

## 第16章 大気中の熱・物質移動に与える植生の影響

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/2487">http://hdl.handle.net/2297/2487</a>

# 第 16 章

## 大気中の熱・物質移動に与える植生の影響

金沢大学自然計測応用研究センター  
木村 繁男  
email: skimura@t.kanazawa-u.ac.jp

### 1. 植生が大気環境に及ぼす影響

植生の存在が過酷な気象環境の影響をしばしば緩和する役割を有することはよく知られている。たとえば中国内陸部などで見られる砂漠化を防止するために最も有効だとされるものが、乾燥に強い樹木の植林である。裸地に比べて植生が存在する地域では、樹木が枝葉を広げている影響で太陽からの日射を吸収し、気温の上昇を押さえてくれる。これが地面からの水分の蒸発を防ぎ、乾燥を阻止してくれる。逆に夜間は地面から宇宙空間への放射冷却を防いで、夜間の気温の低下を防いでくれる。図 1 は夏場にカラマツ林の林内と林外で、時間による温度変化を示したものである。一日を通しての気温の変化がかなり緩和されているのがよくわかる。

植生が風の影響を緩和してくれるということも周知の事実である。海岸に沿って植林された防風林はその典型的な例である。防風作用は単に風速を弱めるだけでなく、冬期の気温の低下防止や海岸部での飛砂、潮風、及び積雪地帯での吹雪などの害の低減効果がある。植生のこのような効果はおもに大気に対するその流体力学的な作用による。図 2 には防風効果を模式的に示している。防風効果は風下で樹高の 35 倍にも及び、風上でも 5 倍程度になる。この場合風の遮断は 6 割程度が理想的であるといわれている。風の遮断があまりに良過ぎると後流に渦を発生するためである。樹木のもっている風をある程度通過させる性質がこの場合かえって役に立っているのである。

日本の伝統的農家は冬期の西風を防ぐために、屋敷裏に防風林を持つ例が多い。北陸地方でも富山県砺波市にある散居村とよばれる、水田の中に点在する杉等を屋敷の西側に配置した農家が、この地方独特の美しい風景を形作っている。能登輪島の大沢地区には間垣と呼ばれる、竹を用いた防風用の垣根もよく知られている。これも樹木の有する適度の通風効果をうまく利用した防風施設である。

大気の運動、すなわち風は上記のように熱エネルギー、水分、化学物質及び微粒子等を輸送する作用を

持っている。樹木帯などの植生は風の流れを制御することにより、風のもっているこれら熱や物質についての輸送現象に大きな影響を与える。たとえば、樹木帯は移動する霧を捕捉沈降させ、冷害などの農業被害を防止することもある。空気中の粉塵についても同様の効果が期待できる。これは一種のフィルタリング作用である。フィルタリング作用はつぎの 2 つの機構により発生するものと考えられる。一つは樹木などの植生が有する枝葉に、空気中に含まれる物質が枝葉に付着し直接捕捉されるためである。もう一つは平均風速が減少するために、空中に浮遊する効果が重力に対して相対的に小さくなり、結果的に重力による沈降を促進させることになるためである。これには樹木帯中を流れる空気の乱流構造も関わっている。すなわち植生内を流れる空気は裸地でみられるような大きな渦構造の流れが崩れ、より微小な渦構造を持つ流れになる。このため空気中の浮遊物質や熱・化学物質を大きく上空に巻き上げることが出来ず、沈降作用が相対的に大きく現れることになる。

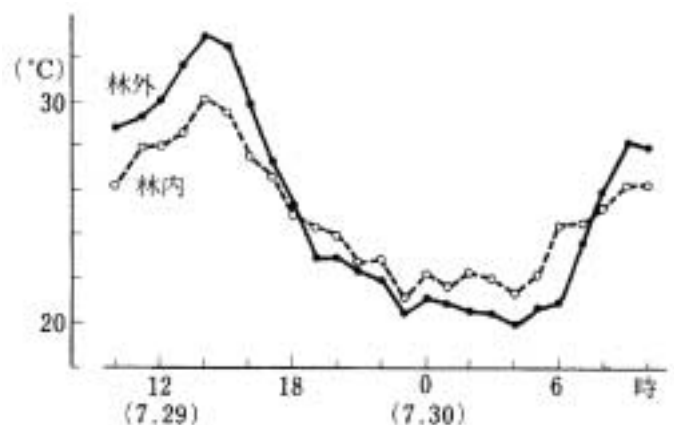


図 1. 林内外の気温の時間変化  
(12 年生カラマツ林, 1991 年 7 月 29~30 日, 晴天,  
只木[1]による)

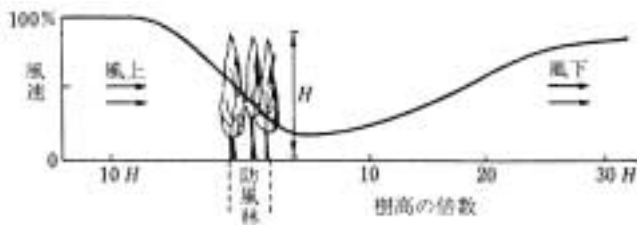


図2. 防風林の風速減少効果領域  
(只木[1]による)

## 2. 大気中での物質拡散の予測

大気中における熱、化学物質の拡散は一般にフィックの拡散則により支配される。これは空気中に含まれる熱・化学物質が、空間の局所的な温度勾配や化学物質の濃度勾配により拡散するという仮定である。このような拡散過程を分子拡散と呼ぶこともある。空気の流れがあると、これに流れによって運ばれる移流効果を考慮する必要がある。一方、煙や浮遊粉塵の拡散過程は、厳密には粒子の運動をラグランジュ的に捉えて、モンテカルロ法的一种であるランダムウォーク法により解析する。しかしながら熱・化学物質の温度分布や濃度分布と同様に近似的にはフィックの拡散則で扱うことができる。

したがって空気中の温度、化学物質濃度、浮遊粉塵濃度などがフィックの拡散則に従うとすると、その温度場や濃度場は次の移流拡散方程式で表すことができる[2]。すなわち2次元デカルト座標では

$$\frac{DC}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + S \quad (1)$$

ここで

$C$  : 温度および化学物質などの濃度場

$K_x, K_y$  : 乱流拡散係数

$S$  : ソース項

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} : \text{実質微分}$$

$u, v$  :  $x$  および  $y$  方向速度成分

である。 $x$  は流れ方向、 $y$  は鉛直方向を示す。実質微分は空間に固定された微小な領域に流入・流出する流体の加速度を算出するものである。大気の流れは一般に乱流であり、分子拡散率に比較して乱流拡散率(乱流は渦の集合体なので渦拡散率とも呼ばれる)が圧倒的に大きい。このため、分子拡散率は無視されることが多い。

空気の平均的流れ場 ( $u, v$ ) と乱流拡散率  $K_x, K_y$

がわかれば(1)式は少なくとも数値的に積分することが出来て、濃度の空間的分布やその時間的変動を予測することができる。右辺の最後の項  $S$  は樹木によるシンクまたはソースをあらわしている。たとえば  $C$  が温度場の場合は、樹木からの水分の蒸発が潜熱の吸収作用をするので、一般的にシンクとなる。二酸化炭素の濃度の場合も日中は光合成が活発な為、二酸化炭素は消費され、やはりシンク項となる。浮遊粒子についても葉面への補足などのため、シンク項となると考えられる。

このうち平均の流れ場については流体に関するナビエーストークスの方程式に樹木についての抵抗力を付け加えたものを解けばよい。すでに述べたように流れ場は乱流であるから、 $k-\epsilon$  や LES などの乱流モデルをもちいなければならないが、樹木帯内の流れについてはこのような乱流モデルを用いたものは見られない。樹林内の密度の高い枝葉の存在の為に、流体のみが存在する空間を仮定して構築されたこれらの乱流モデルを直接適用することが困難なためである。したがって、ここではプラントルの混合距離理論を用いた定式化について述べる。(1)式と同様に2次元デカルト座標を仮定する。

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) - c_m a u |u| \quad (2)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) - c_m a v |v| - g$$

また非圧縮性流体を仮定すると連続の式は

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \text{となる。ここで}$$

$a$  : 面積

$c_m$  : 抵抗係数

$\rho$  : 気流密度

$K_x, K_y$  : 運動量輸送係数

$p$  : 圧力

である。空気はもちろん圧縮性を有しているのであるが、音速に比べて流速が小さければ非圧縮性流体として取り扱うことができる。右辺最後の項が樹木内での枝葉による抵抗を表している。物体が流れに与える抵抗は流速の2乗に比例することが知られている。また絶対値を取っているのは各速度成分の符号を考慮するためである。この表現は多孔質などの狭雑物内の流れをあらわすものと同一である。したがって枝葉が風にそよいだりする効果は考慮されていない。

### 3. 乱流拡散係数

式 (1) 及び式 (2) で重要なパラメータは右辺拡散項に現れる乱流拡散係数である。式 (2) での運動量の拡散係数は式 (1) の物質拡散とほぼ同一の値を持つことが知られている。これは、運動量や物質などの拡散スピードが、乱流場に存在する渦の大きさに依存する為である。流れ場の中の渦の大きさを示すパラメータとしてプラントルの混合距離が使用される。混合距離がわかると乱流拡散係数は摩擦速度と混合距離との積で表すことができる。すなわち

$$K \approx u_* l \quad (3)$$

である。摩擦速度は次のように定義されるが、せん断応力  $\tau$  はレイノルズ応力と呼ばれるもので、乱流特有の速度変動成分の時間平均値として発生するものである。したがって、乱流では層流の場合よりも見かけ上粘性が大きくなることになる。摩擦速度  $u_*$  は次式のように表される。

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}, \quad \tau = -\rho \overline{u'v'} \quad (4)$$

ここで  $u'$ ,  $v'$  は速度の乱流による時間変動成分である。熱線風速計や超音波風速計で、時間平均値に対する変動成分として得られる。また、それらの積  $u'v'$  は必ず負になる為、せん断応力  $\tau$  を正にするためにマイナスの符号を付けている。混合距離の分布については幾つかの測定例がある。これらの測定は主に農業気象の分野で行われている。以下のものはトウモロコシ畑と水稲内の気流の流れから得られた混合距離の値であり、高さ方向に変化している。地表から樹林先端までを 3 層に分割して表している [3]。

$$\begin{aligned} \text{地表面近傍: } l(H) &= \kappa(H-d) \\ \text{中間部: } l(y) &= u_* / (du/dy) \\ \text{樹林先端近傍: } l(y) &= \kappa y \end{aligned} \quad (5)$$

ここで  $\kappa$  はカルマン定数 ( $\kappa; 0.4$ )、 $d$  は地表面位置修正量である。地表面と樹林先端部における乱流渦のサイズは固体壁面、すなわち地面からの距離に比例していることを示す。 $\kappa; 0.4$  は固体壁面近くの乱流を計測した結果得られる実験的事実である。

### 4. 気流と乱流拡散係数の計測

これまで説明したように、大気中の熱、物質などのスカラー量の輸送を解析または予測するためには、

大気の流れ場の正確な予測と式 (2) での乱流拡散係数の評価が非常に重要となる。乱流拡散係数は乱流渦のスケールに依存することから、混合距離の分布を求めることが必要となる。ここでは本 COE プロジェクトのなかで行われている植生内気流の混合距離を計測する試みの一端を紹介する。

図 3 は風洞内に置いた樹木模型である。図 4 には風洞の測定部を示す。風洞はエッフェル型のものを用いている。図 5 と 6 にはそれぞれ樹木背後の中心線上での風速分布、すなわち風速低減効果と乱流強度の分布の様子を示す。樹木高さの 3 倍の距離まで計測してあるが、風速低減の効果は維持されていることがわかる。一方、流れ方向の乱流強度  $I$  は以下のように定義されるものである。

$$I = \frac{\overline{u'}}{U} \quad (6)$$

ここで流速の変動成分は次のように定義される。

$$\overline{u'} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (u_j - U)^2}$$

乱流強度は測定範囲ではほとんど減衰することなく維持されていることがわかる。は各時刻において計測された  $x$  方向の速度である。図 7 は模型樹木背後の流れを可視化したもので、影響領域が樹高の 5 倍以上の距離までおよんでいるのが観察される。また、模型樹木の背後では規模の小さな渦構造が観察される。今後、このような風洞実験を進め、式 (5) で示されるような混合距離や乱流拡散係数の精度について検証して行く計画である。

図 8 は金沢大学角間キャンパス内の山林に建てられている高さ 20m の観測用タワーである。タワーは里山の尾根沿いに位置している。このため水平方向の一様性は保証されないが、複雑な地形上に存在する樹林内の測定例として貴重なデータを提供するものと期待される。特に日本では森林が平坦な場所よりも山岳地帯に残されているために、この様な場所での大気流れに関するデータは、実際のフィールドにおける乱流拡散係数がどの程度の値を持つかの評価について重要な情報を提供する。このタワーでは超音波風速計を用いて 3 次元の平均風速成分、乱流強度、混合距離、流れの空間スケール等を計測する。また、季節による葉密度の違いが拡散係数へ与える影響を測定する。さらに、レイノルズ数の違いにより、乱流拡散係数の値が風洞実験とどの程度異なるか等についても明らかにして行く予定である。

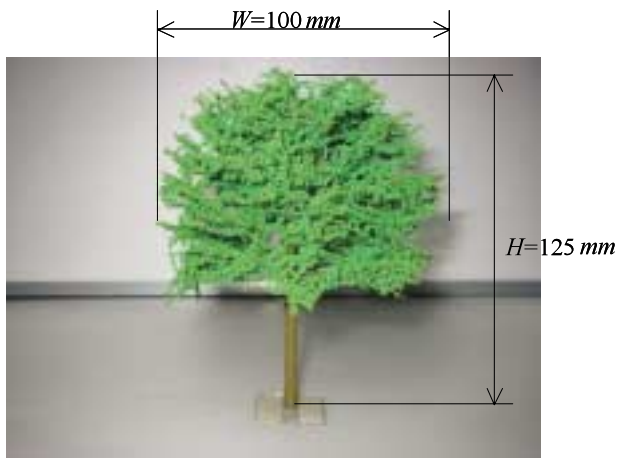


図3. 樹木模型

幹:  $\phi 4\text{ mm}$

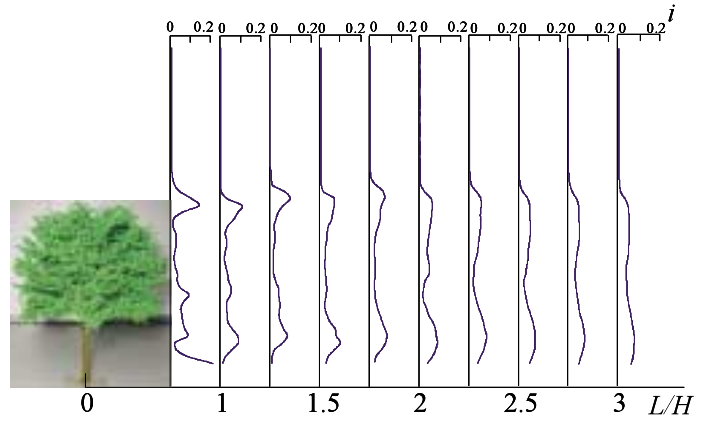


図6. 樹木模型背後の乱れ強さ

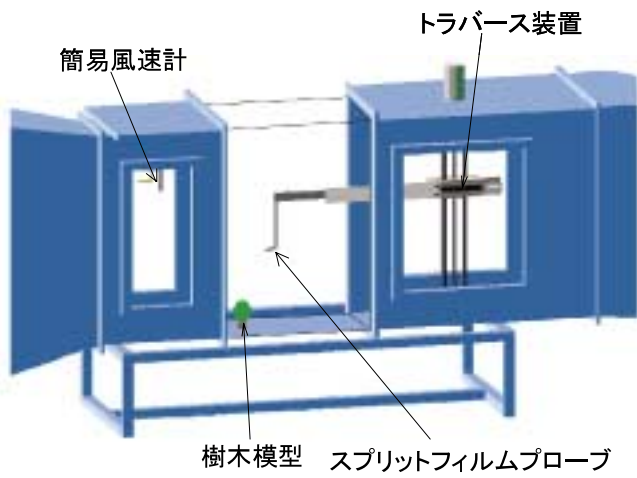


図4. 風洞測定部



図7. 樹木模型背後の流れの可視化

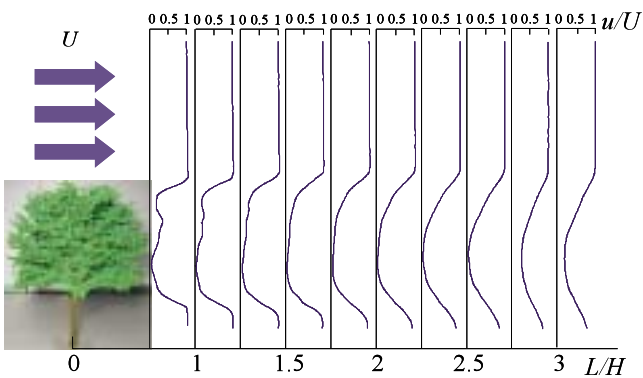


図5. 樹木模型の風速低減効果



図8. 金沢大学角間キャンパス内観測タワー

## 5. おわりに

植生により大気の流れが影響を受け、それにより熱、物質の移動が変化することを述べた。植生が存在する空間での流れ場は、非圧縮性ナビエーストークスの方程式に樹木等による抵抗力を考慮することにより解析することができる。流れ場が計算できると、熱・物質に関する移流拡散の方程式から大気中での熱・物質などのスカラー量の移動やその濃度分布を予測することができる。しかし、これらの方程式を解く上で乱流拡散係数が必要となり、それらは実験により求められなければならない。植生が存在する空間での乱流拡散係数の値を決定するため、風洞実験とフィールドにおける観測データの集積が必要である。

## 参考文献

- [1]只木良也, 森林環境科学, 朝倉書店, 1996.
- [2]日野幹雄, 神田 学, 第 13 章植生による気候緩和効果と都市環境への応用, 地球環境と流体力学 (日本流体力学会編), 朝倉書店, 1992.
- [3]Kimio Inoue and Zembei Uchijima, Experimental Study of Microstructure of Wind Turbulence in Rice and Maize Canopies, *Bull. Natl. Inst. Agric. Sci.*, Ser.A, 26, pp.1-88, 1979