

## 牧草上における地面修正量と粗度長について

### On Zero-plane Displacement and Roughness Length above a Grass Field

林 陽 生\*

Yousay HAYASHI

#### I まえがき

地表面の状態が接地境界層下部のエネルギー収支におよぼす役割を明らかにしようとする立場から、植被上での風速および温度のプロファイルを実測し、若干の知見を得た。

一般に、植被上の風速分布を考える場合には、地面修正量を対数法則に導入する。この地面修正量および粗度長は、風速または摩擦速度とともに変化することが知られている。本論では、これまで報告例の少ない、牧草上において、観測をおこなった結果について述べる。すなわち、中立状態のもとで、摩擦速度に対する粗度長、地面修正量の関係およびこれ等の無次元数の間の関係について、実測結果の特徴を述べるとともに、理論との比較をおこなった。

#### II 基礎方程式

中立状態における、植被上および植被内の風速分布はそれぞれ次に示す方程式で表現することができる。すなわち、植被上 (i) では、

$$(i) \begin{cases} \frac{d}{dz} \left( \frac{\tau}{\rho} \right) = 0 & \dots\dots\dots (1) \\ \frac{\tau}{\rho} = K \frac{du}{dz} & \dots\dots\dots (2) \\ K = ku_* (z-d) & \dots\dots\dots (3) \end{cases}$$

となることが知られ、また植被内 (ii) では、武田 (1964, 1965), Takeda (1966) によると、

$$(ii) \begin{cases} \frac{d}{dz} \left( \frac{\tau}{\rho} \right) = \frac{C}{H} Fu^2 & \dots\dots\dots (4) \\ \frac{\tau}{\rho} = K \frac{du}{dz} & \dots\dots\dots (5) \\ K = \alpha H u (1-F) & \dots\dots\dots (6) \end{cases}$$

の成立することが示されている。ただし、 $C$ : 武田の抵抗係数、 $F$ : 繁茂度、 $H$ : 植被高、 $\alpha$ : 武田の定数である。ところで、植被上では(2), (3)式および、

$$\frac{\tau}{\rho} \equiv u_*^2$$

から、

$$\frac{du}{dz} = \frac{u_*}{k(z-d)} \dots\dots\dots (7)$$

を得る。(7)式は、いわゆる微分型の風速分布式であるが、これを  $u$  について解き、積分定数として  $Z_0$  を考慮し整理すると次に示す積分型の風速分布式を得る。

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z-d}{Z_0} \dots\dots\dots (8)$$

植被内において、運動量のフラックスに比例する量を定義する式は、植被上と同じであるが、その高さ方向の勾配を示す式および拡散係数を示す式は異なる。(4)式の代わりに、Cowan(1968), Kondo (1971) は、

$$\frac{d}{dz} \left( \frac{\tau}{\rho} \right) = \frac{1}{2} cau^2$$

を用いている。ここで、 $c$ : 単位葉面積当りの抵

\*筑波大学水理実験センター

抗係数,  $a$ : 単位面積当りの葉面積である。また, (6)式の代りに, 真木 (1975a) は,

$$K = \mu Z_0 u (1 - F) \dots\dots\dots (9)$$

を, Inoue (1963) は, より基本的な式,

$$K = l u_*$$

を用いている。ここで,  $\mu$ : 真木の定数,  $l$ : 垂直方向の混合距離である。

次に, 植被高度  $z = H$  では, (i) と (ii) の状態が連続するという仮定から,  $F = 0$  を(6)式に代入し, (8)式を用いて整理すると,

$$\ln \frac{H-d}{Z_0} = \frac{k^2 (H-d)}{\alpha H} \dots\dots\dots (10)$$

を得る。(10)式を無次元粗度長  $\delta (= d/H)$ , 無次元地面修正量  $\zeta_0 (= Z_0/H)$  で整理し,  $\zeta_0$  につき書き直す,

$$\zeta_0 = (1-\delta) \exp \left\{ -\frac{k^2}{\alpha} (1-\delta) \right\} \dots\dots\dots (11)$$

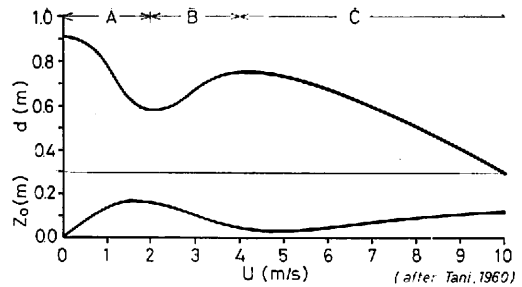
を得る。定数  $\alpha$  については, 水田上の値として,  $\alpha = 0.087$  が得られている。また, (3), (9)式に前述の境界条件をあたえ, 同様に(8)式を用いると次式となる。

$$\ln \frac{1-\delta}{\zeta_0} = \frac{k^2}{\mu} \left( \frac{1-\delta}{\zeta_0} \right) \dots\dots\dots (12)$$

定数  $\mu$  に関し, 真木 (1975a) はトウモロコシ, カラマツ等の群落および人工粗面について,  $\mu = 0.45 \sim 0.50$  の範囲内であることを示し, 平均値 0.475 を得ている。(11), (12)式は, 本来互いに独立して導入された粗度長と地面修正量の関係を示すものである。

### III これまでの観測結果

風速 ( $u$ ) あるいは摩擦速度 ( $u_*$ ) と粗度長 ( $Z_0$ ), 地面修正量 ( $d$ ) の関係に関する研究は, これまで数多くおこなわれている。Rider (1954) は, 草高 10cm から 80cm まで連続的に変化するカラス麦畑上における実測結果から,  $u$  と  $H$  の両者に比例して  $d$  が変化することを示した。一方, 谷ほか (1954) は出穂後の草高 1.1m の水稲について, 比較的風速の強い場合の観測をおこない, 高度 2m における  $u$  が, 約 5m/s までは  $d$

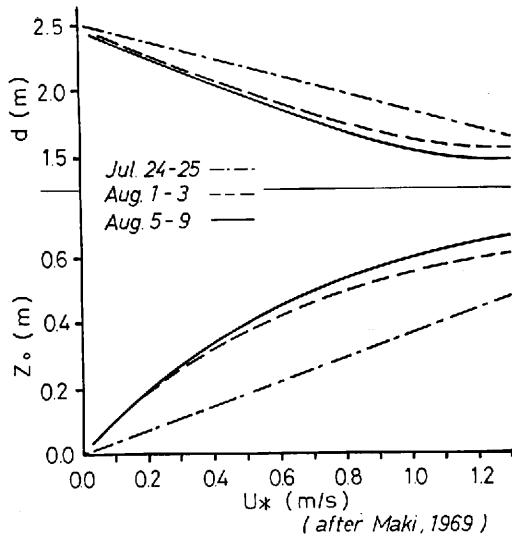


第1図 風速に対する地面修正量 ( $d$ ), 粗度長 ( $Z_0$ ) の変化 (谷, 1960)

が増大するとともに  $Z_0$  が減少し,  $u$  がさらに増すと, 逆に  $d$  が減少し  $Z_0$  が増大することを示した。また, 谷ほか (1956) は, 穂の垂下った時期の実測から,  $u$  が 1~5m/s の範囲では  $d$  が減少し,  $Z_0$  が増大することを示した。そして, これ等の結果から,  $d$  と  $Z_0$  の  $u$  に対する関係が, 植被の生育段階により異なることを指摘した。谷

(1960) は, この時期までの研究結果をまとめて第1図を得た。これによると,  $d$  と  $Z_0$  の変化に対して3つの特徴的な風速領域が存在し, (A)高度 1.5m の風速が 2m/s 以下では  $d$  が減少,  $Z_0$  が増大する。(B) 2~4.5m/s では  $d$  が増大,  $Z_0$  が減少する, (C) 4.5m/s 以上では再び  $d$  が減少,  $Z_0$  が増大する傾向のあることを示した。Penman & Long (1960) は, 卓越する渦の代表速度として考えることのできる  $u_*$  を  $u$  の代りに用いて, 草高約60cm の小麦畑における実測から,  $u_*$  の増大とともに  $d$  が減少,  $Z_0$  が増大することを示した。また, 草高 90cm の小麦畑において, Isobe

(1964) も同様の結果を得た。特に植被の生育状態の差異が,  $d$  と  $Z_0$  におよぼす影響については, Udagawa (1966), 真木ほか (1968) が数多くの観測をおこない,  $d$  は生育全期間について  $u$  とともに減少する一方,  $Z_0$  は生育前半  $u$  が増大するに従い減少するのに対し, 生育後半は特に弱風の場合逆に増大する傾向が認められることを示した。さらに真木 (1969) は, 第2図に示すように, 比較的弱風速の場合のトウモロコシ畑で,  $u$  に対して  $d$  が減少,  $Z_0$  が増大し, これ等の回帰線の傾きは生育がすすむにつれ



第2図 摩擦速度( $u_*$ )に対する地面修正量( $d$ )と粗度長( $Z_0$ )の植被生育時期との関係

少しづつ大きくなる傾向のあることを示した。

#### IV 観測および解析方法

観測は、水理実験センター熱収支・水収支観測施設のうち、接地プロファイル測定装置を用いておこなった。観測期間は、1978年8月2日から11日の連続10日間である。観測方法は、半径80mの圃場のほぼ中央に高さ8mのポールを立て、0.5、1.0、2.0、4.0、8.0mの5高度で乾球温度と風速を測定した。風速計感部には3杯式光電風速計発信器を、温度計感部にはサーミスタを用いた。風速計発信器は、始動風速0.2m/sで比較的弱風の場合にも測定可能なものである。測定周期を10分とし、連続した3個の10分平均値から、30分平均値を求め解析に用いた。測定装置の詳細については、林・古藤田(1979)を参照されたい。

データ処理の手順は、接地プロファイル測定装置で測定した値をデジタルプリンターに記録し、これを1日毎にまとめて、端末装置RT-80からTOSBAC-5600のパーマメントファイルに入力した。このようにして作成した10日間のデータを利用して、FORTRANあるいはSPSSプログラムにより各種の統計処理をおこなうと同時に

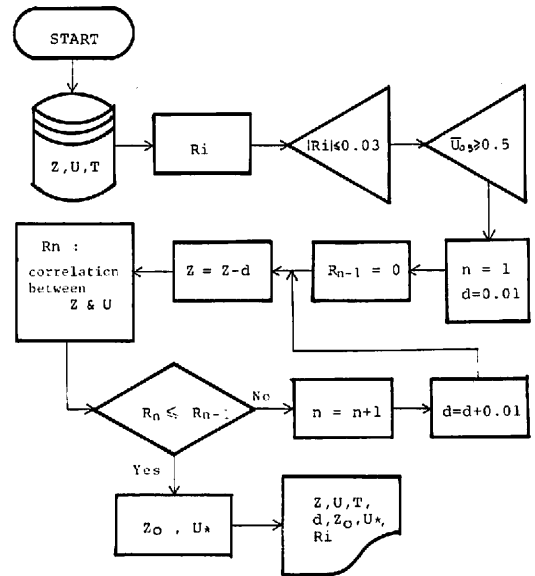
に、リチャードソン数、摩擦速度、粗度長、地面修正量、抵抗係数を求めた。

本論の目的から、中立状態のデータを選択するため、リチャードソン数( $Ri$ )を次式で定義し、

$$Ri = \frac{g \frac{d\theta}{dz}}{\theta \left( \frac{du}{dz} \right)^2}$$

高度2mで、 $|Ri| \leq 0.03$ の範囲に入る全89個の30分平均値を解析に用いた。ここでは、 $\theta$ は絶対温度である。

地面修正量を求める方法として、いわゆるTry & Error法を用いた。計算の流れ図を第3図に示す。実測結果と対数法則の間の相関係数が最も

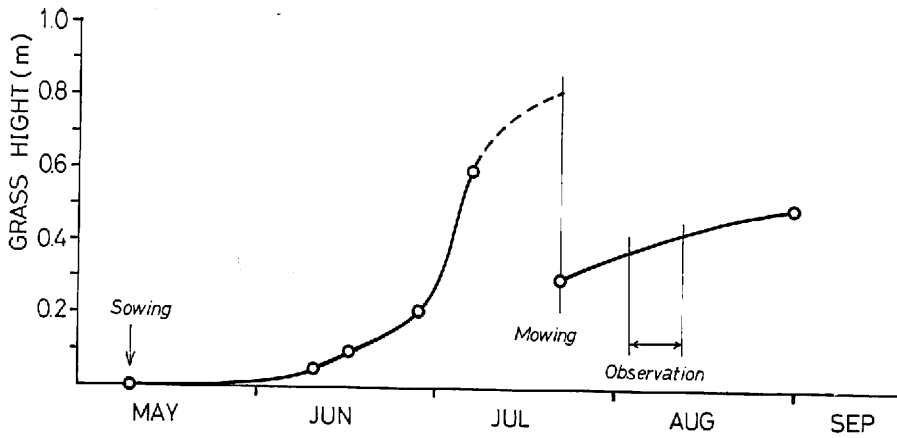


第3図 地面修正量計算の流れ図

大きくなるための補償値として $d$ を求め、その結果得られた風速分布が(7)式を満足することから $u_*$ を決定した。さらに $Z_0$ は(8)式から求めた。抵抗係数( $C_D$ )は次式から求めた。

$$C_D = \left( \frac{u_*}{u} \right)^2 \dots \dots \dots (13)$$

ただし、 $u_*$ 、 $C_D$ は高度2mの値を用いた。



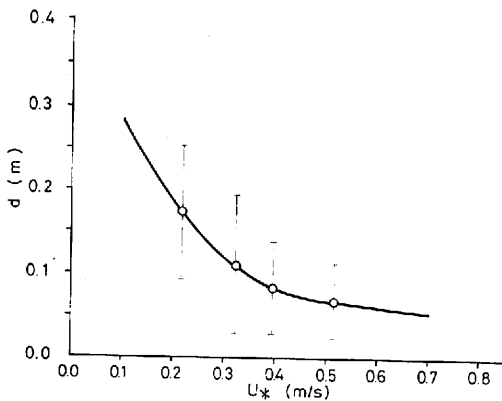
第4図 圃場牧草高の変化

次に、圃場内の牧草高の変化を第4図に示す。5月に5種混合（ケンタッキーブルーグラス、レッドトップ、ウィーピング、ホワイトクローバー、クリーピング）の種子を播き、7月下旬に約30cmに刈込んだ。これから、観測期間の8月2日から11日の平均牧草高 ( $H$ ) は0.4mである。

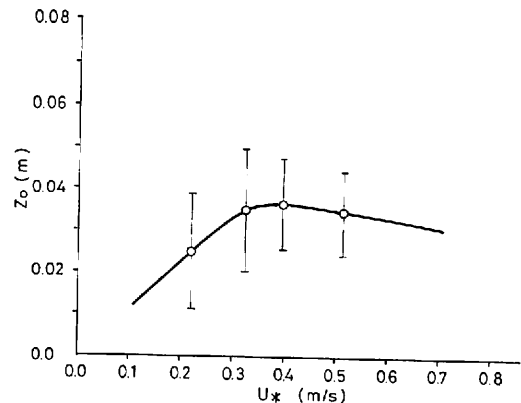
V 結果と考察

すでに述べたように、植被の種類、生育時期によって  $u$  あるいは  $u_*$  に対する  $d$ ,  $Z_0$  の変化の様子が異なることが知られている。第5図に牧草上2mの  $u_*$  に対する  $d$  の変化を、第6図に  $Z_0$  の変化を示す。 $u_*$  の出現範囲は0.12~0.68m/s

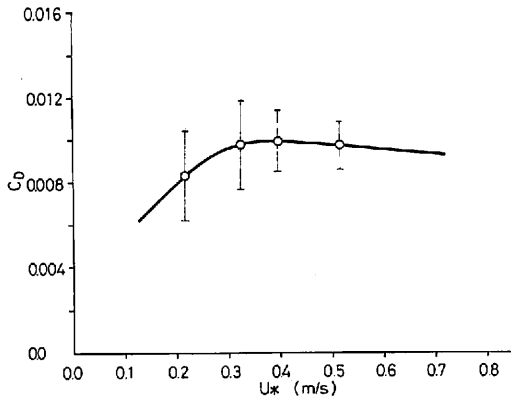
である。細実線は平均値に対する標準偏差を示す。第5図から、 $d$  は  $u_*$  とともに対数的に減少する。この結果は、これまでの観測結果に示された傾向と一致するが、第2図に比べると減少の割合が大きい。 $d$  が減少する理由として、風速すなわち  $u_*$  が大きくなると植被内部に風が侵入するようになり、 $d$  が減ずるものと考えられる。第6図から、 $Z_0$  はある  $u_*$  の値までは増大、それ以上ではむしろ減少する傾向が認められる。すなわち、 $u_*=0.37\text{m/s}$  で粗度が最大となり、 $Z_0=0.037\text{m}$  となる。これは、 $u_*$  の増大とともに  $d$  が減少するため、抵抗として作用する部分が増して  $Z_0$  が増大するが、ある一定の値を越えてさらに  $u_*$



第5図 摩擦速度 ( $u_*$ ) と地面修正量 ( $d$ ) の関係



第6図 摩擦速度 ( $u_*$ ) と粗度長 ( $Z_0$ ) の関係



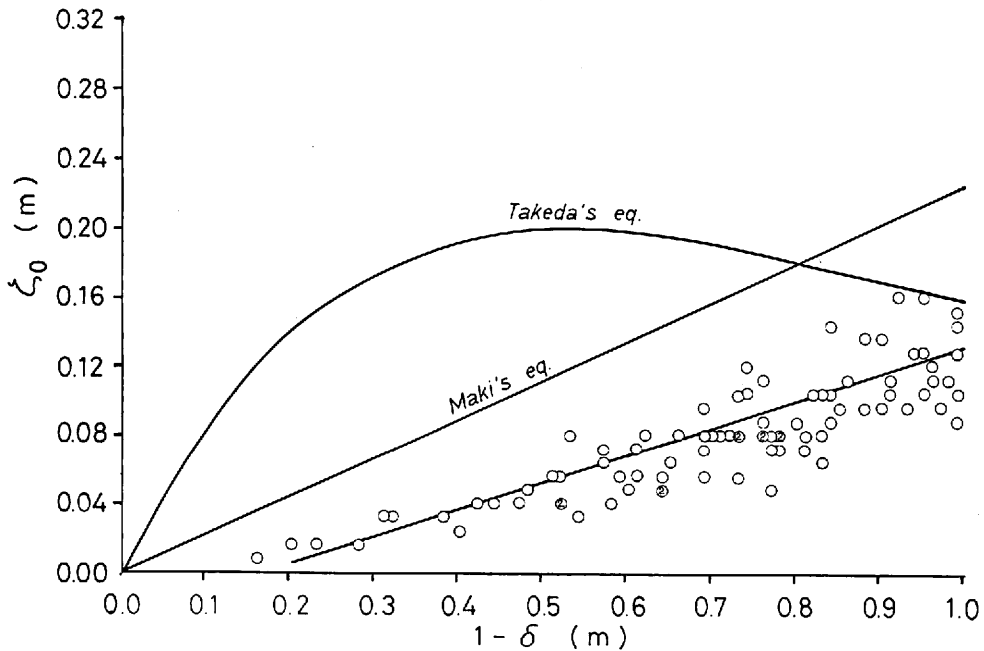
第7図 摩擦速度 ( $u_*$ ) と抵抗係数 ( $C_D$ ) の関係

が増大すると、植被が吹き倒されて障害物として働く部分が減ずる効果が顕著になり、その結果  $Z_0$  が減少すると考えることができる。真木 (1975b) は、トウモロコシ群落上で  $u_*$  に対する  $d$ 、 $Z_0$  の関係が直線で近似できることを示したが、牧草上での結果はこれと多少異なるようである。また、

さらに広範囲の  $u_*$  につき検討する必要があるが、 $Z_0$  に極大値が出現することから、 $d$  と  $Z_0$  は  $u_*$  に対して互いに独立した変化を示すことが予想される。

$C_D$  と  $u_*$  の関係を示すと第7図となる。第6図と同様、 $u_*$  増大とともに  $C_D$  が増大し、 $u_* = 0.37\text{m/s}$  で最大値  $C_D = 0.01$  となる。さらに  $u_*$  が増すと、 $C_D$  は減少する傾向を示す。第6図と第7図が似た変化を示すのは、(8)、(13)式から、両者が  $d$  を媒介に密接な関係にあるため、粗度長が大きいことは抵抗係数が大きいことと同意であることを示すものである。従って、 $Z_0$  と  $C_D$  の間には非常に良い相関があり、これは接地層において対数法則が良く成り立つことを示すに他ならない。

次に、粗度長と地面修正量の関係を知るために、縦軸に  $H = 0.4\text{m}$  で無次元化した  $\zeta_0$ 、横軸に  $(1 - \delta)$  をとり、散布図を作成すると第8図となる。 $\zeta_0$  と  $(1 - \delta)$  は比例し、 $(1 - \delta)$  が比較的大きい場合の直線回帰式を求めると次式のように



第8図 地面修正量に関する量  $(1 - \delta)$  と粗度長 ( $\zeta_0$ ) の関係

なる。ただし  $(1-\delta) > 0.2$  の範囲で、

$$\zeta_0 = 0.15(1-\delta) - 0.02 \dots\dots\dots (14)$$

相関係数は、 $\gamma = 0.863$  となる。(14)式は、地面修正量が小さくなると粗度長が大きくなることを示している。Tanner & Pelton (1960)、Cowan (1968) は、同様な直線関係を認めているが、この場合の直線の勾配は0.36で、上式の約2.5倍である。図中に武田の(11)式、真木の(12)式を同時に示した。(11)式については、定数  $\alpha = 0.087$  を用いた。一方(12)式は、次のように変形できる。

$$\ln A = \frac{k_2}{\mu} A \dots\dots\dots (15)$$

ここで、 $A = (1-\delta)/\zeta_0$  である。定数  $\mu = 0.475$  とすると(15)式は  $A$  に対して2つの解を持ち、その形は、 $\zeta_0 = m(1-\delta)$  で表現できる。このうち一方の解、 $A = 4.39$  すなわち  $m = 0.23$  の場合を図に示した。両理論式とも、 $\zeta_0$  を大きめに評価し、特に武田の式では  $\zeta_0$  の最大値が存在する部分で牧草上の実測との差が大きい。 $\alpha$  の水田上の観測値から得られた値を小さくすれば、牧草の場合に近づくが極値付近のずれは残る。真木の式は、 $\zeta_0$  と  $(1-\delta)$  が一次関数的な関係を示す点では実測結果と一致するが、 $\zeta_0$  は全体的に約2倍大きくなる。実測値が理論式と異なる原因として、植生の種類あるいは生育時期による空気力学的特性の差異が考えられる。すなわち、理論式中の定数を決定する際に、実測対象となった水稻、トウモロコシ等に比較して、牧草の場合には、風に対して変形しやすい特性を定数に対して考慮する必要がある。

本論では、 $\zeta_0$  と  $(1-\delta)$  の間に一次関数的関係を認めるにとどめ、さらに詳細な検討は今後の課題とした。

## VI あとがき

牧草上における風速、温度プロファイルを実測し、摩擦速度 ( $u_*$ ) に対する粗度長 ( $Z_0$ ) と地面修正量 ( $d$ ) の関係を調べ、次の結果を得た。(1)  $0.1 < u_* < 0.7 \text{ m/s}$  の範囲で、 $d$  は  $u_*$  が増大するとともに対数的に減少する。(2)  $Z_0$  は、 $u_* =$

$0.37 \text{ m/s}$  までは増大、それ以上では減少する傾向があり、この場合の  $Z_0$  の最大値は、 $Z_0 = 0.037 \text{ m}$  である。また、無次元化した粗度長 ( $\zeta_0$ ) と地面修正量 ( $\delta$ ) の関係から次を得た。(3)  $\delta$  が比較的小さい範囲で、 $\zeta_0$  と  $(1-\delta)$  の関係を1次関数〔式(14)〕で近似することができる。(4) 前述の関係について、武田および真木の理論式と実測値を比較すると、実測結果は全体的に  $\zeta_0$  が小さくなる。

(1)、(2)、(3)の結果については、これまでの研究とはほぼ一致した。(4)については、植被の種類の違いに起因する空気力学的特性の差異を考慮する必要のあることが認められた。

データ処理には、筑波大学学術情報処理センター大型計算機を用いた。

## 謝 辞

本論文を作成するにあたり、多くの貴重な助言をいただいた筑波大学地球科学系古藤田一雄助教授をはじめとする水理実験センターの諸氏に対し、文末ながら感謝の意を表します。

## 文 献

- 武田京一 (1964) : 植物群落内部の風について。農業気象, 20, 1-5.
- 武田京一 (1965) : 植物群落内部の風について (II)。農業気象, 21, 11-14.
- 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.
- 谷 信輝・井上栄一・今井和彦 (1954) : 耕地風の測定(3)。農業気象, 10, 105-108.
- 谷 信輝・井上栄一・今井和彦 (1956) : 耕地風の測定(5)。農業気象, 12, 17-20.
- 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。筑波大学水理実験センター報告, 3, 81-88.
- 真木太一・高見晋一・新庄 彬 (1968) : ソルゴー植被上に於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.
- 真木太一 (1969) : トウモロコシ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, 25, 13-18.
- 真木太一 (1975a) : 植物群落高度と地面修正量および

- 粗度長との相互関係. 農業気象, 31, 7-15.
- 真木太一 (1975b) : 種々の植被面における風速分布式  
中の変数と安定度. 農業気象, 31, 61-70.
- Cowan, I. R. (1968) : Mass, heat and momentum  
exchange between stands of plants and their  
atmospheric environment. *Quart. J. Roy. Met.  
Soc.*, 94, 523-544.
- Inoue, E. (1963) : On the turbulent structure of  
airflow within crop canopies. *J. Met. Soc. Japan*,  
41, 317-326.
- Isobe, S. (1964) : Zero-plane displacement in relation  
to extinction of momentum flux in crop. *Bull.  
Nat. Inst. Agr. Sci., Ser. A*, 11, 1-18.
- Kondo, J. (1971) : Relationship between the rough-  
ness coefficient and other aerodynamic param-  
eters. *J. Met. Soc. Japan*, 49, 121-124.
- Penman, H. L. & Long, I. F. (1960) : Weather in  
wheat : an essay in micrometeorology. *Quart.  
J. Roy. Met. Soc.*, 85, 16-50.
- Rider, N. E. (1954) : Evaporation from an oat field.  
*Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 80, 198-211.
- Takeda, K. (1966) : On roughness length and zero-  
plane displacement in the wind profile of the  
lowest air layer. *J. Met. Soc. Japan*, 44, 101-  
107.
- Tanner, C. B. & Pelton, L. W. (1960) : Potential  
evapotranspiration estimates by the approxima-  
te energy balance of Penman. *J. Geoph. Res.*,  
65, 391-393.
- Udagawa, T. (1966) : Variation of aerodynamical  
characteristics of a barley field with growth.  
*J. Agr. Met.*, 22, 7-14.