

第1章 地表面と大気のエネルギー輸送の基礎的研究

応用気象研究部 三上正男*

1 飽和草地面上のダルトン数とスタントン数

1.1 はじめに

近年、耕地の砂漠化の進行が世界的に重要な問題となりつつある。この問題に対する影響評価を行なうためには、植生を持った自然の地表面からの蒸発を正確に求めることが必要である。また、局地的ないし地球規模の気候変化を予測するために、地表面と大気間のエネルギー交換過程のパラメタ化を改良することにより、数値モデルの精度をさらに向上させることが求められている。

バルク法を用いたパラメタ化は、接地境界層内のある高さにおける気温、湿度、風速と、地表面における温度と湿度から運動量、顕熱、潜熱輸送量を評価出来るため、数値モデルに組み込むのに適している。このバルク法の計算精度を向上させるためには、様々な条件下における運動量、顕熱ならびに水蒸気のバルク輸送係数 C_M 、 C_H と C_E を正しくパラメタ化することが必要である。

粗度高 z_0 (z_0 は空気力学的粗度高または単に粗度と呼ばれる量で、ここでは粗度高と呼ぶことにする) が小さい平坦な地表面の場合、しばしば C_M 、 C_H と C_E は等しいと仮定される。しかし、山地や森林地帯あるいは都市域などの複雑な形状を持った地表面の場合、運動量輸送に対しては大きな粗度因子によって引き起こされる圧力効果 (form drag) のために、 C_M は C_H や C_E よりも大きな値を持つと考えられる。本研究の目的は、観測によって運動量のバルク係数 C_M と顕熱・潜熱輸送のバルク係数、 C_H ならびに C_E 、との違いを明らかにすることである。

顕熱と潜熱のバルク係数 C_H と C_E はスタントン数とダルトン数、 St と Da 、とに関係付けられる。これらの無次元輸送速度は、しばしば低層スタントン数、 $B_H (= St^{-1} = -T_*/(T_s - T_{0M}))$ 、と低層ダルトン数、 $B_E (= Da^{-1} = -a_*/(a_s - a_{0M}))$ 、の形で用いられる。ここで、 T_* と a_* は摩擦温度と摩擦絶対湿度で、添字 s と $0M$ は各々高さが地表面における値と風速に対する粗度高

*共同研究者：安田延壽（現東北大学）、戸矢時義（現気象庁総務部）、白崎航一（現和歌山地方気象台）、藤谷徳之助（応用気象研究部）

における値を示す。しかしながら、低層スタントン数 B_H と低層ダルトン数 B_E の値は、とりわけ植生を持った複雑地形上においては明らかではない。したがって、顕熱輸送と潜熱輸送に対するバルク係数、 C_H と C_E 、も依然あいまいさを残している。これは、 B_H と B_E が地表面の粗度因子の形状のみならず植生面の生物学的特徴にも依存するからである。

これまでにも $B_H = St^{-1} k_n \ln(z_{0M}/z_{0H})$ 、ただし z_{0M} は風速に対する粗度高また z_{0H} は温度に対する粗度高を示す、で定義される低層スタントン数の性質に関する理論的研究がいくつかなされてきた (Owen and Thomson, 1963)。Brutseart (1975 a, b) はスタントン数と、摩擦係数、粗度レイノルズ数、プラントル数の間の関係について理論的研究を行なった。また、単純化したキャノピーモデルをつかって、Kondo and Kawanaka (1986) は顕熱のバルク輸送係数が、運動量のそれよりも小さく、 C_H と B_H^{-1} が無次元キャノピー密度と深い関係があることを明らかにした。一方、現実の様々な植生面や地表面状態における観測的研究は余り行なわれてはいない。Garratt (1978) は粗度高が 40 cm の草原で運動量と顕熱輸送に対する粗度高を求め、低層スタントン数が 6.25 ± 1.25 であることを見いだした。Hicks *et al.* (1986) は草地上で、低層スタントン数として 6.88 を得た。Yasuda *et al.* (1986) は牧草とかん木に覆われた V 字型谷で、気温と風速の 3 次元分布の観測より低層スタントン数の値として 20 を得ている。Kondo and Yamazawa (1986) は雪面上の観測から Brutseart の理論式の係数を求めた。

一方植生面上での湿度の正確な観測が困難であるため、これまでダルトン数についての観測的研究はほとんど行なわれていない。このため、スタントン数に比べダルトン数については、余り詳しいことは分かっていない。Kondo (1975) は、海面上で潜熱のバルク輸送係数を求め、低層ダルトン数が以下の式で表わされることを明らかにした。

$$Da^{-1} = 0.47(u_* hp/\nu)^{0.45} \quad (1)$$

Chamberlain (1968) は、風洞実験の結果をもとに、粗度レイノルズ数が 20 から 1000 の領域でダルトン数が 5 から 20 の間の値を取るという結果を得ている。また Brutseart and Kustas (1985) は、ヨーロッパの山地での湿度の鉛直プロファイルデータを解析して、中立時に低層ダルトン数が 6.4 (地表面が湿っている場合) から 8.4 (地表面が乾いている場合) の間の値を取ることを見いだした。

植被面の表面が十分湿っている時、表面における絶対湿度 a_s は表面温度に対する飽和絶対温度 $a(T_s)$ に等しく、 $a = a(T_s)$ 、植被面の表面は飽和植被面と見做すことができる。この場合、低層ダルトン数は植被面の表面温度から簡単に求めることが出来る。本研究の目的は、こうした十分湿った植被面を持つ飽和植被面上におけるダルトン数とスタントン数を決定することである。このため、我々は平坦な麦畑上で野外観測を行なった。全部で 14 個の 30 分平均の鉛直プロファイルが得られ、これよりスタントン数とダルトン数が求められた。

1.2 理論的基礎

地表面からの運動量，顕熱，潜熱のフラックスを評価する方法として，バルク法がよく用いられる。バルク法は，接地境界層内の基準高度一点と地表面の風速，気温，絶対湿度から各フラックスを求める方法で，以下の式で表される。

$$\tau/\rho = C_M u^2 \quad (2)$$

$$H/c_p \rho = C_H u (T_s - T) \quad (3)$$

$$E = C_E u (a_s - a) \quad (4)$$

ここで， C_M ， C_H ， C_E は各々運動量，顕熱，潜熱に対するバルク係数で，以下の式で表される。

$$C_M = u_*^2 / u^2 = (\Phi_M / k_M)^{-2} \quad (5)$$

$$C_E = C_M^{-1/2} (k_M C_M^{-1/2} / k_E + Da^{-1}) \quad (6)$$

$$C_H = C_M^{-1/2} (k_M C_M^{-1/2} / k_H + St^{-1}) \quad (7)$$

ここで， k_M ， k_H ， k_E はそれぞれ運動量，顕熱，潜熱に対するカルマン定数を示す。また Da^{-1} と St^{-1} は，低層ダルトン数と低層スタントン数で，中立成層下では以下の式で表わされる。

$$Da^{-1} = -(a_s - a_{0M}) / a_* = k_E^{-1} \ln(z_{0M} / z_{0E}) \quad (8-1)$$

$$St^{-1} = -(T_s - T_{0M}) / T_* = k_H^{-1} \ln(z_{0M} / z_{0H}) \quad (8-2)$$

(8)式中の添字 $0E$ と $0H$ は，各々絶対湿度の粗度高と温度の粗度高における値を示す。図1-1は， $k_E = k_M = 0.4$ と仮定した場合の運動量と潜熱輸送のバルク係数の比を示したもので，横軸に粗度高，縦軸にはバルク係数の比， C_E / C_M ，を取ってある。この図によれば，低層ダルトン数が小さな値の場合は，潜熱輸送のバルク係数は運動量のそれにほぼ等しいとしても差しつかえないが，低層ダルトン数が大きくなるに従って，その比は1よりも小さくなる。従って，バルク法を現実の地表面状態に対し適用し，潜熱・顕熱フラックスの評価を行なう場合，運動量のバルク係数と同時に，ダルトン数ならびにスタントン数も適当な値に決める必要がある。

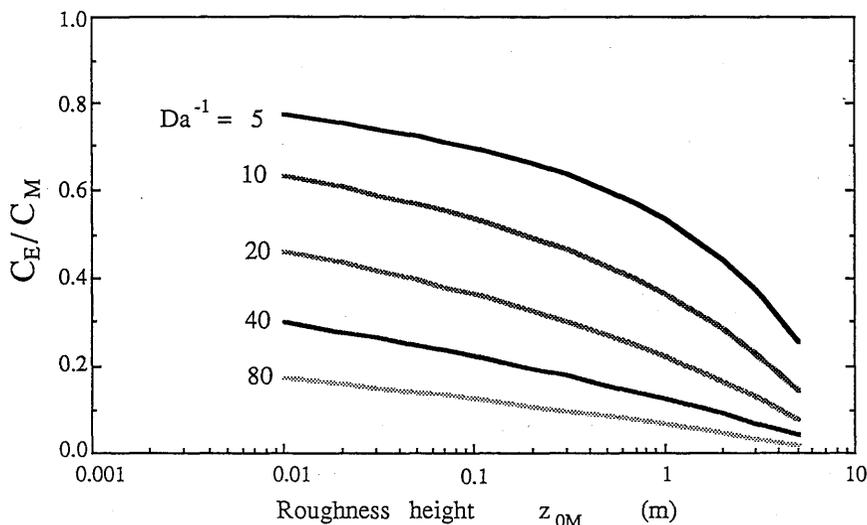


図1-1 潜熱輸送と運動量輸送のバルク係数の比, C_E/C_M (基準高度 $z=10m$ の場合), と低層ダルトン数ならびに風速に対する粗度高 Z_{0M} との関係。

1.3 観測

1.3.1 八郎瀉

八郎瀉は、干拓以前は日本で2番目に大きい219.2平方キロの面積を持つ湖であった。干拓は1957年に開拓され、1964年に終了して現在の姿になった。湖の面積の3/4は、高低差が最大3mの平坦な干拓地となり、その内約90%は水田と麦畑である。今回の観測地点は、干拓地内西部に位置する秋田県立農業短期大学の実験圃場である。観測地点の見取り図を図1-2に示す。実験圃場の植生は、主に秋植え大麦畑からなり、周囲には草地や小麦畑がある。植生(キャノピー)の高さは、およそ11cmで、観測地点西方にある果樹園と野菜畑の高さは各々2.5mと1.5mであった。

観測は、1985年の12月4日から5日にかけて行われた。この時期の秋植え大麦は成長期にあり、また12月2日に降雪が記録されたが、冠雪とはならず観測期間中の4日から5日にかけては地表は十分に湿った状態にあった。この期間の主風向が西北西であることを考慮に入れて、観測機器類はフェッチが十分に確保されるように、大麦畑の東北端に設置した。なお、この期間の日平均風向風速は、西風3.6m/sで、日平均気温は2.9°Cであった。

1.3.2 観測システム

観測は、平均量の鉛直プロファイル、乱流変動量、地表面の土壌水分量並びに正味放射量の各項目について行なった。観測システムのブロック図を図1-3に示す。

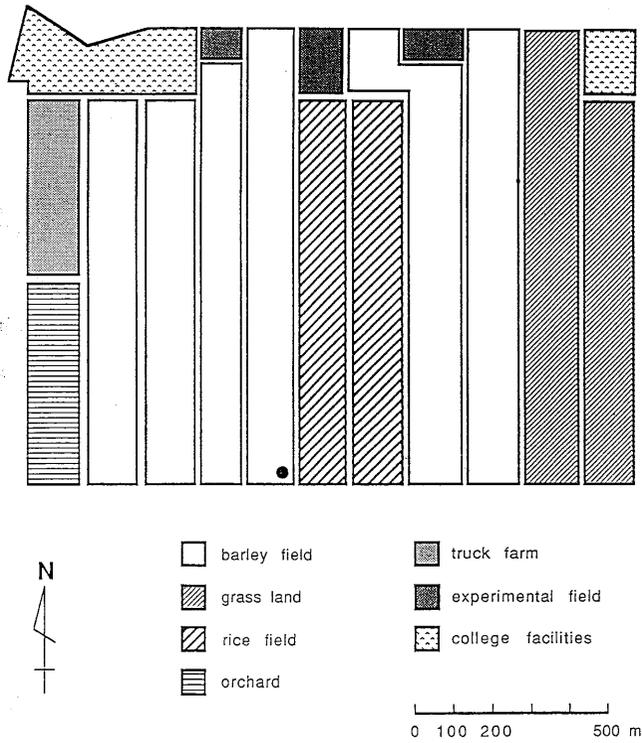


図1-2 観測地点(秋田県立農業短期大学実験圃場)見取り図。図中黒点は、観測塔の設置場所を示す。

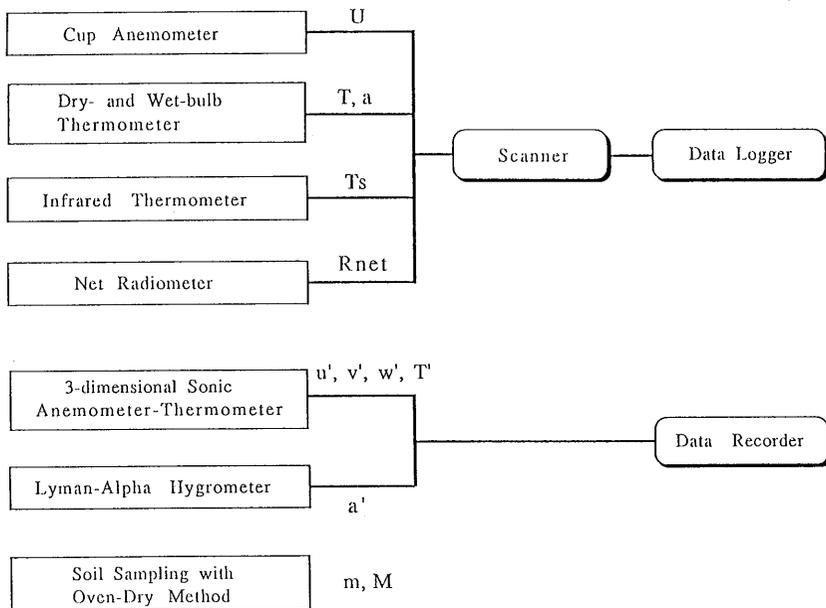


図1-3 観測システムの構成とデータの流れ図。

接地境界層の平均量の鉛直プロファイル観測のために、2 m の可搬型の観測塔を製作した。この観測塔には、地表面より 19, 30, 50, 92, 196 cm の高さに 3 杯式微風速計(牧野応用測器 AF750)が、また 22, 45, 84, 186 cm の高さに白金抵抗測温体を用いた通風乾湿計がそれぞれ取付けられている。放射温度計(松下通信 ER-2007)を用いて地表面温度の測定もあわせて行なった。また、観測塔の通風乾湿計の検定のために、アスマン式通風乾湿計による比較観測も行なった。

渦相関法による運動量、潜熱、顕熱の乱流フラックス輸送量の直接測定のために、3次元超音波風速温度計(海上電気 DAT-310)とライマンアルファ湿度計(ERC Model BLR)による測定を実施した。測定は、これら2つの測器を、地上から1.5 mの高さの三脚に固定して行なった(図1-4)。

地表面付近の土壌水分量の測定は、乾熱法による直接測定によった。測定は、12月5日の10時40分、13時30分、14時10分の3回実施し、それぞれ観測塔の周囲3ヶ所で深さ2 cmにおける土壌を採取した。

正味放射放射量の測定には、フンク式正味放射計(英弘精機 CN-11)を使用した。正味放射計は観測塔から約2 m離れた地上約1 mの所に設置した。

各測定器からの信号は、10秒毎にサンプリングされ、その50回平均値を10分毎に求め、平均値をテープに記録した。その結果、観測を実施した12月5日の7時30分から14時30分にかけて30分平均データで14個のランが得られた。一方乱流変動量については、超音波風速温度計とライマンアルファ湿度計のアナログ出力信号を磁気テープに記録し、解析にはアナログ信号を10 Hzでデジタル化したものを用いた。

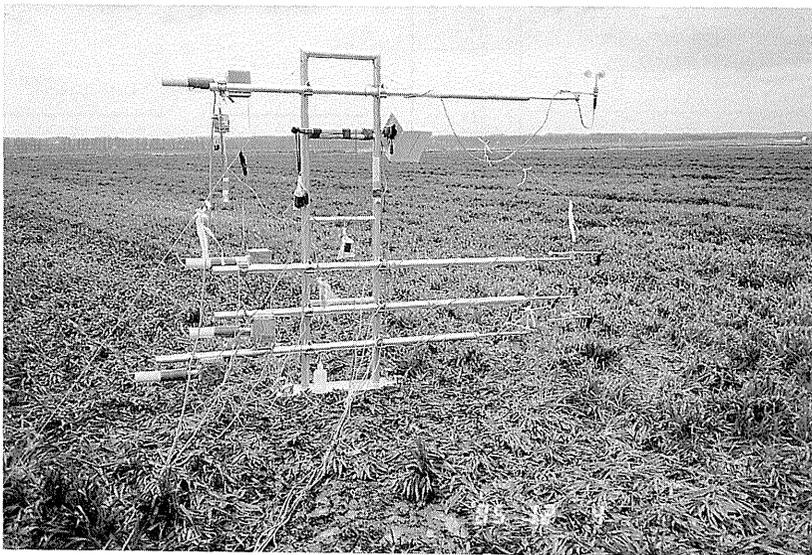


図1-4 観測システムの全体写真。フェッチの反対側より望む。

1.4 結果

1.4.1 平均プロファイル

風速・気温・湿度の鉛直プロファイルから粗度高を求めるためには、プロファイルは十分な鉛直傾度を持っていることが望ましい。このため、ダルトン数については、高さ 10 m と 0.1 m の間の絶対湿度の傾度が 0.4 g/cm^3 以上の 6 ランについて、スタントン数については同じく気温の傾度が 0.35°C 以上の 4 ランについて解析を行なった。風速の粗度高については、14 すべてのランのプロファイルを解析に用いた。

図 1-5 に風速、気温と絶対湿度の鉛直プロファイルを示す。絶対湿度は、高さ 45 cm のデータに系統的な誤差が認められたため、解析から除外した。風速の鉛直プロファイルから、この時の接地気層の成層状態が中立に近い対数分布にそったものであることがわかる。このことをさらに詳しく調べるために、高さ 1 m におけるリチャードソン数を計算した。得られた結果を、横軸にランの数、縦軸にリチャードソン数をとってプロットしたのが図 1-6 である。これによれば、観測時間を通じて接地気層の成層は中立と見做してよいことがわかる。

1.4.2 風速に対する粗度高

キャノピー層を持った植被面上での風速分布を考える場合、通常は風速のラフネスパラメータとして粗度高のほかに、ゼロ面変位 d_0 を考慮に入れる。中立成層下では風速の高度分布に関する方程式は、以下のように表現される。

$$u(z) = \frac{u_*}{k_M} \ln\left(\frac{z-d_0}{z_{0M}}\right) \quad (9)$$

今回、ゼロ面変位について評価するために、地表面に近い方から 3 高度の風速データを用いて、(9)式を変形した次の式より d_0 を求めた。

$$(u_1 - u_2) \ln\left(\frac{z_3 - d_0}{z_1 - d_0}\right) = (u_3 - u_1) \ln\left(\frac{z_2 - d_0}{z_1 - d_0}\right) \quad (10)$$

ここで、添字 1~3 は、地表面からの測定番号を示す。これから得られた d_0 はすべてのランで 0 であったので、ここではゼロ面変位は 0 とし、(9)式からカルマン定数 $k=0.4$ として最小自乗法により摩擦速度と風速に対する粗度高 z_{0M} を求めた (表 1-1)。得られた風速に対する粗度高は、14 ランの平均で $4.2 \pm 0.2 \text{ cm}$ であった。また、求められた u_* を使って、運動量に対するバルク係数 C_M は、基準高度を 10 m とした場合、 5.36×10^{-3} という結果を得た。

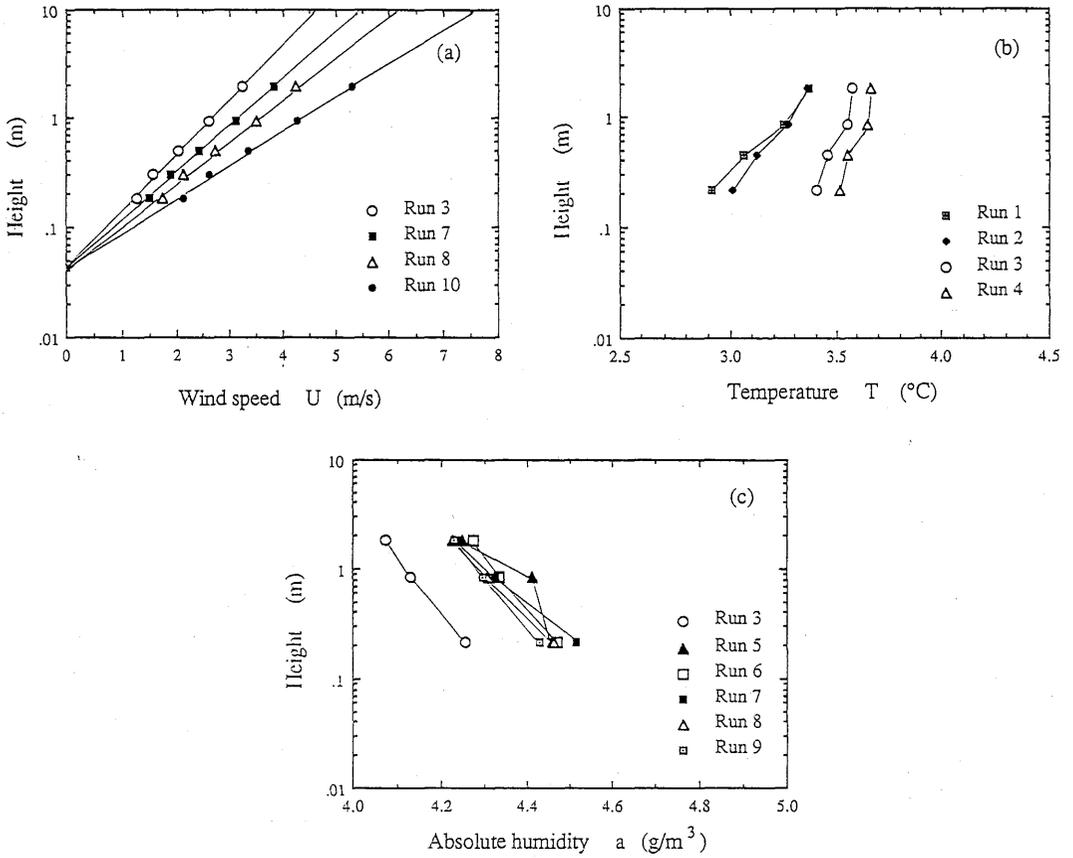


図1-5 秋田県八郎潟大麦畑上における(a)風速、(b)気温ならびに(c)絶対湿度のプロファイル。風速プロファイル図上の実線は、最小自乗法により得られたプロファイルを示す。

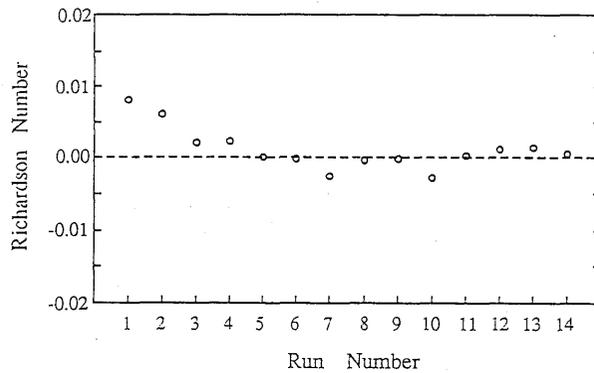


図1-6 観測時間中の高度10mにおけるリチャードソン数の変化

表1-1 八郎瀉大麦畑上における風速プロファイルに対する粗度高と摩擦速度 (1985年12月5日)。ただし、ゼロ面変位は0cmとした。

RUN	Local Time	u_* (m/s)	z_{0M} (m)
1	0730-0800	0.41	0.043
2	0800-0830	0.42	0.044
3	0830-0900	0.34	0.044
4	0900-0930	0.37	0.043
5	0930-1000	0.37	0.045
6	1000-1030	0.36	0.043
7	1030-1100	0.40	0.042
8	1100-1130	0.44	0.040
9	1130-1200	0.54	0.042
10	1200-1230	0.55	0.042
11	1230-1300	0.52	0.040
12	1300-1330	0.49	0.038
13	1330-1400	0.54	0.043
14	1400-1430	0.46	0.044

平均 0.042±0.002

1.4.3 温度と湿度プロファイルに対する粗度高

風速と異なり気温と絶対湿度の鉛直プロファイルは地表面の値からの差によって定義されるため、地表の温度と湿度の定義によって、温度と絶対湿度プロファイルに対する粗度高は大きく異なることが考えられる。本研究では、大麦畑の表面温度は、大麦のキャノピー層の葉面からの放射温度に等しいと仮定することにした。一方、地表面湿度については、地表面付近の土壌水分量や地表面の植生と密接に関係していると考えられるので、一般に定義は困難である。ここでは以下のように考えることにした。

北日本の初冬期は、地表面は湿っており、飽和していると思われてよい場合が多い。気候値によれば、八郎瀉の初冬期の月平均降水量は約170mmである。今回観測地点で乾熱法により得られた含水比 M は観測時間を通じて0.74から1.10の範囲内であった(Appendix表A.1-5)。日本のロームの代表値として固相比を0.25、比重を2.65と仮定すると、体積含水率 w は0.49から0.73となる。Yasuda and Toya (1981) ならびに Toya and Yasuda (1988) によれば、地表面付近の体積含水率が0.36以上ならば、地表面は飽和していると考えてよい。以上の理由により、今回観測を行なった大麦畑の土壌は飽和していると思われた。そこで、今回我々は地表面放射温度に対する飽和絶対湿度を地表面絶対湿度と定義することにした。

解析によって得られた温度に対する粗度高 z_{0H} と湿度に対する粗度高 z_{0E} の結果を表1-2を示す。全体に、 z_{0H} と z_{0E} は風速に対する粗度高 z_{0M} と比較して小さい値をとる。表1-2には

表1-2 八郎潟で求められた粗度パラメーター。ただし、運動量に対する粗度高は4.2cmとした。表中の St^{-1} と Da^{-1} は、プロファイル観測より得られた低層スタントン数と低層ダルトン数を示す。また、 Da^{-1*} は(11)式より求められた低層ダルトン数を示す。

RUN	Local Time	z_{off} (m)	z_{on} (m)	St^{-1}	Da^{-1}	Da^{-1*}	C_H	C_E
1	0730-0800	3.39E-04		12.1			2.85E-03	
2	0800-0830	7.67E-04		10.0			3.09E-03	
3	0830-0900	3.56E-04	3.58E-09	12.0	40.7		2.86E-03	1.35E-03
4	0900-0930	1.42E-04		14.2			2.62E-03	
5	0930-1000		3.45E-07		29.3			1.70E-03
6	1000-1030		6.02E-09		39.4			1.38E-03
7	1030-1100		8.84E-08		32.7	38.4		1.58E-03
8	1100-1130		6.00E-09		39.4	50.2		1.38E-03
9	1130-1200		2.18E-10		47.7	55.1		1.19E-03

顕熱と潜熱に対するカルマン定数を共に0.4として、(8)式より求めたスタントン数とダルトン数の計算値も合わせて載せてある。この結果より得られる顕熱と潜熱のバルク係数 C_H と C_E は、平均値で 2.85×10^{-3} と 1.43×10^{-3} となった。また、運動量に対するバルク係数との比、 C_H/C_M と C_E/C_M はそれぞれ0.53と0.23であった。

ダルトン数については、以下に示す方法による評価も試みた。地表面絶対湿度 $a_s = a_*(Ts)$ と仮定した場合、低層ダルトン数 Da^{-1} は次の式で表すことができる。

$$Da^{-1} = \frac{(a_s - a_{0M})u_*}{a'w'} = \frac{(a_*(Ts) - a_{0M})u_*}{a'w'} \quad (11)$$

ここで、 a' 、 w' は各々絶対湿度と鉛直方向の風速の乱流変動成分を示す。したがって、平均量のプロファイル観測より得られた摩擦速度並びに絶対湿度分布と、直接測定によって得られる湿度と鉛直速度の乱流変動量の共分散($\overline{a'w'}$)の比を求めることにより低層ダルトン数を求めることができる。しかしながら、この場合考慮しなければならないのは、風速と湿度の測器感部が空間的に離れているため、乱流変動法で求めたフラックス量は実際の量よりも過小評価されるという点である。

Chahumeau *et al.* (1989) は、二酸化炭素と水蒸気について、センサーが空間的に離れていることによる乱流フラックスの過小評価について調べた。彼らは、トウモロコシ畑において地上4mに設置した超音波風測温度計により運動量のフラックスを求めたところ、水平成分と鉛直成分の

風速センサー間の距離が 40 cm で測定した場合、実際よりもフラックスを 7% 過小評価したことを確かめた。地上 2 m でセンサー間の距離が 30 cm の場合の過小評価は 12% であった。Koprov and Sokolov (1973) は風速の鉛直成分と気温のセンサー間の距離とキャノピーからの測定高度を考慮して、中立に近い条件における経験的な関係式を導いた。今回の観測の場合、超音波風速温度計とライマンアルファ湿度計のセンサー間の距離は 40 cm で、センサーの地上からの高さは 1.5 m であった。Koprov and Sokolov の風速の鉛直成分と気温のセンサー間の関係が、風速の鉛直成分と絶対湿度との間にも成立すると仮定すると、今回求められた乱流フラックス量は約 20% ほど過小評価していると考えられる。

以上のことを考慮にいて、ラン 7, 8, 9 について(11)式より低層ダルトン数が求められた(表 1-2)。得られた値は、プロファイル観測から求められた結果とほぼ同じ大きさを示した。

フラックスの直接測定は、ラン 7 から 13 にかけての時間帯に行なわれたが、この期間中顕熱フラックスは 0 に近い値を示し、また温度の鉛直傾度も $T_{10m} - T_{0.1m} < 0.35K$ と非常に小さかったために、気温の乱流変動量から低層スタントン数を求めることは出来なかった。従って、低層スタントン数については、ラン 1 から 4 にかけての気温のプロファイル観測より求めた結果だけを表 1-2 中に示す。

1.5 議論

Brutsaert (1975) は、低層ダルトン数(スタントン数)と粗度レイノルズ数 z_{0+} との間に以下のような半理論式が成り立つことを示した。

$$Da^{-1} = 7.3z_{0+}^{1/4} Sc^{1/2} - 5 \quad (12)$$

$$St^{-1} = 7.3z_{0+}^{1/4} Pr^{1/2} - 5 \quad (13)$$

ここで、 Sc はシュミット数、 Pr はプラントル数で、 z_{0+} は粗度レイノルズ数 (roughness Reynolds number) と呼ばれる無次元量で $z_{0+} = u_* z_0 / \nu$ (ν は空気の動粘性係数) で定義される量である。(12)式と(13)式は、粗度レイノルズ数が 1000 以下の観測データから求められた式で、Brutsaert は植生をもった粗度の比較的大きい地表面では低層ダルトン数、スタントン数共に粗度レイノルズ数の変化に敏感ではないことを指摘している。

図 1-7 は、今回の観測により得られた低層ダルトン数(スタントン数)と粗度レイノルズ数の関係である。図中縦軸は低層ダルトン数(スタントン数)、横軸は粗度レイノルズ数を示し、実線はBrutseartの半理論式(12)をプロットしたものである。また図中に、Chamberlain (1968) の室内実験における結果も書き加えてある。今回の観測結果によれば、粗度レイノルズ数の大きい植被面上では低層ダルトン数と低層スタントン数は一致しておらず低層ダルトン数の方が大き

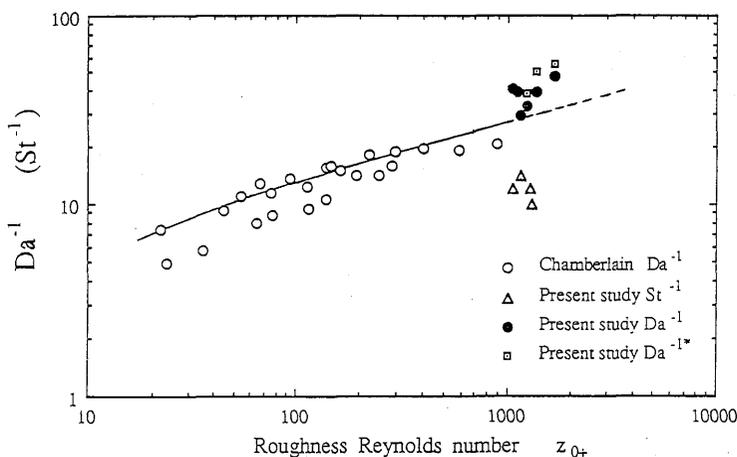


図1-7 粗度レイノルズ数と低層ダルトン数，低層スタントン数との関係。図中の実線と点線は，Brutsaert (1975) の半理論式 (本文中の(12)式) を示す。また，図中には Chamberlain (1968) による実験室における結果もあわせて示す。

い結果を与える。

また本研究で得られた低層スタントン数 (4 ランの単純平均で 12.1) は，これまで得られている数少ない過去の観測例 (6 から 20, ただし麦畑上での観測例は無い) と大きく異なっていないが，(13)式から予想される値よりも小さな値を示している。今回求められた低層スタントン数は，いずれも成層が中立に近く，温度の鉛直傾度が非常に小さい ($\leq 0.25^\circ\text{C}/\text{m}$) 場合の事例であったため，精度は十分でなかったことも考えられる。従って，今回の結果だけでははっきりしたことはわからない。

一方，低層ダルトン数については，プロフィールと乱流変動量いずれの方法によって求めた結果も，Chamberlain の実験室における結果とは矛盾していない。しかし半理論式と比較すると，(12)式から予想される値よりもやや大きめの結果を示している (図1-7)。これは，植被面の表面 (葉面) が飽和していると仮定していることによるものと考えられる。我々は，キャノピー層表面の絶対温度 a_s が $a_s = a_*(T_s)$ と見做せると仮定したが，地表面が飽和していてもキャノピーの表面が必ずしも飽和しているとは限らない。従って，キャノピー層の表面における絶対湿度量は， $a_*(T_s)$ よりも少し小さな値を取っていたことも考えられる。このことは，実際のダルトン数が，今回我々が評価した有効ダルトン数 (apparent Dalton number) よりも少し小さい値を取ることを意味する。

今回のように，植被面上での潜熱のバルク係数を考える場合，Barton (1979) によって定義された地表面湿潤度 (surface moisture availability, $\sigma; \sigma = a_s/a(T_s)$) と同様の概念を用いたパラ

メタ化が必要と考えられるが、植被面において地表面湿潤度に相当する量を決定するのは困難である。従って、本研究で用いた有効ダルトン数は、植被面上から蒸発散の簡単なパラメタ化のためにはより実用的であると考えられる。

2 緩やかな傾斜を持った複雑地形上の粗度パラメーターについて

2.1 はじめに

運動量輸送に対する粗度高 z_0 とゼロ面変位 d_0 は、地表面の運動量のフラックスや、顕熱・潜熱フラックスをバルク法を用いて求める場合のもっとも重要なパラメーターであり、フラックスを正確に評価するためには、粗度高 z_0 とゼロ面変位 d_0 を正しく決定する必要がある。

粗高度とゼロ面変位は、接地境界層における風速の鉛直プロファイルから決定する事が出来る。しかし、数値モデルにおいては、これらの粗度パラメーターは外部パラメーターとして与える必要があるため、粗度パラメーターは、風速のプロファイル観測によらずに地表面の特徴を表現する量で簡単にパラメタ化できなければならない。

粗度高とゼロ面変位のパラメタ化については、これまで実験室と野外の双方で、様々な地表面状態について試みられてきた。また、粗度パラメーターと現実の地表面を特徴付ける因子との関係についても、これまで滑らかな地表面や平坦な都市域を対象として数多くの研究が行われてきている。さらに複雑地形上についても、粗度パラメーターを決定することを目的として、観測塔や気球を用いた野外観測が行われてきた。

しかし、観測塔を用いた風速の鉛直プロファイルの観測は、粗度要素 (roughness element) の高さが高い場合には難しくなる。また接地境界層の厚さは、粗度要素の高さのみならず摩擦速度によって左右されると考えられるため (Kinoshita and Niino, 1990)、摩擦速度が大きくない場合には、複雑地形上の接地境界層の厚さは薄くなる。このため、こうした場合、風速の鉛直分布から粗度パラメーターを決定するのは困難である。また、逆に摩擦速度が大きい場合には地上風速が大きくなるため繫留気球を用いたプロファイル観測は困難になる。以上のような理由から、複雑地形上での野外観測はこれまで満足のゆく形では行なわれてこなかった。しかも、複雑地形上における観測では、粗度高とゼロ面変位に関する何らかの仮定を設けずに、それぞれが独立に求められたことはなく、複雑地形上での粗度パラメーターと地形因子との関係は未だ明かではない。

そこで、我々は埼玉県内の武蔵丘陵森林公園において野外観測を実施し、森林丘陵地帯上の粗度パラメーターと地形因子との関係を調べた。

2.2 観測方法

2.2.1 観測地点

武蔵丘陵は、関東平野の北部に位置し、東西 15 km、南北 30 km にわたって広がるなだらかな丘陵地帯である。観測地点の西方には平均標高が 200 m 程度の低山地帯があり、東は関東平野に続いている。観測点付近は、傾斜が 1.4/1000 の緩やかな斜面になっていて、起伏の鞍部と鞍部の距離はおおよそ 1 km のオーダーである。武蔵丘陵森林公園は、この丘陵地帯の中央部に位置し、約 300 ha (東西 1 km、南北 3 km) の面積を占めている。

観測地点として森林公園の中央部にある芝生で覆われた広場を選び、観測地点を中心として東西 10 km 南北 10 km の領域を地形因子の解析領域(領域 0)として設定した。観測は、1986 年 10 月 21 日から 25 日にかけて実施した。解析領域のおよそ 60%は落葉樹林と針葉樹林、20%は稲作地、10%は草地で残りは人工の建造物(道路や建物)から成っている。森林の平均樹高は約 12 m で、領域 0 の最高と最低標高は各々 91 m と 11 m、平均標高は 44.1 m である。

2.2.2 観測

次の 4 種類の観測を武蔵丘陵森林公園で実施した。①境界層下部の風速、気温と湿度のプロファイル観測、②キャノピー層表面の放射温度、③地表面付近の土壤水分量ならびに④キャノピー層内の気温と湿度のプロファイル観測。

境界層下部の風速、気温と湿度のプロファイル観測のために、繫留気球観測とパイバル観測を芝生で覆われた標高 60 m の地点で実施した(図 1-8)。観測地点は、広さ約 4 ha の運動広場で、周囲を高さ約 20 m の丘によって囲まれている。繫留気球観測は、10 月 21 日の 13 時 30 分から 16 時 00 分にかけて 5 回、10 月 24 日の 10 時 25 分から 16 時 00 分にかけて 6 回実施した。風速、風向、気温湿度のプロファイル測定のために、地上から 1 m、10 m、15 m、20 m、30 m、50 m、100 m、200 m の 8 高度で、それぞれ 2 分間ずつ繫留気球を静止して、4 秒毎に得られるデータを約 30 回収録し、各高度毎に平均を求めた。そして、上昇時・下降時の各高度での値の単純平均値を求めて平均鉛直プロファイルとした。その結果、10 月 21 日に 5 ラン、24 日に 11 ランの鉛直プロファイルデータを得た。

10 月 23 日は、地上風速が 8 m/s を越えたために繫留気球観測が出来なかったため、パイバル観測を 15 時 30 分から 16 時 20 分にかけて 10 分毎に実施した。パイバル観測時の風速と風向は、地上の 2 点より経緯儀で計った高度角と方位角から計算で求めた。その結果、風速の鉛直プロファイルが 6 ラン得られた。パイバル観測による個々の風速の値は、境界層内の乱渦によって大きく影響を受けるため、これらのデータから粗高度とゼロ面変位を正確に求めるのは難しい。このため、パイバル観測のデータは、繫留気球の解析から得られた粗度高とゼロ面変位のパラメタ化を検証する事に用いることにした。

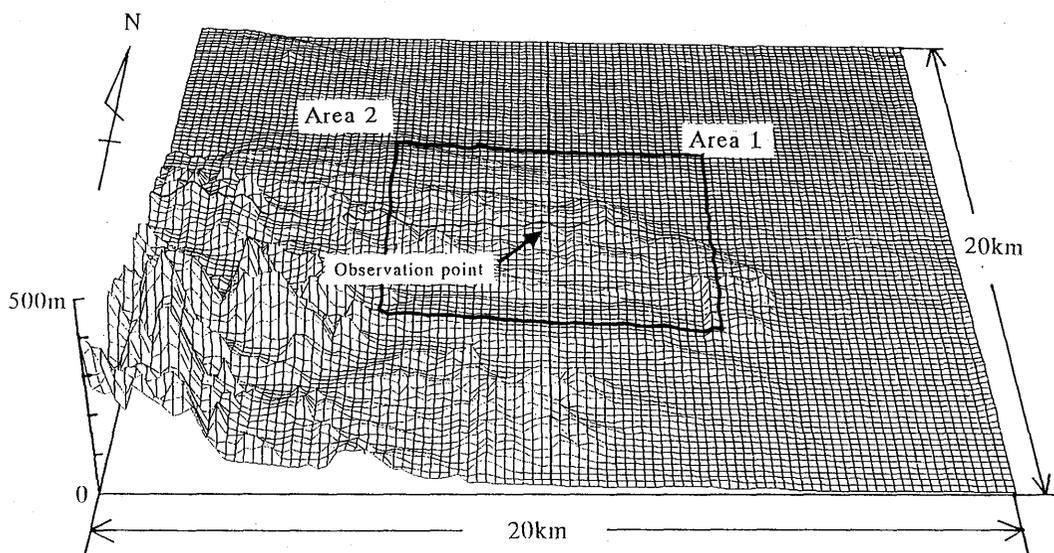


図1-8 建設省国土地理院の標高データによる武蔵丘陵森林公園周辺(20km×20km)の地形図。観測点は、図の中心に位置し、地形因子解析の領域0は、観測点より東西に各5km、南北に各5kmの領域(図中、黒枠で示した領域)を示す。

2.3 これまでの研究のレビュー

一般に、地表面付近の高さ z における風速 $u(z)$ は次のように表現される。

$$u(z) = \frac{u_*}{k_M} \int_{\zeta_0}^{\zeta} \frac{\phi_M}{\zeta} d\zeta \quad (14)$$

ここで、 u_* は $u_* = (\tau/\rho)^{1/2}$ によって定義される摩擦速度、 k_M は運動量に対するカルマン定数(=0.4)、 ζ は、接地境界層の無次元高さ、 ζ_0 は粗度高に対する無次元関数、そして ϕ_M は接地境界層の無次元風速シア関数を表わし、各々以下の式で定義される。

$$\zeta = \frac{z - d_0}{L}, \quad \zeta_0 = \frac{z_{0M}}{L} \quad (15)$$

$$\phi_M \equiv \frac{kz}{u_*} \frac{du(z)}{dz} \quad (16)$$

ここで、 L はモーニン-オブコフ長である。

中立成層下では、(14)式はより簡単になり、いわゆる風速の対数分布則を与える。

$$u(z) = \frac{u_*}{k_M} \ln \left(\frac{z - d_0}{z_{0M}} \right) \quad (17)$$

ここで、 z_{0M} は運動量輸送に対する粗度高、 d_0 はゼロ面変位である。粗度高 z_{0M} は地表面の凸凹の程度を表す量で、草地上で 5 mm から 10 cm、平坦な森林で 50 cm から 1 m 程度とされている。一方、ゼロ面変位は、風速の鉛直分布の基準高度を補正するための量で、粗度高の大きさのみならず粗度要素の形や密度にも依存する量である (Oke, 1987)。さらに、この値は地表面の起伏によっても影響される。

(17)式は、中立成層時には地表面から大気境界層の約 10%の高さまで成立すると考えられている。しかし、粗度が大きい場合には、風速が対数分布を示す対数分布層の上限は大気境界層の厚さの 10%よりも高くなる。Thomson (1978) は、粗度高が 35 m の所で、風速の対数分布が 700 m の高さまで見られ、周辺の山の高さの約 4 倍に達したことを報告している。しかしながら、彼の研究においては、ゼロ面変位の影響は無視されている。Kustas and Brutseart (1982) は、実験室で作られた境界層の場合、(17)式と観測された風速のプロファイルとの差は対数分布層の外側においても大きくないことを見いだした。Parlange and Brutseart (1989) は、複雑地形上で得られた風速の鉛直プロファイルデータを解析し、 $z-d_0=67(\pm 18)z_{0M} \sim 128(\pm 32)z_{0M}$ の間で対数分布層が存在することを示した。したがって、大きな粗度高を持った複雑地形上においては、気象観測塔を用いた観測は困難であるが、繫留気球ないしパイバル観測によって、粗度高とゼロ面変位を求める事が出来ると考えられる。

粗度パラメーターと地表面の地形因子との間の関係はこれまでも数多く研究されてきた。Lettau (1969) は、氷面上と風洞内と実験データ等から次のような関係を導き出した。

$$z_{0M}/h=0.5s/S \quad (18)$$

ここで、 h は effective obstacle height で、粗度要素の平均の高さで定義される実効粗度要素高を表し、 s は silhouette area と呼ばれ、平均粗度要素の風向に直交する面への投影面積を表す。また、 S は specific area ないし lot area と呼ばれる量で、対象とする領域の面積である。粗度高と粗度要素の高さについては上記以外にも、数多くの観測的研究がなされている (Chamberlain, 1968; Thom, 1971; Kondo, 1971; Hicks *et al.*, 1975; Thompson *et al.*, 1975)。これらの研究では、 h は粗度要素の高さで定義されている。一方、アメダス観測点の風速データを解析することにより、Kondo and Yamazawa (1985) は、都市域の一樣でない地表面状態での粗度高を求めた。彼らは、粗度高は、粗度要素の平均の大きさに比例するという結論を得ているが、ゼロ面変位については考慮されていない。これら一連の研究においては、 z_{0M}/h は定数となり、およそ 0.125 から 0.3 の間の値としているが、実際には z_{0M}/h は地表面の地形因子の複雑な関数として与えられるはずである (Brutsaert, 1982)。Kondo and Akashi (1976) は、2次元モデルを用いて、 z_{0M}/h が無次元化したキャノピー抵抗係数 (canopy drag factor) $Cd=0.3$ 付近で最大値を取り、 z_{0M}/h がキャノピー層の物理的な特徴に強く依存することを明らかにした。

これらの研究は、すべて地表面を平坦な面として取り扱っている。しかし現実の地表面は、起伏を持った地形上に、森や人工建築物などの粗度要素が配置されているのが普通である。Kustas and Brutseart (1986) は、数百メートルの鞍部からなる低山地帯で観測を行ない、 z_{0M}/h が $\lambda = s/S$ で定義される placement density と呼ばれる量 λ と $c_s = 2.05(h/s)^{0.4}$ で定義される shape factor of the obstacles c_s によって関係付けられることを明らかにした。しかし、彼らの解析では、斜面の効果は考慮されておらず、しかも $d_0 = 2.18\lambda^{-0.71}$ という仮定を用いている。

一方、ゼロ面変位と地表面の地形因子との関係についてはこれまで数多くの研究がなされている。ゼロ面変位と実効粗度要素高の比、 d_0/h は、野外観測 (Stanhill, 1969; Hicks *et al.*, 1975; Jaeger, 1985) や風洞実験 (Raupach, 1980) さらには数値実験 (Kondo and Akashi, 1976) によって調べられてきた。これらの研究では、 d_0/h はおよそ $2/3$ という結果が得られている。しかし、地形の起伏が大きい複雑地形上においては、地形の起伏や大きさが複雑に入り組んでいるため、 h の定義は明確に定めにくい。さらにこのような場合、地表面付近の風速の鉛直プロファイルは周辺の大きな粗度要素によって乱されているため、観測からゼロ面変位を決定するのにも困難を伴う。このため、複雑地形上におけるゼロ面変位と地形因子とのあいだの関係については、未だに不明な点が多い。

このように、複雑地形上での粗度パラメーターと地形因子との関係は野外観測データの不足により未だ不明確な点を残しているのが現状である。

2.4 解析と結果について

2.4.1 風速のプロファイルデータ

風速の鉛直プロファイルを考える場合、 z 軸の原点は通常地表面で定義される。滑らかな平坦面、裸地面や平坦な植生面などの単純地形の場合、 z 軸の原点に地表面を定義するのは自然である。なぜなら、このような場合「表面」の物理的イメージは明確だからである。

しかし、複雑地形においては、表面の複雑な形状のため z 軸の原点を定義することは難しい。さらに、大きな起伏や地形の傾斜のため、粗度要素の高さ h も明確に求めることは難しい。そこで、我々は z 軸の原点を解析の対象領域の平均標高によって定義することにした。複雑地形上では、平均標高の方が、Kustas and Brutseart (1986) が用いた領域内の最低標高を用いた定義よりも物理的イメージが明快である。また、最低標高は標高データの格子点の間隔や位置に依存するのに対し、平均標高はそれらに大きく依存することはないと考えられる。

地形因子解析には、国土地理院の 250 m メッシュの標高データを用いた。領域 0 の平均標高は海拔 44.1 m で、 z 軸の原点はこの高さとした。プロファイル観測を実施した地点の標高は海拔 60 m であり、このため生データのの高さに 15.9 m を加えたものを高度とした。

図 1-9 に、1986 年 10 月 21 日と 24 日に実施した繫留気球観測による風速風向、仮温位と絶対

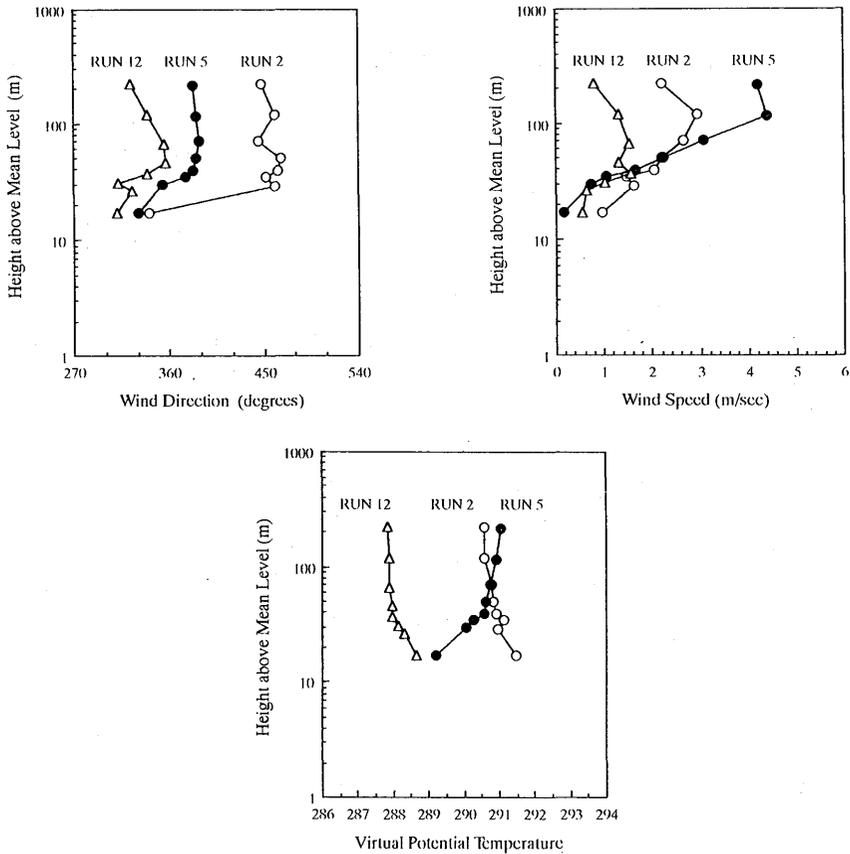


図1-9 繫留気球観測による風速，風向，仮温位と絶対湿度の鉛直プロファイル例 (RUN2, 5, 12)。

湿度の鉛直プロファイルの例を示す。平均標高よりの高さが30 m未満の風速，風向ならびに仮温位は高さ30 m以上のデータと大きく異なっている。観測を実施した場所は，周囲を高さ約20 mの丘に囲まれていた。従って，高さ30 m未満の風速プロファイルデータは，周辺の地形の起伏と植生に強く影響を受けたものであると考え，高さ30 m未満の高さのデータを粗度パラメーター解析から除くことにした。

図1-10にパイバル観測により得られた風速と風向の鉛直プロファイルを示す。レベル1(高度約30 m)の風のデータは地上1 mと60 mの2つの高さで測定した経位儀の方位角と高度角から計算したものである。地上約30 mに相当するレベル1の風のデータは，風向がこれより高いレベルの風のデータと明らかに異なっている。そこで，繫留気球のデータと同様に，レベル1のデータは解析から除くことにした。

風速プロファイルから求められる粗度パラメーターは，接地層の成層状態が中立でない場合，

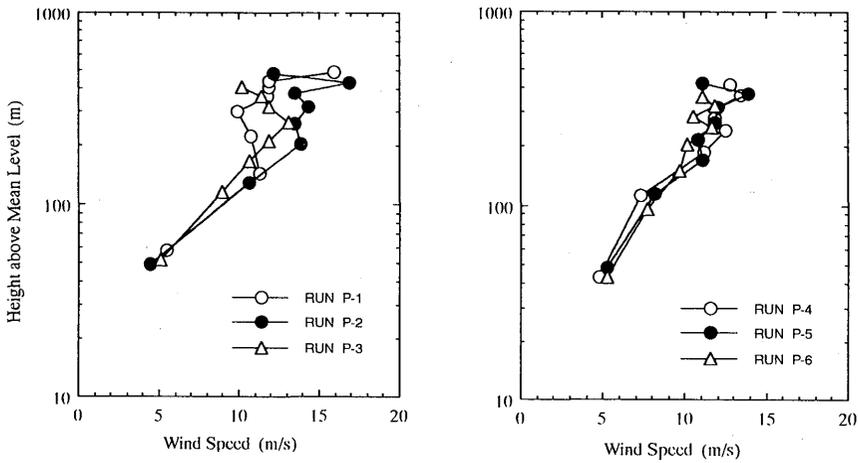


図 1-10(a) パイバル観測による風速の鉛直プロファイル図。

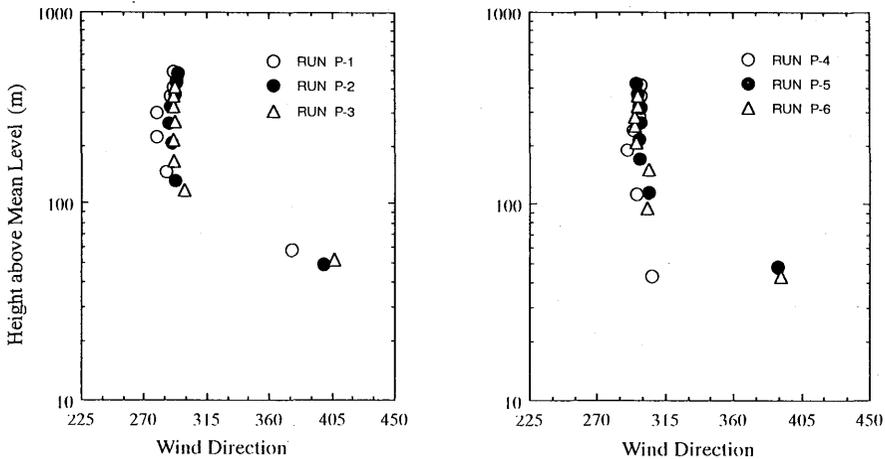


図 1-10(b) パイバル観測による風向の鉛直プロファイル図。

正確に決定することは難しくなる。また、風速が小さい場合や風速の鉛直プロファイルが大きく乱れている場合にも、求められる粗度パラメーターの精度は悪くなる。このため、我々は(1)境界層下層の成層状態が中立であり、(2)高さ 30 m 以上の風速プロファイルに大きな変曲点が無い、という条件を満たすデータについて解析を行なうことにした。

繫留気球観測時の成層安定度は、仮温位 θ_v の鉛直プロファイルから判定した。具体的には、レベル 4 (地上から約 40 m) とレベル 7 (地上から約 120 m) の仮温位差 $\theta_{v7} - \theta_{v4}$ が $\pm 0.4K$ 未満を中立とした。その結果、全 16 ランのうち上記条件(1)、(2)を満たすランとしてラン 4, 13, 14 が

表1-3 繫留気球観測時のレベル4, レベル7の温位と温位表。

RUN	$\theta_v^{\text{Level 4}} (40\text{m})$ (°C)	$\theta_v^{\text{Level 7}} (120\text{m})$ (°C)	delta θ_v (°C)
1	290.49	290.23	-0.26
2	290.90	290.56	-0.34
3	291.12	291.08	-0.04
4	291.07	291.03	-0.04
5	290.58	290.92	0.34
6	286.53	286.12	-0.41
7	286.98	286.58	-0.40
8	287.28	287.10	-0.18
9	287.71	287.53	-0.18
10	287.87	287.82	-0.05
11	287.94	287.86	-0.08
12	287.95	287.87	-0.08
13	288.12	288.05	-0.07
14	288.32	288.28	-0.04
15	288.29	288.35	0.06
16	288.14	288.41	0.27

選ばれた (表1-3)。

パイバル観測時には気温のプロファイルは得られないので、パイバル観測時の安定度は、観測地点より北方8 kmに位置する熊谷地方気象台の地上気象データを用いて、パスキルの安定度により判別することにした。パイバル観測が行なわれた10月23日の日中15時のパスキル安定度はCで、弱不安定を示した。

2.4.2 粗度高とゼロ面変位

過去の複雑地形上における野外観測では、多くの場合、ゼロ面変位 d_0 を粗度高 z_{0M} の関数と仮定して粗度高が求められている (Kustas and Brutsaert, 1986; Parlange and Brutsaert, 1989)。しかしながら、複雑地形上での粗度パラメーターと地形因子との関係は、粗度高、ゼロ面変位並びに摩擦速度がそれぞれ独立に決定されなければ、理解することはできない。そこで、我々は以下に述べる方法で、これら3つのパラメーターを独立に求めることにした。

粗度高、ゼロ面変位と摩擦速度は最小自乗法により求めた。(14)式を変形することにより、中立成層下で各ラン各高度について次の式が成り立つ。

$$\ln(z_{ij} - d_0) = \frac{k}{u_{*i}} u_{ij} + \ln z_{0M} \quad (19)$$

ここで、添字 i はランの番号を、添字 j は高度の番号を示す。境界層下層の渦の影響や生データの測定誤差などのため、(19)式の左辺から右辺を引いた余り、 $\ln(z_{ij}-d_0)-ku_{ij}/u_{*i}-\ln z_{0M}$ は各ラン各高度毎にゼロにはならない。この時、平均自乗誤差 P は次のように定義される。

$$P = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left\{ w_i \ln(z_{ij}-d_0) - w_i \frac{k}{u_{*i}} u_{ij} - w_i \ln z_{0M} \right\}^2 \quad (20)$$

z_{ij} と u_{ij} は観測によって得られる量で、 z_{0M} 、 d_0 と u_{*i} が未知数である。 w_i は u_{*i} が小さい時に計算精度を上げるための weight function で、 $z_0=1\text{m}$ 、 $d_0=20\text{m}$ の時の各ランの摩擦速度を与えた。これより、(20)式が最小値をもつ必要条件は以下の様になる。

$$\frac{\partial P}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial b_i} = 0 \quad \text{and} \quad \frac{\partial P}{\partial d_0} = 0 \quad (21)$$

ここで、 $a = \ln z_{0M}$ で $b_i = k/u_{*i}$ である。ゼロ面変位にある値を与えた場合、(21)式は線形連立方程式になり、代数的に解くことが出来、与えられたゼロ面変位に対する自乗誤差 P が得られる。この手続きをゼロ面変位が現実的な値を取る範囲（この場合 0 から 50 m）で繰り返し行なうことにより、自乗誤差が最小値を取る時のパラメーター z_{0M} 、 d_0 と各ランの u_{*i} の組み合わせが一義的に得られる。

この方法はラン 4、13、14 の組み合わせに対し様々なレベルについて行なわれた。実際の計算においては、ラン 13、14 の風速はラン 4 の風速と比較して非常に弱かったので、計算結果の精度を上げるためにラン 4 とラン 13、14 に 2:1 の重みをかけて計算した。得られた結果を表 1-4 に示す。これによれば、風速プロファイルデータとしてレベル 4、5、6、7 を用いた場合は、大きすぎる粗度高を与える結果となるので、ここではレベル 4、5、6 を用いて得られた z_0 、 d_0 と摩擦速度（ラン 4、13、14）の組み合わせを採用することにした。その結果、粗度高として 2.16 m が、またゼロ面変位として 28.0 m が得られた。

表 1-4 最小自乗法による森林公園における粗度高とゼロ面変位。

RUN	Level	Z_{0M} (m)	d_0 (m)	u_{*i} (RUN4) (m/s)	u_{*i} (RUN13) (m/s)	u_{*i} (RUN14) (m/s)
4,13,14	4,5,6,7,8	1.48	31.7	0.319	0.122	0.105
4,13,14	4,5,6,7	13.1	8.70	0.611	0.277	0.217
4,13,14	4,5,6	2.16	28.0	0.336	0.164	0.103

2.4.3 武蔵丘陵森林公園の地形因子

2.3章で述べたように、粗度高とゼロ面変位は、粗度要素の高さ h によってパラメタ化されてきた。しかし、複雑地形上においては、 h の評価は一般に困難で、パラメタ化のためには地形の特徴を表す別のパラメーターを用いることが望ましいと考えられる。また、実際の数値モデルで粗度高やゼロ面変位のパラメタ化に用いるパラメーターは、特別な観測や解析によって得られる量よりも簡単な地形の統計量であることの方が望ましい。そこで、本研究では、地形因子解析のデータとして建設省国土地理院の250mメッシュの地形データを用いることにした。

解析領域として、10km×10kmの面積を持つ3つの領域を以下のように設定した。すなわち、領域の中心に観測点が位置する領域0、繫留気球の主風向のフェッチに合わせて観測点の北東象限（風上側）に領域を取った領域1とパイバル観測のフェッチに合わせて観測点の北西象限（風上側）に領域を取った領域2である。地表面の地形因子として、平均標高 h_{av} 、領域の高低差 h_d 、平均標高からの偏差の標準偏差 σ 、ならびに平均標高からの偏差の平均偏差 σ_m 、の4つのパラメーターを求めた。これらのパラメーターは各々以下の式で定義した。

$$h_{av} = \sum_l \sum_m h_{lm} / N^2 \quad (22)$$

$$h_d = \text{Max}(h_{lm}) - \text{Min}(h_{lm}) \quad (23)$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_l \sum_m (h_{lm} - h_{av})^2 / N^2} \quad (24)$$

$$\sigma_m = \sum_l \sum_m |h_{lm} - h_{av}| / N \quad (25)$$

ここで、添字 l と m は東西、南北方向の格子番号(1~40)で、 N はグリッド数 (=40)、 h_{lm} は格子 (l, m) の標高を示す。観測地点となった武蔵丘陵森林公園は、1.4/1000程度の非常に緩やかな斜面上にある。そこで、上記の4つのパラメーターを、地表面が水平として取り扱った場合(ケースH)と地表面を斜面として取り扱った場合(ケースS)の2つの場合についてそれぞれ求めることにした。得られた結果を表1-5に示す。

2.5 議論

ここでは、粗度パラメーターと地形因子の関係を調べるために、繫留気球観測の解析結果に基づいて地形因子と粗度パラメーターとの間の関係式を求め、パイバルのデータを用いてそれらの関係式を検証することにした。地形因子としては、標準偏差 σ と平均偏差 σ_m の2つのパラメーターを用いることにした。

粗度高、ゼロ面変位、標準偏差と平均偏差はいずれも同じ次元なので、最も簡単な関係式とし

表1-5 武蔵丘陵森林公園の地形因子。Case Hは領域を水平面として取り扱った場合、Case Sは領域を斜面として取り扱った場合を示す。

Case H (horizontal)

Geometrical Parameter	Area 0	Area 1	Area 2
h_{av} (m)	44.09	22.37	56.86
h_d (m)	80	63	123
σ (m)	15.89	7.70	16.59
σ_m (m)	13.34	4.82	13.24

Case S (slope)

Geometrical Parameter	Area 0	Area 1	Area 2
σ (m)	9.55	5.65	6.82
σ_m (m)	7.81	3.17	4.88

て、粗度高については z_{0M}/σ あるいは z_0/σ_m 、ゼロ面変位については d_0/σ_m を求めた。その結果、繫留気球観測時の粗度高と地形因子については、表1-4と表1-5より次の関係が得られた。

$$z_{0M}/\sigma_1 = 0.281 \quad (26)$$

$$z_{0M}/\sigma_1^s = 0.382 \quad (27)$$

$$z_{0M}/\sigma_{m1} = 0.448 \quad (28)$$

$$z_{0M}/\sigma_{m1}^s = 0.681 \quad (29)$$

ここで、添字 s は領域を斜面として取り扱った場合を示し、添字 1 は領域の番号を示す。また、ゼロ面変位と地形因子については、上と同様にして次の関係が得られた。

$$d_0/\sigma_1 = 3.64 \quad (30)$$

$$d_0/\sigma_1^s = 4.96 \quad (31)$$

$$d_0/\sigma_{m1} = 5.81 \quad (32)$$

$$d_0/\sigma_{m1}^s=8.83 \tag{33}$$

もし、上記の関係が成立するならば、ゼロ面変位と粗度高はフェッチの地形及び地表面の性質に関係するパラメーターであるから、パイバル観測時と繫留気球観測時における粗度高とゼロ面変位との間には次の様な関係が成立するはずである。

$$z_{0M}(\text{Pibal})=\frac{\sigma_2}{\sigma_1}z_0(\text{KYTOON}) \tag{34}$$

$$z_{0M}(\text{Pibal})=\frac{\sigma_2}{\sigma_1}z_0(\text{KYTOON}) \tag{35}$$

そこで、(26)-(29)式と(30)-(33)式の妥当性を検証するために、パイバル観測時の粗度高とゼロ面変位 z_{0M}^{EST} と d_0^{EST} を(34)、(35)式を用いて評価し、これらをパイバル観測データから求めた粗度高とゼロ面変位 z_{0M}^{Pibal} と d_0^{Pibal} と比較した。パイバルデータから求めた粗度高とゼロ面変位の計算は、繫留気球観測データの時と同様に最小自乗法によった。また、全6ランのうちラン1は、高度200m以上の風速が非常に弱かったので解析から除外した。計算は、レベル2, 3, 4を用いた場合からレベル2, 3, 4, 5, 6を用いた場合まで3通り試みたが、レベル2, 3, 4, 5, 6を用いた場合、ゼロ面変位の大きさが明らかに大きくなり過ぎる結果を与えたので、考察からは除外した。

表1-6は、こうして得られたパイバル観測時の粗度高とゼロ面変位である。表には、パイバルデータのレベル2, 3, 5を用いた場合とレベル2, 3, 4, 5を用いた場合の結果と同時に、地形因子としてケースHの標準偏差 σ_m 、ケースSの標準偏差 σ と平均偏差 σ_m を用いた場合の結果をそれぞれ示してある。この結果によれば、レベル2, 3, 4のデータを用いて、地形因子としてケースHで標準偏差を用いた場合が最も良い一致を示しており、 $z_{0M}^{\text{Pibal}}/z_{0M}^{\text{EST}}=0.92$ と $d_0^{\text{Pibal}}/d_0^{\text{EST}}=0.90$ という結果を得た。

表1-6 パイバル観測時の粗度高とゼロ面変位。表中添字のESTは地形因子を用いたパラメタ化によって推定された値を示し、Pibalはパイバルデータから最小自乗法により得られた計算結果を示す。また、表中括弧内のL2-6, L2-5, L2, 3, 4はそれぞれ粗度高計算に用いられた風速データのレベルを示す。

	$Z_{0M}^{\text{Est.}}$	$d_{0M}^{\text{Est.}}$	$Z_{0M}^{\text{Pibal}}(\text{L2-6})$	$Z_{0M}^{\text{Pibal}}(\text{L2-5})$	$Z_{0M}^{\text{Pibal}}(\text{L2,3,4})$
Case H $\sigma(\text{m})$	4.65	60.3	2.66(1.75)	3.31(1.40)	4.07(1.14)
$\sigma_m(\text{m})$	5.93	76.9	7.48(0.79)	9.08(0.65)	11.2(0.53)
Case S $\sigma(\text{m})$	2.61	3.38	0.93(2.81)	1.17(2.23)	1.41(1.85)
$\sigma_m(\text{m})$	3.32	43.1	5.50(0.60)	6.73(0.49)	8.31(0.40)

このことから、複雑地形上においては、地形因子に標準偏差を用いたパラメタリゼーション、(26)式と(30)式、が有効であると思われる。また、今回のような緩やかな斜面の場合、地形因子に斜面の効果を考慮する必要はないことが示唆された。一般に、風速が強くなればフォームドラッグの効果も大きくなる。従って、丘陵地帯上の高い丘や深い谷は、粗度パラメーターをより大きくする効果を持つと考えられる。地形の起伏の平均偏差と比較すると、標準偏差はより地形の起伏を良く反映するので、平坦な地表面におけるような平均粗度要素高、mean roughness obstacle height、が求めにくい複雑地形においては、平均標高からの標準偏差が地形因子として適していると考えられる。

3 武蔵丘陵森林内の風速分布について

3.1 はじめに

植生を持った地表面からのエネルギー交換過程のパラメタ化についてはすでに数多くの研究がなされており、芝生・畑地などのキャノピーハイトが低い場合については、例えばバルク法を用いた比較的簡単なパラメタ化が提唱されている (Toya *et al.*, 1990)。しかし、森林などのようにキャノピーハイトが高い場合については、キャノピー層を独立した層として表現し、キャノピー層上部と大気とのエネルギー交換ならびに、地面とキャノピー層間のエネルギー交換もパラメタ化する必要がある。そのためには、森林キャノピー層の群落構造を表現する基本的パラメーターを、観測によって決定することが必要である。キャノピー層の群落構造を表現するパラメーターには、葉面積密度、葉面積指数、キャノピーフローインデックスなどがあるが、葉面積密度や葉面積指数は一般にはキャノピー内の葉面の直接サンプリングを行なう必要があり、様々な植生が混在した雑木林では実測が困難である。一方、キャノピーフローインデックスはキャノピー内の風速の鉛直分布から求めることが出来る。そこで、武蔵丘陵森林公園内の雑木林においてキャノピー層内の風速分布の測定を行ない、キャノピーフローインデックス a_w を求めた。

3.2 方法

ここでは、取り扱いを簡単にするために、キャノピーを一層として取り扱う事にする。水平一様かつ定常条件の下ではキャノピー層内の運動方程式は、 A_f を葉面積密度、 c を葉面抵抗係数、 Km を拡散係数、 l を混合距離とした場合、次のように表される。

$$\frac{d}{dz} \left(Km \frac{du}{dz} \right) = A_f c u^2 \quad (36)$$

拡散係数と混合距離は、ここでは以下のように表されるものとした。

$$Km = l^2 \frac{du}{dz} \quad (37)$$

$$l = k \frac{(du/dz)}{(d^2u/dz^2)} \quad (38)$$

キャノピー層内の風速分布は、指数関数的分布を示すことが観測によって知られているので(竹内・近藤, 1981), 次の様な指数関数として仮定する。

$$u(z) = u_h \exp\left(\frac{a_w}{h}(z-h)\right) \quad (39)$$

(39)式の a_w/h はキャノピー層内の風速プロファイル観測によって求めることの出来る量で、 h はキャノピーハイト、 u_h はキャノピー層トップにおける基準風速、 a_w はキャノピーフローインデックスと呼ばれる量である。さらに(36)~(38)式からキャノピーフローインデックスは次の様に表現することが出来る。

$$a_w = \frac{A_f ch}{2k^2} \quad (40)$$

(40)式より、 a_w と A_f は比例するので、キャノピー層内の風速プロファイルから葉面積密度の鉛直分布もおおよそ推定することが出来る。すでに、葉面積密度、葉面積指数、キャノピーフローインデックスと、風向・風速プロファイル、キャノピー層内放射特性、各種フラックス量との関係については、観測・理論の双方から研究が進められており(Kondo and Akashi, 1976; Brutsaert, 1979; Monteith, 1976), 葉面積密度や葉面積指数をパラメーターとして、大気・キャノピー層・地表面間のエネルギー交換過程をパラメタ化することが可能になっている。

3.3 観測

観測は、森林公園内の放送用パンザマスト(高さ19m)を利用して行なった。パンザマストは公園内の雑木林(樹高12m)の中にあり、上部は周辺のキャノピー頂部より約7mほど突出している。そこで、基準風速 u_h はパンザマストの頂上部に3杯式微風速計(牧野応用測器 AF750)を固定して求めることとした。一方、キャノピー層内の風速の鉛直分布 $u(z)$ は微風速計を上下させて、一部キャノピー層外も含む10高度(1, 3, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 14, 17m)で測定を行なうことにより求めた。一般にキャノピー内の風速は非常に弱いので、風速プロファイルの測定精度を確保するために、各高度で約2分間ほど風速計を静止させ、レファレンスの風速計とのパルスカウント比 $(u(z)/u_h)$ を求める方法をとった。測定は、風速計を上下させながら9回行ない、各々の高度について平均パルスカウント比を計算し、無次元風速 $u(z)/u_h$ の平均鉛直プロファイルとした。観測は、1987年10月28日9時43分より15時35分にかけて行なった。

3.4 結果と考察

図1-11は、キャノピー層頂部での風速で無次元化された風速の鉛直プロファイル図である。キャノピー層頂部の高さは、森林公園での平均的な樹高と、今回の風速プロファイルから判断し12mとした。キャノピー層内の風速の鉛直プロファイルは、キャノピー頂部からの高さに対し指数関数的に減少するため、縦軸はキャノピーハイトで無次元化した高さに対してリニアに、横軸は無次元風速に対し対数的にとった。図には Chionco(1978)による観測例も加えてある。Chioncoによれば、栽培作物のヒマワリ、麦、トウモロコシ、米やトウヒなどの場合は、全層にわたって

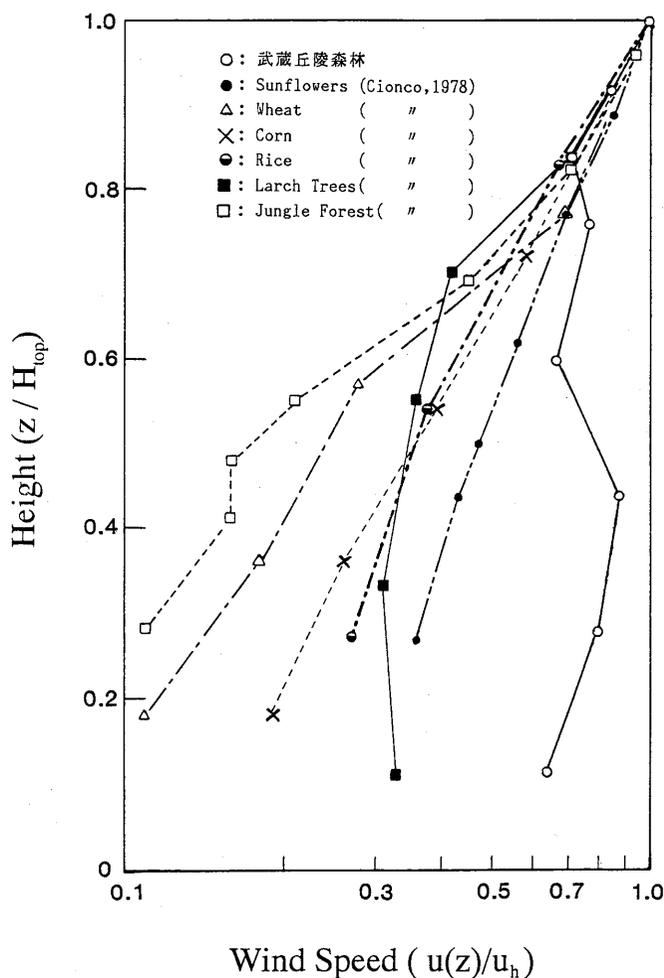


図1-11 キャノピー層トップでの風速で無次元化された武蔵丘陵森林公園の雑木林内の風速の鉛直プロファイル (図中白丸実線)。縦軸は、キャノピートップの高さ ($H_{top}=12m$) で無次元化した高さ、横軸は無次元風速を示す。図には、Chionco (1978) による観測例も合わせて表示してある。

傾きがほぼ一定で、葉面積密度、キャノピーフローインデックス共に高さに依存せず一定の値を示している。一方、果樹園 (citrus orchard) や森林 (jungle forest, larch trees) の場合は、キャノピー層上部の葉面積密度が密な部分と、下部の疎な部分の2層に分けられる。森林公園の雑木林における観測結果を見ると、Chioncoの森林や果樹園の場合と同様に、上部の密な層と下部の疎な層に2つに分けられることがわかる。上部の密な層は、高さ約10 mから12 mの樹冠部に相当する。また、今回の観測では、Chioncoの観測例と比較してキャノピー層下層での無次元風速が大きい。これは、森林公園の雑木林の葉面積密度が、樹冠部よりも下の部分で非常に疎で、運動エネルギーの大部分が上部の樹冠部と地表面から1 m以下の下層で吸収されている事を示唆していると思われる。

キャノピーフローインデックスの評価は、キャノピーを1層とした場合と、2層に分けた場合の2通り試みた。1層モデルの場合 $a_w=0.70$ という結果を得た。これは、密な植生についての過去の研究例 ($a_w=3$: Brutsaert, 1975; $a_w=2\sim 4$: Chionco, 1972) とは大きく異なる。一方、キャノピー層を高さ10 mから12 mの樹冠部と高さ10 m以下の樹幹部の2層に分けた場合、上部の樹冠部の a_w は2.16となり、過去の研究例とも一致する(図1-12)。また下層の a_w は上部のそれよりもずっと小さくなる。

地表面過程を数値モデルに取り込むために、地表面とは独立にキャノピー層をパラメタ化する場合、一層として取り扱う立場から多層モデルまで様々な方法が考えられる。今回の風速分布の

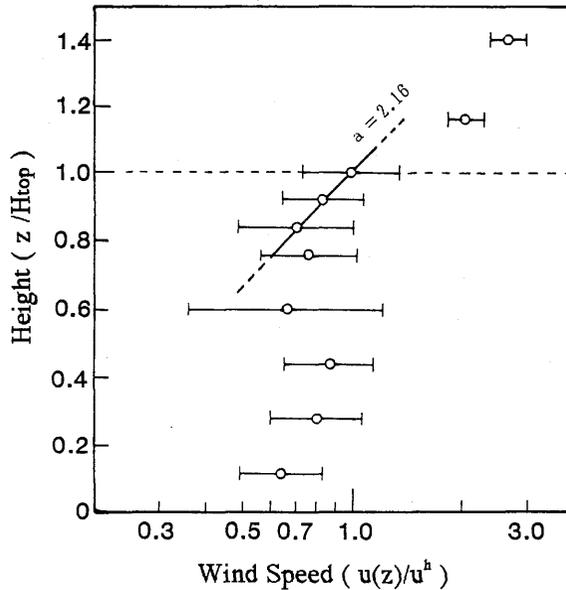


図1-12 武蔵丘陵森林内の風速分布。表記は、図1-11に同じ。図中横線は標準偏差の範囲、点線はキャノピートップの高さを示す。

解析結果によれば、武蔵丘陵の雑木林においては、キャノピーは樹冠部と樹幹部の 2 層として取り扱い、下草を含めた地表面とキャノピー層より上部の境界層下部とのエネルギー交換を考えるのが合理的であることが示唆された。

4 森林上の気象特性について

4.1 はじめに

森林上の気象特性については、果樹園、針葉樹林帯ならびに熱帯雨林帯においては数多くの観測がなされているが、我が国の森林の主要な部分を占める落葉樹林帯におけるそれは、特に一年を通じた観測例は少なく、不明な点も多い。そこで、森林上の気象特性の把握と蒸発散量の評価を目的として、1988 年 11 月 29 日より武蔵丘陵森林公園内で、気温・湿度・風向風速の連続観測を行なった。

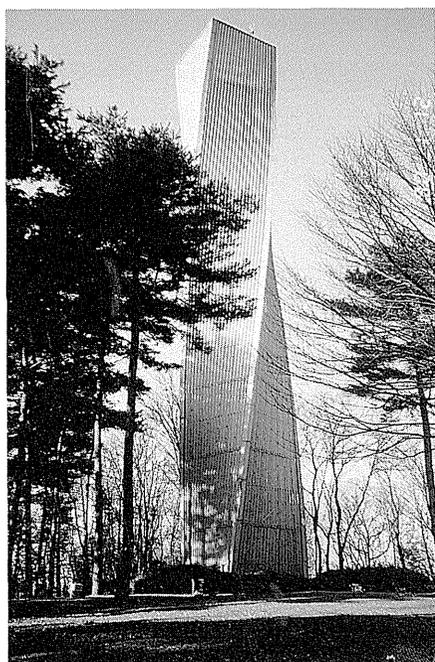
4.2 観測

気温・湿度・風向風速の連続測定は、森林公園内の記念塔上で実施した(図 1-13)。測定地点の標高は 60 m で、記念塔の高さは 33 m である。測器は、記念塔屋上部に設置した高さ 2 m のポールに固定した。測定地点周辺の平均標高は 44.1 m で、周辺のキャノピー層の高さは約 12 m なので、測器は平均標高より 51 m の高さ(周辺のキャノピー層頂部より 23 m)に位置することになる。気温と露点温度の測定には、白金抵抗温度計と塩化リチウム露点計(中浅 Model E-701)を使用し、風向風速の測定には、2次元の超音波風速計(海上電気 SA-200)を用いた。観測値は、10 分毎に記念塔内に設置されたデータロガーに収録され、これから 30 分平均値を求めた。連続観測は、1988 年 11 月 28 日から開始され、今回の解析にはそのうち 1988 年 12 月 1 日から 1989 年 11 月 30 日までの一年間のデータを使用した。

4.3 解析方法

まず、季節毎の気象特性を調べるために、生データから温位、絶対湿度、風向風速の一時間平均値を計算し、これらのデータから月別に時間毎の平均値を求めた。

また、森林域と都市域との気象特性の差を調べるために、観測地点より北方約 8 km に位置する熊谷地方気象台の地上気象観測値との比較を試みた。熊谷地方気象台は、人口約 14 万人の熊谷市のほぼ中央に位置しており、都市域の気象を代表する観測点として好都合である。熊谷地方気象台の気温・湿度観測は地上 1.5 m の高さで、森林公園の観測と同じく白金抵抗温度計と塩化リチウム露点計を用いて行なわれている。また、風速計と風向計は地上より 16.9 m の高さに設置されている。比較のための事例としては、日射量が大きい 5 月から 8 月のデータの中から、①前日に



(a)



(b)

図1-13 森林公園内記念塔における気象観測。写真(a)記念塔の全景。写真(b)屋上部の2mポールに固定した超音波風速計と通風式乾湿計。

10 mm 以上の降雨ないし前日と前々日の降雨の合計が 20 mm 以上を記録し、②当日の日中の天気が快晴又は快晴に近い晴れを記録した 2 例、5 月 27 日と 6 月 29 日、を選び、温位・絶対湿度・風向風速の各要素の毎時データを比較した。

4.4 結果と考察

図1-14は、月別の平均絶対湿度と相対湿度を示した図である。図には、熊谷地方気象台の相対湿度の月別平年値も合わせて示してある。これによれば、冬季にあたる12月から2月にかけて相対湿度が低く、他の月は相対湿度が高い。これは、熊谷市内の月別平年相対湿度と同様の傾向を示している。一方、温度の場合は、森林公園の温度は温位で表わしているため、熊谷地方気象台の気温の平年値とは直接比較できないが、月別の平均温位図(図1-15(a))によれば森林公園の平均温位は、熊谷における平均気温の平年値と定性的にほぼ一致した季節変化を示している事が分かる。しかし、図1-15(b)に示した森林公園と熊谷市の月別の最高、最低温差(森林公園の温位-熊谷市の気温)によれば、最高気温・最低気温のいずれの場合についても夏季は森林の方が低く冬季は森林の方が高い傾向を示している。

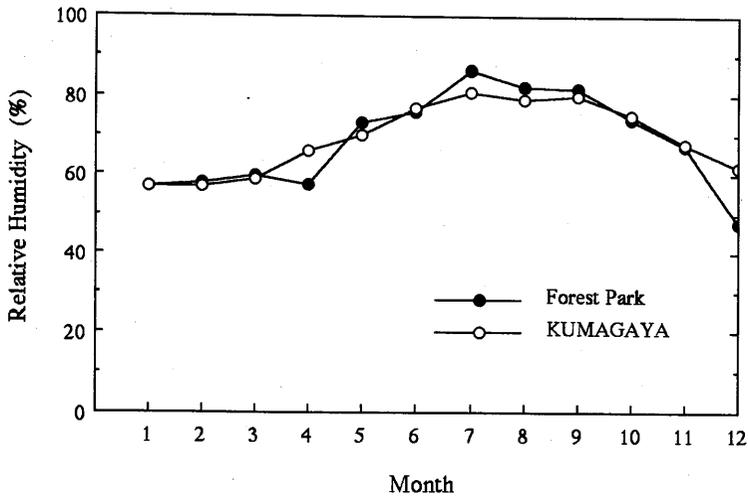


図1-14 武蔵丘陵森林公園における月別の平均相対湿度（1988年12月～1989年11月）ならびに熊谷地方気象台の月別平均相対湿度の平年値。

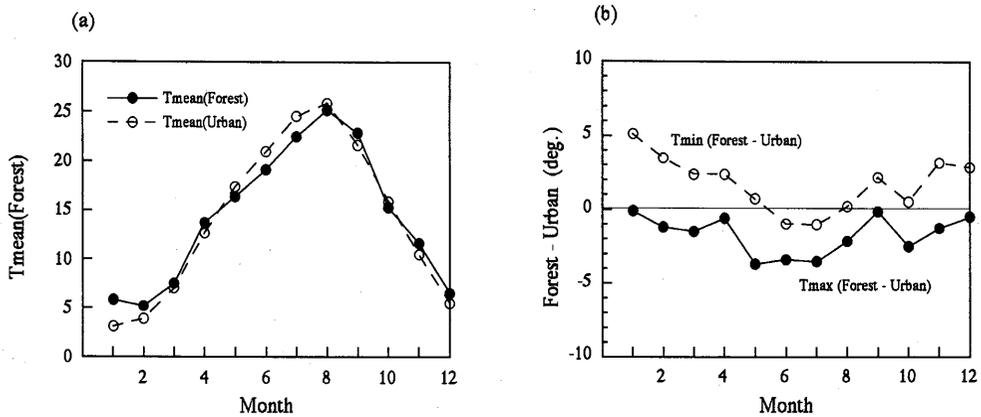


図1-15 森林公園と熊谷市内の気温の比較図。(a)は武蔵丘陵森林公園における月別の平均温度図と熊谷地方気象台の月別平均気温の平年値、(b)は森林公園と熊谷市の最高気温と最低気温の温度差（森林公園の温度－熊谷市内の温度）を示す。

森林公園における月別の最高最低気温、最高最低絶対湿度の起時を図1-16に示す。最高気温の起時は、季節によらず15時から16時で、最低気温の起時は、日の出から1～2時間後の6時から7時である。一方、最低絶対湿度の起時は植生の有無によって異なり、4月から10月は、最低気温と同じく日の出から1～2時間後の6時から7時であるが、11月から3月にかけての落葉期は、最低気温の起時と一致していない。また、最高絶対湿度の起時は、夏季（6～8月）は最高気

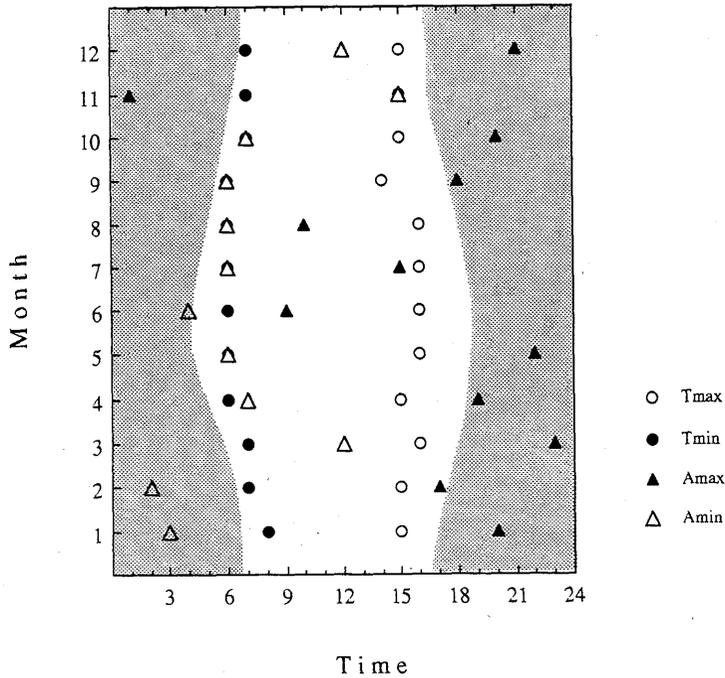


図1-16 武蔵丘陵森林公園における月別最高最低気温，最高最低絶対湿度の起時。図中ハッチの部分は日没中の時間帯を示す。

温の起時と一致していない。また，最高絶対湿度の起時は，夏季（6～8月）は最高気温の起時よりも早く出現し，それ以外の季節ではいずれも日没後に現われる。

図1-17は，6月29日における熊谷市と森林公園の温位と絶対湿度の日変化図である。全体的に温位，絶対湿度共に日変化の傾向はよく一致している。また，温位の日較差は日中の温位が森林域で低く夜間高くなるため，森林の方が小さくなっている。森林域と都市域での温位の日変化と絶対湿度の日変化の差をより詳しく見るために，5月27日と6月29日について時間毎のプロットしたのが図1-18と1-19である。森林と都市の温位差（図1-18）を見ると，日中森林域の方が1°C近く低く，夜間は最大1.5°C近く高くなっていることがわかる。一方，森林域と都市域との絶対湿度差（図1-19）は，一日を通じて常に正で，森林域の絶対湿度が都市域よりも高くなっている。これらの結果は，森林域の方が森林からの蒸散作用のために都市域よりもボーエン比が小さく，そのため日中の有効エネルギーが森林では都市よりもより多く潜熱に振り分けられるためだと思われる。

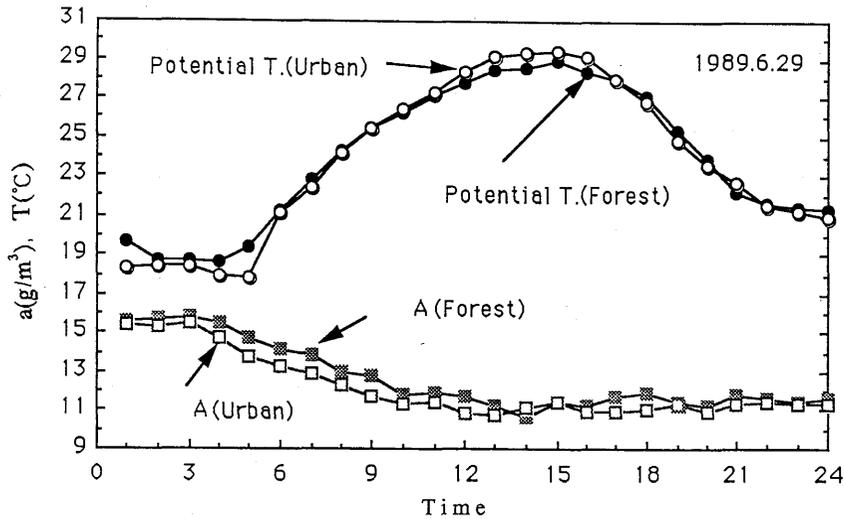


図1-17 森林公園 (Forest) と熊谷地方気象台 (Urban) における温位 (Potential T.) と絶対湿度 (ABH) の日変化図 (1989年6月29日)。

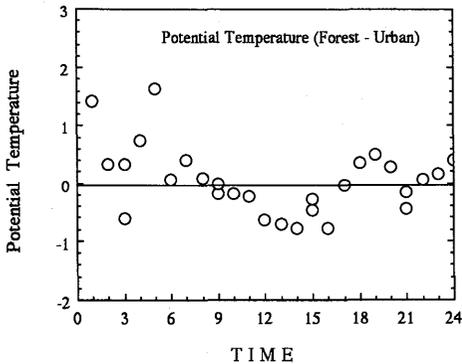


図1-18 1989年5月27日と6月29日の都市域 (熊谷地方気象台) と森林域 (武蔵丘陵森林公園) の温位差。

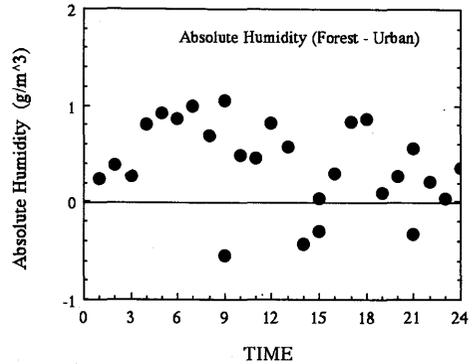


図1-19 1989年5月27日と6月29日の都市域 (熊谷地方気象台) と森林域 (武蔵丘陵森林公園) の絶対湿度差。

5 ペンマン法による森林からの蒸発散量評価

5.1 はじめに

森林のような広域の地表面からの蒸発散量の評価は、時間スケールの長い場合については、流域解析などの水収支法が用いられてきたが、より時間スケールの短い日々あるいは時間毎の変化については、いまだその評価法は確立していない。またこうした場所では、ライシメーターや渦

相関法などを用いた直接測定による観測も困難である。プロファイル観測などの特別な観測を必要とせず、地表面付近の一高度のみにおける気象データから蒸発量を評価する簡単な方法として、ペンマン法が知られているが、この方法は、湖面などからの蒸発量評価に用いられることが多く、森林域においては適用される例が少ない。

安田ら(1988)は、ペンマン法は地中熱流量 $G=0$ としているが、注意して用いるならば、飽和芝生面上に適用し、顕熱・潜熱の定性的な変化傾向を知るのに有効であるとしている。また、裸地や芝生では地中熱流量 G が顕熱とほぼ同じオーダーになり得るが、森林では G は小さいと考えられる。さらに、森林の顕熱と潜熱の比、ボーエン比は対象となる武蔵丘陵森林公園におけるプロファイル観測の解析結果より、夏季には海面などと同じ $0.1\sim 0.3$ という結果を得ている(三上・安田, 1988)。我々のグループでは、1988年11月より武蔵丘陵森林公園内の記念塔(高さ33m)上において、気温・湿度・風向風速の連続観測を行なっている。そこで、記念塔上の気温・湿度・風速データを用いて、蒸発散量の一次近似としてペンマン法を森林に適用してみた。

5.2 方法

ペンマン法は、水面からの蒸発量を計算するために用いられることが多く、一日以上の長い時間にわたる蒸発量の平均値を計算する場合には、比較的良い結果が得られるとされている。この方法の長所は、一高度の風速、気温、湿度データのみを用いて蒸発量を求めることが出来る点にある。

今簡単のために地中熱流量 G を 0 と仮定すると、地表面におけるエネルギー収支は以下の様に書く事が出来る。

$$Q_{\text{net}} = R_{\text{net}} = IE + H \quad (41)$$

この時、地表面付近にある高さ(例えば10m)における風速、気温、水蒸気圧をそれぞれ U , θ_a , e_a とすると、蒸発量は以下の式で求められる(Penman, 1948)。

$$\lambda E = Q_{\text{net}} \Delta / (\Delta + \gamma) + \lambda E_a \gamma / (\Delta + \gamma) \quad (42)$$

ここで、 λE_a は

$$\lambda E_a = 0.622 \lambda \rho C_e (e_a^* - e_a) / p \quad (43)$$

で、定義される量で、 e_a^* は $\theta = \theta_a$ における飽和水蒸気圧である。 Δ は、飽和水蒸気圧の接線勾配で以下の式で表される。

$$\Delta = 373.15 e_a^* (13.3185 - 3.952 T_r - 1.9335 T_r^2 - 0.5196 T_r^3) / \theta_a^2 \quad (44)$$

ただし, T_r は $1 - (373.15/\theta_a)$ で表される量である。

また γ は

$$\gamma = C_p P / 0.622 \lambda \quad (45)$$

で, 表される。

したがって, 地表面における放射収支量と地表面付近の気温, 湿度が得られれば, (41)式と(42)式より顕熱と潜熱フラックスを求めることが出来る。ペンマン方程式(42)の右辺第1項は放射収支項, 第2項は空気力学項を表す。気温が高いほど, 右辺第1項の Q_{net} の係数 $\Delta / (\Delta + \gamma)$ が λE_a の係数 $\gamma / (\Delta + \gamma)$ よりも大きくなるので, 日中気温が高くなる時の蒸発量 λE は, 放射収支量の寄与によるものが大部分となる。

次に, 芝生面上でのペンマン法の有効性について確かめるために, 気象研究所内の露場データを用いて, ライシメーターによる蒸発散量の直接測定値と, バルク法, ペンマン法による蒸発散量を比較した。解析を行なったのは, ライシメータータンクを水で満たして飽和させた1982年11月12日の日中9時30分から16時30分にかけての時間で, 30分平均値を解析データとして用いた。計算に用いる正味放射量は, 隣接する高層気象台の観測値を用い, 粗度高は5mmとした。得られた結果を図1-20に示す。これによれば, ペンマン法による蒸発散量は, バルク法による蒸発散量と共にライシメーターの測定値と良い一致を示すことがわかった。ちなみに, ペンマン

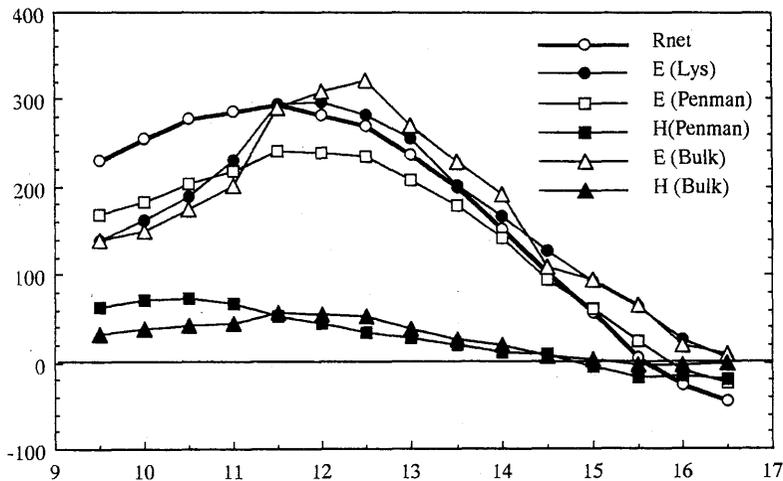


図1-20 1982年11月12日の気象研究所実験露場における正味放射量(Rnet), 顕熱フラックス(H)ならびに潜熱フラックス(E)の時間変化。図中括弧内のLysはライシメーターによる実測値, Penmanはペンマン法による計算値, Bulkはバルク法による計算値を示す。

法の残差項としての $H+G$ は夕方になると負の値を示し、夕方放射冷却により地表面から先に温度が下降することによる効果を良く再現している。

ペンマン法を森林公園の観測データを用いて適用する場合注意しなければならないのは、森林公園での観測は公園内の記念塔（キャノピー層トップからの高さ 21 m）で行なっているため、大気安定度を考慮しないと潜熱フラックスが正しく評価されないことである。そこで、今回は安定度も考慮して計算を実行した。具体的方法は、以下の通りである。

- ① まず、モーニン-オブコフ長を無限大に仮定（中立成層を仮定）し、
- ② 潜熱輸送に関する普遍関数 Φ_E を求める。普遍関数 Φ_E は次の形で表されるとした。

$$\Phi_M = \int_{z_{0M}}^z \frac{\Phi_M}{\zeta} d\zeta \quad (46)$$

$$\Phi_E = \int_{z_{0E}}^z \frac{\Phi_E}{\zeta} d\zeta \quad (47)$$

ここで、風速と絶対湿度プロファイルに対する粗高度 z_{0M} と z_{0E} は森林公園上の風速・湿度プロファイル解析結果（安田・三上, 1987; 三上・安田, 1987）から各々 3.9 m と 10^{-4} m ($Da^{-1} = 26.5$) を与えた。

- ③ 次に、バルク係数を以下の式で計算し、(43) 式より λE_a を求める。

$$C_M = \frac{k^2}{\Phi_M^2} \quad (48)$$

$$C_E = \frac{k^2}{\Phi_M \Phi_E} \quad (49)$$

- ④ つづいて Q_{net} は、正味放射量の観測値が得られないので、太陽高度角、アルベド (0.15 と仮定した) と山本・プラントの式から計算で求め、(42) 式より潜熱フラックス量 E を決定する。

- ⑤ Q_{net} と E より、顕熱フラックス H を(41) 式から求め、モーニン-オブコフ長 L を再計算する。

上記の手順②から⑤を、 H が一定の値に収束するまで繰り返し、この時得られた潜熱、顕熱フラックスを解とした。

5.3 解析に用いた事例

ペンマン法は、地表面が十分湿っていないと、正しい潜熱フラックス量を与えない。そこで、

森林公園内の記念塔で連続測定を開始した1988年11月1日から1989年7月31日までの期間中、観測点より北方8kmの地点にある熊谷方気象台で、①前日に10mm以上の降雨ないし前日と前々日の降雨の合計が20mm以上を記録し、②当日の日中の天気が快晴又は快晴に近い晴れを記録した7事例を選び出した。7つの事例は、森林の落葉期に相当する1月から3月の事例が多かったため、解析はこのうち、葉が枯れておらず日射量も多い6月29日の例についてのみ行なう事とした。また、地表面が比較的乾燥していた例と比較するために、前日と前々日に降水量が記録されず、同期間中当日最も良く晴れた6月1日の事例を選び、同じくペンマン法による顕熱・潜熱フラックス量の評価を行ない、29日の結果と比較した。

5.4 結果と考察

図1-21は、上記の方法によって求められた6月29日の正味放射量、顕熱、潜熱フラックスの日変化図である。これによれば、日中潜熱フラックスが正味放射量を上回り、一日積算で9.26mm/dayの蒸発量を示した。一方、顕熱フラックスは日中負で、20~30w/m²の熱が下向きに輸送されていて、森林がヒートシンクとなる結果を与える。6月29日は、前々日と前日に合計41.5mmの降水量を記録しており、森林の表面は十分湿っていたと考えられる。また、日中の風速は6時から14時にかけて約8m/sと比較的強かった。従って、当日は摩擦速度 u_* が大きく、森林の表面も十分湿っていたため、潜熱輸送量が大きくなり、森林表面からの潜熱放出のため表面温度が常に周囲の大気より押さえられた結果、日中森林がヒートシンクとなったものと考えら

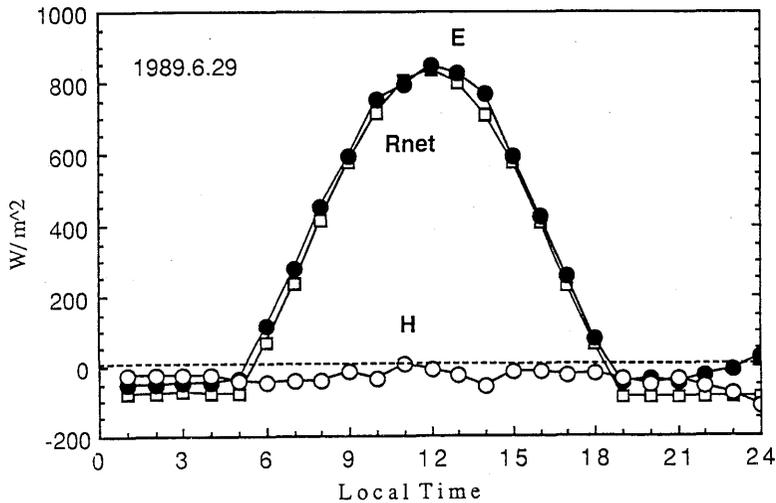


図1-21 ペンマン法による顕熱フラックス(H)、潜熱フラックス(E)の日変化図(6月29日)。図中には正味放射量(Rnet)も合わせて示した。

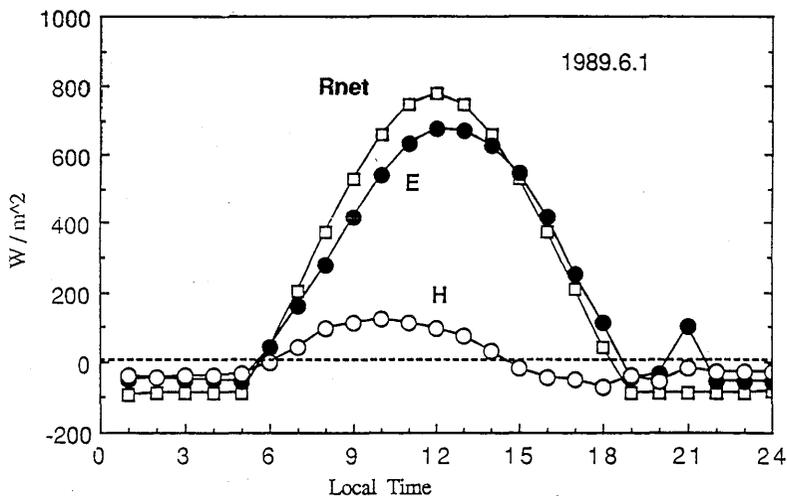


図1-22 ペンマン法による顕熱フラックス，潜熱フラックスの日変化図（6月1日）。

れる。

一方，森林の表面が比較的乾燥していたと思われる6月1日の結果を図1-22に示す。この日は日中南東の風で風速も小さかった。計算によって求められた顕熱は午前中正となり，この時のボーエン比も0.3前後を示した。6月29日の例と比較すると，潜熱は小さい結果を与える。これは，キャノピー層が乾燥しているため，森林内からの蒸発が29日の例よりも少なく，日中の有効エネルギーが顕熱フラックスと植物の蒸散による潜熱フラックスとに分けられたためであると考えられる。しかしながら，この例においても日中6時から18時の積算値で見ると，ボーエン比， B_o ，は1日の例で約0.1となり，森林公園におけるプロファイル観測による実測例 ($B_o = 0.1 \sim 0.3$, 三上・安田, 1988) と比較すると，ペンマン法では潜熱がやや大きめに計算されることが分かる。

6 まとめ

大気と地表とのエネルギー交換過程を観測的に明らかにするために，秋田八郎瀧の大麦畑と，国営武蔵丘陵森林公園において，野外観測を実施した。

八郎瀧においては，飽和草地上におけるダルトン数とスタントン数が求められ，低層スタントン数 St^{-1} は12.1，また低層ダルトン数 Da^{-1} は38.2という結果を得た。さらに，渦相関法によるフラックスの直接測定の結果と比較することにより，ダルトン数とスタントン数を用いたバルクパラメタリゼーションが飽和草地上で有効であることがわかった。

武蔵丘陵森林公園における繫留気球観測の風速プロファイルデータから、丘陵森林地帯上における粗度高とゼロ面変位が求められ、その結果粗度高として2.16 mが、ゼロ面変位として28.0 mが得られた。また、得られた粗度パラメーターと地形因子との関係が調べられ、複雑地形上においては平均標高からの偏差の標準偏差を地形因子として用いたパラメータ化が有効であることがわかった。

また、森林キャノピー層の群落構造を表現するパラメーターであるキャノピーフローインデックスが、キャノピー層内の風速プロファイル観測により求められた。その結果、武蔵丘陵の雑木林では、群落構造が葉面積密度の密な樹冠部と疎な樹幹部の2層に分けられることがわかった。

森林上の気象特性の把握と蒸発散量の評価を目的として、森林公園内の記念塔上で気温・湿度・風向風速の連続観測を実施し、森林上の気象特性について都市域のデータと比較して解析を行った。また、記念塔上での連続気象観測データを用いて、ペンマン法による森林上の蒸発散量の簡単な評価も試みた。

謝辞 秋田県八郎潟の観測にあたっては、秋田県立農業短期大学に同大学属農場を観測場所として提供していただいた。また、同大学守屋高雄助教授には大麦畑の土壌水分についてご教示いただいた。さらに、森林公園の観測にあたっては、建設省関東地方建設局国営武蔵丘陵森林公園管理所ならびに(財)公園緑地管理財団武蔵管理センターに、公園の使用について許可していただき、観測の便宜を計っていただいた。観測にあたっては、気象研究所応用気象研究部の田中豊顕^{*1}、成瀬 弘、岡田菊夫、栗田 進、高橋俊二の各氏ならびに防災科学技術センター(当時)の内藤玄一^{*2}氏に協力していただいた。ここに深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 三上正男・安田延壽, 1987: 森林丘陵地帯上のダルトン数について, 日本気象学会 1987年秋季大会講演予稿集.
- 三上正男・安田延壽, 1988: 森林草地, 半乾燥地からの蒸発散量, 天気, 35, 662-667.
- 竹内清秀・近藤純正, 1981: 大気科学講座 1 地表に近い大気, 東京大学出版会, 226p.
- 戸矢時義, 1985: 陸地蒸発量の評価——接地気象観測システムと蒸発のパラメタリゼーション, 気象研究所昭和60年度研究発表会誌, 91-105.
- 安田延壽・三上正男, 1987: 森林丘陵地帯の風速分布と粗度, 日本気象学会 1987年秋季大会講演予稿集.
- 安田延壽・鈴木紀行・三上正男・戸矢時義, 1988: Penman法による地中熱フラックスの評価, 日本気象学会 1988年秋季大会予稿集.

^{*1}現所属: 気象研究所気象衛星・観測システム研究部。 ^{*2}現所属: 防衛大学校。

- Barton, I. J., 1979 : A Parameterization of the evaporation from nonsaturated surfaces. *J. Appl. Met.*, **18**, 43-47.
- Brutsaert, W., 1975a : A theory for local evaporation (or heat transfer) from rough and smooth surfaces at ground level. *Water Resource Res.*, **11**, 543-550.
- Brutsaert, W., 1975b : The roughness length for water vapor, sensible heat and other scalars. *J. Atmos. Sci.*, **32**, 2028-2031.
- Brutsaert, W., 1979 : Heat and mass transfer to and from surface with dense vegetation or similar permeable roughness. *Bound. Layer Met.*, **16**, 365-388.
- Brutsaert, W., 1982 : Evaporation into the atmosphere, D. Reidel, Dordrecht, Holland, 299 pp.
- Brutsaert, W. and W. P. Kustas, 1985 : Evaporation and humidity profiles for neutral conditions over rugged hilly terrain. *J. Climate Appl. Met.*, **24**, 915-923.
- Chahumeau, F., R. L. Desjardins, E. Brach and R. Verdon, 1989 : A micrometeorological facility for eddy flux measurements of CO₂ and H₂O. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **6**, 193-200.
- Chamberlain, A. C., 1968 : Transport of gases to and from surfaces with bluff and wave-like roughness elements. *Quart. J. R. Met. Soc.*, **94**, 318-332.
- Chionco, R. M., 1978 : Analysis of canopy index value for various canopy densities. *Bound. Layer Met.*, **15**, 81-93.
- Dyer, A. J. and B. B. Hicks, 1970 : Flux-gradient relationships in the constant flux layer. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **96**, 715-721.
- Garratt, J. R., 1978 : Transfer characteristics for a heterogeneous surface of large aerodynamic roughness. *Quart. J. R. Met. Soc.*, **104**, 491-502.
- Hicks, B. B., P. Hyson and C. J. Moore, 1975 : A study of eddy fluxes over a forest. *J. Appl. Meteorol.*, **14**, 58-66.
- Hicks, B. B., M. L. Wesely, R. L. Coulter, R. L. Hart, J. L. Durham, R. Speer and D. H. Stedman, 1986 : An experimental study of sulfur and NO_x fluxes over grassland. *Bound. Layer Met.*, **34**, 103-121.
- Jaeger, L., B. A. Hutchison and B. B. Hicks, 1985 : The forest-atmosphere interaction. D. Reidel Publ. Co., 71-90, 684 pp.
- Kinoshita, N. and H. Niino, 1990 : On the depth of the surface layer in the turbulent Ekman layer. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **68**, 747-751.
- Kondo, J., 1971 : Relationship between the roughness coefficient and other aerodynamic parameters. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **49**, 121-124.
- Kondo, J., 1975 : Air-sea bulk transfer coefficient in diabatic conditions. *Bound. Layer Met.*, **9**, 91-112.
- Kondo, J. and S. Akashi, 1976 : Numerical studies on the two-dimensional flow in horizontally homogeneous canopy layers. *Bound. Layer Met.*, **10**, 255-272.
- Kondo, J. and H. Yamazawa, 1986 : Bulk transfer coefficient over a snow surface. *Bound. Layer Met.*, **34**, 123-135.

- Kondo, J. and A. Kawanaka, 1986 : Numerical study on the bulk heat transfer coefficient for a variety of vegetation types and densities. *Bound. Layer Met.*, **37**, 285-296.
- Koprov, B. M. and D. Yu. Sokolov, 1973 : Spatial correlation functions of velocity and temperature components in the surface layer of the atmosphere. *Izv. Atmos. Oceanic Phys.*, **9**, 178-182.
- Kustas, W. P. and W. Brutsaert, 1986 : Wind profile constants in a neutral atmospheric boundary layer over complex terrain. *Bound. Layer Met.*, **34**, 35-54.
- Lettau, H., 1969 : Note on aerodynamic roughness-parameter estimation on the basis of roughness-element description. *J. Appl. Meteorol.*, **8**, 828-832.
- Monteith, J. L., 1975 : Vegetation and the atmosphere. Academic Press, London, 278 pp.
- Oak, T. R., 1987 : Boundary layer climates. —2nd ed., Methuen, London, 416 pp.
- Owen, P. R. and W. R. Thomson, 1963 : Heat transfer across rough surfaces. *J. Fluid Mech.*, **15**, 321-334.
- Parlange, M. B. and W. Brutsaert, 1989 : Regional roughness of the landes forest and surface shear stress under neutral conditions. *Bound. Layer Met.*, **48**, 69-81.
- Penman, H. L., 1948 : Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. A.*, **193**, 120-145.
- Raupach, M. R., A. S. Thom and I. Edwards, 1980 : A wind-tunnel study of turbulent flow close to regularly arrayed rough surfaces. *Bound. Layer Met.*, **18**, 373-397.
- Stanhill, G., 1969 : A simple instrument for the field measurement of turbulent diffusion flux. *J. Appl. Meteorol.*, **8**, 509-513.
- Stull, R. B., 1988 : An introduction to boundary layer meteorology. K. Academic Publishers, 666 pp.
- Thom, A. S., 1971 : Momentum absorption by vegetation. *Quart. J. R. Met. Soc.*, **97**, 414-428.
- Thompson, O. E. and R. T. Pinker, 1975 : Wind and temperature profile characteristics in a tropical evergreen forest in Thailand. *Tellus*, **27**, 562-573.
- Thompson, R. S., 1978 : Note on the aerodynamic length for complex terrain. *J. Appl. Meteorol.*, **17**, 1402-1403.
- Toya, T. and N. Yasuda, 1988 : Parameterization of evaporation from a non-saturated bare surface for application in numerical prediction models. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **66**, 729-739
- Toya, T., M. Mikami and N. Yasuda, 1990 : A determination of the Dalton and Stanton number over a saturated barley field. *Bound. Layer Met.*, **52**, 377-395.
- Yasuda, N. and T. Toya, 1981 : Evaporation from non-saturated surface and surface moisture availability. *Pap. Met. Geophys.*, **32**, 89-98.
- Yasuda, N., J. Kondo, T. Sato, 1986 : Drainage flow observed in a V-shaped valley. *J. Meteorol. Soc. Japan*. **64**, 283-301.

Appendix 1 : 1985 年度観測

飽和草地上における各種フラックスの測定とバルク係数の決定を目的として、以下に示す4つのカテゴリーの観測が行なわれた。観測地点は、八郎潟干拓地の西部に位置する秋田県立農業短期大学実験圃場の大麦畑である。観測時間は、1985年12月5日7時30分より14時30分である。観測地点の概要については、本文を参照のこと。

(1) 平均プロファイル観測

高さ2mの観測塔を用いて、気温・湿度・風速の鉛直プロファイル観測を実施した(本文図1-4参照)。

気温は、白金抵抗測温体を感部とする通風式乾球温度計を用いて、地表面から21.5, 44.5, 83.5, 185.0 cmの4高度で測定を行なった。

湿度(絶対湿度)は、白金抵抗測温体を感部とする通風式湿球温度計を用いて、乾球・湿球温度より求められた。通風式湿球温度計の測定高度は、乾球温度計と同じ高さである。

風速は、三杯式微風速計(牧野応用測器 AF 750)を地表面から18.5, 30.0, 49.5, 92.0, 195.5 cmの5高度に設置し、測定が行なわれた。

測定されたデータは、10秒毎にスキャナからデータロガーに転送され、十分間平均値の生データとして記録した。解析には、生データから計算した30分平均値を用いた。観測期間を通じ全部で14個の30分平均値のデータが得られた。表A.1-1は、乾球・湿球温度の30分平均プロファイルデータである。データの単位は°Cで、 $T_{dry\ 1} \sim T_{dry\ 4}$ はそれぞれ高さ185 cmから21.5 cmの乾球温度を示し、 $T_{wet\ 1} \sim T_{wet\ 4}$ は高さ185 cmから21.5 cmの湿球温度を示す。また、表中のSur. Tは、放射温度計による地表面放射温度を示す。表A.1-2は、風速の30分平均プロファイルデータで、データの単位はm/s、 $U_1 \sim U_5$ はそれぞれ高さ195.5 cmから18.5 cmの5高度における風速を示す。

(2) 地上気象要素の観測

地上気象要素として、地表面放射温度と正味放射量の測定を実施した。また、気温・湿度のプロファイル観測のチェックを目的として、補助的に電動式通風乾湿計(吉野計器 SY-1型)による乾球・湿球温度の測定も実施した。

地表面放射温度の測定は、赤外放射温度計(松下通信 ER-2007)を高さ2m観測塔の上部に下向きに固定して行なった。

正味放射量の測定は、フンク式正味放射計(英弘精機 CN-11)を高さ1mの三脚に固定し、観測塔より2m離れた地点で行なった。

表A.1-1 八郎瀉大麦畑上における乾球・湿球温度の30分平均プロファイルデータ。
データの単位は°C, Timeの0730は7時30分を示す。

Hachirogata Barly Field
Dry and Wet Bulb Temperatures Profile Data
Date : 1985/12/5

RUN	Time	Tdry 1	Tdry 2	Tdry 3	Tdry 4	Sur. T	Twet 1	Twet 2	Twet 3	Twet 4
1	0730-0800	3.37	3.25	3.06	2.91	1.49	0.96	0.93	1.12	0.86
2	0800-0830	3.36	3.27	3.12	3.01	2.06	1.06	1.06	1.27	1.03
3	0830-0900	3.58	3.55	3.46	3.40	2.60	1.29	1.34	1.60	1.39
4	0900-0930	3.66	3.65	3.56	3.51	2.71	1.40	1.45	1.70	1.50
5	0930-1000	3.80	3.85	3.80	3.81	3.13	1.62	1.83	2.01	1.86
6	1000-1030	3.81	3.85	3.82	3.82	3.32	1.66	1.75	2.03	1.88
7	1030-1100	4.39	4.49	4.50	4.55	4.07	1.96	2.11	2.46	2.35
8	1100-1130	4.23	4.27	4.24	4.26	4.07	1.85	1.96	2.27	2.13
9	1130-1200	4.26	4.31	4.27	4.28	4.05	1.87	1.97	2.26	2.10
10	1200-1230	4.08	4.15	4.14	4.18	4.14	1.94	2.04	2.33	2.19
11	1230-1300	3.80	3.83	3.79	3.81	3.76	1.66	1.74	2.00	1.83
12	1300-1330	3.63	3.65	3.60	3.60	3.49	1.56	1.62	1.87	1.70
13	1330-1400	3.48	3.51	3.45	3.45	2.92	1.30	1.37	1.62	1.43
14	1400-1430	3.49	3.53	3.47	3.52	2.30	1.28	1.37	1.61	1.46

表A.1-2 八郎瀉大麦畑上における風速の30分平均プロファイルデータ。データの単位はm/s。

Hachirogata Barly Field
Wind Speed Profile Data
Date : 1985/12/5

RUN	Time	U1	U2	U3	U4	U5
1	0730-0800	3.94	3.16	2.46	1.92	1.56
2	0800-0830	3.98	3.24	2.52	1.96	1.58
3	0830-0900	3.22	2.62	2.04	1.58	1.26
4	0900-0930	3.54	2.86	2.22	1.74	1.40
5	0930-1000	3.50	2.82	2.20	1.70	1.36
6	1000-1030	3.44	2.78	2.16	1.70	1.40
7	1030-1100	3.82	3.12	2.44	1.90	1.52
8	1100-1130	4.24	3.50	2.74	2.14	1.74
9	1130-1200	5.20	4.20	3.28	2.62	2.08
10	1200-1230	5.30	4.28	3.36	2.60	2.14
11	1230-1300	5.08	4.12	3.22	2.54	2.06
12	1300-1330	4.84	3.94	3.10	2.42	2.02
13	1330-1400	5.20	4.18	3.24	2.54	2.06
14	1400-1430	4.38	3.52	2.74	2.14	1.74

表A.1-3 八郎瀧大麦畑上における30分平均の正味放射量データ。単位はW/m²。

Hachirogata Barly Field
 Net Radiation Data
 Date : 1985/12/5

RUN	Time	Rnet
2	0800-0830	35.1
3	0830-0900	51.5
4	0900-0930	68.6
5	0930-1000	76.6
6	1000-1030	112.6
7	1030-1100	124.1
8	1100-1130	112.2
9	1130-1200	122.9
10	1200-1230	122.4
11	1230-1300	95.1
12	1300-1330	79.0
13	1330-1400	82.9

地表面放射温度と正味放射量の出力信号は、プロフィールデータと同様にデータロガーに収録し、30分平均値を求めた。

表A.1-3は、正味放射計による30分平均正味放射量で、データの単位はW/m²である。なお、正味放射量データだけは正味放射計の校正を行なわなかったため、出力信号から物理量への変換にはメーカー検定値 ($7.0 \times 10^{-3} \text{mV/kWm}^{-2}$) をそのまま用いている。

(3)乱流変動量の観測

渦相関法による運動量、潜熱、顕熱の乱流フラックス輸送量の直接測定のため、風向・風速、気温、湿度の乱流変動量の観測を実施した。

風向・風速、気温の測定は、3次元超音波風速温度計(海上電気 DAT-310)を高さ1.5mの三脚に固定して行なった。また、湿度の測定には、ライマンアルファ湿度計(ERC Model BLR)を同じく三脚に固定して行なった。両センサー間の距離はおおよそ40cmである。

乱流データのアナログ出力値は磁気テープに記録され、解析にはアナログ信号を10Hzでデジタル化したものを用いた。観測データの収録は、10時30分より12時00分と12時30分より14時00分にかけて行なわれ、プロフィール観測の結果と比較するため30分平均のフラックス量を計算した。

表A.1-4は、渦相関法によって求められた顕熱・潜熱フラックス量ならびに平均風速と風向である。単位は、顕熱と潜熱がW/m²、風速がm/sそして風向がdegreesである。表のRUN No.

表A.1-4 渦相関法により求められた八郎瀧大麦畑上における潜熱、顕熱フラックス、
ならびに超音波風速温度計による30分平均風速と風向。表中、フラックスの
単位はW/m²、風速はm/s、風向は°を示す。

Hachirogata Barly Field
Flux Calculation by Eddy Correlation Method
Date : 1985/12/5

RUN No.	Time	顕熱	潜熱	平均風速	平均風向	ボーエン比
7	10:30-11:00	5.5	34.6	3.4	278	0.16
8	11:00-11:30	2.0	30.4	4.0	280	0.07
9	11:30-12:00	3.1	35.1	4.7	283	0.09
11	12:30-13:00	1.4	36.0	4.9	303	0.04
12	13:00-13:30	0.1	32.3	4.5	301	0.00
13	13:30-14:00	3.6	40.9	4.8	303	0.09

表A.1-5 八郎瀧大麦畑で得られた地表面付近の土壌水分量。重量の単位はgを示す。

Hachirogata Barly Field
Soil Water Measurement by Oven-Dry Method
Date : 1985/12/5

CUP No.	DATE	TIME	深さ	重量	乾燥重量	CUP重量	液相重量	含水率(%)	含水比(%)
1	12/5	10:40	-2cm	37.40	24.17	10.69	13.23	49.5	98.2
2	12/5	10:40	-2cm	43.23	28.83	10.86	14.40	44.5	80.1
3	12/5	10:40	-2cm	32.24	22.25	11.09	9.99	47.2	89.5
4	12/5	13:30	-2cm	39.12	25.15	11.12	13.97	49.9	99.6
5	12/5	13:30	-2cm	26.84	19.13	11.03	7.71	48.8	95.2
6	12/5	13:30	-2cm	22.10	17.42	11.11	4.68	42.6	74.2
A1+B1+B2	12/5	10:40	-2cm	241.17	172.02	99.48	69.15	48.8	95.3
A2+B3+B4	12/5	13:30	-2cm	239.50	174.17	99.35	65.33	46.6	87.3
A3+B5+B6	12/5	14:10	-2cm	236.97	164.76	99.26	72.21	52.4	110.2

は、プロフィールデータに対応している。

(4) 土壌水分の測定

地表面のウェットネスを調べるため、土壌カップを用いた土壌水分量の直接測定を行なった。測定は、12月45日の10時40分、13時30分ならびに14時10分の3回実施し、それぞれ観測塔の周辺3ヶ所で深さ2cmにおける土壌を土壌カップで採取した。土壌水分量は、オープンを用いた乾熱法で求めた。表A.1-5は、上記方法により得られた結果である。表中の各重量の単位はgで、重量は固相+液相+カップの重さを、乾燥重量は固相+カップの重さを示す。

Appendix 2 : 1986 年度観測

複雑地形上の粗度パラメーターと地形因子との関係を調べるため、1986年10月21日から24日にかけて埼玉県内の国営武蔵丘陵森林公園において野外観測を実施した。武蔵丘陵は、関東平野の北部に位置する丘陵地帯で、観測地点となった森林公園は、この丘陵地帯の中央に位置し、約300haの面積を占めている。観測地点周辺の平均標高は44.1mで、地形の起伏の標準偏差は約16mである。観測は、以下に示す4つのカテゴリーについて行なわれた。

(1) 境界層下部のプロファイル観測

境界層下部のプロファイル観測のために、繫留気球観測とパイバル観測を実施した。観測地点は、森林公園内の広さ約4haの運動広場で標高は60mである。繫留気球観測は、10月21日の13時30分から16時00分にかけて5回、10月24日の10時25分から16時00分にかけて6回実施した。測定項目は、気温・湿度・風向風速・気圧で、精度の良い鉛直プロファイルデータを得るために、地上から1m, 10m, 15m, 20m, 30m, 50m, 100m, 200mの8高度で2分間ずつ気球を静止させ、4秒毎に得られる生データを約30回収録し、その平均値を求めた。さらに、上昇時と下降時の各高度での平均値の単純平均を求めて鉛直プロファイルデータとした。表A.2-1は、こうして得られた風向、風速、気圧、気温、湿度のプロファイルデータである。表中のHeightは観測地点からの高さ、Height above M.L.は周辺の平均標高からの高さを示す。

繫留気球観測は、地上の風速が8m/s以上の気象条件では実施できない。1986年10月23日は、地上風速が強く繫留気球観測が行なえなかったため、パイバル観測を実施した。観測時間は、15時30分から16時20分にかけてで、10分毎に経緯儀を用いて風向、風速を求めた。表A.2-2に得られた結果を示す。表中のW.Speedは風速を示し、単位はm/sである。またDirectionは風向を示し、単位はdegreesである。

(2) キャンピアー層表面の放射温度測定

森林公園のパンザマスト上で、赤外放射温度計（松下通信 ER-2007）によるキャンピアー層表面の放射温度測定を実施した。測定は、10月22日9時46分より27日の12時49分にかけて行なわれ、打点式記録計に記録された。また、10月21日と23日には、ヘリコプターを利用して森林公園の上空約30mからスキャンした地表面放射温度の測定も試みた。用いた測器と記録計は、パンザマストの場合と同様である。

(3) キャンピアー層内部の気温と湿度のプロファイル観測

繫留気球観測を実施した運動広場より約400mほど南西に位置する松林内において、キャン

表A.2-1 (56頁まで続く) 繫留気球観測により得られた森林公園における風向・風速、気圧、気温、絶対湿度の鉛直プロファイルデータ。表中のHeightは、測定地点からの高度、Height above M.L.は、測定地点を中心とする10km四方の領域の平均標高からの高度を示す。

Musaahi Hill Forest Park Observation

KYTOON DATA

Date: 1986/10/21, 10/24

No. of RUN	Month. day	Time
1	10.21	13:28

Level	Height (m)	Height above M.L. (m)	W. Direction (deg)	W.Speed (m/sec)	Pressure (mb)	Temperature (deg)	a (g/m ³)
1	1.0	16.9	327	1.2	1014.4	16.7	6.37
2	13.1	29.0	150	1.6	1013.0	16.4	6.02
3	18.4	34.3	139	1.3	1012.4	16.4	6.00
4	23.8	39.7	140	1.7	1011.8	16.3	5.94
5	34.5	50.4	138	2.3	1010.6	16.1	5.82
6	54.5	70.4	137	1.8	1008.2	15.9	5.86
7	105.0	120.9	154	2.4	1002.1	15.3	5.58
8	204.0	219.9	154	1.4	990.3	14.3	5.37

No. of RUN	Month. day	Time
2	10.21	14:10

Level	Height (m)	Height above M.L. (m)	W. Direction (deg)	W.Speed (m/sec)	Pressure (mb)	Temperature (deg)	a (g/m ³)
1	1.0	16.9	331	1.0	1013.9	17.4	6.55
2	13.1	29.0	104	1.6	1012.6	16.8	6.08
3	18.5	34.4	92	1.5	1012.1	16.9	6.22
4	23.8	39.7	103	2.1	1011.4	16.7	6.04
5	34.0	49.9	106	2.2	1010.2	16.5	6.03
6	54.5	70.4	84	2.7	1007.8	16.3	5.97
7	104.5	120.4	101	3.0	1001.8	15.6	5.78
8	202.5	218.4	88	2.2	990.1	14.7	5.55

No. of RUN	Month. day	Time
3	10.21	14:54

Level	Height (m)	Height above M.L. (m)	W. Direction (deg)	W.Speed (m/sec)	Pressure (mb)	Temperature (deg)	a (g/m ³)
1	1.0	16.9	331	0.8	1013.8	16.7	7.12
2	13.3	29.2	46	1.3	1012.5	16.9	6.59
3	18.4	34.3	41	1.4	1012.0	16.9	6.59
4	23.8	39.7	56	1.8	1011.3	16.8	6.50
5	34.1	50.0	43	1.9	1010.1	16.8	6.42
6	54.5	70.4	46	2.8	1007.7	16.5	6.28
7	103.0	118.9	51	3.1	1001.5	16.0	6.03
8	201.0	216.9	65	3.1	989.9	15.1	5.78

No. of RUN	Month. day	Time
4	10.21	15:20

Level	Height (m)	Height above M.L. (m)	W. Direction (deg)	W.Speed (m/sec)	Pressure (mb)	Temperature (deg)	a (g/m ³)
1	1.0	16.9	327	0.3	1013.5	15.9	7.98
2	13.4	29.3	8	0.9	1012.2	16.6	7.29
3	18.5	34.4	28	0.9	1011.6	16.5	7.22
4	23.7	39.6	28	1.4	1011.0	16.7	7.17
5	33.9	49.8	40	2.0	1009.8	16.5	7.02
6	54.5	70.4	39	2.5	1007.5	16.3	6.85
7	101.5	117.4	32	3.5	1001.4	15.9	6.59
8	200.5	216.4	40	3.7	989.7	15.0	6.17

No. of RUN	Month. day	Time
5	10.21	15:44

Level	Height (m)	Height above M.L. (m)	W. Direction (deg)	W.Speed (m/sec)	Pressure (mb)	Temperature (deg)	a (g/m ³)
1	1.0	16.9	330	0.2	1013.3	14.9	8.28
2	13.4	29.3	354	0.7	1011.9	15.7	7.59
3	18.4	34.3	15	1.1	1011.3	15.9	7.58
4	23.8	39.7	23	1.7	1010.6	16.1	7.49
5	34.0	49.9	26	2.3	1009.4	16.1	7.36
6	54.5	70.4	28	3.1	1007.1	16.0	7.21
7	100.5	116.4	25	4.4	1001.2	15.8	6.84
8	200.0	215.9	22	4.2	989.4	15.0	6.56

No. of RUN	Month. day	Time
6	10.24	10:25

Level	Height (m)	Height above M.L. (m)	W. Direction (deg)	W.Speed (m/sec)	Pressure (mb)	Temperature (deg)	a (g/m ³)
1	1.0	16.9	320	0.6	1020.0	13.1	5.80
2	11.6	27.5	12	1.8	1018.8	12.6	5.51
3	16.6	32.5	346	1.8	1018.3	12.2	5.36
4	22.9	38.8	5	1.4	1017.6	12.4	5.51
5	32.3	48.2	332	2.1	1016.4	11.9	5.28
6	53.2	69.1	339	1.7	1014.0	11.6	5.14
7	100.5	116.4	346	2.1	1007.9	11.3	5.16
8	201.0	216.9	342	2.6	995.7	10.2	4.85

No. of RUN	Month. day	Time
7	10.24	10:54

Level	Height (m)	Height above M.L. (m)	W. Direction (deg)	W.Speed (m/sec)	Pressure (mb)	Temperature (deg)	a (g/m ³)
1	1.0	16.9	323	0.7	1019.7	13.4	5.94
2	10.0	25.9	23	1.6	1018.7	13.4	5.68
3	15.1	31.0	12	1.3	1018.2	13.0	5.57
4	22.0	37.9	39	1.4	1017.4	12.9	5.54
5	31.1	47.0	355	1.4	1016.3	12.6	5.39
6	51.6	67.5	343	1.8	1013.9	12.2	5.29
7	101.5	117.4	350	2.0	1007.6	11.7	5.23
8	202.5	218.4	350	2.2	995.3	10.7	5.02

No. of RUN	Month. day	Time
8	10.24	11:25

Level	Height (m)	Height above M.L. (m)	W. Direction (deg)	W.Speed (m/sec)	Pressure (mb)	Temperature (deg)	a (g/m ³)
1	1.0	16.9	324	0.8	1019.2	13.9	5.03
2	10.0	25.9	78	1.4	1018.3	13.6	5.68
3	15.4	31.3	96	1.4	1017.7	13.5	5.71
4	21.8	37.7	108	1.5	1017.0	13.2	5.55
5	31.0	46.9	80	1.2	1015.9	13.2	5.60
6	51.4	67.3	324	1.3	1013.5	12.9	5.50
7	104.0	119.9	336	1.9	1007.1	12.2	5.28
8	204.0	219.9	2	1.7	994.9	11.3	5.19

No. of RUN	Month. day	Time
9	10.24	12:00

Level	Height (m)	Height above M.L. (m)	W. Direction (deg)	W.Speed (m/sec)	Pressure (mb)	Temperature (deg)	a (g/m ³)
1	1.0	16.9	324	0.9	1018.6	14.2	6.11
2	10.0	25.9	167	1.3	1017.6	13.8	5.76
3	15.3	31.2	158	1.2	1017.0	13.7	5.75
4	21.4	37.3	195	1.1	1016.3	13.6	5.67
5	30.5	46.4	236	0.5	1015.2	13.5	5.73
6	50.9	66.8	278	0.8	1012.7	13.//	5.63
7	105.0	120.9	338	1.8	1006.3	12.6	5.42
8	202.0	217.9	10	1.4	994.2	11.6	5.29

No. of RUN	Month. day	Time
10	10.24	12:37

Level	Height (m)	Height above M.L. (m)	W. Direction (deg)	W.Speed (m/sec)	Pressure (mb)	Temperature (deg)	a (g/m ³)
1	1.0	16.9	320	0.5	1018.2	14.3	6.53
2	10.1	26.0	299	0.6	1017.2	13.8	6.03
3	15.2	31.1	313	0.9	1016.5	13.7	5.87
4	21.3	37.2	321	0.7	1015.7	13.7	5.87
5	30.0	45.9	275	0.2	1014.6	13.6	5.78
6	50.5	66.4	313	0.8	1012.0	13.4	5.73
7	105.0	120.9	358	1.2	1005.6	12.9	5.56
8	200.0	215.9	23	1.1	993.5	11.9	5.39

No. of RUN	Month. day	Time
11	10.24	13:03

Level	Height (m)	Height above M.L. (m)	W. Direction (deg)	W.Speed (m/sec)	Pressure (mb)	Temperature (deg)	a (g/m ³)
1	1.0	16.9	310	0.4	1018.0	14.4	6.54
2	10.1	26.0	316	0.6	1017.0	13.9	6.05
3	15.1	31.0	311	1.3	1016.3	13.8	5.83
4	21.3	37.2	316	1.3	1015.5	13.8	5.80
5	30.2	46.1	338	0.5	1014.2	13.7	5.66
6	50.5	66.4	351	0.9	1011.7	13.5	5.58
7	105.0	120.9	0	1.1	1005.4	12.9	5.45
8	205.0	220.9	359	1.0	993.4	11.9	5.26

No. of RUN	Month. day	Time
12	10.24	13:28

Level	Height (m)	Height above M.L. (m)	W. Direction (deg)	W.Speed (m/sec)	Pressure (mb)	Temperature (deg)	a (g/m ³)
1	1.0	16.9	311	0.6	1017.6	14.6	6.13
2	10.0	25.9	325	0.7	1016.5	14.2	6.03
3	15.1	31.0	312	1.0	1015.9	14.0	5.74
4	21.3	37.2	340	1.6	1015.1	13.8	5.52
5	30.2	46.1	356	1.3	1013.9	13.7	5.52
6	50.3	66.2	355	1.5	1011.4	13.5	5.34
7	104.5	120.4	340	1.3	1005.3	13.0	5.31
8	205.0	220.9	324	0.8	993.3	12.0	5.13

No. of RUN	Month. day	Time
13	10.24	13:57

Level	Height (m)	Height above M.L. (m)	W. Direction (deg)	W.Speed (m/sec)	Pressure (mb)	Temperature (deg)	a (g/m ³)
1	1.0	16.9	318	0.8	1017.2	14.5	6.07
2	10.0	25.9	64	0.6	1016.2	14.2	6.00
3	15.2	31.1	40	0.3	1015.6	14.1	5.86
4	21.3	37.2	21	0.7	1014.9	14.0	5.75
5	30.3	46.2	7	0.9	1013.9	13.8	5.82
6	50.3	66.2	7	1.1	1011.4	13.6	5.74
7	102.0	117.9	352	1.2	1005.3	13.1	5.67
8	200.0	215.9	342	1.0	993.3	12.1	5.48

No. of RUN	Month. day	Time
14	10.24	14:23

Level	Height (m)	Height above M.L. (m)	W. Direction (deg)	W.Speed (m/sec)	Pressure (mb)	Temperature (deg)	a (g/m ³)
1	1.0	16.9	320	0.6	1017.5	14.3	7.14
2	10.0	25.9	78	0.5	1016.5	14.1	6.42
3	15.2	31.1	99	0.1	1015.7	14.2	6.43
4	21.3	37.2	20	0.3	1015.0	14.1	6.30
5	30.5	46.4	7	0.5	1014.0	13.9	6.34
6	50.3	66.2	5	0.8	1011.5	13.8	6.25
7	100.0	115.9	3	1.2	1005.2	13.3	6.04
8	200.0	215.9	354	1.2	993.3	12.3	5.84

No. of RUN	Month. day	Time
15	10.24	14:53

Level	Height (m)	Height above M.L. (m)	W. Direction (deg)	W.Speed (m/sec)	Pressure (mb)	Temperature (deg)	a (g/m ³)
1	1.0	16.9	314	0.1	1017.5	14.1	8.50
2	10.1	26.0	333	0.1	1016.5	13.8	7.68
3	15.1	31.0	341	0.1	1015.8	13.9	7.46
4	21.3	37.2	3	0.7	1014.9	14.0	6.76
5	30.7	46.6	356	0.8	1013.7	13.9	6.76
6	50.4	66.3	352	1.1	1011.3	13.8	6.59
7	102.0	117.9	350	1.3	5.0	13.3	6.40
8	205.0	220.9	348	1.4	993.0	12.3	6.17

No. of RUN	Month. day	Time
16	10.24	15:23

Level	Height (m)	Height above M.L. (m)	W. Direction (deg)	W.Speed (m/sec)	Pressure (mb)	Temperature (deg)	a (g/m ³)
1	1.0	16.9	324	0.1	1017.3	13.0	8.46
2	9.9	25.8	292	0.2	1016.1	12.8	8.07
3	15.1	31.0	336	0.3	1015.5	13.1	7.91
4	21.3	37.2	344	0.9	1014.6	13.8	7.08
5	30.6	46.5	336	1.0	1013.3	13.9	6.98
6	50.7	66.6	337	1.4	1010.9	13.8	6.81
7	104.5	120.4	334	1.4	1004.7	13.3	6.76
8	205.0	220.9	344	1.5	992.6	12.4	6.50

ピー内の温度、湿度プロファイル観測を実施した。温度と湿度は、電動式通風乾湿計（吉野計器 SY-1 型）の水銀温度計を小型の白金抵抗測温体に交換したものをを用いて測定し、連続データを打点式記録計に記録した。測定は、松林内にアルミ製の二段式はしごを固定し、地上より 3.5 m, 6.9 m, 12.65 m の高さに通風乾湿計を固定して行なった。測定を行なった松林の平均樹高は、約 13 m である。表 A. 2-3 に上記の方法により得られた結果を示す。表中のデータの単位は°Cである。

(4) 土壌水分の測定

森林公園内の地表面のウェットネスを調べるため、土壌カップを用いた土壌水分量の測定を行なった。測定地点は、放射温度を測定した雑木林 (B1 点)、キャノピー内プロファイル測定を行なった松林 (B3 点) ならびに繫留気球観測を実施した運動広場に隣接する雑木林 (A 点) の 3ヶ所である。土壌カップによるサンプルの採土は、10月23日の11時と15時に行ない、各地点毎に3ヶ所で深さ 2 cm における土壌を採取し、オープンを用いた乾熱法により土壌水分を求めた。表 A. 2-4 は、上記方法により得られた結果である。表中の各重量の単位は g で、重量は固相+液相+カップの重さを、乾燥重量は固相+カップの重さを示す。

表A.2-2 パイバル観測により得られた森林公園における風速と風向の鉛直プロファイルデータ。データの単位は、風速がm/s, 風向が°を示す。表中、P-1~P-6とあるのはラン番号, 15:31とあるのは15時31分を示す。

Pilot Balloon Observation
Forest Park 1986.10.23

P-1 15:31

Level	Height(m)	Height above M.L.	W. Speed	Direction
1	42	57.9	5.5	16
2	129	144.9	11.3	286
3	208	223.9	10.8	279
4	284	299.9	9.9	279
5	349	364.9	11.8	289
6	389	404.9	11.9	291
7	423	438.9	11.9	294
8	476	491.9	15.9	291

P-2 15:40

Level	Height(m)	Height above M.L.	W. Speed	Direction
1	33	48.9	4.4	39
2	114	129.9	10.7	292
3	190	205.9	13.9	290
4	246	261.9	13.5	288
5	303	318.9	14.3	289
6	358	373.9	13.5	292
7	411	426.9	16.9	294
8	464	479.9	12.2	295

P-3 15:50

Level	Height(m)	Height above M.L.	W. Speed	Direction
1	36	51.9	5.1	47
2	101	116.9	9	299
3	151	166.9	10.7	291
4	197	212.9	11.9	291
5	251	266.9	13.1	292
6	302	317.9	11.9	291
7	347	362.9	11.4	291
8	390	405.9	10.2	292

P-4 16:00

Level	Height(m)	Height above M.L.	W. Speed	Direction
1	27	42.9	4.8	306
2	96	111.9	7.3	296
3	172	187.9	11.2	290
4	226	241.9	12.5	294
5	266	281.9	11.8	298
6	304	319.9	12	298
7	349	364.9	13.4	299
8	399	414.9	12.8	299

P-5 16:10

Level	Height(m)	Height above M.L.	W. Speed	Direction
1	32	47.9	5.3	29
2	98	113.9	8.2	304
3	155	170.9	11.1	298
4	201	216.9	10.8	298
5	248	263.9	11.8	299
6	299	314.9	12	299
7	355	370.9	13.9	297
8	406	421.9	11.1	296

P-6 16:20

Level	Height(m)	Height above M.L.	W. Speed	Direction
1	27	42.9	5.3	31
2	79	94.9	7.7	303
3	134	149.9	9.7	304
4	191	206.9	10.1	296
5	236	251.9	11.6	295
6	270	285.9	10.5	295
7	305	320.9	11.8	297
8	347	362.9	11.1	297

表A.2-3 (次頁まで続く) 森林公園内のキャノピー層内の乾球・湿球温度プロファイルデータ。表中の1ch, 3ch, 5chは、各々地上12.65m, 6.9m, 3.5mにおける乾球温度, 2ch, 4ch, 6chは、各々地上12.65m, 6.9m, 3.5mにおける湿球温度を示す(単位は°C)。

Musashi Hill Forest Park
 Canopy Temperature, Humidity Profile Data
 Date: 1986/10/21-24

測定項目及び高度

CH	項目	高度
1	Tdry	12.65m
2	Twet	12.65m
3	Tdry	6.9m
4	Twet	6.9m
5	Tdry	3.5m
6	Twet	3.5m

年月日	時分	1ch	2ch	3ch	4ch	5ch	6ch
1986/10/21	13:30	16.85	12.05	16.65	10.55	16.60	10.50
1986/10/21	14:00	17.10	12.25	16.87	10.75	16.83	10.68
1986/10/21	14:30	16.98	12.32	16.83	10.92	16.83	10.93
1986/10/21	15:00	16.73	12.23	16.53	10.95	16.53	10.95
1986/10/21	15:30	15.98	11.93	15.90	10.73	15.90	10.73
1986/10/21	16:00	15.10	11.35	15.02	10.30	14.93	10.33
1986/10/21	16:30	14.30	10.87	14.00	9.88	13.70	9.92
1986/10/21	17:00	13.77	10.43	13.20	9.52	12.68	9.48
1986/10/21	17:30	12.90	10.07	12.63	9.25	12.20	9.15
1986/10/21	18:00	12.38	9.90	12.31	9.18	11.90	9.03
1986/10/21	18:30	11.33	9.73	11.47	9.25	11.47	9.15
1986/10/21	19:00	11.07	9.42	11.03	9.10	11.00	8.97
1986/10/21	19:30	10.58	9.10	10.47	8.77	10.38	8.68
1986/10/21	20:00	10.23	8.93	10.10	8.57	9.97	8.50
1986/10/21	20:30	10.17	8.75	10.07	8.40	10.07	8.29
1986/10/21	21:00	10.10	8.73	9.97	8.41	9.87	8.40
1986/10/21	21:30	10.20	8.80	10.17	8.45	9.97	8.40
1986/10/21	22:00	10.08	8.80	9.73	8.47	9.50	8.37
1986/10/21	22:30	9.78	8.70	9.48	8.43	9.37	8.43
1986/10/21	23:00	9.63	8.55	9.39	8.43	9.39	8.43
1986/10/21	23:30	9.30	8.47	9.18	8.35	9.17	8.35
1986/10/22	0:00	9.17	8.30	8.99	8.18	8.95	8.13
1986/10/22	0:30	9.20	8.50	8.92	8.20	8.83	8.07
1986/10/22	1:00	9.27	8.47	9.05	8.25	9.03	8.13
1986/10/22	1:30	8.78	8.25	8.77	8.10	8.77	8.00
1986/10/22	2:00	9.07	8.13	9.03	8.01	9.03	7.91
1986/10/22	2:30	9.03	8.09	8.90	8.00	8.87	7.87
1986/10/22	3:00	9.22	8.18	9.07	8.08	9.07	7.97
1986/10/22	3:30	9.87	8.63	9.67	8.40	9.55	8.20
1986/10/22	4:00	9.99	8.70	9.88	8.43	9.87	8.33

1986/10/22	4:30	10.47	8.97	10.30	8.68	10.27	8.68
1986/10/22	5:00	10.67	9.03	10.43	8.70	10.27	8.73
1986/10/22	5:30	10.57	9.15	10.50	8.83	10.50	8.87
1986/10/22	6:00	10.63	9.17	10.63	9.00	10.63	9.00
1986/10/22	6:30	10.70	9.30	10.70	9.08	10.70	9.08
1986/10/22	7:00	10.75	9.60	10.60	9.50	10.60	9.50
1986/10/22	7:30	11.01	9.95	11.01	9.87	11.01	9.87
1986/10/22	8:00	11.10	10.10	11.10	10.00	11.10	9.90
1986/10/22	8:30	11.67	10.53	11.67	10.20	11.67	10.20
1986/10/22	9:00	11.43	11.00	11.43	10.95	11.43	10.95
1986/10/22	9:30	12.20	11.73	12.20	11.73	12.20	11.73
1986/10/22	10:00	14.23	13.27	14.23	13.27	14.23	13.27
1986/10/22	10:30	15.53	14.00	15.33	13.77	15.13	13.77
1986/10/22	11:00	17.40	14.20	16.87	14.37	16.30	14.27
1986/10/22	11:30	20.00	16.05	19.62	15.27	19.13	15.27
1986/10/22	12:00	21.10	16.27	28.50	15.20	20.37	15.17
1986/10/22	12:30	20.77	15.67	20.30	14.60	20.28	14.57
1986/10/22	13:00	19.62	14.53	19.53	13.38	19.53	13.38
1986/10/22	13:30	18.28	13.30	18.18	12.13	18.18	12.20
1986/10/22	14:00	18.57	13.28	18.31	12.07	18.25	12.08
1986/10/22	14:30	18.60	13.11	18.37	11.87	18.35	11.97
1986/10/22	15:00	18.20	13.01	17.95	11.72	17.95	11.87
1986/10/22	15:30	17.60	12.67	17.38	11.40	17.38	11.52
1986/10/22	16:00	16.58	12.13	16.45	11.10	16.45	11.12
1986/10/22	16:30	15.37	11.32	15.33	10.30	15.33	10.30
1986/10/22	17:00	14.53	10.92	14.53	10.03	14.53	10.03
1986/10/22	17:30	13.65	10.25	13.65	9.52	13.78	9.52
1986/10/22	18:00	12.88	9.80	12.88	9.00	12.88	9.00
1986/10/22	18:30	12.35	9.33	12.35	8.67	12.35	8.67
1986/10/22	19:00	12.10	8.87	12.10	8.17	12.10	8.17
1986/10/22	19:30	11.65	8.63	11.65	7.83	11.65	7.83
1986/10/22	20:00	11.17	8.18	11.17	7.65	11.17	7.65
1986/10/22	20:30	11.11	8.00	11.11	7.18	11.11	7.18
1986/10/22	21:00	10.97	7.80	10.97	7.03	10.97	7.03
1986/10/22	21:30	10.53	7.50	10.53	6.88	10.53	6.88
1986/10/22	22:00	10.13	7.20	10.13	6.67	10.13	6.67
1986/10/22	22:30	9.90	7.08	9.90	6.47	9.90	6.47
1986/10/22	23:00	9.60	6.93	9.60	6.27	9.60	6.27
1986/10/22	23:30	9.31	6.75	9.31	6.15	9.31	6.15
1986/10/23	0:00	8.95	6.47	8.87	5.93	8.80	5.93
1986/10/23	0:30	8.37	6.17	8.15	5.67	8.08	5.65
1986/10/23	1:00	7.67	5.83	7.48	5.37	8.33	5.23
1986/10/23	1:30	7.38	5.75	6.98	5.18	6.73	5.05
1986/10/23	2:00	7.13	5.57	6.72	5.02	6.28	4.87
1986/10/23	2:30	6.90	5.23	6.25	4.87	5.98	4.72
1986/10/23	3:00	7.08	5.25	6.55	4.78	6.10	4.58
1986/10/23	3:30	6.27	4.87	5.62	4.30	5.31	4.15
1986/10/23	4:00	6.36	4.80	5.40	4.05	4.83	3.85

表A.2-4 森林公園内雑木林 (A点, B1点), 松林 (B3点) における地表面付近 (深さ 2cm) の土壌水分量。表中の重量の単位はg。

Musashi Hill Forest Park
Soil Water Data
Date: 1986/10/23

Point	Time	重量	乾燥重量	CUP重量	含水率m(%)	含水比M(%)
A	10:50	35.64	27.46	10.42	32.4	48.0
A	10:50	29.54	22.96	10.94	35.4	54.7
A	10:50	38.14	27.52	11.08	39.2	64.6
B1	11:00	45.34	31.52	10.90	40.1	67.0
B1	11:00	39.08	28.04	11.11	39.5	65.2
B1	11:00	34.40	25.63	10.65	36.9	58.5
B3	11:10	26.50	21.22	11.03	34.1	51.8
B3	11:10	27.80	20.55	10.82	42.7	74.5
B3	11:10	29.89	23.42	10.63	33.6	50.6
A	14:50	31.27	24.99	10.87	30.8	44.5
A	14:50	23.85	17.92	10.76	45.3	82.8
A	14:50	30.45	23.22	10.93	37.0	58.8
B1	15:10	33.00	23.75	10.26	40.7	68.6
B1	15:10	27.63	20.07	10.49	44.1	78.9
B1	15:10	28.17	21.47	11.17	39.4	65.0
B3	14:40	27.61	21.39	10.94	37.3	59.5
B3	14:40	25.09	19.95	10.87	36.1	56.6
B3	14:40	25.65	21.30	10.94	29.6	42.0

Appendix 3 : 1987 年度観測

森林キャノピー層の群落構造を調べるために、キャノピー層内における風速と気温のプロファイル観測を実施した。観測地点は、国営武蔵丘陵森林公園の雑木林で、周辺のキャノピーの平均的な樹高は約 12 m である。観測は、雑木林内にある放送用のパンザマスト (高さ 19 m) を利用して行なった。観測は、1987 年 10 月 28 日に実施した。この時期はまだ紅葉は始まってはおらず、落葉はまだ見られない。

本観測の目的は、キャノピー層の構造を明らかにすることである。従って、キャノピー層内の風速の測定は、風速の絶対値ではなくキャノピー層トップにおける基準風速 U_{ref} との比 $U(z)/U_{ref}$ を正確に求めることが必要とされる。そこで、キャノピー層トップより約 7 m ほど高いパンザマストの頂上部に三杯式微風速計 (牧野応用測器 AF 750) を固定し、そこでの風速を基準風速とした。そして、キャノピー層内の風速プロファイルは三杯式微風速計を上下させて、一部キャノピー層外も含む 10 高度 (1, 3, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 14, 17 m) で約 2 分間ずつ風速計を静

止させ、基準風速計とのパルス信号のカウンtr比(U(z)/Uref)を求める方法を採用した。測定は、風速計を上下させながら9回行ない、各々の高度毎に平均パルスカウンtr比を求め、無次元風速の平均鉛直プロファイルとした。測定は、9時43分に開始し、15時35分に終了した。表A.3-1は、上記の方法によって得られた各レベルにおけるキャノピー内風速計のカウンtr数(U count)、基準風速計のカウンtr数(Uref.count)ならびに無次元風速(U/Uref)の生データである。表には各レベル毎の平均無次元風速(Umean)も合わせて示した。

キャノピー内の気温プロファイルの測定は、風速のプロファイルと同様に電動式通風乾湿計(吉野計器SY-1型)の水銀温度計を小型の白金抵抗測温体に交換したものを上下させ、一部キャノピー層外も含む10高度(1, 3, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 14, 17m)で約2分間ずつ温度計を静止させた時の平均気温を生データとした。気温のプロファイル測定の場合は、11時58分より15時35分にかけて3回温度計を上下させ、上昇時、下降時のプロファイルをそれぞれRUN 1からRUN 6とした。表A.3-2は上記の方法により得られた気温の鉛直プロファイルデータである。表中のデータの単位は、℃である。

表A.3-1 (次頁まで続く)森林公園内雑木林における三杯式微風速計の高度別カウンtr数と基準風速計(高度18.5mに固定)のカウンtr数。表にあわせて各高度毎の平均無次元風速を示す。各高度の地上からの高度は、別表に示した(単位m)。

Musashi Hill Forest Park
Canopy Wind Profile Raw Data
Date: 1987/10/28
From: 09:43
To: 15:35

Level	Height
1	1.43
2	3.43
3	5.43
4	7.43
5	9.43
6	10.43
7	11.43
8	12.43
9	14.43
10	17.43
Reference	19.5

Level:1 Umean= 0.238

U count	54	50	26	39	59	51	89	34
Uref. count	217	159	140	150	292	200	286	246
U/Uref	0.249	0.314	0.186	0.260	0.202	0.255	0.311	0.138

Level:2 Umean= 0.297

Ucount	52	33	67	51	76	78	91	73	62	28
Uref count	196	198	185	167	161	263	284	251	198	153
U/Uref	0.265	0.167	0.362	0.305	0.472	0.297	0.320	0.291	0.313	0.183

Level:3 Umean= 0.324

Ucount	79	32	55	106	73	49	69	34
Uref count	243	151	101	313	239	156	181	149
U/Uref	0.325	0.212	0.545	0.339	0.305	0.314	0.381	0.228

Level:4 Umean= 0.248

Ucount	16	16	16	16	44	79	91	80	59	37	1354
Uref count	279	285	172	144	154	312	365	316	227	211	4831
U/Uref	0.057	0.056	0.093	0.111	0.286	0.253	0.249	0.253	0.260	0.175	0.280

Level:5										Umean= 0.287
Ucount	73	52	49	32	76	61	78	89	61	29
Uref.count	188	204	229	81	193	216	325	238	225	195
U/Uref	0.388	0.255	0.214	0.395	0.394	0.282	0.240	0.374	0.271	0.149
Level:6										Umean= 0.263
Ucount	61	66	70	55	39	92	44	87	63	24
Uref count	296	229	162	145	121	332	273	318	217	196
U/Uref	0.206	0.288	0.432	0.379	0.322	0.277	0.161	0.274	0.290	0.122
Level:7										Umean= 0.313
Ucount	78	69	52	69	70	83	61	65	59	47
Uref count	213	157	105	187	230	263	215	270	262	187
U/Uref	0.366	0.439	0.495	0.369	0.304	0.316	0.284	0.241	0.225	0.251
Level:8										Umean= 0.372
Ucount	87	81	55	106	58	82	119	96	79	72
Uref count	216	183	75	168	167	267	383	300	281	207
U/Uref	0.403	0.443	0.733	0.631	0.347	0.307	0.311	0.320	0.281	0.348
Level:9										Umean= 0.765
Ucount	170	224	94	100	257	200	151	201	200	184
Uref count	254	261	142	126	339	296	220	235	230	224
U/Uref	0.669	0.858	0.662	0.794	0.758	0.676	0.686	0.855	0.870	0.821
Level:10										Umean= 0.997
Ucount	205	197	326	346	221					
Uref count	254	183	327	317	218					
U/Uref	0.807	1.077	0.997	1.091	1.014					

表A.3-2 森林公園内雑木林におけるキャノピー層内気温プロファイルデータ。データの単位は°C。

Musashi Hill Forest Park
 Canopy Temperature Profile Data
 Date : 1987/10/28 From : 11:58 To : 15:37

Time	11:58-12:28	12:33-12:59	13:49-14:15	14:18-14:41	14:44-15:09	15:12-15:35	
LEVEL	RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4	RUN 5	RUN 6	平均値
1	18.90	20.00	20.72	20.98		20.20	20.16
2	19.57	20.45	21.18	21.53	21.48	20.63	20.81
3	19.65	20.52	21.22	21.63	21.62	20.98	20.94
4	19.82	20.58	21.12	21.62	21.75	21.40	21.05
5	19.82	19.93	21.07	21.58	21.52	21.10	20.84
6	20.10	20.18	21.17	21.52	21.68	21.22	20.98
7	20.50	20.38	21.33	21.53	21.60	21.42	21.13
8	20.75	20.40	21.25	21.50	21.55	21.47	21.15
9	20.33	19.97	21.42	21.47	21.60	21.67	21.08
10	19.67		21.28		21.55		20.83