

高い粗面上の風速分布について I : ソルゴー群落上の観測

高見, 晋一
九州大学農学部

清野, [ヒロシ]
九州大学農学部

<https://doi.org/10.15017/23036>

出版情報 : 九州大学農学部学藝雑誌. 24 (3), pp.189-197, 1969-11. 九州大学農学部
バージョン :
権利関係 :

高い粗面上の風速分布について I

ソルゴー群落上の観測

高見 晋一・清野 啓

On the wind profile above a tall roughness. I

Measurements over a sorgo canopy

Shinichi Takami and Hiroshi Seino

緒 論

高い粗面, 例えば植物群落上の風速分布については, 断熱大気に近い場合

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z-d}{z_0} \quad (1)$$

のような対数法則の成立することが知られている。ここに u は地表面からの高さ z における風速, u_* は摩擦速度, k はカルマン定数 (=0.4), d は地面修正量, z_0 は粗度長である。

ところで(1)式中の d と z_0 は互いに無関係に導入されたものであるにもかかわらず, 従来の観測結果によれば相関連して変化するように思われる。例えば Penman and Long (1960) は草高約 60 cm の小麦畑における観測から基準風速に対して z_0 は増加し, d は減少することを報告している。また谷 (1960) も水田において地上 1.5 m の風速に対して d および z_0 がそれぞれ複雑な変化をすることを示した。Udagawa (1966) は大麦畑において Penman and Long とほぼ同様の結果を得ている。Allen (1966) はカラマツ林での観測から得られた d および z_0 を樹林上の風速に対して整理するとともに, 摩擦速度との関係も求めている。そして基準風速に対する d および z_0 の相関連する変化は, 摩擦係数がいたるところ風速に対して一定と仮定すれば, 対数分布式(1)から必然的に生じるものであるが, u_* と d および u_* と z_0 との関係は説明がつかないことを述べている。

このような事実に関して, 武田 (1966) は d と z_0 との間に次のような関係があることを理論的に導いた,

$$\frac{1}{H-d} \ln \frac{H-d}{z_0} = \frac{K^2}{\alpha H} \quad (2)$$

ここに H は粗面高さ (草高), α は比例定数 (=0.087)

である。すなわち 3 個のパラメーター, H , z_0 , d の間に (2) のような関係式が成り立つため, 例えば d と z_0 とは独立にとることができる。しかし粗面が植物群落のような場合, H は風速によつて減少するから

$$H = f(u_*) \quad (3)$$

のような関係が成り立つ。(2) と (3) とから H を消去すれば, 一定の u_* を与えたとき z_0 と d とは必ずしも互いに独立でなくなる。このような考えのもとに武田は従来の観測結果が理論的によく説明できることを示した。

近年, 植物群落内外の輸送現象に対する農学的あるいは生産生態学的な立場からの興味が増大するにつれて, 群落の物質生産に大きく関与する風速分布の定量的把握が必要になってきた。そしてそのためには風速分布式中のパラメーター d および z_0 の種々の条件のもとにおける変化を明らかにすることが必要である。

著者らは d および z_0 の変化を特に群落構造との関連において明らかにするために, ソルゴー畑で生育時期をおつて風速分布観測を行ない, d および z_0 を求めるとともに, それらの相互関係について検討するために (2) 式による若干の解析を行なった。

観測は 1967 年および 1968 年の夏に九大附属農場のソルゴー群落で行ない, 1967 年の結果についてはその一部をすでに報告した (真木ら, 9168) のでここでは 1967 年度の結果を参照しつつ, 1968 年の結果を中心に報告したい。

観測場所および方法

観測は福岡県粕屋郡の九州大学附属農場で 1968 年 7 月 27 日から 8 月 16 日にかけて行なった。

図 1 に示すように 60 × 120 m の広きのソルゴー群

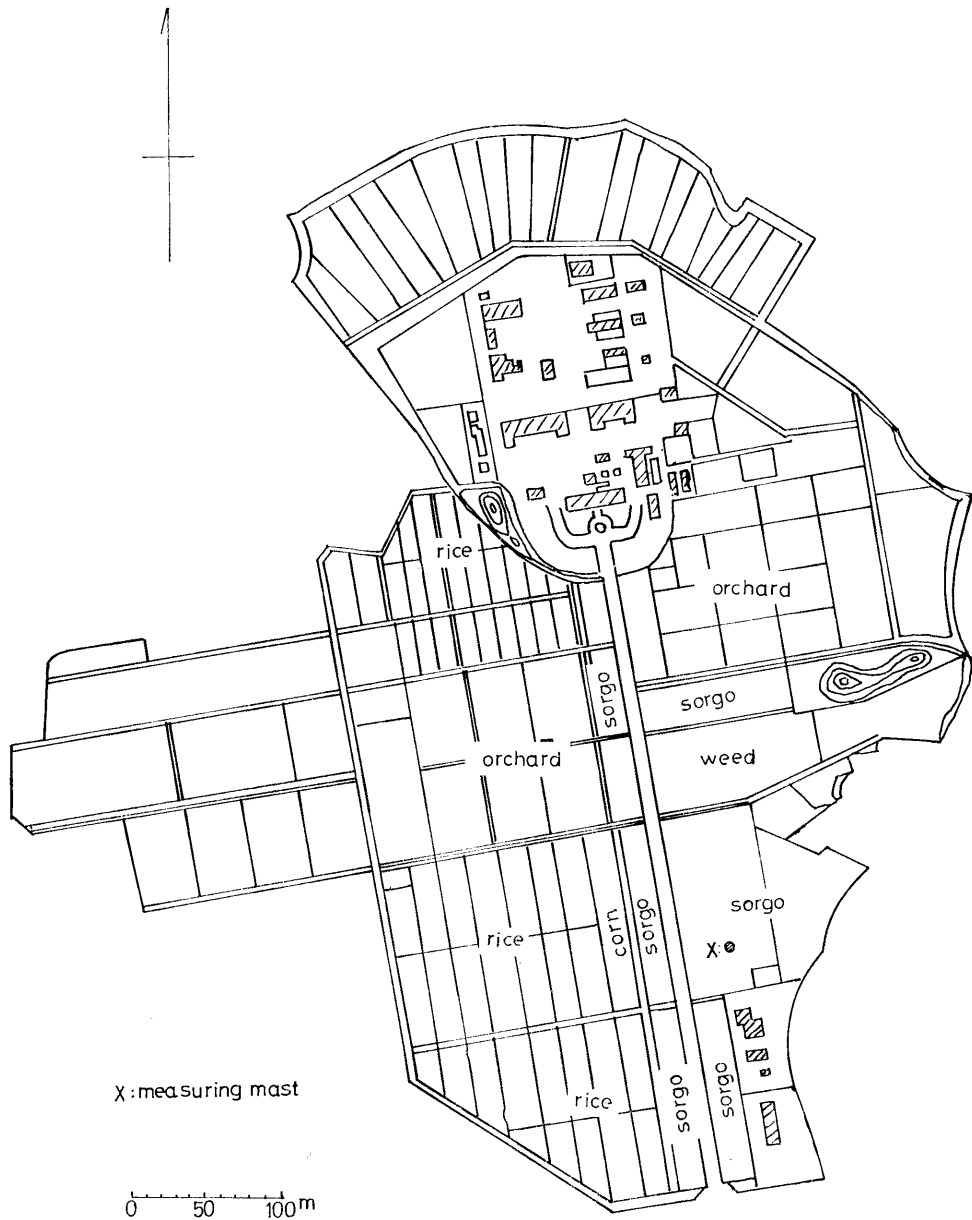


Fig. 1. Outline of the experimental site, located at Kasuya, Fukuoka.

落を観測区画とした。この区画中には途中に東西に帯状に続く草丈の高い異品種（日本在来種赤だね）があつたが主風向すなわち南北方向の中が約3m程であつたので境界層の形成に大きな支障はないと判断した。区画の東方は宇鶴見塚にかけてゆるい傾斜をなしており、ここにもソルゴーが続いていた。北側約50mは裸地になつており、さらにその北方には再び約50mにわたつてソルゴー群落があつた。このソルゴーと果

樹園との間には高さ4~5mの防風林があるが風下側（南方）への影響は観測区画まではおよばないと思われる。また観測区画の南側は巾約3mの道路を隔てて、播種期の異なるソルゴーが約130m続いていた。南東には高さ2mの杉畑とその内部に家があつたが主風向（北—北北西）から考えて大して問題はないと考えられる。

以上のような観測区画内に表1.に示す如く、5高

Table 1. Anemometer and thermocouple heights (cm) in 1968, Sorgo crop.

Anemometer system		Temperature system	
I	II	I	II
600	600	*	400
500	400	*	300
400	300	*	250
300	240	*	205
200	200	*	150
		*	80
		*	40
		*	20
		*	10
		*	5

I. Jul. 27--Aug. 3

II. Aug. 11--Aug. 16

度に理工研式小型風杯風速計を配置して、10分間の信号を電磁カウンターに積算させた。II期には10高度で熱電対による気温の測定も行なつた。

得られた風速データは安定度を考慮して取捨すべきであるが、植被層上での温度分布があまり発達しないこと、日中の比較的風の強い時の観測が多かつたことおよびI期の気温測定ができなかつたことのために、今回は一応得られた風速値が $(z-d)$ (z は測定高度、 d は地面修正量)に対して対数直線化される場合は全て採用した。

これら気象要素の観測と並行して、群落構造を把握するために、草高(h)、葉面積指数(LAI)および出穂率の調査を行なつた。

結果および考察

得られた平均風速、ならびに対数分布式中のパラメーターをそれぞれ表2、表3に示した。

(1) 群落構造

観測区画のソルゴーはアーリースマック種で10aあたり約4.5kgの割合で播種された。1967年度の品種(日本在来種赤だね)に比べて草高が低く、I期(7月27日~8月3日;図2-A参照)の平均が約150cm、II期(8月11日~8月16日;図2-B参照)が約180cmであつた。ここに図2は軌跡法(内島ら,1966)によつて求めたソルゴーの姿である。

出穂率は8月12日が約50%で、8月20日には約88%に達した。従つてII期には平均7割程が出穂していたことになる。

LAIは8月12日に9.9、8月20日には8.9であつた。1967年の最大LAIが8.6であつたから1968年はさらに密植になつている。I期のLAIの測定値が得られなかつたので1967年のLAI発達の経過曲線を援用して約6~7と推定した。従つて群落の疎密をあらわす平均葉面積密度はI期が約 0.04 cm^{-1} 、II期が約 0.05 cm^{-1} となる。1967年の同時期には、それぞれ約 0.02 cm^{-1} 、 0.03 cm^{-1} であつた。

(2) 地面修正量 d

一般に、風速測定の基準高度は草高の変化に応じて取らなければならないが、このことは實際上困難である。そこで各パラメーターの風速に伴う変化を検討す

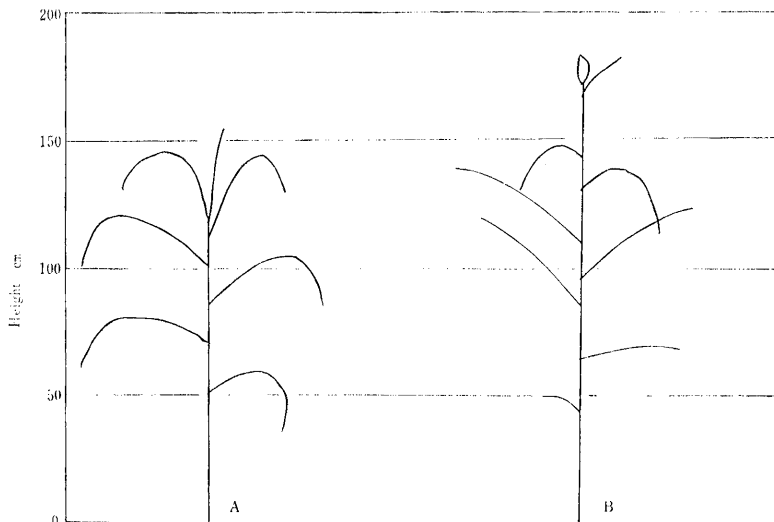


Fig. 2. Changes of plant profiles with growth.

Table. 2. Log profile parameters for 1968, Sorgo crop.

Time	Stability	Mean wind direction	U_* (cm/sec)	Z_0 (cm)	d (cm)	U_{h+400} (cm/sec)	H (cm)
Jul. 27							
1333	*	NW	23	3.6	120	293	123
1415	*	"	14	6.0	150	155	157
1442	*	"	23	3.8	120	275	124
1458	*	"	20	4.2	110	317	114.2
1510	*	"	23	2.8	120	285	122.8
1522	*	"	40	12	70	365	87
1541	*	"	29	7.6	90	308	98.6
1557	*	"	26	5.2	90	285	106.4
1608	*	"	23	5.8	120	245	126.8
1622	*	"	26	2.6	120	295	122.6
1640	*	"	26	4.8	100	325	105.6
1904	*	"	40	12	60	385	78.5
1914	*	"	46	12	40	426	64
1924	*	"	35	11	60	357	76.5
1946	*	"	43	10	60	430	74.5
1957	*	"	43	13	70	390	89.5
2007	*	"	46	14	50	420	76
Jul. 28							
1058	*	NW	35	8.4	100	350	110.5
1109	*	"	43	10	70	405	83.5
1120	*	"	38	9.0	90	360	101
1400	*	N	55	8.2	50	575	62
1410	*	"	66	12	40	615	64
Jul. 29							
1159	*	SE	23	1.8	100	315	101.8
Aug. 2							
1055	*	NWN	32	3.8	120	343	123.8
1220	*	"	23	7.0	140	245	148
1355	*	"	26	2.6	150	295	152.6
1455	*	"	23	5.6	120	245	126.6
1558	*	"	26	2.9	140	343	142.9
Aug. 3							
1055	*	NW	32	14	90	273	109.5
1319	*	"	32	6.4	120	333	127.4
1755	*	NWN	14	5.2	170	147	175.2
1855	*	N	14	3.6	180	157	183.6
Aug. 11							
1400	*	NEN	117	70	50	588	*
1521	*	"	76	23	80	573	124
1650	*	"	66	28	70	435	141
Aug. 12							
0915	*	NEN	40	14	100	346	119
1559	-0.293	N	51	20	90	395	123
1655	-0.111	"	46	11	100	415	113.4
1756	-0.035	NE	49	11	110	396	123
1855	-0.204	"	32	19	130	247	156
1955	+0.039	E	28	2.5	160	348	162.5
Aug. 13							
1436	*	ENE	37	11	100	343	113
1458	*	"	26	3.5	130	325	133.5
1555	*	NE	38	10	100	353	112
1655	*	ENE	27	3.0	130	335	133
1859	*	NE	16	1.4	170	218	171.4
2010	*	"	8	1.3	170	100	171.3
Aug. 14							
0859	-0.190	NE	5	0.0025	190	148	190
1359	-0.222	"	48	25	110	348	151.5
1457	-0.195	NW	47	10	120	365	132
1559	-0.226	"	25	6.0	160	268	166.5
1655	-0.933	"	14	5.8	190	143	195.8
1758	-0.380	"	14	3.8	180	156	183.8
1858	-0.400	"	15	3.0	180	180	183
Aug. 15							
0858	-0.199	S	25	7.0	160	256	168
0953	-0.089	SWS	43	20	110	365	139
1055	*	SES	25	3.4	160	288	163.4
Aug. 16							
1125	*	SE	88	42	70	555	187
1150	*	S	116	45	40	710	*
1306	*	"	83	48	50	612	*

るにあたっては高さに対して一定である摩擦速度 u_* に対して整理した。

まず、観測期別の d の u_* に伴う変化は図3の上側のようになる。この図から風速の増加すなわち u_* の増加に伴って d が単調に減少することがわかる。1967年の観測結果も同様であった。

以上のような結果は Rider (1954), 谷 (1960) の結果とは異なっているが, Pennan and Long (1960), 宇田川 (1966), Allen (1968) および真木 (未発表) とはきわめて良く一致している。すなわち Rider はえん麦畑 (草高約 10~80 cm) での観測から d は風速とともに増加することを報告している。また谷は水田における観測から d が風速とともに最初減少して 2 m/sec 近くで極小値をとり以後再び増加して 4 m/sec 近くで極大値に達し、それ以上の風速では再び減少するという結果を得ている。一方, Penman and Long の結果によると、草高約 60 cm の小麦畑での観測から d は風速とともに減少している。宇田川, Allen および真木もそれぞれ大麦畑, カラムツ林およびトウモロコシ群落において d が風速とともに減少することを報告している。

宇田川も指摘しているように、風速が増すにつれて、乱渦が植被内深くまで侵入しやすくなるとともに、風によって植物体がたわむために d が減少すると考えれば、われわれの得た結果は、妥当のように思われる。

d の変化を観測期別すなわち植被の発達段階別にみると II 期には d の値そのものが若干増加するとともに、 u_* による変化がややゆるやかになっている。 d の増加は平均葉面積密度と草高が増したためであるが、1967 年度の結果によれば草高が増しても平均葉面積密度が大きく減少すれば d はやや減少することが見いだされた。このような d の増減に関する傾向は真木 (未発表) もトウモロコシ群落で認めている。

(3) 粗度長 z_0

図3の下半分に摩擦速度 u_* と粗度長 z_0 との関係を示した。観測期の如何に拘らず u_* の増加に伴って z_0 も増大している。同様の結果を Penman and Long (1960) は小麦畑での観測から, Udagawa (1966) は生育中・後期の大麦畑で、また Allen (1968), 真木 (未発表) もそれぞれカラムツ林およびトウモロコシ群落上で得ている。しかし, Monteith (1963) は beans で、また Udagawa は生育初期の大麦畑で逆の結果を得ている。また谷 (1960) は水田において、 z_0 は最初風速 2 m/sec までは増加し、それ以上で再び減少し、5 m/sec から再びわずかに増加するという複雑な変化をとることを報告している。

Monteith (1963) は従来の観測結果を整理して、 z_0 の風速に伴う変化を大・中・小の3段階に分けた葉の大きさと、風速との関係による fluttering および streamlining とから説明した。これによればソルゴーはトウモロコシとともに大きな葉を持つグループに

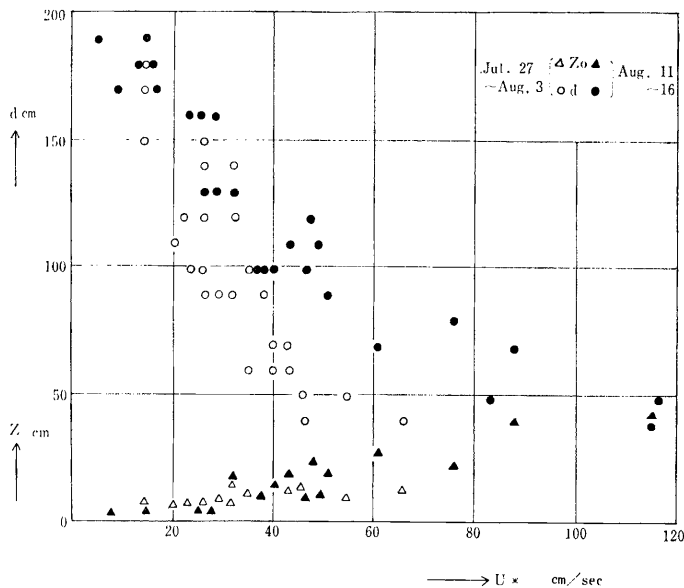


Fig. 3. Variations of zero-plane displacement (d) and roughness length (z_0) with friction velocity (U_*).

入り、中程度以下の風では、群落の表面摩擦抵抗が葉の fluttering によつて支配されるために、風速に伴つて z_0 が増加するものと考えられる。しかし、1967年度の結果に特に明瞭にみられるように、風速がかなり大きくなると z_0 が一定、もしくはやや減少の傾向を示すことから、ソルゴーなどにおいても一定風速以上では、streamlining が卓越するようになると思われる。

次に u_* に伴う z_0 の変化は植被の発達によつて異なってくるのがわかる。前期では値そのものが小さく、 u_* による変化も小さいが後期では z_0 が大きくなるとともに、その u_* による変化も大きくなっている。1967年度の結果も同様であり、Udagawa (1966) とよく一致している。この理由として出穂の影響が考えられるが、詳細については今後の研究に待ちたい。なお後期の z_0 の値の増加は、草高 h の増加および出穂による植被面の形態的变化にもとづくものと思われる。

(4) 粗度高さ H

この粗度高さ H は (2) 式によつて定義されるものであり、粗面が植物群落の場合、大体平均草高 h に等しいと考えられる。しかしながら、 h は一般に風の弱い時に求められた種々の異なる個体の平均的な高さであつて、この値がそのまま粗面の高さを表わすとは考えられない。従つて、風による変化および群落内外の空気力学的性質の差異を考慮した H の方が群落の高さを表わすのにより有効なものと考えられる。

そこでここでは観測より求めた d および z_0 を使つて (2) 式より H の値を計算した。この H の u_* に伴

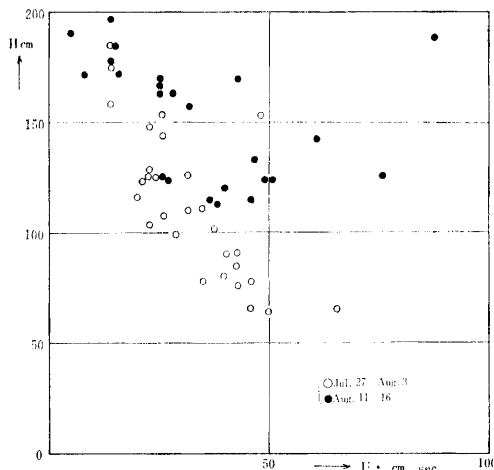


Fig. 4. Variations of plant canopy height (H) with friction velocity (U_*).

う変化が図4に示されている。

理論から予想されるように、 H は群落の発達を反映して I 期から II 期へ増加するとともに両期とも u_* が大きくなると減少するのがみられる。実測より求めた h の平均が前期で約 150、後期で約 180 cm であるから、それらと等しい H は $u_*=20$ cm/sec あたりで得られている。真木 (未発表) は出穂期前後のトウモロコシ群落で H の u_* に伴う変化を詳しく調べ、出穂がごくわずかの時には H は u_* の増加につれて若干減少するが、出穂が進むにつれてその変化がほとんどなくなることを見出ししている。さらに出穂完了時には H が u_* に対してむしろ増加するのみならず、 u_* が 80 cm/sec を越えるころから急に大きくなり h をかなり上まわるような値をとるという結果を得ている。また、武田 (1968) も Allen (1968) のカラマツ林におけるデータを整理して、 u_* が 120 cm/sec 以上で同様のジャンプがおこることを見出ししている。以上のような u_* による H の変化は真木も指摘しているように群落面が風になびくかあるいは振動が卓越するかによつて説明できるだろう。すなわち群落の発達、特に出穂後の群落上面は風によつて長周期の振動を起しやすい状態になるためだと思われる。従つて、今後は振動を考慮した (2) 式の一般化が必要であろう。

(5) d と z_0 との関係

すでに述べたように d と z_0 とは風速分布式中に独立に導入されたにもかかわらず、図3に示したように d の減少に対して z_0 は増加するという逆の関係がみられる。これをより明瞭にみるために図5に d と z_0 との相関図を示した。両者の間には極めて高い負の相関のあることがわかる。また I 期と II 期とは同一 d に対して II 期の方がより大きい値をとる。また $d=100$ cm 付近を境として I 期、II 期とも両者の関係が若干変化している。

定義から明らかなように z_0 は H と $(H-d)$ の間の植被層の空気力学的性質に依存する。従つて後期になれば H が大となるから、当然同一 d 与えると z_0 がより大きな値をとることになる。いいかえれば、有効群落面 (Monteith, 1963) の高さ (z_0+d) が後期に上昇することを反映している。

(6) d , z_0 及び H の相互関係

いままで述べてきた d , z_0 および H はすでに説明した (2) 式によつて相互に関係づけられる。そしてこの関係は、武田 (1966) によつて粗面ダイアグラムとして与えられている。

この粗面ダイアグラムを模式的に示すと図6のよう

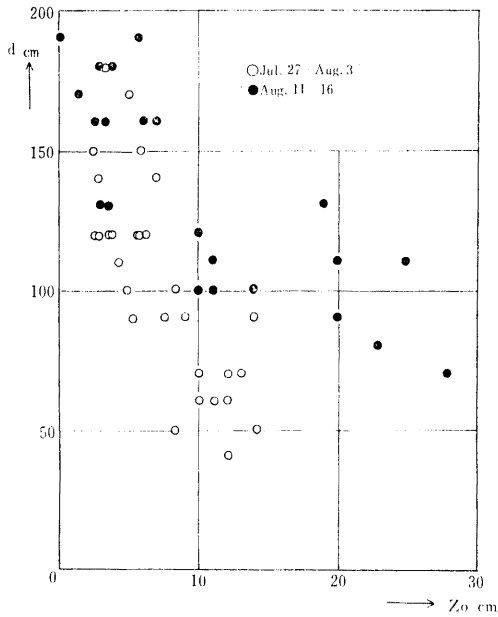


Fig. 5. Relationship between the roughness length (Z_0) and zero-plane displacement (d) in 1968 at sorgo field.

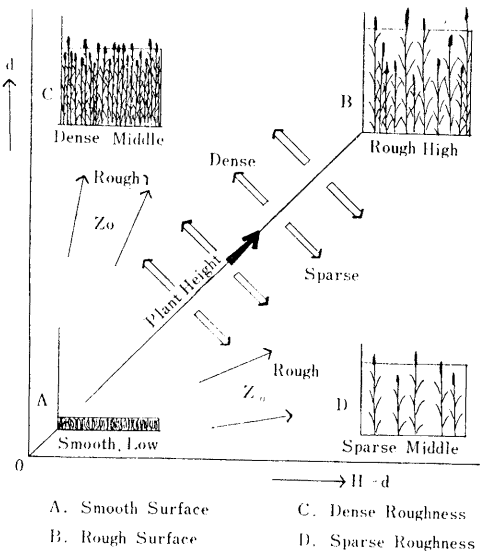
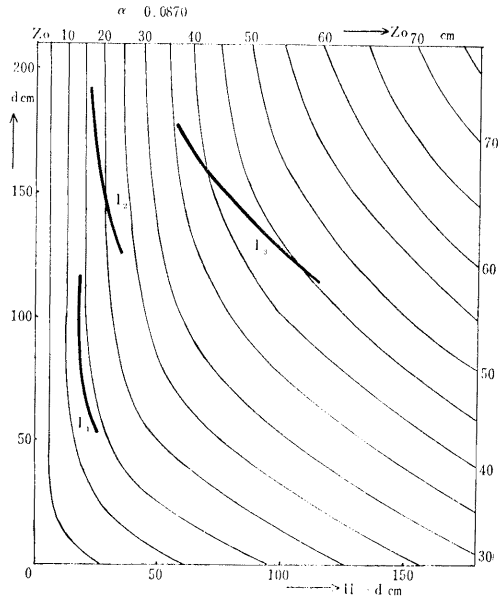


Fig. 6. The rough surface diagram which shows the relation between d , Z_0 and $H-d$. After Maki *et al.* (1968).

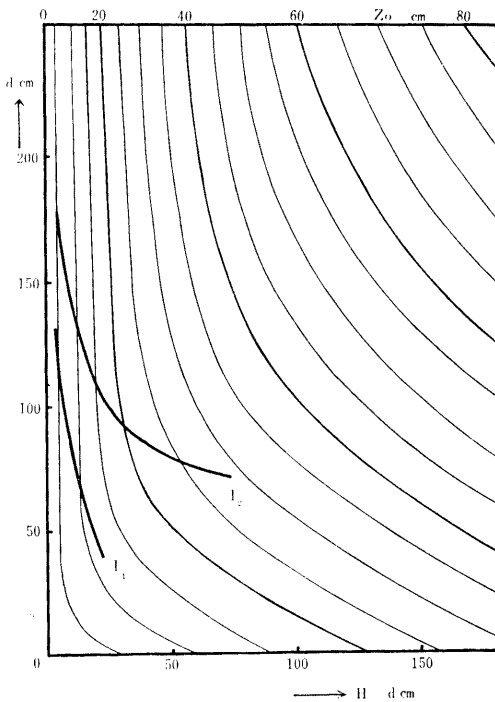


Fig. 7. The line segments in the rough surface diagram which correspond to the conditions of the observation.

になる (真木ら, 1968). 図中の各領域は粗面高さ, 粗滑度そして疎密度の違いに対応して次のような空気力学的特徴を有している.

A : Smooth surface ; 粗面高度は低く, 粗度長は最小, すなわち滑らかである.

A : 1967, I_1 ; Aug. 1~5. I_2 ; Aug. 15~20. I_3 ; Aug. 28~29. (After Maki *et al.*, 1968)

B : 1968, I_1 ; July 27~Aug. 3. I_2 ; Aug. 11~Aug. 16.

B : Rough surface ; 粗面高度は一般に高く疎密度は中程度で、粗度長は最大である。

C : Dense roughness ; 植物群落の密度は大きい。

D : Sparse roughness ; 植物群落の密度は小さい。

この粗面ダイアグラムを用いると、1967年度の観測結果(真木ら, 1968)は図7-Aの如くなり、図6との比較からよくわかるように実際の群落の発達をよくあらわしている。1968年の結果(図7-B)はさほど明瞭でないが、ほぼ同様の傾向を示している。

摘 要

高い粗面上での風速分布、特に d , z_0 および草高と風速との関係を調べるために、1967年8月に引き続いて1968年7月から8月、ソルゴー群落において風速分布の観測を行なった。

その結果、ならびに武田の理論による解析から以下のようなことがわかった。

1. 地面修正量 d は摩擦速度、従つて風速の増大に伴つて減少するが、粗度長 z_0 は逆に増加するという結果が得られた。従つて、ソルゴー群落では両者は高い相関で逆の変化をすることがわかった。

2. d の値は草高および平均葉面積密度の増大とともに増すが、草高が増しても平均葉面積密度が減少すれば d は減少する傾向のあることがわかった。

3. z_0 の値は草高並びに出穂率の増加に伴つて増大することがわかった。また z_0 の風速に伴う変化から、ソルゴーはトウモロコシとともに Monteith (1963) のいう大きな葉を持つグループに入るものと思われる。

4. z_0 の風速に伴う変化は出穂後の方が大きくなる傾向にあつた。

5. 粗面高さ H は風が弱い場合、実測による草高 h とほぼ等しく、風速の増大に伴つて減少する傾向がみられた。

6. 点 (d , z_0) を粗面ダイアグラム上にプロットして得られた観測期別の曲線の位置の変化は、実際の群落の発達をよく反映することが認められた。

謝 辞

本研究を行なうにあつてテーマを与えられ終始懇

篤なる指導を賜つた武田京一教授ならびにとりまじめにあつて未発表のデータを知らせていただくとともに有益な御助言をよせられた農業技術研究所の真木太一技官に謹んで感謝の意を表す。

また観測に際し多大の便宜を与えられた九大付属農場の武藤、松永両氏および観測に協力していただいた気象学研究室の塩月、杉谷、早川、青木、神品、谷口、埜口の諸兄に謝意を表したい。

なお1968年度には文部省の科学研究費補助を受けたことを記して関係各位、特に栽培学研究室の武田助教授に感謝する。

引用文献

- 1) Allen, L. H. (1968): The energy budget at the earth's surface: Air flow and turbulence characteristic in a Japanese larch plantation. Tech. Rept. ECOM 2-671-2, Res. Rept. No. 395 of Northeast Branch, Soil and Water Conservation Res. Div.
- 2) 真木太一・高見晋一・新庄 彬 (1968): ソルゴー植被上における風速分布式中の地面修正量と粗度長について. 農業気象, 24, 127~132.
- 3) Monteith, J. L. (1963): Gas exchange in plant communities. In Environmental Control of Plant Growth, ed. By Evans, Academic Press. New York, 95~112.
- 4) Penman, H. L. & Long, I. E. (1960): Weather in wheat: an essay in micrometeorology. Quart. J. R. Met. Soc., 86, 16~50.
- 5) Rider, N. E. (1954): Evaporation from an oat field. Quart. J. Roy. Met. Soc., 80, 198-211.
- 6) Takeda, K. (1966): On roughness length and zero-plane displacement in the wind profile of the lowest air layer. J. Met. Soc. Japan, Ser. II, 44(2), 101~108.
- 7) 武田京一 (1968): 粗度パラメーターと零面変位について. 九州の農業気象, 5, 25~27.
- 8) 谷 信輝 (1960): 耕地上の風の測定結果について. 農業気象, 16, 89~93.
- 9) 内島善兵衛・小林勝次・伊藤綾子 (1966): トウモロコシ植被内の微気候に関する研究. 農業気象, 21, 122~126.
- 10) Udagawa, T. (1966): Variation of aerodynamical characteristics of barley field with growth. J. Agr. Met., 22, 7~14.

Summary

The wind profile above a tall and very rough surface, in the case of adiabatic condition, is known to be represented by a formula such as

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z-d}{z_0}, \quad (1)$$

where u is the wind velocity, z the height above the ground surface, u_* the frictional velocity, d the zero-plane displacement, k von Kármán constant ($=0.4$), and z_0 the roughness length. Although d and z_0 were independently introduced into this formula, it seems from some observations i.e., Penman and Long (1960), Tani (1960), Udagawa (1966) and Allen (1968) that d and z_0 change with relation to each other. On the other hand, Takeda (1966) has theoretically deduced a following relation;

$$\frac{1}{H-d} \ln \frac{H-d}{z_0} = \frac{k^2}{\alpha H} \quad (2)$$

where H is plant height and α constant ($=0.087$). It is easily seen that three parameters which are characteristics to a very rough surface (H , d and z_0) are contained in eq. (2). Hence two of the three parameters, e.g., d and z_0 are intrinsically mutually independent. But if the variation of H due to the wind as in the case of the wind above the plant canopy is taken consideration, another condition will be imposed, and d and z_0 will be no more mutually independent. Based on this consideration, Takeda shows that experimental results above mentioned can be theoretically explained.

We also measured the wind profiles over a sorgo canopy in Fukuoka Prefecture, from July to August 1968, in succession to 1967. And obtaining d , z_0 and H from them, we have tried to find the relation between d , z_0 and H in the light of Takeda's theory (1966).

Results obtained are summarized as follow:

1. The zero-plane displacement (d) decreased with the friction velocity (u_*) but increased with the plant height (H) and the mean leaf area density. These results are in accordance with those obtained by Udagawa (1963) over barley fields, but different from by Rider (1954) and Tani (1960). However, when the mean leaf area density decreased rapidly, a slight decrease in d was found though the plant height increased.

2. The roughness length (z_0) increased with u_* , H and rate of emergence, which is in agreement with the results obtained by Penman and Long (1960) over a wheat field and by Allen (1968) over a Japanese larch plantation. The change in z_0 with u_* became much larger after heading.

The sorgo together with corn canopy seems to behave as a large leaf type according to Monteith's classification (1963).

3. The roughness height (H) decreased from the maximum value (almost equal to the measured plant height at low wind speed) to nearly constant value with the increase in u_* ; the decrease is the fact that the theory expects.

4. Values of d and z_0 plotted on the rough surface diagram (Takeda, 1966) produced a curved line segment. The change of the place of the segment on the diagram brilliantly reflected the actual development of the plant canopy.