



Title	森林上の風速の垂直分布
Author(s)	石崎, 健二; ISHIZAKI, Kenji; 太田, 路一 他
Citation	北海道大學農學部 演習林研究報告, 44(2), 461-475
Issue Date	1987-07
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/21212
Type	departmental bulletin paper
File Information	44(2)_P461-475.pdf



森林上の風速の垂直分布

石崎健二* 太田路一**

Wind Profiles above a Forest Canopy

By

Kenji ISHIZAKI* and Michikazu OTA**

要 旨

森林の上を通り抜けてくる風と森林との力学的相互作用について調べた。平均風速のプロファイル測定し、それを対数分布で近似することにより、力学的相互作用の大きさの目安となる量として摩擦速度と粗度を、樹木の繁茂の程度を示す量として零面変位を推定した。

測定は北海道大学苫小牧演習林でおこなった。平均樹高が約8mの広葉樹林の地上から18m以下で測定された風速は、零面変位6mで対数分布に近いプロファイルを示した。粗度は0.1~0.8m、平均値で0.3mとなり、樹葉の有無による差はみられなかった。また、摩擦速度は零面変位からの高さ12mの所の平均風速の1/10前後となった。なお、零面変位からの高さが林縁からの距離の1/10よりも高い所での平均風速は対数分布からはなれていく傾向を示した。

長さ60mのコードラートについて林冠上端の輪郭を調和解析したところ、卓越振幅の大きさが粗度と同じ程度、ないしは、やや大きめとなった。

キーワード： 森林上の風、平均水平風速、対数速度分布、樹冠表層の並び。

目 次

1. 緒 言	462
2. 森 林 と 風	462
3. 風に関する諸量を風速分布から求める方法	468
4. 苫小牧地方演習林における風の測定とその結果	469
5. 森林の表面形状の調和解析	473
6. 粗度と樹木の状態との関係について	474

1987年2月28日受理 Received February 28, 1987.

* 北海道大学工学部工業力学第二講座
Faculty of Technology, Hokkaido University.

** 岩手大学農学部林学科
Faculty of Agriculture, Iwate University.

謝 辞	475
参考文献	475
Summary	475

1. 緒 言

森林内の大気は林縁部と林冠上部の両面から林外の大気と交換される。林縁部では大気の直接の侵入が、林縁から十分はなれた林冠上部では乱流拡散が、その主要な役割を担っている。大気のこの交換過程は同時に風が森林に及ぼす力の過程でもある。

本報告では林冠上部における風の場に注目する。まず、平均風速を考える意義を明らかにしたうえで、水平一様な定常二次元流に対するモーニン・オブコフの相似理論を手がかりにしながら、森林の存在が平均風速にどのように反映されるかを確かめる。次に、風と森林との相互作用を示すところの風及び森林に関する特性量——零面変位、粗度、摩擦速度——の求めかたを確かめ、北海道大学苫小牧演習林における風の観測結果から、広葉樹林の場合の特性量の値を推定する。最後に、森林の表面形状を評価するために林冠の形状の水平分布の調和解析を試み、粗度との関連を見る。

2. 森林と風

2.1 瞬間風速と平均風速

図-1は苫小牧演習林308林班の樹冠上端から約3m上で測定された風速の時間変化を示す。林冠の上のある一点における風速はたえず変化しており、この風から得られる平均風速はもとの風とはちがった時間変化を示すことが予想される。図-2はこれを確かめたもので、平均化時間を10分間として得た平均風速の時間変化である。任意の時刻の平均風速はその時刻の10分前からその時刻までの間の風速の平均値として与えられている。平均化時間よりも短い周期の変動が消えていることがわかる。

2.2 平均流

森林上の任意の位置における時々刻々の風速がその瞬間値ではなく平均値であるようなあの種の“風”を想定してみよう。実際の空気(大気)とは異なる抽象的な“実体”が流れている

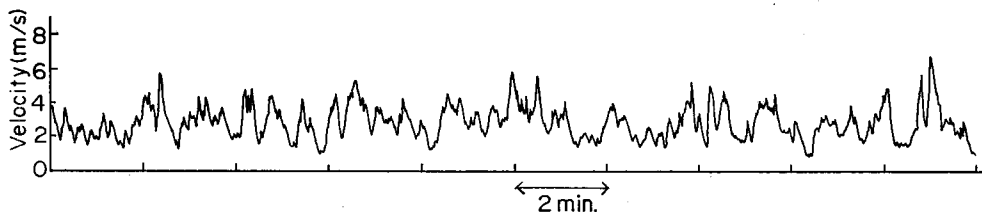


図-1 瞬間風速の時間変化を示す例

Fig. 1. Typical example of a recording of wind velocity.

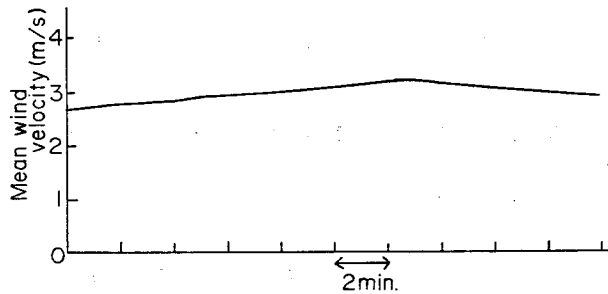


図-2 図-1の例から計算した10分間平均風速

Fig. 2. Ten-minute average of the wind velocities shown in Fig. 1.

と想定し、その流速が平均風速で示されるところの“風”，と考えるのである。このように抽象的に考えられた流れを平均流とよぶ。

ある位置ある時刻の平均風速は、平均化時間の長さによって異なる。平均化時間が零ならば瞬間風速と同じであり、10分間ならば2.1節で示したようになり、20分間ならばもっと時間変化の少ない平均風速が得られる。したがって、ある実際の流れが与えられた時、そこから抽象化される平均流は平均化時間の大きさ次第で異なってくるのである。平均化時間の大きさは、どのような問題を解こうとしているかによって、おのずからきまってくるべきものである。

2.3 平均流に対する運動と熱の基礎方程式からの結論

演習林での観測結果によれば、平均流の流速の位置によるちがいは、高さによる依存性が大きい割には水平的なそれは小さい。そこで、ここでは次のような単純な平均流に対して流体力学における運動と熱の基礎方程式からどのようなことがわかるか、考えることにする。

まず、水平に無限に広がっている地面を考える。そこに繁っている樹木は高さ及び樹冠配置がいずれも一樣、言いかえれば、樹木の繁茂の状態がどこでも同じであるとする。平均流の方向はどこでも同じで、かつ、水平であるとし、これを座標の X 軸方向にとる。平均流の流速は水平的には一樣で高さ方向 (Z 軸の方向) にのみ変化しているとする。さらに、平均流速の時間変動は無く、地球の自転に起因するコリオリの力も無視できるとする。この最後の条件から樹冠上端から高々 50 m 位の高さまでしか考えないことになる。その他のいくつかの仮定や方程式の演算の過程は他書を参照することとして結果のみを示せば、運動の方程式からは

$$-\rho_0 \overline{u'w'} + \rho_0 \nu \frac{\partial U}{\partial z} = const \quad (1)$$

熱の方程式からは

$$c_p \rho_0 \overline{w'T'} - c_p \rho_0 \lambda \frac{\partial T}{\partial z} = const \quad (2)$$

を得る¹⁾。ここで U は平均流の速度、 ρ_0 と T は大気密度と温度の平均値 (平均流として流れている“実体”の密度と温度に相当)、 ν と λ と c_p は大気の粘性係数と熱伝導係数及び比熱で

ある。\$u'\$, \$w'\$, \$T'\$ は、それぞれ速度の \$x\$ 成分, \$z\$ 成分, 及び温度などの乱れとよばれる量である。また (1), (2) の左辺第一項の横線のついた量は、その線の下の方の量の平均値を表わし、それぞれ次のように定義される。

ある高さ \$z\$ での瞬間的な風速の刻々の値の \$x\$ 成分を \$u(t)\$ とし、次の式

$$U(t) = \frac{1}{b+a} \int_{-a}^b u(t+t') dt' \quad (3)$$

で与えられる平均風速 \$U(t)\$ を考える。時刻 \$t\$ における平均流の流速である。\$(b+a)\$ が平均化時間の長さで、2.1 節の例では \$a=10\$ 分, \$b=0\$ 分であった。次にある時刻 \$t_0\$ における平均流速 \$U(t_0)\$ に関連して、次の式で定義される乱れ \$u'(t)\$ を考える。

$$u'(t) = u(t) - U(t_0) \quad (4)$$

$$\text{但し } t_0 - a \leq t \leq t_0 + b. \quad (5)$$

瞬間的な風速の \$z\$ 成分 \$w(t)\$ についても同様に

$$w'(t) = w(t) - W(t_0) \quad (6)$$

を考える。\$W(t_0)\$ は時刻 \$t_0\$ における \$w(t)\$ の平均値である。\$u'(t)\$ と \$w'(t)\$ の同時刻での積を刻々としてから平均したものが \$\overline{u'w'}(t_0)\$, すなわち、

$$\overline{u'w'}(t_0) = \frac{1}{b+a} \int_{t_0-a}^{t_0+b} u'(t) w'(t) dt \quad (7)$$

である。

(1) の左辺第一項 \$-\rho_0 \overline{u'w'}\$ の物理的な意味は次の通りである。平均流として流れている“実体”の中の、高さ \$z\$ の位置で水平面 (\$z\$ 軸に垂直な面) を \$z\$ 方向へ横切っていく運動量の \$x\$ 成分を単位面積、単位時間当たりで表わしたもので、運動量流束とよばれているものである。言いかえれば、その水平面を境にして、平均流の速度差を小さくするように水平方向に及ぼしあう単位面積当りの力——剪断応力——であり、レイノルズ応力とも言う。この力を粘性の作用にもとづく剪断応力と同様に扱うことにすれば

$$-\rho_0 \overline{u'w'} = \rho_0 \varepsilon \frac{dU}{dz} \quad (8)$$

とおいて渦粘性係数 \$\varepsilon\$ を考えることができる。平均流として流れている“実体”にはその固有の物性として渦粘性とよばれる粘性が存在し、その大きさは \$\varepsilon\$ で与えられるということになる。ただし、\$\varepsilon\$ の値は“実体”のどの部分でも同じにはならないのが普通である。\$u'\$ や \$w'\$ の値が流れの様子に依存しているからである。

同様に (2) の左辺第一項を

$$c_p \rho_0 \overline{w'T'} = -c_p \rho_0 \varepsilon_H \frac{dT}{dz} \quad (9)$$

とにおいて渦熱拡散係数 ϵ_H を定義することができる。

さて、(1)の左辺第二項は ν 、すなわち大気の粘性による運動量流束なので、結局(1)は全体としての運動量流束がどの高さでも同じ値になることを示している。この一定値を τ で表わすことにする。同様に(2)は熱流束が高さによらず一定値であることを示しており、この一定値を q で表わすことにする。なお、(1)および(2)の左辺第二項は第一項にくらべて2桁ぐらい小さいために無視されるのが普通で、結局(1)、(2)は

$$-\rho_0 \overline{u'w'} = \tau = \text{const} \quad (10)$$

$$c_p \rho_0 \overline{w'T'} = q = \text{const} \quad (11)$$

となる。

以上のように、基礎方程式である運動と熱の方程式から簡単な流れに対して得られる結果には、平均流速 U や平均温度 T が含まれないことになった。したがって、これらの量が従うべき方程式は(1)、(2)に矛盾しないことを考慮しつつ別な観点から導かねばならない。

次節に移る前に、レイノルズ応力 $-\rho_0 \overline{u'w'}$ と森林との関連について若干の説明を追加しておきたい。この剪断応力は(10)が示しているように“実体”と樹木の間にも、正確には“実体”と接する抽象化された“森林”の間にも現われる。この節のはじめの方で単純な森林を想定したが、現実にはそのような森林は存在しないだろう。こういう森林があれば、ここで考えているような水平に流れる二次元一様流が生じるだろう、ということから便宜的に仮定された森林である。さらに、この一様流が実在の流れに平均操作をほどこすことによって得られる抽象化された“実体”の流れであることに対応して、この森林も実在の森林のある平均化された特性がその特性であるところの抽象化された“森林”であると考えられるのである。

2.4 平均流の速度分布式

風と森林の間での力学的相互作用は、森林に接している風にのみならず、もっと高い所の風にも反映される。したがって、風の垂直分布を理論的に明らかにすることにより、風の垂直分布をどのような注意のもとに測定し、得られた結果をどのように処理すれば風と森林の相互作用を明らかにできるか、がわかってくる。このようなことを念頭において本節では MONIN と YAGLOM¹⁾ に依りながら必要な関係式を確認する。

2.4.1 大気が中立の場合

2.3節で述べた流れを扱う前に、それをさらに簡単にして熱流束がない場合 ($q=0$) を考えることにする。このような場合、大気の安定度は中立であるという。考慮すべきは

$$-\rho_0 \overline{u'w'} = \tau = \text{const} \quad (12)$$

のみである。

流速分布を支配しているのは(12)により、流れの媒質、“実体”、の特性量である ρ_0 と流れ場の力学的な性質を特徴づける τ 、それに高さ z であると考え、次元的な考察から速度分

布を支配する式として

$$\frac{dU(z)}{dz} = \frac{1}{\kappa} \frac{\sqrt{\tau/\rho_0}}{z} \equiv \frac{1}{\kappa} \frac{u_*}{z} \quad (13)$$

が得られる。 κ は定数でカルマン常数とよばれ、その値は実験的にきめられるのであるが約0.4であるとされている。左辺に速度 U でなく速度勾配 dU/dz がきているのは、(8)からわかるように、応力 τ と結びつくのは dU/dz だからである。 u_* ($\equiv \sqrt{\tau/\rho_0}$) は速度の次元をもち、摩擦速度とよばれている。(13)から速度分布式として

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln z + C \quad (14)$$

が得られる。 C は流れ場の境界条件、すなわち地表面の様子や樹木の幾何学的性質——樹冠の形や並びかた——が流れに及ぼす力学的効果を反映している常数である。

$$C = -\frac{u_*}{\kappa} \ln z_0 \quad (15)$$

とおけば(14)は

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (16)$$

となる。 z_0 は粗度とよばれる長さの次元をもった量であるが、力学的に意味するところは次のようにして知ることができる。

森林の上の平均流を代表する平均流速を U_1 とし、その平均流速をもつ高さを z_1 とする。流れが樹冠に及ぼす応力 (風向の方向への力) τ は U_1 の二乗に比例すると考えて

$$\tau = c_f \cdot \frac{1}{2} \rho_0 U_1^2 \quad (17)$$

とおく。 c_f を抵抗係数といい、応力の大きさが風のエネルギー $\left(\frac{1}{2} \rho_0 U_1^2\right)$ にくらべてどのぐらいかという、その割合を示す“森林”の特性量である。 τ はどの高さでも同じ値の場合を考えているから、(17)に $u_*^2 = \tau/\rho_0$ を代入し、(16)を考慮すると

$$z_0 = z_1 \exp \left(-\frac{\kappa}{\sqrt{\frac{1}{2} c_f}} \right) \quad (18)$$

となる。 κ も z_1 もあらかじめきめられている値だから、 c_f が大きいほど z_0 も大きいことがわかる。

林冠の表面状況は z_0 に反映されているが、平均樹高を h_0 とすれば、これはどう反映されるであろうか。 h_0 の付近ではそこに樹木がない場合よりも風速は小さくなっているはずである。そこで、(13)を基本にしなが h_0 を考慮した式

$$\frac{dU(z)}{dz} = \frac{1}{\kappa} \frac{u_*}{z} g \left(\frac{h_0}{z} \right) \quad (z > h_0) \quad (19)$$

を考える。関数 $g(h_0/z)$ の性質, $g(0)=1$, を考慮しながら g を評価した結果として

$$\frac{dU(z)}{dz} = \frac{u_*}{\kappa(z-d)} \quad (20)$$

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) \quad (z > h_0) \quad (21)$$

が得られている。高さを測る基準点を $z=d$ におけば, (13) の形の速度分布を表わす式, すなわち流れ場の条件 (12) と矛盾することなく, 樹高を考慮した速度分布が得られるということである。ここで, d は零面変位とよばれ, h_0 より小さいのが普通である。林冠上の風は樹木の平均高度がある程度以上大きくなると実際の地面 ($z=0$) は感じなくなり, あたかも零面変位のところが地表面であるかの如くになってしまうだろう, ということである。

2.4.2 大気が中立でない場合も含めて

実際の風を観測する時には, いつも大気の安定度が中立の場合を選べるとは限らない。ここでは中立でない場合も含む一般的な速度分布式を求めてその性質を調べ, 林冠上端からあまりはなれていない高さに限れば, 中立の場合と同様に扱ってもさしつかえないことを示す。

モーニン・オブコフの相似則によれば, 2.3 節で考えている簡単な流れの速度分布は, 流れの媒質 (“実体”) の特性量である ρ_0 , 流れ場の力学的および熱的な性質を特徴づける τ と q , さらに浮力効果 (乱れ w' に関連する) を反映させるための g/T_0 , これら四つの諸量と z によって支配される。ここで T_0 は $T(z)$ の平均値, g は重力加速度である。次元的考察から, 無次元表示された速度分布は一つの無次元量

$$\zeta = \frac{z}{L} \quad (22)$$

$$\text{但し} \quad L = \frac{u_*^3}{\kappa \frac{g}{T_0} \frac{q}{c_p \rho_0}} \quad (23)$$

のみによって記述されることになる。 L はモーニン・オブコフの長さとしてよばれており, その絶対値 $|L|$ は熱的な要因よりは力学的な要因が支配する層の厚さ ($z=d$ から測る) の目安になる量である。また, 大気が不安定の時には $q > 0$ であり, $L < 0$ が不安定の指標になる。 $L > 0$ は $q < 0$ に対応し, この時, 大気は安定である。

さて, 無次元表示された速度分布は ζ のみの関数であることから

$$\frac{d\left(\frac{U}{u_*}\right)}{d\left(\frac{z}{L}\right)} = g(\zeta) \quad (24)$$

となる。これを中立の場合の (13) の形と比べやすいように書き直せば

$$\frac{dU}{dz} = \frac{u_*}{\kappa z} \varphi(\zeta) \quad (25)$$

但し $\varphi(\zeta) = \zeta g(\zeta)$

となる。

中立の場合は $q \rightarrow 0$, すなわち $L \rightarrow \infty$ だから $\zeta \rightarrow 0$ に相当し, この時 (25) は (13) に一致しなければならないことを考慮しながら, $\zeta < 1$ に対して $\varphi(\zeta)$ をべき級数に展開すると

$$\varphi(\zeta) = 1 + \beta_1 \zeta + \beta_2 \zeta^2 + \dots \quad (26)$$

となる。 β_1 の値としては観測により, $\kappa = 0.35$ として,

$$0 < \zeta < 0.1 \quad \text{について} \quad \beta_1 \approx 4$$

$$-0.1 < \zeta < 0 \quad \text{について} \quad \beta_1 \approx 2$$

が得られている²⁾。この値を用いれば, (26) の第二項が例えば 0.1 程度になる ζ は 0.03 程度である。したがって $z \leq 0.03 |L|$ の範囲で風速を測定すれば, 風速分布は中立の場合の式 (13), したがって (21) で表わすことができると考えてよいだろう。竹内・近藤³⁾ は $|L|$ の限界値として, もう少しきびしく, 0.01 をすすめている。

3. 風に関する諸量を風速分布から求める方法

高さが $z < 0.03 |L|$ の範囲にある場合だけを考えることにすれば, 風速分布は (21) により

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \quad (27)$$

である。 κ として 0.4 を採用することにして, 求めるべきは, さしあたり u_* , z_0 , d の三つである。これら三つの量のうち直接測定可能なのは u_* のみである。 z_0 と d は, u_* も多くの場合は, 風速の垂直分布が (27) に従わねばならないということから推定する。この方法は風速勾配を扱うことから「傾度法」とよばれている。 u_* を直接求める一つの方法は 2.3 節で述べた(「渦相関法」という)ので, 次に傾度法によって三つの量を求める手順を示す。

まず d を求める。高さの異なる 3 点, z_1, z_2, z_3 における平均風速 U_1, U_2, U_3 がわかっているれば, (27) により

$$\frac{U_2 - U_1}{U_3 - U_1} = \frac{\ln \left(\frac{z_2 - d}{z_1 - d} \right)}{\ln \left(\frac{z_3 - d}{z_1 - d} \right)} \quad (28)$$

となる。右辺の d に樹木の平均高度 h_0 に近い値をいろいろあてはめて右辺の値を計算し, 左辺と等しくなる時の d の値が求めている値である。

次に u_* を求める。 d がわかったので (27) により

$$u_* = \frac{\kappa(U_2 - U_1)}{\ln \left(\frac{z_2 - d}{z_1 - d} \right)} \quad (29)$$

となり、 u_* が求まる。 κ は0.4とする。

最後に z_0 を求める。 u_* と d がわかったので、(27)により

$$z_0 = \exp \left[\ln(z_1 - d) - \frac{\kappa}{u_*} U_1 \right] \quad (30)$$

となり、 z_0 が求まる。

以上のようにして u_* 、 z_0 、 d が得られると、(8)と(20)から渦粘性係数 ε は

$$\varepsilon = \kappa u_* (z - d) \quad (31)$$

となる。また(9)で与えられている ε_H は、相似則によれば ε に比例するとされて

$$\varepsilon_H = \alpha \varepsilon = \alpha \kappa u_* (z - d) \quad (32)$$

となる。 α の値は $|\zeta| < 0.03$ の範囲では1.3程度である³⁾。水蒸気やその他の気体についても渦輸送係数は相似則によれば(32)と同じ形になる。係数の値は熱の場合とほぼ同じと予想されている¹⁾。

4. 苫小牧演習林における風の測定とその結果

測定地点は308林班(面積3.4ha)の中央からやや北東よりのところである。この林班で上層を構成する樹種としては、ミズナラが本数のうえでは最も多くて約2,000本、次がサクラ類で1,400本、ついでイタヤ類740本、シナノキ450本と続き、それらの樹高は大部分が5~9mである⁴⁾。

測定点には高さ13mの観測用鉄塔(いわゆるB鉄塔)が建てられており、周辺の樹高は約8mである。そこから東西および北の約300mまでは平坦で樹木の様子もほぼ一様である。南の方も平坦ながら約200mで森林の南端に達し、そこから急に30mさがって平坦な苫小牧市街地に続いている。より高い高度での測定にはB鉄塔から南東に約100mの所にある送電線用鉄塔(No. 30, 高さ36m, 北海道電力設置)を借用させていただいた。

風の測定には三杯の風杯と矢羽根から成る光電風向風速計(AVS 16型, 牧野応用測器研究所製)を使用した。

4.1 B鉄塔における風速の垂直分布

着葉期である1977年9月28日, 29日, それに落葉期である同年11月1日, 2日, の測定結果を検討する。風速は3高度で測定し, 地上から9m, 12mの点は鉄塔から風上側へ横に1.5mポールをつき出して, 18mの点は鉄塔の上に長さ6mのポールを立てて, それぞれの先端に風杯を設置した。風向は鉄塔の高さ14.5mに常置されている風向風速計による測定値から判断した。

風速の平均化時間を10分間にした場合の結果が表-1に示されている。 d , z_0 , u_* は3章で示されている手順に従って計算したものである。

零面変位は、風が強くなって樹木の変形が著しくならない限り、一つの測定点については一定値と考えられる。しかし表-1ではかなりのばらつきが見られる。これは、3高度の平均風速が常に正確に対数速度分布(27)をしているとの前提で d を計算しているためで、平均風速が僅かでもそれまでとちがった分布になると d の変化となって現われる可能性があるのである。そこで、 d を一定値、表-1の d の平均値に近い値であるところの、6mとしたうえで、風速分布を検討してみた。6mという値は平均樹高の約75%に相当し、この比率は平均樹高15.5mの松林の場合⁵⁾とほぼ同じである。

表-1 10分間平均風速とそれから計算された d , z_0 , u_*

Table 1. Data of ten-minute average value of wind velocities and results computed from these data.

Series No.	Observation date and time	Wind direction	Wind velocity (m/s)			d (m)	z_0 (m)	u_* (m/s)
			P ₁	P ₂	P ₃			
1	15 h 30 m-40 m 28 Sept. 1977	SW	2.0	2.6	3.2	6.0	0.28	0.34
	40 m-50 m	SSW	1.8	2.7	3.7	4.9	1.35	0.65
	50 m-60 m	SSW	1.9	2.8	3.7	6.0	0.67	0.51
	16 h 00 m-10 m	SSW	2.2	3.0	3.8	6.0	0.44	0.46
2	11 h 40 m-50 m 29 Sept. 1977	SSE	1.4	1.9	2.2	8.2	0.01	0.13
	50 m-60 m	S	1.8	2.3	2.6	8.2	0.00	0.13
	12 h 00 m-10 m	S	1.9	2.3	2.7	6.0	0.11	0.23
	10 m-20 m	S	1.9	2.3	2.8	3.0	0.85	0.39
3	15 h 30 m-40 m 29 Sept. 1977	SSW	2.4	3.1	3.9	4.6	0.74	0.54
	40 m-50 m	SSW	2.3	3.0	3.7	6.0	0.30	0.40
	50 m-60 m	SSW	2.2	2.9	3.5	7.1	0.10	0.30
	16 h 00 m-10 m	SSW	1.9	2.4	3.0	3.5	1.05	0.46
4	11 h 00 m-10 m 2 Nov. 1977	N	3.0	3.4	4.6	/	/	/
	10 m-20 m	NNE	3.3	3.6	4.8			
	20 m-30 m	N	3.1	3.2	4.3			
	30 m-40 m	N	3.1	3.3	4.7			
5	13 h 10 m-20 m 2 Nov. 1977	N	2.7	3.4	3.8	8.3	0.00	0.17
	20 m-30 m	NNE	3.4	4.0	4.9	4.3	0.29	0.49
	30 m-40 m	N	3.4	4.1	4.9	4.6	0.35	0.54
	40 m-50 m	N	2.1	2.5	2.9	6.0	0.07	0.23
6	15 h 10 m-20 m 1 Nov. 1977	N	1.0	1.3	1.6	6.0	0.28	0.17
	20 m-30 m	N	1.1	1.5	1.9	6.0	0.44	0.23
	30 m-40 m	N	1.0	1.4	1.8	6.0	0.52	0.23
	40 m-50 m	N	1.0	1.3	1.8	—	—	—

P₁, P₂ and P₃: anemometer level of 9, 12 and 18 m high respectively.

d : zero plane displacement, z_0 : roughness length and u_* : friction velocity.

図-3, 4 は $d=6\text{ m}$ として風速をプロットしたものである。この図からわかることの第一は、シリーズ4を除き、いずれも対数分布に十分近いということである。第二は、40分間を1シリーズとして測定しているが、シリーズ内での z_0 のばらつき方や、その平均値がシリーズ

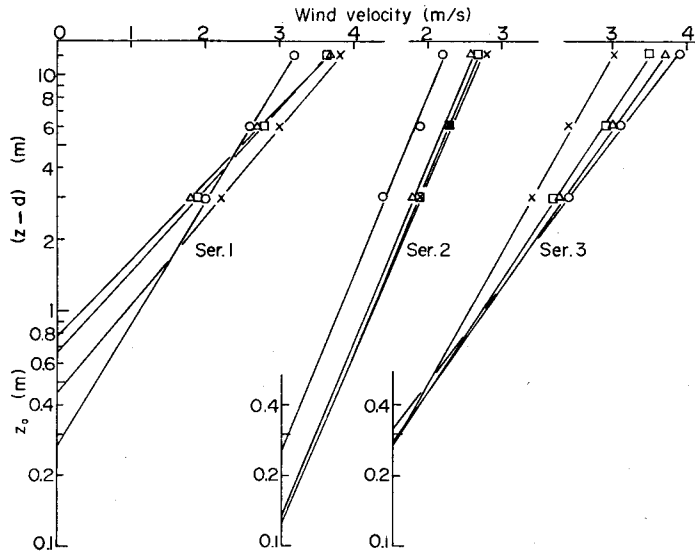


図-3 $d=6\text{ m}$ として $(z-d)$ と $u(z)$ の関係から z_0 を求める。B 鉄塔, 着葉期
 Fig. 3. Plot of $\ln(z-d)$ against $u(z)$ to determine z_0 , assuming $d=6\text{ m}$, at Tower-B station in the foliage season.

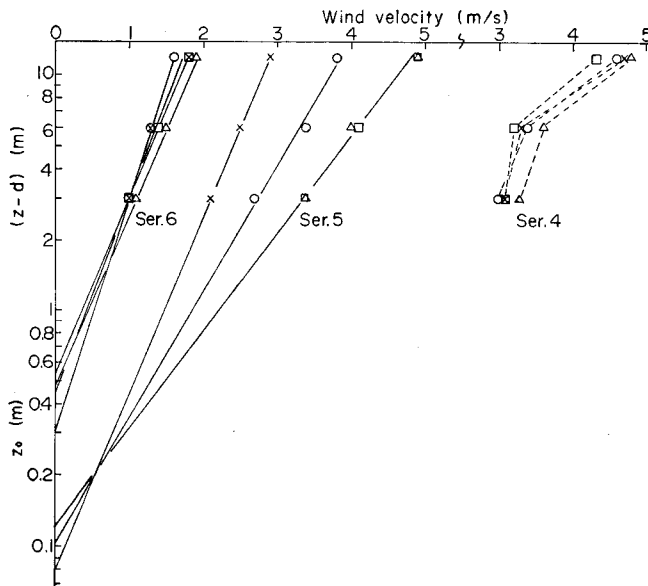


図-4 図-3と同じ。但し落葉期
 Fig. 4. Same as Fig. 3, but in the nonfoliation season.

によってかなり異なっていることである。風向が異なるのであれば風が通って来るところの樹冠の形や分布の様子も異なってきて、それが z_0 の変化となって反映されることもあり得よう。しかし、シリーズ1と3ではほとんど同じ風向であるにもかかわらず、 z_0 のばらつき方がちがっており、平均値にも2倍ぐらいの開きがある。第三は、時期によって風向がちがっているために正確な比較はできないが、 d および z_0 には樹木の葉の有無による差が現われていない、ということである。第四は、風速分布は対数分布から著しくはずれることもある、ということである。シリーズ4はシリーズ5と同様の風向、風速であるにもかかわらず、僅か2時間の差で40分間にわたって非対数的分布を示している。

z_0 の値については大気不安定度とともに大きくなる傾向があるという報告⁵⁾もある。| κ |がある程度大きくなっても風速は相変わらず対数分布的—— z_0 の値が中立の場合とは異なる形で——になることを示しているのであろう。本論文では L の測定はしていないので z_0 のばらつきが不安定度によるものかは不明である。ほとんど中立の場合でも0.8m~1.0m程度のばらつき⁵⁾は避けられないようである。

結局図-3, 4からは、 $d=6$ m, $z_0=0.1\sim 0.8$ m (平均値0.3 m) が得られたことになる。この値は、平均樹高15.5 mの松林で得られた値0.7~2.7 m³⁾、果樹園での0.5~1.0 mや森林での1.0~6.0 m³⁾などに比べれば、やや小さめである。

さて、ここで得られた d と z_0 の値を用いて u_* と U の関係を調べてみよう。 U として高さ18 mの風速を用いることにして、それを U_{18} で表わせば、(27)により

$$u_* = \frac{\kappa}{\ln\left(\frac{18-d}{z_0}\right)} U_{18} = C_1 U_{18} \quad (33)$$

但し $C_1 = 0.13\sim 0.09$

が得られる。 z_0 として平均値の0.3 mを用いれば $C_1=0.11$ となる。ちなみに、 $U_{18}=5\times 10^2$ cm/sの時には、 $C_1=0.11$, $\rho_0=1.2\times 10^{-3}$ g/cm³とすれば、 $u_*=55$ cm/sとなり、 $\tau=3.6$ dyn/cm²となる。

4.2 送電線用鉄塔における風速の垂直分布

送電線用鉄塔の高さ30 mの所から南側につき出ている長さ4.5 mの腕から、ワイヤーロープをつり下げ、地上からの高さが11 m, 16 m, 21 m, 27 mの各位置に風杯を取りつけた。ワイヤーロープは2本平行に張り、先端を地面に固定してねじれを防いだ。この鉄塔の北には約10 m掘り下げて路面幅25 mの自動車道路が東北東~西南西に走っており、道路に沿って樹木が幅60 m(道路も含めて)にわたって伐採されている。その林縁が鉄塔の北、僅か数mにせまっているため、南よりの風が吹いた1979年7月6日、7日の測定結果について検討する。樹木の開葉後間もない時期である。

前節の場合と同様に、40分間を1シリーズとして平均化時間10分間の平均風速を求めた。風向が南、南南西、南西の中から、それぞれ風速が大きめ、小さめの2例を取り出して示した

のが図-5である。但し、零面変位は前節で得た値6mを使用した。この図からわかることの第一は、南南西、南西の風の場合は高度の低い3点では対数分布に従い、 z_0 も0.6m近くに集中しており、かつ、B鉄塔で得た値と矛盾しないということである。第二は南風の場合でも z_0 を0.6mと考えてみると下の2点ではよく対数分布にのるということである。なお、ここでもB鉄塔の場合と同様に $z_0=0.2$ mというかなり小さい値が現われている。第三は、高い所の測定点では対数分布で期待される値より大きい風速になっていることである。南南西と南西の風では高さ27mの点で、南風ではその下の21mの点でも大きめの風速になっている。

最後の点については、内部境界層の発達の違いを反映していることが考えられる。南風の時には林縁までの距離が140m、南西の時には180m程度なので、測定点における内部境界層の厚さは遷移層も含めて、南風の場合で6~13m、南西で9~18mが期待される³⁾からである。零面変位6mを加えると、それぞれ12~19m、15~24mとなるのである。

以上のことから、林縁から200mのB鉄塔で測定点の最高点を $18m-d$ を基準にすれば12mに設定しても対数分布が期待されることがわかる。

5. 森林の表面形状の調和解析

B鉄塔の西側10mの所に幅10m、長さ60mの南北にのびる永久コドラートNo.1が、その東側150mの所にやはり南北にのびる同規模の永久コドラートNo.2が設定されている。これらのコドラートについては樹木の位置、樹高、樹冠の広がり範囲などが調査されており、樹冠投影図も作成されている⁴⁾。この投影図上で、樹冠上端をなぞっていくと森林の表面形状図が得られる(図-6)。60mの区間を159等分して、それぞれの位置での森林表面の高さを読み取り調和解析した結果が図-7である。

両コドラートに共通する点に注目すれば、最大振幅が波数1、波長60mにあること、波長10~15mにもう一つのピークがあるということである。両コドラートにおけるピークの波長と振幅のちがいは、樹冠の大きさのちがいがきいているようである。コドラートNo.1は2~5mの比較的揃った樹冠がびっしり並んでいるのに、コドラートNo.2では5mをこす樹冠が混在するために、樹間の大きさや樹高にもばらつきが大きくなっているからである。

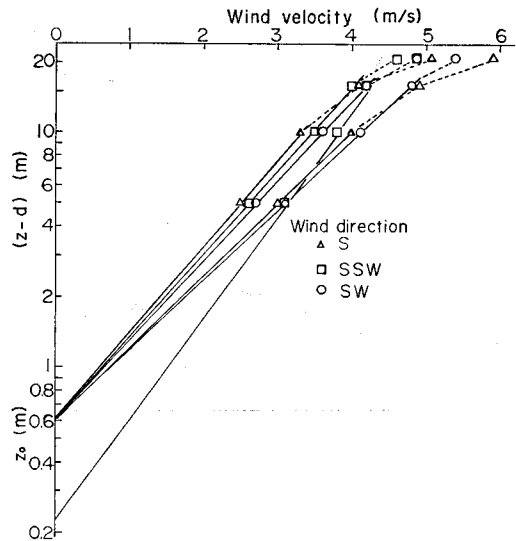


図-5 図-3と同じ。但しNo.30鉄塔、着葉期
Fig. 5. Same as Fig. 3, but at Tower-No. 30 station in the foliage season.

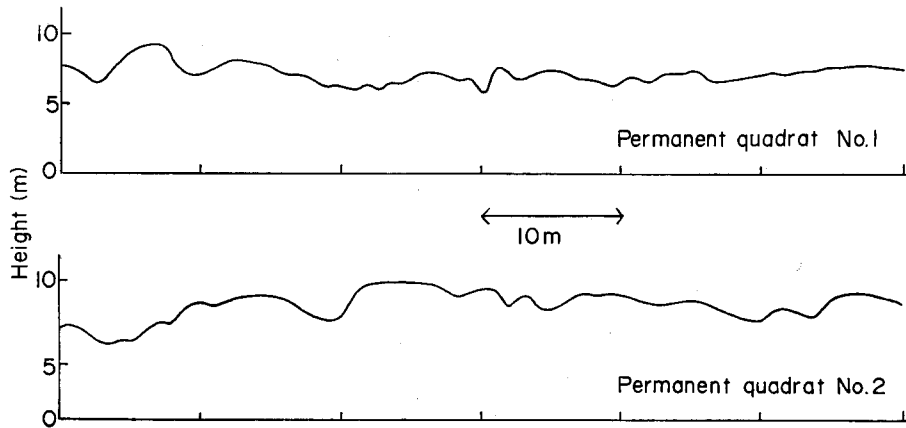


図-6 永久コドラートにおける林冠上端の輪郭

Fig. 6. Outlines of canopy top at the permanent quadrats.

コドラートの長さである 60 m 以上の波長の振幅がわからないためはっきりしたことは言えないが、図-7 で見る限り、ピークの振幅 0.4~0.9 m が粗度の大きさと同程度ないしはやや大きめであることが注目される。

6. 粗度と樹木の状態との関係について

(16)式をみると、ある風の場合が与えられると、その場には速度の基準量——摩擦速度 u_* ——が考えられ、粗度 z_0 は、それに対応してきまるところの長さの基準量であることがわかる。すなわち、どのような風の場合でも——対数分布する限り——風速と高さをそれぞれの基準量を単位にして表わすと、どれも同じ速度分布、同じ風の場合として表現できるのである。

長さの基準量である粗度は、樹冠の形や並びを反映した量であるが、具体的にそれらとどんな関係にあるのだろうか。今回の報告では、有効樹高——零面変位（みかけの地表面の高さ）と平均樹高との差——の 1/5 程度であった。有効樹高というのは、森林上の平均されていない風が林内にむけてたえず吹きこんでいる部分と考えれば、樹冠の形や並びを反映する一つの平均量であるから、これと粗度をくらべるのは一つの方法であろう。

樹冠の形や並びを直接数量的に表現する一方法として、樹冠上端部の形を調和解析により三角関数の和で表わしてみた。その結果は、粗度は最も大きい振幅の大きさと同じ程度、ないしはやや小さめであった。粗度に最も関係する振幅は、ある特別の範囲の波長のものではない

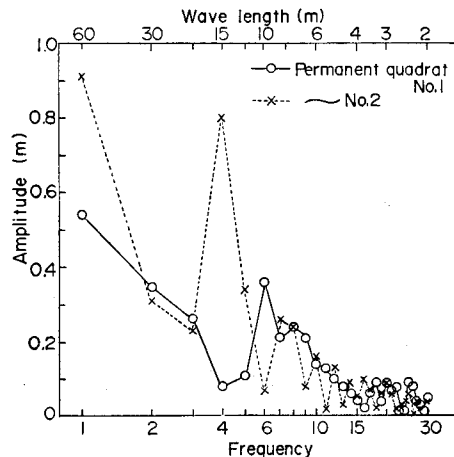


図-7 振幅と波長又は振動数の関係

Fig. 7. The amplitude as a function of wavelength or frequency.

かとも予想されるが、この点については今後の課題である。

さて、樹冠表層の並びの形が何らかの方法で知られ、本報告で行なったように調和解析し粗度が推定できるようになれば、それを5倍して有効樹高、そして平均樹高からの差をとって零面変位が推定できるようになる。そして、どこかの高さの平均風速が与えられた時の摩擦速度、さらには樹冠におよぼす風の応力が(33)式から推定できるようになる。おそらく、樹冠表層の並びは風から受ける力(成長の阻害要因)と樹木の成長力とのバランスできまってくるのではないかと思われる。もし、この辺の事情がわかってくれば、植林や択伐の計画も、このようなことを念頭において、より合理的にできるようになるのではないだろうか。

謝 辞

本研究をすすめるにあたり、苫小牧地方演習林の石城謙吉林長はじめ、職員の皆様には多大の配慮をいただいた。厚くお礼申し上げます。川瀬清演習林教授にはたえず激励を受け、また、工藤哲也元農林省林業試験場北海道支場職員(現林試防災第1研究室)には観測を軌道に乗せるのに援助をいただいた。さらに、送電線用鉄塔での観測は北海道電力株式会社の好意によって可能になった。ほかにも多くの人たちの援助があり、ここに厚くお礼申し上げます次第である。

参 考 文 献

- 1) MONIN, A. S. and A. M. YAGLOM: *Statistical Fluid Mechanics, Mechanics of Turbulence*, Vol. 1, 769 pp. (1971), The MIT Press, Cambridge, Mass.. (邦訳: 総合図書)
- 2) BUSINGER, J. A. *et al.*: Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *J. Atmos. Sci.*, 28, 181-189 (1971).
- 3) 竹内清秀・近藤純正: 大気科学講座第1巻地表に近い大気. 226頁(1981), 東京大学出版会.
- 4) 五十嵐恒夫・小笠原定広: 高速道路予定地の林分構成と永久コドラートの設定. 北海道における道路計画と森林環境の保全に関する調査研究(その2), 1-41(1978), 北大演習林.
- 5) OLIVER, H. R.: Wind profiles in and above a forest canopy. *Qurt. J. R. Met. Soc.*, 97, 548-553 (1971).

Summary

Measurements were made of wind speed above a forest. Measuring stations were located at a distance of about 200 m from the south edge of the Tomakomai Experiment Forest of Hokkaido University, Hokkaido. Trees around the stations were mostly latifolious ones with a mean height of about 8 m.

Ten-minute average values of the wind speeds for anemometer levels ranging up to 27 m high were obtained. It was assumed that a logarithmic relationship, given as the equation for a neutral velocity profile above an extensive uniform surface, could be applied to the wind profile data. It was found that the wind profile up to 18 m high followed in most cases a log form with a zero plane displacement of 6 m, irrespective of the foliation of trees. The mean value of the roughness length obtained was 0.36 m.

Harmonic analysis was carried out for heights of outlines of the canopy top at permanent quadrats of 60 m in length. Results showed that the dominant amplitude was of the same order of magnitude as the roughness length.