

森林キャノピー層による
乱れエネルギーの
減衰機構の解明
(課題番号 09650200)

平成9年度～平成10年度
科学研究費補助金 (基盤研究(C)(2))
研究成果報告書

平成11年4月

研究代表者 平野 公孝
(宮崎大学工学部 教授)

はしがき

本研究では、複雑な特性を示す森林キャノピー層の防風効果を風洞実験及び数値シミュレーションの二つの手法により解明する。特に、樹木の伐採が防風機能に及ぼす流体力学的影響について注目し、以下の手順で研究を行った。

1. 乱流風洞装置用流速測定システムの設計：森林模型の下流域の乱れは強い三次元構造を示している。大型乱流風洞測定部に置かれた模型周りの三次元的流れ場を三つの熱線プローブを持つ熱線流速計で計測するシステムを構築する。
2. 森林模型の改良：現在の研究対象の海岸林は、宮崎一ツ葉リゾート開発における松林である。この海岸林をモデル化し、その樹幹部を、平面に直立した円柱群で模擬する。一方、マツ林の樹冠部のモデル化に対しては、個々の樹木の樹冠部効果を表せる模型の確立を目指す。平成10年度には大型乱流風洞が使用できるために、従来の研究で使用された小型模型を大型化するための実験を実施する。
3. 流れの数値シミュレーション：近年の乱流を対象とした数値解析手法の成果に基づいて、より現実の海岸林に近い流れ場の状況を解析する。しかし、数値シミュレーションを進める過程での樹木の樹冠部抵抗の予測において、分子動力学的手法を導入し、従来の差分法手法と融合させる新しい方法を提案し、模型実験結果との比較検討を行う。

なお、研究組織、研究経費は次の通りである。

(1) 研究代表者：平野公孝（宮崎大学工学部教授）

(2) 研究経費

平成9年度	1,600 千円
平成10年度	1,500 千円
計	3,100 千円

また、本研究期間で得られた研究成果は、以下の研究発表等において公表されている。

(1) 学会誌等

- ① 平野，菊地，森林キャノピー模型下流域における流れ方向速度の三次元分布構造，宮崎大学工学部研究紀要，28巻，1999年9月出版予定

(2) 口頭発表

- ① 山下，平野，菊地，分林，森林キャノピー模型まわりの流れ場における乱れ構造の測定，日本流体力学会年会'98講演論文集，1998年7月28日

本報告書の構成は、研究手順に対応して、次の3部構成になっている。

第1部 中型風洞による森林キャノピー模型下流域における流れ方向速度分布の三次元構造

第2部 大型乱流風洞における森林キャノピー模型を過ぎる流れの乱れ構造

第3部 森林キャノピーを過ぎる流れの数値シミュレーション

第1部

中型風洞による

森林キャノピーモデル下流域における

流れ方向速度分布の三次元構造

1. はじめに

森林を構成する樹木は、変形しやすい樹冠部と変形しにくい樹幹部とにより成り立っている。このような樹木の構造上の特徴のため、森林を通り抜ける大気の流れは、森林からきわめて複雑で多様な影響を受けている。特に、大気接地気層中の森林は森林キャノピー層と呼ばれ、大気物質輸送や熱輸送に対して重要な働きをする⁽¹⁾。森林の持つ多様な機能の中でも、森林の防風機能は、人間の社会生活に大きな効果を及ぼしている⁽²⁾。

更に、近年の地球温暖化防止策に関連した国別のCO₂削減目標の設定において、「排出権取引」では植林がCO₂の削減努力として評価されることが決まった。このために、植林事業に対して森林を過ぎる風環境が、樹木の生長、即ちCO₂吸収能力に与える影響を明らかにすることが求められている。

しかしながら、森林キャノピーの防風機能やCO₂吸収能力に関する流体力学的な解明は、全く不十分な状況にある。穀物や植栽などのなどの比較的高さの低い植生まわりの流れは、実験結果⁽³⁾⁽⁴⁾、また数値シミュレーション⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾などにより解析されてきた。しかし、これらの多くは、植生が無限に広く分布していると仮定された二次元モデルとしての取り扱いや、一本のみの植物の運動⁽⁸⁾として解析がなされている。

しかし、実際の森林キャノピーでは、多数本の樹木が有限の広がりの中に密集している。このようなより現実の森林キャノピーに近いモデル化に基づく流れの解析は、きわめてわずかである。著者らは、有限の林帯幅を持つ森林キャノピーを二次元模型として、風洞実験により二次元流れ場の特徴を明らかにしてきた⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。この森林キャノピー模型においては、森林の樹冠部はスチールウールで模擬され、また、樹幹部は円柱群で表現されてきた。これにより、さまざまなキャノピー模型における乱れ構造の特徴を明らかにした。しかしながら、この樹冠部はスチールウールで構成されていること及び小型風洞装置の狭い測定部幅寸法の制約などのために、一本毎の樹木個体の効果を表すことができない。

このため、本研究では、より大きな測定部形状を有する風洞装置を使用し、更に樹木個体の効果を表現できる森林模型を考案することにより、森林キャノピー模型まわりの流れ場の特徴を明らかにすることを目的とする。

2. 実験装置及び実験方法

2.1 風洞装置

本実験で使用した風洞装置は、宮崎大学工学部物質工学科に設置されている三次元乱流風洞⁽¹¹⁾である。図1にその概要を示すように、風洞測定部形状は、長さ3,600mm×幅730mm×高さ830mmである。流れは、ACサーボモータで駆動される小型送風機群により発生される。小型送風機群は、縦9列×横4段に配置され、合計36個の送風機で構成されている。

2.2 森林キャノピー模型

本研究で対象とされた森林は、宮崎一ツ葉地区の海岸林である。この森林を構成するマツ林の現況は、現地調査結果⁽¹²⁾によると平均樹高7.6m、平均胸高直径10cm、平均立木密度2,354本/haである。模型の作製にあたっては、まずはじめに模型の樹高寸法が、風洞測定部高さによる閉塞効果の影響を小さくしうる中での最大寸法として決められた。この樹高寸法を基礎にして、模型の各要素の縮尺と寸法が、以下に示すように定められた。即ち、模型の樹高 H は、1/20の縮尺で $H=380\text{mm}$ であり、胸高直径 d は、1/10の縮尺で $d=10\text{mm}$ である。また、1/30の縮尺に基づく平均立木密度は、 2.16×10^{-4} 本/ mm^2 である。水平方向の縮尺は、樹幹の表面粗さや曲がりの影響を考慮して、高さ方向の縮尺より大きく設定されている。

従って、樹木個体の模型の樹幹は、長さ $H=380\text{mm}$ 、直径 $d=10\text{mm}$ の木製の丸棒で表された。一方、樹木の枝葉部分に相当する樹冠部は、5mm間隔で横方向に切れ目を入れられた長さ1,060mm、幅40mmの長方形の紙に針金を張り付け、更にこれを樹幹にらせん状に巻き付けることにより模型化されている。図2(a)には、樹木個体模型の写真を示す。このようにして樹冠部材料を紙にすることにより、風による樹冠部の変形の影響を受けやすくしたが、樹木の揺れ・たわみなどの大きな変形の影響は考慮されていない。

平均立木密度に基づき、これらの樹木個体の配置間隔 D は、 $D=80\text{mm}$ とされた。これら樹木個体は、模型土台の上に千鳥型格子状に配置された。森林キャノピー模型の全体写真を、図 2(b)に示す。樹木個体が千鳥型格子に配置される場合には、 $80\text{mm}\times 80\text{mm}$ の土地面積に対する全葉片側面積との比として葉面積指数 LAI を定義すると、この樹木個体模型の葉面積指数は LAI=6.6 である。例えば、マツ林の LAI は、3~6 程度と報告されている⁽¹³⁾。

2.3 森林キャノピー模型配置パターン

図 3 には、樹木個体模型の配列パターン及び模型の寸法を示す。流れに対する幅方向として 1 列を定義すると、この 1 列を構成する樹木個体数が 9 本または 8 本となるように配置されている。

本研究では、樹木個体の配列として、1 列、2 列、3 列及び 10 列の 4 種類の列配置の森林キャノピー模型を対象とした。図 4 に 3 列の樹木個体配置パターンを示す。図 3 は、10 列配置の場合である。

2.4 流れ場の座標系と速度の計測領域

本研究で流れ場を表示するために用いられる座標系は、主流方向を x 軸、高さ方向を y 軸、模型の列幅方向を z 軸と定義されている。 x 軸と y 軸の原点を森林キャノピー模型最後列の樹幹付け根の中心とし、 z 軸は上流方向から右側壁面を原点とする。即ち、 x 軸方向は上流から下流に向けて正に、 y 軸方向は高さ方向を正に、 z 軸方向は上流方向から右側壁面から左側壁面に向けた列幅方向を正とする。

更に、結果の表示においては、距離 x 及び y は平均樹高 H で、距離 z は樹幹間隔 D で、それぞれ無次元化されている。また、図 5 に示すように、最後列の樹木個体の間($z/D=3.5$)に沿った森林模型の下流方向の速度計測に対して「樹間下流」と、一方、最後列の樹木個体の真後ろ($z/D=5.0$)の下流方向の速度計測に対しては「樹幹下流」と表記する。

模型の下流域において流れの速度が測定された領域は、模型下流方向に $x/H=1/4\sim 10/4$ 、高さ方向は $y/H=0.028\sim 1.908$ 、模型列方向は $z/D=0.275\sim 5.169$ であった。

2.5 流速の計測方法

図 1 に流速計測系統図の概略を示す。本実験での代表速度 U_∞ は、それぞれの位置 x における高さ $y/H=1.6$ で測定された主流方向速度として定義されている。 U_∞ は、ピトー管とデジタルマノメータにより測定された。

流れ方向速度について、時間平均速度成分 \bar{U} 及び乱れ度 $\Delta U/U_\infty$ は、I 型熱線プローブを速度計測用のセンサーとして用い、定温度型熱線流速計(KANOMAX, IHW-100)により測定された。熱線には $\phi 5\mu\text{m}$ のタングステン細線が用いられている。更に、変動流れのパワースペクトルは、FFT アナライザ(小野機器, CF-900)により熱線流速計からの出力信号を統計処理することにより求められた。

流速測定値のばらつきを抑えるため、一つの測定点につき 2~3 回の測定が行われ、その結果が平均化された。

3. 実験結果

3.1 樹木個体の列数が流れ場に及ぼす影響

森林の林帯幅の効果を解明するための基礎的データとして、樹木個体の列数が流れ場に与える影響を検討した。即ち、樹木個体列数が 1, 2, 3, 10 列の場合について、流れの主流方向速度成分の三次元分布が測定された。測定位置 x は、森林模型の後端から比較的近い下流位置として、 $x/H=1/4$ と設定されている。

3.1.1 時間平均速度 図 6(a)(b)に、時間平均速度 \bar{U}/U_∞ の高さ y 方向の変化を示す。図 6(a)(b)に対応する列幅方向の位置 z は、それぞれ樹幹下流と樹間下流の場合である。これらより、樹冠部下流域である $y/H\approx 0.4\sim 1.0$ の範囲で時間平均速度の減速が確認できる。特に、樹幹下流(図 6(a))では、樹木列数が多いほど減速効果が強いが、列数による速度

の変化は少なく、ほぼ同程度の減速となっている。しかし、樹間下流（図 6(b)）では、列数が少なくなると、減速効果が急速に弱められる。一方、 $y/H \leq 0.4$ の樹幹部下流域では、樹木列数の増加と共に減速効果が強められるが、樹冠部下流域に比べると樹幹下流と樹間下流における時間平均速度の差異は少ない。また、 $y/H \geq 1.8$ では、風洞測定部上壁面上に発達する境界層のため、速度は減速している。

図 7(a)(b)(c)は、それぞれ樹冠部上方 ($y/H = 1.1$)、樹冠部下流 ($y/H = 0.8$)、樹幹部下流 ($y/H = 0.2$) における樹木列幅方向 (z 方向) の時間平均速度 \bar{U}/U_∞ の分布を示す。図 7(a)より、樹冠部上方では時間平均速度の分布は、樹木個体の配列ピッチでは変化していない。また、樹木列数の増加と共に減速効果が強められている。一方、図 7(b)より、樹冠部下流における時間平均速度分布は、樹木個体の配置ピッチで変化している。即ち、森林キャノピー模型の下流域では時間平均速度は、全体としては列数に依らず大きく減速している。しかし、樹木個体の間を通り抜ける流れのため、樹間下流の時間平均速度は、樹幹下流の速度に比較して速い流れとなっている。また、この速い流れは、樹木個体模型の列数の増加により大きく減速する。樹木列数が少ない場合には、流れの混合が進んでいないために、 z 方向に時間平均速度がきわめて大きく変化している。更に、図 7(c)の樹幹部下流の時間平均速度分布の特徴は、図 7(b)と同様である。しかし、樹幹直径が細いため、樹幹部は樹冠部よりも減速効果に及ぼす影響は少ない。樹木列数が 10 列配置の場合について、10 列のも多数の樹木が存在しているため流れが十分混合され、その下流域での時間平均速度は十分均一化されていると考えられる。しかしながら、図 7(b)(c)より森林キャノピー模型下流での速度場は、最終列の樹木配置により大きく影響を受け、必ずしも均一化されていないことを示している。

3.1.2 乱れ度 図 8(a)(b)に、乱れ度 $\Delta U/U_\infty$ の高さ y 方向の変化を示す。図 8(a)(b)に対応する列幅方向の位置 z は、図 6 と同じく、それぞれ樹幹下流と樹間下流の場合である。樹幹下流（図 8(a)）では、樹冠部下流の乱れ度は、樹幹部下流よりも小さくなっている。また、樹冠部及び樹幹部の両者の下流領域において樹木列数が多くなるほど乱れ度は小さくなる。しかし、樹間下流（図 8(b)）における乱れ度は、樹冠部と樹幹部の下流において異なった傾向が見られる。即ち、樹冠部下流領域では、樹間下流と同様に列数の増加により乱れ度は減少する傾向がある。逆に、樹幹部下流では、1 列配置の乱れ度は大変小さく、2 列、3 列と列数の増加と共に乱れは強められる。一方、10 列配置の乱れ度は、1 列配置と 3 列配置の乱れ度の中間的な大きさになっている。

図 9(a)(b)(c)は、図 7 と同じく、それぞれ樹冠部上方 ($y/H = 1.1$)、樹冠部下流 ($y/H = 0.8$)、樹幹部下流 ($y/H = 0.2$) における樹木列幅方向 (z 方向) の乱れ度 $\Delta U/U_\infty$ の分布を示す。図 9(a)より、樹冠部上方での乱れ度は、1 列配置から 2, 3 列配置になると急激に増加する。しかし、10 列配置の乱れ度は、図 8(b)と同様に、1 列配置と 3 列配置の乱れ度の中間的な大きさになっている。また、この領域の乱れ度の列幅方向の分布は、樹木個体の配列ピッチでは変化していない。一方、樹冠部下流域（図 9(b)）における乱れ度の列幅方向の分布は、図 7(b)の時間平均速度分布と異なり、明確な樹木個体の配置ピッチで変化していない。しかし、列数の増加と共に、乱れ度は減少している。図 9(c)の樹幹部下流の乱れ度は、列幅方向の樹木個体の配列ピッチにきわめて強く依存した変化を示している。乱れ度は、樹幹下流では大きく、樹間下流ではきわめて小さい。

3.2 流れ場の下流方向の変化

10 列配置の森林キャノピー模型に対して、流れ場の下流 x 方向への変化を以下に示す。

3.2.1 時間平均速度 図 10 に、流速の列幅方向測定位置が樹間下流位置 ($z/D = 3.5$, 実線) と樹幹下流位置 ($z/D = 5.0$, 破線) の場合に対して、時間平均速度の下流方向分布を示す。流速の測定位置は、下流方向に $1/4H$ から $10/4H$ までの $1/4H$ 間隔である。森林キャノピー模型の樹冠部上面に沿って、更に、下流に渡って形成されるはく離せん断層が、下流域において高さ方向に広がると共に、模型後流域の減速が下流域になると共に回復していく状況が示されている。この傾向は、樹冠部をスチールウールで模擬した実験結果⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾と一致

している。更に、樹冠部下流域では、 $x/H \approx 9/4$ になると樹幹下流と樹間下流の時間平均速度はほぼ同じになる。しかし、樹幹部下流域では、本実験での下流側測定限界の $x/H = 10/4$ においても樹幹下流と樹間下流の時間平均速度に差異が存在している。

図 11 には、高さ方向の位置が樹冠部下流 ($y/H = 0.8$, ○印) 及び樹幹部下流 ($y/H = 0.2$, ●印) における、時間平均速度の xz 面内の分布を示す。風洞測定部側壁面の影響が現れている側壁面近傍の範囲 ($z/D \leq 2$) を除くと、森林キャノピー模型の下流直後では、時間平均速度は列幅方向に強く変動している。しかし、樹冠部下流では $x/H \approx 1$ の下流になると時間平均速度は列幅方向にほぼ一定となる。一方、樹幹部下流では $x/H \approx 2$ の下流でようやく列幅方向の速度変化は弱まり、ほぼ一定となる。流れ場の三次元構造は、樹冠部と樹幹部の下流では異なる。

3.2.2 乱れ度 図 12 には、図 10 に対応する乱れ度の分布を示す。乱れ度の y 方向分布は、樹冠部の上面と下面の下流域で強くなっており、この二次元的分布は既存の実験結果^{(9) (10)}と同様である。しかし、樹間下流 ($z/D = 3.5$, 実線) と樹幹下流 ($z/D = 5.0$, 破線) に対する乱れ度の三次元的分布を比較すると、これらは、本実験の測定範囲内のすべてで異なっている。特に、樹冠部上面下流域では、樹幹下流の乱れが樹間下流の乱れより強くなっている。しかし、樹冠部下面の下流域では、逆に、樹間下流の乱れが樹幹下流の乱れより強くなっている。

図 13 には、図 11 と同様に、高さ方向の位置が樹冠部下流 ($y/H = 0.8$, ○印) 及び樹幹部下流 ($y/H = 0.2$, ●印) における、乱れ度の xz 面内の分布を示す。風洞測定部側壁面の影響は、時間平均速度と同様に $z/D \leq 2$ の範囲で現れている。森林キャノピー模型の下流直後の乱れ度は、列幅方向に強く変動している。しかし、時間平均速度の場合と異なり、樹幹部下流域の乱れ度は、 $x/H \approx 1.5$ の下流で列幅方向にほぼ一定となる。一方、樹冠部下流域の乱れ度は、実験範囲の限界である $x/H \approx 2.5$ になっても列幅方向に大きな変化を示している。

以上のように、流れの主流方向速度成分に関する時間平均速度と乱れ度の三次元的分布は、森林キャノピー模型下流域の流れ場がきわめて複雑な構造をしていることを示している。

3.3 パワースペクトル

図 14 に、流れの変動速度成分のパワースペクトルを示す。測定位置は、 $x/H = 1/4$, $y/H = 1.0$, $z/D = 5.0$ であり、樹冠上面で、かつ、樹間下流の位置である。ストローハル数 St は、 $St = fh/U_0$ で定義されている。ここで、 f はパワースペクトルの卓越周波数、 h は樹冠部の厚さである。図 14 より、変動速度成分に関するスペクトル分布の卓越性は、明確には存在していないと考えられる。比較的大きいスペクトル値を持つ周波数を卓越周波数として、ストローハル数を求めると $St = 0.173$ である。円柱からの渦放出に関するストローハル数は、約 0.2 である。図 14 のように、代表長さに樹冠部厚さを用いた場合のストローハル数は、この 0.2 に近い値となっている。森林キャノピー模型下流において、多数の測定点でパワースペクトルが計測された。これらの結果は、いずれも図 14 と同様な傾向を示しており、スペクトルの卓越性は見られないものの、 $St \approx 0.2$ 近辺のストローハル数を示している。

4. まとめ

森林キャノピー模型の下流域における流れ場について、主流方向速度成分、即ち、時間平均速度及び乱れ度の三次元分布の測定が、風洞実験により行われた。これより得られた主な結果は、以下の通りである。

(1) 樹木個体の列数が増加し、林帯幅が広がると共に、時間平均速度に対する減速効果は強まり、また、乱れ度は抑えられる。また、森林キャノピー模型の下流直後ほど、また、その樹木個体の列数が少ないほど、模型樹冠部の配置パターンの影響を受ける。

(2) 森林キャノピー模型下流の $x/H = 1/4$ における乱れ度は、樹冠部下流域では樹幹下流より樹間下流の方が強い。しかし、樹幹部下流域の乱れ度は、逆に樹間下流より樹幹下流の方が

強くなる。一方、時間平均速度については、樹間下流の方が常に樹幹下流より速くなり、乱れ度とは違った傾向がみられる。

(3)10 列配置模型を含めすべての模型に対して、流れ場は、模型最後列の樹木個体の配置パターンの影響を強く受ける。

(4)森林キャノピー模型下流域における変動速度のパワースペクトルには、強い卓越性が見られず、模型から周期的に渦は放出されないと考えられる。

参考文献

- (1)安田 延寿, 基礎大気科学, (1994), 118, 朝倉書店.
- (2)村井 宏, 他編, 日本の海岸林, (1992), 249, ソフトサイエンス社.
- (3)中島勇喜, 他 3 名, 海岸防災林の減風機能に及ぼす林分条件の影響について, 日林東北支誌, 39 (1987), 250.
- (4)日野幹雄, 神田 学, 風洞付きライシメーターによる植生の気候緩和効果に関する基礎実験と解析, 水文・水資源学会誌, 2-1 (1989), 61.
- (5)P. J. Sellers, Y. Mintz, et al., A Simple Biosphere Model (SiB) for Use within General Circulation Model, Journal of the Atmospheric Sciences, 43-6(1986), 505.
- (6)日本流体力学会編, 地球環境と流体力学, (1992), 朝倉書店, 240.
- (7)Gunter Gross, Numerical Simulation of Canopy Flows, (1993), Springer-Verlag.
- (8)池田駿介, 山田知裕, 戸田祐嗣, 2次元 LES による可撓性植生層を有する場における流れの数値計算, 日本流体力学会年会'98 講演論文集, (1998), 281.
- (9)山下 祐一, 平野公孝, 菊地正憲, 森林キャノピー模型を通過する気流の速度場の測定, 宮崎大学工学部紀要, 26 (1997), 169.
- (10)山下 祐一, 平野公孝, 菊地正憲, 分林裕之, 森林キャノピー模型まわりの流れ場における乱れ構造の測定, 日本流体力学会年会'98 講演論文集, (1998), 279.
- (11)菊川裕規, 西亮, 他 3 名, 乱流風洞の研究 (その2) 大気乱流パワースペクトルの再現, 日本風工学会誌, (1999), .
- (12)河野 憲, 一ツ葉地区マツ林の立ち木密度及び胸高直径について, (1993), 宮崎県農林振興課.
- (13)堤 利夫, 森林生態学, (1989), 朝倉書店, 61.

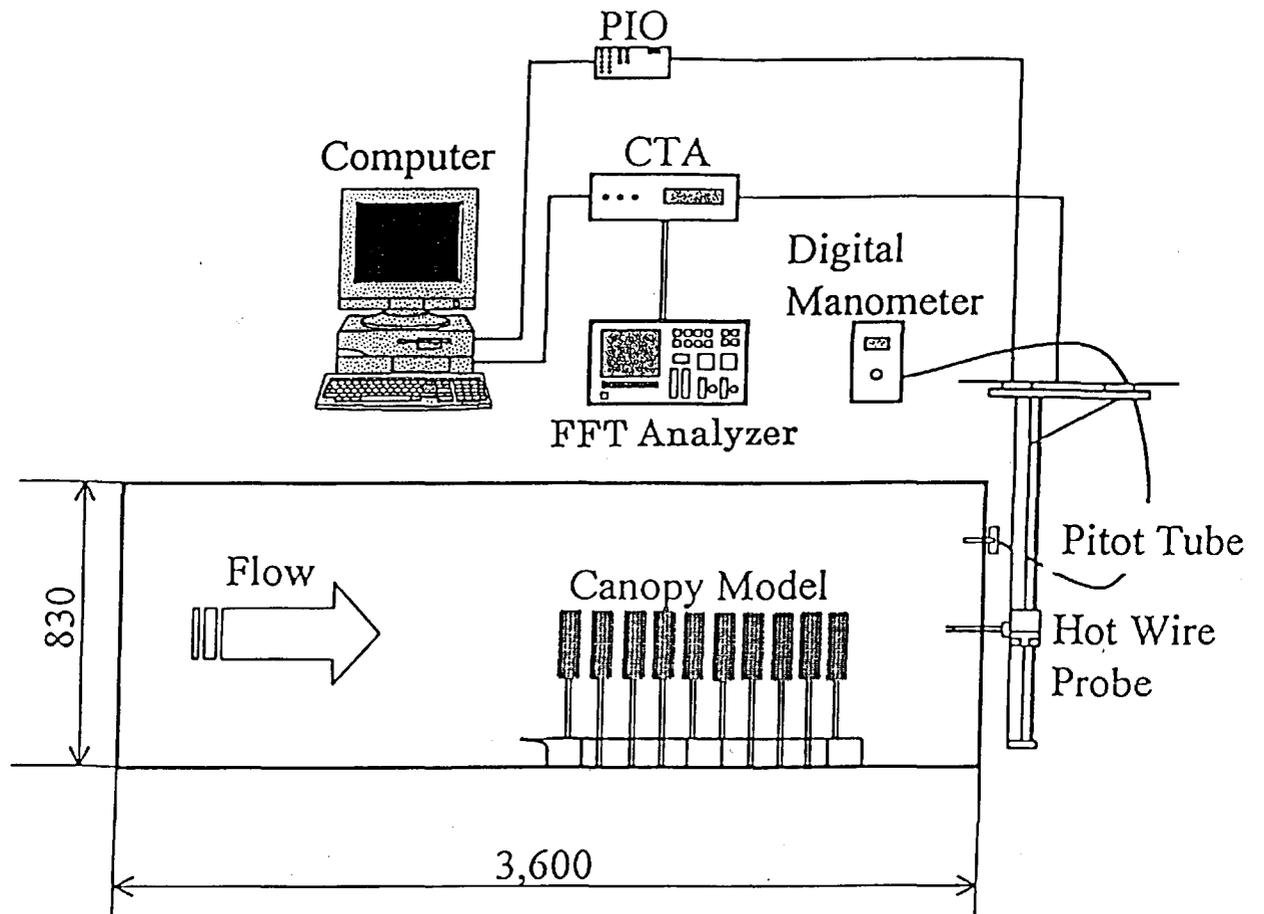
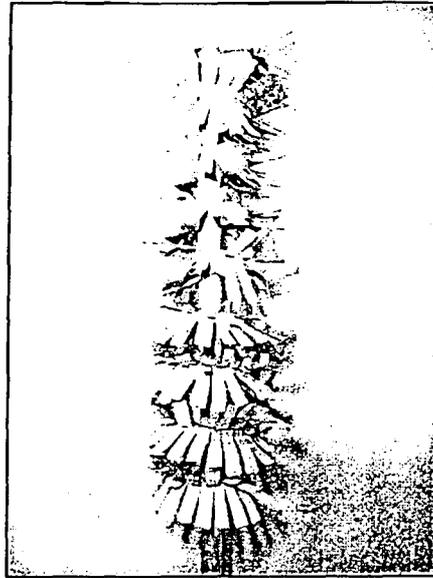
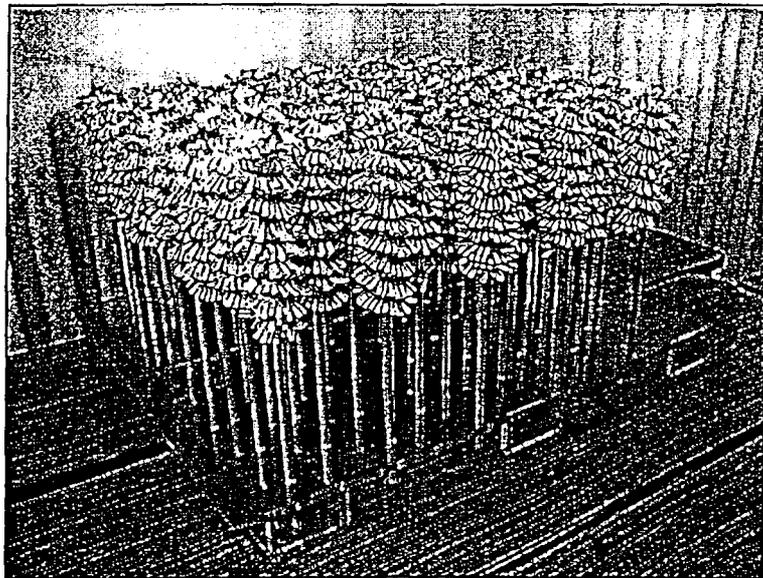


図1 風洞測定部及び流速計測の系統図



(a) 樹木個体模型



(b) 森林キャノピー模型

図2 森林キャノピー模型

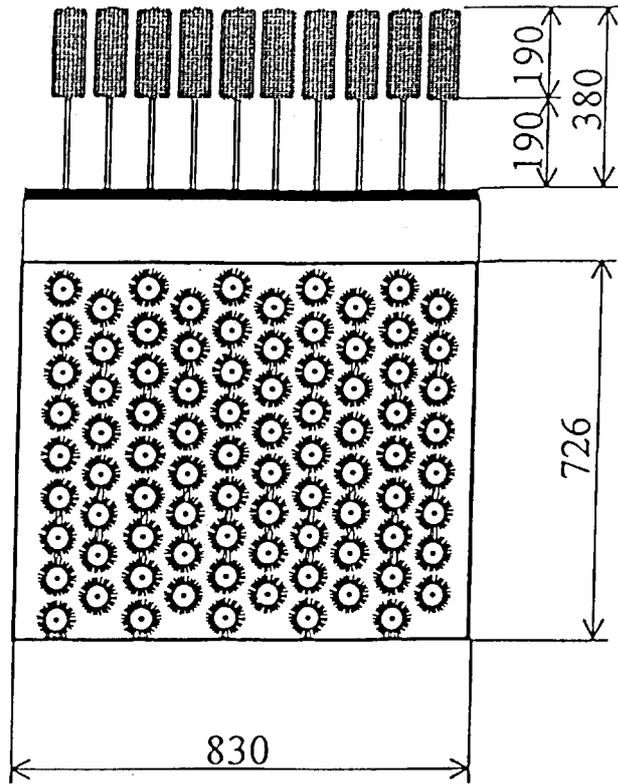


図3 森林キャノピーモデルの寸法 (10列配置)

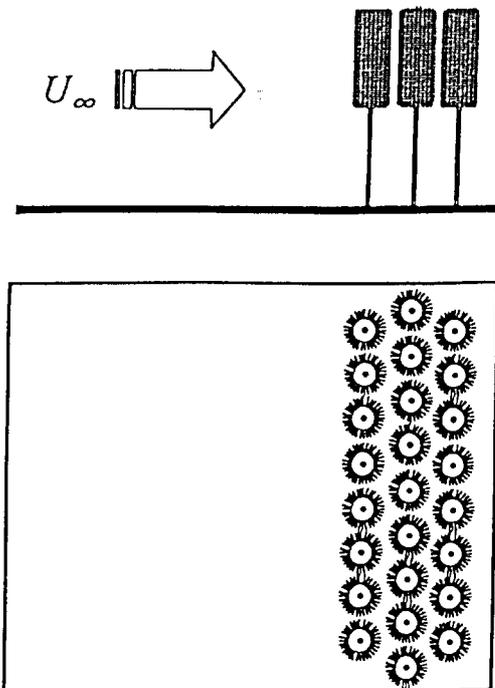


図4 3列配置の森林キャノピーモデル

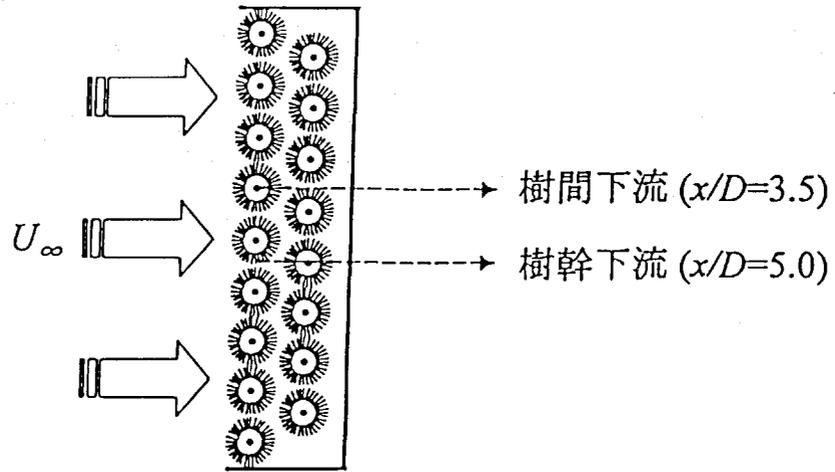


図5 模型下流における流速計測位置の表示

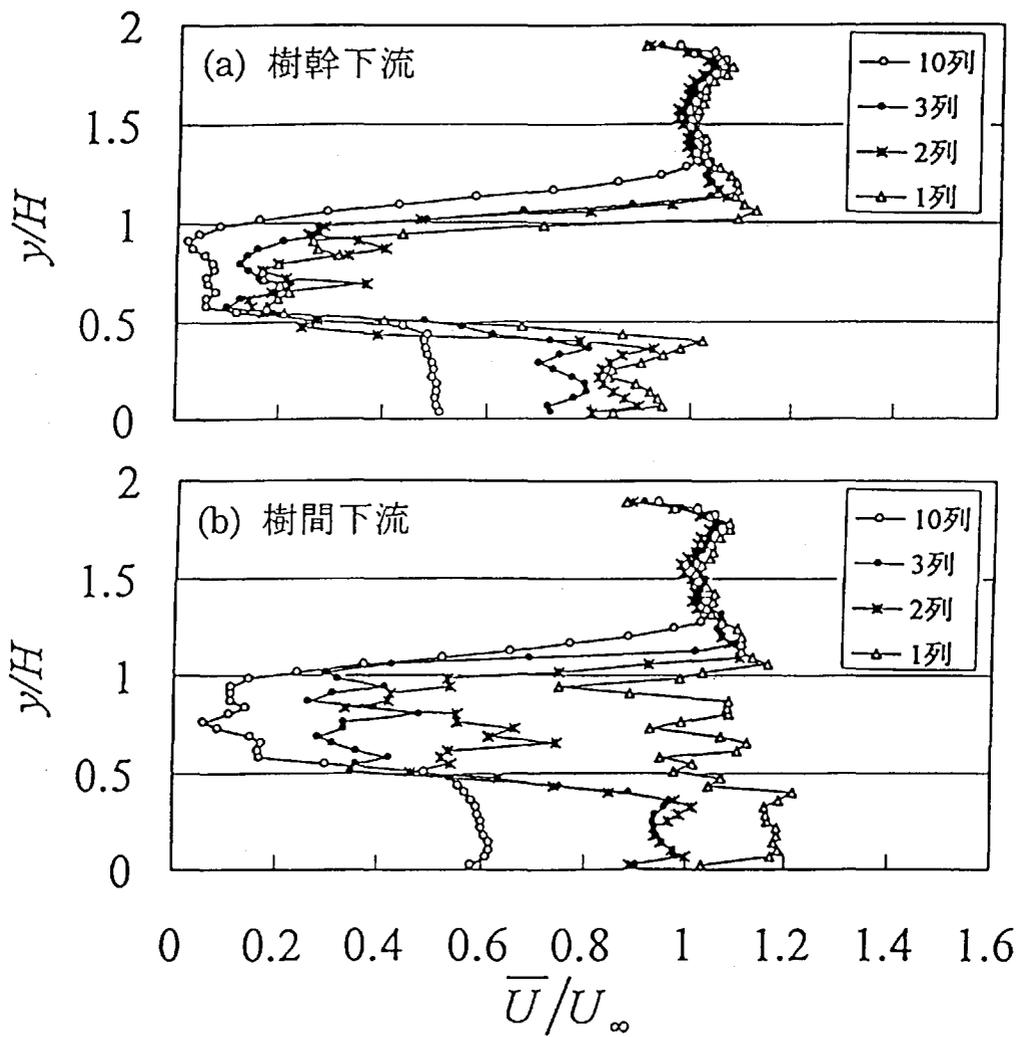


図6 時間平均速度分布 ($x/H = 1/4$) ; (a) 樹幹下流, (b) 樹間下流

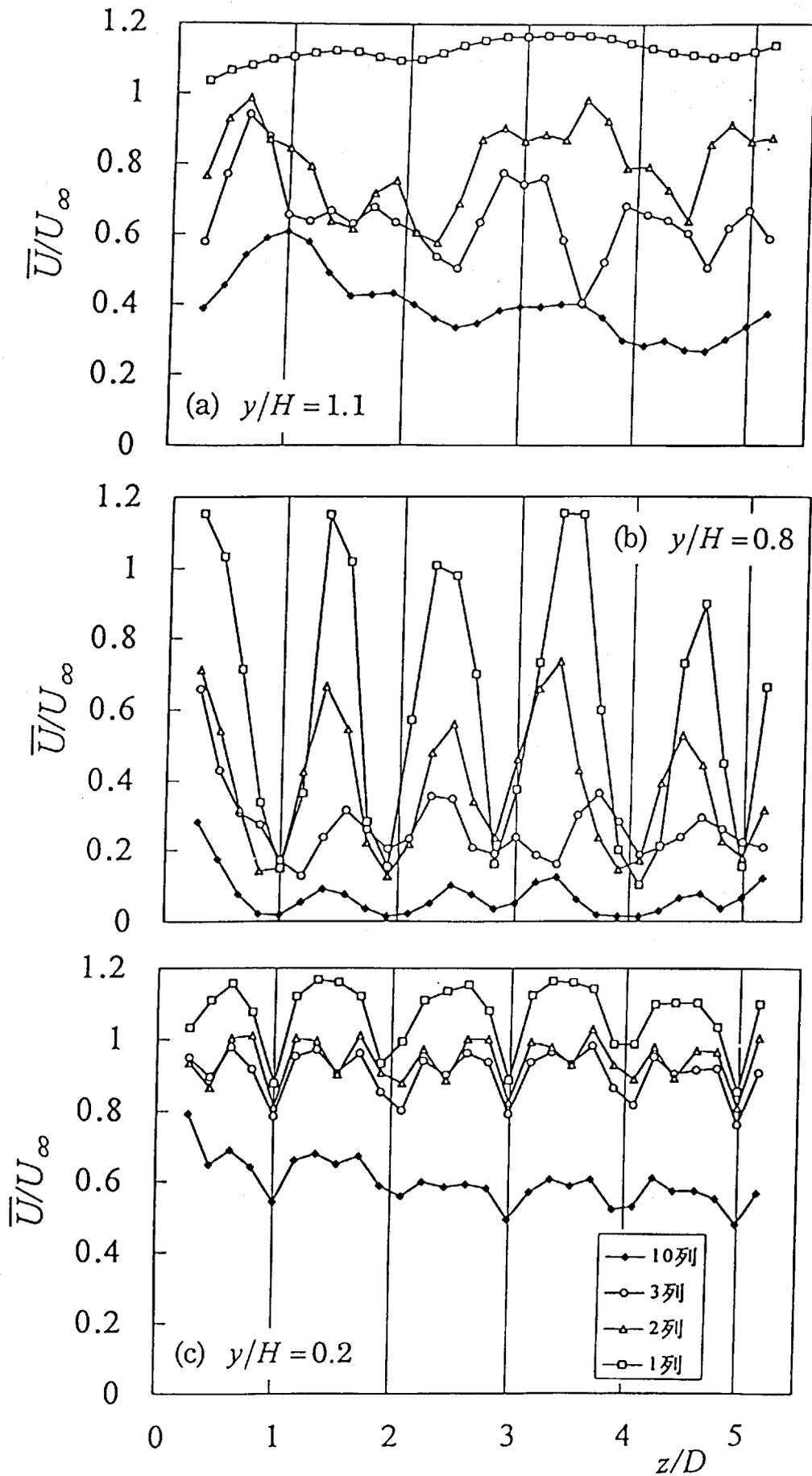


图7 時間平均速度分布 ($x/H = 1/4$) ;
 (a) $y/H = 1.1$, (b) $y/H = 0.8$, (c) $y/H = 0.2$

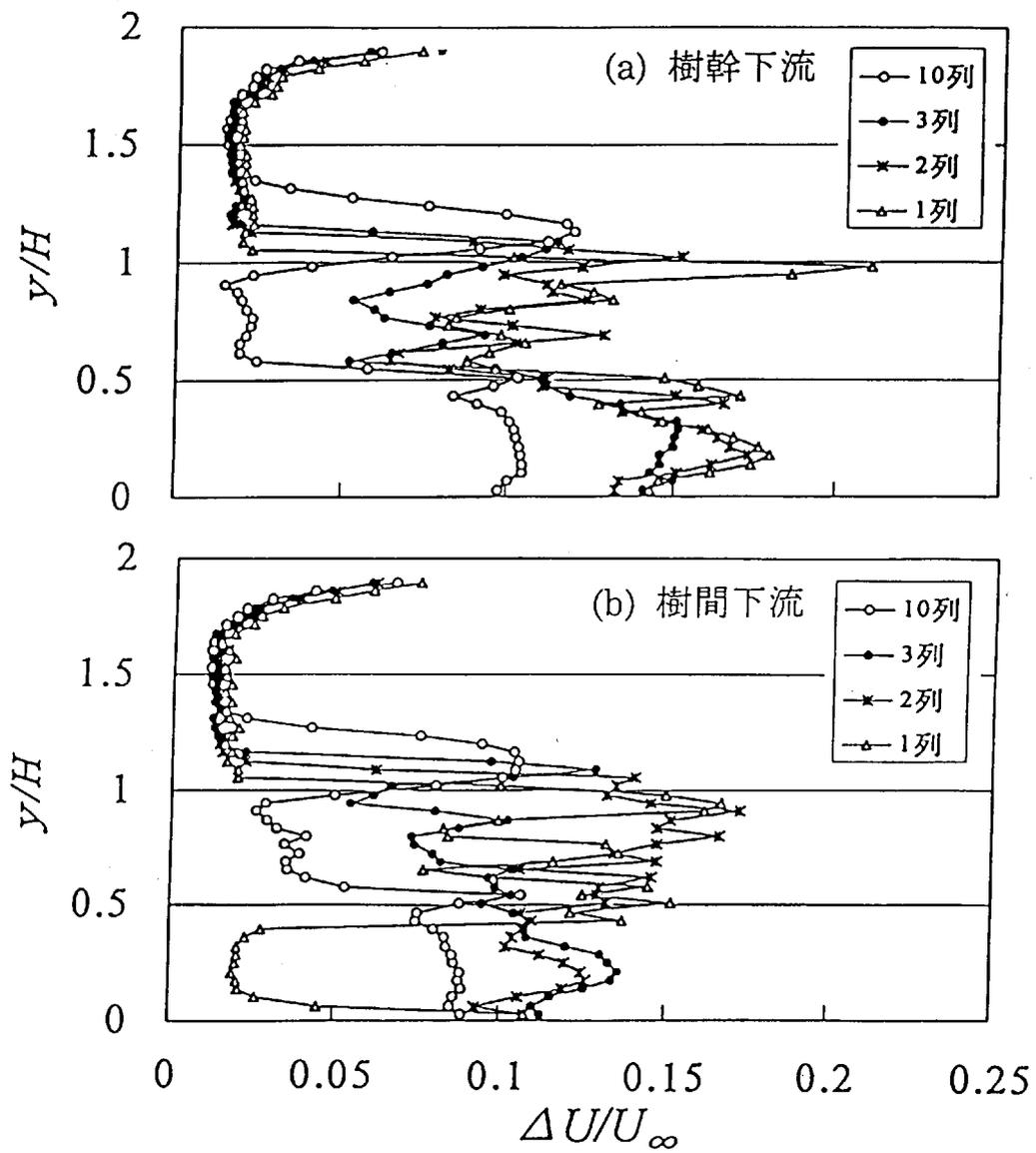


図8 乱れ度の分布 ($x/H = 1/4$) ; (a) 樹幹下流, (b) 樹間下流

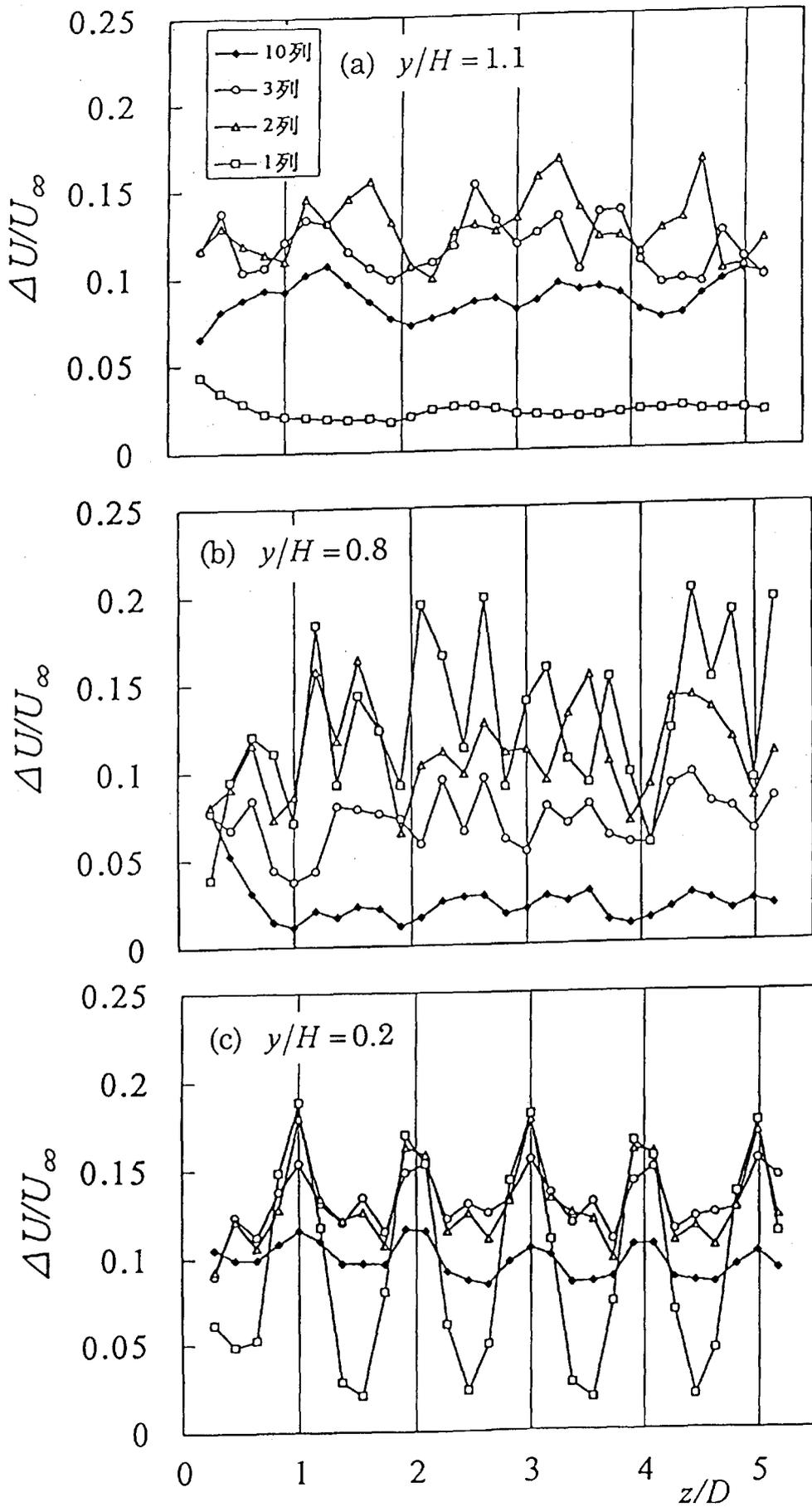


図9 乱れ度の分布 ($x/H = 1/4$) ;
 (a) $y/H = 1.1$, (b) $y/H = 0.8$, (c) $y/H = 0.2$

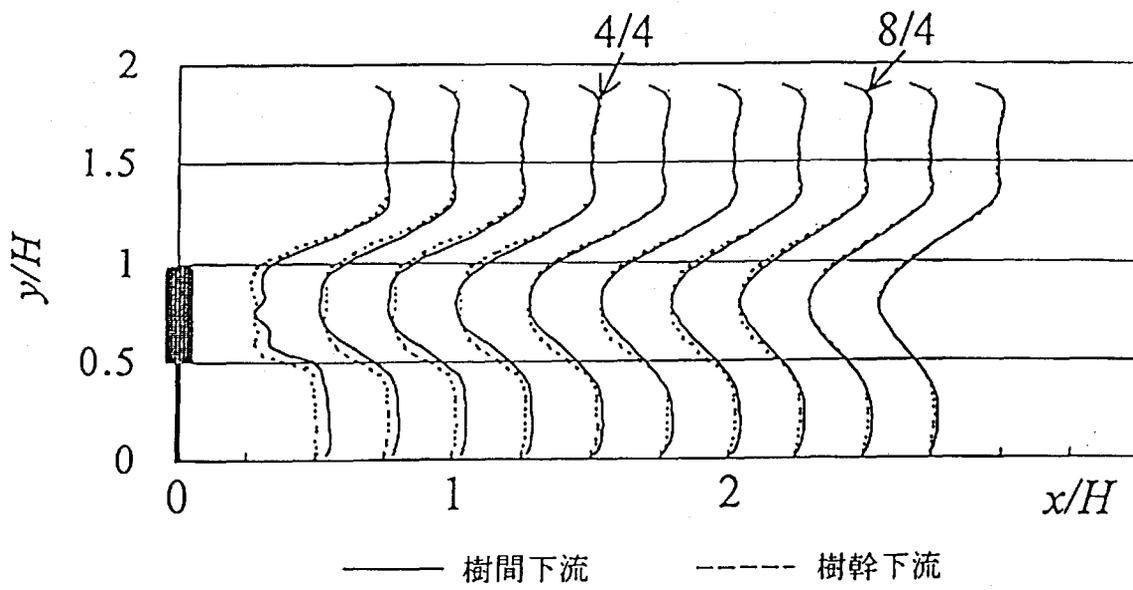


圖 10 時間平均速度分布

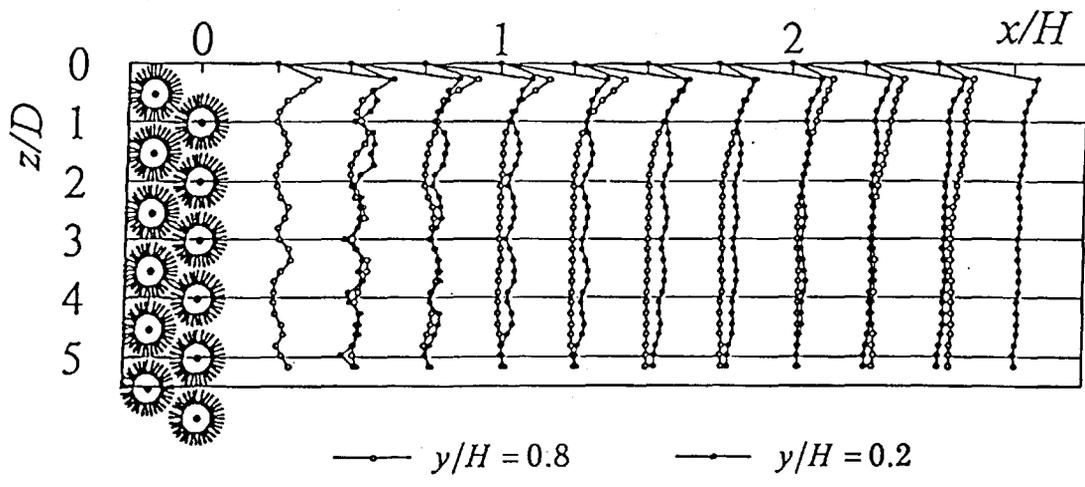


圖 11 時間平均速度分布

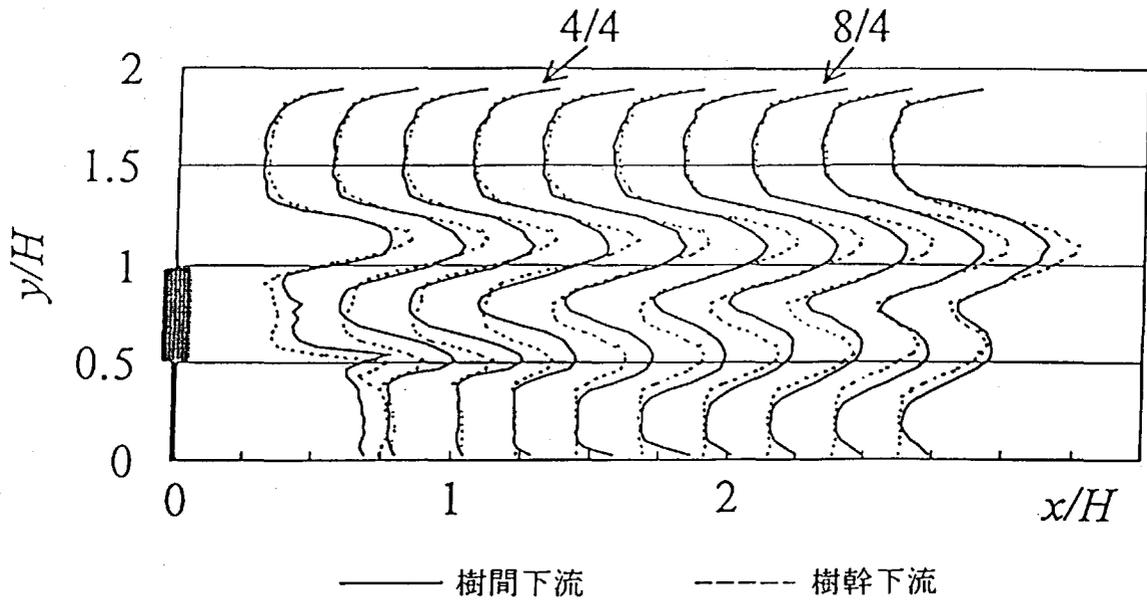


図 12 乱れ度の分布

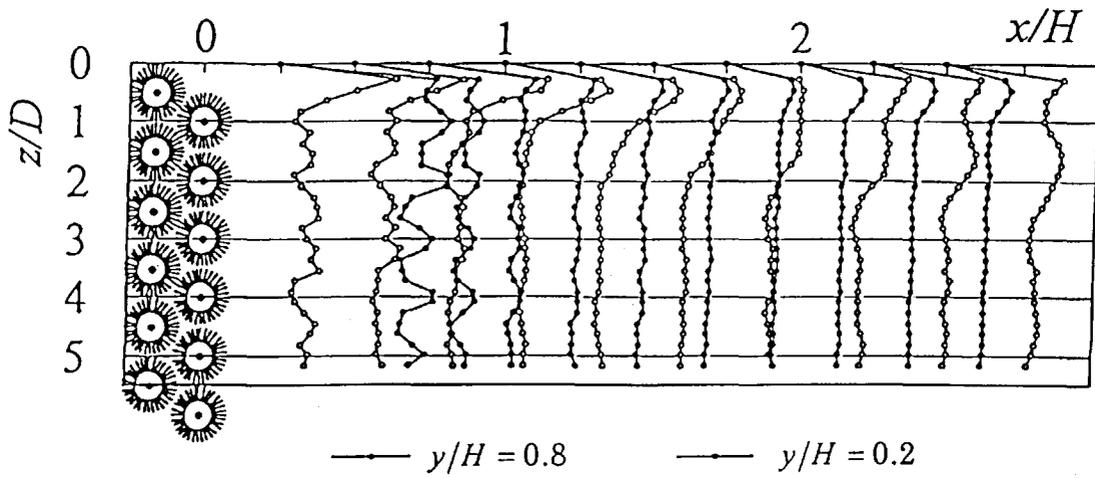


図 13 乱れ度の分布

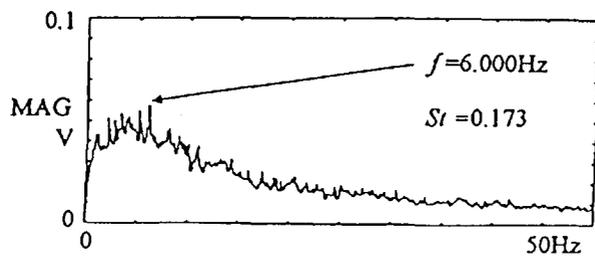


図 14 変動速度のパワースペクトル ($x/H = 1/4$, $y/H = 1.0$, $z/D = 5$)

第2部

大型乱流風洞による 森林キャノピー模型まわりの 流れ場の測定

1. はじめに

森林は強風、飛砂、高潮などの自然現象に対する防災のために利用されてきており、その歴史は長い。特に、海岸林の防風機能は有名である。しかし、最近、それらの防災機能を持つ海岸林がリゾート開発のために伐採されている。

また、森林には大気浄化作用の働きもある。昨年開かれた地球温暖化防止京都会議で、国別の二酸化炭素の削減目標が設定された。火力発電に頼っている先進国には厳しい目標である。そこで、「二酸化炭素の削減が無理なら、吸収して埋め合わせよう」という発想から、植林の研究がいつそう盛んになってきた。

以上の防災問題のリゾート開発と環境問題の二酸化炭素削減は、それぞれ、森林の伐採と植林で相対するものであるが、住みよい環境創りという共通の目標がある。そのためには、森林の伐採後と植林後の環境の変化の予想が必要である。それらに関する調査は、森林気象や生態学的研究では多くの調査、研究結果が得られている。一方、森林を模型化し風洞実験も行われているが、種類や環境によって形状が異なる樹木を模型化するのは困難であり、物理学的解明には多くの課題が残されている。

そこで、本研究では将来的な森林に関する問題に対処するために、樹木の模型化を重視し、その基礎データを得ることを目的とした。樹木模型は、種類や育成環境によって異なる葉面積指数に着目し、すべての樹木模型の葉面積指数を統一した。実験は模型後流の速度分布と、乱れ強度をI型熱線風速計で測定した。得られた結果は、これまでの研究結果と比較し、今後の研究課題を検討する。

2. 実験装置

2.1 森林キャノピー模型

本実験では平成10年に宮崎大学に設置された大型乱流風洞を使用するので、平成9年度よりもさらに大きな森林キャノピー模型を新たに制作することにした。昨年は使用した風洞が小型だったために模型を大きくすることができず、側板（昨年の模型では風洞の壁）や巻き込みの影響を考慮すると模型中心のごく限られた範囲のデータしか有効ではなく、森林キャノピー模型の幅方向の測定があまりなされていなかった。本研究で制作した模型を使用し、より広い領域で、より多くのデータを取るにより森林キャノピー周りの流れの構造を詳しく解析することができる。

森林キャノピー模型は大きく分けて土台部分と樹木模型群の2つで構成されており、1本の樹木模型はさらに樹冠部分と樹幹部分に分けられる。

土台部分の寸法は1760(W)×150(H)×2880(L)mmの12分割式とし新たに側板を取り付けた。先端にはせき止め効果を和らげるためにエッジを取り付けた。

樹木模型は、樹幹部分については昨年と同様に直径10mmの丸棒を使用した。樹冠部分には新たに「葉面積指数」という概念を取り入れたため初めから作り直すことにした。「葉面積指数」とは森林科学などの分野で用いられている用語であり、単位土地面積あたりのすべての葉の面積の合計で表され、樹種によりある程度決まっている。もともと葉面積指数は植物や森林の生産力（光合成により生成されるエネルギー）を計算するときの係数であるが、異なった樹種間において風の通り抜けにくさを比較する場合に、どちらが葉の面積の合計が大きいかを大きく関係してくると考えられるので、風速を測定対象とする本実験において葉面積指数という概念を取り入れることとした。

一般的な森林の葉面積指数の例としては、常緑針葉樹の松林3~6、杉6、常緑広葉樹のカシ7、シラカシ8.4、熱帯雨林8などが報告されている⁽¹⁾。

2.1.1 樹木模型単体

模型化する際、樹高6~8m、胸高直径(幹の直径)0.1mの樹木を想定した。昨年の実験からの継続性を持たせるため、昨年と同様樹木模型単体を1/20、胸高を1/10の縮尺とし、樹木模型単体の樹高 $H=300\text{mm}$ 、胸高直径 $d=10\text{mm}$ とした。

実際の樹木後方の流れは枝葉の揺れや幹のしなり、風の透過性により作られると考えられるが、枝葉のレベルまで模型化しさらにその揺れまで再現するのは困難であるので、枝葉の揺れや幹のしなりは考慮せず風の透過性のみを考えることとし、このとき葉面積指数を用い

る。こうすることにより穴をあけた平面の組み合わせという単純な形で樹木を模型化することができる。本研究では、樹冠部分は葉面積指数が計算しやすい形状とした。材料には加工しやすいアルミニウム板を使用し、樹木一本につき 75×75 の正方形 8 枚と 32.5×210 の長板 4 枚を互いに切り込みを入れて図 2.1 のように組み合わせ、シリコン系の接着剤で固定した。組み合わせる前にこれに複数の穴をあけ残った部分を葉の面積とする。葉面積指数は次のように定義される。

$$\text{葉面積指数 (leaf area index : LAI)} = \frac{\text{森林中の全葉の片側面積の合計}}{\text{森林の土地面積}}$$

森林の葉面積指数は 1 ~ 13 程度であるが、強度を考えるとあまり小さくできない (あまり穴をあけられない) ことと、本樹木模型が今後の森林キャノピー実験の基準になることを考慮して、今実験では葉面積指数は 9 前後と高めに設定した。隣り合うまたは前後する樹木模型を十分密集させることにより、樹木一本についても葉面積指数の式を適用してよく、樹木 1 本の全葉の片側面積の合計を A として上式を適用すると、

$$9 = \frac{\text{全葉の片側面積の合計}}{\text{土地面積}} = \frac{A}{75 \times 75} \quad \therefore A = 75 \times 75 \times 9 = 50625 \text{ (mm}^2\text{)} \quad (1)$$

また穴をあけていない状態の総面積を B とすると、

$$B = (75 \times 75) \times 8 + (32.5 \times 210) \times 4 = 72300 \text{ (mm}^2\text{)} \quad (2)$$

(1), (2) より切り取らなければならない面積の合計は

$$B - A = 72300 - 50625 = 21675 \text{ (mm}^2\text{)} \quad (3)$$

穴の直径を 11mm とすると、樹木模型 1 本あたり 228 個の穴をあければよい。このとき葉面積指数 $LAI = 9.001$ となる。

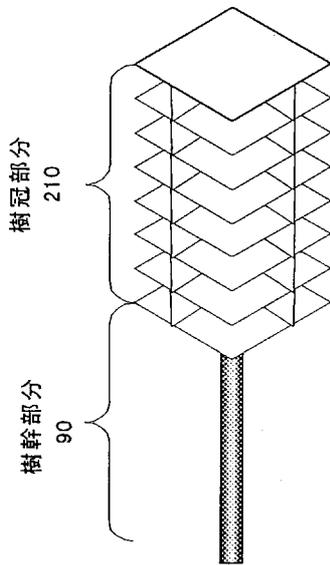


図 2.1

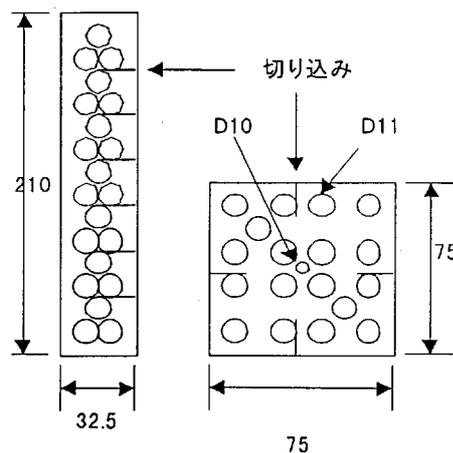


図 2.2 穴の配分

この 228 個の穴の配分は、部品の強度を考えて図 2.2 のようにした。正方形板の中心の穴は幹になる丸棒を通すためのものであって葉面積指数の計算には関係ない。完成図を図 2.3 に、写真を図 2.4 に、樹木模型群からなる森林キャノピー模型の写真を図 2.5 に示す。本実験ではこの樹木模型を 194 本制作した。

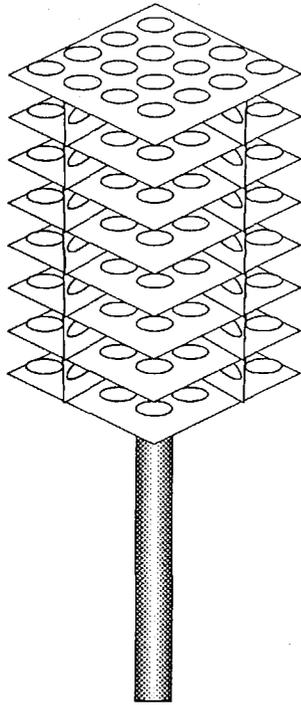


図 2.3 樹木模型単体

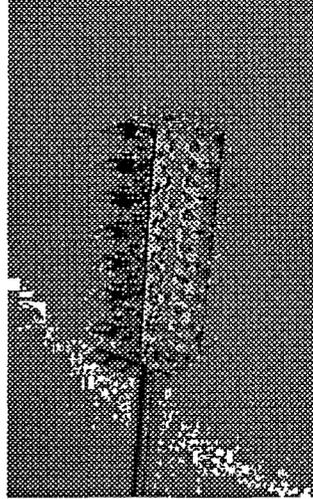


図 2.4 樹木模型単体

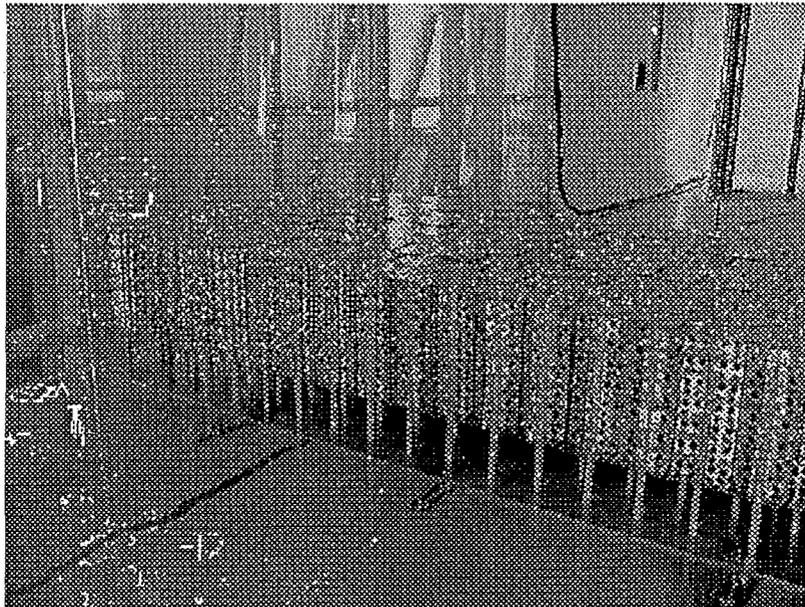


図 2.5 森林キャノピー模型

2.1.2 土台部分

土台部分の寸法を図 2.6 に示す。材料には昨年と同様に 10mm アクリル板を使用した。加工性と持ち運びのことを考慮し図のように 12 分割式とした。前段の 4 つとそれに取り付ける側板にはエッジを取り付け、先端でのせき止めによる流れへの影響を小さくした。樹木模型の配列方式は昨年と同じ千鳥型格子状とし、隣り合う樹木間の距離を 8cm、前後する樹木列間の距離を 8cm とした。中段の 4 つには樹木模型の幹の部分差し込むための穴を流れ方向に 9 列、幅方向には前から 22 列、21 列... と交互に 194 個あけてある。図 2.7 に千鳥型格子配列の概略図を示す。

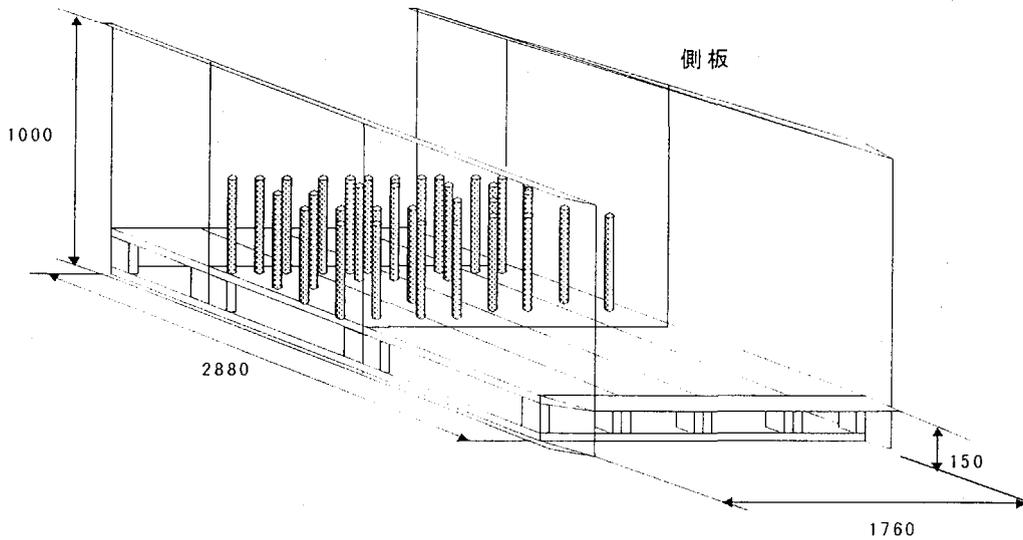


図 2.6 土台寸法

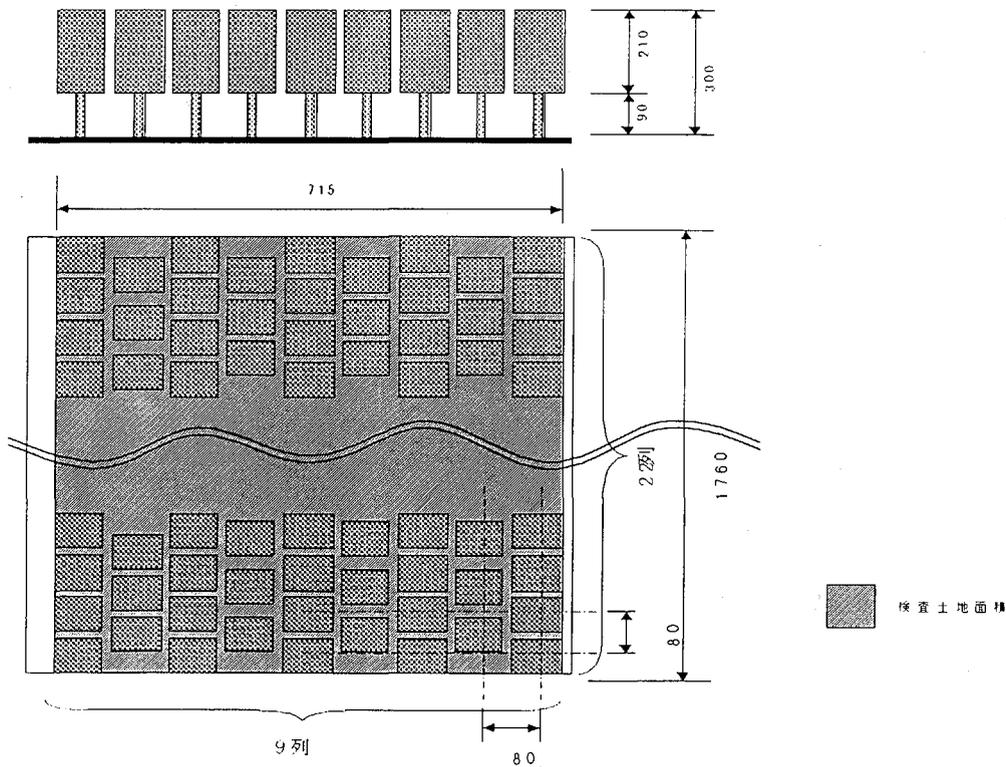


図 2.7 千鳥型配列

2.2 風洞装置

本実験では平成 10 年に宮崎大学に設置された大型乱流風洞を使用した。概略図を図 2.8 に、送風機部を図 2.9 に示す。この風洞は 99 個の送風機をそれぞれ独立にコンピュータ制御し、11 枚の気流偏向翼と組み合わせて任意の速度分布や乱流を作ることができる。以下に仕様を示す。

形式	開放押込
測定部	2.565(W)×1.8(H)×15.45(L)m
風速	1~18m/s
乱れ強さ	2%以下(9 m/s 時)
送風機	AC サボモータ 750w×99 台
トラバース装置	2 軸自動制御×2 台

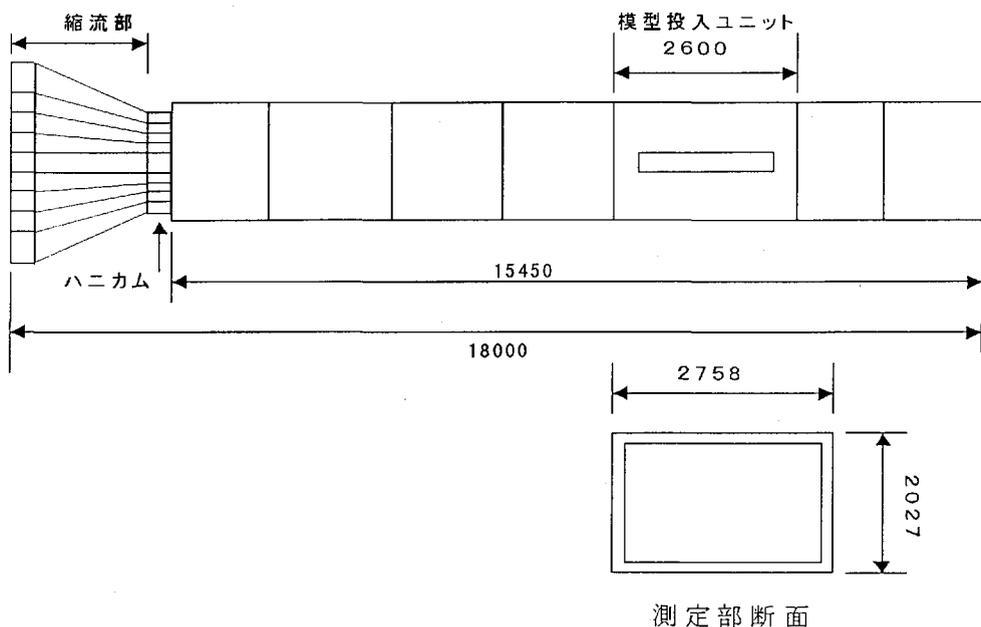


図 2.8 風洞概略図

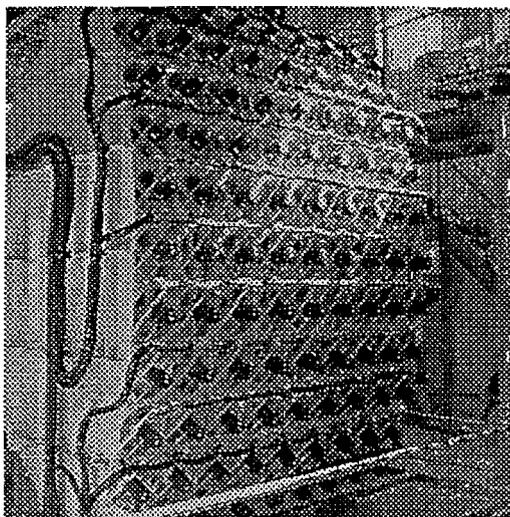


図 2.9 風洞送風機部

2.3 計測装置

平均風速, 乱れ強度を熱線風速計(KANOMAX,IHW-100)で測定し, 熱線プローブ には I 型を使用した. なお本実験で使用する風洞は, 99 個の送風機がそれぞれコンピューターにより適切に制御されており, あらかじめ風速を設定していればその平均風速が得られるので, ピトー管を使って上流側の平均風速を調整する必要はない. 図 2.10 に計測, 制御の概略図を示す.

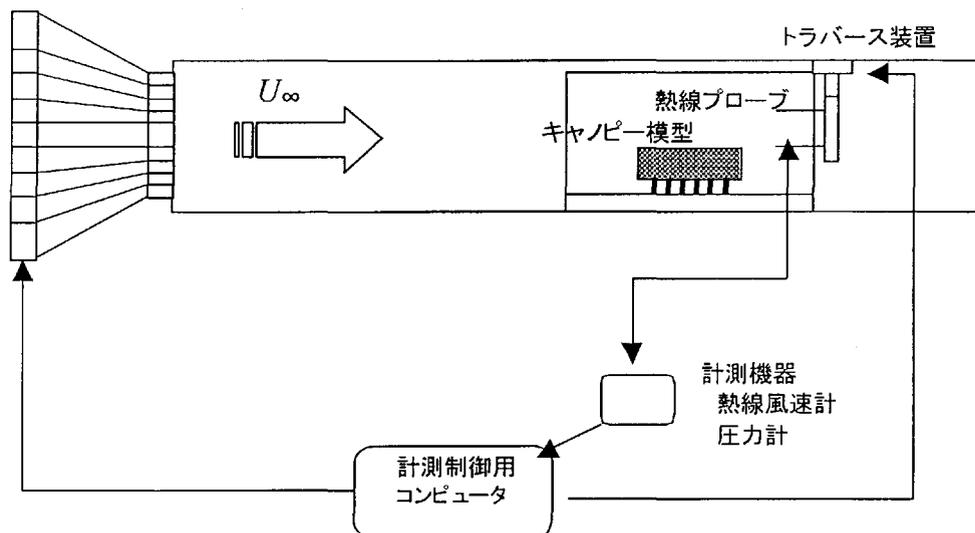


図 2.10 流速計測及び送風機制御の系統図

3. 実験方法

3.1 測定法

大型化した森林キャノピーモデルを風洞の中に置き、一様な風（風速が一番始めの実験で決定する）を流して、その周辺の平均風速、乱れ強度をI型熱線流速計で測定する。測定の結果は、信頼性を高めるために各測定点につき2回測定し、再現性を確認している。なお今後平均風速、乱れ強度を用いる際には上流側の一様流速 U_∞ で割って無次元化した値を用いる。

3.2 座標系

座標系は、図3.1に示すように、流れ方向を x 軸、高さ方向を y 軸、模型の幅方向を z 軸としている。 x 軸、 y 軸の原点を樹木模型最終列の幹の付け根の中心とし、 z 軸の原点を下流に向かって左側壁面とする。 x 軸方向は上流から下流にかけて正に、 y 軸方向は高さ方向を正に、 z 軸方向は下流に向かって左側壁面から右側壁面に向けた方向を正とする。なお今後は x 軸、 y 軸は樹高 H (=300mm)で、 z 軸は樹幹間隔 D (=80mm)で割って無次元化した値を用いる。

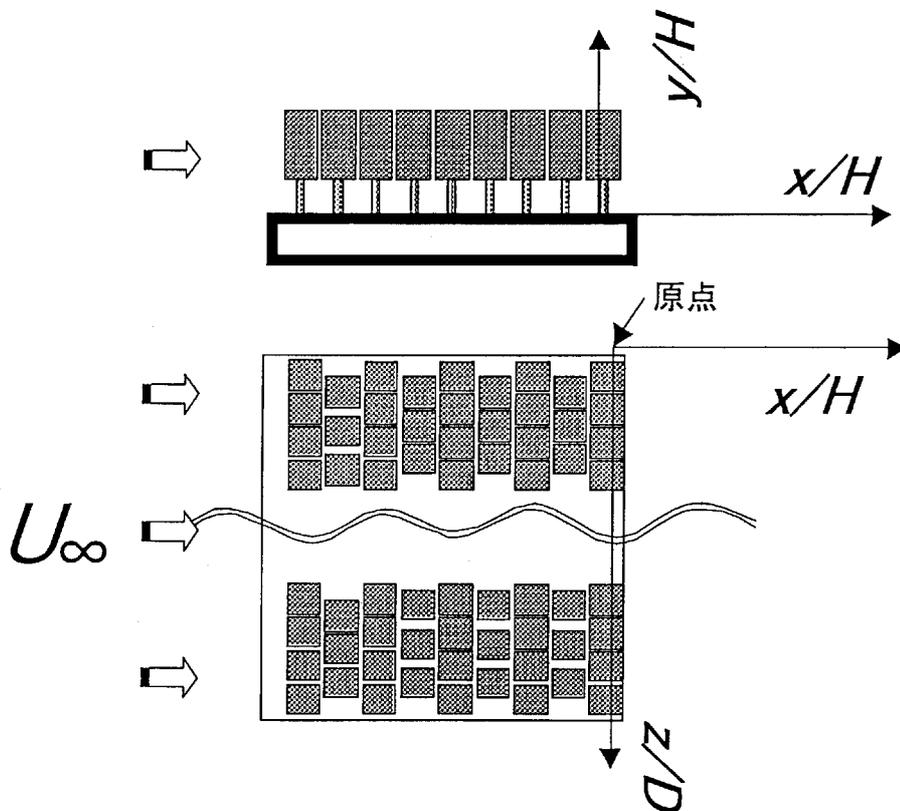


図 3.1 座標系

3.3 測定領域

まず樹木模型前方の延長板上において、 $x/H = 0.67$ 、 z 方向は模型の中心として y 方向に測定し、樹木模型に吹き付ける流れの速度分布を測定した。模型の後流域では、まず z 方向は模型の中心に最寄の樹木の後方とし、 $x/H = 0.67$ で y 方向に細かく測定した。次に、 $x/H = 0.67$ で y 方向に $y/H = 0.15, 0.67, 1.1, 1.43, 1.9, 2.4$ でそれぞれ z 方向全幅にわたる領域で測定した。

4. 実験結果

4.1 風洞の一樣流の測定

風洞が昨年よりも大型化したので、一樣流に誤差、または乱れがないか確認するため、風洞に模型を設置しない状態で一樣流の速度測定をした。測定は模型を設置した場合の土台前縁部に相当する位置で行った。

測定の結果、各測定点で平均流速、乱れ強度ともにほぼ完全な一樣な速度分布であったので、解析した結果などは特に記載しない。

4.2 代表速度（レイノルズ数）の決定

実験をする際、ある程度の気候条件の変化があっても実験値に影響がでない風速（レイノルズ数）を決定するため、一樣流を $U=5\text{ m/s}\sim 14\text{ m/s}$ まで 1 m/s おきに变化させて、測定部 ($x/D=11$ $y/H=0.15, 0.67, 1.1$) の平均流速と乱れ強度を調べ、それらがあまり変化しない風速域（レイノルズ数の範囲）をみつける。測定結果は、設定したときの一樣流 U でそれぞれ無次元化している。

4.2.1 測定結果

(a) $y/H=0.15$, $z/D=11$ (樹幹下流)

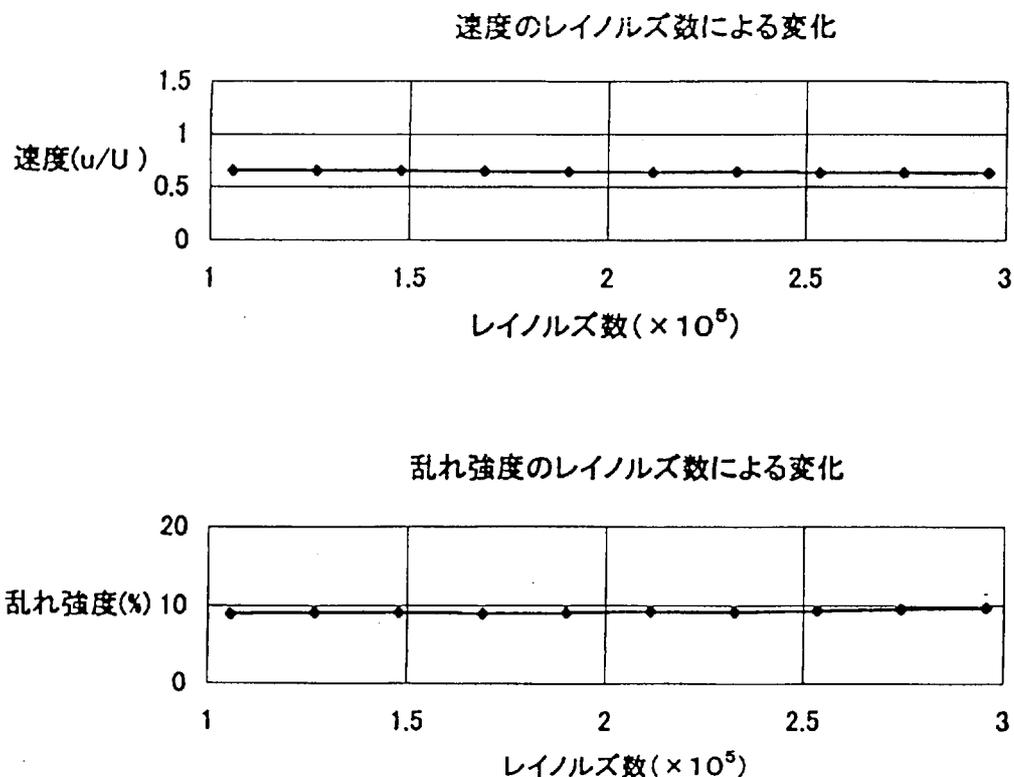
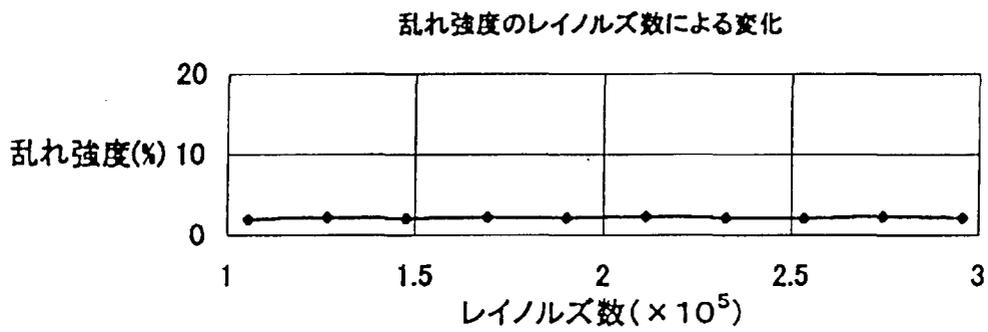
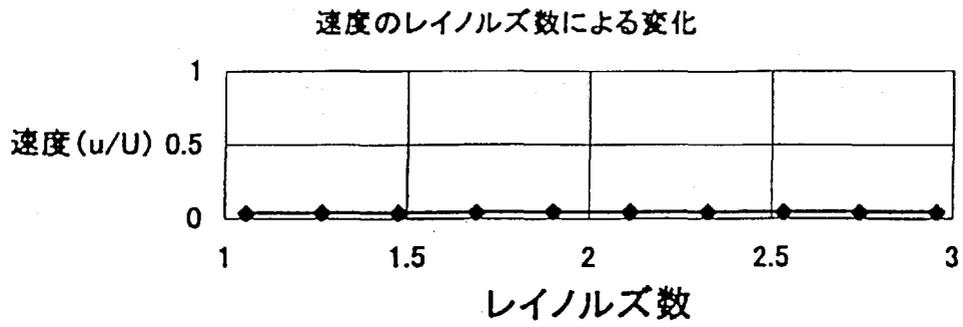


図 4.1 乱れ強度と平均風速のレイノルズ数による変化

(b) $y/H=0.67$, $z/D=11$ (樹幹下流)



(c) $y/H=1.1$, $z/D=11$ (樹幹下流)

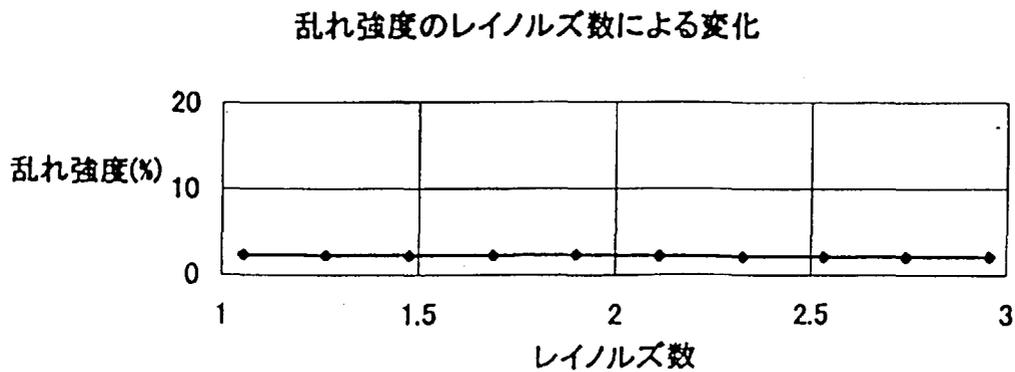
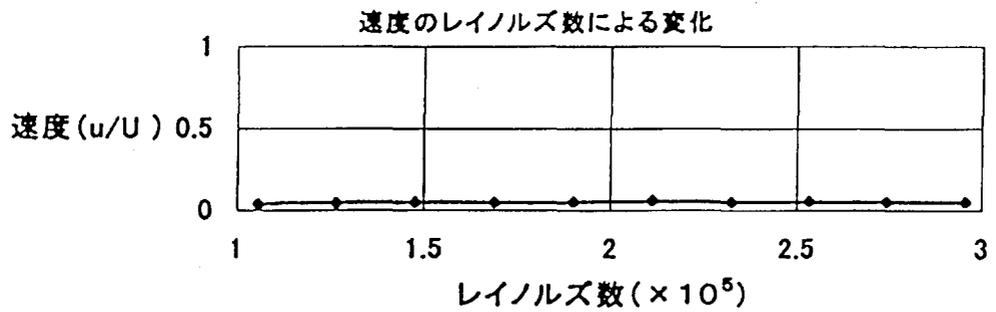


図 4.1 乱れ強度と平均風速のレイノルズ数による変化

4.2.2 代表速度（レイノルズ数）の選択

図 4.1 より、どの測定点においても乱れ強度、平均風速ともにほぼ一定値であり、一様流風速 5~14m/s の範囲ではレイノルズ数に依存しない。そこで本実験では測定した平均風速と無次元化した値がすぐに分かるように、一様流風速に 10m/s ($Re=2.1 \times 10^5$) を選んだ。これからこの値を代表速度 U_∞ とし、測定された平均風速や乱れ強度はすべて U_∞ で無次元化している。

4.3 森林模型前方の速度分布

実際の大気の流れの速度分布は必ずしも一様ではなく、また厚い境界層がある。そこで、模型を通過する前の風の境界層を知るため速度分布と乱れ強度を測定した。測定は、土台から樹木模型すべてを除いた状態で行なった。測定位置は土台前縁部から下流方向に 1000mm, $z/D=11$ の位置で行った。

4.3.1 測定結果

(a) 速度分布

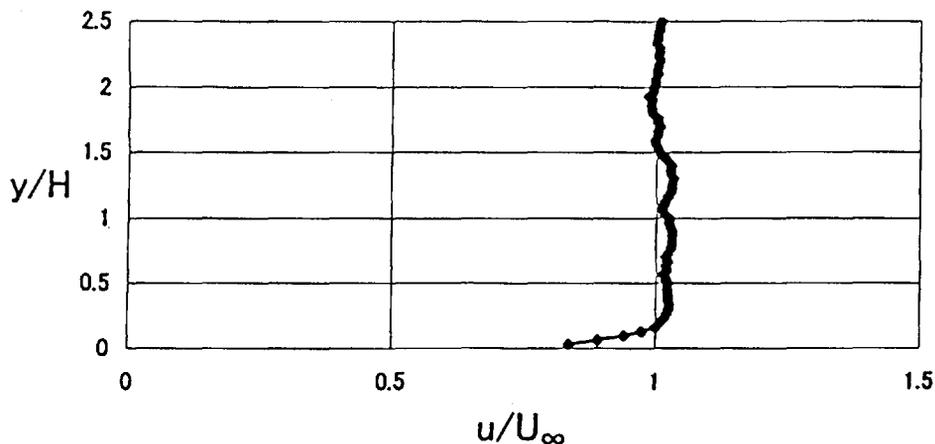


図 4.2.1 森林模型前方の速度分布

(b)乱れ強度

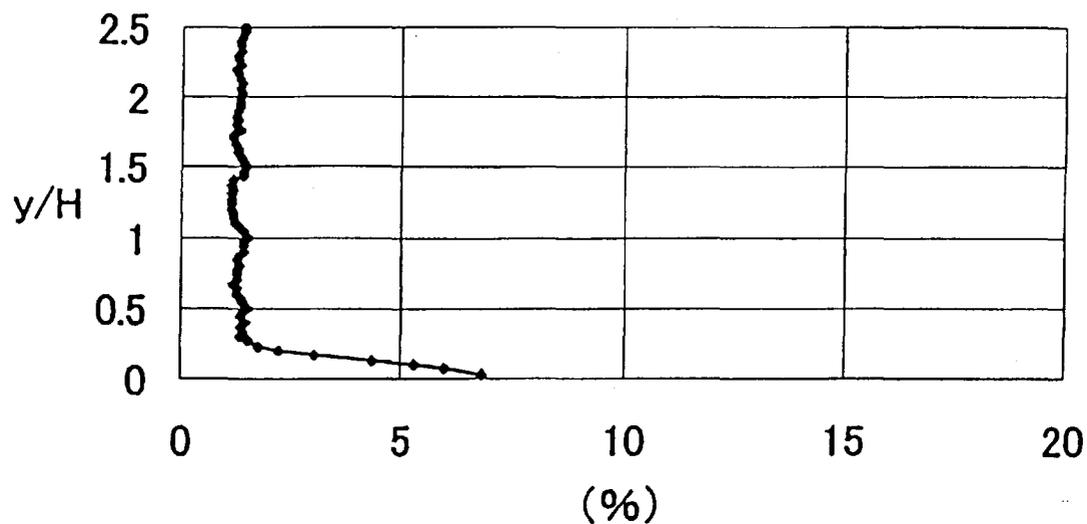


図 4.2.2 森林模型前方の乱れ強度の分布

図 4.2.1 より、森林模型前方の速度分布の形状は同じであるが、 $y/H=0.3$ 付近からほぼ一様流に回復しており、実際の境界層の厚さより薄いことが分かった。

図 4.2.2 より、速度が回復している高さ $y/H=0.3$ から上は、乱れ強度は 2%以下で小さい。以上のことから、土台の形状は本実験を行うにあたって、特に問題はないことがわかった。

4.4 森林模型通過後の流れ場

これまで当研究室で行われてきた森林キャノピ・模型を用いた実験では、 z 方向に対する流れの構造がはっきりしていないため、本実験では z 方向を主に計測した。

4.4.1 平均風速 u

模型下流の平均風速 u/U_∞ の速度分布を以下に示す。

1) y 方向

(a) $x/H=0.5$ $z/D=11$ (樹幹下流)

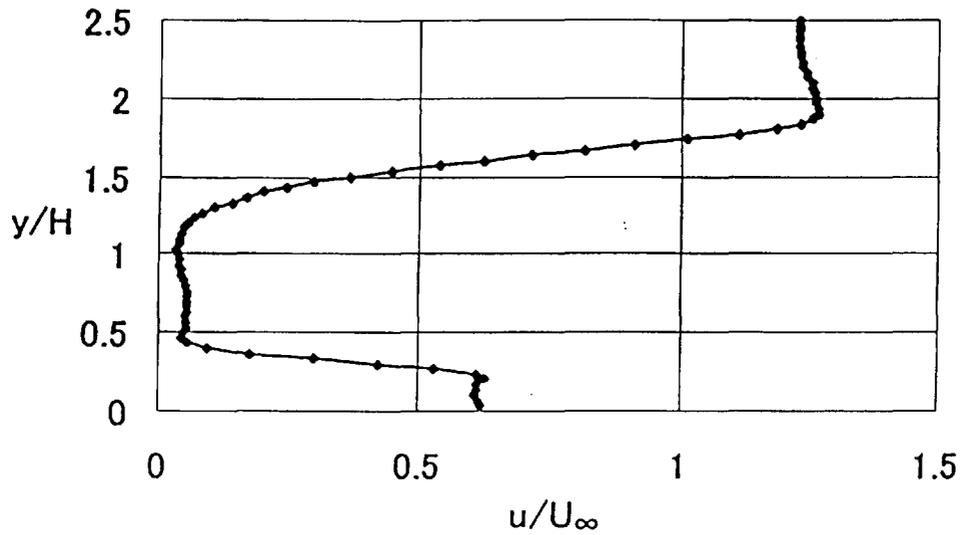
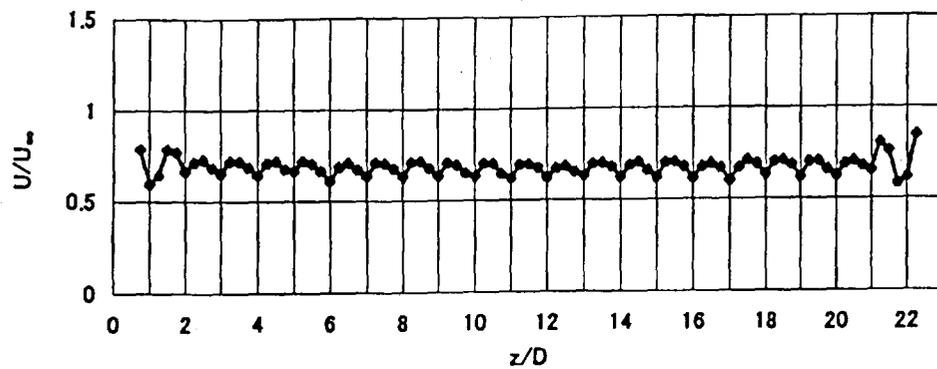


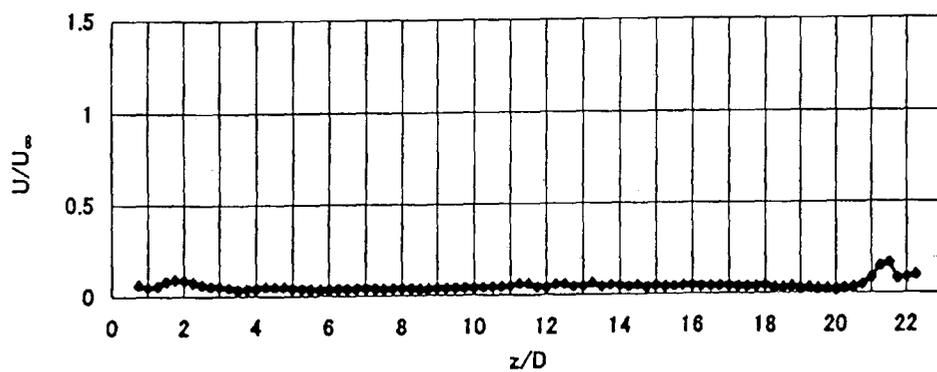
図 4.3.1 模型後流の y 方向の速度分布

2) z 方向

(a) $x/H=0.5$ $y/H=0.15$



(b) $x/H=0.5$ $y/H=0.67$



(c) $x/H=0.5$ $y/H=1.1$

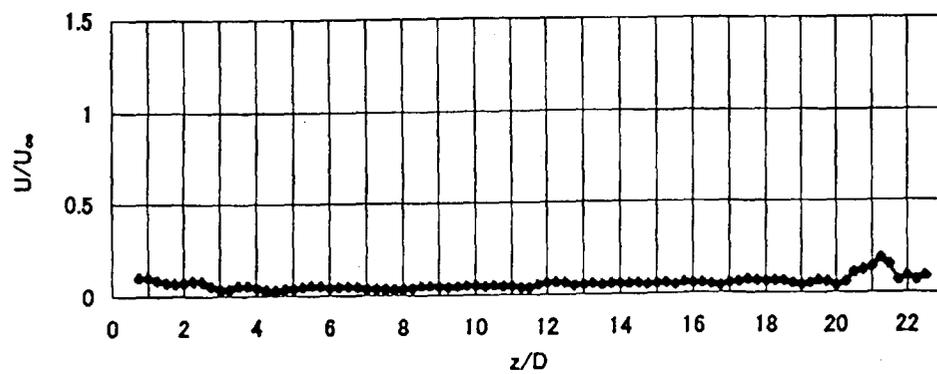
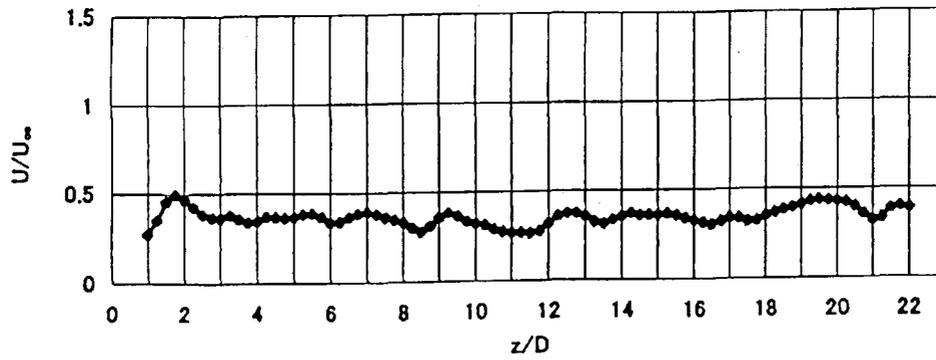
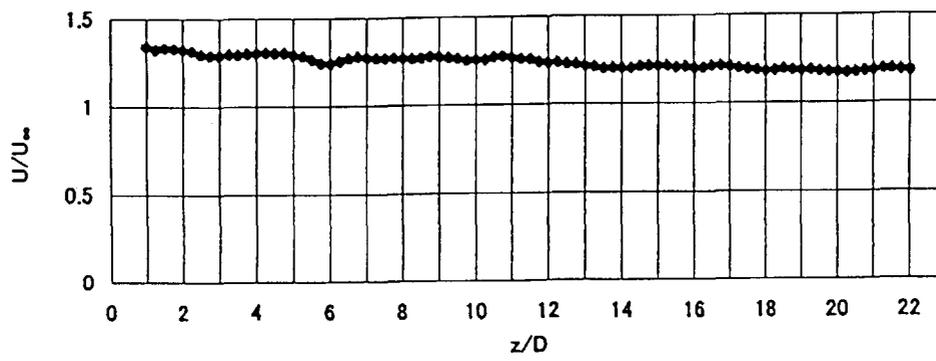


図 4.3.2 模型後流の z 方向の速度分布

(d) $x/D=0.5$ $y/H=1.43$



(e) $x/D=0.5$ $y/H=1.9$



(f) $x/D=0.5$ $y/H=2.4$

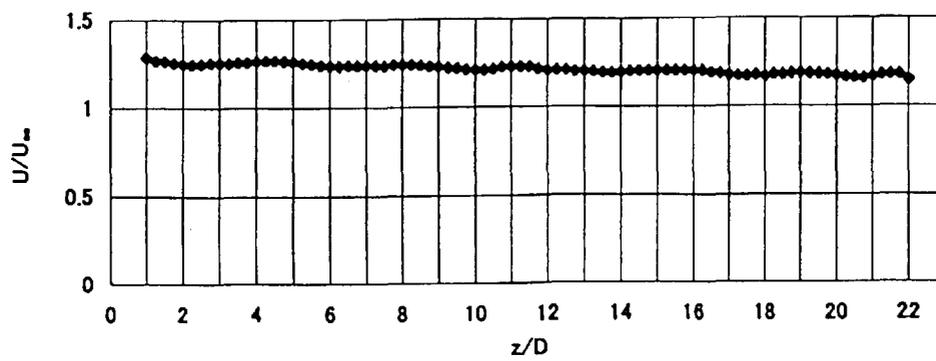


図 4.3.2 模型後流の z 方向の速度分布

図 4.3.1 と図 4.3.2 を比較すると、平均速度は各高さでほぼ一致している。その中で樹幹部後流を示す図 4.3.2(a)は、昨年の実験データと同様に樹木間隔と同じ周期性がみられた。また、樹冠部後流では、昨年のデータでは樹木間隔と同じ周期性が現れているが、本実験では図 4.3.2(b),(c)に示すように周期性はなく、風速が大きく弱められている。これは、今回の樹木個体模型の葉面積指数が昨年よりも大きくなり、風の低減効果が高くなったためと思われる。図 4.3.2(d)では z 方向に対して樹木間隔よりも大きいスケールで変化しているのが分かる。しかし、図 4.3.2(E),(f)から分かるように、この変化はせん断層のほぼ境にあたる $y/H=1.9$ 付近から上で再び一様流に近づいている。

4.4.2 乱れ強度

1) y 方向

(a) $x/H=0.5$ $z/D=11$

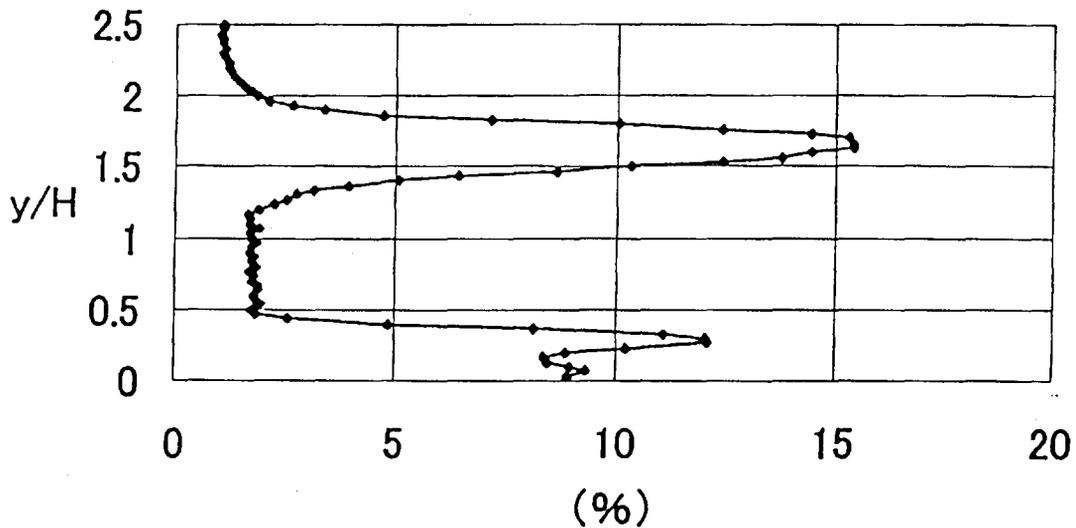
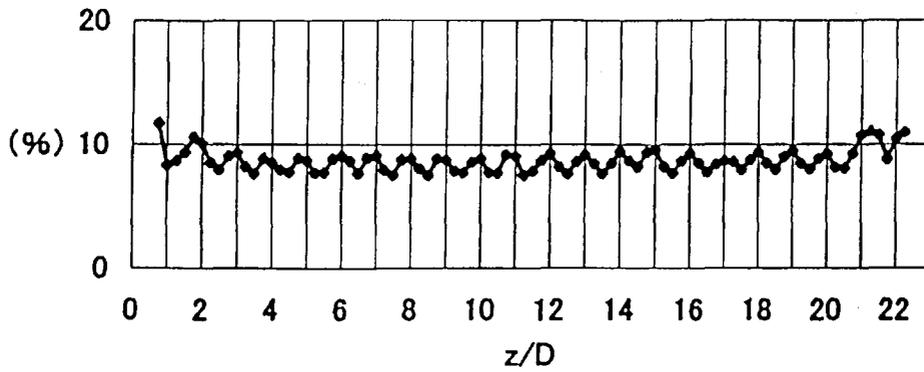


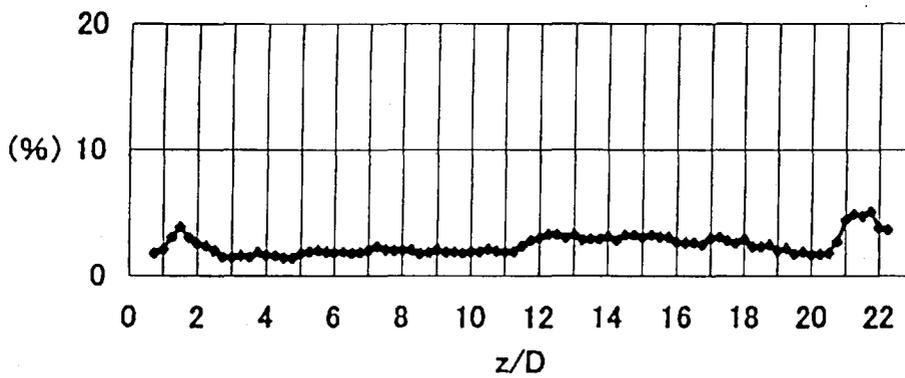
図 4.3.3 模型後流の y 方向の乱れ度の分布

2) z 方向

(a) $x/H=0.5$ $y/H=0.15$



(b) $x/H=0.5$ $y/H=0.67$



(c) $x/H=0.5$ $y/H=1.1$

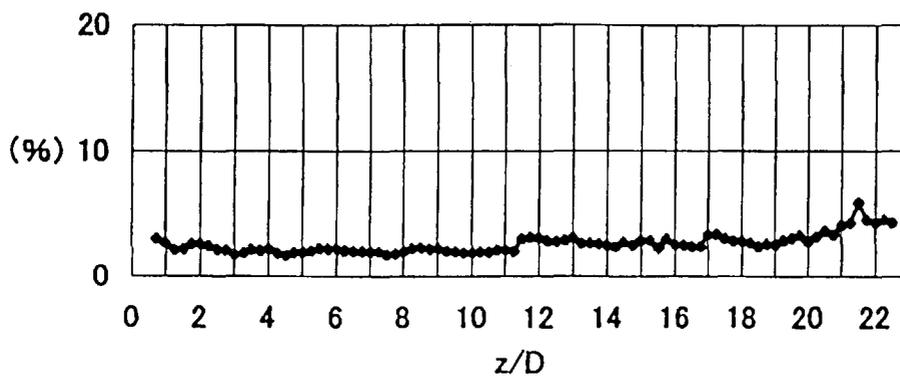
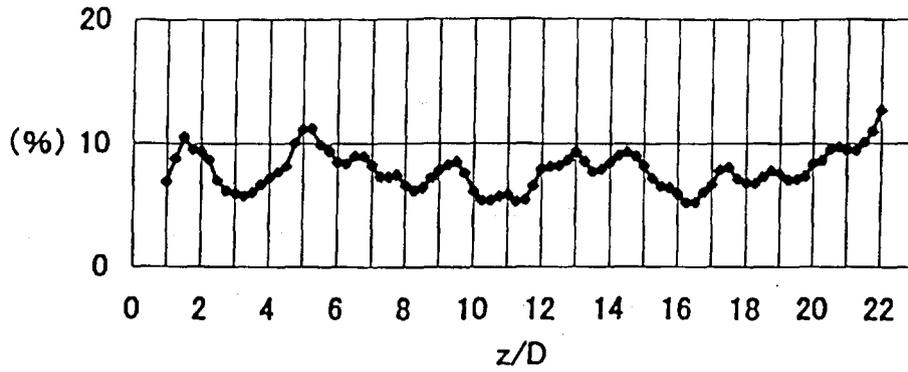
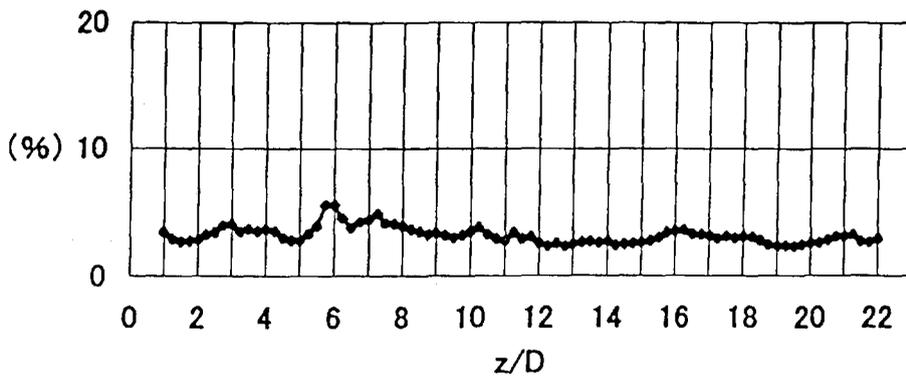


図 4.3.4 模型後流の z 方向の乱れ強度の分布

(d) $x/H=0.5$ $y/H=1.43$



(e) $x/H=0.5$ $y/H=1.9$



(f) $x/H=0.5$ $y/H=2.4$

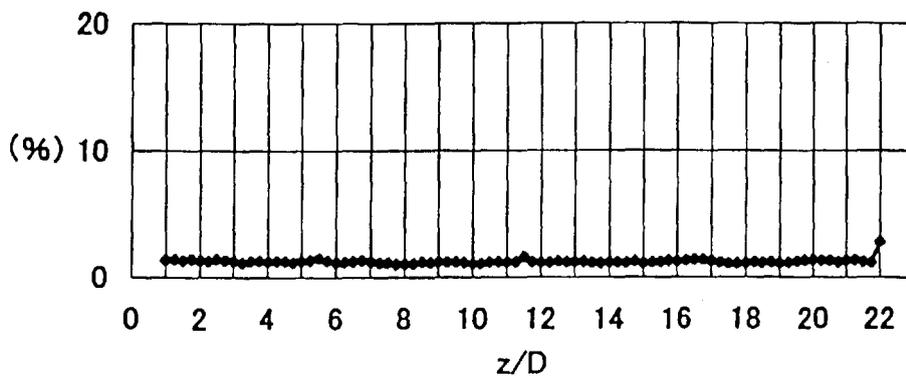


図 4.3.4 模型後流の z 方向の乱れ強度

図 4.3.3 と図 4.3.4 を比較すると、乱れ強度は各高さでほぼ一致している。樹幹部後流を示す図 4.3.4(a)は、昨年の実験データと同様に樹木間隔と同じ周期性がみられた。また、樹冠部後流では、昨年のデータでは樹木間隔と同じ周期性が現れているが、本実験では図 4.3.4(b),(c)に示すように周期性はない。図 4.3.4(d)では z 方向に対して樹木間隔よりも大きいスケールで変化しているのが分かる。しかし、図 4.3.4(e),(f)から分かるように、この変化はせん断層のほぼ境にあたる $y/H = 1.9$ 付近から上で小さくなっている。

これらのことから、平均風速と乱れ強度の測定結果を総合して比較検討してみると、図 4.3.1 で示されているせん断層の範囲内($y/H = 1.1 \sim 1.9$)には、ある程度の周期性を持った三次元乱れ構造があると予想される。このことを明確にするためには、より多くのせん断層内のデータが必要である。そのためには、本実験で使用した I 型プローブではなく X 型プローブなど用いて三次元的な測定が必要である。

本実験と平成 9 年度における研究結果⁽³⁾を総合的に比較すると、同一条件での実験では平均風速、乱れ強度の分布ともに形状は同じである。本実験で用いた模型の樹冠部は、穴をあけた平面を組み合わせた極めてシンプルなものであったが、9 列並べた場合には、樹木模型の個体形状は流れに影響を与えていない。今後、樹木の列数や葉面積指数を変えて実験し、模型の単体形状が流れに与える影響を詳しく測定する必要がある。

5. まとめ

今年度から新しく設置された乱流風洞実験室を使用し、森林キャノピー模型は、今までで最大ののサイズに製作しなおして、すべて新しい実験施設で計測を行ってきた。以下に得られた結果と今後の課題を示す。

- (1) 模型後流のせん断層内には、強い三次元構造があることが分かった。
- (2) 本実験で用いた模型は、9 列並べた場合その個体形状は流れに影響を与えない。今後、列数や、葉面積指数を変えてさらに模型の特性を調べる必要がある。
- (3) 模型後流の乱れの構造の解明には、I 型プローブではなく X 型プローブを用いて 3 次元的に測定することが今後必要である。

参考文献

- (1) 荒木 真之, 森林気象, 川島書店, 1995.
- (2) 山下, 平野, 菊地, 森林キャノピー模型を通過気流の速度場の測定, 宮崎大学工学部紀要, 26, (1997), 169.
- (3) 平野, 菊地, 森林キャノピー模型下流域における流れ方向速度の三次元分布構造, 宮崎大学工学部紀要, 28, (1999).

第3部

森林キャノピーを過ぎる流れの 数値シミュレーション

1. はじめに

リゾート開発や、湾岸整備などによる海岸林の伐採が活発に行われており、近隣地域における環境への影響が問題となっている。海岸林の機能として、海風に対する防風機能、風によって海から運ばれてくる塩分に対する防塩機能、津波や高潮等による被害を軽減させる防潮機能などがあげられる。

林帯は風に対して障害物となるため、風の運動量を奪い、林帯の風蔭となった場所の風速が弱められる。特に、海岸地域は、常に海からの風にさらされているため、海岸林の防風効果は日常生活において経験的には良く知られている。しかし、海岸林の防風機能についての工学的な研究はそれほど多くはなされておらず、農学の立場からの研究も少ない。従って海岸林の伐採による後背地の環境への影響について予測する事は、極めて困難である。

海岸林は、一般に接地気層 (surface boundary layer あるいは surface layer) 中に存在している。接地気層内でも特に、森林や高層建築物などが存在する空間は森林キャノピー、都市キャノピー等と呼ばれ、大気に対し特有の働きをする。

森林キャノピーもしくは植生キャノピー周りの流れ、すなわちキャノピー流を取り扱った研究としては、風洞実験による研究や、 $k-\varepsilon$ モデルを用いた植生層上の流れ場の乱流構造の研究⁽¹⁾、LES (Large Eddy Simulation) モデルを用いた流れ-植生間の相互作用についての数値計算による研究⁽²⁾などがあげられる。これまでの研究の多くは、以上のような直立性植生キャノピー周りの流れ場に関する研究であり、植生そのものの振動を扱った研究はそれ程多くは行われていない。また、植生の振動を扱った研究の多くは、穂波を扱った研究や、水草などの比較的背の低い植物に関する研究、あるいは一つの樹木个体についてたわみや振動などを考慮した研究⁽³⁾などであり、樹林帯の大きな振動を取り扱ったものも、流れ場と植生の相互作用を考慮したものも数少ない。

本研究では、実際の松林の調査から得られたデータを基礎とし、樹冠部が流れにより振動する森林キャノピーモデルを考え、海岸林の伐採の影響が後背地に与える影響を数値解析を用いて分析した。

Navier-Stokes 方程式に植生からの抗力項を加えた式を差分法により離散化し、SMAC 法を用いて時間発展させた。SMAC 法における修正子を求めるための Poisson 方程式の解法には ICCG 法を用いた。樹冠部の枝葉は質点粒子として取り扱い、隣り合う質点同志はバネとダンパーにより連結されたモデルが適用されている。また、質点粒子の位置と速度の評価には、Velocity Verlet アルゴリズムを用いた。樹幹部は円柱群としてモデル化されている。

時間平均速度、乱れ強度、レイノルズ応力の各物性を計算し、本研究室で行われてきた風洞実験による森林キャノピー周りの流れ場の研究⁽⁴⁾の実験結果との比較検討を行った。

2. 問題の定式化

2.1 流れ場の支配方程式

十分に広い空間内に、高さ H 、主流方向長さ W の、流れにより樹冠部が振動する森林モ

デルを配置し，上流から一様流を与えた場合の森林キャノピー周りの流れを解析する．
Fig. 2-1 に解析モデルの概略図を示す．

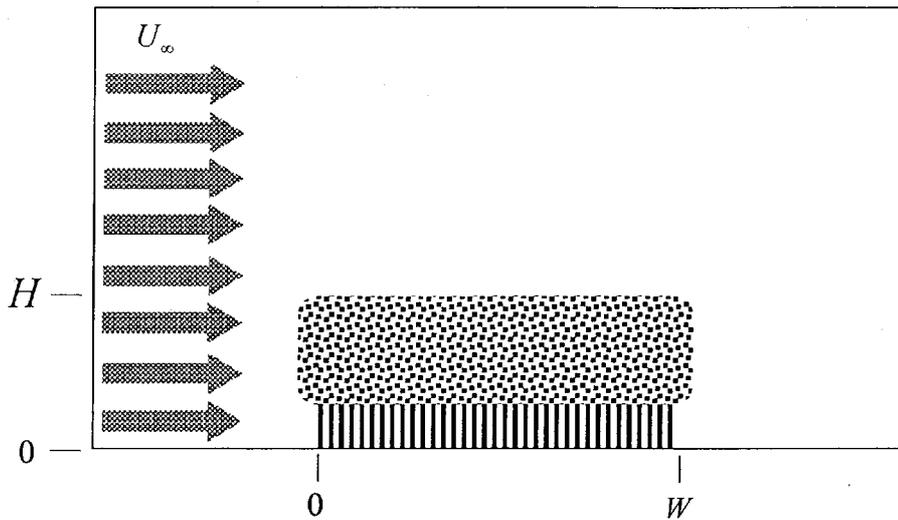


Fig.2-1 Canopy model

流れ場の支配方程式は，植生からの抗力の項が加えられた Navier-Stokes 方程式と連続の式である．樹冠内部における枝葉の運動の支配方程式として，流体から受ける力を外力とする強制振動の式が導入され，枝葉の揺れが再現されている．

式 (2.1)，(2.2) における外力項 F_d ， F_l は Canopy の存在の有無により定義式が異なる．それぞれの場については以下にその定義を述べる．

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + F_d \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + F_l \quad (2.2)$$

(1) Canopy が存在しない領域の Navier-Stokes 方程式

Canopy の影響を受けない流れ場における Navier-Stokes 方程式は，式 (2.1)，(2.2) の外力項 F_d 及び F_l をゼロと置いたものである．

$$F_d = 0 \quad (2.3)$$

$$F_l = 0 \quad (2.4)$$

(2) 樹冠部が存在する領域の Navier-Stokes 方程式

樹冠部が存在する領域における Navier-Stokes 方程式は，式 (2.1)，(2.2) の外力項 F_d

及び F_l を, それぞれ式 (2.5), (2.5) と置いたものである. なお, 式 (2.5), (2.6) は, 流体が樹冠部に与える力の反力である. ここで用いられている b は葉面積密度⁽⁵⁾を表し, A はCanopyの投影面積を表す.

$$F_d = -\frac{1}{2}C_{dc}|u-u_c|(u-u_c)bA \quad (2.5)$$

$$F_l = -\frac{1}{2}C_{lc}|v-v_c|(v-v_c)bA \quad (2.6)$$

(3)樹幹部が存在する領域の Navier-Stokes 方程式

樹幹部の存在する領域における Navier-Stokes 方程式は式 (2.1), (2.2) の外力項 F_d 及び F_l を, それぞれ式 (2.7), (2.8) と置いたものである. なお, 式 (2.7), (2.8) は, 流体が樹幹部に与える力の反力である. ここで用いられている n は, 実際の松林の調査結果より導き出された, 単位面積当たりの樹木の固体数である.

$$F_d = -\frac{1}{2}C_{dt}n|u-u_c|(u-u_c)\Delta x \Delta y \quad (2.7)$$

$$F_l = -\frac{1}{2}C_{lt}n|v-v_c|(v-v_c)\Delta x \Delta y \quad (2.8)$$

2.2 初期条件

(i)流れ場の初期条件

流れの場における初期条件として, 領域全体に一様流を与え, 壁面上においては, すべり無しの条件が与えられている.

(ii)Canopy内の質点の初期条件

樹冠部の質点は, 実際の樹木の枝葉のようなランダムな分布を再現するために, 正規乱数により, 格子上からずらして配置される.

2.3 境界条件

境界条件は次のように与えられる.

(1)流入境界

無限上流の速度として代表速度 U_w の一様流が与えられる. よって上流での境界条件は, $u=1$ となり, 境界に平行な速度成分は $v=0$ となる.

$$A \leq y \leq D, \quad : \quad u' = 1, \quad v' = 0, \quad \phi = 0, \quad p = 0$$

(2)流出境界

下流における速度の境界条件として, 流れ方向に速度の変化が無いとする以下の境界条件を用いる. また, 速度ポテンシャル, 圧力ともに流れ方向に変化しないので以下の条件となる.

$$B \leq y \leq C, \quad : \quad \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial n} = 0$$

(3) 壁面境界

固体壁面上では流れが静止しているのが、主流方向速度 u ，鉛直方向 v ともに 0 である。

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = v = 0 \text{ より, } \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0, \text{ よって式 (3.19) より } \frac{\partial p}{\partial n} = 0 \text{ となる.}$$

$$A \leq x \leq B, \quad : \quad u = 0, \quad v = 0, \quad \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial n} = 0$$

(4) 流出境界

境界条件として、速度が境界の法線方向に変化しないと言う条件を与える。さらに速度ポテンシャル、圧力ともに法線方向に変化が無いとして、以下のような条件を与える。

$$C \leq x \leq D, \quad : \quad \frac{\partial u}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial n} = 0$$

Fig. 2-2 に計算領域の境界を示す。

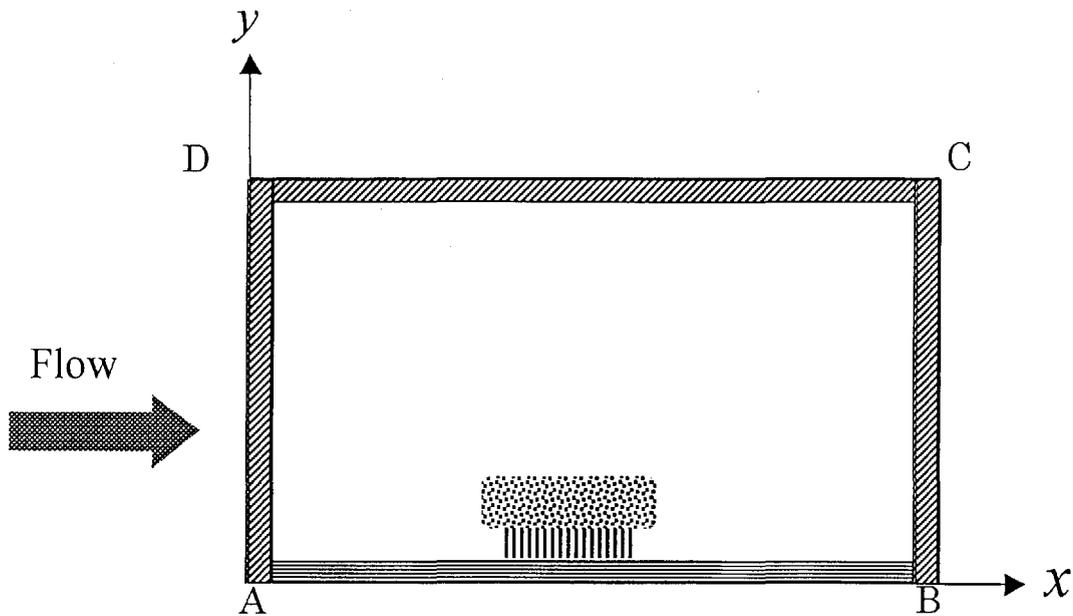


Fig.2-2 Boundary

2.4 森林キャノピーのモデル化

近年行われている森林キャノピー周りの流れの解析の多くは、植生自体を剛体とみなし、その周りの流れの変化を取り扱ったもの⁽²⁾、もしくは植生単体の変形を考慮し、流れ場への影響を解析したもの⁽³⁾である。

本解析では、流体からの影響により、樹冠部分の枝葉が実際の植生の様に自由な運動をする森林キャノピーを以下のようにモデル化した。

(1) 樹冠部分のモデル化

樹冠部分は、実際の枝葉のようにある程度制限された範囲内で自由に運動する様子を表現するため、樹木の枝葉を質点粒子として取り扱い、隣り合う質点同志はバネとダンパーで連結されたモデルが適用されている。

葉面積密度⁽⁶⁾を適用した抗力の計算式{(2.9), (2.10) 右辺}より求められる力を、流体からの外力とし、この外力が加えられる事により、強制振動を行うように設定されている。また、質点の運動を表すアルゴリズムとして分子動力学アルゴリズムの一つである Velocity Verlet アルゴリズムを採用し⁽¹⁰⁾、粒子の運動を評価した。

なお、本解析では、枝葉が占める空間により流れが排除される効果は考慮されておらず、枝葉の分布は葉面積密度によってのみ表現されている。よって、枝葉が茂っている状態とそうでない状態は、葉面積密度の設定によって表現される。

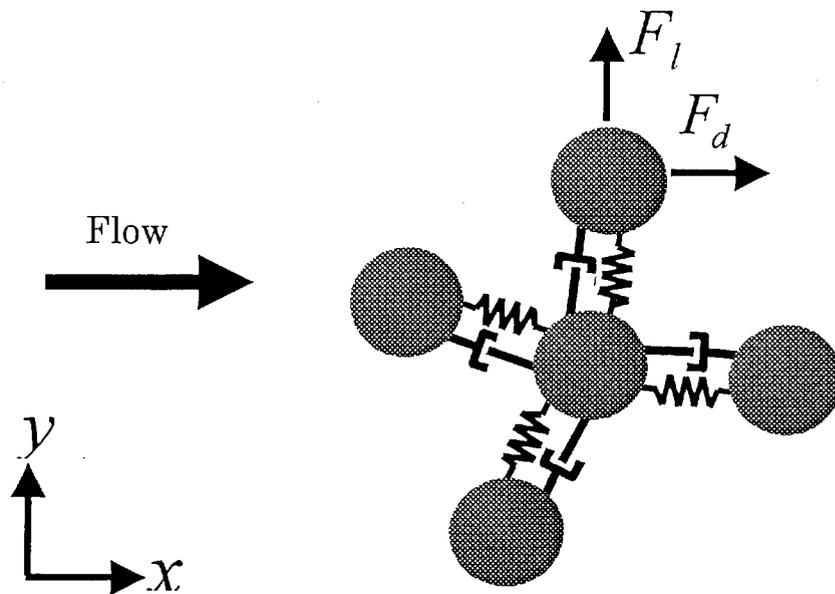


Fig.2-3 Concept of modeled leaves

(2) 樹冠内部の枝葉の運動方程式

樹冠内部の枝葉の運動は、式 (2.9), (2.10) に示す運動方程式により表現されている。式 (2.9), (2.10) において左辺はバネとダンピングの効果と考えた振動を表しており、右辺に流体からの外力を導入し強制振動するよう設定されている。

ここに用いた減衰係数 c 、バネ定数 k は、実際のマツ林の観測から得られたデータを元に設定されている。また、樹木が風を受け振動する際、樹冠部分の傾きに伴い樹冠部分の投影面積も刻々と変化する事を考慮し、葉面積密度 b が時間と共に変化するよう設定されている。

$$m_c \frac{d^2 x_c}{dt^2} + c \frac{dx_c}{dt} + kx_c = \frac{1}{2} C_{dc} \rho |u - u_c| (u - u_c) bA \quad (2.9)$$

$$m_c \frac{d^2 y_c}{dt^2} + c \frac{dy_c}{dt} + ky_c = \frac{1}{2} C_{lc} \rho |v - v_c| (v - v_c) bA \quad (2.10)$$

(3) 樹幹部分のモデル化

樹幹部分は、直立した円柱群としてモデル化されており、樹幹部に働く抗力を表す式として円柱に働く抗力の式 (2.11), (2.12) が適用されている。なお、本解析においては、樹幹部分の振動やたわみは無視されている。

キャノピーモデル中の単位面積当たりの円柱の数 n_c は「宮崎一ツ葉地区マツ林標準地調査結果」⁽⁶⁾を元に設定された。

なお、本解析は流れの場の解析を二次元で解析したものであり、奥行きは存在しないため、奥行き方向の長さは、全て1としてパラメーターが設定されている。

$$D = \frac{1}{2} n_c C_{dt} \rho |u - u_c| (u - u_c) \Delta x \Delta y \quad (2.11)$$

$$L = \frac{1}{2} n_c C_{lt} \rho |v - v_c| (v - v_c) \Delta x \Delta y \quad (2.12)$$

(4) 森林キャノピーのモデルパターン

森林キャノピーのモデルパターンは、本研究室で行われた実験との比較を考慮して、設定された。モデルの全長は実験モデルと同じく、 x 方向に $0 \sim 2.8H$ と設定されている。樹冠部分の厚さは、次の2パターンが設定されている。

①パターン1

枝葉が樹木の上部に位置する樹木個体により形成される森林を再現するために、樹冠部分の薄いモデルが設定された。樹冠部の厚さは y 方向に $0.8H \sim H$ と設定されている。

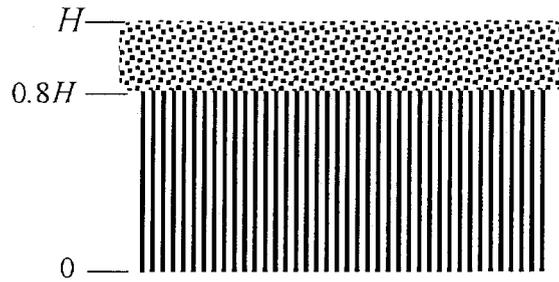


Fig.2-2 model pattern 1

②パターン2

大部分を枝葉で覆われている樹木個体により形成される森林を再現するために、樹冠部分の厚いモデルが設定された。

樹冠部分の厚さは y 方向に $0.3H \sim H$ と設定されている。

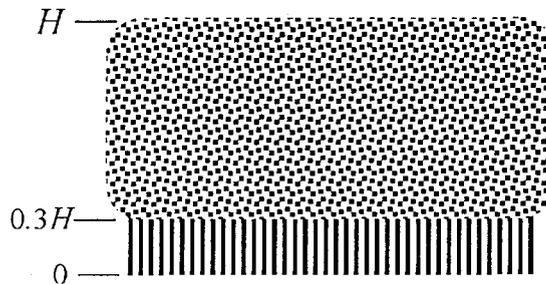


Fig.2-3 model pattern 2

なお、樹冠部は流体の影響を受け、初期位置の周りを、バネとダンパーの拘束を受けながら自由に運動するため樹幹部との境界は時々刻々変化する。

2.5 支配方程式の無次元化

2.1 節で定義した支配方程式を、以下のように無次元化する。以後、無次元量は、'を付けて表記する。

$$\text{距離} \quad x' = \frac{x}{H}, \quad y' = \frac{y}{H}$$

$$\text{流体の速度} \quad u' = \frac{u}{U_\infty}, \quad v' = \frac{v}{U_\infty}$$

$$\text{キャノピーの移動速度} \quad u'_c = \frac{u_c}{U_\infty}, \quad v'_c = \frac{v_c}{U_\infty}$$

$$\text{時間} \quad t' = \frac{U_\infty}{H} t,$$

$$\text{圧力 } P' = \frac{P}{\rho U_\infty^2}$$

$$\text{葉面積密度 } b' = Hb$$

$$\text{キャノピーの断面積 } A' = H^2 A,$$

$$\text{キャノピーの質量 } m_c' = \frac{m'}{M}$$

$$\text{バネ定数 } k' = \frac{H^2}{MU_\infty^2} k,$$

$$\text{減衰係数 } c' = \frac{H}{MU_\infty} c$$

式 (2.1), (2.2) を無次元化すると式 (2.13), (2.14) となる.

$$\frac{\partial u'}{\partial t'} + u' \frac{\partial u'}{\partial x'} + v' \frac{\partial u'}{\partial y'} = -\frac{\partial P'}{\partial x'} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 u'}{\partial y'^2} \right) + F_d' \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial v'}{\partial t'} + u' \frac{\partial v'}{\partial x'} + v' \frac{\partial v'}{\partial y'} = -\frac{\partial P'}{\partial y'} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 v'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 v'}{\partial y'^2} \right) + F_l' \quad (2.14)$$

(1) Canopy が存在しない領域の無次元化された Navier-Stokes 方程式
式 (2.13), (2.14) の外力項をゼロと置く.

$$F_d' = 0 \quad (2.15)$$

$$F_l' = 0 \quad (2.16)$$

(2) 樹冠部が存在する領域の無次元化された Navier-Stokes 方程式

式 (2.5), (2.6) を無次元化すると式 (2.17), (2.18) となる. これらを外力項として式 (2.13), (2.14) に代入する.

$$F_d' = -\frac{1}{2} C_{dc} \left| u' - u_c' \right| \left(u' - u_c' \right) b' A' \quad (2.17)$$

$$F_l' = -\frac{1}{2} C_{lc} \left| v' - v_c' \right| \left(v' - v_c' \right) b' A' \quad (2.18)$$

(3) 樹幹部が存在する領域の無次元化された Navier-Stokes 方程式

式 (2.7), (2.8) を無次元化すると式 (2.24), (2.25) となる. これらを外力項として式 (2.11), (2.12) に代入する.

$$F_d' = -\frac{1}{2} C_{dt} \left| u' - u_c' \right| (u' - u_c') x' y' \quad (2.19)$$

$$F_l' = -\frac{1}{2} C_{lt} \left| v' - v_c' \right| (v' - v_c') x' y' \quad (2.20)$$

(4) 無次元化された樹冠内部の枝葉の運動方程式

式 (2.9), (2.10) を無次元化すると式 (2.21), (2.22) となる.

$$\frac{d^2 x_c'}{dt'^2} + c' \frac{dx_c'}{dt'} + k' x' = \frac{1}{2} C_{dc} \frac{\rho}{\rho_c} \left| u' - u_c' \right| (u' - u_c') b' \quad (2.21)$$

$$\frac{d^2 y_c'}{dt'^2} + c' \frac{dy_c'}{dt'} + k' y' = \frac{1}{2} C_{lc} \frac{\rho}{\rho_c} \left| v' - v_c' \right| (v' - v_c') b' \quad (2.22)$$

以下において, 全ての数式は, 無次元化されているものとし, ' は省略して表記される.

3. 差分法による流れの解析

3.1 格子分割

本解析では、流れの場の解析領域に等間隔の二次元直行座標が用いられている。格子幅は Canopy の高さ H の $1/20$ 、すなわち $\Delta x = 0.05$ 、 $\Delta y = 0.05$ と設定されている。Canopy 部分の主流方向長さは、等研究室において行われた実験結果との比較の為、実験に用いたモデルと同じく樹木の高さの 2.8 倍の $2.8H$ に設定されている。樹冠部の格子は、樹木の揺れを再現するため、流れの場の格子幅に対して 2 倍に取られており強風時の樹冠部分の大きな揺れを再現する事が可能となっている。

上流の流入境界は、Canopy 前縁から、 $-7H$ の位置に設定された。また、下流の流出境界は、Canopy 後縁から、 $10H$ の位置に設定された。更に、Canopy 上方の境界は、Canopy 上縁から $9H$ の位置に設定された。Fig.3-1 に計算領域の概略図を示す。

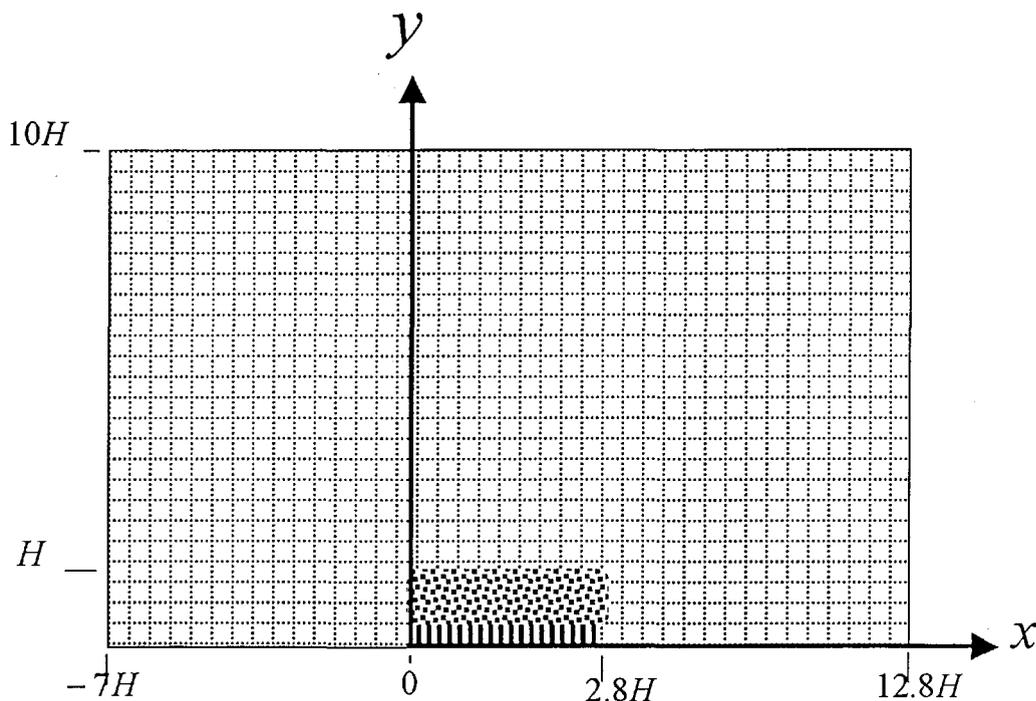


Fig.3-1 Calculation region

3.2 移流項の離散化

Navier-Stokes 方程式中の移流項の離散化には、三次精度の風上差分が用いられた。Fig.3-2 の記号を用いて、1 階微分は次式で表現される。

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_i = \begin{cases} \frac{l^2 m^2 (l+m) u_{i-2} - m^2 (k+l)^2 (k+l+m) u_{i-1}}{klm(k+l)(l+m)(k+l+m)} \\ + \frac{k(l+m)\{m^2(k+2l) + (k+l)(m-l)\}u_i + kl^2(k+l)^2 u_{i+1}}{klm(k+l)(l+m)(k+l+m)} & u > 0 \\ -\frac{l^2 m^2 (l+m) u_{i+2} + l^2 (m+n)^2 (l+m+n) u_{i+1}}{lmn(l+m)(m+n)(l+m+n)} \\ + \frac{-n(l+m)\{(m+n)^2(l-m) + l^2(2m+n)\}u_i - m^2 n(m+n)^2 u_{i-1}}{lmn(l+m)(m+n)(l+m+n)} & u < 0 \end{cases}$$

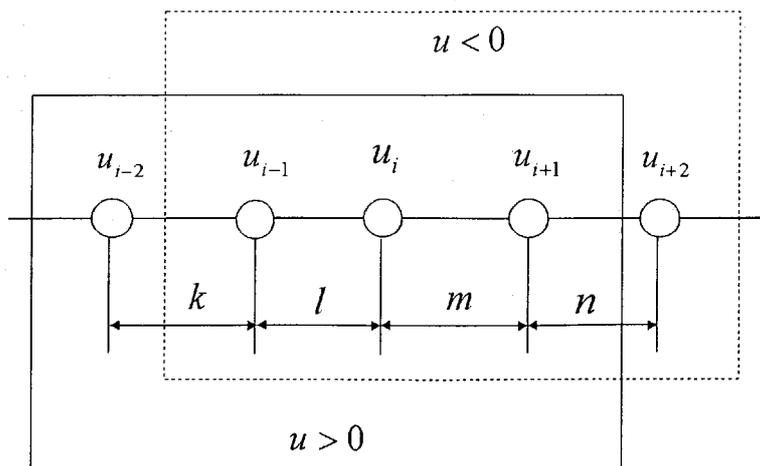


Fig.3-2 up-stream difference scheme

3.3 拡散項の離散化

Navier-Stokes 方程式中の拡散項の離散化には二次精度の中心差分が用いられた。拡散項の二次導関数を、Fig.3-2 の記号を用いて次式に示す。

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_i = 2 \times \frac{l u_{i+1} - (l+m) u_i + m u_{i-1}}{lm(l+m)}$$

3.4 圧力項の離散化

セルを囲む 4 点での圧力の平均値を、下図に示すように P_1, P_2, P_3, P_4 と置き、それらの値を用いて Staggered 格子に \tilde{P} を設置し、圧力の離散化を行った。次式に離散化された圧力項を、また、格子点と圧力の関係図を Fig.3-3 に示す。

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \left\{ \frac{a_1}{a_2(a_1 + a_2)} \right\} \tilde{p}_1 - \left(\frac{a_1 - a_2}{a_1 \cdot a_2} \right) p_{i,j} - \left\{ \frac{a_2}{a_1(a_1 + a_2)} \right\} \tilde{p}_3$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \left\{ \frac{b_1}{b_2(b_1 + b_2)} \right\} \tilde{p}_2 - \left(\frac{b_1 - b_2}{b_1 \cdot b_2} \right) p_{i,j} - \left\{ \frac{b_2}{b_1(b_1 + b_2)} \right\} \tilde{p}_4$$

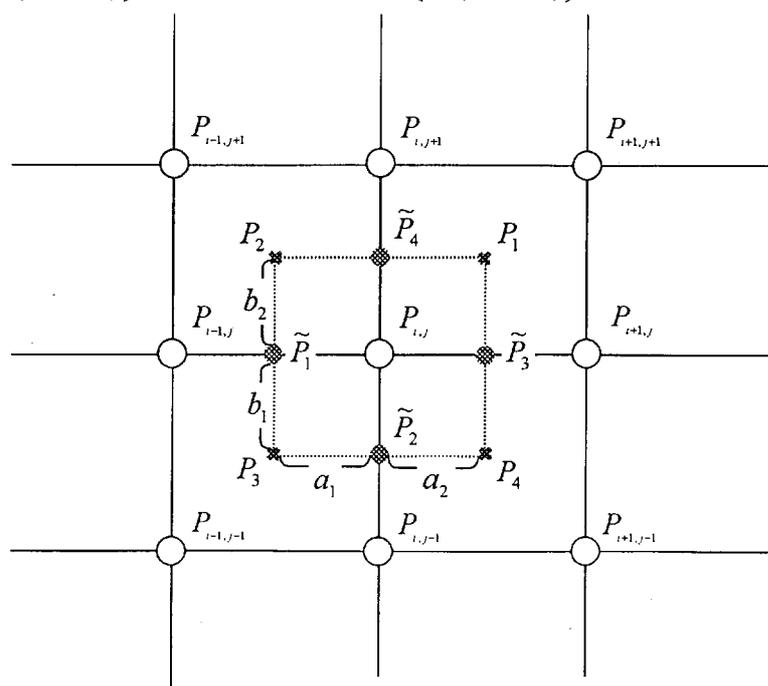


Fig.3-3 staggered mesh

3.5 時間進行法

(1)速度場と樹冠要素の運動のリンク

Canopy の樹冠部分は、ランダムな運動をする質点粒子としてモデル化されているため、その位置は時間によって絶えず変化している。従って樹冠要素の格子は流れ場の格子と一致しないので補間によって速度場と樹冠要素の運動のリンクを行った。Fig.3-4, Fig.3-5 に説明図を示す。なお Fig.3-4, Fig.3-5 中の白丸は流れ場の格子であり、緑色の丸は質点粒子を表している。

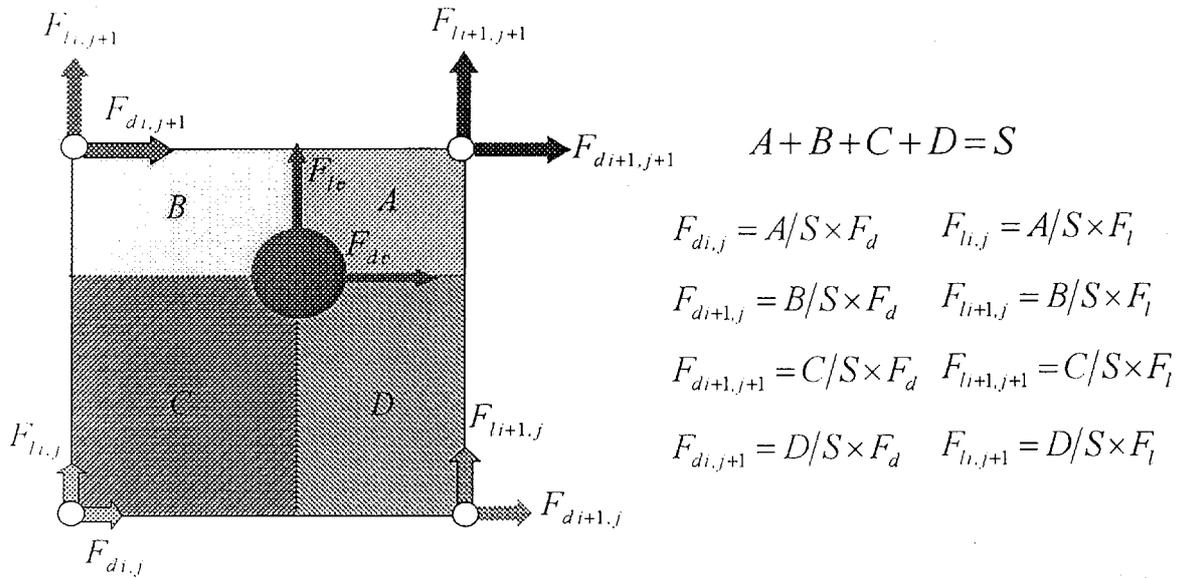


Fig.3-4 interpolation of fluid force

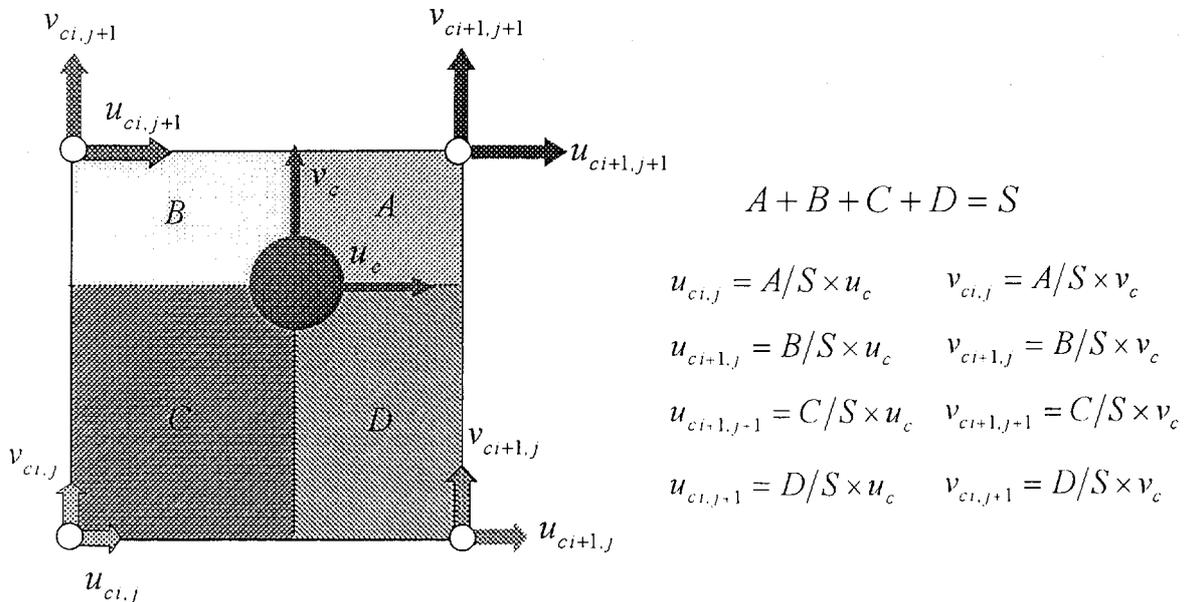


Fig.3-5 interpolation of velocity

(2)流れ場の時間進行法

流れ場の時間進行は、SMAC法 (Simplified MAC method) に基づき行われた。

具体的な計算方法を以下に示す。

1 予測子の計算

現時刻での速度 u^n , v^n と圧力 p^n から Navier-Stokes 方程式を陽的に時間発展させ、予測子 \tilde{u} , \tilde{v} を、次式のように求める。

$$\begin{aligned}\tilde{u} &= u^n + dt \left\{ - \left(u^n \frac{\partial u^n}{\partial x} + v \frac{\partial u^n}{\partial y} \right) - \frac{\partial P^n}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u^n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^n}{\partial y^2} \right) + F_d \right\} \\ \tilde{v} &= v^n + dt \left\{ - \left(u^n \frac{\partial v^n}{\partial x} + v \frac{\partial v^n}{\partial y} \right) - \frac{\partial P^n}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 v^n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^n}{\partial y^2} \right) + F_l \right\}\end{aligned}$$

②修正子の導入

予測子 \tilde{u} , \tilde{v} の流れ場は、連続の式を満たさないため、修正子としてスカラーポテンシャル ϕ を導入し、次のタイムステップでの速度を次のように表す。

$$u^{n+1} = \tilde{u} + \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad v^{n+1} = \tilde{v} + \frac{\partial \phi}{\partial y}$$

③ポアソン方程式

($n+1$)ステップにおける速度場が連続の式を満たすようにするために、スカラーポテンシャル ϕ は次式のポアソン方程式を満足する必要がある。

$$\nabla^2 \phi = - \left(\frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{v}}{\partial y} \right)$$

このポアソン方程式を解いて ϕ を求めることにより、タイムステップ ($n+1$) での速度が求められる。

④圧力と修正子の計算方法

次のタイムステップでの圧力場は、次式で求められる。

$$p^{n+1} = p^n - \frac{\phi}{\Delta t}$$

(3)樹冠要素の運動の時間進行法

樹冠要素を表す質点粒子の運動の解析には、分子運動アルゴリズムのひとつである Velocity Verlet アルゴリズムが用いられた。Velocity Verlet アルゴリズムは粒子の速度と位置を同じ時間ステップで評価するため、粒子の運動を速度と別個に求めていくアルゴリズムで生じる桁落ちと言う問題が生じないという利点がある⁽¹⁰⁾。なお、このアルゴリズムの誤差のオーダーは、位置、速度ともに $O(\Delta t^3)$ である。

粒子の位置 x_i^{n+1} と速度 u_i^{n+1} は、次式から求められる。

$$\begin{aligned}x_{ci}^{n+1} &= x_{ci}^{n+1} + (\Delta t)u_{ci}^n + \frac{(\Delta t)^2}{2m} f_i^n + O(\Delta t^3) \\ u_{ci}^{n+1} &= u_{ci}^n + \frac{(\Delta t)^2}{2m} \frac{\Delta f_i^n}{\Delta t}\end{aligned}$$

3.6 ポアソン方程式の解法

大次元の連立一次方程式を解く場合、その係数行列の形は、大部分が 0 である疎行列である。しかも、疎行列の場合、0 でない成分は、その行列の対角線上と、対角線近くに分布しているいわゆる帯行列がほとんどである。次元数の小さい密行列を係数に持つ連立一次方程式ならば、すべての行列成分を計算機のメモリにストアし、ガウスの消去法をそのまま適用し解く事が可能であるが、次元数が大きくなればなるほどメモリと計算時間の両面での制約からこの方法は実用的でなくなる。

よって大次元の連立一次方程式を解く場合には、その係数行列の大部分が 0 であると言う特質を生かした解法を採用すべきであり、なるべくならば係数行列が変形を受けないような解法が望ましい。なぜなら、その場合、行列の非 0 成分のみをメモリに保存しておき、必要になる度毎に、その値を引き出すようにプログラムを組む事が可能になるからである。

本解析において解くべき連立一次方程式における係数行列は、対角成分と平行な 4 本の線上に非ゼロ成分が並んでいる大規模な 5 重対角行列であり、fill-in の発生する直接法ではなく、反復法を用いて解いた方が先に述べた理由からも有利である。

そこで、本解析ではポアソン方程式の解法に反復解法の一つである ICCG 法⁽⁷⁾ (Incomplete Cholesky decomposition Conjugate Gradient method) を用いた。

3.7 流れ場の物性量の計算方法

森林キャノピー周りにおける流れ場の乱れ構造を明らかにするため、解析によって得られたデータを元に時間平均流速、乱れ強度、レイノルズ応力の各物性量を求めた。これらの物性量と、当研究室において行われた風洞実験によって得られた結果とを比較することにより、解析結果の精度の検討を行った。それぞれの物性量は以下のように定義される。ここで、' は速度の変動成分を表し、 n は総タイムステップ数を表す。

① 時間平均流速

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n u, \quad \bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n v$$

② 乱れ強度

$$\sqrt{u'^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (u - \bar{u})^2}, \quad \sqrt{v'^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (v - \bar{v})^2}$$

③ レイノルズ応力

$$-\overline{u'v'} = -\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n uv + \bar{u}\bar{v}$$

以上の物性量は、代表速度 U_0 で無次元化されている。

4. 計算結果および考察

本章では、第3章に示した計算方法により得られた平均流速、乱れ強度、レイノルズ応力の各物性をグラフにまとめ森林キャノピー周りの乱れ構造を考察する。

4.1 パラメーターの設定

各パラメーターは、風速 20m/s の強風時を想定して設定されている。

(1)レイノルズ数

レイノルズ数は、乱流現象を取り扱う事を考慮し、空気の動粘性係数に変わり渦動粘性係数 ν_T を導入し設定された。大気境界層での渦動粘性係数は、通常 $10^{-1} \sim 10^2 \text{ m}^2/\text{s}$ のオーダーであり、空気の動粘度に比べかなり大きい。そのためレイノルズ数はかなり小さな値をとるが、実際の現象との相似性が多くの研究により確かめられている。なお、代表長さとしてマツ林調査⁽⁶⁾を参考にマツの平均樹高 7m が用いられている。本解析ではレイノルズ数として以下の値を用いた。

$$Re = \frac{U_\infty H}{\nu_T} = 1500$$

(2)葉面積密度

葉面積密度は、Numerical Simulation of Canopy Flows⁽⁵⁾の針葉樹に関するデータを参考に設定された。実験との比較を考慮して、葉面積密度は以下の高低二種類が設定された。無次元量は ' を付けて併記する。

$$b = 0.3 \text{ m}^2/\text{m}^3, \quad b' = 2.1$$

$$b = 0.6 \text{ m}^2/\text{m}^3, \quad b' = 4.2$$

本解析においては、枝葉の占める空間については考慮していないため、葉面積密度は、枝葉の分布を表す唯一のパラメーターであり、特に重要である。樹冠部分の枝葉の疎密の違いは、葉面積密度により設定されている。

(3)バネ定数および減衰係数の設定

バネ定数および減衰係数は、樹冠要素の質量を 0.2kg と想定し、樹冠要素の振動の周期を 0.5s と想定して設定されている。無次元量は ' を付けて併記する。

$$\text{バネ定数} : k = 32.0 \text{ N/m}, \quad k' = 19.0$$

$$\text{減衰係数} : c = 4.0 \text{ N} \cdot \text{s/m}, \quad c' = 7.0$$

(4)計算パラメーター

計算には以下のパラメーターを用いた。

$$\text{格子間隔} : \Delta x = 0.05, \quad \Delta y = 0.05$$

$$\text{時間刻み} : \Delta t = 0.01$$

$$\text{クーラン数} : C = 0.2$$

$$\text{総節点数} : 79200 \text{ 点}$$

本章に示されているグラフにおいて、x軸はキャノピーモデルの前縁を原点とし、主流方向を正として設定されている。またy軸は樹幹部の根元を原点とし、高さ方向を正として設定されている。

4.2 時間平均流速

Fig.6-1 に各森林キャノピーモデル周りにおける時間平均流速の分布図を示す。

Fig.6-1 (a), Fig.6-1 (b) は樹冠部が薄いモデル周りの時間平均流速の分布を示しており、Fig.6-1 (c), Fig.6-1 (d) は樹冠部が厚いモデル周りの時間平均流速の分布を示している。

Fig.6-1 (a) と Fig.6-1 (c) は枝葉の少ない森林キャノピーをモデル化した葉面積密度の低い森林キャノピーモデル周りの時間平均流速分布を、Fig.6-1 (b) と Fig.6-1 (d) は枝葉の生い茂った葉面積密度の高い森林キャノピーモデル周りの時間平均流速分布を示している。以後、本章で取り扱う分布図において表記される (a), (b), (c), (d) の4種類の図は、時間平均流速の分布図において定義された4種類のモデルを示すものとする。

Fig.6-1 から以下の様な傾向が示された。Fig.6-1 (a) と Fig.6-1 (b) の比較及び、Fig.6-1 (c) と Fig.6-1 (d) の比較から樹冠部の葉面積密度が高くなるほど、後流域での平均流速の回復が遅くなる傾向がある。Fig.6-1 (b) と Fig.6-1 (d) の比較から樹冠部が厚くなるほど、平均流速の遅い部分が後流域まで及んでいる。剥離せん断層の最大高度は、当研究室で行われた風洞実験によると、 $y/H \sim 1.5$ であるが本解析では $y/H \sim 2.0$ となっている。風洞実験結果においてはキャノピーモデル直後の平均流速の分布は滑らかであるが、本解析の結果では複雑な分布を示している。

次に各モデルについて、葉面積密度の違いによる時間平均流速分布の差を、局所的に検討する。それぞれ、樹冠による速度場への影響が顕著に現れる位置での比較を行う。樹冠の薄いモデルについては $x/H = 3.0$ の位置における時間平均流速分布図を Fig.6-2 (I) に示し、樹冠の厚いモデルについては $x/H = 4.0$ の位置における時間平均流速分布図を Fig.6-2 (II) に示す。Fig.6-2 から以下のような傾向が示された。キャノピー後流域では、流速が弱められており、樹冠部の後流域では特に顕著である。Fig.6-2 (I), (II) 共に、葉面積密度が高い程キャノピー後部での流速がより弱められており、速度欠損が大きい。また、はく離せん断層の厚さもより厚い。

次に時間平均流速の解析結果と実験結果とを、樹冠による速度場への影響が顕著に現れる位置で比較検討する。樹冠の薄いモデルについては $x/H = 3.0$ の位置における時間平均流速の比較を Fig.6-3 (I) に示し、樹冠の厚いモデルについては $x/H = 4.0$ の位置における時間平均流速の比較を Fig.6-3 (II) に示す。Fig.6-3 より以下の傾向が示された。Fig.6-3 (I), Fig.6-3 (II) 共に解析値と実験値はかなり良く一致している。樹冠部後流で最も流速が遅くなり、樹幹部分では樹冠部に比べより多くの流量が流れるために若干流速が速いという特長が一致している。解析値は、実験値に比べ樹冠部後流での流速が速く、はく離せん断層の厚さがより厚いという相違点がある。

Fig.6-1, Fig.6-2 および、Fig.6-3 より、以下の考察が得られた。解析より得られた時間平均流速の分布と、当研究室で行われた風洞実験より得られた時間平均流速の分布は良く一致している。本解析では、樹冠部の揺れを再現しているため、実験結果とは異なり樹冠直後において流れが複雑な分布を示している。樹冠部における葉面積密度の値が高いほど、枝葉が流れのエネルギーをより多く奪うため、流れの速度損失が多くなり、はく離せん断層の厚さも厚くなる。実験結果においては、はく離せん断層の上限は $y/H \sim 1.5$ であったのに対し、解析結果では $y/H \sim 2.0$ となっているが、実験に用いた風洞の閉塞率が問題となっていると推測される。

6.3 乱れ強度

Fig.6-4 に x 軸方向の乱れ強度を、Fig.6-5 に y 軸方向の乱れ強度の分布図を示す。Fig.6-4 (a), Fig.6-4 (b) は樹冠部が薄いモデル周りにおける x 軸方向の乱れ強度の分布を示しており、Fig.6-4 (c), Fig.6-4 (d) は樹冠部が厚いモデル周りにおける x 軸方向の乱れ強度の分布を示している。また、Fig.6-4 (a) と Fig.6-4 (c) は枝葉の少ない森林キャノピーをモデル化した葉面積密度の低い森林キャノピーモデル周りにおける x 軸方向の乱れ強度の分布を、Fig.6-4 (b) と Fig.6-4 (d) は枝葉の生い茂った葉面積密度の高い森林キャノピーモデル周りにおける x 軸方向の乱れ強度の分布を示している。

Fig.6-5 (a), Fig.6-5 (b) は樹冠部が薄いモデル周りにおける y 軸方向の乱れ強度の分布を示しており、Fig.6-5 (c), Fig.6-5 (d) は樹冠部が厚いモデル周りにおける y 軸方向の乱れ

強度の分布を示している。また、Fig.6-5 (a) と Fig.6-5 (c) は枝葉の少ない森林キャノピーをモデル化した葉面積密度の低い森林キャノピーモデル周りにおける y 軸方向の乱れ強度の分布を、Fig.6-5 (b) と Fig.6-5 (d) は枝葉の生い茂った葉面積密度の高い森林キャノピーモデル周りにおける y 軸方向の乱れ強度の分布を示している。

Fig.6-4 より以下の傾向が示された。Fig.6-4 (a) と Fig.6-4 (c) の比較から、樹冠の薄いモデルでは、はく離せん断層内部の乱れが強く、モデル後流域ではモデルから離れた場所で乱れているのに対し、樹冠部の厚いモデルでは、はく離せん断層内部、モデルの後流域全体に渡って共に強く乱れる傾向がある。Fig.6-4 (c) と Fig.6-4 (d) の比較から、樹冠部の葉面積密度が高いほど、モデル後流域において、より乱れが強くなる。乱れ強度の分布の全体的な傾向として、樹冠の上下を通過した流れによる乱れが後流まで及んでおり、2 箇所もしくは 3 箇所の乱れのピークが現れている。

Fig.6-5 より以下の傾向が示された。Fig.6-5 (a) と Fig.6-5 (b) の比較から、樹冠の薄いモデルでは樹冠後流の離れた部分のみで、乱れているのに対し、樹冠の厚いモデルでは樹冠の内部と、樹冠後流域の両方で乱れている。Fig.6-5 (c) と Fig.6-5 (d) の比較から、樹冠部の葉面積密度が高いほど、モデル後流域において、より乱れが強くなる傾向がある。

次に各モデルについて、葉面積密度の違いによる乱れ強度分布の差を、局所的に検討する。Fig.6-6 に $x/H = 3.0$ の位置における x 軸方向の乱れ強度の分布図を示す。Fig.6-6 (I) に樹冠部の厚さが薄いモデル周りにおける x 軸方向の乱れ強度の分布図を示し、Fig.6-6 (II) に樹冠部の厚さが厚いモデル周りにおける x 軸方向の乱れ強度の分布図を示す。Fig.6-6 より以下のような傾向が示された。Fig.6-6 (I)、Fig.6-6 (II) より、樹冠の内部から上部にかけて乱れの強い部分が見られる。Fig.6-6 (I) より、樹冠部の厚さが薄いモデル周りにおいては、葉面積密度の違いによる、 x 軸方向の乱れ強度の分布への影響はほとんど無い。Fig.6-6 (II) より、樹冠部の厚さが厚いモデル周りにおいては、葉面積密度が高いほど、キャノピー後流において流れがより乱される。

Fig.6-7 に $x/H = 3.0$ の位置における y 軸方向の乱れ強度の分布図を示す。Fig.6-7 (I) に樹冠部の厚さが薄いモデル周りにおける y 軸方向の乱れ強度の分布図を示し、Fig.6-7 (II) に樹冠部の厚さが厚いモデル周りにおける y 軸方向の乱れ強度の分布図を示す。

Fig.6-7 より以下の様な傾向が示された。Fig.6-7 (I) と Fig.6-7 (II) との比較より、樹冠部の厚さの薄いモデル周りでは、樹冠部の上部において乱れが強く、樹冠部の厚さの厚いモデル周りでは樹冠部後流から上部にかけて強く乱れている。Fig.6-7 (I) より、樹冠の厚さの薄いモデル周りでは樹冠の葉面積密度が低いほど、樹冠上部での乱れが強くなっている。

Fig.6-7 (II) より、樹冠の厚さの厚いモデル周りでは樹冠の葉面積密度が低いほど樹冠後流域での乱れが強くなっている。

次に、乱れ強度分布の解析結果と実験結果とを、 x 軸方向を例にとり $x/H = 3.0$ の位置において比較する。比較に用いるモデルは、解析モデル、実験モデル共に、葉面積密度の低いモデルである。Fig.6-8 (I) に、樹冠部の厚さが薄いモデル周りにおける x 軸方向の乱れ強度の分布を、Fig.6-8 (II) に樹冠部の厚さが厚いモデル周りにおける x 軸方向の乱れ強度の分布図を示す。Fig.6-8 より以下の様な傾向が示された。解析結果と実験結果に共通して見られる乱れ強度の分布の特長として、樹冠の上部と下部において乱れの強い部分が現れる。解析結果と実験結果の樹冠上部における乱れの強い部分の分布はほぼ一致している。

Fig.6-4、Fig.6-5、Fig.6-6、Fig.6-7 および Fig.6-8 より、以下の考察が得られた。解析より得られた乱れ強度の分布と、風洞実験により得られた乱れ強度の分布は、はく離せん断層内において乱れが強いと言う点で一致した。実験結果では樹冠が流れを塞ぎ止める効果が強すぎるため、樹冠後流域においてそれ程乱れていないのに対して、解析結果では、樹冠をある程度流れが通過するため、樹冠の後流域において強い乱れが生じている。実験では実験装置の限界から、森林キャノピーモデル内部の乱れ強度の測定は行われていないためモデル内部の乱れ構造が不明であったが、本解析ではモデル内部の乱れ強度の計算も行われており、樹冠内部において流れが乱れさている事が示された。

6.4 レイノルズ応力

Fig.6-9 にレイノルズ応力の分布図を示す. Fig.6-9 (a), Fig.6-9 (b) は樹冠部が薄いモデル周りにおけるレイノルズ応力の分布を示しており, Fig.6-9 (c), Fig.6-9 (d) は樹冠部が厚いモデル周りにおけるレイノルズ応力の分布を示している. Fig.6-9 (a) と Fig.6-9 (c) は枝葉の少ない森林キャノピーをモデル化した葉面積密度の低い森林キャノピーモデル周りにおけるレイノルズ応力の分布を, Fig.6-9 (b) と Fig.6-9 (d) は枝葉の生い茂った葉面積密度の高い森林キャノピーモデル周りにおけるレイノルズ応力の分布を示している. Fig.6-9 より, 以下のような傾向が示された. Fig.6-9 より, どのモデルも, 樹冠上部の後流域においてレイノルズ応力は正の値を示しており, 樹冠部の厚さの厚いモデルでは樹冠下部後流においてレイノルズ応力は負の値を示している. Fig.6-9 (a) と Fig.6-9 (b) より, 樹冠部の厚さの薄いモデル周りのレイノルズ応力分布は, 樹冠部の葉面積密度の違いに依存していない事が示された. Fig.6-9 (c) においてはレイノルズ応力の, Fig.6-9 (d) より, 樹冠部の厚さの厚いモデル周りのレイノルズ応力分布は, 葉面積密度に強く依存している事が示された. Fig.6-9 (c), Fig.6-9 (d) より, 樹冠部の厚さの厚いモデルの樹冠内部においてレイノルズ応力が正の値を示している.

次に各モデルについて, 葉面積密度の違いによるレイノルズ応力の分布の差を, 局所的に検討する. Fig.6-10 に $x/H = 3.0$ の位置におけるレイノルズ応力の分布図を示す. Fig.6-10 (I) に樹冠部の厚さが薄いモデル周りにおけるレイノルズ応力の分布図を示し, Fig.6-10 (II) に樹冠部の厚さが厚いモデル周りにおけるレイノルズ応力の分布図を示す. Fig.6-10 より, 以下の様な傾向が示された. Fig.6-10 (I) より樹冠部の厚さの薄いモデルでは, 樹冠上部においてレイノルズ応力が正の値を示している. Fig.6-10 (II) より樹冠部の厚さの厚いモデルでは, 樹冠の下部でレイノルズ応力は負になり, 樹冠内部で正, 負の両方の値をとり, 樹冠上部で再び正の値をとると言う複雑な分布を示している. Fig.6-10 (I), Fig.6-10 (II) に共通して葉面積密度が低い程, レイノルズ応力の正負の差が大きい.

次に, レイノルズ応力分布の解析結果と実験結果とを, $x/H = 3.0$ の位置において比較する. 比較に用いるモデルは, 解析モデル, 実験モデル共に, 葉面積密度の低いモデルである. Fig.6-8 (I) に, 樹冠部の厚さが薄いモデル周りにおけるレイノルズ応力の分布を, Fig.6-8 (II) に樹冠部の厚さが厚いモデル周りにおけるレイノルズ応力の分布図を示す.

Fig.6-11 より以下の様な傾向が示された. Fig.6-11 (I) より, 樹冠の厚さの薄いモデルにおいて実験結果では樹冠の上部でレイノルズ応力が正の値をとり, 樹冠下部において負の値を示しているのに対し, 解析結果では, 樹冠上部に実験値と同じようなレイノルズ応力分布を示す事が示された. 数値的には, ほぼ同じ大きさを示す. Fig.6-11 (II) より, 樹冠の厚さの厚いモデルでは, 解析結果, 実験結果共に樹冠の下部においてレイノルズ応力は負の値をとり, 樹冠上部で正の値をとると言う傾向は一致しているが, 解析結果では樹冠後部においてより複雑な分布を示している.

Fig.6-9, Fig.6-10, Fig.6-11 より以下の考察が得られた. 解析結果, 実験結果共に, 樹冠上部においてレイノルズ応力は正の値をとり, 樹冠下部において負の値を示している. レイノルズ応力の値が大きな場所は, はく離せん断層内部および後流域において流速の勾配が急な箇所と, 樹幹を通過した流れにより発生する速度勾配が急な箇所に一致する. 実験結果に比べ, 解析結果ではレイノルズ応力の分布の強い部分が, より高い位置に現れている. 実験と比較して, 本解析ではモデル上部境界をかなり余裕を持って設定しているため, はく離せん断層の厚みに違いが生じたためであると推測される.

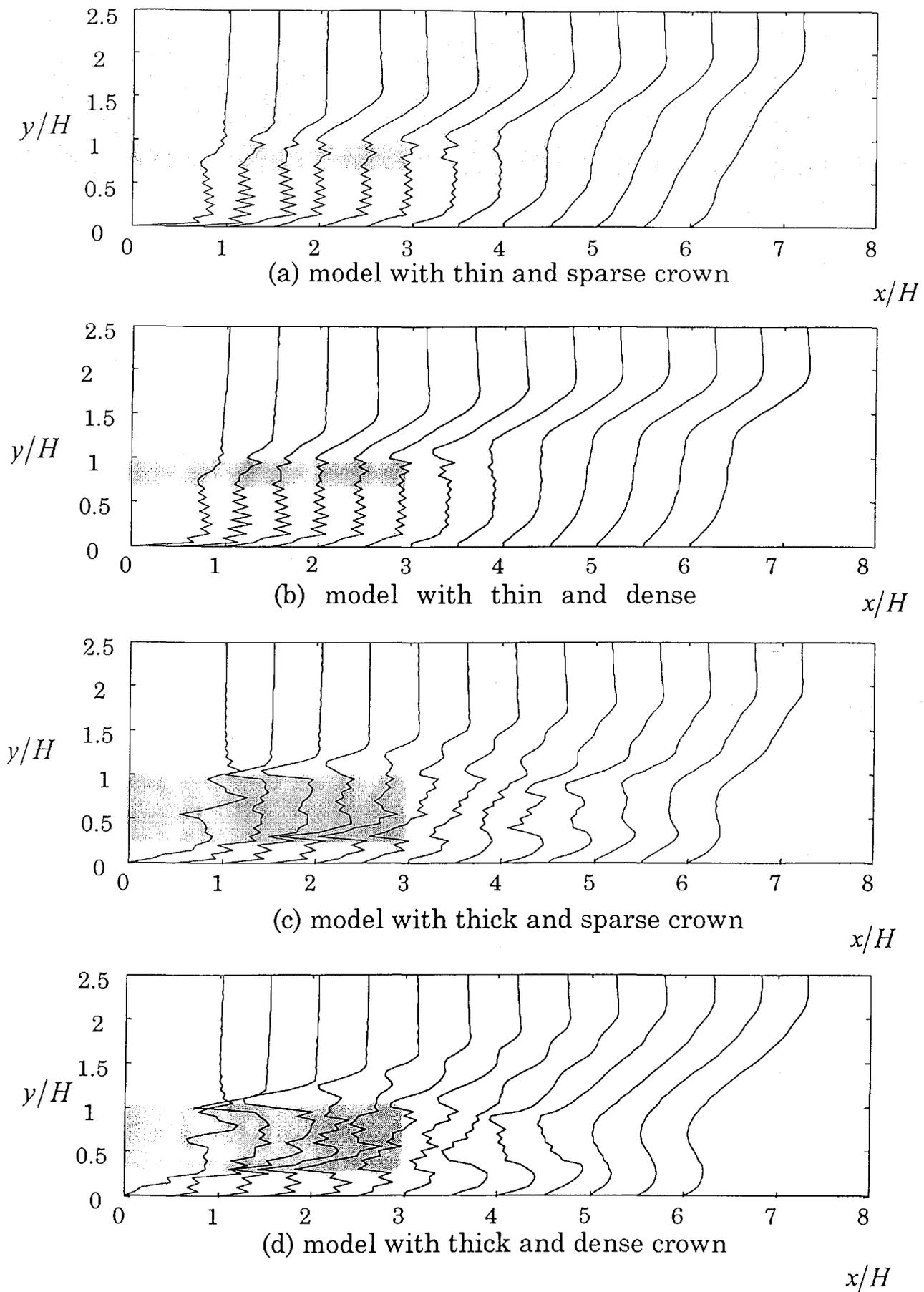


Fig.6-1 time-mean velocity \bar{U}/U_∞

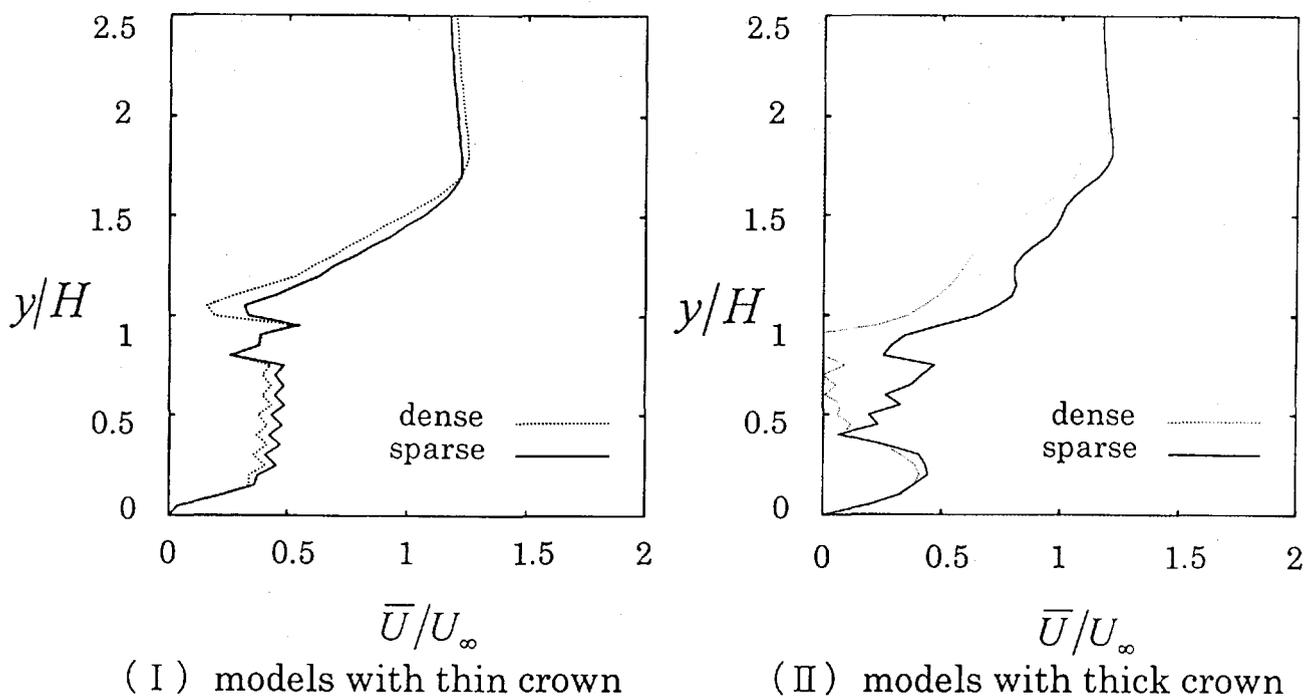


Fig.6-2 Time-mean velocity profiles for different leaf-area density

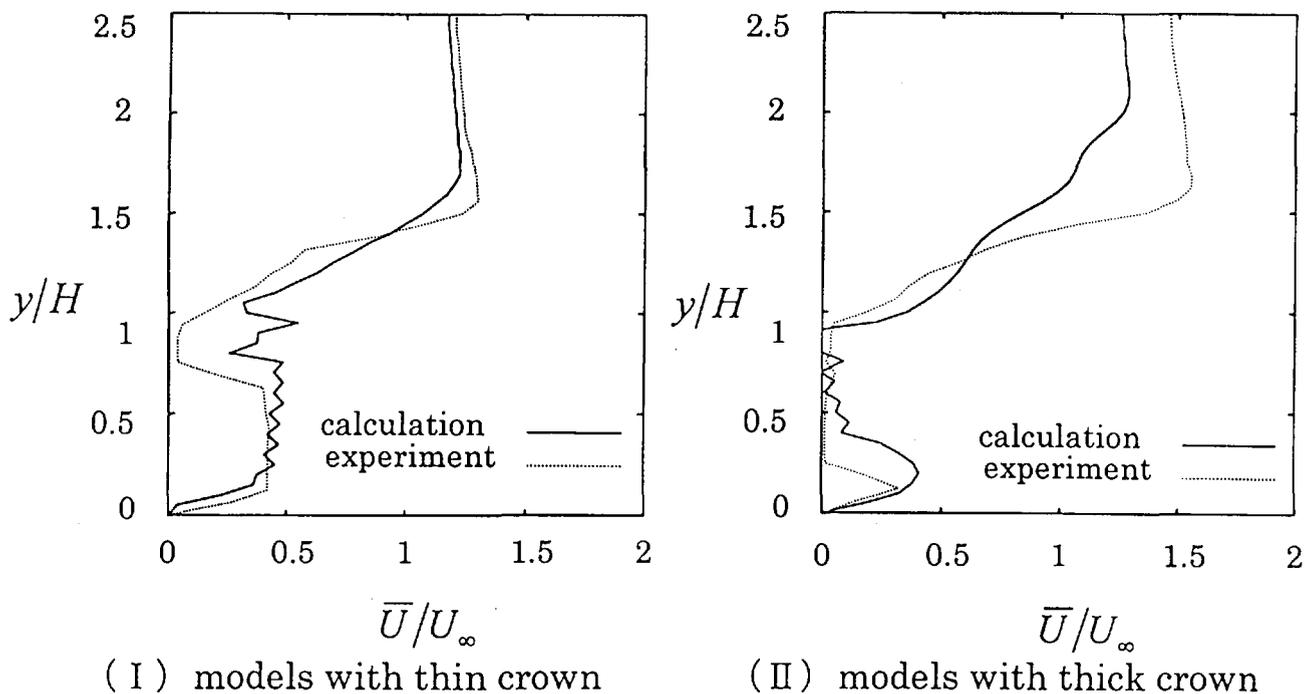


Fig.6-3 Time-mean velocity

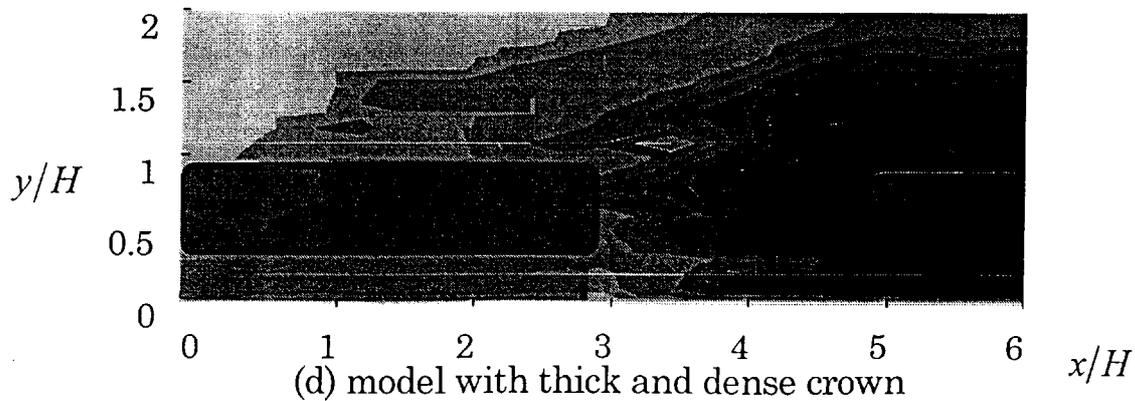
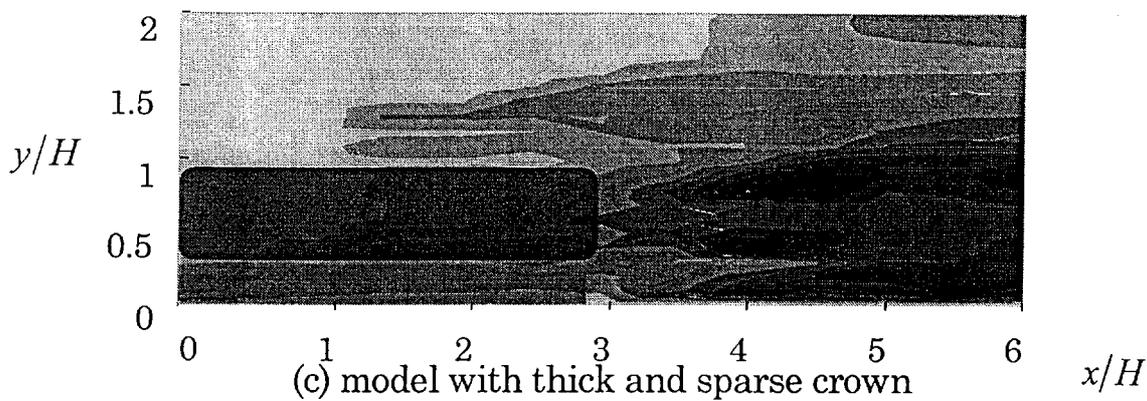
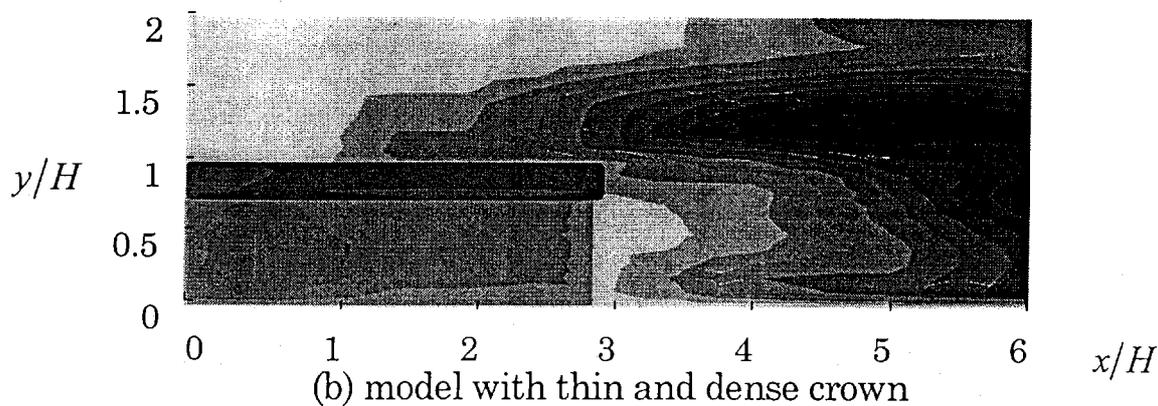
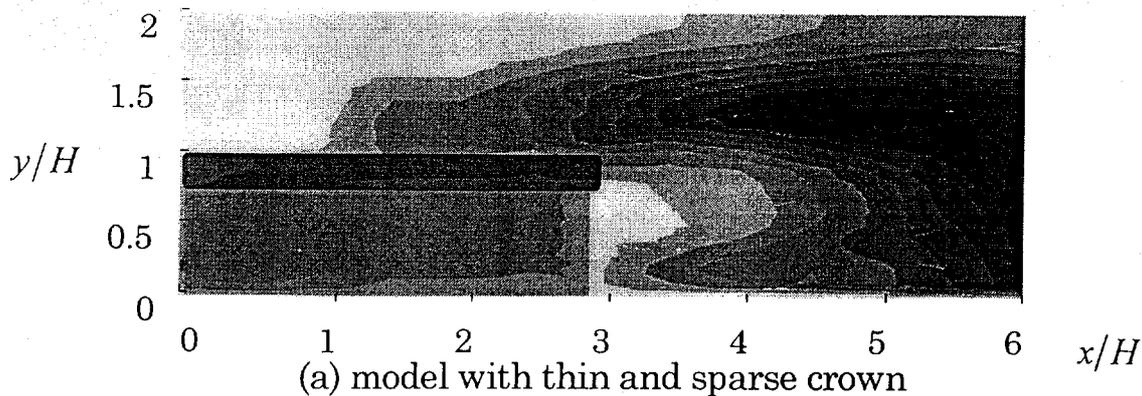
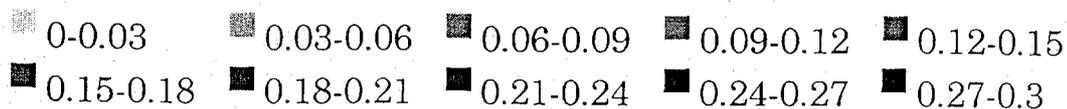


Fig.6-4 intensity of turbulence $\sqrt{u'^2}/U_\infty$

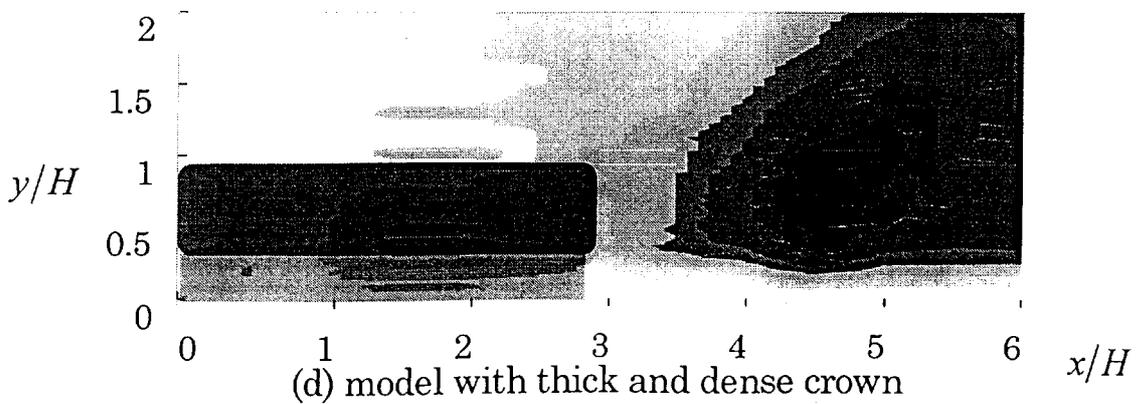
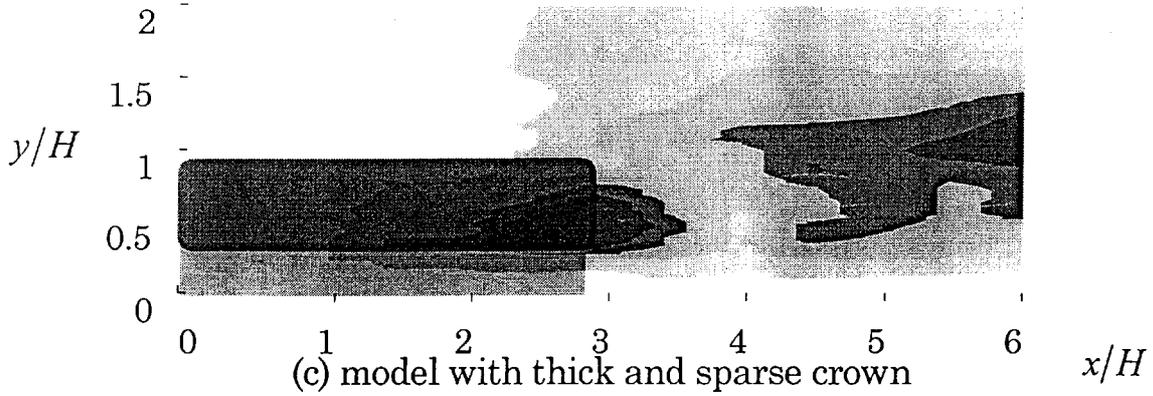
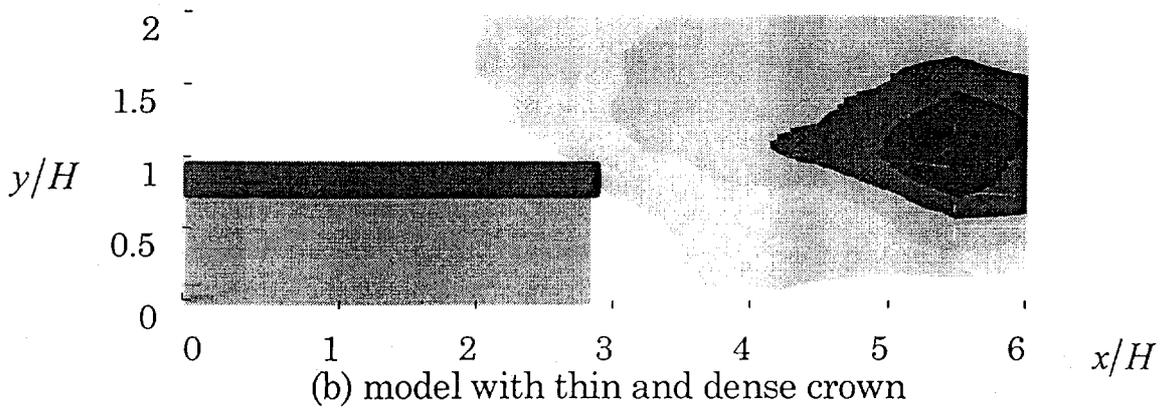
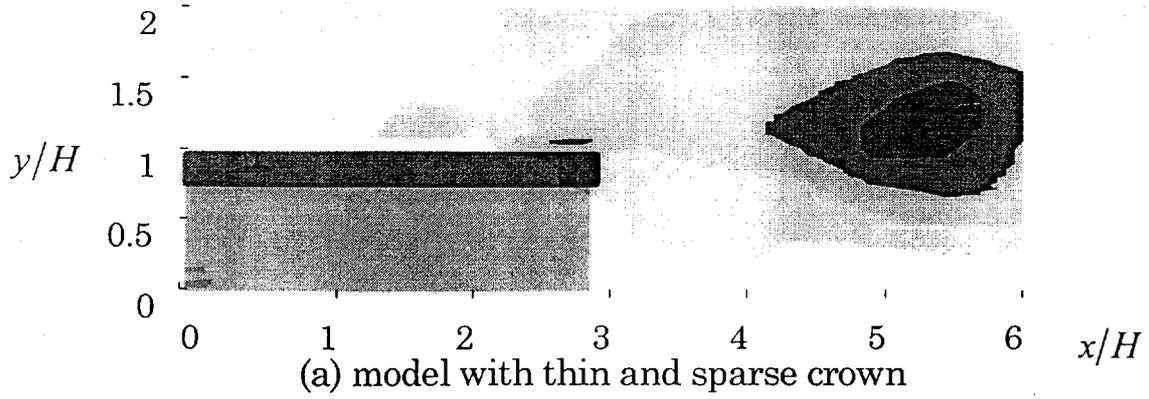
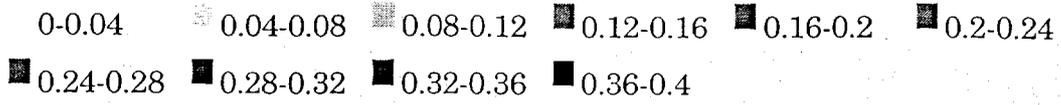
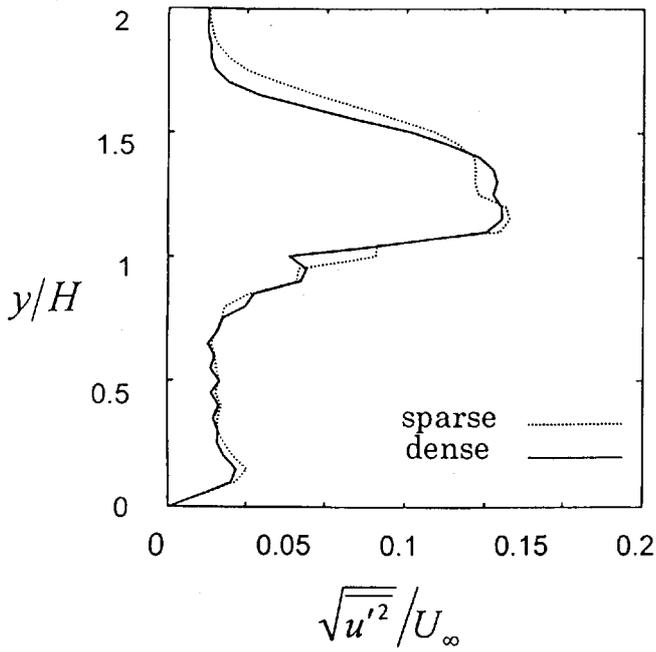
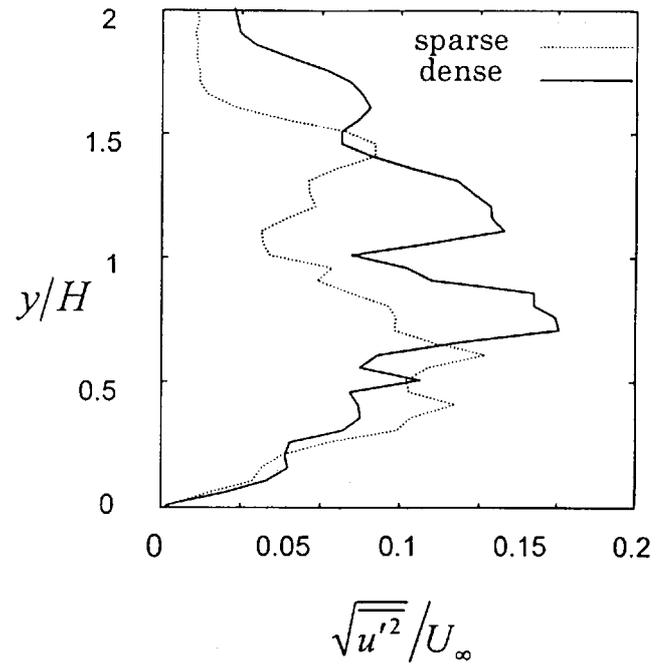


Fig.6-5 intensity of turbulence $\sqrt{v'^2}/U_\infty$

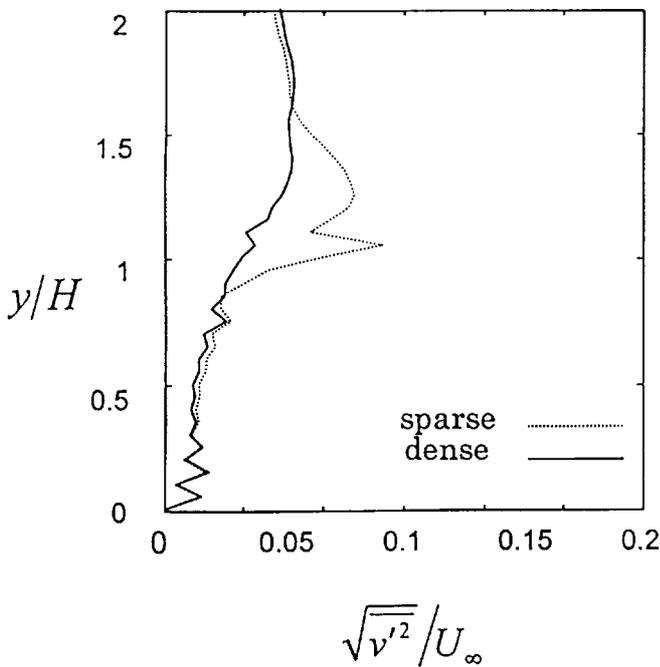


(I) models with thin crown

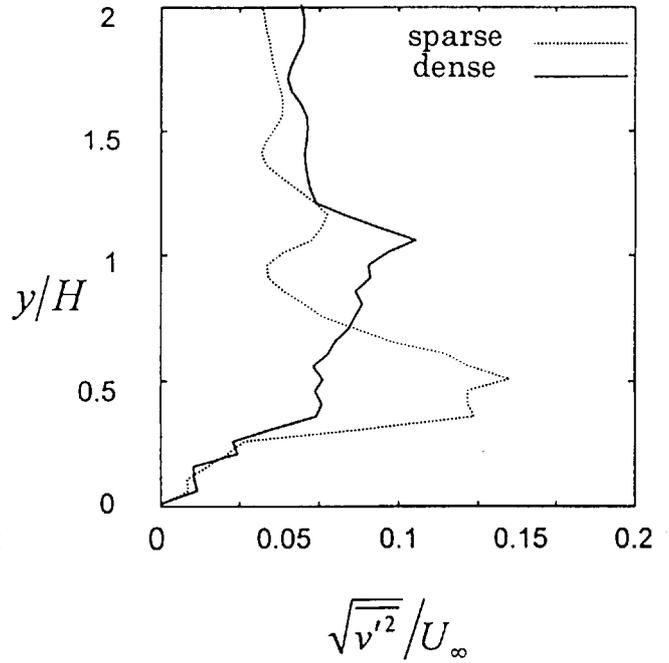


(II) models with thick crown

Fig.6-6 intensity of turbulence $\sqrt{u'^2}/U_\infty$

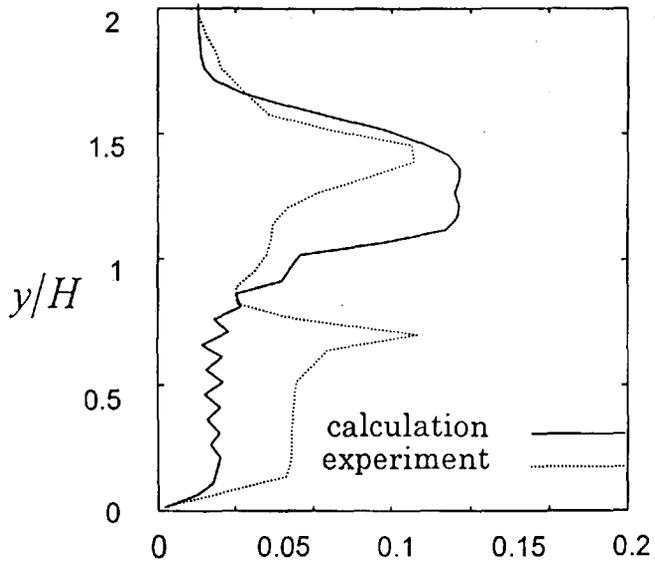


(I) models with thin crown



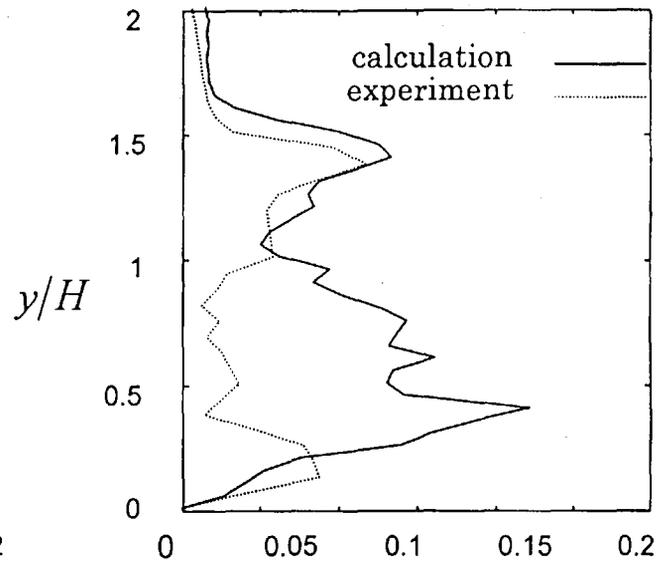
(II) models with thick crown

Fig.6-7 intensity of turbulence $\sqrt{v'^2}/U_\infty$



$$\sqrt{u'^2}/U_\infty$$

(I) models with thin crown



$$\sqrt{u'^2}/U_\infty$$

(II) models with thick crown

Fig.6-8 intensity of turbulence $\sqrt{u'^2}/U_\infty$

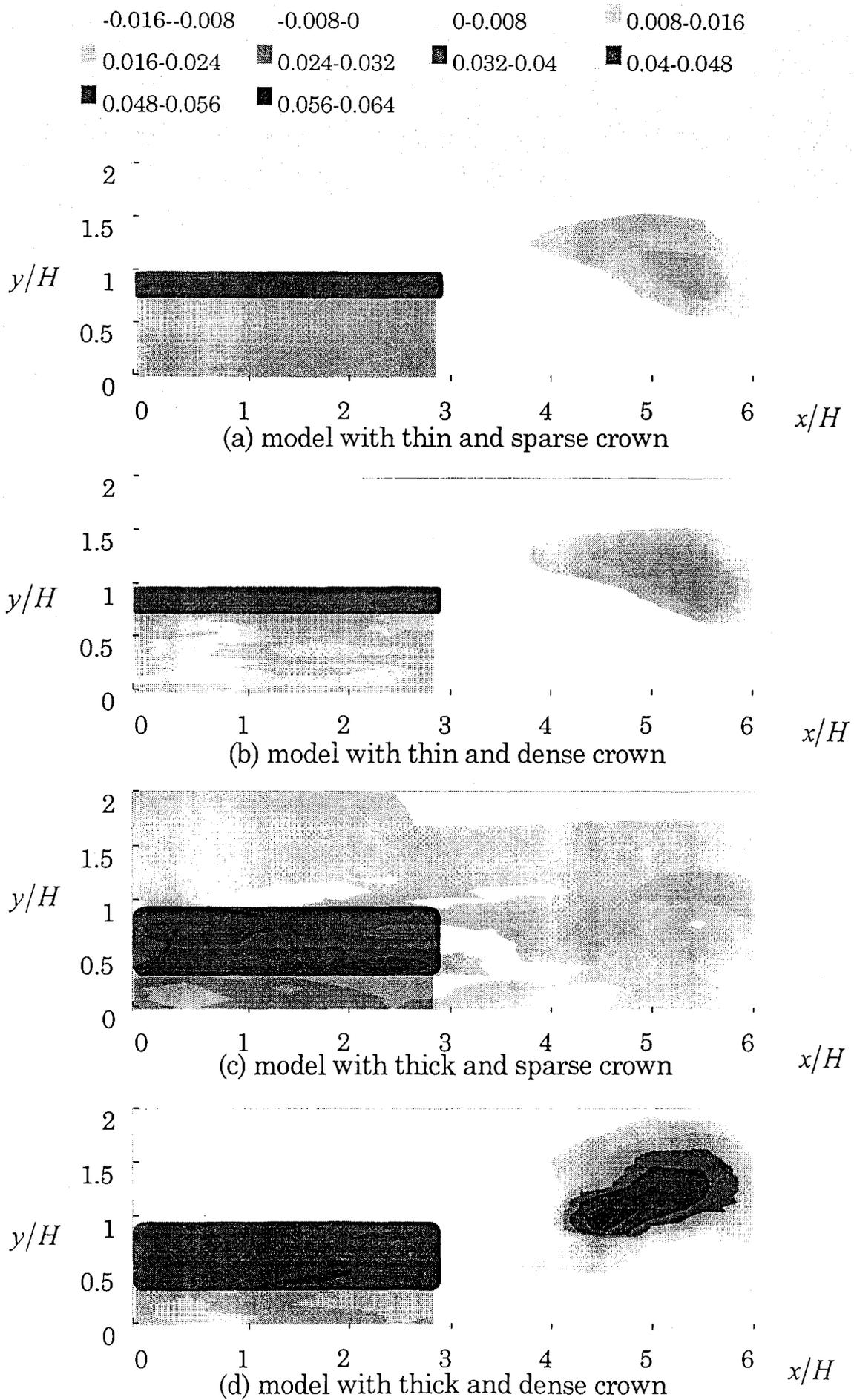


Fig.6-9 Reynolds stress $-\overline{u'v'}/U_\infty^2$

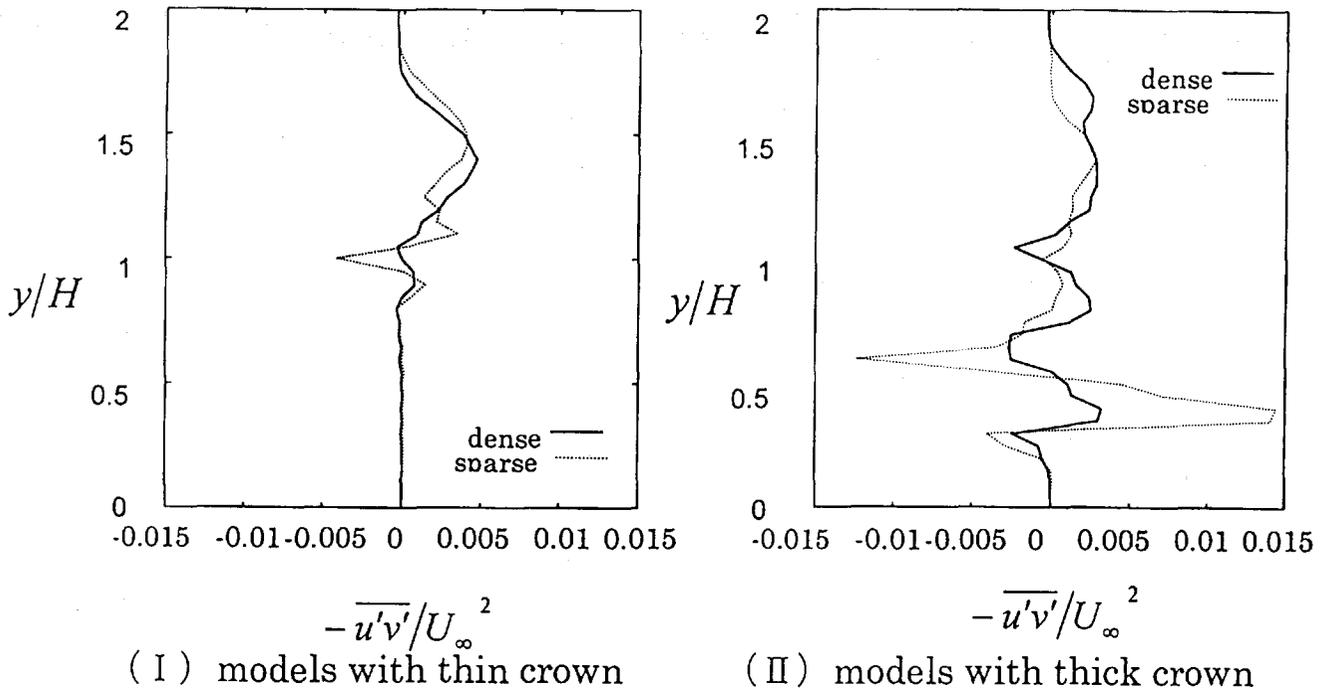


Fig.6-10 Reynolds stress $-\overline{u'v'}/U_\infty^2$

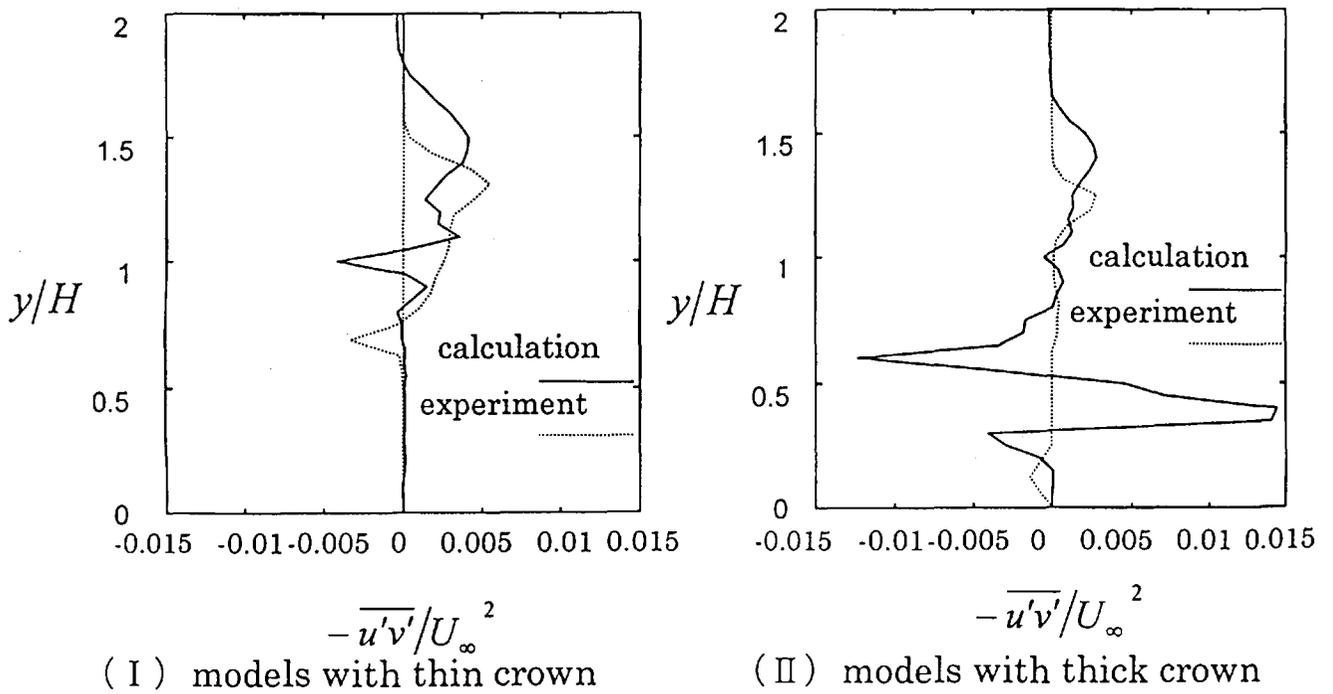


Fig.6-11 Reynolds stress $-\overline{u'v'}/U_\infty^2$

5. まとめ

本研究では、数値解析により、森林キャノピーを過ぎる流れのシミュレーションを行なった。実験モデルでは再現が困難な、森林キャノピーの樹冠部の揺れを再現し、森林キャノピー周りの流れ場の乱れ構造を調べた。樹冠の厚さ、葉面積密度等のパラメーターを変化させ、時間平均流速、乱れ強度、レイノルズ応力の各物性量の計算を行ない、実験結果との比較を行なった。研究から以下の結果が得られた。

- (1) 計算結果と実験結果との比較から、強い乱れの発生位置や、キャノピーによる流速の速度損失、はく離せん断層の発達等の傾向がほぼ一致する。
- (2) 実験結果では樹冠直後における速度分布が直線的であるのに対し、計算結果では樹冠部の振動の影響により、樹冠直後において複雑な分布を示す。
- (3) 森林キャノピー周りの流れの解析において、樹木の防風機能を再現する際、葉面積密度の設定が非常に重要である事が確認された。
- (4) 解析に用いたパラメーターは、まだパターンが少ないため、今後、様々なパラメーターについて解析を行なう必要がある。
- (5) 今回の解析では、格子分割に等間隔メッシュが採用されているが、今後、キャノピー周りの格子をより細かくとる事を考慮して不等間隔メッシュへの拡張が必要と思われる。

参考文献

- (1)池田駿介, 館健一郎, スペクトル応答解析による穂波の成因に関する研究, 土木学会論文集 No.539 /II-35, 43-52, (1996-5).
- (2)Manabu Kanda and Mikio Hino, Organized Structure of Turbulent Flow within and above a Plant Canopy Simulated by an LES Model, Technical Report, No.46, Department of Civil Engineering Tokyo Institute of Technology, Dec.(1992).
- (3)Synsuke IKEDA, Tomohiro YAMADA and Yuji TODA, 2D-LES on Flow over Flexible Vegetation layer, 第3回環境流体シンポジウム講演論文集, (1998-7).
- (4)山下祐一, 森林キャノピー模型まわりの流れ場における乱れ構造の測定, 宮崎大学大学院工学研究科エネルギーシステム工学講座修士論文 (平10).
- (5)Günter Gross, Numerical Simulation of Canopy Flows, Springer-Verlag, (1993).
- (6)河野憲, 一ツ葉地区マツ林の立ち木密度及び胸高直径について, 宮崎県農林振興局, (1993).
- (7)R.S.バーガ, 大型行列の反復解法, サイエンス社, (昭50).
- (8)平岡久司, 丸山敬, 中村泰人, 桂順治, 植生群落内および都市キャノピー内の乱流モデルに関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 第406号, (1989-12).
- (9)大橋征幹, 植栽の気流抵抗に関する数値解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1995-8).
- (10)神山新一, 佐藤明, 分子動力学シミュレーション, 朝倉書店, (1997-5).
- (11)河村哲也, 流体解析 I, 朝倉書店, (1996-4).