）で純放射量を、日射計（英弘精機製MS-42）と検定済みの簡易日射計で入射および反射の日射量を、赤外精密放射計（英弘精機、MS-200）で大気からの長波放射量を、また1時間毎に測器を下に向け地表面からの長波放射量を測定した。この放射収支計は後日、工場出荷時の特性を保つ測器との検定を行い、初期の感度を持つことが確認された。赤外精密放射計は温度に依存して感度定数が変化するため、10%程度誤差が生じることが考えられる。しかしこの検定方法では同一測器で上、下向きの長波量の測定を行っているため、長波量の収支（ $L \downarrow - L \uparrow$ ）が $-200W/m^2$ としても、誤差は10%の $-20W/m^2$ であり、計算される純放射量に寄与する誤差量は小さい。測定された各放射収支項より(1)式により計算純放射量（ $R_{ncal}$ ）を算出し、実測した純放射量（ $R_{nobs}$ ）と比較した。その結果が図4である。これにより実測された純放射量は10%程度過大評価されていることわかる。以後の解析ではこの補正を行った結果を用いる。

4-2 日射およびアルベドの特性

図5には各地表面で測定された入射および反射の日射量、純放射量の日変化を示す。上段は桐生、赤穂、波丘地の森林で、中段は毛鳥素沙地の乾燥面である砂地、湿潤面である丘間低地、筑波（グラウンド）での裸地面で、下段は、毛鳥素沙地内の臭柏および楊柴の背丈の低い植生上で、そして芦生の積雪面上で測定された結果である。芦生の積雪面での観測時は太陽高度が低かったためか、やや日射量のピーク値が小さかったが、他の観測地では日中 $800 \sim 900W/m^2$ 程度の最高値をとり、天候は晴れであり、ほぼ同様な日射環境であったといえる。日射の反射量は桐生、波丘地の森林で小さく、砂地、積雪面でやや大きな値である。日中のアルベドの平均値の一覧を表3に示す。なお、赤穂、芦生では一部のデータを除いた。算出されたアルベドは森林で $0.08 \sim 0.22$ とたいへん小さく、裸地面で $0.11 \sim 0.29$ 、背丈の低い植生地で $0.16 \sim 0.23$ 、積雪面で $0.65$

表3 各地表面アルベド

観測地	アルベド
桐生	0.09
赤穂	0.22
波丘地	0.08
砂地（毛鳥素）	0.29
丘間低地（毛鳥素）	0.23
筑波	0.22
琵琶湖	0.11
臭柏（毛鳥素）	0.16
楊柴（毛鳥素）	0.23
芦生	0.65

と高い値を示した。桐生、波丘地の針葉樹林では $0.08$ 程度で従来の報告<sup>1)</sup>と同様であったが、赤穂の針広混交林では従来の報告よりもやや高い値であった。これは赤穂の森林が $2本/m^2$ と非常に高密度に植栽され、樹冠が閉鎖されて、樹冠内部に透過する日射量が小さいためと思われる。裸地面では土質によってもアルベドの特性が変化するとと思われるが、土壤水分の大きな琵琶湖、丘間低地では $0.1 \sim 0.2$ 、土壤水分の小さな筑波、砂地では $0.2 \sim 0.3$ とやや大きな値であり、土壤水分の減少に従い、アルベドの増加が示唆される結果である。

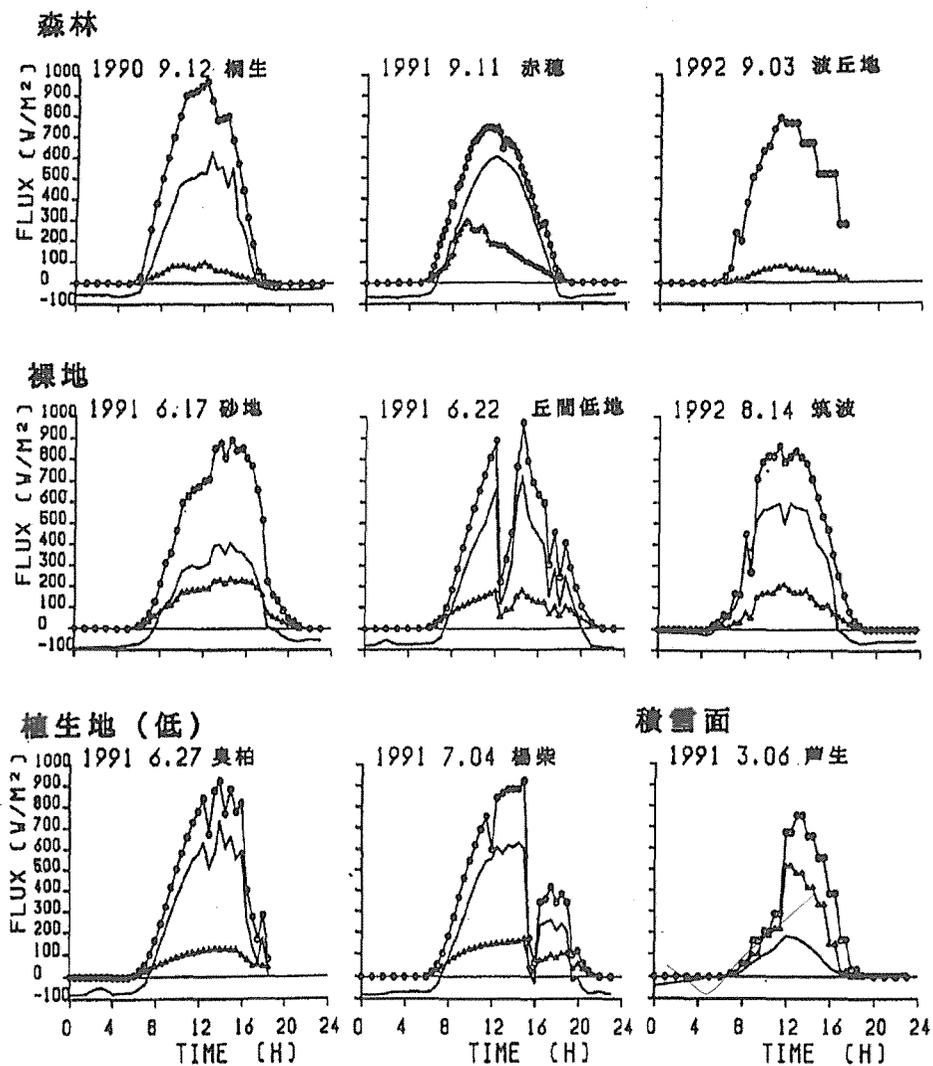


図5 日射量と純放射量の日変化

- 日射量
- △ 日射量(反射)
- 純放射量

#### 4-3 純放射量の特徴

日中の純放射量は日射の変動に追随して変動しているが、各地表面での特性は異なる。

純放射量の日射量に占める割合は日中、森林で約70～85%、裸地面では砂地で日中約45%と低

かったが、丘間低地、筑波のグラウンドや背丈の低い植生地では約60~70%、芦生の積雪面で約30%程度と小さな値となった。森林で大きな純放射量を示すのは、アルベドが小さいため短波放射の収支量が大きいこと、また表面温度がさほど大きくならなかったため、地表からの長波放射量が大きくなかったためと思われる。裸地面では森林に比べ、やや高いアルベドと日中の表面温度の上昇によって地表からの長波放射量が大きくなったために純放射量がやや小さくなったものと考えられる。乾燥した裸地面である砂地では表面温度が50度以上に上昇したため、長波放射の損失量が大きく、純放射量が小さくなったと思われる。また積雪面ではアルベドが大きかったため小さな純放射量になったものと思われる。

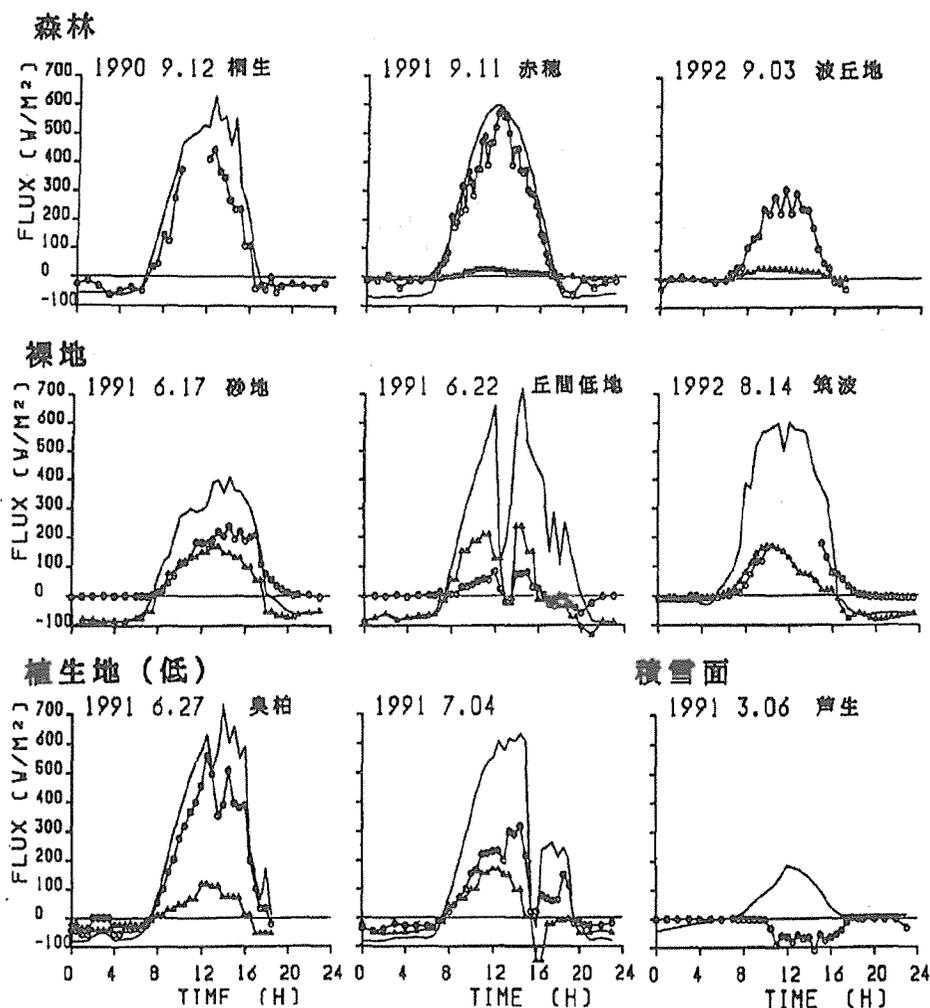


図6 顕熱フラックス、貯熱変化量、純放射量の日変化

- 純放射量
- 顕熱フラックス
- △ 貯熱変化量

## 4-4 顕熱フラックスの特性

乱流変動法により(3)式で算出した顕熱フラックスと地温プロファイルの変化より算出した貯熱変化量の結果を図6に示す。同図には純放射量もあわせて示した。顕熱フラックスは積雪面以外では日中プラスの値、積雪面では逆にマイナスの値、夜間はほぼゼロに近い値という日変化を示した。積雪面以外では日中、熱の輸送が地表から大気へ行われる結果が得られたが、積雪面では反対に大気より地表に向けて熱の輸送が行われた結果が得られた。森林や背丈の低い植生地で

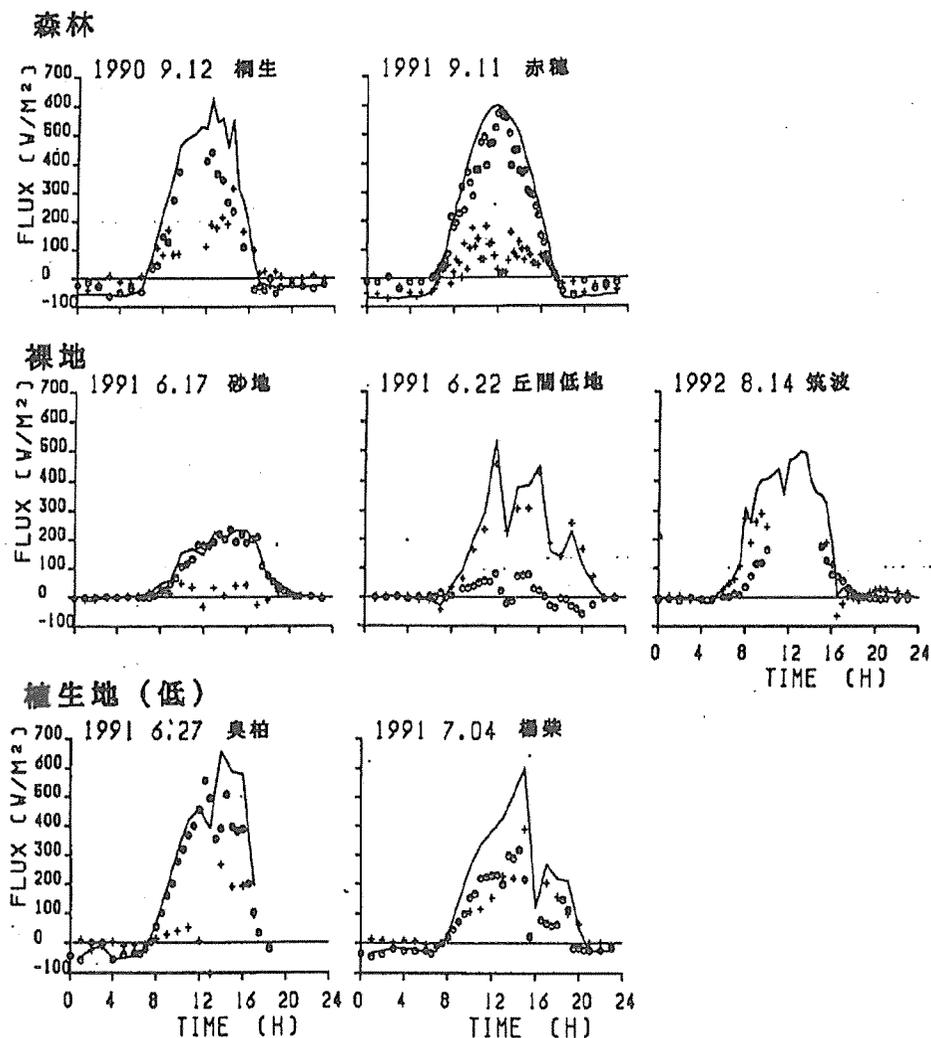


図7 有効放射量と顕熱、潜熱フラックスの日変化

- 有効放射量
- 顕熱フラックス
- + 潜熱フラックス

は日中500W/m<sup>2</sup>と大きな値であったが、裸地面では200W/m<sup>2</sup>以下と小さな値である。また積雪面では日中-100W/m<sup>2</sup>程度と小さな値であった。

#### 4-5 貯熱変化量の特徴

森林ではエネルギー交換が樹冠面で主として行われるため、地表に到達するエネルギーは小さく、貯熱変化量は±30W/m<sup>2</sup>以下と小さなものであった。なお桐生では地温の測定を行っていないため貯熱変化量の算出を行っていないが、赤穂、波丘地での結果にみられるように純放射量に比べたいへん小さいものであると考えられる。一方、裸地面ではエネルギー交換が地表面で行われるため、地中へ伝導される熱量は大きく、日中は200W/m<sup>2</sup>程度に、夜間は-100W/m<sup>2</sup>程度を示した。背丈の低い植生地では裸地面よりやや小さな値だが、森林と比べると大きな値である。地表面が植生に覆われているとはいえ、森林のように閉鎖されていないため地表に到達する短波放射量が多いことやエネルギー交換面が地表近くであるためこのような値となったと思われる。

森林では貯熱変化量はエネルギー収支上重要ではないが、裸地面では土壤水分の状態にかかわらずたいへん重要な項目である。背丈の低い植生地では裸地面ほどではないがエネルギー収支上重要な項目であった。

#### 4-6 潜熱フラックスの特徴

(2)式のエネルギー収支式においてP項は小さいものと仮定し、潜熱フラックス (LE) を残差項 (LE=Rn-H-G) として推定した。有効放射量 (Rn-G) と顕熱フラックスおよび潜熱フラックスを示したものが図7である。この図は有効放射量が顕熱と潜熱フラックスにどの様に配分されているかを示す。森林での観測時は土壤水分が小さかったため(表2)、有効放射量の多くが顕熱フラックスに変換され、潜熱フラックスは日中でも200W/m<sup>2</sup>程度と小さな値であった。裸地面では土壤水分状態で全く異なる結果となった。乾燥している砂地では有効放射量のほとんどが顕熱フラックスに変換されるが、土壤水分の豊富な丘間低地では有効放射量のほとんどが潜熱フラックスに変換された。背丈の低い植生地の臭柏では有効放射量のほとんどが顕熱に、楊柴では顕熱と顕熱フラックスにほぼ同等に配分された。この結果は土壤水分の相違および自生している臭柏と植栽された楊柴の気孔抵抗の違いによるものと考えられる。

#### 4-7 空気力学的抵抗の特徴

顕熱フラックスは、大気と地表面温度の差 (Ts-Ta) と顕熱に関する空気力学的抵抗 (rah) を用いて次式で表される。

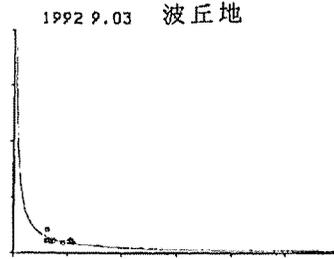
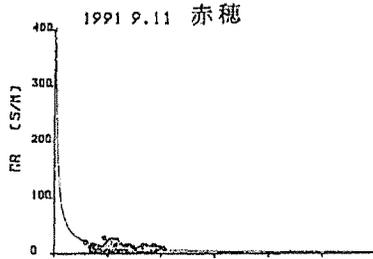
$$H = \rho C_p / r_{ah} \cdot (T_s - T_a) \quad (5)$$

一方大気の状態が中立である場合、運動量に関する空気力学的抵抗 (ram) は次式で表される。

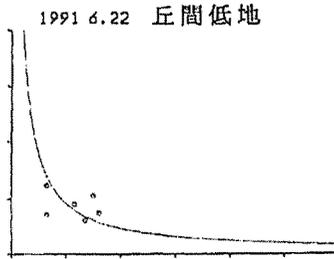
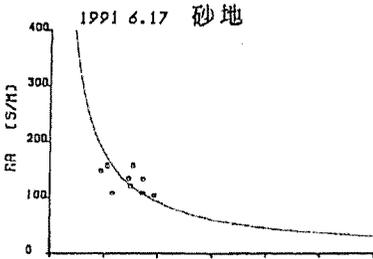
$$r_{am} = 1 / (\kappa^2 U) \cdot [\ln(z-d) / z_0]^2 \quad (6)$$

ここでκはカルマン定数、Uは風速、zは測定高度、dは地面修正量、z<sub>0</sub>は粗度である。地表面パラメータであるd、z<sub>0</sub>は風速依存性が指摘されているが<sup>2)</sup>、ここでは強風時の場合を考慮せず一定と考える。また多様な地被形態における空気力学的特性を比較、考察するため、顕熱と運動量に関する空気力学的抵抗は異なるが<sup>3)</sup>、近似的にrah=ramと仮定し、(5)式で得られる実測された顕熱フラックスと温度差より空気力学的抵抗 (ra) を算出した。風速とraの関係を示したものが図8である。なお同一地表面で数日間観測が行われたものについてはそれらのデータも使用した。ここでは測器の誤差を考慮し、顕熱フラックス、大気と表面の温度差、風速が小さなデータは除

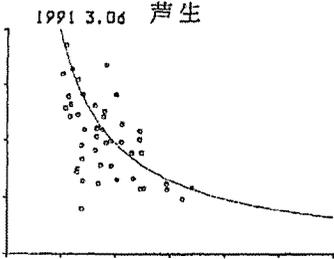
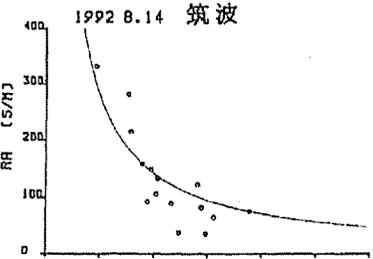
森林



裸地



積雪面



植生地 (低)

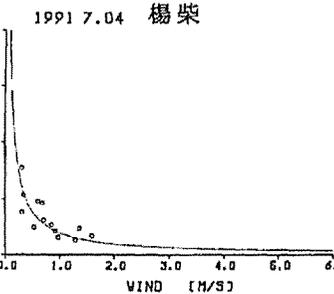
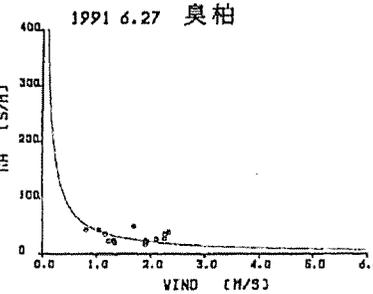


図8 風速と空気力学的抵抗の関係

いた。裸地面や積雪面ではばらつきが大きくなったが、他の地表面では風速が増加するにつれて $r_a$ が減少した。各地表面での風速が $1 \sim 2 \text{ s/m}$ 程度の空気力学的抵抗を比較すると、森林では $5 \sim 20 \text{ s/m}$ 、背丈の低い植生地では $20 \sim 50 \text{ s/m}$ 、裸地面では $50 \sim 200 \text{ s/m}$ 、積雪面では $100 \sim 400 \text{ s/m}$ であった。このように森林樹冠上では小さな $r_a$ のため、地表と大気との温度差が小さいにもかかわらず効率よく顕熱の輸送が行われるが、逆に裸地面では大きな $r_a$ のため、温度差が大きいかかわらず顕熱が小さくなると説明される。また背丈の低い植生地は両者の中間の傾向を示した。

$r_a$ は(6)式にみられるように測定高度に依存する。それゆえ測定高度によらない地表面パラメータである粗度の算出を行った。図8中の回帰式と次式で示される平均樹高( $h$ )と地面修正量( $d$ )の関係<sup>4)5)</sup>より、粗度の算出を行った。

$$d=0.63h \quad (\text{背丈の低い植生地}) \quad (7)$$

$$d=0.78h \quad (\text{森林}) \quad (8)$$

また容易にフラックスを求めることのできるバルク法におけるバルク係数を、ここでも近似的に顕熱と運動量に関するバルク係数( $Ch$ )が等しいものとして次式で算出した。

$$Ch = \kappa^2 / [\ln(z-d)/z_0]^2 \quad (9)$$

バルク係数は(9)式に示されるように、測定高度 $z$ の増加とともに減少する関数であるため、基準の測定高度での値を求めた。裸地面、積雪面、背丈の低い植生地では基準高度を地表より $1.2 \text{ m}$ 、森林では平均樹高が大きく異なるため、平均樹高上 $3.0 \text{ m}$ とした。これらの値の一覧を表4に示す。

表4 各地表面の粗度、バルク係数

観測地	基準高m	植生高m	粗度m	$z_0/h$	バルク係数
赤穂	6.0	3.0	0.34	0.114	0.0299
波丘地	13.0	10.0	0.61	0.061	0.0365
砂地 (毛鳥素)	1.2		0.0019		0.0040
丘間低地 (毛鳥素)	1.2	0.2	0.021	0.104	0.0108
筑波	1.2		0.0012		0.0035
琵琶湖	1.2		0.0027		0.0045
臭柏 (毛鳥素)	1.2	0.6	0.056	0.094	0.0233
楊柴 (毛鳥素)	1.2	0.8	0.076	0.096	0.0344
芦生	1.2		0.0004		0.0026

粗度は積雪面で $0.0001 \text{ m}$ 、裸地面で $0.001 \text{ m}$ 、背丈の低い植生地では $0.01 \text{ m}$ 、森林では $0.1 \text{ m}$ のオーダーであった。そして植生地での粗度と樹高の比( $z_0/h$ )は $0.1$ 程度であり、従来の報告<sup>5)</sup>と調和的であった。また基準高度でのバルク係数は積雪面、裸地面で $0.002 \sim 0.004$ 、背丈の低い植生地では $0.02 \sim 0.03$ 、森林では $0.03$ という値が得られた。

## 5 ま と め

地表面と大気の水、熱の交換過程解明のために森林、裸地、背丈の低い植生地、積雪面上にお

けるエネルギー収支および空気力学的抵抗の特性を考察した。各地表面の放射特性はアルベドと表面温度の相違に大きく起因していると考えられる。各地表面での純放射量は、日射条件が等しければ、アルベドの小さく表面温度が大きくない森林では大きく、アルベドの大きな積雪面では小さく、裸地面では土壤水分の影響を受け、土壤水分の少ない地表ではアルベドが大きくまた表面温度の上昇が大きく上昇するため小さく、土壤水分が多い地表ではアルベドが小さく表面温度が高くないためやや大きくなる。地中貯熱変化量は森林ではほぼゼロであり、裸地面で大きく、背丈の低い植生地では両者の中間の値を示した。有効放射量は森林では本観測時は土壤水分が少なかったため、多くが顕熱に、背丈の低い植生地での観測も土壤水分の少ない状態であったが、乾燥地に自生する植生では多くが顕熱に、植栽された植生上では顕熱と潜熱にほぼ等しく変換された。裸地面では土壤水分状態の影響を受け、乾燥した地表ではほとんどが顕熱に、湿潤な地表ではほとんどが潜熱フラックスに変換された。空気力学的抵抗より求められた粗度は森林で0.1 m, 背丈の低い植生地で0.01m, 裸地面で0.001m, 積雪面で0.0001mのオーダーの値が得られ、各地表面のバルク係数の算出を行うことができた。

## 謝 辞

本研究を進めるに当たり研究室内、学内、学外の多くの方々の協力を頂いた。赤穂の観測では関西電力赤穂発電所、関西環境センターの方々、波丘地では森林蒸散量共同観測の代表者、東京大学鈴木雅一助教授をはじめとするメンバーの方々、琵琶湖では琵琶湖プロジェクトの代表者、山梨大学砂田憲吾教授をはじめとするメンバーの方々、毛烏素では内蒙古林業科学院の姚先生をはじめとする中国側の方々、現地の観測では同行された新村義昭鳥根大学助教授、芦生では京都大学演習林の方々にお世話になった。また同研究室の大手信人助手、東京大学鈴木雅一助教授には多くのご助言を頂いた。これら全ての方々には心からの謝意を表します。

## 引 用 文 献

- 1) 柴田和雄・内嶋善兵衛 (1987) 太陽エネルギーの分布と測定. 191pp. 学会出版センター.
- 2) 原園芳信・林 陽生・那須野正明・鳥谷 均 (1989) 群落外の環境変化に対する赤松群落の動的応答. 2. 赤松群落の乱流輸送に関する空気力学的パラメータの特徴. 筑波大学水理実験センター報告. 13. 105~112
- 3) 竹内清秀・近藤純正 (1981) 地表に近い大気. 226pp. 東京大学出版会
- 4) 服部重昭 (1985) 蒸発散推定式の誘導過程の解説と林分への適用における問題点. 林誌研報. 332. 139~165
- 5) Monteith, J.L. (1973) Principles of environmental physics. 241pp. Edward Arnold Press, London. (佐伯敏郎監訳 (1975) 生物環境物理学. 222pp, 共立出版, 東京.)

## Résumé

In order to clarify the exchanging processes of heat and water vapor between atmosphere and various surfaces, meteorological observations using a sonic anemometer-thermometer were carried out on forests, short vegetative fields, bare soil surfaces and a snow surface. Latent heat flux at each place was calculated with the energy budget method using net radiation, sensible heat flux measured by the eddy correlation method and heat storage. The

characteristics of the energy budget varied with the surface structure and soil surface condition. Sensible heat flux were determined largely by the aerodynamic resistance ruled by the roughness length which are small on the forests, middle on short vegetative fields and large on the bare soil surfaces and the snow surface.