

防風林の機能に関する基礎的研究

宮田 正史*・池田 駿介**・武若 聡***

1. はじめに

わが国では、海岸防風林の造成は1955年頃までにほぼ完了し、大規模な飛砂の発生による被害は減少している。現在は河川から海への給砂が減少し、砂浜は後退する傾向にあり、飛砂問題は余り大きく取り扱われてない。しかし今後、土地利用の高度化に伴って海岸林が伐採される可能性が高いこと、また砂漠地帯では飛砂の問題は緑化事業にとって障害であること等を考慮すると、飛砂問題はいまだに重要な研究課題である。

本研究では防風林が有する防風機能とそれに伴う飛砂固定機能に着目し、数値計算及び風洞実験により防風林付近の風況やその特性、および堆砂状況を明らかにすることを試みる。

2. 風速の計算

2.1 計算モデル

基礎式は2次元のレイノルズ方程式に植生による抵抗項を付加した式(1)、(2)と連続の式(3)である。

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial u}{\partial z} \right] - C_m S(z) |U|^2 \frac{u}{|U|} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial v}{\partial z} \right] - C_m S(z) |U|^2 \frac{v}{|U|} - g \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \quad K_z = l^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \dots\dots\dots (3), (4)$$

ここに、 x ：流下方向座標、 z ：鉛直方向座標、 ρ ：流体密度、 u ：時間平均流下方向速度、 v ：鉛直方向速度(上向きを正)、 $U = \sqrt{u^2 + v^2}$ 、 p ：圧力、 g ：重力加速度、 K_z ：鉛直方向運動量拡散係数、 C_m ：運動量交換係数、 $S(z)$ ：葉面積密度(m^2/m^3)、 l ：混合距離である。運動量拡散係数 K_z は混合距離モデルによって、式(4)のように与える。

これらを差分法で解くが、詳細については神田ら

(1990)を参照されたい。また具体的な葉面積密度や混合距離の分布については後述する。

2.2 計算領域及び境界条件

計算は風洞実験のスケールと防風林のスケールの2種類行う。計算領域は風洞実験の場合、高さ0.3m×長さ4mとし、防風林の計算の場合には高さ30m×長さ300mとした。差分格子は、植生入口付近と大気下層で最小の格子幅を持つ不等間隔格子とした。最小の格子幅は植生の高さ(H)で表すと、高さ $0.01H$ 、流下方向間隔 $0.1H$ である。

境界条件は、風上端から既知の流速分布を持った気流が流入してくるものとして、流速を対数分布で与える。また大気層上端および風下端では流速分布が変化しないとみなし、2階微分ゼロを与える。地表面ではno-slip条件を満たすものとする。この条件で解がほぼ定常に達するまで計算を行う。

3. 風洞実験

前章で示した計算モデルの検証と植生のある場の流況の把握のために、簡単な植生模型を用いた風洞実験を行った。以下に風洞実験と数値計算の結果を示す。

3.1 実験装置及び測定方法

図-1に実験に用いた風洞を示す。風洞は長さ9m、高さ43cm、幅15cmである。風洞断面が拡大する領域では導流板を設置し、剥離を防いでいる。植生模型を風洞の後端に設置し、流速と静圧の測定を行った。流速は定温度型X型プロープの熱線風速計を用い、静圧はピトー管とベッツ型マノメーターを用いて計測を行った。さらに得られた流速データより平均流速、レイノルズ応力、乱れ強度を算出した。

植生模型は高さ7cm、直径5mmの円柱木材を2cm(流下方向)×3cm(横断方向)に千鳥状に配置したもの

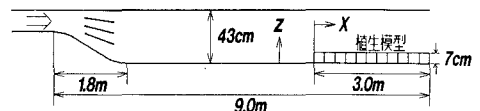


図-1 実験風洞の縦断面

* 学生員 東京工業大学大学院
** 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科
*** 正会員 工博 九州大学助手 建設都市工学科

とした。従って、植生円柱の平面密度は $1500(\text{本}/\text{m}^2)$ である。

3.2 測定結果

a) 平均流速・乱れ強度・レイノルズ応力

各測定点での u 成分平均流速, u 成分乱れ強度, レイノルズ応力の鉛直分布を図-2に示す。植生風上側では、風速分布は対数則に従っている。植生領域に入ると、流況は次の4領域に分けられる。i) 植生入口付近の断面 ($x=0\sim64\text{ cm}$) では、植生の抵抗のため植生内の流速は急激に減少し、植生内の流体は植生外部に排除される。そのため流れは大きな上向き成分を持つ。ii) $x=64\sim120\text{ cm}$ では植生内の流速が最小になり、上向き流れは生じなくなる。また境界付近の乱れが徐々に植生内外に拡散し、運動量の交換が激しく行われるようになる。iii) $x=120\text{ cm}\sim216\text{ cm}$ の断面では、運動量の交換がさらに大きなスケールで行われ、植生境界上方の高速流が頻繁に植生内に入り込む。ここでは平均流れは下向き成分を持ち、植生内の流速は再び大きくなる。iv) 流れの状態は流下方向に変化しないようになり、平衡状態に達する。この領域では、風速分布は植生境界面より上方では対数分布に、下方では指数減衰型の分布に従う。

実際の植生では、葉面積密度の分布は空間的に均一でなく、実験の場合とは異なっているが、基本的な流れの状況はほぼ同様であると考えられる。

b) 風洞内の静圧 図-3に風洞内の静圧分布を示す。植生帯入口の下方付近で植生内の静圧は、植生外よ

り大きくなる。植生層内外の静圧は流下方向に行くに従って同じ値に近づく。これは平均鉛直流速が、徐々にゼロになることに対応する。静圧の流下方向への勾配は植生入口付近で大きく変化するが、徐々に一定となり、流れは平衡状態に達する。

3.3 数値計算による風洞実験の再現

a) 葉面積密度と混合距離 風洞実験に用いた植生模型の場合、式(1)、(2)中の抵抗 $C_m S(z)$ は円柱群の抵抗に相当し、次式で与えられる。

$$C_m S = \frac{1}{2} C_d N A$$

ここに、 C_d : 円柱の抵抗係数, N : 単位体積中の円柱の本数, A : 円柱の投影面積である。植生模型の円柱の密度と円柱の投影面積より、 NA は一定値として $7.5(\text{m}^{-1})$ を与える。また C_d は円柱の抵抗係数として 1.0 を与える。

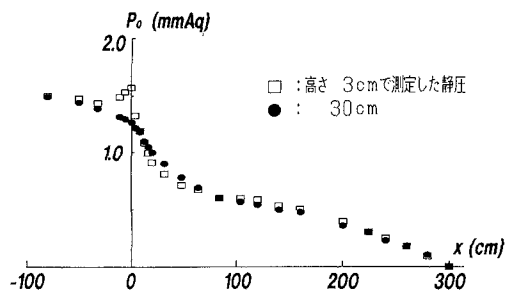


図-3 風洞内の静圧分布

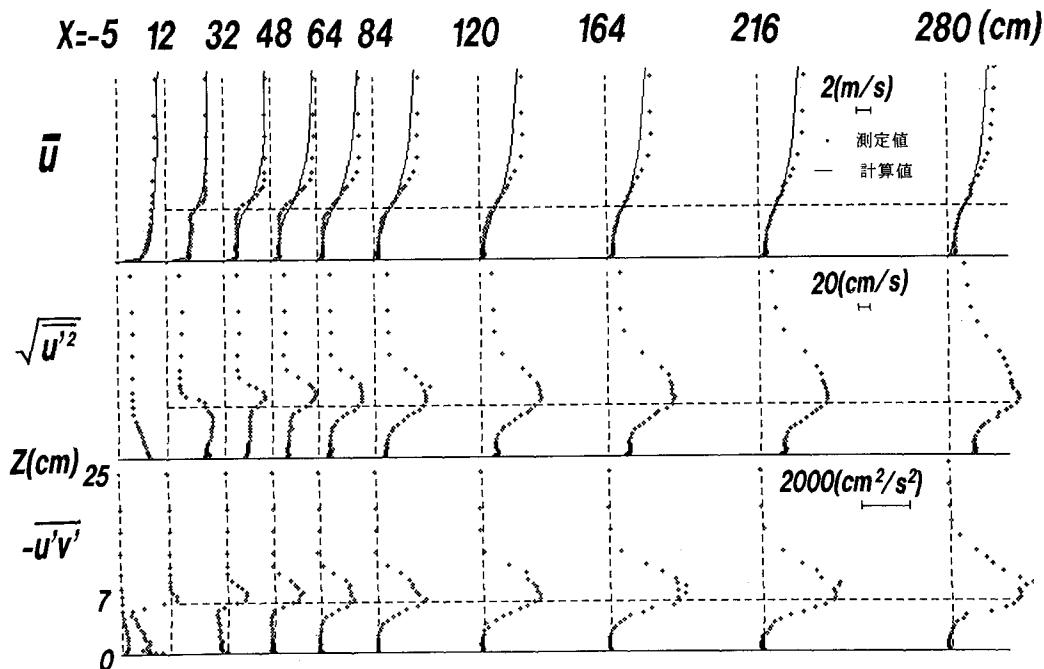


図-2 流速平均, 乱れ強度, レイノルズ応力分布

混合距離は植生内で一定値 $l_0 (=0.0112 \text{ m})$ として与える。 l_0 の値の決定方法は後述する。

b) 計算結果 計算結果と実測値の平均流速 u の結果を図-2 に示す。植生層内では、計算結果の流速分布は実測値の分布をよく表している。しかし植生外では実験値の方が計算より大きな値をとる。これは、計算に於いて上端は解放としてあるため、計算断面での流量は流下方向に減っていくが、風洞実験の場合には断面で流量が保存されるためである。

4. 数値計算モデルの実際への応用

4.1 計算方法

a) 計算の流れ 実際の防風林に適用するためには、葉面積密度の分布が必要である。しかし現地では、測定された例は殆どない。そこで葉面積密度を風速分布の実測値から Marquett 法を用い逆推定する (神田, 1992)。このようにして得られた葉面積密度を用いて、風速場の計算を行う。さらに計算結果の風速から、飛砂量と堆砂高さの計算を行う。以下に、これらの方法を示す。

b) 葉面積密度 葉面積密度の分布形は Kondo & Akashi (1976) が提案した式 (5) で与える。

$$S(z) = S_m \frac{H-z}{H-z_m} \exp \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{z_m}{H-\lambda} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{z}{H-\lambda} \right)^2 \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、パラメータ λ により

$$\frac{z_m}{H} = \frac{(\lambda+1) - \sqrt{(\lambda-1)^2 + 4}}{2}; \lambda > 1$$

が成立する。 z_m は葉面積が極大値 S_m をとる高度である。但し、枝下高 h より下方では、葉面積密度は一定とし $S(z) = S(h)$ で与える。

c) 混合距離 混合距離 l は植生の存在しない領域では式 (6)、植生内では葉面積密度の関数として式 (7) のように与える (Kondo & Akashi, 1976)。

$$l = \kappa z, \quad l = \frac{2\kappa^3}{C_m S(z)} \quad \dots\dots\dots (6), (7)$$

ここに、 κ : カルマン定数である。混合距離の分布を与える際に、式 (7) では、疎な粗度群落、即ち $C_m S(z)$ が小さい群落では混合距離が植生粗度のない場合よりも大きくなるがあるので、以下の2つの条件を仮定する。

$$l < \kappa z, \quad \frac{dl(z)}{dz} < \kappa \quad \dots\dots\dots (8), (9)$$

式 (9) は混合距離の急激な変化を避けるものである。さらに式 (9) の条件に合わなくなる高さを D 、その高さでの混合距離を l_0 とし、 D より上方領域では混合距離を次式 (10) で与える。

$$l = l_0 + \kappa(z-D) \quad \dots\dots\dots (10)$$

d) 葉面積密度と混合距離の推定 風速分布が安定

している領域では、運動量の釣合い式 (11) が成立する。

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial u}{\partial z} \right] = C_m S(z) |U|^2 \frac{u}{|U|} \quad \dots\dots\dots (11)$$

式 (5) ~ (7) と式 (10), (11) の関係に於いて、風速 u の鉛直分布が既知であるとする、未知パラメータ $S_m, \lambda, du/dz|_{z=0}$ の3個が同定できれば、葉面積密度と混合距離の分布が求められる。式 (11) では、底面の流速 (=0) と未知パラメータである初期勾配を与え、ルンゲ・クッタ法で積分を行うことにより上面境界 (樹高 H) までの風速の計算値が求められる。この計算で得られた風速と実測値の風速との誤差が、最小となるように Marquett 法によって収束計算を行い、パラメータを推定する。

実測値は松岡ら (1987) の防風林の観測結果を採用し、平衡状態に達していると考えられる領域の風速分布を葉面積密度の推定に用いた。また観測された防風林はクロマツ林で、樹高 H は約 5 m、枝下高 h は約 2.4 m、林分密度は約 5000 (本/ha) である。

同定された葉面積密度と混合距離を図-4 に示す。葉面積密度は葉のある部分のほぼ中心に極大値を有し、下層の幹の部分で一定となる分布となり、実際の松の形状に即した抵抗を表している。混合距離は地表面から 250 cm までは式 (6)、250 cm から 420 cm までは式 (7)、420 cm より高い地点では式 (10) が成立している。

e) 飛砂量の計算 飛砂量は河村 (1951) による式 (12) を用いる。

$$Q_w = K \frac{\rho_a}{g} (u_* - u_{*c})(u_* + u_{*c})^2 \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 Q_w : 単位幅単位時間当りの飛砂量、 K : 経験係数、 ρ_a : 空気密度、 u_* : 摩擦速度、 u_{*c} : 砂粒子の限界摩擦速度である。摩擦速度 u_* は飛砂が生じている場合、focal point の存在を考慮して、式 (13) より求める。飛砂が生じていない場合は式 (14) より求める。

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z'} + u', \quad u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad \dots\dots\dots (13), (14)$$

式 (12), (13) の z', u', z_0 は既往の実験により得られた結果より、次式で与えられる (本間, 1973)。

$$z' = 10d, \quad u' = 8.94d, \quad z_0 = 0.081 \log_{10}(d/0.18)$$

ここに、 d は砂粒子の直径 (mm) である。式 (13), (14) より得られる摩擦速度と地上 50 cm 風速 (u_{50}) の関係を図

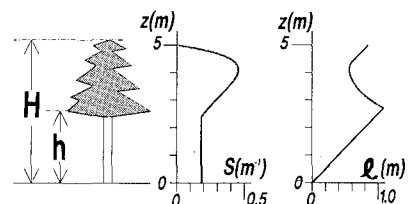
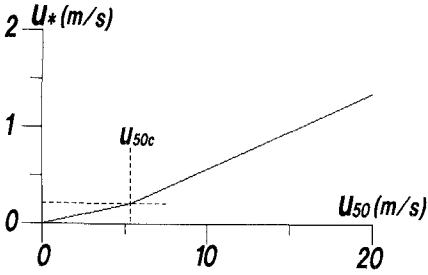


図-4 同定した葉面積密度と混合距離 (クロマツ林)

図-5 U_* と U_{50} の関係

—5に示す。focal point の存在のため折れ曲がった直線になる。

U_* は風速場の計算結果で得られる U_{50} から求めることができる。従って、各断面での飛砂量は式(12)により求められる。ただし限界摩擦速度 U_{*c} は、 U_{50} が U_{50c} になる時の摩擦速度とする。

地表面境界条件は飛砂が生じている場合とそうでない場合とを分ける。すなわち底面に於いて、 $U_{50} > U_{50c}$ の時は式(13)、 $U_{50} < U_{50c}$ の時は式(14)が成立するとする。

今回の計算に於いて、飛砂を求める際に U_{50} を用いたのは以下の理由からである。植生内での流速分布が対数分布に従うと考えられるのは、地表面の極く近傍であること、及び飛砂が生じるのは地表面から数 10 cm に集中しているからである。

f) 堆砂高さの計算 ここでは風速と飛砂量の間の遅れは考慮せず、各断面間の飛砂量の差が各断面内に堆積する堆砂量とし、砂の連続式(15)を用いて堆砂高さ η を算出した。

$$\frac{\partial Q_w}{\partial x} + B \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0, \quad B = \rho_s \left(1 - \frac{n}{100}\right) \cdots \cdots (15), (16)$$

ここに、 η : 堆砂高さ、 ρ_s : 砂粒子の単位体積質量、 n : 砂粒子の間隙率である。但し、これ以後は堆砂高さ η は、単位時間に砂が堆積する高さ (cm/day) とする。

今回の計算では、地表面は全て同一粒径の砂粒子 (0.3 mm) であると仮定し、計算はすべて平坦な状態から始めた。計算に用いた諸定数をまとめて表-1 に示す。

4.2 計算結果

a) 流況 林帯が風下方向に続く場合の流線を図-6 に示す。葉と幹の抵抗により流れは一担上昇し、下流で再び下降する。林帯入口では葉と幹の部分の抵抗の差により下層部が速い流速分布となるが、流下距離に伴い植生内の流れは徐々に指数関数的な風速分布に漸近していく。

表-1 計算に用いた諸定数

C_m	K	ρ_a (kg/m ³)	ρ_s (kg/m ³)	d (mm)	n (%)
0.5	2.0	1.293	2650	0.3	60

く、全体の流況は風洞実験と同様な傾向を示す。林帯が一部の領域にのみ存在する場合 (図-7)、流れは植生の抵抗のため一担上昇するが、林帯後方の地面で再び下降する。風速分布は流下に伴い、徐々に対数分布に戻っていく。

b) 減風範囲 防風林の減風範囲の指標として、地上 100 cm の風速 U_{100} が用いられる。林帯幅 L を 5, 10, 20 m にかえた 4 ケースの計算結果を U_{100} で示したものが図-8 である。図では林帯後端の位置を合わせてある。この結果より、林帯の風上側の減風領域は林帯幅、流入風速とは無関係にほぼ一定 ($-5H$) であることがわかる。一方、林帯の風下側に於いても、減風領域は林帯幅や流入風速によらず、ほぼ一定 ($30H$) である。桜山 (1967) の観測結果によると、林帯の確実な減風範囲は風上側で $5H$ 、風下側で $20H$ である。従って、本モデルによる計算結果は妥当であると考えられる。さらに林帯幅が大き

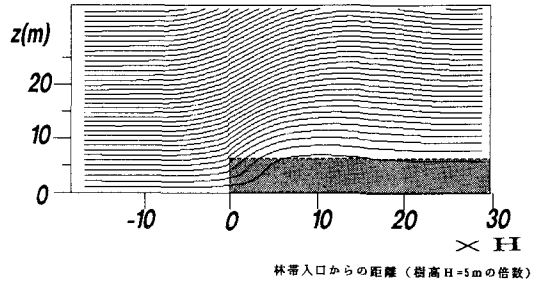


図-6 林帯が風下方向に続く場合の流線 (■は林帯領域を示す)

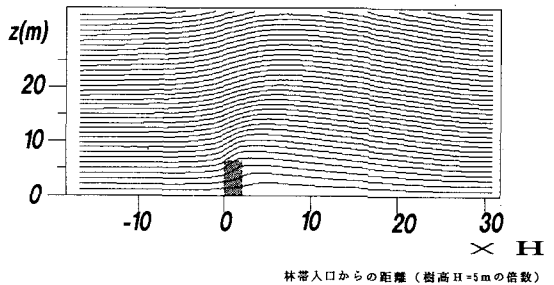


図-7 林帯が一部の領域に存在する場合の流線

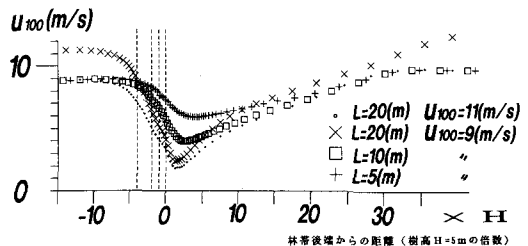


図-8 防風林による減風範囲

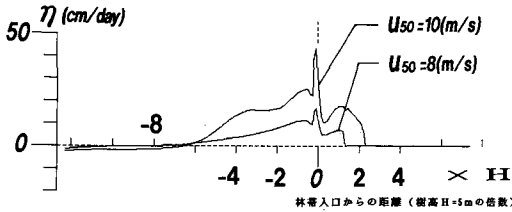
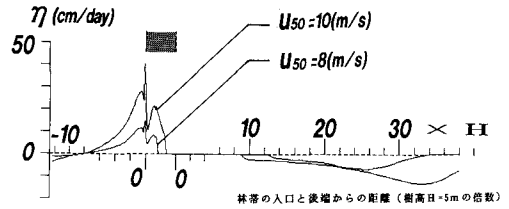
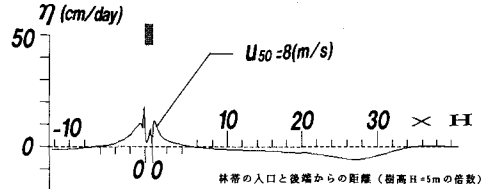


図-9 林帯が流下方向に続く場合の堆砂高さ分布

図-10 $L=20\text{ m}$ の場合の堆砂高さ分布図-11 $L=5\text{ m}$ の場合の堆砂高さ分布

いほど、風速が最も小さくなる位置が林帯の後端に近づくことがわかる。これは林帯幅が大きいほど、植生境界面付近での速度勾配 (du/dz) が大きくなり、風下側での風速の回復が早くなるためである。

c) 堆砂状況 i) 林帯が風下方向に続いている場合 (図-9), 林帯の風上側では風速の減少に従って砂が徐々にたまり、林帯の手前 $1H$ あたりで堆砂高さのピークが現れ、砂が大量に堆積する。林帯の入口では、幹と葉の抵抗の差により、下層で気流が収束するため、流下方向の風速の減少は小さくなる。そのため堆積高は一担小さくなる。さらに風下側では、抵抗のため風速は激減し、砂は再びピークを持って堆積する。本計算の林分密度は約 5000 (本/ha) であるが、 u_{50} が 10.0 (m/s) の時、砂は約 12 m 程進入することになる。

ii) つぎに林帯幅 L が 20 m の場合を示す (図-10)。林帯の入口付近の堆砂分布は i) とほぼ同じである。林帯後端付近から $10H$ 程度までは飛砂の限界風速以下になるため飛砂は生じない。さらに風下側では、逆に砂面が大きく掘れる。これは林帯を乗り越えた流れが地面に再び下降するためである。風速が大きくなるほど谷の深さは大きくなり、その頂点は風下側へ移動する。

iii) 植生帯幅が 5 m の場合を図-11 に示す。植生入口付近の堆砂分布は i), ii) の結果とほぼ同じである。しかし植生帯幅が小さいため植生後端部においても飛砂は止まらず、このような数箇所にピークが存在する堆砂分布になる。植生帯風下側では ii) と同様に大きく掘れ、その傾向は同じである。

5. 結 語

本研究では、風洞実験と数値計算により、植生の存在する場の風況を把握することができた。さらに葉面積密

度を逆推定することによって、数値計算を実際の防風林に適用することが可能となった。その結果、防風林の有する防風機能と飛砂固定機能の特性が明らかになった。

しかし、非平衡の領域での砂の挙動など、今後解明すべき点も多い。

謝辞：本研究の数値計算を進めるにあたり、山梨大学工学部土木環境工学科の神田学講師には、数々の有益な御助言を頂いた。ここに感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 檜山徳治 (1967): 内陸防風林, 林業技術, 309 巻, pp. 23-26.
- 河村龍馬 (1951): 飛砂の研究, 東京大学理工学研究所報告, 5 巻, pp. 96-112.
- 神田 学・日野幹雄 (1990): 大気-植生-土壌モデル (NEO S PAM) によるシミュレーション, 水文・水資源学会誌, 3 巻, 3 号, pp. 47-55.
- 神田 学 (1992): 大気-植生-土壌および水面の相互作用を考慮した水文気象に関する研究, 東京工業大学土木工学科博士論文, pp. 13-14.
- 本間仁 (1973): 海岸防災, 共立出版, pp. 141-142.
- 松岡広雄・工藤哲也 (1987): 防風・空中塩分捕捉・飛砂防止機能の解析 (東海村クロマツ林), 農林水産技術会議研究成果, 185 巻, pp. 77-79.
- Kondo, J and A., Akashi (1976): Numerical study on the two dimensional flow in horizontally homogeneous canopy layers, Boundary-Layer Meteorol., Vol. 10, pp. 255-272.