

風杯風速計と超音波風速温度計で 観測した風速と摩擦速度の特徴

Characteristics of Wind Speed and Friction Velocity Observed by the
Cup-Anemometers and sonic Anemometer-Thermometer

林 陽 生*・黄 水 鎮**

I まえがき

接地境界層における物理量の輸送量を知ることは重要な課題である。特に地表面が植被等に覆われている場合、輸送量はそこに卓越している粗度要素に固有な量となる。このような課題に対し、古くから多くの研究の中で用いられてきた観測方法は、風杯風速計を使った傾度法によるものである。一方、渦相関法により乱れを直接測定しようとする目的で、1950年ごろから超音波風速温度計 (Sonic Anemometer-Thermometer, SAT) の開発がおこなわれた。その後、SAT は実用化され (Mitsuta, 1966)、今日では、ほぼ野外観測用測器として定着している (光田, 1971)。

本報告は、牧草群落上の同一高度 (2 m) に3杯風速計とSTAを設置し、風速および摩擦速度について両者の比較をおこなった結果について述べる。また、これ等の結果に至る道程で、風向による特性についても言及する。

II 乱れによる運動量輸送

本報告で用いた傾度法と渦相関法の関係を知るため、始めに乱流輸送について考える。

今、図1に示すように、 x, z 平面に沿った2次元流中の、面積 dA を通しての運動量輸送を考えてみる。ここで、水平および垂直風速の平均成分と乱流成分を、それぞれ \bar{u}, \bar{w}, u', w' とすると瞬間風速 u, w は、 $u = \bar{u} + u', w = \bar{w} + w'$ と書き表わすことができる。平均時間を充分長くとり、

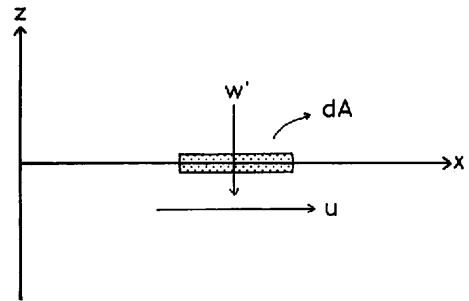


図1 2次元流中の輸送量の概念図

この時 $\bar{w} = 0$ とすれば、ある瞬間に dA を通る単位時間当りの質量流は $\rho w' dA$ となる。さらに、単位時間に dA を通る水平流の運動量は $\rho u w' dA$ である。この、単位面積当りに働く力がせん断応力とよばれ、その時間平均は、 $\tau = -\rho \overline{u w'}$ で示される。ところで、これを変形すると、

$$\begin{aligned} \rho \overline{u w'} &= -\frac{\rho}{T} \int_0^T (\bar{u} + u') w' dt \\ &= -\frac{\rho}{T} \left(\int_0^T \bar{u} w' dt + \int_0^T u' w' dt \right) \end{aligned}$$

ここで、 $\frac{1}{T} \int_0^T w' dt = 0$ だから、与式は結局、

$$\tau = -\rho \overline{u' w'} \dots \dots \dots (1)$$

となる。これがレイノルズ応力である。すなわち (1) 式を用いて、風速の微変動を測定すれば、運動量輸送に関する量を知ることができるわけである。

また、 τ は、

* 地球科学系 ** 地球科学研究科

$$\tau = -\bar{\rho} u' w' = \rho K_M \frac{d\bar{u}}{dz} \dots\dots\dots(2)$$

と書き表わすことができる。ここで、運動量拡散係数の概念として、 $K_M \sim u'l$ なる混合距離 l を考え、さらに、 l だけ離れた場所の平均流が乱れ成分に寄与する、すなわち、

$$u' \sim | \bar{u}(z-l) - \bar{u}(z) | \sim l \left| \frac{d\bar{u}}{dz} \right|$$

と考える。すると拡散係数は、

$$K_M = l^2 \left| \frac{d\bar{u}}{dz} \right| \dots\dots\dots(3)$$

となる。(2)、(3)式から K_M を消去すると、

$$\frac{\tau}{\rho} = l^2 \left| \frac{d\bar{u}}{dz} \right| \left| \frac{d\bar{u}}{dz} \right| \dots\dots\dots(4)$$

すなわち、 τ と $\frac{d\bar{u}}{dz}$ を測定すれば、 l を知ることができる。このことから、実験的に $l = kz$ の関係が得られている。ここで k はカルマン定数である。この関係を(4)式に代入すると、

$$\frac{\tau}{\rho} = k^2 z^2 \left| \frac{d\bar{u}}{dz} \right| \left| \frac{d\bar{u}}{dz} \right| \equiv u_*^2 \dots\dots\dots(5)$$

u_* は、地表面における $(-\frac{\tau}{\rho})^{1/2}$ で定義される、速度の次元を持つ量で、摩擦速度と呼ばれる。(5)式の右側の関係を積分し、積分定数 z_0 (粗度長) を導入して整理すると、一般に用いられる対数則を示す次式を得る。

$$\bar{u} = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \dots\dots\dots(6)$$

また、(6)式は、地面修正量 (d) を考慮すると

$$\bar{u} = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z-d}{z_0} \dots\dots\dots(7)$$

となる。(7)式は植物群落上の風速分布を示す場合に用いられる。本報告では、傾度法に対して(7)式、渦相関法に対して(1)式を用いた。

III 観測方法および解析方法

1) 観測方法

観測期間は、1980年11月12日から14日までの予備観測と、19日から23日までの本観測の、合計8日間である。観測場所は筑波大学水理実験センター

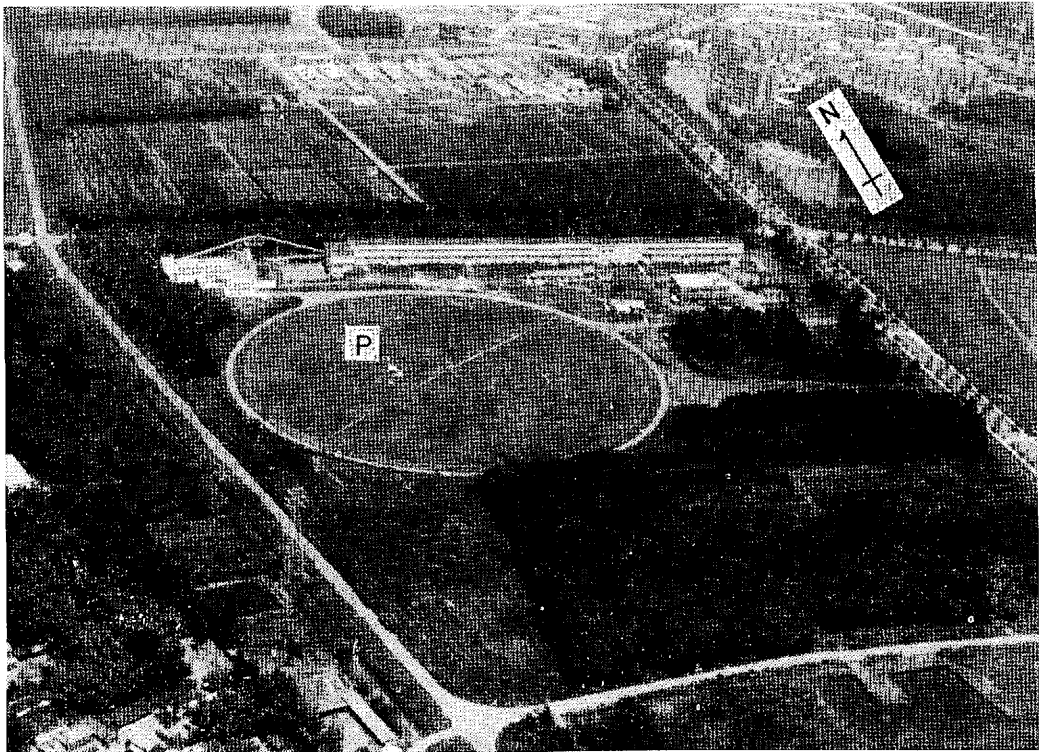


図2 観測圃場とその周辺 (1980年7月)、Pは観測点を示す

熱収支水収支観測圃場で、直径 160m の圃場の地表面は高さ 50~60cm の枯れた牧草で覆われていた。測定には、圃場の中心から北西側へ 40m 離れた地点に設置した高さ 8m のポールの高さ (1, 2, 4, 8 m) に取り付けられた 3 杯風速計および、このポールから南東側へ約 2m 離れた地点の高さ 2m に設置した超音波風速温度計を用いた。

図 2 に観測圃場の全景を示す。北西から北北東側は高さ約 10m の建物、西南西から北西、東から南南東側は高さ 10m の松林が分布している。北北東から東、南南東から西南西側は高さ 3m 程度の樹木や雑草が分布している。圃場外周から測定点までのフェッチは、西南西から北東側が 40~60m で短かく、東から南側は 100~120m で比較的長い。

3 杯風速計による測定値は、すでに開発されたデータ処理システム (林・古藤田, 1979) を用いて、10分平均値をデジタルプリントアウトし、器差補正を加えた後、30分平均値を計算した。SAT による測定値は、アナログチャートに記録した値を読み取り、10分平均および 30分平均を計算した。観測に用いた SAT の詳細な性能は、古藤田ほか (1978) に示されている。風向は、隣接した 30m 気象観測塔の高さ 1.6m における値を 30分ごとに記録紙から読み取って用いた。大気不安定度を計算する場合に必要な気温は、SAT で測定し

た値を用いた。

2) 解析方法

始めに、高度 2m の 3 杯風速計と SAT で求めた 30分平均風速を比較し、同時に風向との関係を調べた。摩擦速度の比較は、高度 2m における両測器の風速の差が 10% 以内で、風向変動の少ない期間についておこなった。また、3 杯風速計による 10分平均風速が 0.5 m/s 以下の場合には比較の対象から外した。

大気不安定度については、モニン・オブホフ長を次式で定義し、各平均時間に対応する不安定度パラメーター、 $\zeta (= -\frac{z}{L})$ を計算した。

$$L = -\frac{u_*^3 C_p \rho \theta}{k g q} \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 q は顕熱フラックスで、 $q = C_p \rho \overline{w' \theta'}$ で表わされる。 C_p は定圧比熱、 θ は絶対温度である。

摩擦速度 u_* を求めるに際して、(7) 式を整理して、

$$u_* = \frac{k \bar{u}}{\ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right)} \dots \dots \dots (9)$$

とする。さらに(1)、(5)式の関係から、

$$u_* = (-u'w')^{1/2} \dots \dots \dots (10)$$

と書き直すことができる。3 杯風速計の測定値に

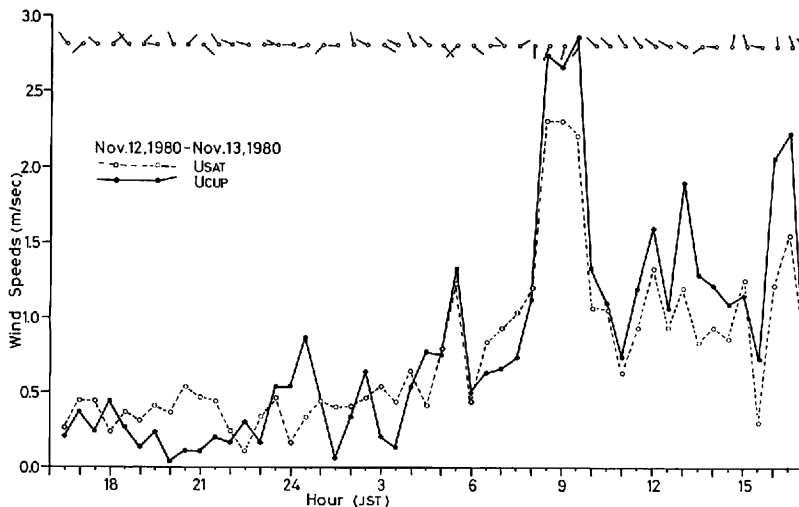


図 3-a 平均風速の時間変化 (11月12日~13日)
実線は 3 杯風速計、破線は超音波風速計を示す

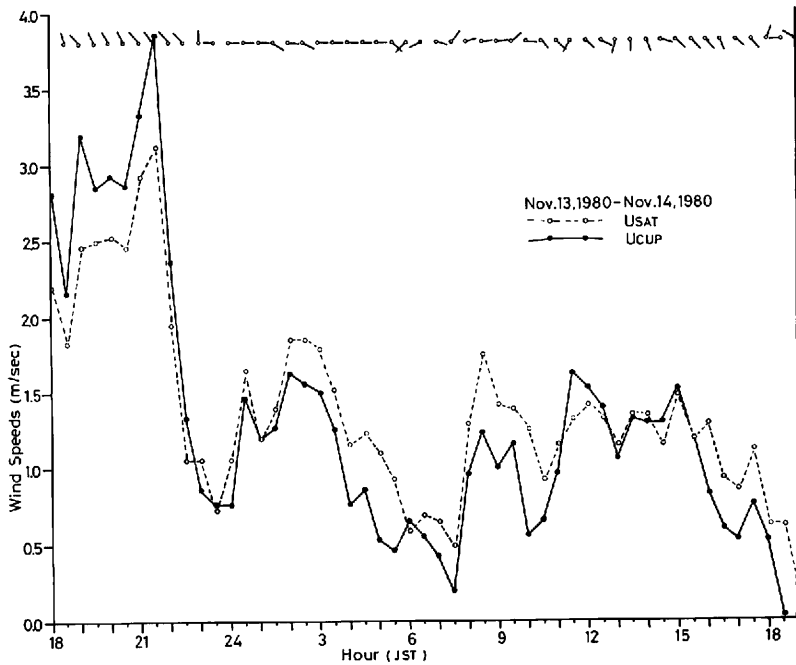


図3-b 前図と同じ(11月13日~14日)

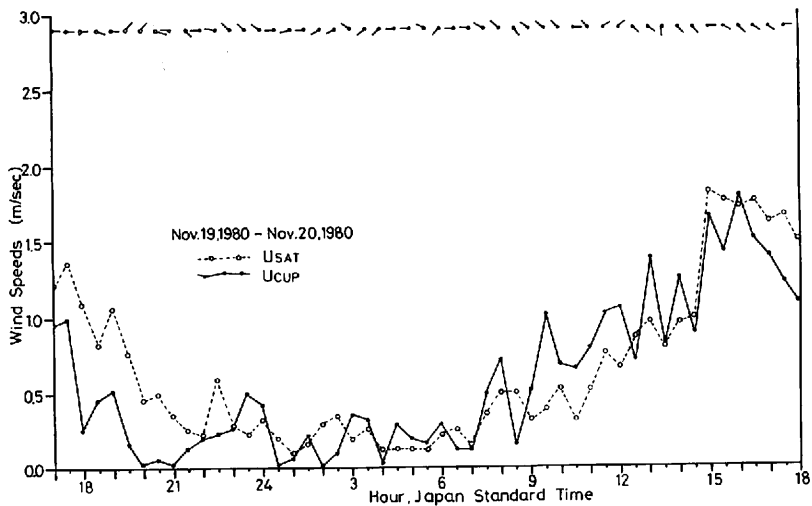


図4-a 平均風速および風向の時間変化(11月19日~20日)

対して(9)式、すなわち対数則を、SATの測定値に対して(10)式、すなわち渦相関法による定義式を用い、摩擦速度、 u_{*UCUP} 、 u_{*SAT} をそれぞれ求めた。

IV 観測結果

予備観測期間中の平均風速と風向の時間変化を

図3に、今回の解析対象である、本観測期間中の時間変化を図4に示す。いずれも u_{SAT} を破線、 u_{UCUP} を実線で示す。

11月13日8時ごろに南寄りの強い風が吹き、10時30分ごろ風向が北西に変ると共に風速も弱まった。以後北西の風が卓越し、21時ごろまでだんだ

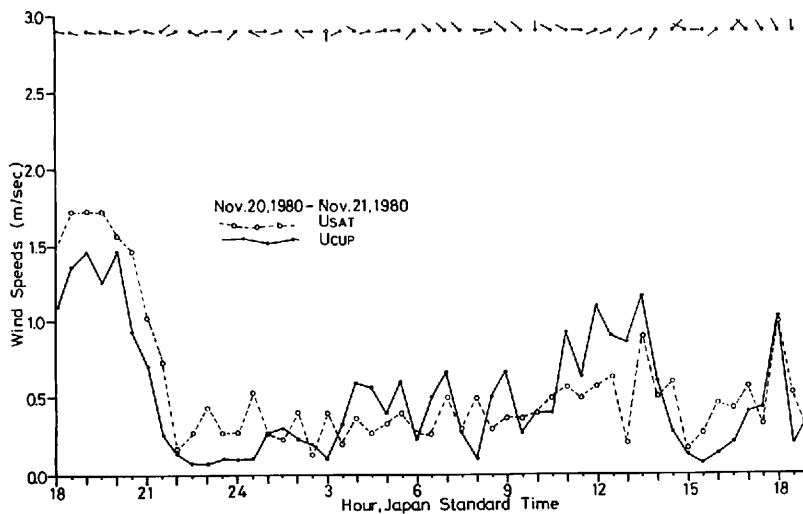


図 4-b 前図と同じ (11月20日~21日)

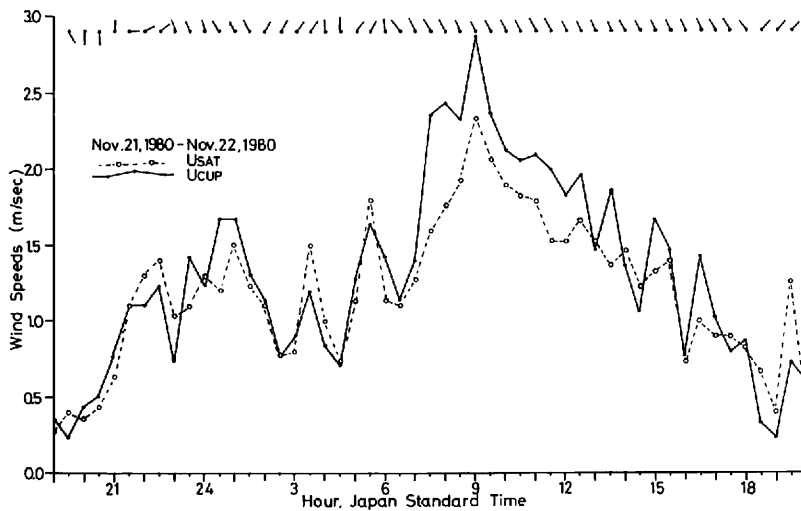


図 4-c 前図と同じ (11月21日~22日)

ん風速が強まり、その後弱まった(図3-a, b)。11月19日以後は、ほぼ 3.0 m/s 以下の風速で、特に19日20時から20日7時、同22時から21日10時ごろの間は、風速が 0.5 m/s 以下となり、風向変動も大きい。この期間には、接地逆転層が形成されていた。22日7時から17時には北北西、23日12時から21時には東の一定風向で比較的強い風が吹いていた。

u_{SAT} と u_{CUP} を比較すると、変化の傾向はほぼ

一致しているが、必ずしも両者の値は一致しない。

V 考 察

1) 3杯風速計とSATによる風速の比較

本観測期間中の3杯風速計とSATで測定した30分平均風速の関係を図5に示す。縦軸は u_{CUP} を、横軸は u_{SAT} を示す。両者には良い一致がみられ、相関係数は、 $r=0.914$ となる。ただし、

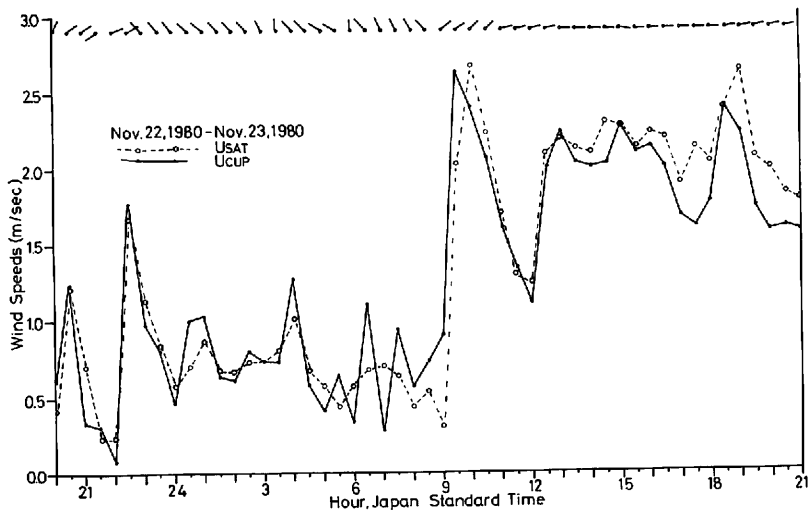


図4—d 前図と同じ (11月22日~23日)

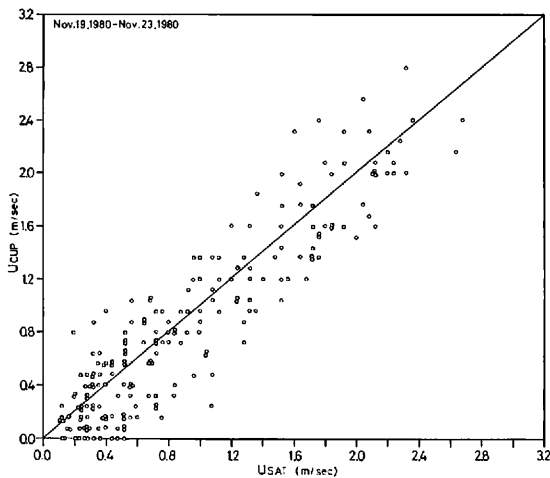


図5 杯風速計と超音波風速計で測定した平均風速の関係

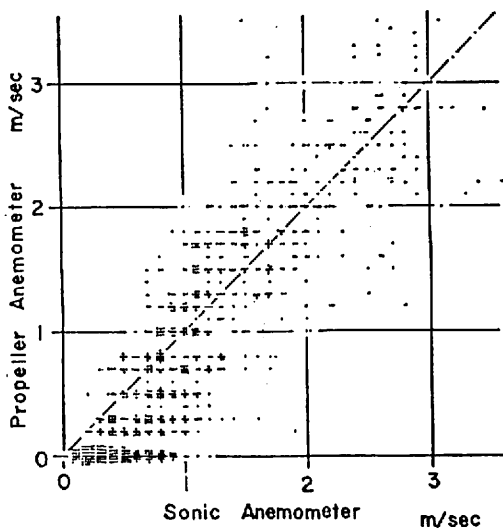


図6 プロペラ風速計と超音波風速計で測定した平均風速の関係 (光田, 1970)

0.5m/s 以下の風速範囲で両者の関係は1:1を示す直線から外れ、 u_{UCUP} が u_{SAT} より小さな値となる。すなわち、SATによれば風が吹いているにもかかわらず、3杯風速計によると風速がしばしば0になる場合があることがわかる。この傾向は光田(1970)のプロペラ風速計とSATで測定した風速の比較結果にも示されている(図6)。

弱風範囲で、風杯あるいはプロペラ風速計で測

定した風速が小さくなるのは、風によって生じる風速計の軸の回転トルクが摩擦によるトルクより小さいためと考えられる。一方、比較的強風範囲でも、 u_{SAT} と完全に一致した値にならずにばらつくのは、回転を開始した3杯あるいはプロペラ風速計の動回転摩擦は小さくなるものの、慣性モーメントの影響が加わって、風の息(Gustiness)に対し忠実に追従しないためと考えられる。

図5の結果から、今回観測に用いた3杯風速計の測定範囲を風速0.5m/s以上と考えることは妥当であろうと考えられる。

2) 風向別にみた風速の特性

本観測期間中の風向出現頻度をまとめると、表1となる。表から、主として、北西から北北西および東の風向出現頻度の多いことがわかる。

表1 風向出現頻度

風向	出現数	風向	出現数
SW	0	NE	9
WSW	3	ENE	6
W	4	E	11
WNW	4	ESE	7
NW	14	SE	3
NNW	19	SSE	0
N	9	S	2
NNE	5	SSW	0

3杯風速計とSATの測定値に対して、吹走距離(フェッチ)がどのような影響を及ぼすかを調べるため、次式で定義したパラメーター、

$$A = \frac{u_{SAT} - u_{CUP}}{u_{SAT}} \times 100 \dots\dots\dots(1)$$

を風向別に求めた。図7に、Aの風向別分布図を示す。A>0の場合を白丸、A<0の場合を掛印

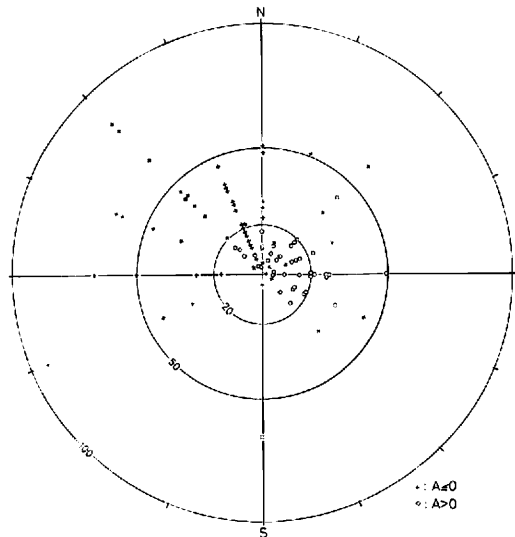


図7 パラメーターAの風向別分布図

で示した。

Aの絶対値が20%以上の領域に注目すると、西南西から北北東の風向範囲で、A<0となっている。一方、これ以外の東を中心とする範囲では、Aの符号はばらつき、その絶対値は比較的小さい。この結果は、観測圃場のフェッチおよび図2に示されるような圃場周辺の障害物の分布状態と密接な関係を持つものと考えられる。すなわち、北西側では、風上方向に高さ約10mの松林などが分布し、かつフェッチは短い。その結果、3杯風速計の応答速度では測定できない領域の乱れの影響を受け、 $u_{SAT} < u_{CUP}$ となるためと考えられる(注)。乱れとフェッチの関係をより定量的に取扱うためには、測定周期を短くした観測を実施する必要がある、これは今後の課題である。

3) 3杯風速計とSATによる摩擦速度の比較

接地境界層の定義に従うと、風速が決まれば、摩擦速度は高さ方向に変化しない。このことから一般に接地境界層のことを、Constant Flux Layerと呼ぶ。3杯風速計およびSATで測定した平均風速の差が10%以内でかつ連続した期間を観測期間中から選び、両測器で求めた摩擦速度を比較した。この時、データ数を増すため、予備観測結果も解析対象とした。

図8に、解析に用いた期間の u_{SAT} と u_{CUP} の関係

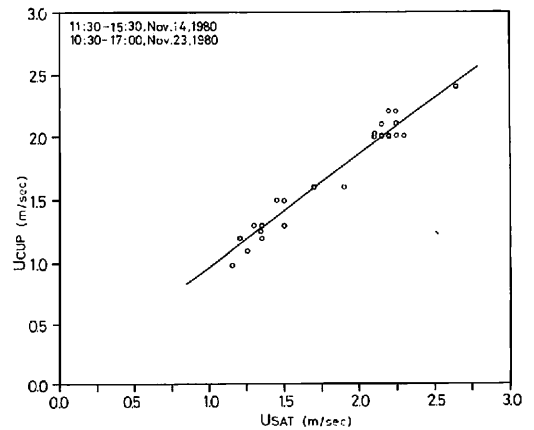


図8 3杯風速計と超音波風速計で測定した平均風速の関係(摩擦速度解析のため図5から抜粋)

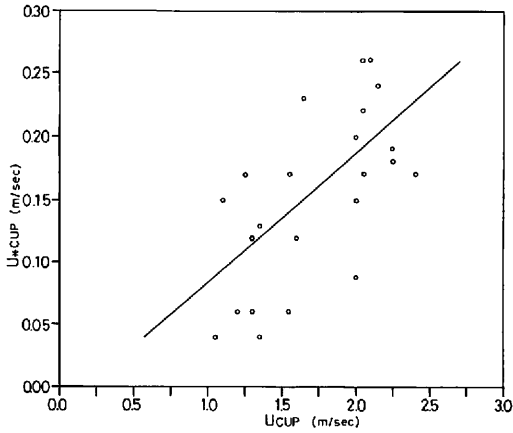


図9 風杯風速計による平均風速と摩擦速度の関係

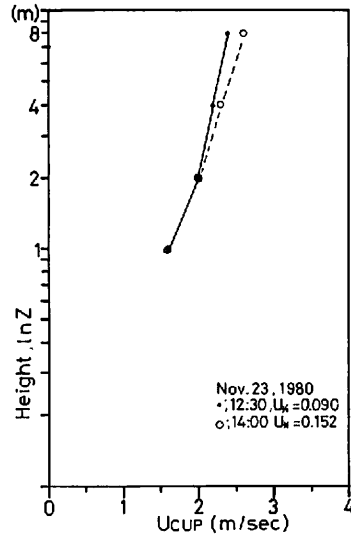


図11 風速の垂直分布

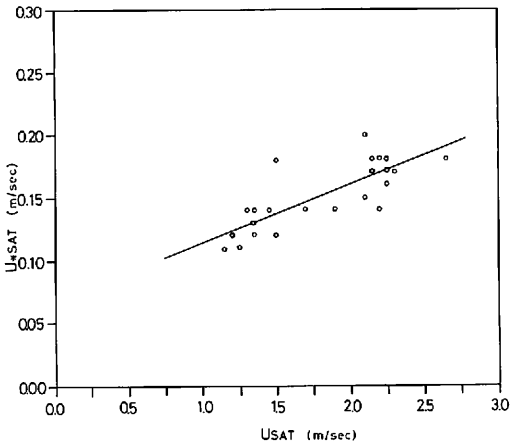


図10 超音波風速計による平均風速と摩擦速度の関係

果に散らばりが多く現われる原因を調べるために以下の考察をおこなった。まず、図11に、11月23日12:30と14:00の風速分布を示す。この図から明らかなように、高度1 mと2 mにおける風速は同じにもかかわらず、4、8mの値を比較すると、12:30の値が14:00の値よりも小さくなっている。(9)式を使って u_* を求める場合、4高度の測定値を等しく評価して、 z_0 、 d を決定する方法を用いるが、例に示した程度の差が上層にあれば、最終的に u_* に約 0.06m/s の差が生ずることになる。

を示す。風速出現範囲は、 $1.2 < u_{SAT} < 2.7 \text{ m/s}$ で、両者の間には次の直線関係が成り立つ。

$$u_{*CUP} = 0.905 u_{*SAT} + 0.081 \quad \dots\dots\dots (12)$$

この時の相関係数は、 $r = 0.976$ である。安定度、 ζ は、 $|\zeta| < 0.01$ で中立に近い状態であった。

次に、平均風速と、(9)、(10)式を用いて求めた、 u_{*CUP} および u_{*SAT} の平均風速に対する関係を、9図、10図に示す。前図は3杯風速計の場合で、 $r = 0.644$ となり、実測結果は分散している。一方、後図のSATによる結果は、 $r = 0.801$ で比較的良好な直線関係を認めることができる。

そこで、3杯風速計を用い傾度法で計算した結

上層で風速差を生ずる原因としては、(i)本報告でも考慮した気層の安定度、(ii)地表面の粗度要素が、気流の状態によって異なる空気力学的特性を示すこと、(iii)風速計の器差、などが考えられる。特に2番目の条件については、実際の野外観測の場合、事前に条件を備えることはほとんど困難で、むしろ、空気力学的特性の変化自体が研究対象となっている程である(古藤田・林, 1980; 林・古藤田1980) 従って、ここでは、図9に表わればらつきは元来本報告で用いた方法の中に含まれるもの(場合によっては有意なもの)と考えることにする。さて、 u_{*SAT} と u_{*CUP} の関係を示

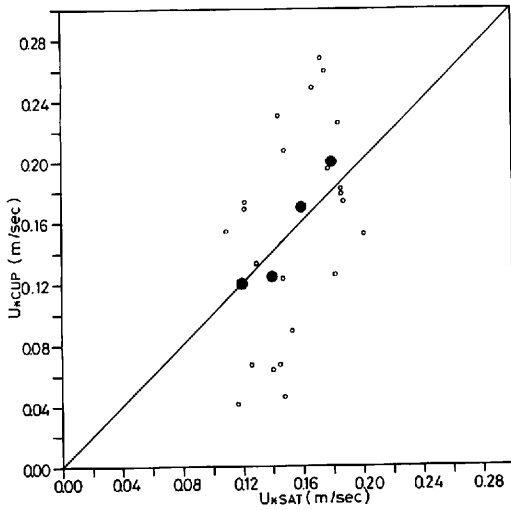


図12 3杯風速計と超音波風速計で求めた摩擦速度の関係

したのが図12である。図中白丸は個々の観測値を示す。直接測定により求められる、 u_{*SAT} を基準にして、ばらつきの多い u_{*CUP} を4つのグループに分け、平均値を求め、両者の関係を示したのが黒丸である。この結果から、二つの異なる方法で求めた摩擦風速は、ほぼ等しい値になることがわかった。

VI ま と め

現在一般に、風速測定に用いられる測器には、風杯風速計と超音波風速計がある。前者はスカラー量として風速を測定するのに対し、後者はベクトル量として風速を測定する点が大きな相異点である。特に、後者により微変動が測定できることは、それが乱流境界層の観測には不可欠な測器である所以である。しかしながら、経済性や取り扱い上の容易さを考えると、まだまだ風杯風速計が利用される余地は広い。このことから、これら2種類の風速計を有機的に組み合わせながら観測をおこなうことが、当面の課題と考える。

本報文は、このような立場に立ち、3杯風速計と超音波風速計で測定した、平均風速および摩擦速度を比較し、次に示す結果を得た。(i) 3杯風

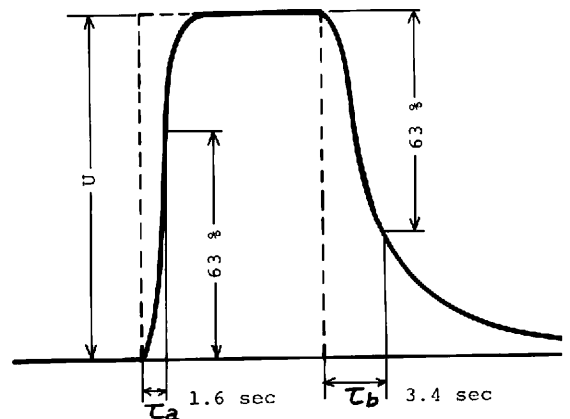
速計で求めた平均風速は、 3.0m/s 以下の風速範囲で、SATで求めた風速に対して良い直線関係を示した。今回観測に使用した3杯風速計の実際上の始動風速は 0.5m/s と考えられる。(ii) 3杯風速計とSATで求めた風速の差を示すパラメーターAは風向による特性を示し、風向が北西よりの場合に負、すなわち、風杯風速がSAT風速よりも大きくなることが示された。(iii) 3杯風速計で求めた摩擦速度と、SATで求めた摩擦速度を比較すると、前者のばらつきは多いものの、両者には、1:1の関係のあることが示された。このことは、異なる測器および方法を用いたにもかかわらず、ほぼ一致する値を得ることができたという点で今後の究研の指針となる結果である。

謝 辞

本報文をまとめるにあたり、筑波大学地球科学系吉野正敏教授および、井口正男教授、古藤田・雄助教授をはじめとする筑波大学水理実験センターの皆様には、格別なる御指導を賜りました。文末ながら、感謝の意を表します。

注

3杯風速計の使用開始直後の始動風速は、 0.2m/s であるが、気流中に乱れ(風の息)が存在する場合には、風杯のレスポンスによる測定誤差を考慮しなければならない。図に示すように、5



3杯風速計の応答特性

m/sの一様流中に測器を挿入した場合の立上り時間は、 $\tau_a=1.6$ 秒、減衰時間は、 $\tau_b=3.4$ 秒で平均すると、2.5秒のレスポンスであることがわかる。すなわち、3杯風速計では、平均2.5秒より速い変化をとらえることはできない。一方SATは、分解能が1 cm/s以内、レスポンスは0.01秒で非常に良い応答特性を持つ。

文 献

- 古藤田一雄・佐倉保夫・林 陽生・甲斐憲次(1978)
：水理実験センターにおける熱収支・水収支観測システムとデータ集録・処理について。水理実験センター報告，筑波大学，2，65—90.
- 古藤田一雄・林 陽生(1980)：植物群落上の風速分布とその空気力学的特徴量について。農業気象，39(4)，221—228.
- 林 陽生・古藤田一雄(1979)：接地層における気象要素垂直分布測定装置について。水理実験センター報告，筑波大学，3，81—88.
- 林 陽生・古藤田一雄(1980)：牧草地上の粗度長と地面修正量の特徴。天気，27(4)，277—283.
- 光田 寧(1970)：種々の風速計の比較について。京大防災研究所年報第13号A，441—448.
- 光田 寧(1971)：超音波風速温度計とその大気境界層研究への応用。天気，18(8)，377—385.
- Mitsuta, Y. (1966) : Sonic anemometer-thermometer for general use. J. Meteor. Soc. Japan, 44(4), 12—24.