

(別紙様式 11)

乱流風洞と曳航風洞を用いた
強風環境下における
森林キャノピー層の
防風機能の解明
(課題番号 13650188)

平成 13 年度～平成 14 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 15 年 4 月

研究代表者 平野 公孝
(宮崎大学工学部 教授)

平成13年度～平成14年度科学研究費補助金(基盤研究(C)(2))
(課題番号 13650188)

乱流風洞と曳航風洞を用いた強風環境下における 森林キャノピー層の防風機能の解明

研究代表者 平野 公孝(宮崎大学工学部 教授)

研究成果報告書 目次

はしがき	p. 1
第1部 乱流風洞によるキャノピーモデルの葉面積指数が流れ場に及ぼす影響の解明	p. 3
第1章 はじめに	p. 4
第2章 森林キャノピーモデル	p. 5
第3章 乱流風洞実験装置	p. 9
第4章 実験方法	p. 12
第5章 実験結果及び考察	p. 16
第6章 まとめ	p. 31
第2部 曳航風洞による供試樹木の下流域における流れ場の特性の計測	p. 33
第7章 はじめに	p. 34
第8章 曳航風洞実験装置及び供試樹木	p. 35
第9章 実験方法	p. 45
第10章 実験結果及び考察	p. 52
第11章 まとめ	p. 88
おわりに	p. 91
参考文献	p. 93

はしがき

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。特に海岸林をはじめとする森林は、飛砂、強風、潮風、津波などの災害を防止したり光合成により二酸化炭素を消費したりすることだけでなく、その地域の住民の生活や産業などが、安全で快適に営まれるために欠かせない存在である。

しかしながら、例えば宮崎・一ツ葉リゾート開発でのゴルフ場造成では、この一ツ葉海岸林のマツ林が、広範囲にわたりくし型配列状に伐採された。九州東岸にあり、台風などの強風にさらされることの多いこの地域において、樹木の列状伐採に伴う防風機能の変化による影響を明らかにすることは、海岸林、より一般的には森林キャノピー層の特性を考える際にきわめて重要な課題となる。

本研究では、以上の背景を踏まえて環境問題や防災問題にかかわって強風環境に置かれた森林キャノピー層の防風機能を、植生流体力学的立場から乱流風洞及び曳航風洞を用いた実験的手法により解明する。

- (1) 曳航風洞により種々の風速下における大きな樹木の幹、大枝、小枝、葉などの各要素が示す振動特性を実測する。
- (2) 乱流風洞と曳航風洞とにより得られたデータに基づき、大気の流れと干渉した樹木の振動特性、また、樹木要素の振動により生成される乱れの特性を計測する。
- (3) 樹木の振動と流れに乱れの相互干渉の特性を実験的に明らかにし、樹木の防風機能のメカニズムを明らかにする。
- (4) 樹高約 2m の針葉樹を実験対象として、これを曳航台車に搭載し、種々の速度で曳航する。
- (5) 供試樹木の下流域の速度場は、熱線流速計を用いて計測される。このデータを解析することにより、平均流速、乱れ強さ、さらにそのパワースペクトルなどの乱れ特性を得る。
- (6) 樹木の各部の振動特性は、樹木に貼付されたひずみゲージの出力から分析される。

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 13 年度	1,600 千円
平成 14 年度	1,500 千円
計	3,100 千円

本報告書の構成は、研究手順に対応して、次の2部構成になっている。

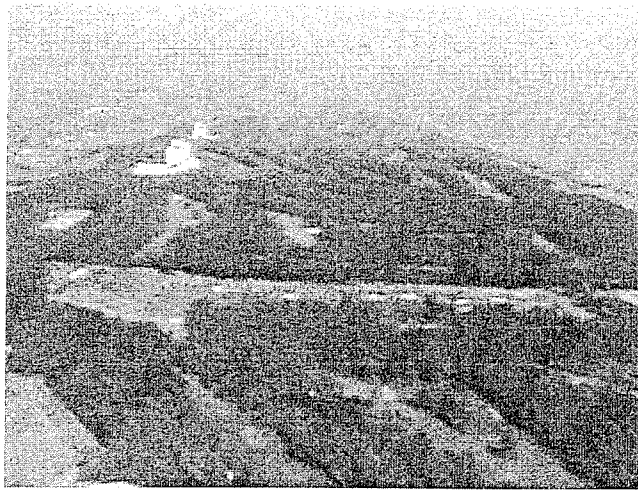
第1部 乱流風洞によるキャノピーモデルの葉面積指数が流れ場に及ぼす影響の解明

乱流風洞において剛体の単体のキャノピー樹木モデルを多数並べることにより、森林キャノピーを模擬する。これらの配置を変化させることにより森林キャノピー密度（葉面積指数）を変化させた時の森林モデルの下流域における流れ場の特性を計測する。

第2部 曳航風洞による供試樹木の下流域における流れ場の特性の計測

JR 総研旧リニア実験線のガイドウェイを曳航風洞として利用し、大きく成長した実物の針葉樹（モミの木）を曳航することにより樹木下流域の速度場を測定した。枝葉の揺れや幹のしなり、風の透過性などの現実性のある実験環境を再現し、風に対する樹木の反応とそれに対応する下流域の乱れ等の関連性を明らかにする。

第1部 乱流風洞によるキャノピーモデルの
葉面積指数が流れ場に及ぼす影響
の解明



第1章 はじめに

第1部では、乱流風洞を使用して、キャノピー模型の葉面積指数の変化に注目して流れ場を計測していくことにする。近年、ゴルフ場造成等のため海岸近くの多くの防風林が広範囲にわたって、くし型配列状に伐採されるようになってきている。飛砂、強風、潮風、など様々な災害を防止する役目をになっている防風林だが、このくし型配列状の伐採によって、どの程度、防風機能の変化による影響があるのか。

本実験ではキャノピー模型を使用するが、キャノピー単体模型を一つ一つ抜き取り実際にくし型配列状に形成させ、その下流域における平均風速や乱れ強度などをもとに、葉面積指数の変化がこれらに及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

第2章 森林キャノピー模型

2.1 葉面積指数の設定

本実験では宮崎大学に設置された大型乱流風洞を使用するので森林キャノピー模型も大型のものを使用することができ、それにより広い領域で多くのデータを取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幹部分と樹冠部分に分けられる。土台部分の寸法は、幅1760mm、高さ150mm、長さ2880mmとし、その両端に1630mmの側板を付けた。土台先端と側板先端には、せき止め効果を和らげるためエッジを取り付けた。さらに下流域まで速度測定が出来るように長さ1000mmの土台部分を付け足した。

樹木模型の樹幹部分は、直径10mmの丸棒を使用した。樹冠部分の構成には「葉面積指数 (leaf area index:LAI)」という概念を基本とした。「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、森林を構成している土地面積とその中に含まれる葉の片側面積の比で次式のように定義される。

$$LAI = \frac{\text{森林中の全葉の片側面積の合計}}{\text{森林の土地面積}}$$

このよう面積指数は、樹種によってある程度決まった値となる。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）を計算する時の指数であるが、異なった樹種間において風の通り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ということが関係してくると思われるので、風速を測定対象とする本実験において、パラメーターとして葉面積指数を用いた。

2.2 キャノピー樹木模型

模型化する際、樹高6~8m、胸高直径0.1mの樹木を想定した。キャノピー模型は、宮崎市一ツ葉海岸林の松林の平均的松の大きさを想定し、その樹木模型単体の縮尺を樹高について1/20、胸高直径について1/10とした結果、樹木模型単体の樹高H=300mm、胸高直径D=10mmと設定した。

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、枝葉レベルまで模型化しさらにさらにその揺れまでも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に風の透過性のみを考えることとし、この時の指数として葉面積指数を用いる。こうすることによって穴をあけた平板の組み合わせという単純な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 75×75mm の正方形 8 枚と 32.5×210mm の長方形 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，シリコン系接着剤で固定した．組み合わせる前にこれらに複数の穴をあけ，残った部分を葉の面積とした．

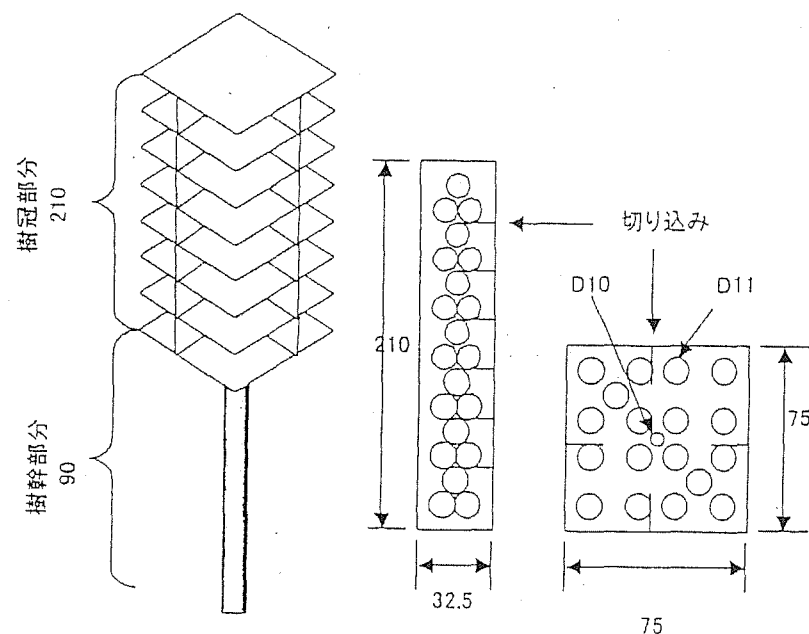


図 2.1 樹木模型の構造

森林の葉面積指数は 1～13 程度であるが，樹冠部分の強度を考えるとあまり LAI を小さくできないこと，また本実験の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，本実験では葉面積指数 LAI は 9 と高めに設定された．

樹木模型完成図を図 2.2 と図 2.3 に，また，樹木模型群からなる森林キャノピー模型の全体写真を図 2.4 に示す．

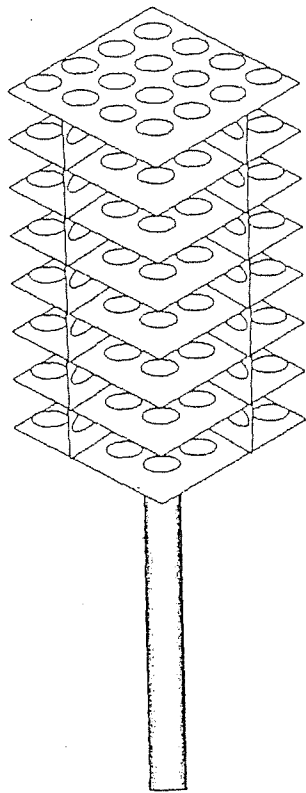


図2.2 樹木の単体模型

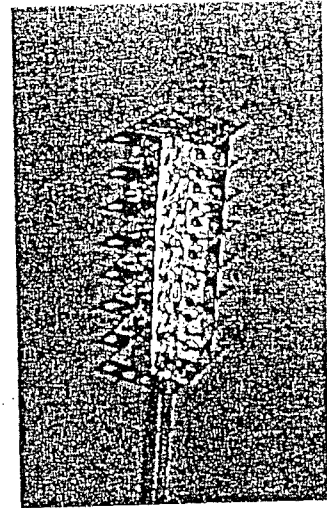


図2.3 樹木模型の写真

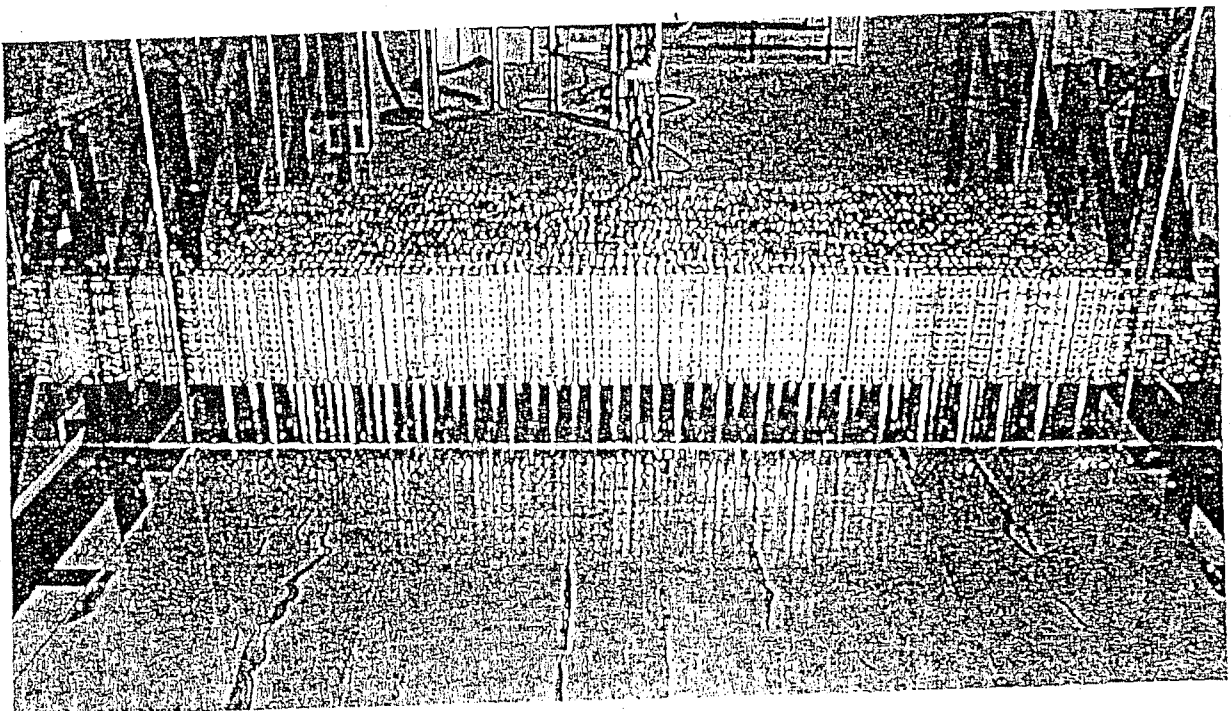


図2.4 森林キャノピー模型の風洞内の設置状況

2.3 樹木模型を支える土台

樹木模型を支える土台部分の構造を，図2.5に示す．材料には厚さ10mmの亚克力板を使用し，加工性と可搬性を考慮して図のように12分割式とした．前方部分の4つとそれに取り付ける側板にはエッジを付け，土台先端での流れのせき止めの影響を小さくした．

単体の樹木模型の配列は千鳥型格子状配列とし，隣り合う樹木模型間の間隔を80mm，前後する樹木列間の間隔も80mmとした．中段の樹木模型の幹の部分に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列の場合と21列の場合と交互に194個開けてある．

さらに，さらに下流域までの測定を可能にするため図2.5のAの位置に奥行き1mで高さ，幅は同一の土台も取り付けてある．この部分の材料には10mmのベニヤ板を使用した．

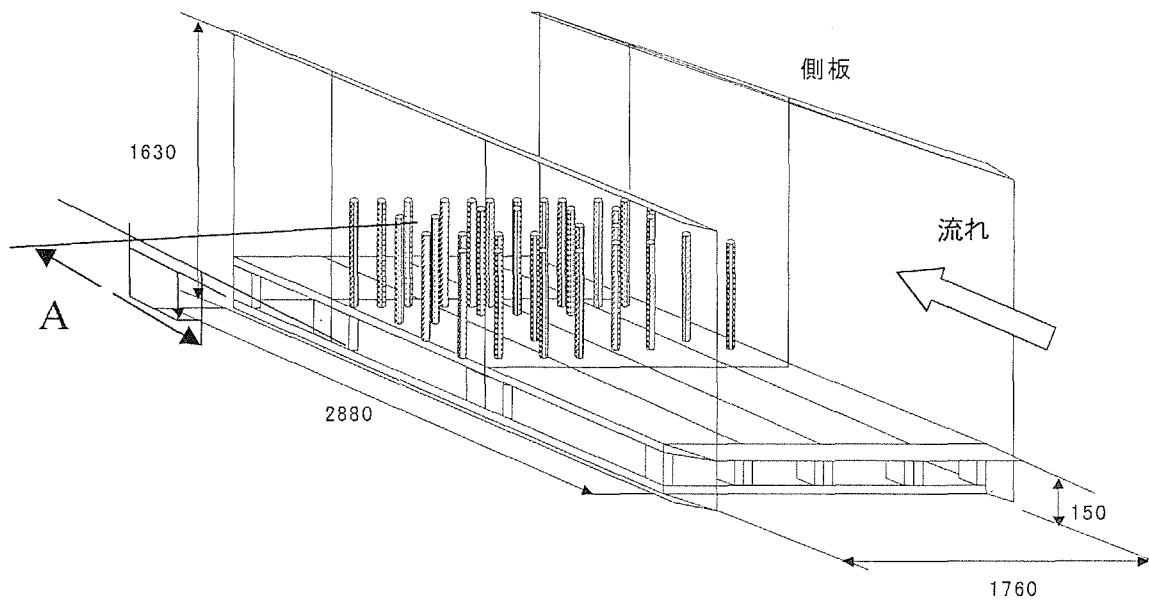


図 2.5 樹木模型を支える土台の構造

第3章 乱流風洞実験装置

3.1 乱流風洞装置

本実験で使用した風洞は、宮崎大学に設置されている大型乱流風洞である。この風洞の概略図を図3.1と図3.2に示す。風洞の形式は開放押し込み式であり、測定部流路の長さ15.5m、幅2.5m、高さ1.8mの形状である。風速の範囲は、1~18m/sであり、乱れ強さは2%以下（風速9m/sの場合）である。また送風機部を図3.3に示す。この送風機部には、99個の個別にコンピューター制御されるファンが取り付けられており、任意の速度分布や乱れの状態を作り出すことができる。

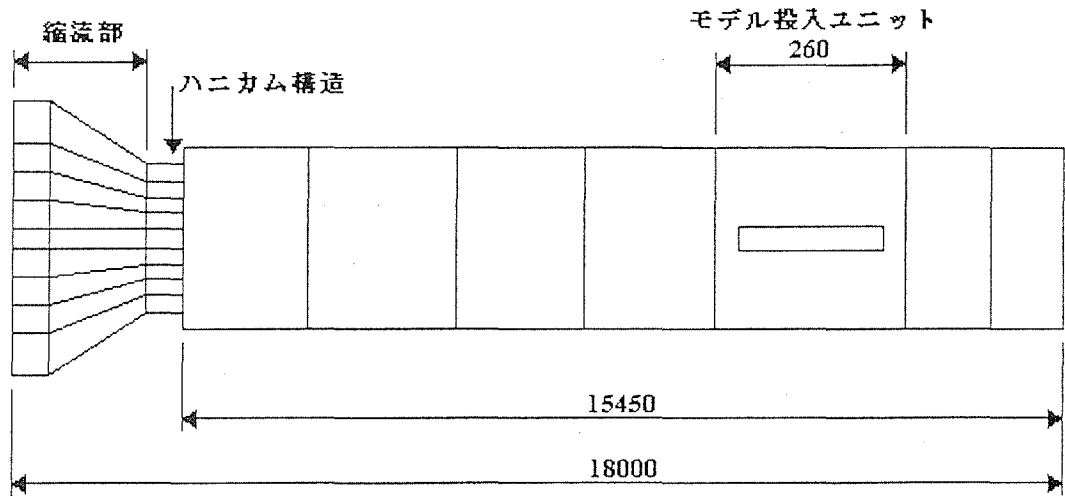


図3.1 乱流風洞の概略

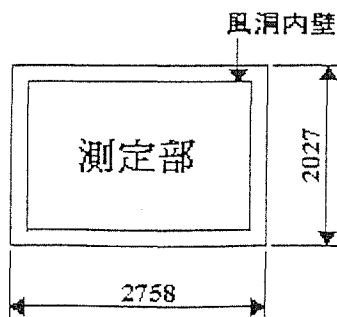


図3.2 風洞の測定部断面形状

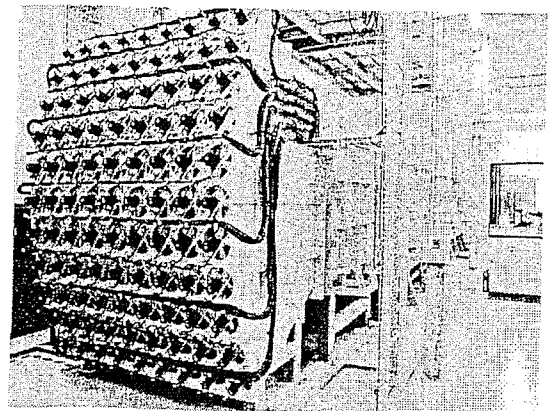


図3.3 風洞の送風機部

3.2 トラバース装置

本実験で使用したトラバース装置を 図3.4 に示す。風下に見て左側をトラバースA、右側をトラバースB と呼び、それぞれの下に取り付ける熱線を熱線 1、上に取り付ける熱線を熱線 2 と呼ぶ。トラバースA、および B はサーボモータをそれぞれ 2 基ずつ搭載しており、手動モードまたはプログラムによる自動制御モードにより、Y 方向と Z 方向に 0.01mm の精度で制御することができる。トラバースA、B、熱線 1、2 を組み合わせることにより、図3.5 に示すような範囲を測定することができる。

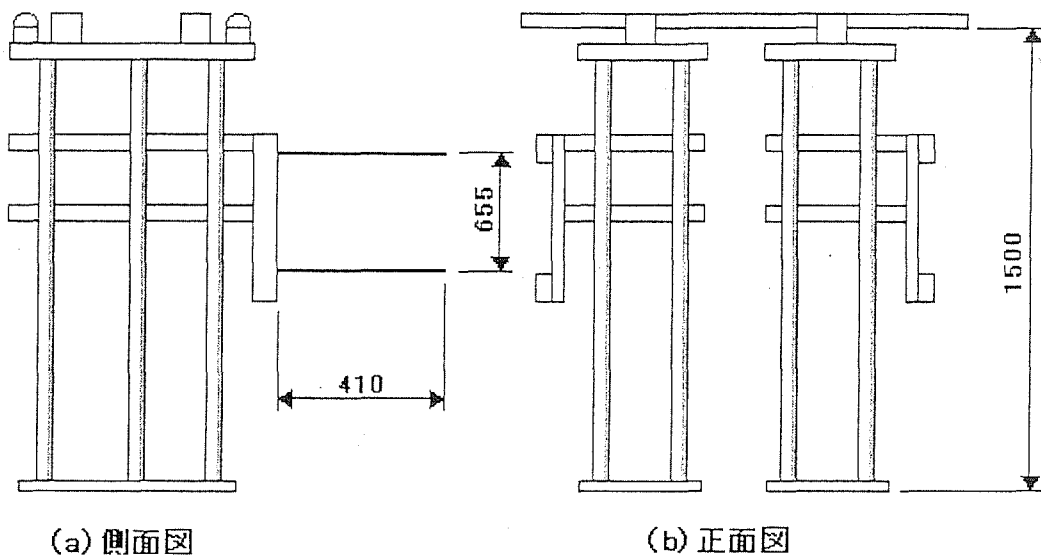


図3.4 トラバース装置

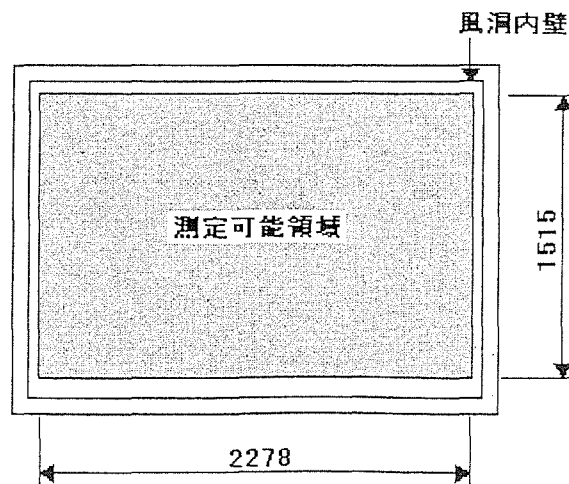


図3.5 風洞測定部断面で測定可能な範囲

3.3 流速の計測装置

平均風速及び乱れ強度の計測及び制御の概略図を図3.6に示す．速度計測には熱線流速計（KANOMAX, IFA-300）を使用し，熱線プローブにはI型プローブを用いた．I型熱線流速計には多少の測定誤差が生じることが分かっている．I型プローブでは，乱れ強度が平均流速の30%程度ある場合5%程度の誤差が生じる．

なお，本実験で使用する99個の送風機は，それぞれコンピューターにより適切に制御されている．また，平均風速は，一様流及び強乱流も含めあらかじめ5m/sと設定した．さらに，無限上流及びキャノピー高さ4Hの場所にピトー管をそれぞれ設置し，常に平均風速を確かめながら慎重に何度も再校正を行いつつ計測を行った．

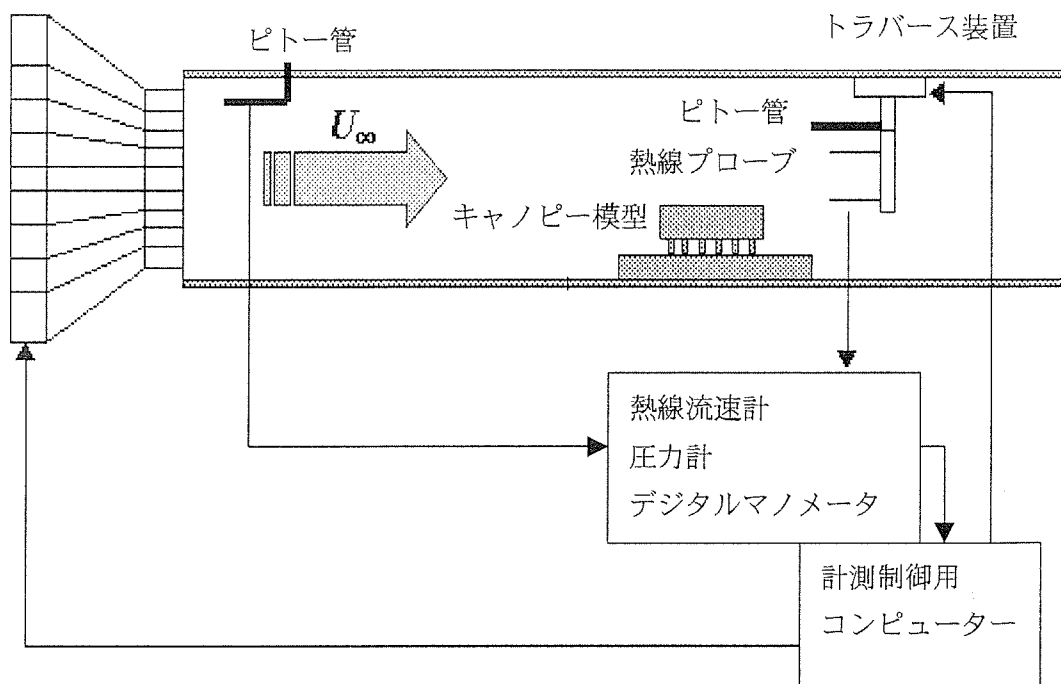


図 3.6 計測及び制御の概略

第4章 実験方法

4.1 主流の測定方法

本実験では、大型乱流風洞において、森林キャノピーモデルを設置し、一昨年度の実験の継続として主流速 5 m/s の一様流を主流として設定し、その模型後流の平均風速、乱れ強度を I 型熱線プローブにて測定する。

また本実験でのレイノルズ数は代表長さ $H = 0.3\text{m}$ 、平均風速 $U = 5\text{m/s}$ 、動粘性係数 $\nu = 1.4 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ とし、 $Re = 1.1 \times 10^5$ である。

$$Re = \frac{U \times H}{\nu} = 1.1 \times 10^5$$

4.2 葉面積指数 (LAI) の設定

本実験では、4種類の葉面積指数 (LAI) について測定する。

第2章で詳しくキャノピーモデルについて説明したが、キャノピーモデル単体を隙間なく敷き詰めた場合は前述の通り、LAIは 9.001 という数値を示す。これは、熱帯雨林程度の値なのであるが、キャノピー単体モデルをくし型配列に抜き取り、LAIを 4.5, 3.0, 1.8, 即ち単体モデルが敷き詰められた状態の LAI = 9.001 の 1/2, 1/3, 1/4 と変化させ測定していくことにする。

下図は、キャノピーモデルにおいて、単体モデルを敷き詰めた状態から、くし型配列状に抜き取っていき、LAIを変化させた模型の略式図を示す。

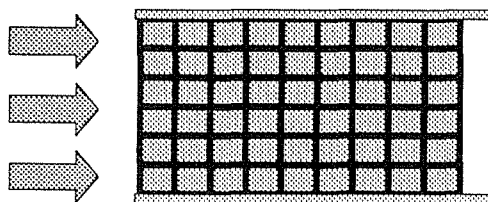


図 4.1 上方から見た模型略式図 (LAI=9)

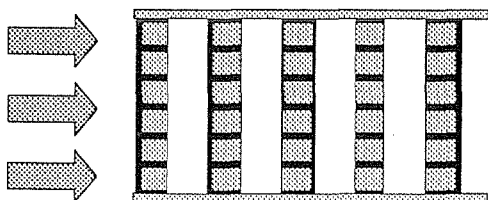


図 4.2 上方から見た模型略式図 (LAI=4.5)

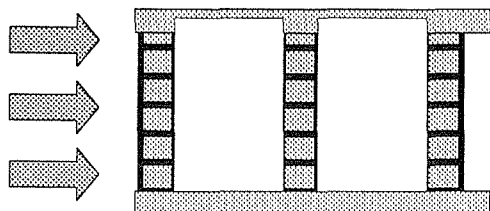


図 4.3 上方から見た模型略式図 (LAI=3)

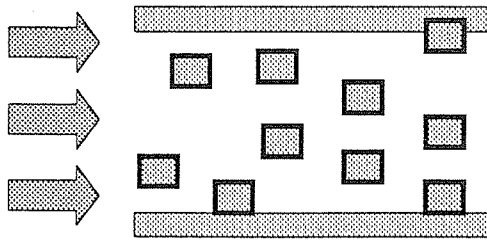


図 4.4 上方から見た模型略式図 (LAI=1.8)

4.3 座標系

座標系は, 図 4.5 に示すように, 流れ方向を x 軸, 高さ方向を y 軸, 模型方向を z 軸としている. x 軸, y 軸の原点を樹木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側面とする. 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面から右側面に向かって正とする.

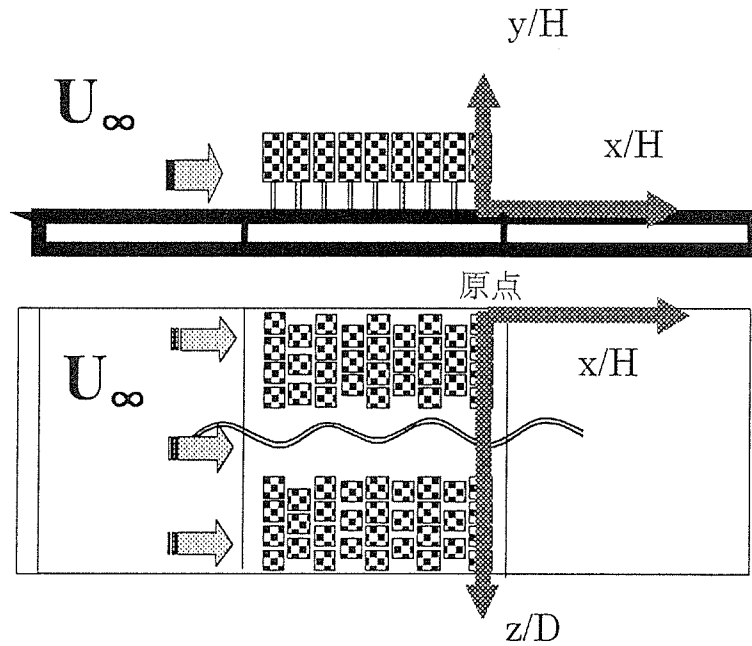


図 4.5 座標系

4.4 無次元化

x 及び y 方向座標は樹高 H ($=300\text{mm}$) で, z 方向座標は樹幹間隔 D ($=80\text{mm}$) で, 平均風速, 乱れ強度に対してはキャノピー高さ $4H$ の風速 U_{4H} で無次元化される.

4.5 測定領域

樹木模型下流での流速測定領域の概略図を図 4.6 に示す。主流方向速度の測定部幅方向 (y 軸方向) の分布を, $x/H=1.0, 1.5, 2.5, 3.5, 5.5$ の下流方向の各位置で測定した。

また測定点が, 樹幹の中心の下流に置かれた場合と樹幹と樹幹の間位置の下流におかれた場合の測定結果の相違を確認するために, 図4.7に樹木模型下流域の流路幅方向の平均流速と乱れ強さの分布を示す。この結果より, 両者の間での違いはほとんどなく, 樹幹の中心の下流位置でのみの測定とした。さらに, $x/H=4.5, 5.5$ の測定位置では側板が存在していないが, この側板の影響についても図4.7より側板のあるなしについての違いが見られない。このため, これらを考慮せずに流速の測定が行われた。

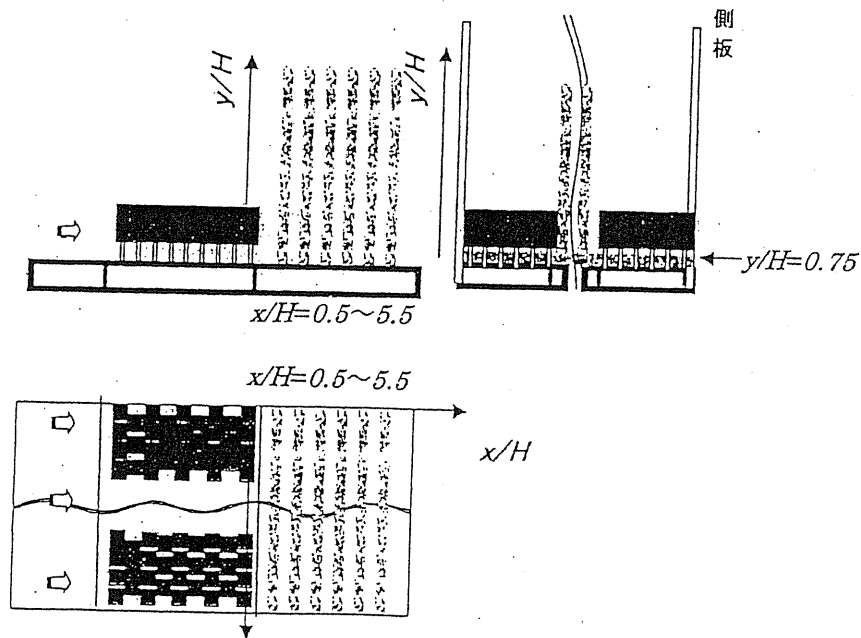


図4.6 計測領域の概略

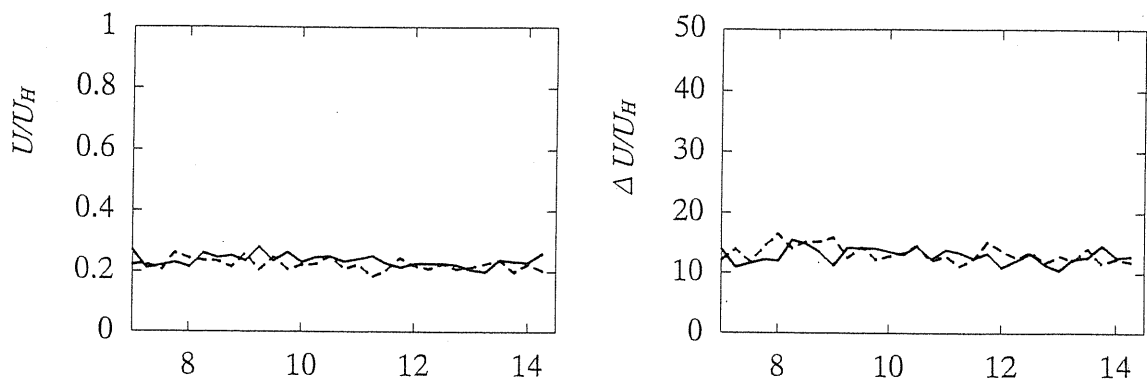


図 4.7 強乱せん断流の平均風速と乱れ強度の分布
($x/H=2.5, y/H=0.75$; 実線は側板あり, 破線は側板なし)

4.6 求められる流れ場の諸量

樹木周りにおける流れ場の乱れ構造を明らかにするために、実験によって得られたデータを元に、時間平均流速、乱れ強度の各諸量を求めた。

これらの諸量は次のように定義される。ここで、 $\hat{\quad}$ (ダッシュ)は速度の変動成分を表し、 N はサンプリング個数(4096)、 u は流体の主流方向速度を表す。また表記の便宜上、時間平均流速と乱れ強度をそれぞれ U および ΔU で定義する。

(1) 時間平均速度

$$U = \bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u^i$$

(2) 乱れ強度

$$\Delta U = \sqrt{u'^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u^i - \bar{u})^2}$$

第5章 実験結果及び考察

5.1 キャノピー模型の各葉面積指数の違いにおける流れ場の測定

5.1.1 固定された測定位置での各葉面積指数の違いにおける平均流速の結果と考察

特定の後流域の測定点に固定し、それぞれの各葉面積指数に対して平均流速の分布を Fig. 5.1.2 に示す。考察される一つ要素として、防風効果が増えられる。これは、無限上流主流速度からの速度欠損率として定義される。

Fig. 5.1 (a) $x=1H$ において、(キャノピー模型に一番近い測定点) 各々の葉面積指数に対して、最大の防風効果を示している。LAI=9.0 と比較して LAI=4.5, LAI=3.0 は 8%程度低い防風効果を示しているが、LAI=4.5, LAI=3.0 はどちらも LAI=9.0 程、数値の差がないために、ほとんど同じような防風効果を示している。LAI=1.8 のグラフにおいては、LAI=9.0 と比較して 30%程度、防風効果が低くなっていることを示している。

Fig. 5.1 (c) $x=2.5H$ において、LAI=9.0 と LAI=1.8 との防風効果の差が 33%ほどとなり、徐々に差が出始めることがわかる。

Fig. 5.1 (d) $x=3.5H$ において、(c) $x=2.5H$ までは LAI=4.5 と LAI=3.0 のグラフは、ほぼ重なるような形で似たような防風効果を示していたが、 $3.5H$ 離れた場所で、LAI=3.0 の方が若干 3%程度、防風効果が低くなりはじめた。これは、LAI=3.0 のくし型配列の形に関して、一番下流側もしくは 2 番目の列の樹冠部分から剥離した境界層が再付着していることが原因なのではないかと考えられる。また LAI=9.0 と LAI=1.8 との防風効果の差が 38%程となる。

Fig. 5.1 (e) $x=5.5H$ において、葉面積指数の数値が低くなるほど、防風効果も減衰していくことを表している。また LAI=9.0 と比較して LAI=4.5 は (a) $x=1H$ の時と同様、常に 8%程度の防風効果の低さを示した。LAI=3.0 は (c) $x=2.5H$ までは同じく 8%程度だったが、最終的に 18%程度の差が見られた。LAI=1.8 は (c) $x=2.5H$ までは同じく 30%程度の差だったが序々にその差は大きくなり最終的に 40%程度となっている。

	X=5.5H で LAI=9.0 を基準とした時の防風効果の減衰比率
LAI=4.5	8%減衰
LAI=3.0	18%減衰
LAI=1.8	40%減衰

Fig. 5.1 において全体的に, LAI=3.0, LAI=1.8 つまり最初の LAI=9.0 のキャノピー単体模型が最大に詰まった状態から考えて LAI が 1/3, 1/5 と低くなると, (d) $x=3.5H$ 程度の後流域から, 序々に防風効果が薄れてくることが見て取れる.

5.1.2 固定された測定位置での各葉面積指数の違いにおける乱れ強度の結果と考察

特定の後流域の測定点に固定し, それぞれの各葉面積指数に対して乱れ強度の分布を Fig. 5.2 に示す.

Fig. 5.2 (a) $x=1H$ において, LAI=9.0, 4.5, 3.0 では樹幹部分を通り抜けてきた流れによって出来る速度勾配の急な場所, 後流域における流れの速度勾配の急な場所との 2 つの明らかなピークが見られる. LAI=1.8 では若干の 2 つのピークは見られるが樹冠部分の密度の低さからか y 方向高さ 1 以下のピークの方が大きい. LAI=9.0 と比べて, それ以外の LAI=4.5, 3.0, 1.8 は, 最大ピークで 15% 程の乱れを持っており, 低葉面積指数が原因での乱れであると考えられる.

Fig. 5.2 (b) $x=1.5H$ において, LAI=4.5, 3.0, 1.8 の y 方向高さ 0.5 で低い方にあたるピークが, y 方向高さ 1.0 以上にあるピークより乱れが若干低くなってきている事が分かる. これは, 樹幹部を通り抜けてくる風が序々に拡散してきている事を示す.

Fig. 5.2 (c) $x=2.5H$, (d) $x=3.5H$ において, LAI=1.8 の y 方向高さ 0.5 にあったピークがほとんど存在しなくなることがわかる. LAI=4.5, 3.0 に対しては, ほぼ同様な乱れ強度の分布のグラフを示しており, ここで最大の乱れピーク 17.5% と 16% となる. LAI=9.0 との差も 6% 程度と一番大きくなる.

Fig. 5.2 (e) $x=5.5H$ において, LAI=4.5, 3.0 に対する乱れ強度のピークがここではじめて減衰する. このことから, LAI=4.5, 3.0 で, くし型配列の形における樹冠部分から剥離した境界層が再付着する限界点は (d) $x=3.5H$ ではないかと考えられる. そして, ほとんど常に同じ乱れを生成しているのは, 適度に葉面積指数が低い (LAI=4.5, 3.0) からではないかと考えられる. しかし, LAI=9.0 の y 方向高さ 1.5 のピークは次第に大きくなってきており, 葉面積指数が高い分, まだ再付着領域は後流域に続いており, 遂には, LAI=4.5, 3.0 の乱れより高くなることがわかる.

全体的に (d) $x=3.5H$ までは, 適度に葉面積指数が低い ($LAI=4.5, 3.0$) と乱れも高くなり, (e) $x=5.5H$ 以上になると葉面積指数が高い順に, 乱れも高くなることがわかった. また本実験では, 測定領域が $5.5H$ までであったので, $LAI=9.0$ での再付着領域限界点は明確にすることが出来なかった.

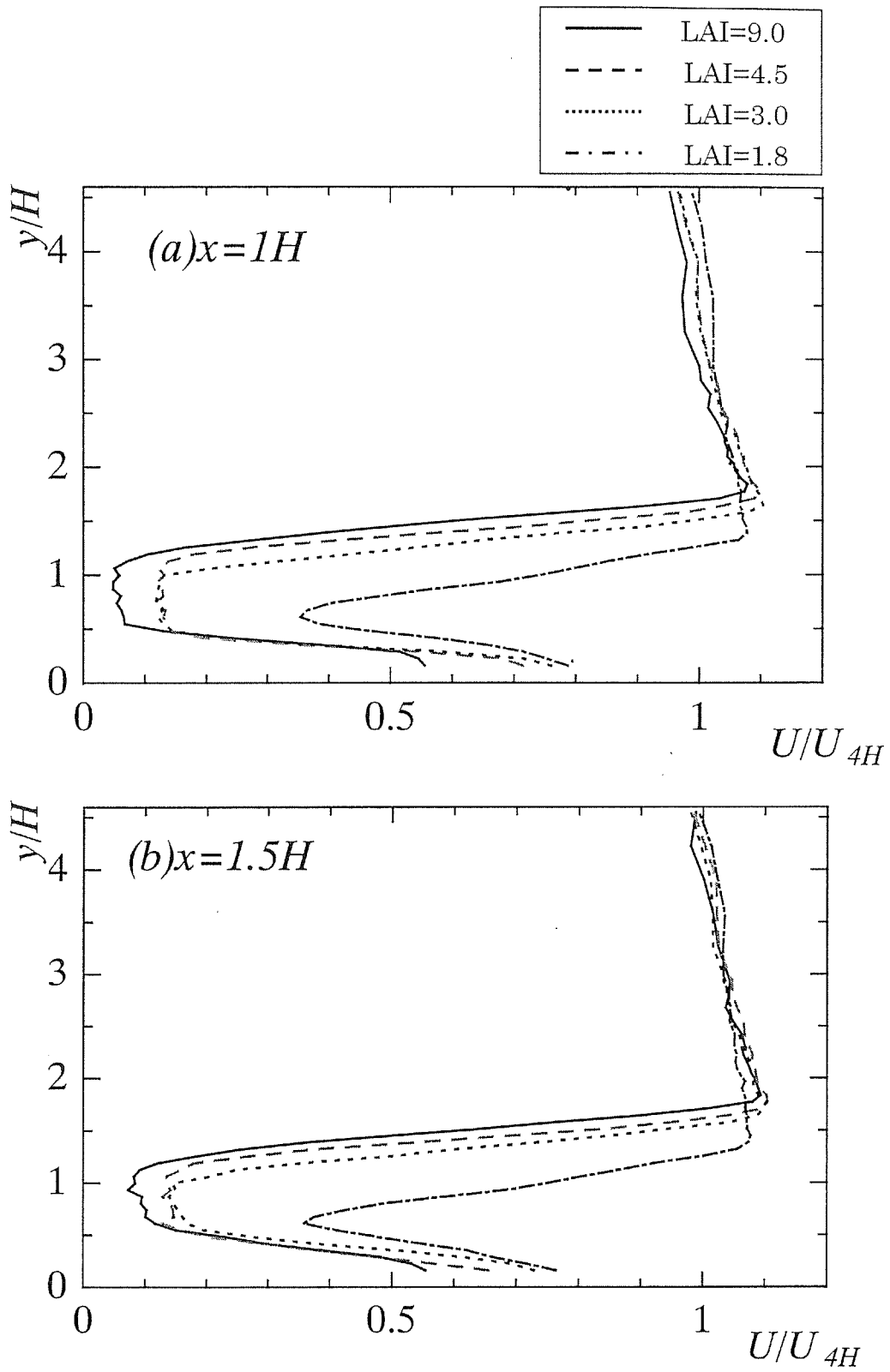


Fig. 5.1 各葉面積指数に対する平均風速の分布

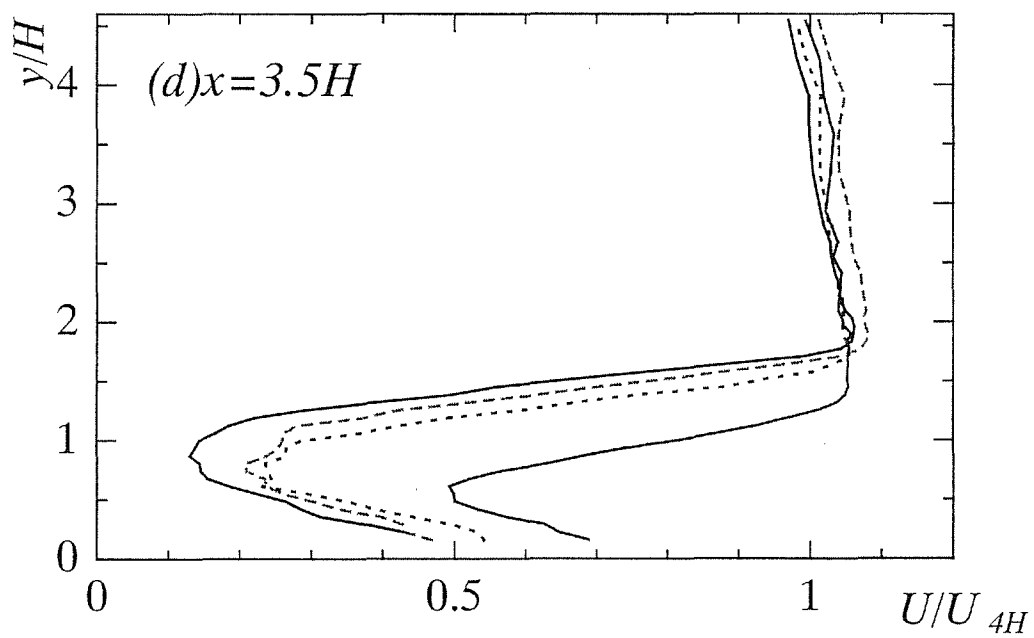
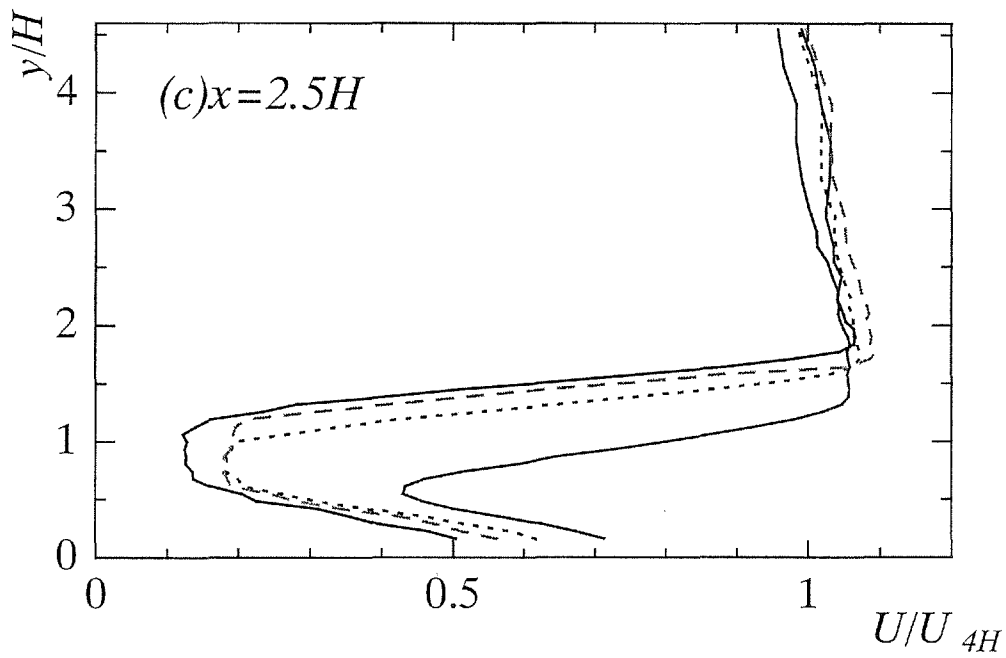


Fig. 5.1 各葉面積指数に対する平均風速の分布

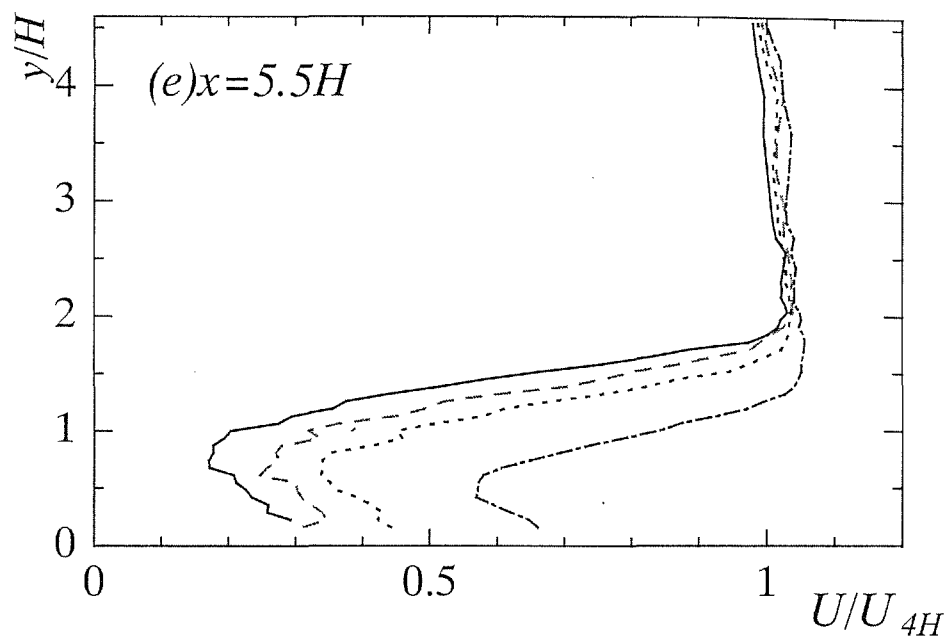


Fig.5.1 各葉面積指数に対する平均風速の分布

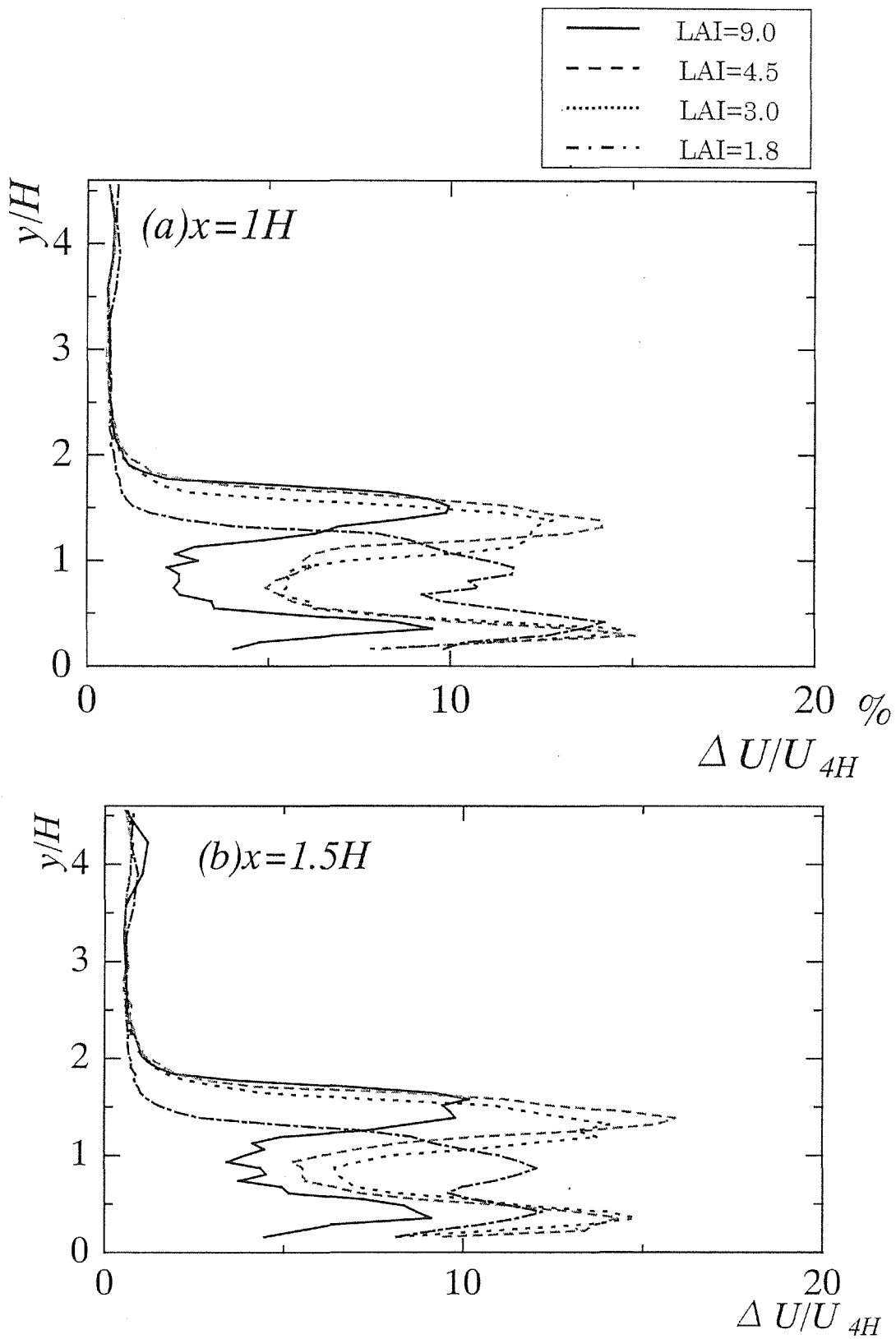


Fig5.2 各葉面積指数に対する乱れ強度の分布

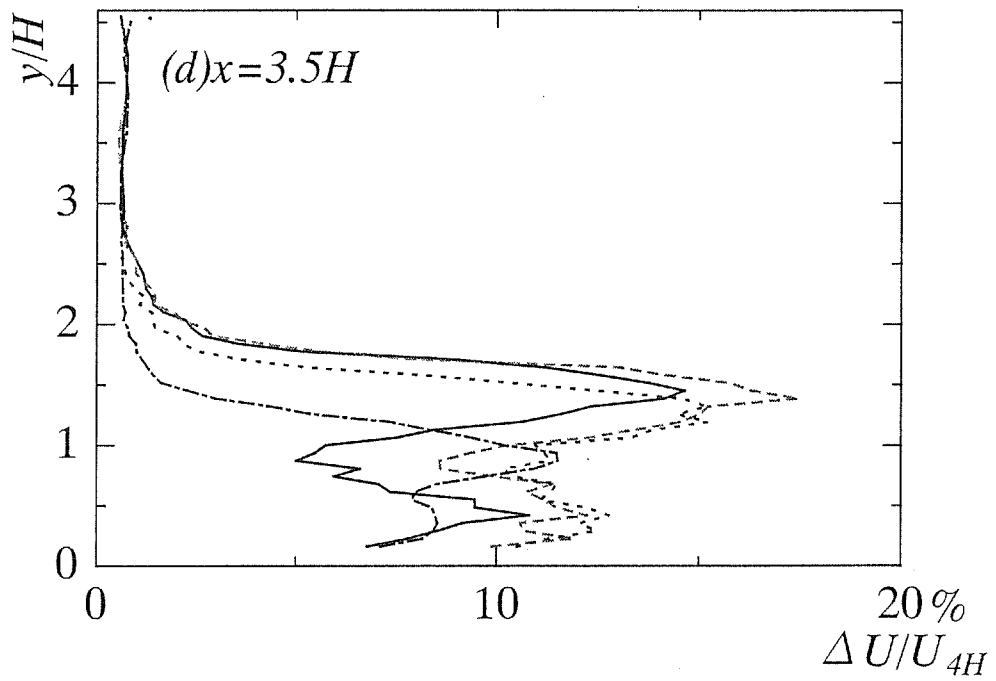
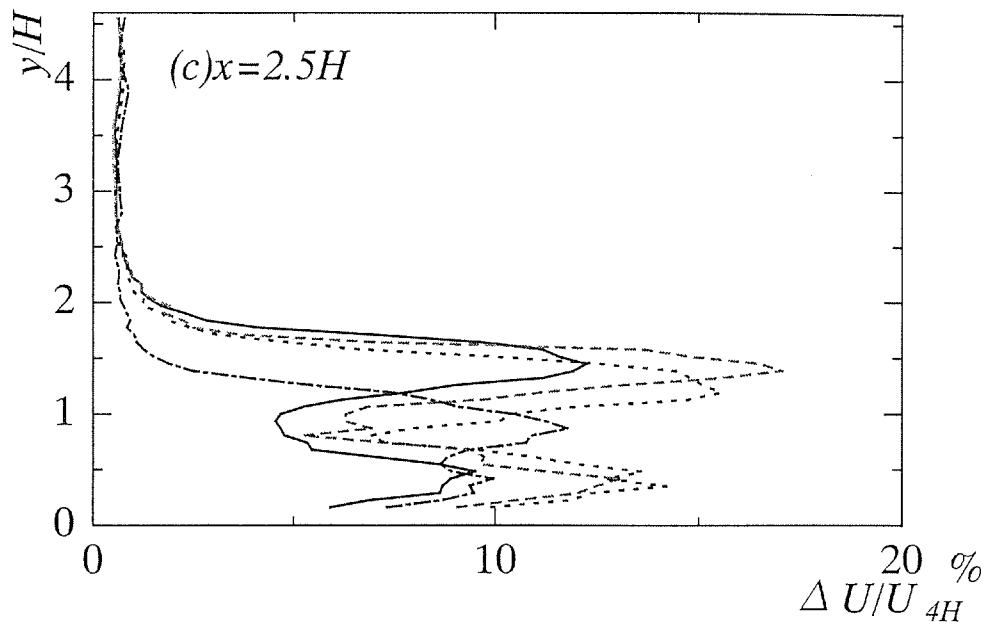


Fig5.2 各葉面積指数に対する乱れ強度の分布

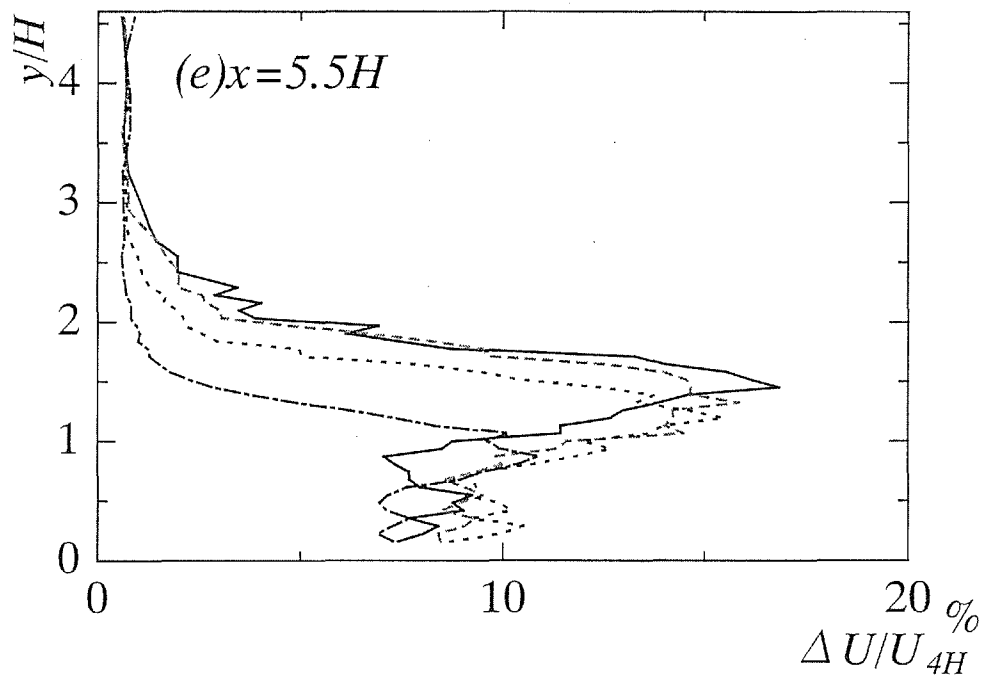


Fig5.2 各葉面積指数に対する乱れ強度の分布

5.2 キャノピー模型の各葉面積指数における後流域への推移

5.2.1 各葉面積指数に対する後流域への平均風速推移の結果と考察

それぞれの葉面積指数に対して、後流域への平均風速推移を測定した。Fig. 5.3 に平均風速推移分布を示す。

Fig. 5.3 について次のことが明らかになった。

(a) LAI=9.0 では最初の $x=1H$ と比較して、 $x=5.5H$ の後流域に達するまで 12% 程度の防風効果の減衰が見られた。

(b) LAI=4.5 では最初の $x=1H$ と比較して、 $x=5.5H$ の後流域に達するまで 15% 程度の防風効果の減衰が見られた。

(c) LAI=3.0 では最初の $x=1H$ と比較して、 $x=5.5H$ の後流域に達するまで 21% 程度の防風効果の減衰が見られた。

(d) LAI=1.8 では最初の $x=1H$ と比較して、 $x=5.5H$ の後流域に達するまで 25% 程度の防風効果の減衰が見られた。

	X=1.0H から X=5.5H に達するまでに減衰する防風効果比率
LAI=9.0	12%減衰
LAI=4.5	15%減衰
LAI=3.0	21%減衰
LAI=1.8	25%減衰

どの LAI に対しても、各後流域に対して、約 2.5% 程度ずつ防風効果は減衰していくことがわかった。同様に、防風効果を示す、y 方向高さの幅は $x=5.5H$ の後流域に達するまで 50% 程度狭まることもわかる。

y 方向高さ 0.5 以下では、下流域に行けば行くほど、風速は遅くなっている。これはキャノピー模型から離れていくことで、樹幹を通り過ぎる風と、樹冠を通る風との区別がつかなくなっているからである。

y 方向高さが 1.75 以上のところでは、どの下流域においてもキャノピー模型が及ぼす防風効果は見られない。

5.2.2 各葉面積指数に対する後流域への平均風速推移の結果と考察

それぞれの葉面積指数に対して、後流域への乱れ強度推移を測定した。Fig. 5.4 に乱れ強度推移分布を示す。

Fig. 5.4 について次のことが明らかになった。

(a) LAI=9.0 においては、下流域に行けば行くほど、乱れは大きくなっていくことがわかる。これは、樹冠部分で剥離した境界層が再付着していることが原因であると考えられる。しかし、測定領域の限界があるために再付着領域を明確にするとこまでには至らなかった。また、各々の下流域に対して、樹幹部分を通り抜けてきた流れによって出来る速度勾配の急な場所、後流域における流れの速度勾配の急な場所との2つの明らかなピークが残っていく。

(b) LAI=4.5, (c) LAI=3.0 においては、y 方向高さ 1.5 でのピークで、 $x=3.5H$ までは徐々に乱れは大きくなるが、 $x=5.5H$ になると乱れが小さくなる。くし型配列の形においての樹冠部分から剥離した境界層が再付着する限界点が $x=3.5H$ なのではないかと考えられる。更に y 方向高さ 0.5 でのピークは下流域に行くに従って減衰していき、最終的には存在しなくなっている。これは、測定点がキャノピー模型から離れるほど急な速度勾配がなくなるからである。

(d) LAI=1.8 においては、y 方向高さ 1 でのピークは、 $x=3.5H$ までは後流域に測定点を変化させても、あまり乱れの違いは見られない。これは、どの下流域においても乱れが約 12% 程度で一定であることを示しており、急激な防風効果の変化が見られないことになる。

y 方向高さ 3 以上ではキャノピー模型による影響は見られず、ほぼ乱れが存在しない事がわかる。

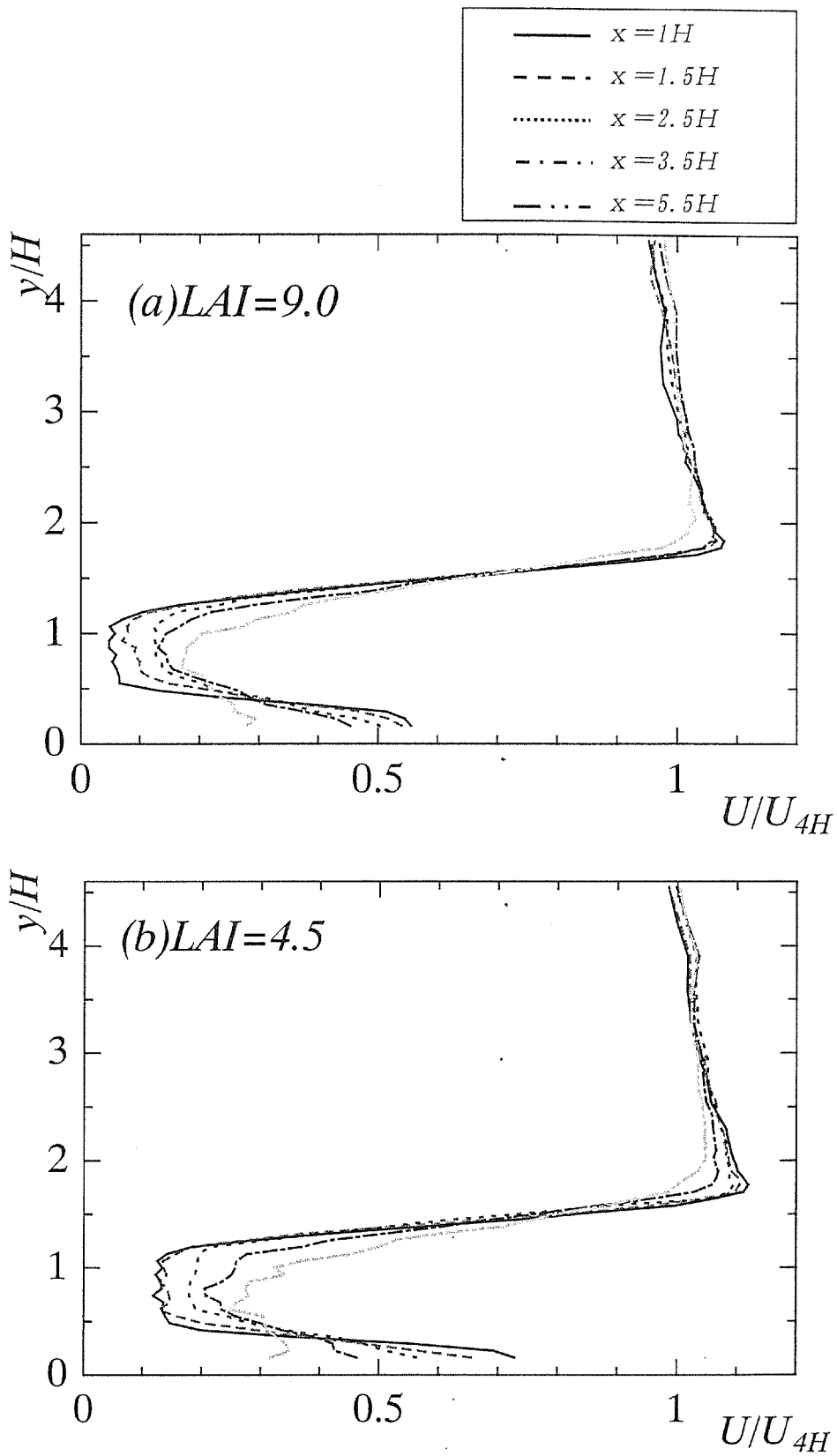


Fig. 5.3 特定の葉面積指数での後流域に対する風速推移分布

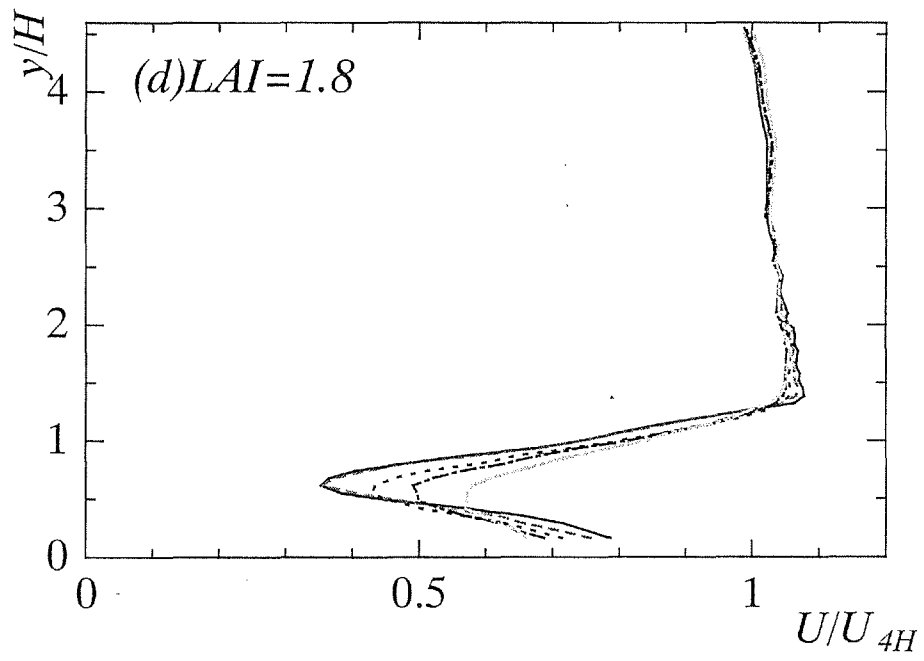
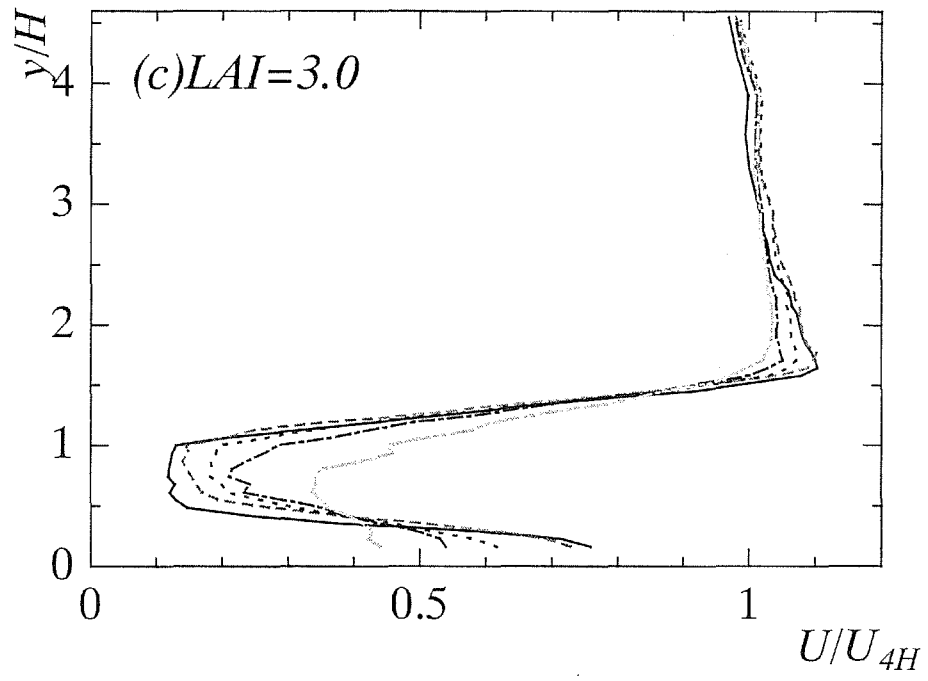


Fig. 5.3 特定の葉面積指数での後流域に対する風速推移分布

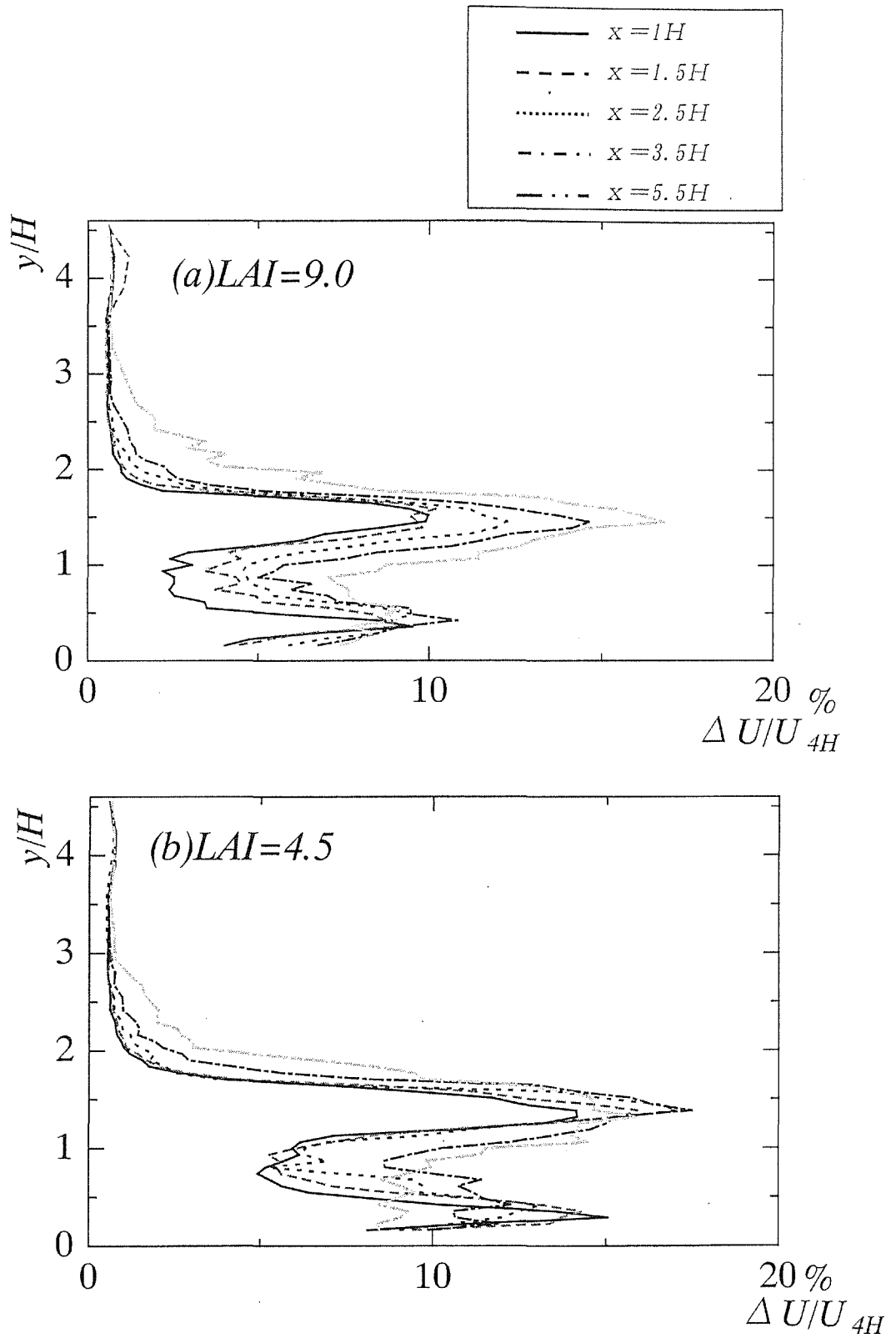


Fig. 5.4 特定の葉面積指数での後流域に対する乱れ強度風速推移分布

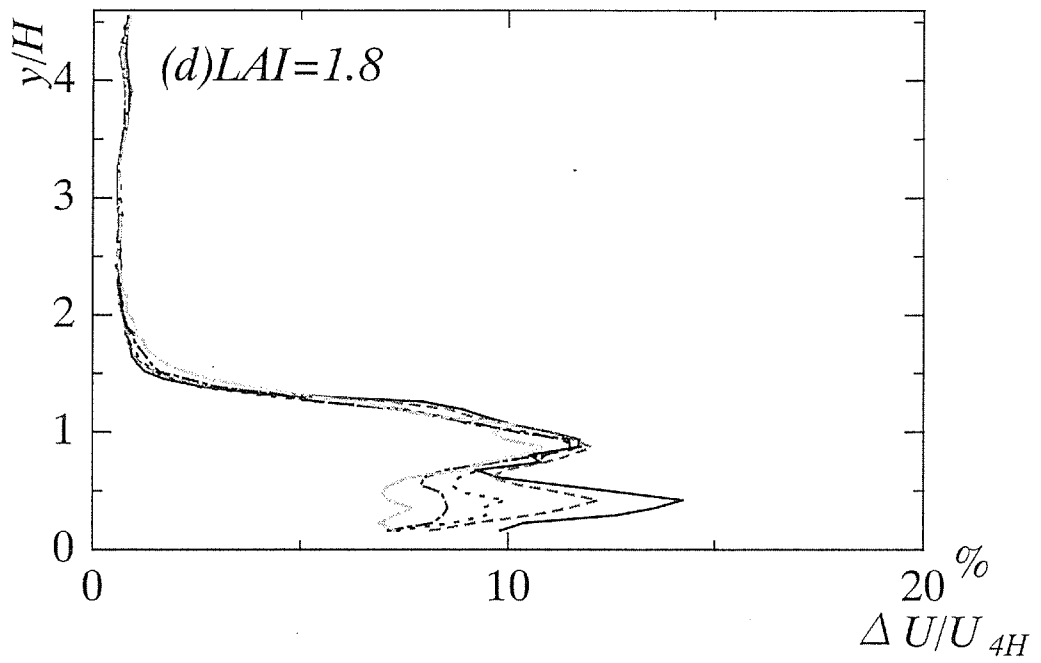
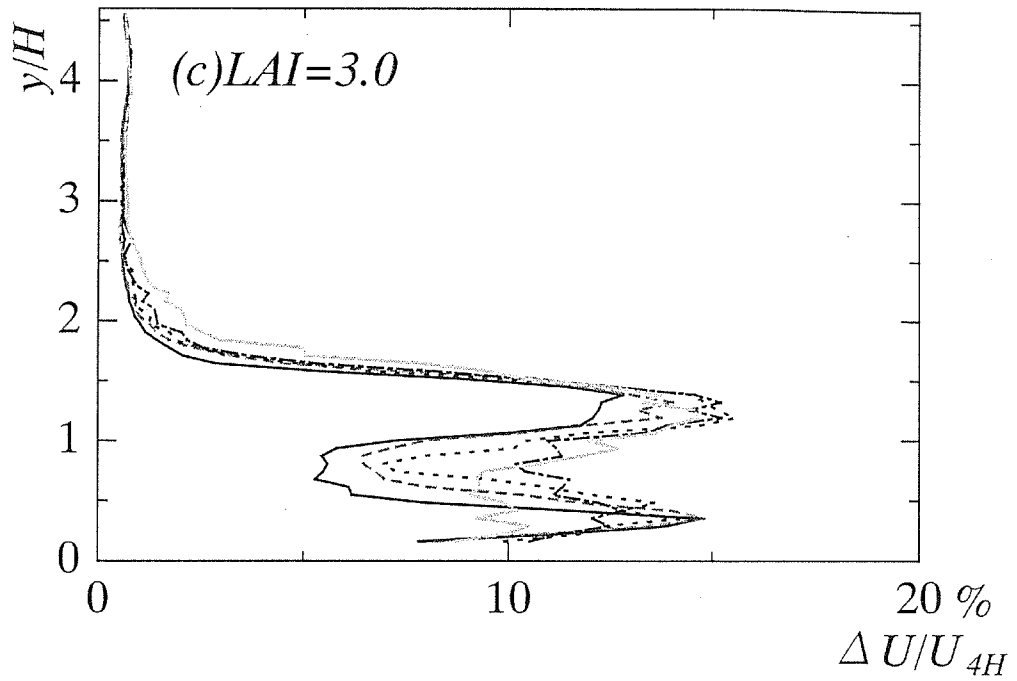


Fig. 5.3 特定の葉面積指数での後流域に対する風速推移分布

第6章 まとめ

本実験では, 大型乱流風洞を利用して, くし型配列状に形成させたキャノピーモデルに一樣流を流入させ, 葉面積指数変化に対する流れ場の影響を知るために, その後流域の平均風速や, 乱れ強度の変化を測定した. 以下に本実験で得られた結果を示す.

- (1) 葉面積指数変化における平均風速のグラフで, 最終測定領域である $x=5.5H$ において防風効果減衰率として基準を $LAI=9.0$ とすると, $LAI=4.5$ の時 8%, $LAI=3.0$ の時 18%, $LAI=1.8$ の時 40% の減衰がそれぞれ見られた.
- (2) $LAI=3.0$, $LAI=1.8$ つまり最初の $LAI=9.0$ のキャノピー単体モデルが最大に詰まった状態から考えて LAI が $1/3, 1/5$ と低くなってくると, $(d)_{x=3.5H}$ 程度の後流域から, 顕著に防風効果が段々と薄れてくることを見て取れるようになる. また $(d)_{x=3.5H}$ では, それまで $LAI=4.5$ と同じようなグラフを示していたのが, ずれてくる傾向を示した. これは $LAI=3.0$ のくし型配列の構造上, 一番下流側もしくは2番目の列の樹冠部分から剥離した境界層が再付着していることが原因と上げられる.
- (3) 葉面積指数変化における乱れ強度のグラフにおいて $(c)_{x=2.5H}$, $(d)_{x=3.5H}$ において, $LAI=4.5, 3.0$ は, 大体似通ったグラフをしておりここで最大の乱れピーク 17.5% と 16% となる. $LAI=9.0$ との差も 6% 程度と一番広くなるが分かった.
- (4) 全体的に $(d)_{x=3.5H}$ までは, 適度に葉面積指数が低い ($LAI=4.5, 3.0$) と乱れも一番高くなる. これは $LAI=4.5, 3.0$ で, くし型配列の形においての樹冠部分から剥離した境界層が再付着する限界点が $(d)_{x=3.5H}$ ではないかと考える. また $(e)_{x=5.5H}$ 以上になると葉面積指数が高い順に, 乱れも高くなることがわかった. また本実験では, 測定領域が $5.5H$ までであったので, $LAI=9.0$ での再付着領域限界点は明確にすることが出来なかった.

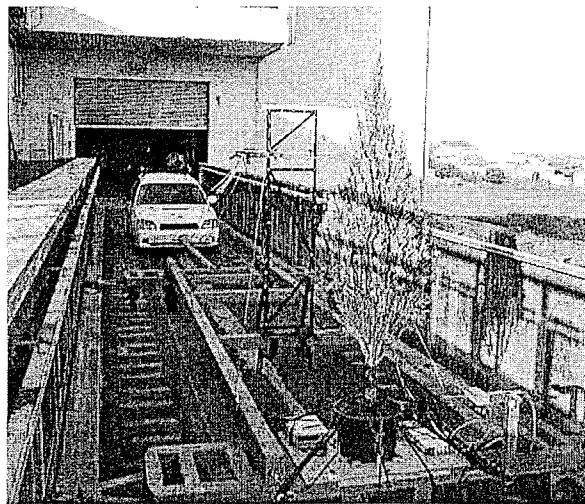
- (5) 各葉面積指数において測定領域 $x=1.0H$ から $x=5.5H$ に達するまでに減衰する平均風速の防風効果推移比率として, LAI=9.0 の時 12%, LAI=4.5 の時に 15%, LAI=3.0 の時に 21%, LAI=1.8 の時に 25% の減衰が見られた.
- (6) どの LAI に対しても, 各後流域に対して, 約 2.5% 程度ずつ防風効果は減衰していくことがわかった. 同様に, 防風効果を示す, y 方向高さの幅は $x=5.5H$ の後流域に達するまで 50% 程度狭まる.
- (7) $x=5.5H$ の後流域に達するまでの乱れ強度の減衰傾向として

LAI=9.0 の場合は, 後流域にいけばいくほど乱れ強度の最大ピークは大きくなり, 約 8% 程度増加する. これは, 樹冠部分から剥離した境界層が再付着する領域が広いことを意味し, 本実験では領域限界点を明らかにすることは出来なかった.

LAI=4.5, 3.0 の場合は, $x=3.5H$ までは序々に乱れは大きくなるが $x=5.5H$ の後流域に達すると乱れが低くなる. これもやはり, くし型配列の形における樹冠部分から剥離した境界層が再付着する限界点が (d) $x=3.5H$ ではないかと考える.

LAI=1.8 の場合は, どの下流域においても乱れ強度の最大ピークが 12% 程度で一定であることを示し, 急激な防風効果の変化が見られないことが分かった.

第2部 曳航風洞による供試樹木の下流域 における流れ場特性の計測



第7章 はじめに

第2部では、曳航風洞を使用して、供試樹木の下流域における流れ場の特性の計測を行うこととする。苗木のサカキを供試樹木とし、乱流風洞で実験を行った結果、苗木というまだまだ成長段階の小さい樹木のため実験結果に再現性が得られないこと、このサカキの樹木は、全体的に小さく枝葉の付き方も少ない。このため、葉面積指数が非常に低く、主流に対する揺れなどもあまり観測できなかった。

そこで成長した針葉樹（モミの樹）を使用することにした。全体的に柔らかく、弾力性もあり、揺れに対して敏感であると考えたためである。しかし、成長した大きな樹木であるために、乱流風洞で実験は不可能であり、高さ制限がない曳航風洞を利用することにした。

実験施設として、宮崎県にある（財）鉄道総合技術研究所が所有する「浮上式鉄道宮崎実験センター」（旧リニア実験線）を利用している。この施設は、全長7km、幅3.5m、高さ1.4mのコンクリート構造を有しており、この実験施設のガイドウェイの中で、供試樹木を載せた台車を乗用車で押して実験を行う。ただ、屋根がまだ付いていないために、向かい風、横風、追い風、タイヤの振動など外乱も多く、計測は困難なものとなった。それでも、振動が少ないように走行し、無風の早朝や夕方を中心に細心の注意が払われた。

本実験では、曳航風洞の施設を利用して、枝葉の揺れや幹のしなり、風の透過性まで現実性のある測定を再現し、風に対する樹木の反応と、それに対応する後方流の関連性を探ることを目的とした。

第8章 曳航風洞実験装置及び供試樹木

8.1 実験施設（ガイドウェイ）

実験施設には、宮崎県にある（財）鉄道総合技術研究所が所有する「浮上式鉄道宮崎実験センター」（旧リニア実験線）を利用している。図8.1～図8.3に曳航風洞として利用したガイドウェイの参考図を示す。この施設は、全長7km、幅3.5m、高さ1.4mのコンクリート構造を有している。実験使用区間は、実験棟から500m程の区間である。

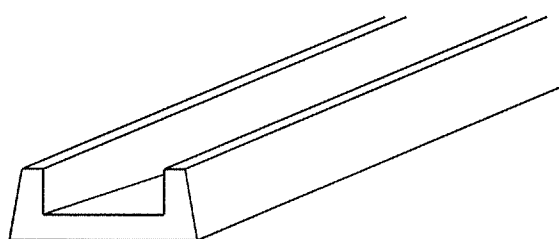


図8.1 ガイドウェイ全体概略図

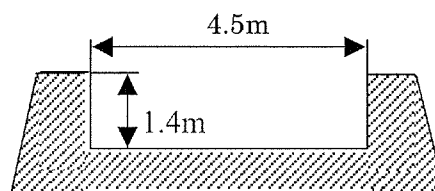


図8.2 ガイドウェイ断面図



図8.3 ガイドウェイの写真

8.2 曳航風洞の実験装置

本実験では、曳航実験つまり、供試樹木を取り付けた台車ごと実際に走行させて供試樹木周りの流れを計測するので、実験装置も大掛かりなものになった。以下に供試樹木、台車、トラバース装置等の詳細を記す。台車は、1回の測定毎にバックさせ、これを繰り返して実験を行う。

8.2.1 供試樹木

図8.4のように、予備的に乱流風洞の中でサカキの苗木を使用して実験が行われた。苗木ということもあり実験期間中でも成長してしまい、変形が著しく見られ、再現性をとることが困難であった。また少し小さめの苗木ということもあって、葉面積指数の低さ、風に対する枝葉の揺れの小ささ、枝葉の付き方からくるバランスなど、実験を行うにあたっての不具合な点がいくつかあった。

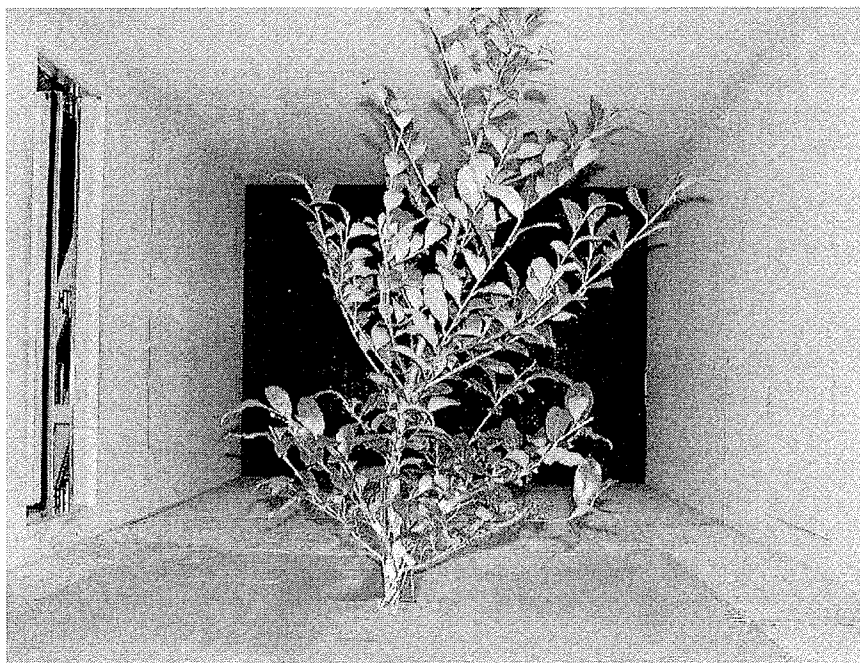


図 8.4 風洞内のサカキの苗木

この予備実験を踏まえて、苗木ではなく成長した樹木を使用することにした。実際に防風林に使用されている針葉樹であるモミの木（コロラドピャクシンウィッチタブルー）を取り扱う。

今回の供試樹木であるウィッチタブルーは、樹高 $H=2000\text{mm}$ 、最大幅 $W=800\text{mm}$ と大きく成長しており、風に対するしなりも大きいことから決定された。また、前述のサカキのように大きな葉はないが、樹木全体が針葉で覆われており、バランスもきれいに整っているのが特徴である。

図 8.5 に曳航台車に取り付けられた供試樹木を示す。また、図 8.6 にその寸法の概略を示す。



図 8.5 台車に設置された供試樹木

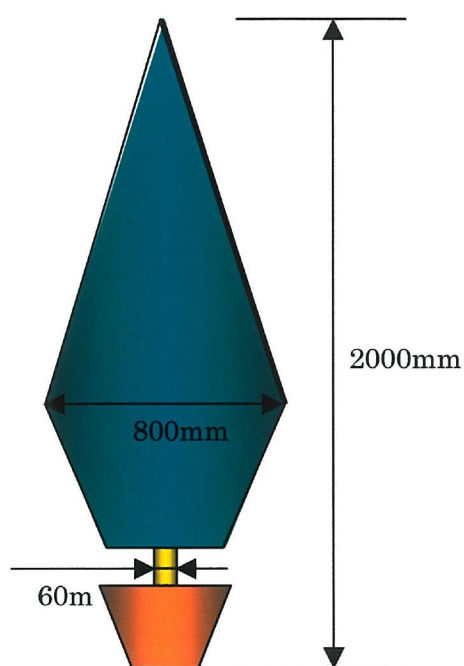


図 8.6 供試樹木イメージ図

8.2.2 葉面積指数測定装置

第2章でも詳しく述べたが、樹木の特徴の一つに葉面積指数(LAI)がある。このLAIの測定には、図8.7に示すLAI-2000Plant Canopy Analyzer(LI-COR社)を使用した。

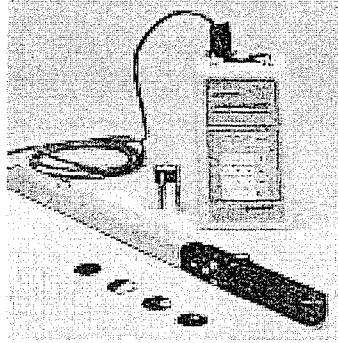


図8.7 LAI-2000Plant Canopy Analyzer

このLAI-2000Plant Canopy Analyzerは、天頂からの光の量が群葉を通過することによりどの程度減衰したかを測定することで葉面積指数を得ることができる。測定には光の均一さなどが条件にあり、曇りの日などに行うように薦められている。

今回の測定方法としては、図8.8に示すように天頂からの光量をまず測定し、次に群葉を通過する光の量を葉の付き方の違いなどに考慮して、群葉の下から4回測定し平均化することにした。

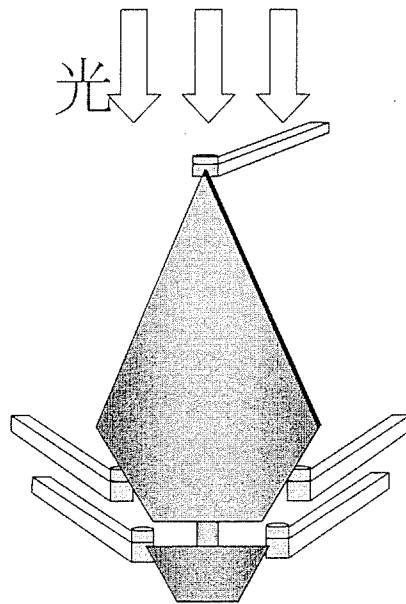


図8.8 葉面積指数の測定

供試樹木を縦に置いて測定した結果と横に向けて測定した結果を、表 6.1 に示す。また、針葉樹の葉面積指数は一般的に、その針葉の特殊な断面形態に依存している。針葉が円筒形なら全面積と投影面積の変換係数は π に、半円筒形なら 2.57 ($\pi/2+1$) に、完全な平面葉（広葉）ならば 2 ということがいえる。今回、使用した供試樹木は、比較的円筒形の針葉が多かったことから、変換係数に π を使用して葉面積指数を算出した。

表 6.1 供試樹木の葉面積指数

	LAI 測定値	変換係数	実際の LAI
縦置き	1.65	π	5.43
横置き	1.8	π	5.65

この結果より、供試樹木を縦置きにした結果と、横置きにした結果は同じような値を示している。実際には風は供試樹木の横側から吹き抜けるので、横置きの時の値 LAI=5.65 を採用することにする。また、一般的に針葉樹の葉面積指数は $3 \sim 6$ と報告されており、今回の計測値はこれらと比較しても妥当な値である。なお、サカキの苗木と比べても LAI の値が 2 倍程度大きな供試樹木を使用することになる。

8.2. 台車及びトラバース装置

本実験において、供試樹木を支え走行する台車と、その供試樹木の後流を測定するためのトラバース装置が必要となる。

トラバース装置の概略を図 8.9 及び図 8.10 に示す。図 8.9 に示すように台車からの揺れを考慮して、出来るだけぶれがないように熱線プローブのサポートを亚克力板と板でボルトを用いて固定した。次いで、図 8.10 のようにそのプローブサポートを供試樹木の広い下流範囲で流速を測定できるようにトラバース装置に固定してある。固定方法は、数個の万力とワイヤーを使用し、さらに着脱が可能であるため自在にどの位置でも測定することができる。

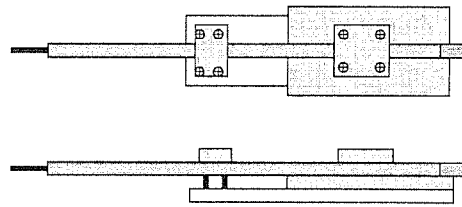


図 8.9 プローブサポート

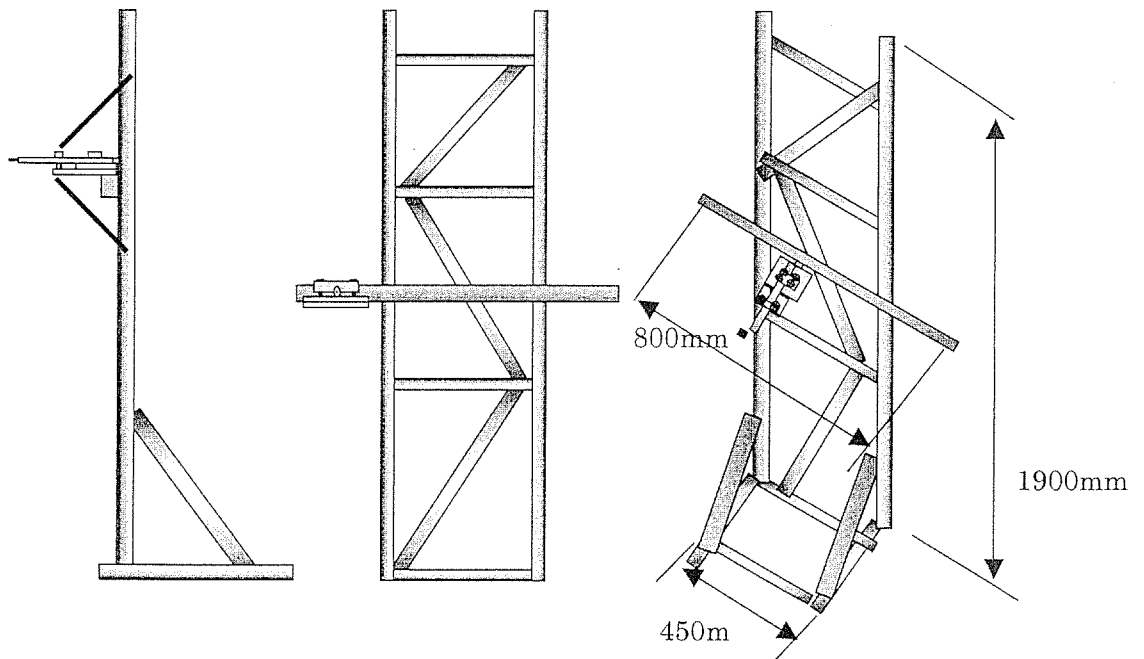


図 8.10 トラバース装置

次に図8.11のように、台車に供試樹木とトラバース装置を設置する。供試樹木と台車は、台車の上にベニヤを敷き、その上に供試樹木の鉢ごと載せて、ゴムひもで何重にも巻きつけ固定した。トラバース装置と台車は、まず台車の中間くらいにある梁に万力4本で締め付け、さらにトラバース装置の台車からの揺れを直接受けないようにワイヤー4本で台車側と固定した。

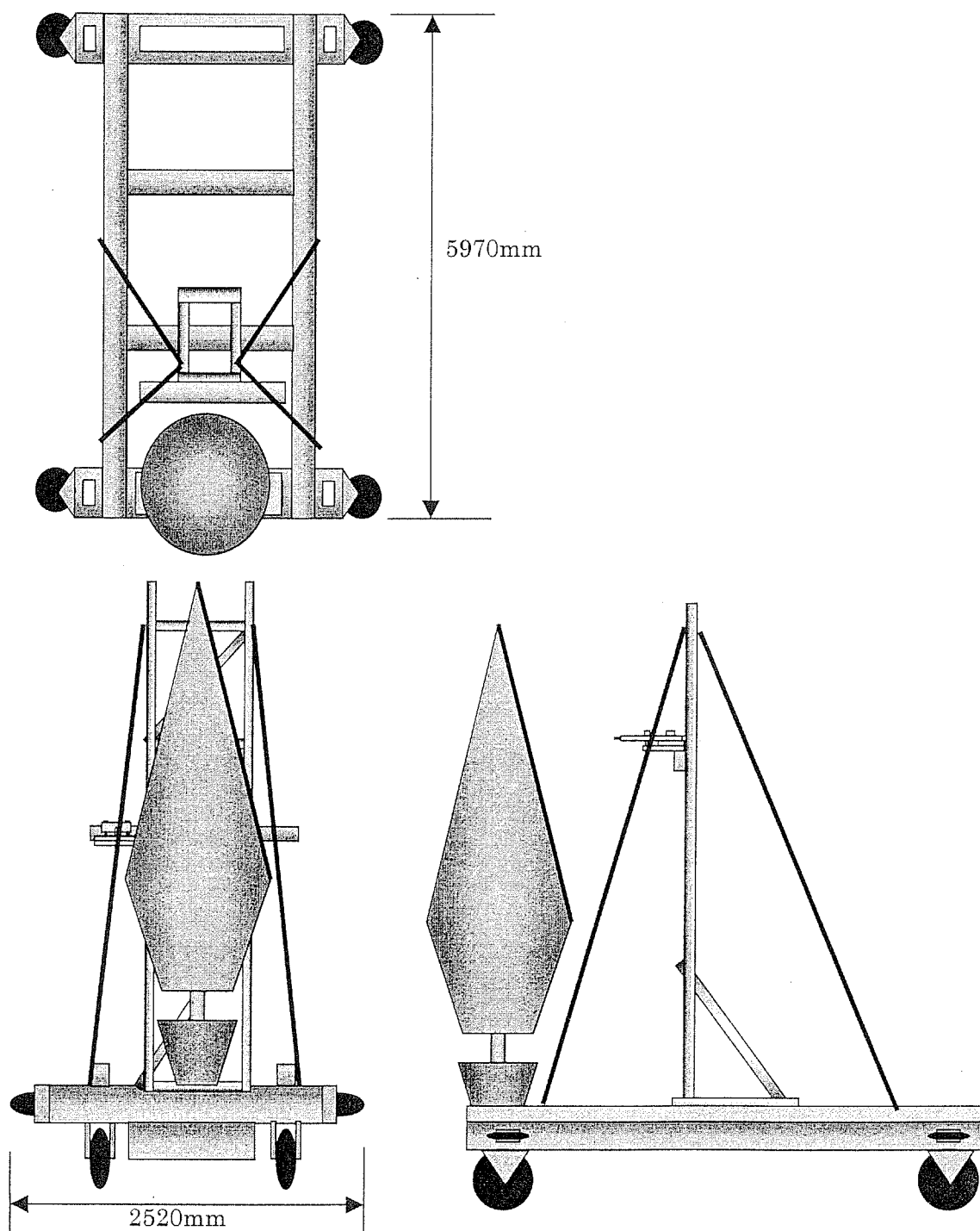


図8.11 台車に設置された供試樹木とトラバース装置

8.3 計測装置

- (1) 供試樹木後流の平均風速及び乱れ強度は、熱線流速計(KANOMAX, CTA SYSTEM ANEMOMETER1010, VOLTMETER1015, リニアライザー1013)で測定し、熱線プローブにはI型プローブを使用した。さらに、そのアナログ電圧をA/D変換カードを介し、デジタルデータとしてノートパソコンに取り込む。A/D変換カードはKEYENCE社製「NR-110」を使用した。ノートパソコン上でデジタル波形の収集と解析を行うソフトとしてKEYENCE社製「波形データ観測ソフト<WAVE SHOT!>」を使用した。
- (2) 無限上流側にピトー管を設置した。ピトー管からの差圧を拡散形半導体圧カトランスデューサ(豊田工機)を介して、DC AMP AA 6200(豊田工機)に取り込み、電圧計を確認しながら(1)WAVESHOTで測定した。
- (3) 供試樹木の後流のパワースペクトルの測定には、FFTアナライザー(ONO SOKKI CF-3200)を使用した。
- (4) 供試樹木の振動測定に図8.12に示すひずみゲージ(KYOWA KFH-1-120-C1-11,)及び動ひずみ測定器(KYOWA DPM-712B)を使用した。動ひずみ測定器からの信号も,(3)同様、FFTアナライザー(ONO SOKKI CF-3200)に取り込み計測した。

どの測定器も、発電機(HONDA)から電源を得ることになっている。

図8.13に計測及び制御の概略図,8.14~図8.18に実験装置の参考写真を示す。

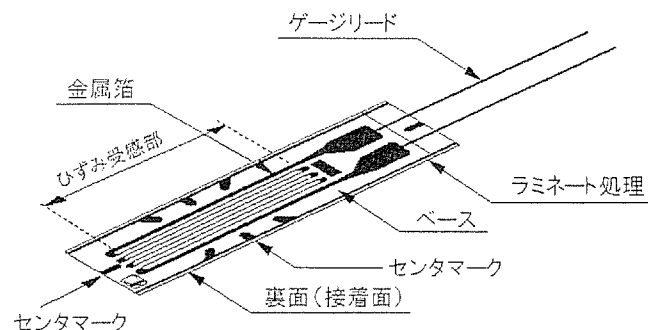


図 8.12 ひずみゲージ

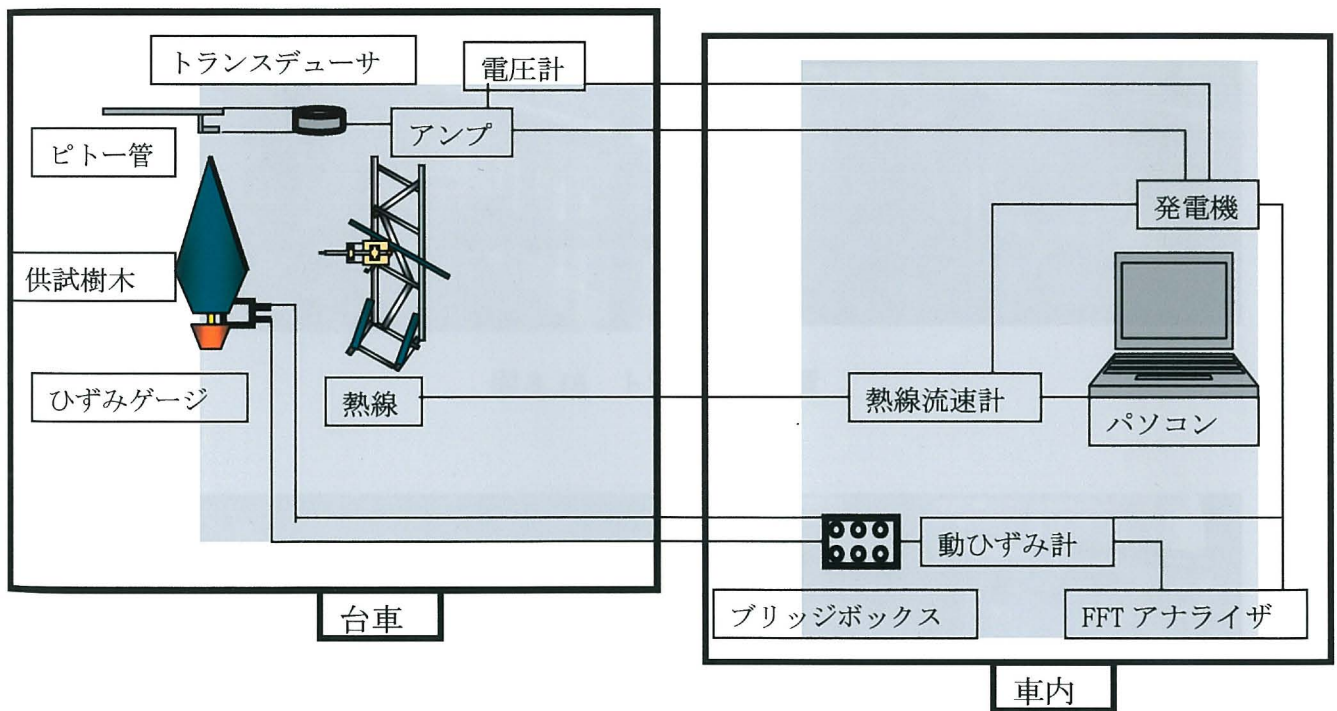
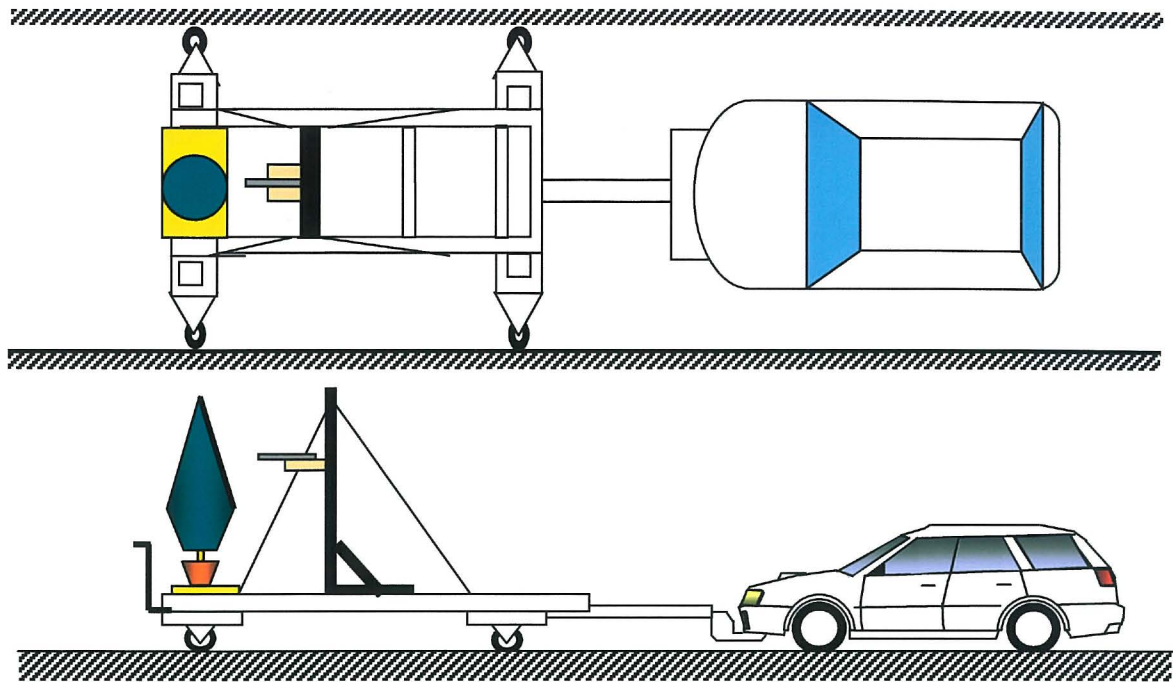


図 8.13 計測装置全体図及び計測と制御の概略



図 8.14 実験装置全体



図 8.15 走行中の実験状態



図 8.16 トラバース装置

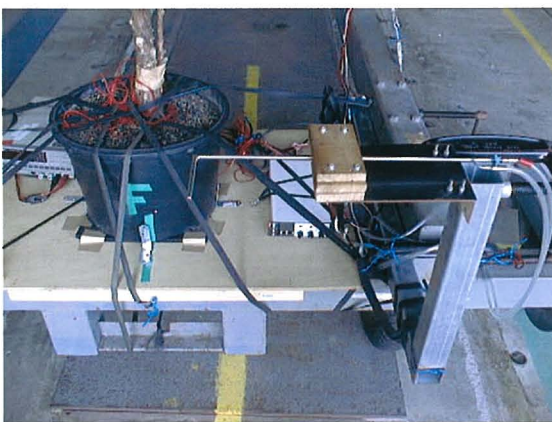


図 8.17 台車に固定された樹木



図 8.18 車内測定装置

第9章 実験方法

9.1 主流の測定方法

本実験では、供試樹木の土台の耐える風速、走行安全距離、走行安全速度、などを考慮して車速36km(風速10m/s)、車速18km(風速5m/s)を主流として設定し、一番誤差の少ないとされるI型熱線プローブで測定する。乱れは無風時で5~7%、ただし、屋外の実験であるために、追い風、向かい風、横風の影響を大きくうけることもあり、乱れは13~18%程となる。また供試樹木の後流のスペクトルも、I型プローブを用いて主流方向成分のみを計測した。またFFTにおける計測は、平均処理設定回数を1024回とした。

また本実験でのレイノルズ数は、平均風速 $U = 10\text{m/s}$ 及び平均風速 $U = 50\text{m/s}$ についてそれぞれ以下となる。ただし、代表長さ H は $H = 2.0\text{m}$ であり、動粘性係数 ν は $\nu = 1.4 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ とする。

$$U = 10\text{m/s} \text{ の場合} : \text{Re} = \frac{U \times H}{\nu} = 1.42 \times 10^5$$

$$U = 5\text{m/s} \text{ の場合} : \text{Re} = \frac{U \times H}{\nu} = 7.1 \times 10^4$$

9.2 樹木の振動のパワースペクトル

9.2.1 供試樹木へのひずみゲージの貼り付け方法

第2部で使用する実物の樹木が第1部で用いられたキャノピー模型と大きく異なる点として、樹木が風の大きさや振動に反応して“しなり”や振動を生じさせることにある。この振動を測定し、パワースペクトルを検出するために、ひずみゲージを用いる。本来、ひずみゲージは金属のような平滑な平面に貼り付けるものであるため、樹木に使用する場合には従来の瞬間接着剤では接着力が足りず、細い枝のような極小半径の曲面に対して十分に測定面が密着しないなどの問題があった。そこで、いくつかの接着方法を試みてみたところ、表9.1に示すようにどの方法を用いても樹木の振動スペクトルがピークを示す周波数に変化はなかった。しかし、図9.1に示すように、そのスペクトルピークの絶対値に差が生じている。この中でゴム製のボンドで接着する方法が、接着力、密着性及びパワースペクトルの絶対値を考慮して最も適切であると判断し、従来の接着法を使える根元部分以外のすべての測定部で使用した。

表 9.1 ひずみゲージ貼り付け方法とその特徴

接着方法	詳細	特徴
瞬間接着剤	測定面を削って滑らかにし，瞬間接着剤を用いてゲージを貼り付ける．	ひずみゲージの従来への貼り付け方法．接着の条件が限定されるので，樹木に対しては接着力が弱く，接着の自由性に乏しい．
紙	ゲージを薄い紙の土台に貼り付け，それを測定面に接着する．	ゲージの湾曲を小さくして接着できるが，測定部への接着面積が小さくなり，また紙であることからひずみへの反応が若干悪く，検出されるひずみが小さくなる．
プラスチック	ゲージを薄いプラスチックの土台に貼り付け，測定面に接着する．	紙に比べひずみへの反応性がよいが紙と同様に接着面積が小さい．
ゴム接着剤	ゴム素材の接着剤を用いて測定部に貼り付ける．	接着力が強く，また接着面の自由性も高い．ひずみへの反応も十分である．

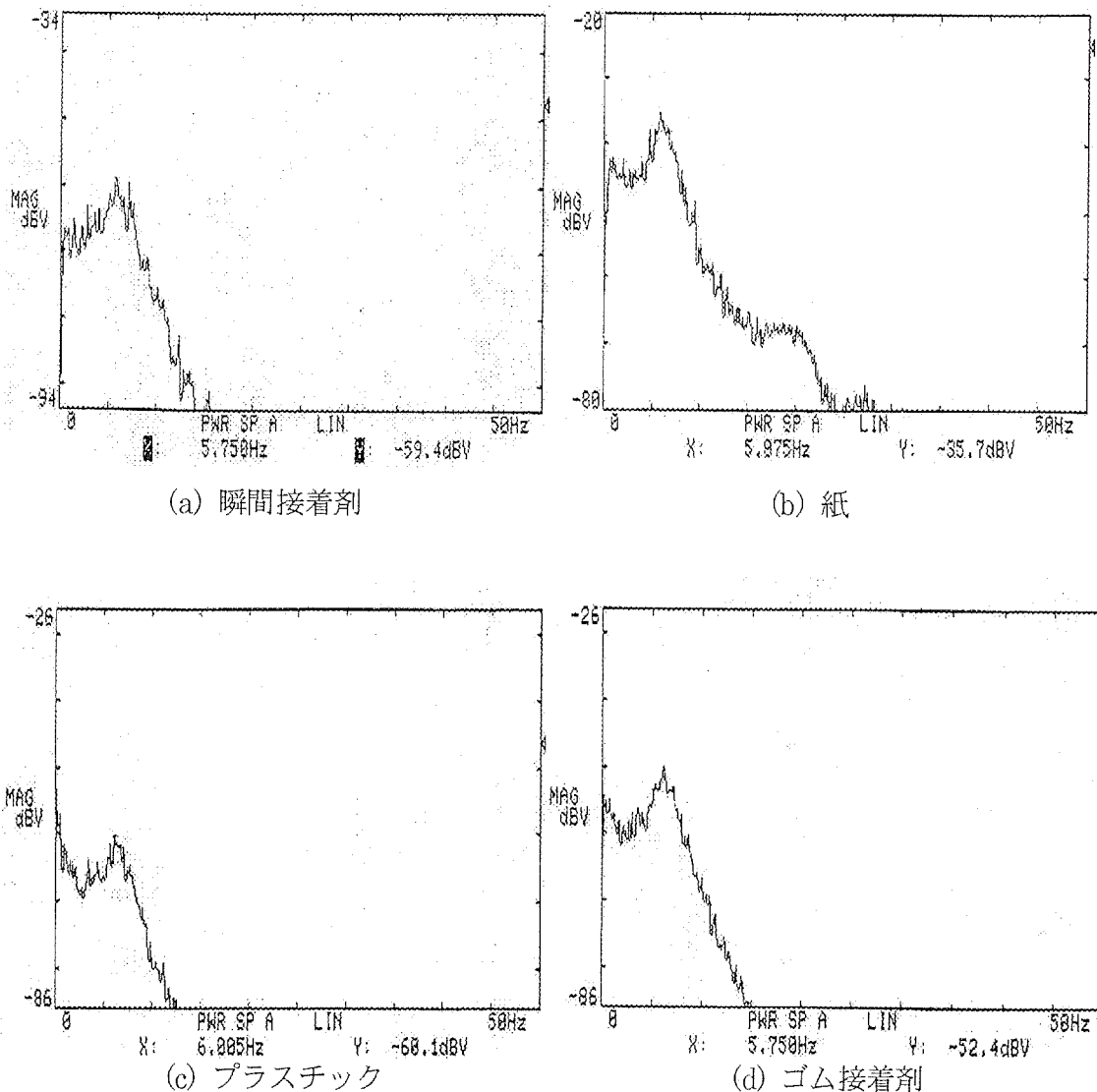


図9.1 各貼り付け方法によるパワースペクトル

9.2.2 供試樹木へのひずみゲージの貼り付け位置

本研究に使用する供試樹木には、図9.2に示すような合計3ヵ所にひずみゲージを貼り付けた。点(a)は幹の根元($y/D, z/H$)=(0, 0.15), 点(b)は最大幅の位置にある枝の根元の($y/D, z/H$)=(-0.375, 0.5), 点(c)としてその枝の最終端にあたる細い枝($y/D, z/H$)=(-0.125, 0.35)である。各座標については、次節9.3において定義する。さらに、樹木だけでなく、樹木を支える台車等の振動を把握するために、台車(図9.3)及びトラバース枠(図9.4)にもひずみゲージを取り付けた。台車は下流から見て左側の梁の $x/H=1.35$ の位置に、トラバース枠は下流から見て左側の根元上の3cmの場所に貼り付けてある。どちらも一番たわみやすく、ひずみが検出できそうな場所を選んでいる。樹木の揺れに及ぼす台車等の振動も考慮して実験を行えるように配慮した。

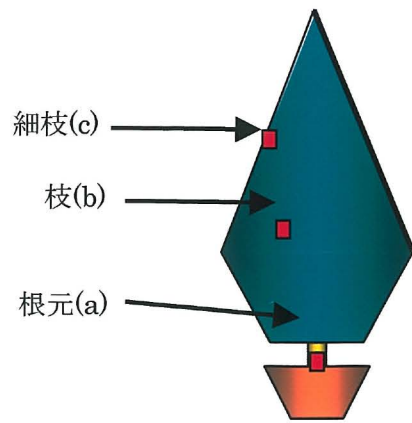


図 9.1 供試樹木におけるひずみゲージ位置

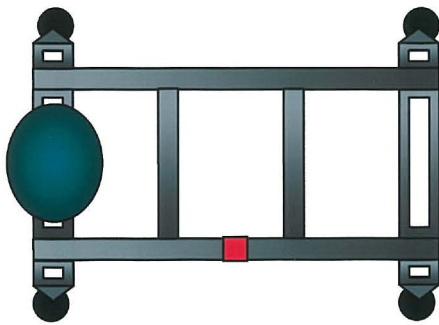


図 9.2 台車に貼付されたひずみゲージ位置

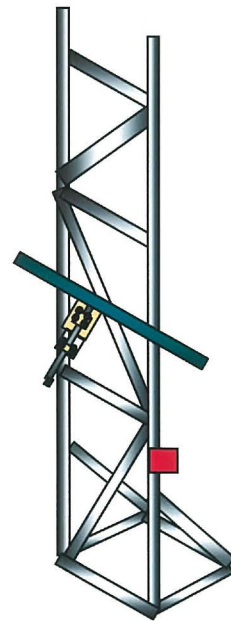


図 9.3 トラバース枠のひずみゲージ位置

9.3 座標系

座標系は，図9.5に示すように，流れ方向を x 軸，水平方向を y 軸，高さ方向を z 軸としている．供試樹木の根元を座標系の x 軸， y 軸， 及び z 軸の原点として， x 軸方向は上流から下流に向けた方向を正に， y 軸方向は下流に向かって左手方向を正に， z 方向は樹木の上方向を正とする．

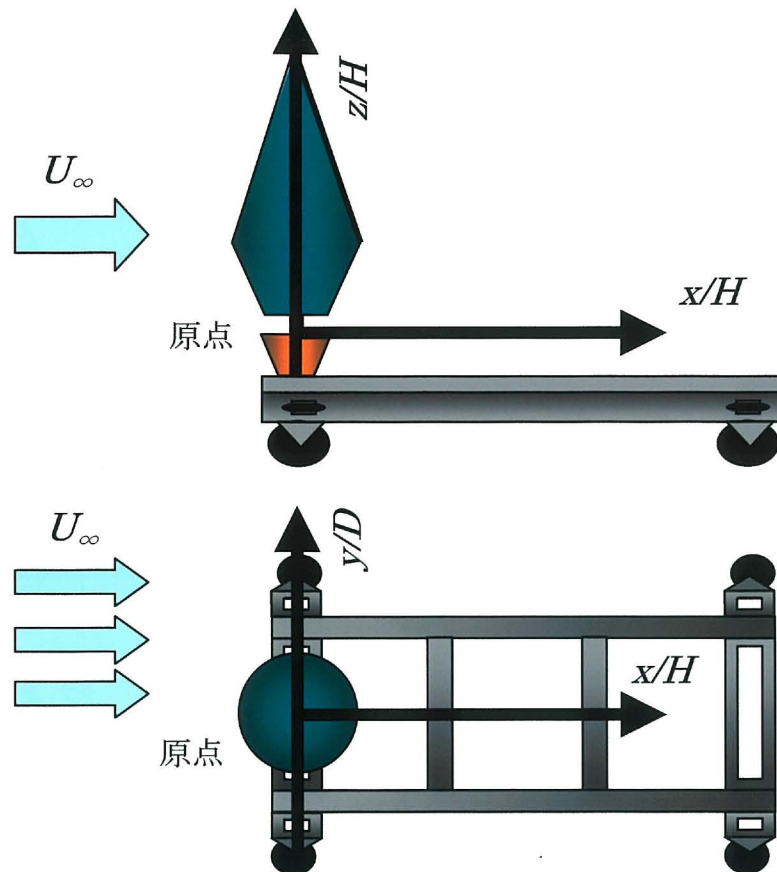


図9.5 座標系

9.4 無次元化

以降の記述の中で， x および z 方向座標は樹高 H ($=2000\text{mm}$) 及び y 方向座標は供試樹木の最大幅の半分 D ($=400\text{mm}$) により無次元化される．さらに，平均流速及び乱れ強度に対しては，台車前方に設置されたピトー管から得られた風速 U_∞ で無次元化される．

9.5 測定領域

供試樹木の下流域において、主流方向速度分布及びその流速の乱れ成分のパワースペクトルを下流位置 $x/H = 0.9, 1.8$ の2カ所で測定した。

また、樹木形状が高さ方向に変化するために、この形状が流れ場に及ぼす効果の違いを考慮して、測定の高さ位置を変えて $z/H = 0.15 \sim 0.85$ の範囲で約200mm程度間隔で同様に測定した。この測定範囲の概略図を図9.6に示す。この中で、薄い青色でハッチングされた部分が測定領域である。

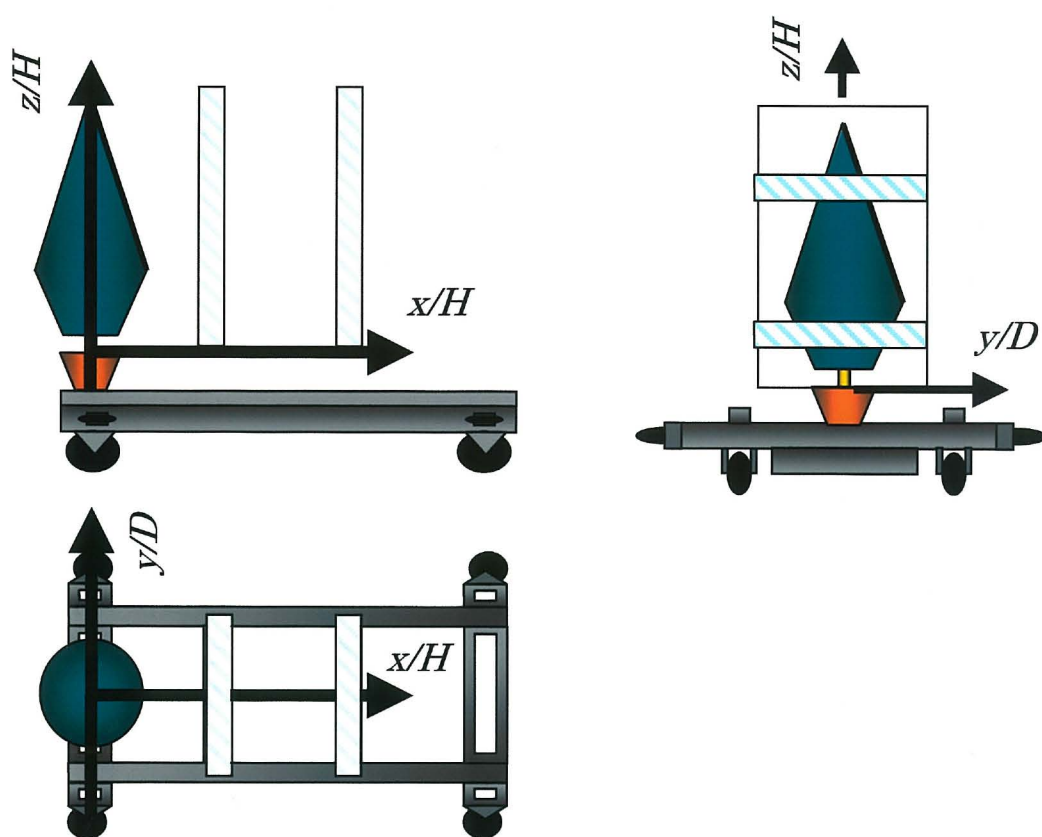


図9.6 計測領域の概略図

9.6 求められる流れ場の諸量

樹木周りにおける流れ場の乱れ構造を明らかにするために、実験によって得られたデータを元に、時間平均流速及び乱れ強度の各諸量を求めた。

これらの諸量は次のように定義される。ここで、 \hat{u} (ダッシュ)は速度の変動成分を表し、 N はサンプリング個数(4096 個)、 u は流体の主流方向速度を表す。また表記の便宜上、時間平均流速と乱れ強度をそれぞれ U および ΔU で定義する。

(1) 時間平均速度

$$U = \bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u^i$$

(2) 乱れ強度

$$\Delta U = \sqrt{u'^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u^i - \bar{u})^2}$$

9.7 実験手順

本実験では曳航風洞ということで、直に、追い風、向かい風、横風といった外乱と隣り合わせである。そのために、毎走行おきの安全確認はもちろんのこと、ピトー管、熱線流速計の校正が非常に重要になってくる。

次に実験の流れを以下に示す。

1. ピトー管に厚手の布でカバーをして、圧力変換機のゼロ点調整を行う。
2. 無風の状態と、最大流速の状態での熱線流速計の校正を行う。
3. 計測したいポイントに熱線プローブをトラバースさせて固定する。
4. 安全を確認してから、なるべく無風な時間帯を選んで走行開始。
5. 設定速度で正常になるのを確認した後、風速及びパワースペクトルの測定を開始。
6. 計測を終了したらデータを保存する。
7. 手順3～6を繰り返す。(計測値にノイズが多く含まれデータの信頼性が見られないときには、再度1～2の校正を行う。)
8. 収集したデータをもとに乱れ強度などを算出し、一ラインずつのグラフを作成し、データの信頼性を確認する。

第 10 章 実験結果及び考察

10.1 曳航風洞における供試樹木周りの流れ場

10.1.1 供試樹木周りの平均流速

供試樹木下流域における流速の測定位置及び主流速度などのパラメーターを変化させて計測して得られた平均流速の結果を図 10.1～図 10.4 に示す。即ち、図 10.1 と図 10.2 は、主流速度が 10m/s の場合の下流位置 x/H がそれぞれ 0.9 と 1.8 における樹木幅方向の平均流速の分布である。各図の中に高さ z/H による幅方向分布の変化も含まれている。

主流速度が 10m/s で供試樹木に近い $x/H=0.9$ の時(図 10.1)は、顕著にその防風効果、即ち速度欠損の様子が理解できる。特に最大幅の場所 $z/H=0.35$ (図(c))～0.45 (図(d))では、それに見合って幅広く、かつ最大速度欠損率として 85%程度が確認できる。同様に、高い測定位置になると樹木の幅も狭くなり速度欠損も小さくなる。 $z/H=0.85$ の樹木先端部(図(i))では、樹木自体の幅も細く、また細い枝の密集部分からなっており、しなりが大きくほとんど平均速度の欠損は見られない。また、樹木最下部の幹(図(a))での速度欠損も見られなかった。これは、流速に対して幹の太さが 5cm 程度と細いためであると考えられる。

図 10.2 には、図 10.1 と同じ主流速度であるが、樹木の約 2 倍程度下流の測定位置 $x/H=1.8$ においては、ほとんど最大幅付近(図(c))でしか、顕著な速度欠損は見られず、それも 30%程度であった。

図 10.3 に、主流速度が 5m/s と低速になった場合の供試樹木に近い $x/H=0.9$ における結果を示す。この場合では、樹木が最大幅となる $z/H=0.35$ (図(c))で、明らかな防風効果を示す結果が得られた。最大速度欠損率としてやはり 80%程度は見られた。また、図 10.4 のように同主流速度で $x/H=1.8$ と樹木の約 2 倍程度下流での測定結果は、ほとんど最大幅付近(図(c), (d))での速度欠損率は 20%程度であった。

主流速度が 5m/s の実験では、主流速度が低かったため、向かい風、追い風、横風等の影響を受けやすく、計測結果のデータにノイズが多く生じていた。

下流域方向における平均流速の高さ方向の分布を図 10.5 に、さらに x 軸に垂直な yz 断面内の平均流速の分布を図 10.6 に示す。

図 10.5 の図(a)(b)は主流速度 10m/s の場合、図(c)(d)では主流速度が 5m/s の場合である。主流速度の違いによらず下流域では、 z 方向における防風効果の幅が 50%程狭くなるのが分かる。また図 10.6 の yz 断面分布において、図(a)のように樹木全体で防風効果が見られる場合に対し、図(c)では樹木の最大幅を持つ高さのみにおいて局地的な防風効果の発生は示されている。

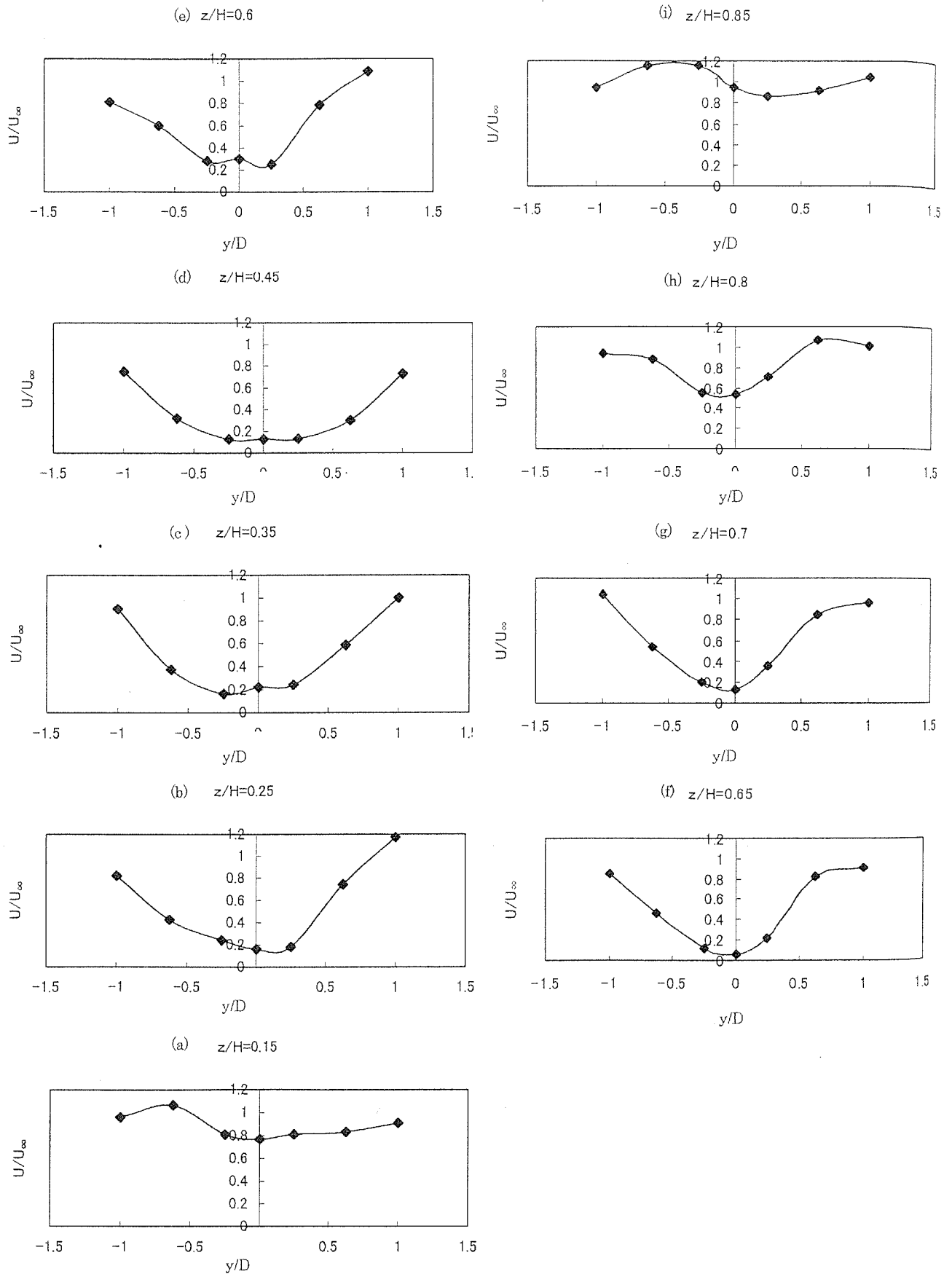


図10.1 樹木幅方向の平均流速分布 ($U_\infty=10\text{m/s}$, $x/H=0.9$)

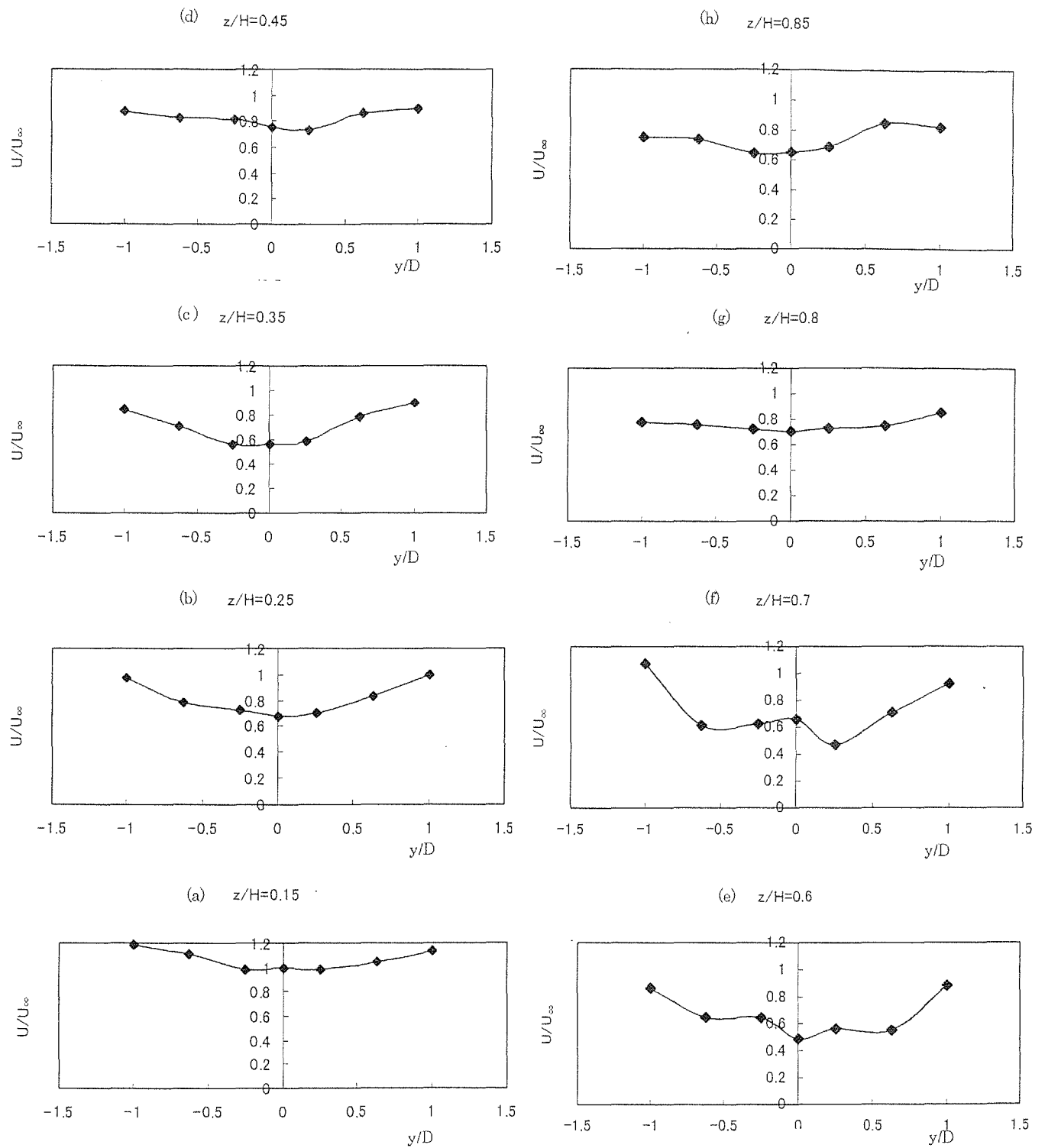


図10.2 樹木幅方向の平均流速分布 ($U_\infty=10\text{m/s}$, $x/H=1.8$)

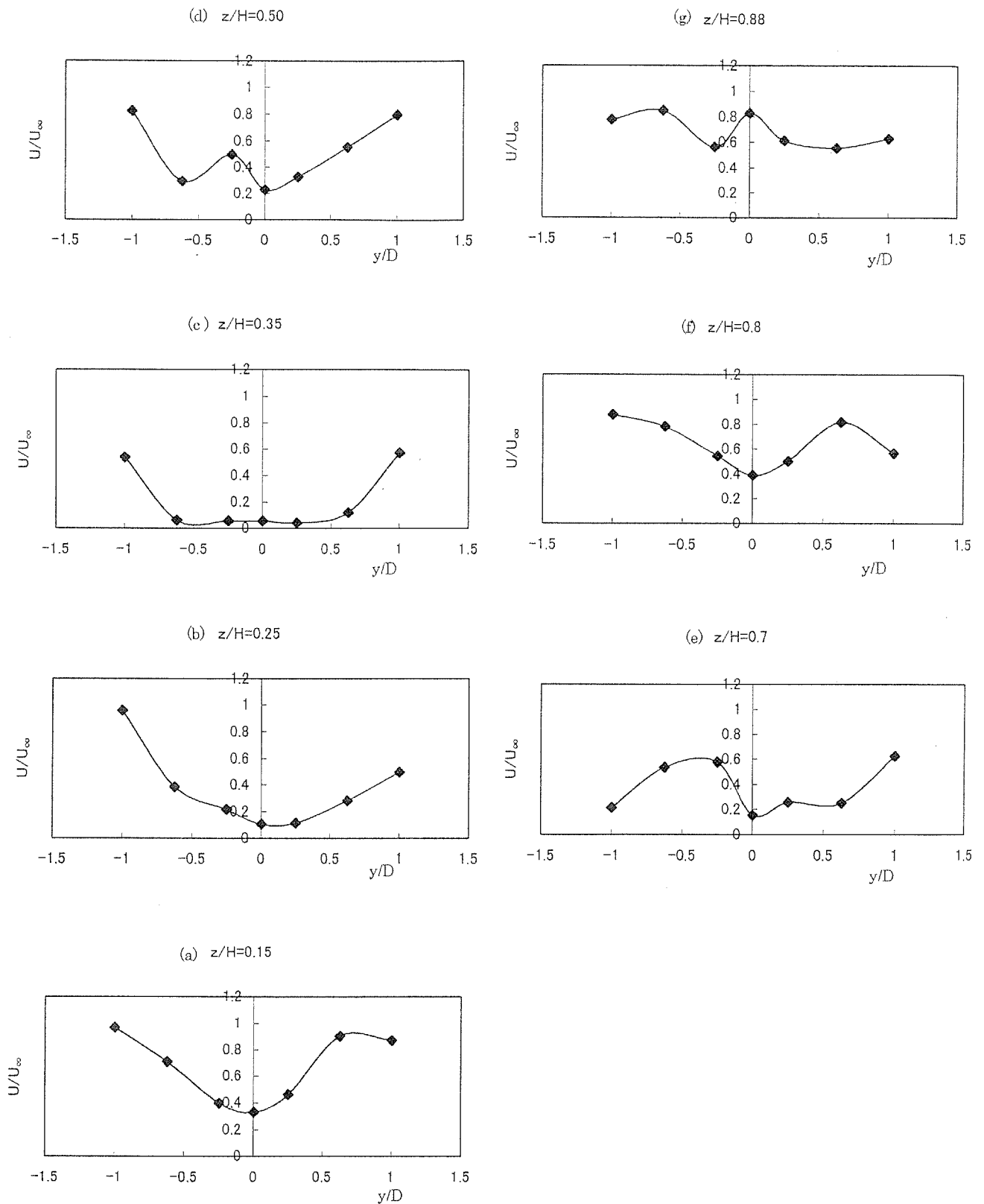


図10.3 樹木幅方向の平均流速分布($U_\infty=5\text{m/s}$, $x/H=0.9$)

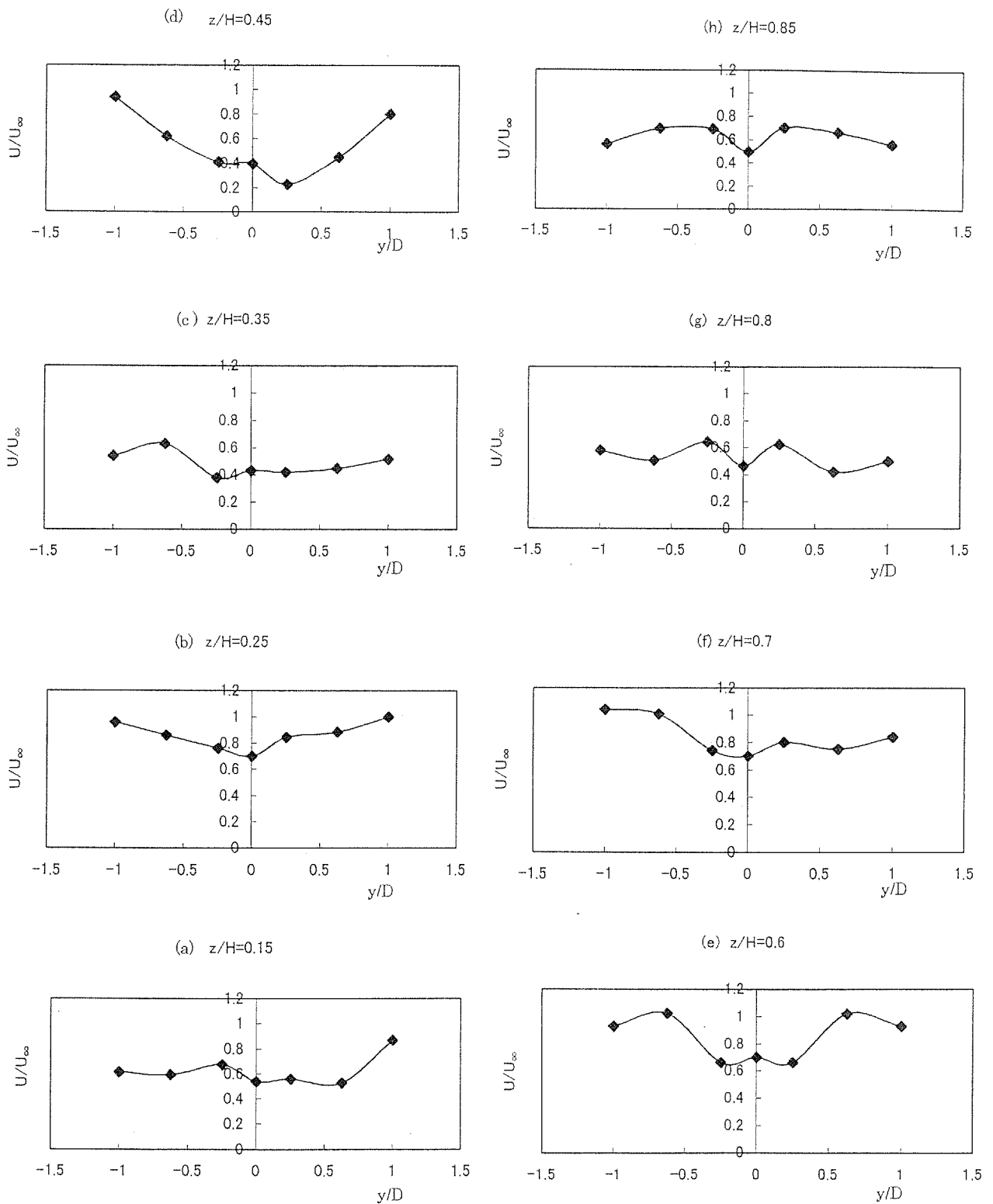
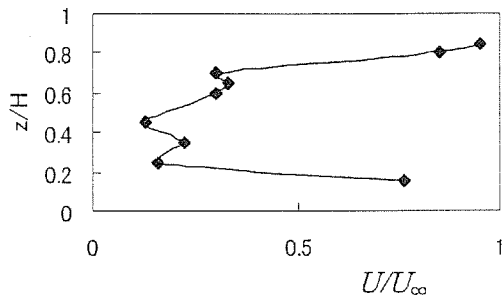
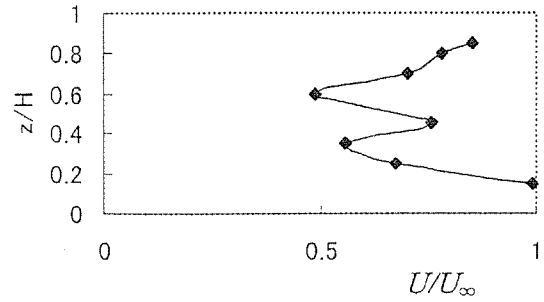


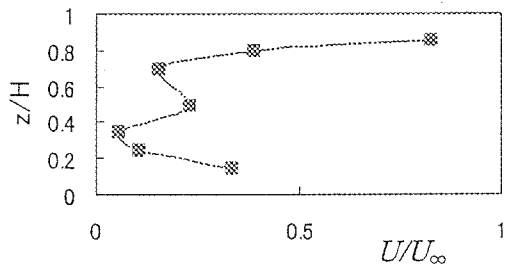
図10.4 樹木幅方向の平均流速分布 ($U_\infty=5\text{m/s}$, $x/H=1.8$)



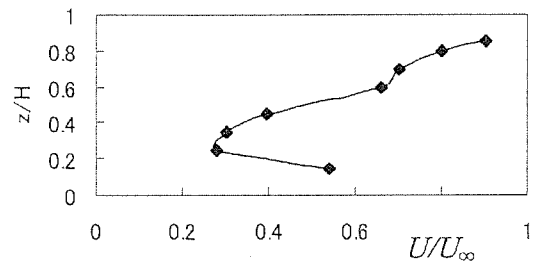
(a) $U_\infty=10\text{m/s}$, $x/H=0.9$



(b) $U_\infty=10\text{m/s}$, $x/H=1.8$

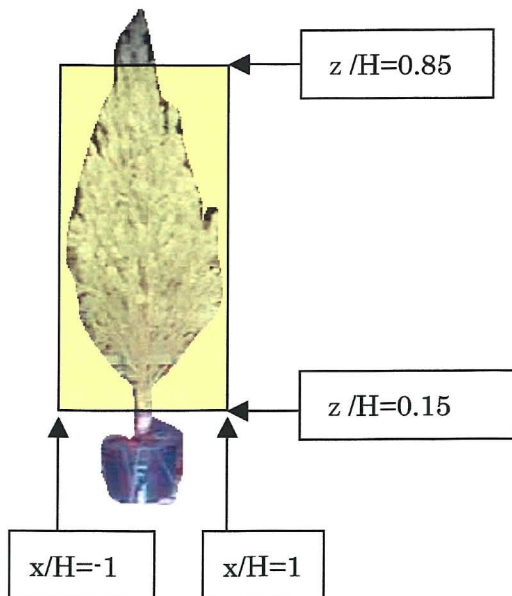


(c) $U_\infty=5\text{m/s}$, $x/H=0.9$

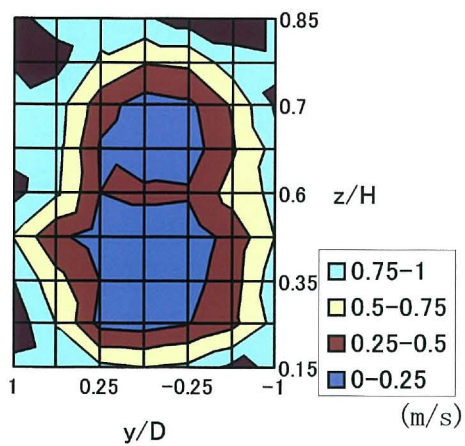


(d) $U_\infty=5\text{m/s}$, $x/H=1.8$

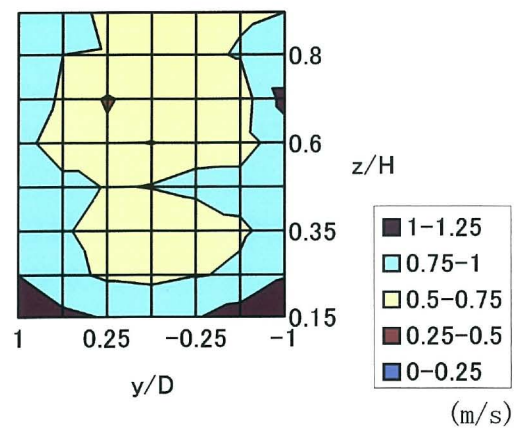
図 10.5 樹木の高さ方向の平均流速の分布



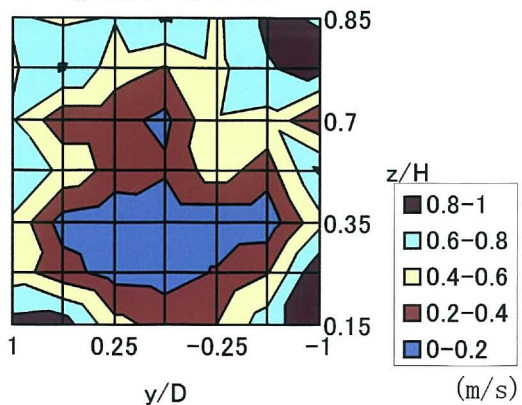
(a) $U_\infty=10\text{m/s}$ $x/H=0.9$



(b) $U_\infty=10\text{m/s}$ $x/H=1.8$



(c) $U_\infty=5\text{m/s}$ $x/H=0.9$



(d) $U_\infty=5\text{m/s}$ $x/H=1.8$

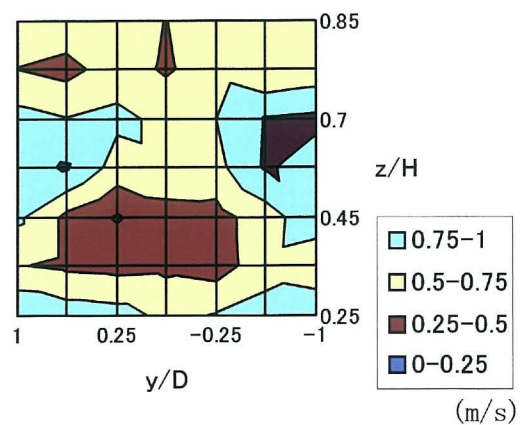


図10.6 樹木下流の主流に垂直断面内の主流速度の分布

10.1.2 供試樹木周りの乱れ強さ

10.1.1と同様に、供試樹木の下流における流速の測定位置及び主流速度などのパラメーターを変化させ、計測して得られた乱れ強度の結果を図10.7～図10.10に示す。

図10.7においては、主流速度が10m/sの場合に供試樹木に近い $x/H=0.9$ における乱れ強さの樹木幅方向の分布を示す。平均流速に対する防風効果が有効な樹木の下流で生じる減速領域の広い範囲 ($z/H=0.25$ (図(b))～ 0.7 (図(g)))において、乱れ強さは10%程度におさえられている。しかし、全体を通して樹木の後流端の領域 $y/D\sim\pm 1$ では、乱れ強さは30%～40%程度となる。これは、主流の平均速度分布が示す急激な速度勾配が生じる領域であり、乱れの生成がきわめて活発なところである。

図10.8は、同じ主流速度10m/sの場合であるが、樹木の約2倍程度の下流である $x/H=1.8$ における測定結果が示されている。樹木の下流にもかかわらず、乱れはほとんど抑えられず、全体的に樹木の幅方向にほぼ同じ程度の乱れ強さとなっている。 $z/H=0.35$ (図(c))～ 0.7 (図(f))において、流れは約35%の強い乱れを持っている。一方、樹木の先端部下流の $z/H=0.8$ (図(g))及び 0.85 (図(h))においては、樹木の先端が細く柔らかいため後述するように変形し、25%程度と低めの乱れをもつことになる。

さらに、図10.9に示すように主流速度が5m/sの場合における供試樹木に近い $x/H=0.9$ の時では、樹木幅が最大幅となる高さ $z/H=0.35$ (図(c))で明らかとなっているように乱れが抑えられてる。また、図10.10のように樹木の下流位置 $x/H=1.8$ においては、樹木先端の下流である $z/H=0.85$ (図(h))では樹木の影響をほとんど受けず、乱れ強さが低くなっている。

また、図10.11には、平均速度分布の図10.5に対応して、各風速の場合の2カ所の下流位置における乱れ強さの樹木の長さ方向の分布を示す。さらに、図10.12には、図10.6に対応した yz 断面内の乱れ強さの分布を示す。図10.11の図(a)や図(c)に示されるように、樹木最大幅の高さ位置の下流では放出渦のために乱れ強さが高くなっている。図(b)及び図(d)は、主流速の違いによらず、樹木の先端部下流にもかかわらず乱れ強さが高くなり、防風効果は認められない。また、図10.12の yz 断面内の乱れ強さの分布において、図(a)より比較的樹木の幅がある部分の $z/H=0.2\sim 0.8$ では、乱れ強さは低く防風効果が見られる状況であるのに対し、図(c)では樹木の最大幅を持つ高さでのみで局地的な防風効果が生じている。

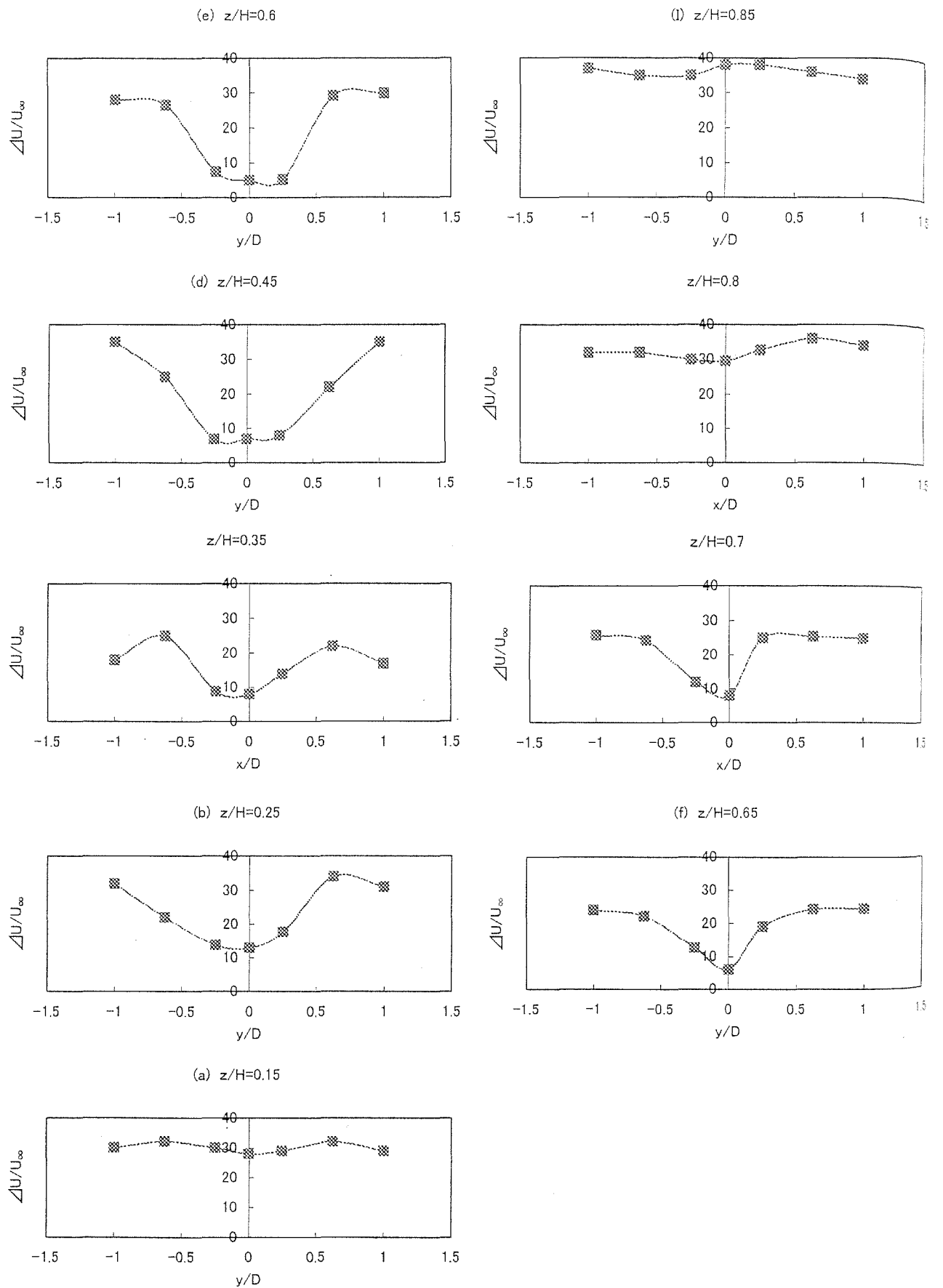


図10.7 樹木幅方向の乱れ強さの分布 ($U_\infty=10\text{m/s}$, $x/H=0.9$)

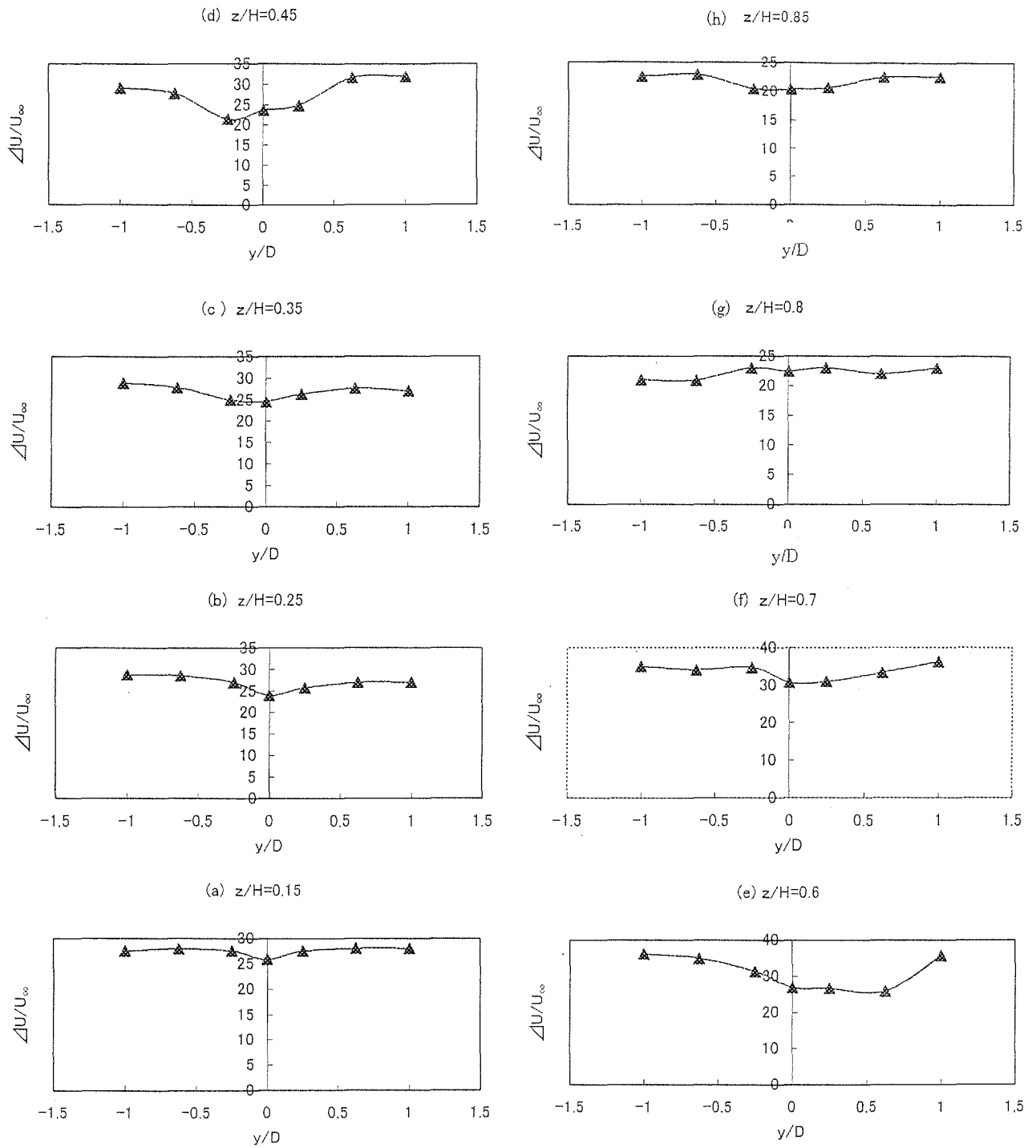


図10.8 樹木幅方向の乱れ強さの分布 ($U_\infty=10\text{m/s}$, $x/H=1.8$)

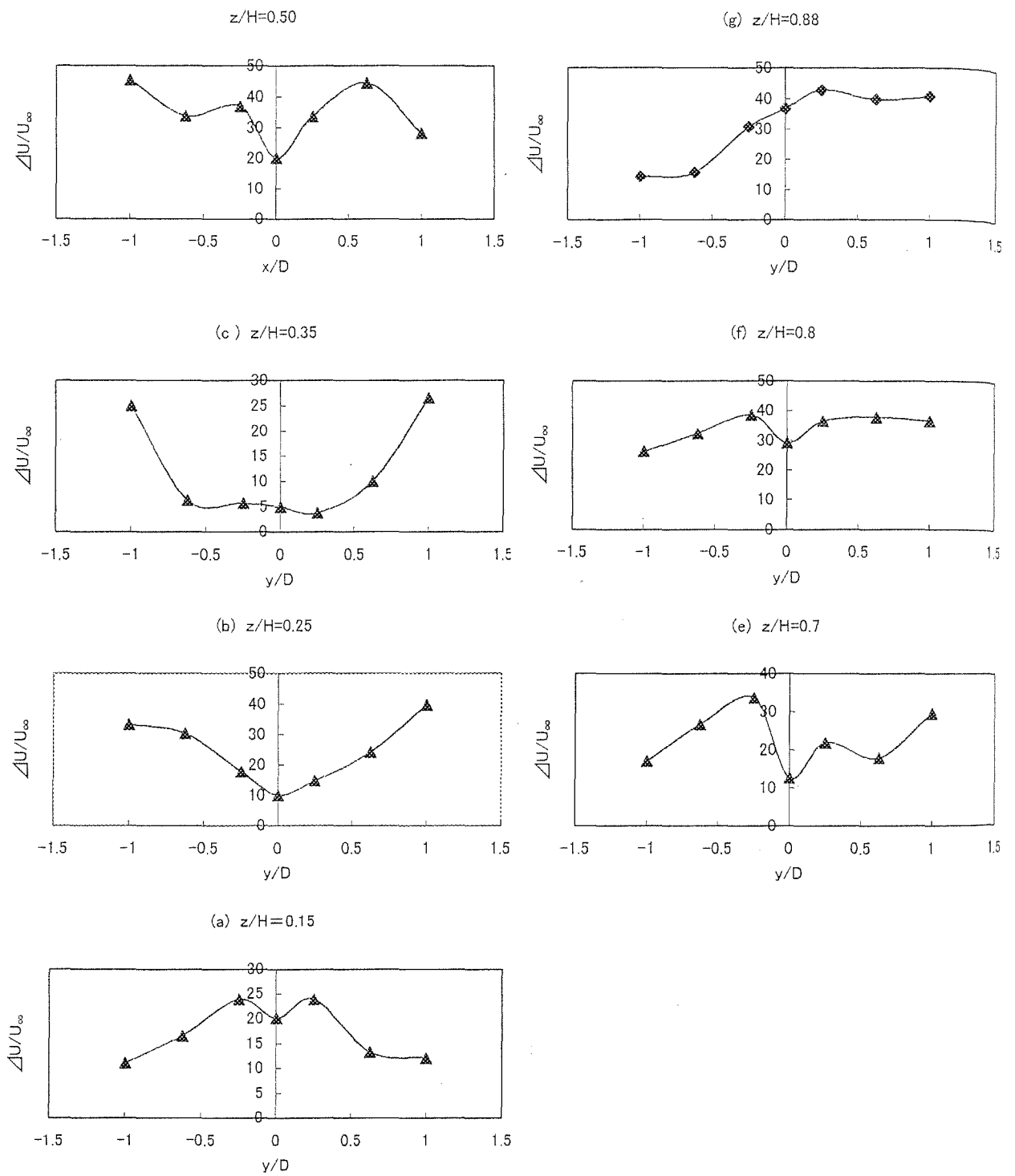


図 10.9 樹木幅方向の乱れ強さの分布 ($U_\infty=5\text{m/s}$, $x/H=0.9$)

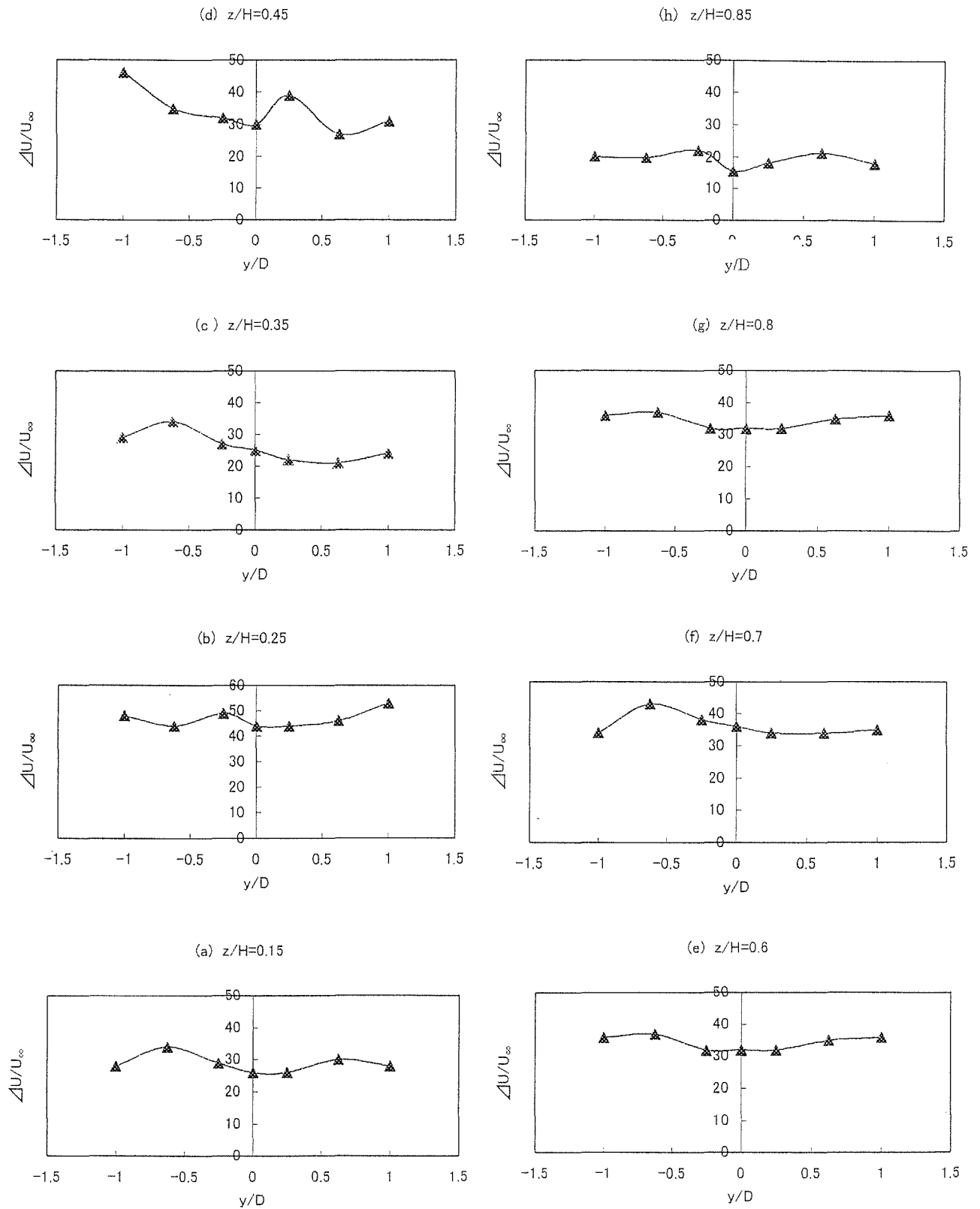
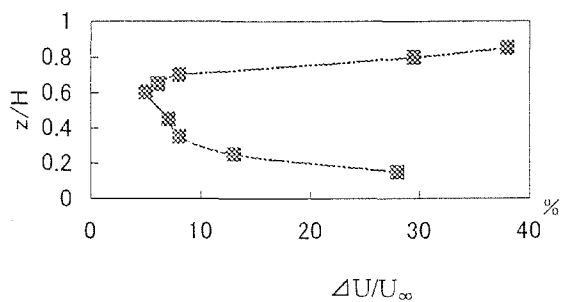
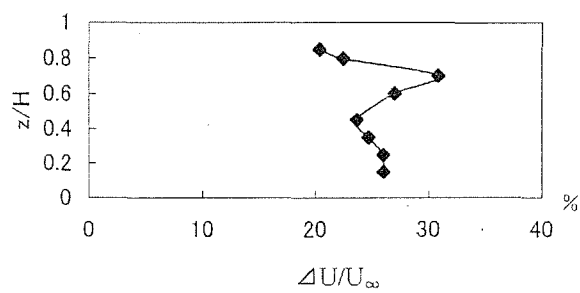


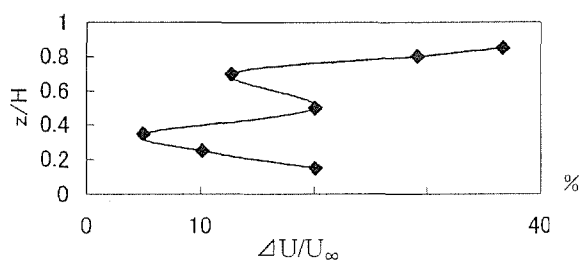
図10.10 樹木幅方向の乱れ強さの分布 ($U_\infty=5\text{m/s}$, $x/H=1.8$)



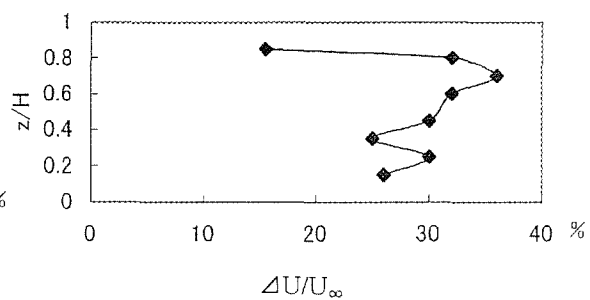
(a) $U_{\infty}=10\text{m/s}$, $x/H=0.9$



(b) $U_{\infty}=10\text{m/s}$, $x/H=1.8$

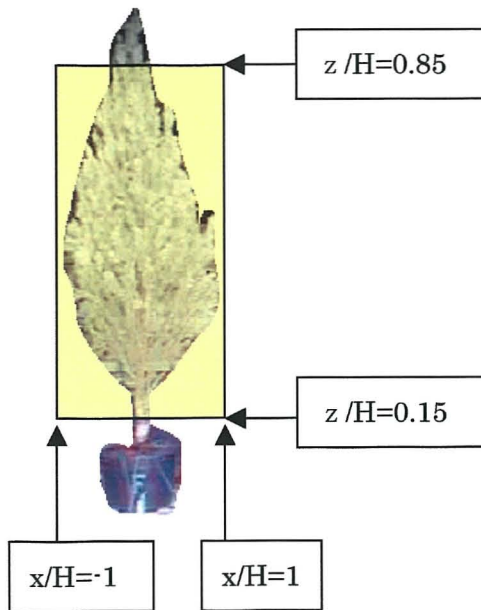


(c) $U_{\infty}=5\text{m/s}$, $x/H=0.9$

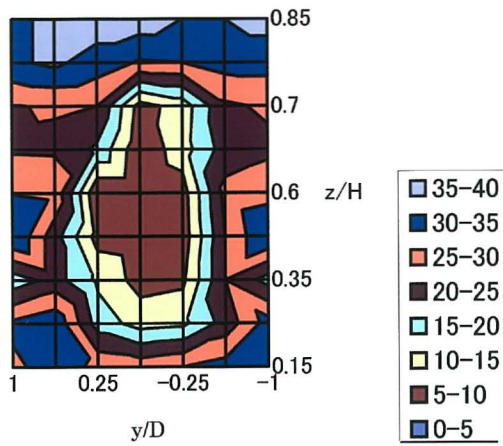


(d) $U_{\infty}=5\text{m/s}$, $x/H=1.8$

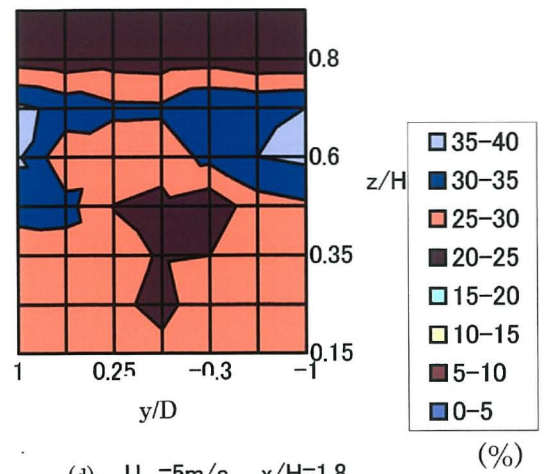
図 10.11 樹木の高さ方向の乱れ強さの分布



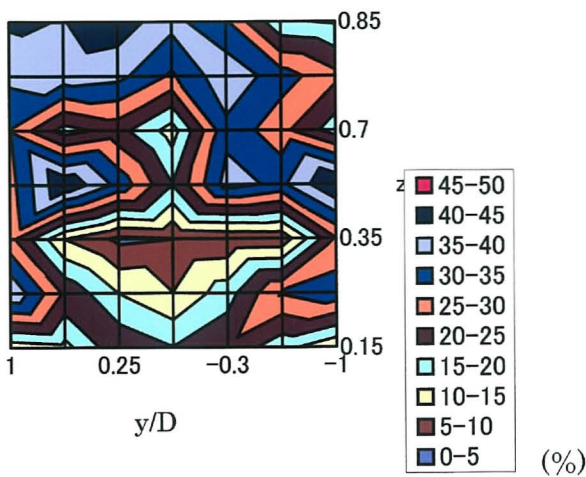
(a) $U_\infty=10\text{m/s}$ $x/H=0.9$



(b) $U_\infty=10\text{m/s}$ $x/H=1.8$



(c) $U_\infty=10\text{m/s}$ $x/H=0.9$



(d) $U_\infty=5\text{m/s}$ $x/H=1.8$

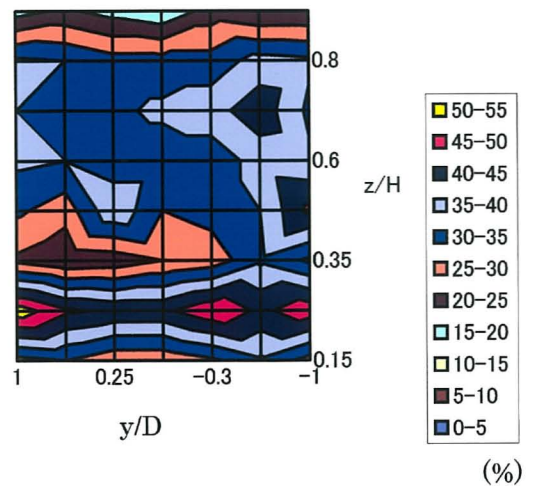


図10.12 流れに垂直な断面内での乱れ強さの分布

10.2 樹木の下流における乱れのパワースペクトルと樹木の振動との関係

10.2.1 樹木、台車、トラバース枠の振動について

大きく成長した樹木を使用することにより、樹木の“しなり”をはじめとして樹木の変形や振動・揺れと樹木下流域での気流の乱れとの関連性を調べた。樹木の振動が流れにどのように影響を及ぼしているかを計測するために、ひずみゲージを図9.1～図9.3に示すように取り付けられた。これらは、流れの中で特に揺れていた場所に特定して取り付けられた。

図10.13に、基本的なデータとして樹木の各点及び台車、トラバース枠の固有振動スペクトルを示す。

また、図10.14には、主流速10m/sで走行してる時の樹木各点の振動スペクトルを示す。また、樹木を載せている台車及び熱線流速計を取り付けているトラバース枠の振動スペクトルも同様に示す。

台車を曳航させている場合のスペクトルより、台車、トラバース枠、幹、枝に、約6Hz前後の周波数においてスペクトルピークが見られる。このことから、樹木の振動スペクトルには、路面から台車のタイヤを伝わってくる振動、また横のガイドウェイから伝わる振動にも影響していることが示される。また、低周波数のスペクトルピークも見られるが、固有振動数と一致するものは見られなかった。

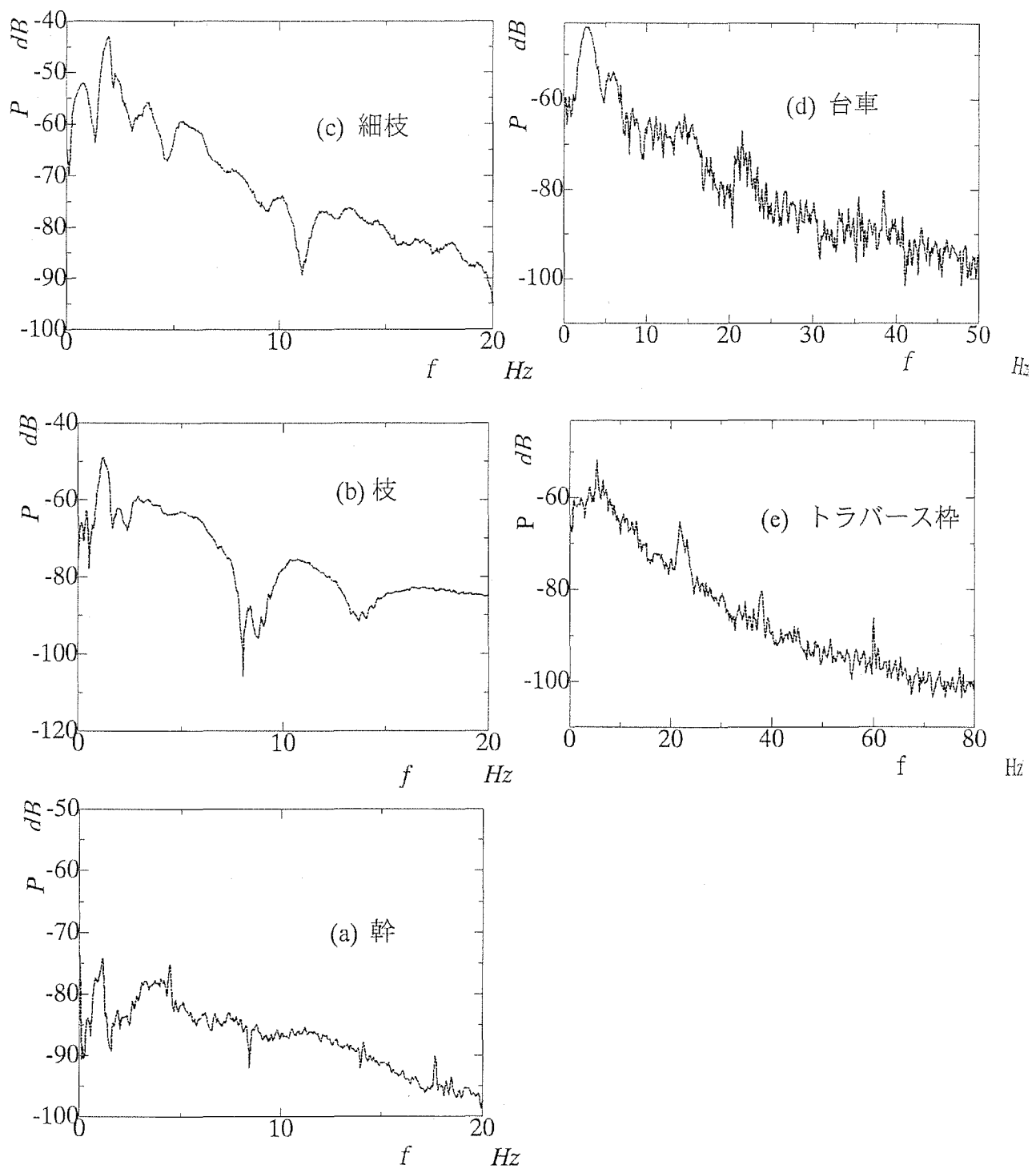


図10.13 静止樹木の各部位及び曳航台車とトラバース枠の固有振動のスペクトル

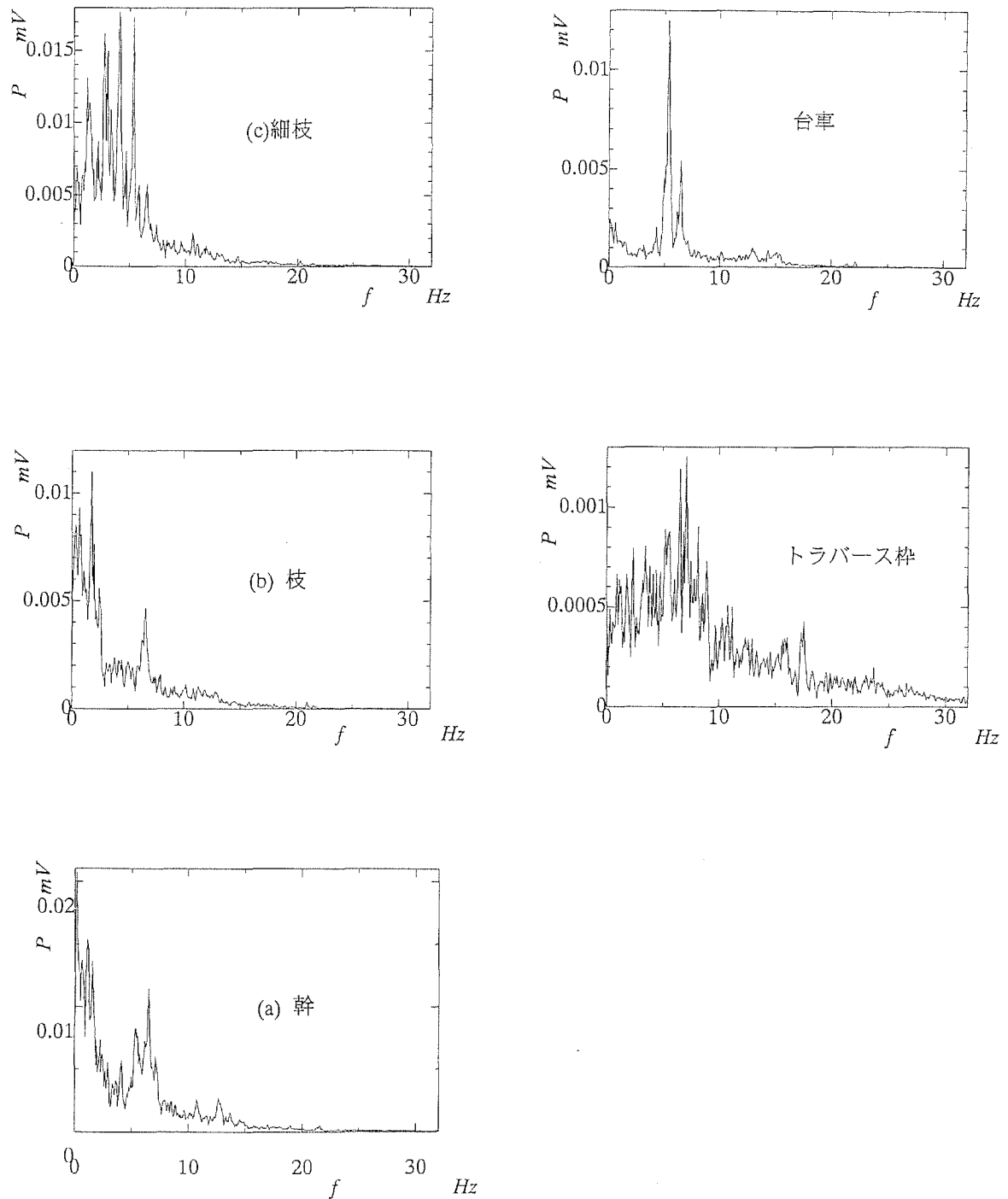


図10.14 曳航される樹木の各部位の振動及び
曳航台車とトラバース枠の振動のスペクトル

10.2.2 後方流の乱れスペクトルについて

樹木の振動が、樹木の下流域の流れ場にどのような影響を与えているかを調べるために、各風速に対応して主流方向に垂直なyz断面における乱れのスペクトルを計測した。

まず、本実験で使用する主流の乱れのスペクトルと図10.15に、また計測中に不具合を生じさせた追い風の乱れスペクトルを図10.16に示す。どちらも、卓越した乱れスペクトルピークは見られないが、追い風の乱れスペクトルにおいては風速の違いから若干低めの乱れ成分を持つことが示されている。

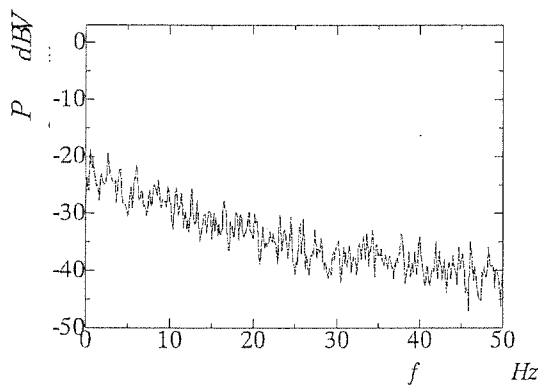


図10.15 主流の乱れスペクトル

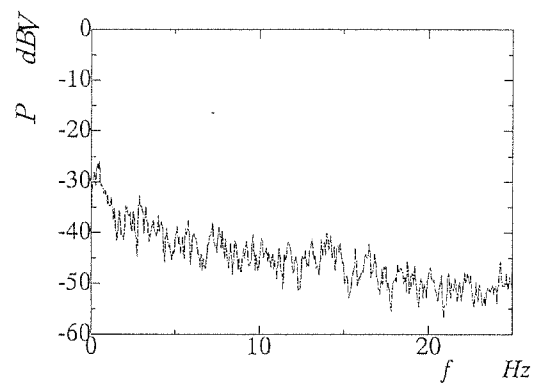


図10.16 追い風の乱れスペクトル

次に、樹木の下流域において流速の変動成分である乱れのスペクトルを測定した。スペクトルピークを示す周波数の実験条件の異なる相違を解決するために、周波数を次式のストローハル数の形式で無次元化する。

$$St = \frac{f d}{U_{\infty}}$$

ここで、 d は測定位置の高さにおける供試樹木の直径である。図10.17に、供試樹木の各高さの直径を示す。

供試樹木は、円柱とは異なる形状と気流の透過性を有している。しかし、この樹木を円柱とみなした場合に、ストローハル数 $St=0.2$ に近い値を示すスペクトルピークを示すかどうか、解析を行った。

各風速における多数の測定点において、樹木の下流の乱れのスペクトルから、この $St=0.2$ から計算される周波数の値と合致するピークを有するグラフを、図10.18～図10.20に示す。カルマン渦放出と考えられるスペクトルピークと樹木の振動スペクトルのピークには○印で識別している。

なお、ピークが見づらいグラフなどは、あえて縦軸のスケールを変更してある。

樹木高さ H (cm)	樹木幅 d (cm)	樹木高さ H (cm)	樹木幅 d (cm)
120	45	200	5
110	50	175	10
100	55	170	13
90	60	160	20
70	80	150	25
50	35	140	35
30	5	130	40

図 10.17 樹木の高さにおける樹木幅

図10.18は、風速10m/s、樹木下流位置 $x/H=0.9$ における主流に垂直断面 (yz 断面) 内の各位置における乱れのスペクトルを示す。図10.18より、次のことが明らかになった。

測定点(a)の $(y/D, z/H)=(-0.625, 0.15)$ のスペクトルでは、樹木の幹のすぐ下流であるにもかかわらず、幹からの渦と思われるスペクトルの40Hzはあまり卓越性がなく、幹からの距離が幹の直径に対して長かったのが原因と考える。また、それ以外に2つのピークがあるが、これは幹からではなく、幹と樹幹の境目の部分から出た渦のスペクトル（それぞれ代表長さを35cm及び15cmとする場合）であると考えられる。

測定点(b)の $(y/D, z/H)=(-0.25, 0.25)$ ～測定点(l)の $(y/D, z/H)=(-0.625, 0.7)$ までは、樹木から渦がはく離する時の振動スペクトルと、そのはく離した渦が下流で検出される乱れスペクトルの数値がよく合致している。これは、樹木の揺れが、その下流の乱れの成分に影響を及ぼす重大な要素の一つであると考えられる。特に、樹木高さが高い場所ほど、細枝のスペクトルピーク値と合致してくる傾向にある。

樹木の先端部 ($z/H=0.7$ 以上) のところ(測定点(m)～測定点(o))では、渦を検出するようなスペクトル値は示さなかった。樹木高さの高いところでは、樹木自体の剛性があまりなくなり、柔らかく細い幹が中心になることから、主流の中で非常にしなってしまい、更には樹木形状を円柱で近似することも難しく、樹木からの渦を計測するには困難であった。

測定点(p)の $(y/D, z/H)=(2.5, 0.35)$ において乱れを計測したところ（最大幅から更に60cm下流方向にずらした）、渦放出に伴うと考えられる乱れスペクトルのピークは検出できなかった。

図10.19は、図10.18と同じ樹木下流位置 $x/H=0.9$ であるが、風速が5m/sと低速な場合の主流に垂直断面 (yz 断面) 内の各位置における乱れのスペクトルを示す。図10.19より、次のことが明らかになった。

測定点(a)の $(y/D, z/H)=(0, 0.15)$ では、20Hzに大きなピークが見られるが、これも幹からではなく、幹と樹幹の境目の部分から出た渦のスペクトルであると考えられる。

測定点(c)の $(y/D, z/H)=(-1, 0.35)$ 及び測定点(d)の $(y/D, z/H)=(1, 0.35)$ において、これらも樹木から渦がはく離する時の振動スペクトルと、そのはく離した渦が下流で検出される乱れスペクトルの数値がよく合致している。

これら以外の他の点においては、特徴的なスペクトルが検出されず、強い追い風が主に原因で計測状況に問題があったと考えられる。

図10.20は、図10.19と同じ風速が5m/sの場合に樹木のより下流位置 $x/H=1.8$ における主流に垂直断面(yz断面)内の各位置における乱れのスペクトルを示す。図10.20より、次のことが明らかになった。

測定点(a)の $(y/D, z/H)=(-1, 0.25)$ ～測定点(j)の $(y/D, z/H)=(-0.25, 0.6)$ までは、はく離した渦であろうスペクトルピークが示されている。しかし、樹木から渦がはく離するスペクトルピークと樹木の振動・揺れのスペクトルピークと重なることはほとんどなく、樹木の下流における測定位置が樹木の高さの1.8倍であり、各高さ位置の代表長さに比べて非常に下流になってしまっていることや、はく離した渦がこの測定位置まで到達するのに乱れが減衰しきっていることなどが原因ではないかと考えられる。

測定点(d)の $(y/D, z/H)=(2.5, 0.35)$ でスペクトルを計測したところ(最大樹木幅から更に60cm下流方向にずらした)、渦放出に伴うと考えられる乱れスペクトルのピークは検出できなかった。

測定点(k)の $(y/D, z/H)=(-0.625, 0.7)$ ～測定点(m)の $(y/D, z/H)=(-0.25, 0.8)$ においては、高さ $z/H=0.7$ の位置で渦を検出するようなスペクトルピークは示されなかった。

主流速度5m/sの場合について、樹木の下流位置 $x/H=0.8$ と $x/H=1.9$ の乱れのスペクトルを比較した場合、スペクトルピークが存在する位置では、樹木により近い $x/H=0.8$ におけるピーク値が若干強めとして検出される。これは樹木に近い場所の方が急激な速度勾配の変化が大きいためであると考えられる。また同じ測定位置で流速を変化させた場合のスペクトルの比較から、同じ理由で10m/sで測定した乱れスペクトルの方が一般的に大きな値を示している。

樹木の高さ方向にスペクトルの特長をみていくと、基本的に $z/H=0.7$ ～ 0.875 の樹木の高い先端部分の下流点では、樹木からはく離した渦の乱れスペクトルは検出されなかった。樹木の先端部分では樹木自体が細くなり、また枝も主流に対してしなりが強くなり、後流速度分布において大きな速度勾配の生成がなされずに、このため乱れも低くなるのではないかと考えられる。

下流方向の変化を見た場合、 $z/H=0.35$ ～ 0.6 における比較的大きな後流幅を持った位置では、 $x/H=0.9$ はもちろんのこと $x/H=1.8$ のように下流に離れた地点まで渦と思われるスペクトルが若干ではあるが認められる。

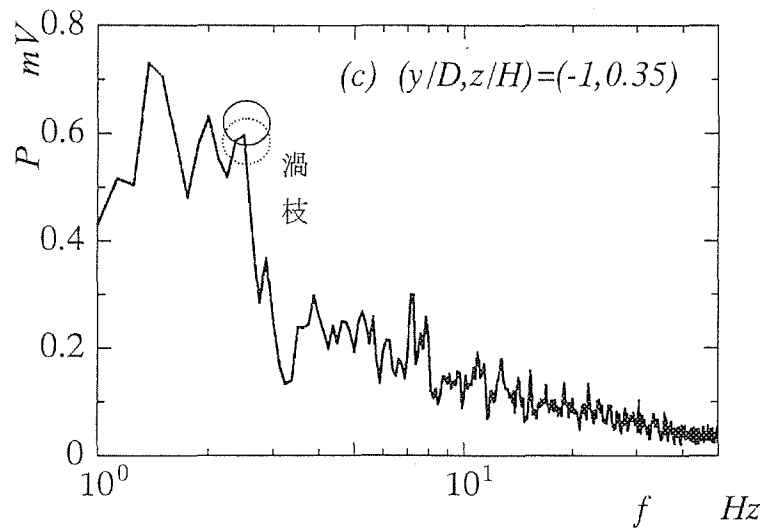
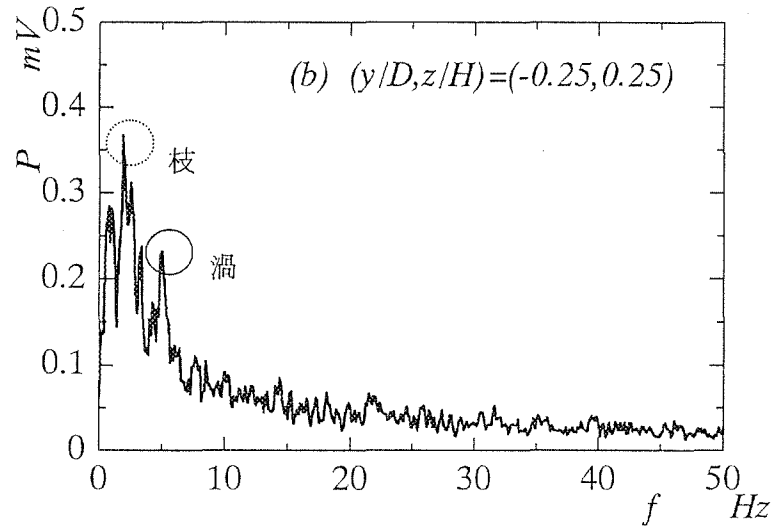
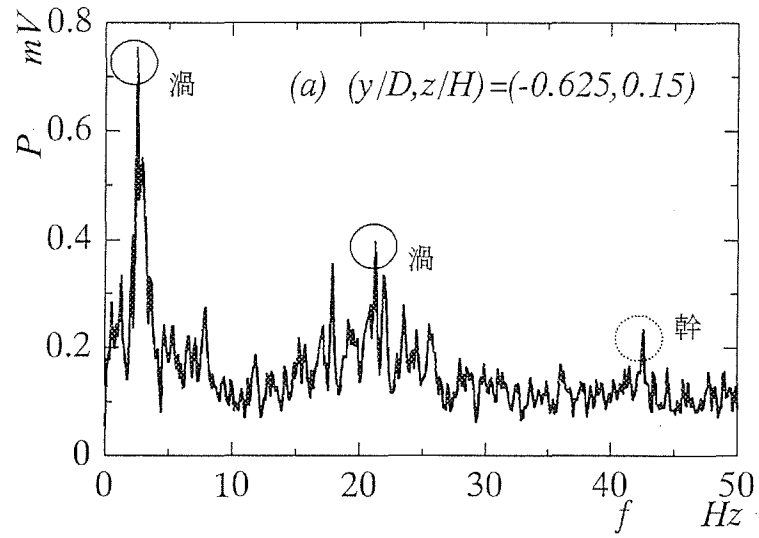


図10.18 乱れのスペクトル ($U_\infty = 10 \text{ m/s}$, $x/H = 0.9$)

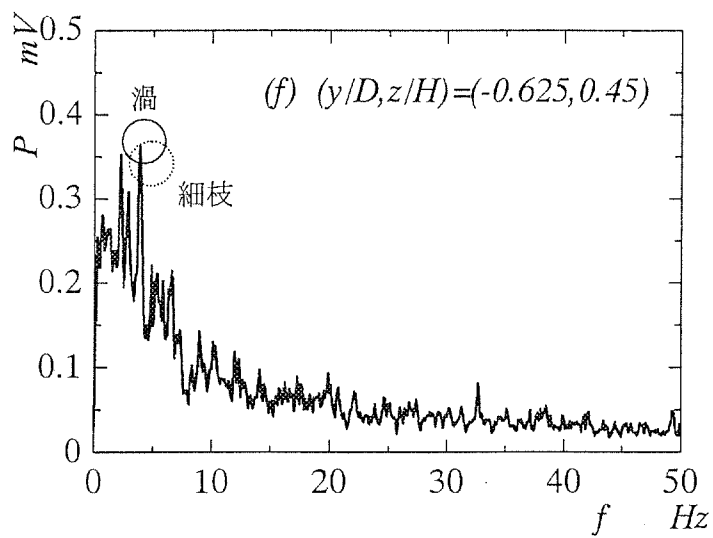
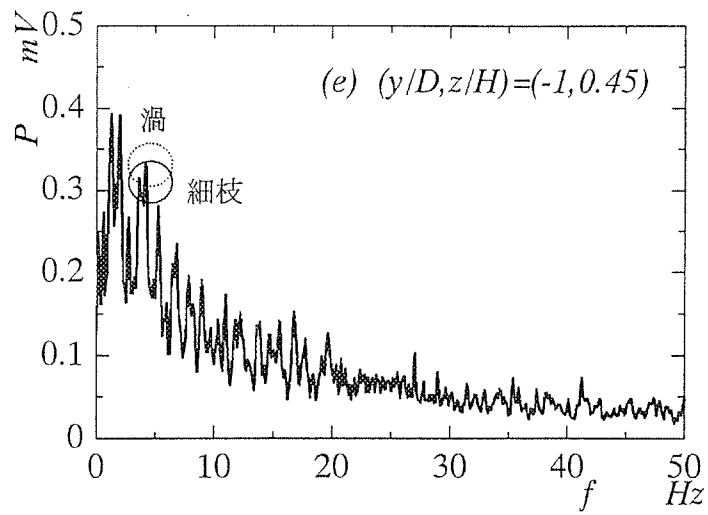
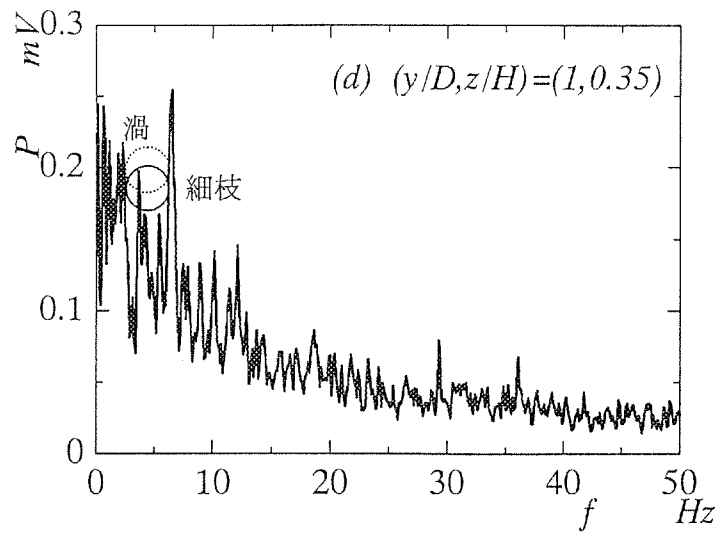


図10.18 乱れのスペクトル (続き) ($U_\infty=10\text{m/s}$, $x/H=0.9$)

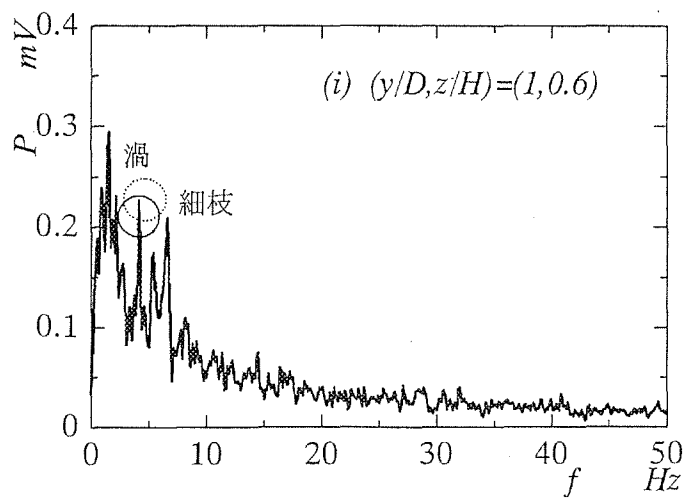
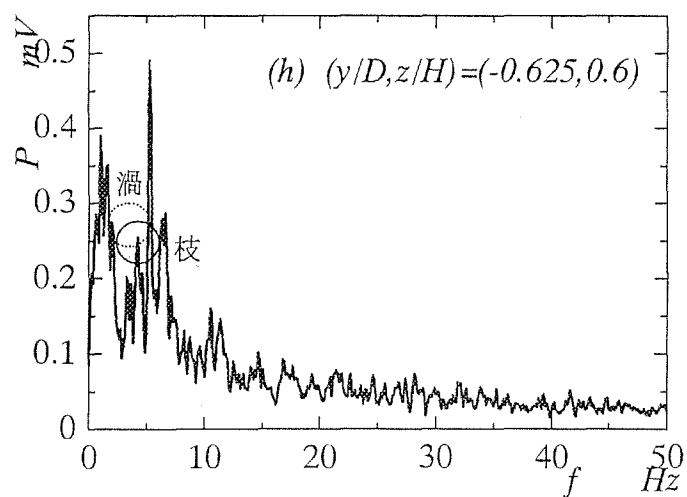
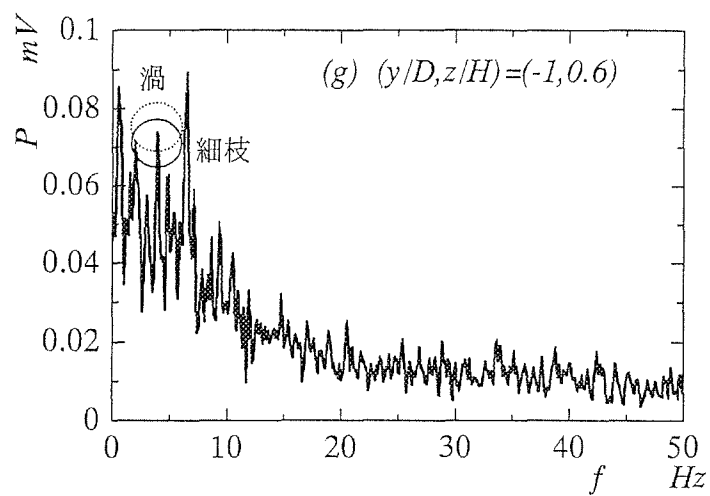


図10.18 乱れのスペクトル (続き) ($U_\infty = 10 \text{ m/s}$, $x/H = 0.9$)

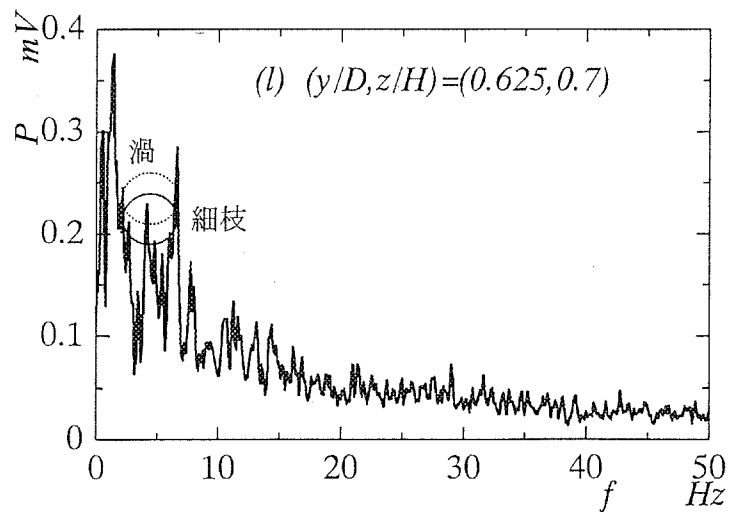
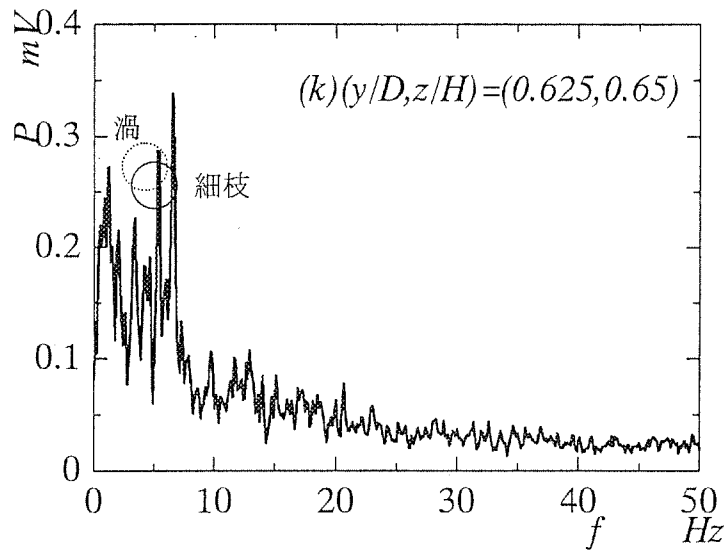
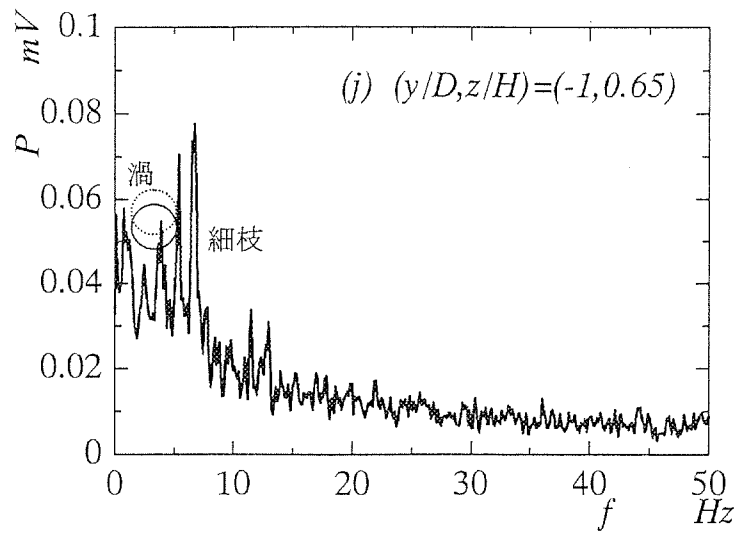


図10.18 乱れのスペクトル (続き) ($U_\infty = 10\text{m/s}$, $x/H = 0.9$)

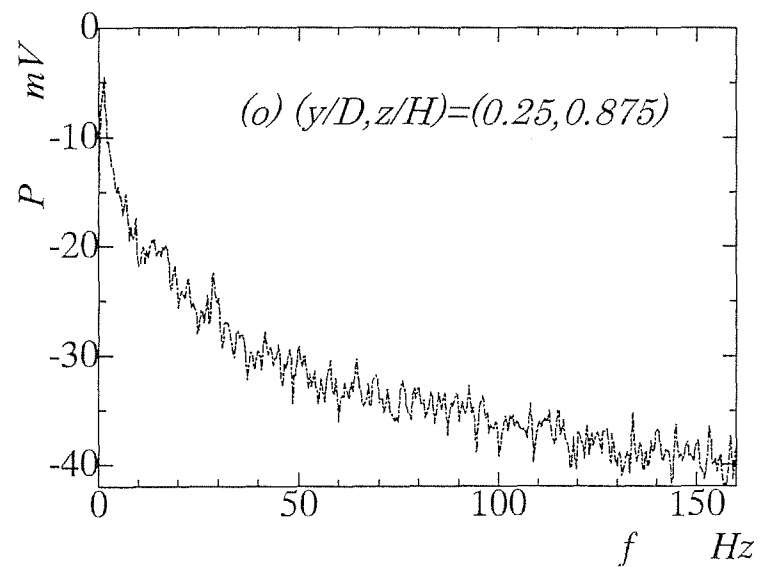
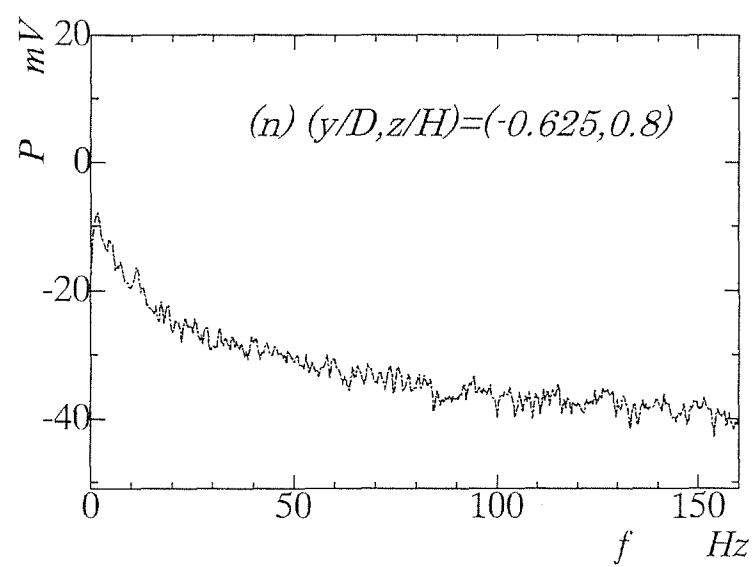
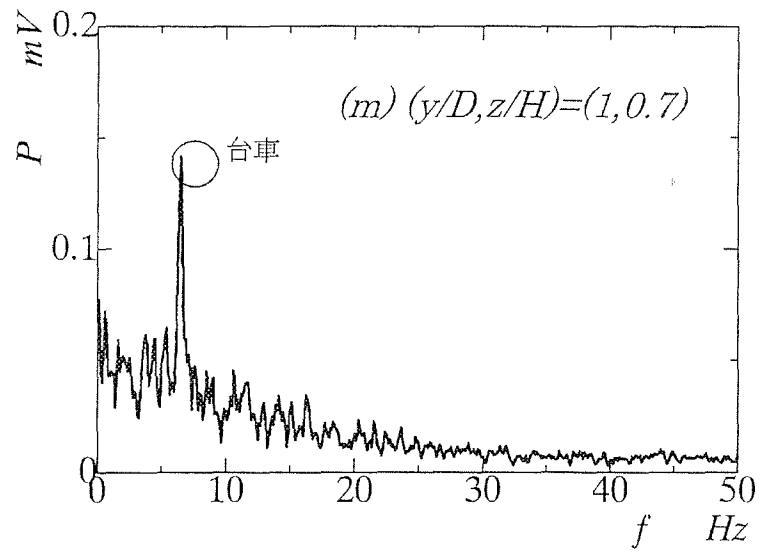


図10.18 乱れのスペクトル (続き) ($U_\infty = 10 \text{ m/s}$, $x/H = 0.9$)

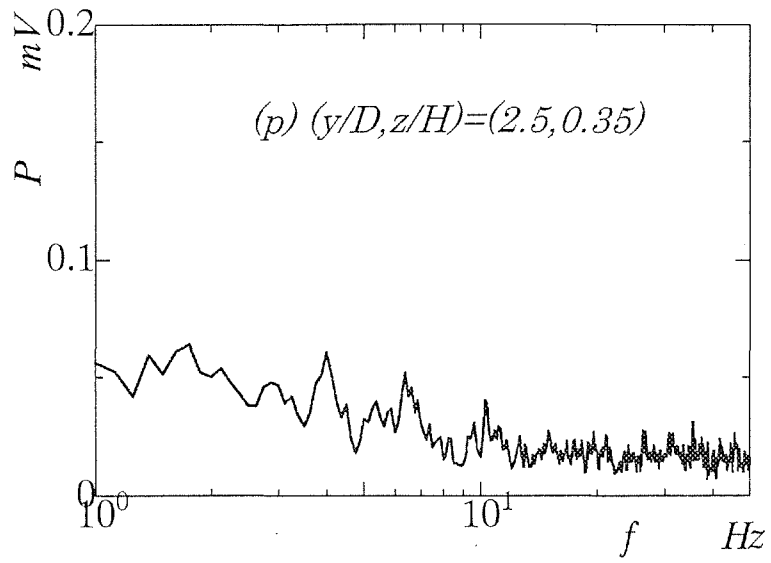


図 10.18 乱れのスペクトル (続き) ($U_{\infty}=10\text{m/s}$, $x/H=0.9$)

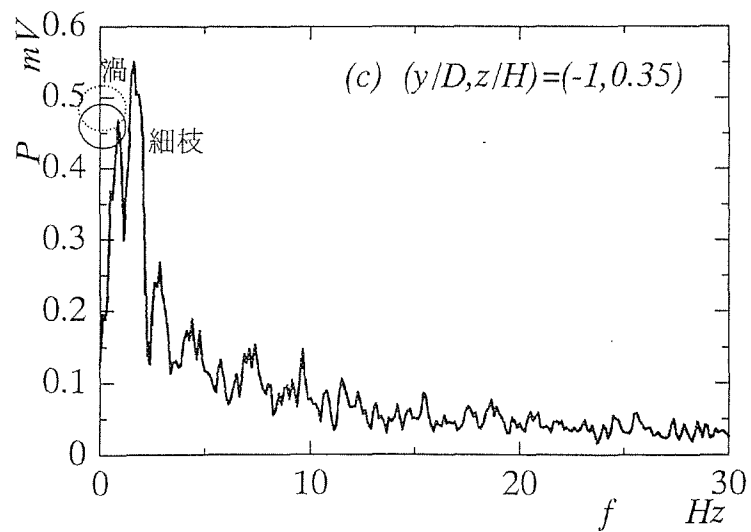
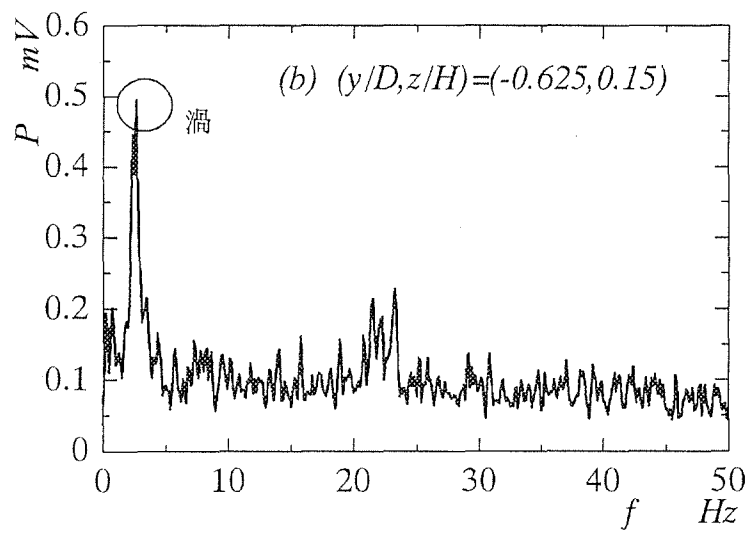
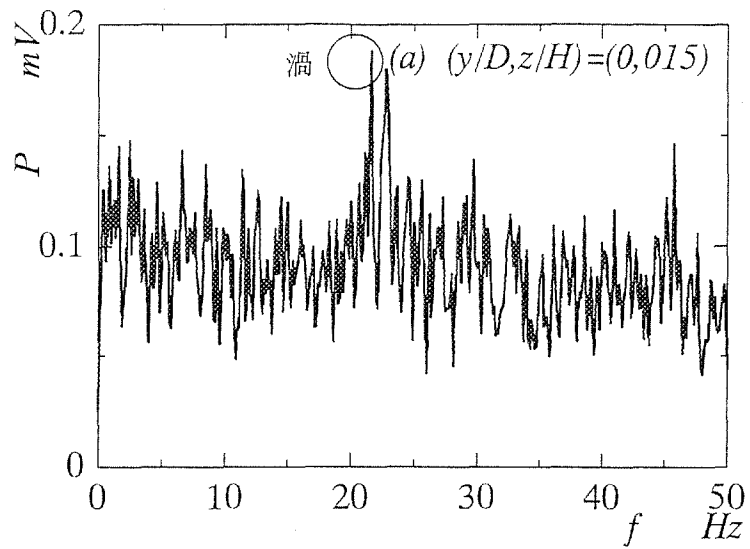


図10.19 乱れのスペクトル ($U_\infty = 5\text{m/s}$ $x/H = 0.9$)

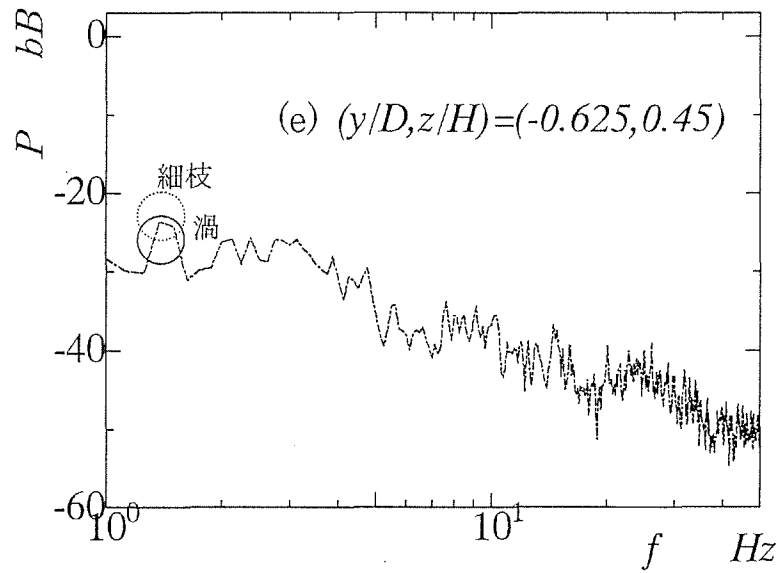
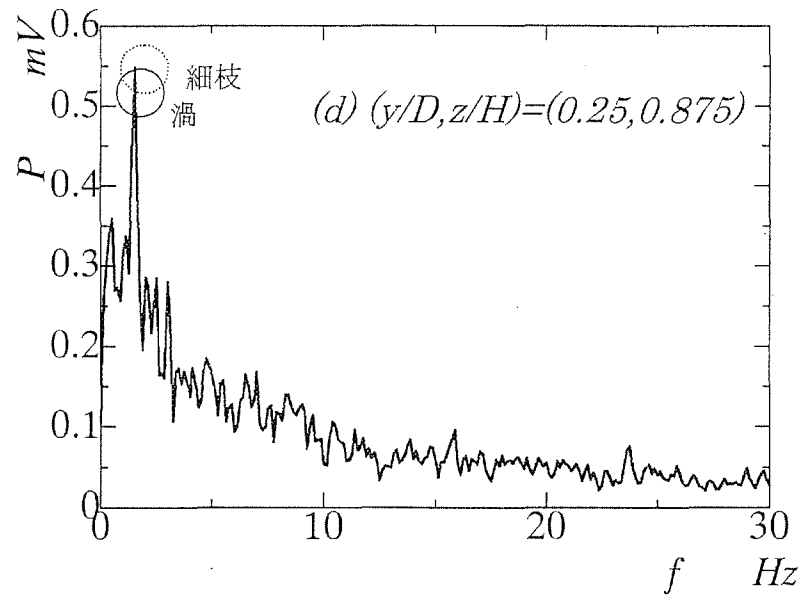


図10.19 乱れのスペクトル(続き) ($U_\infty=5\text{m/s}$ $x/H=0.9$)

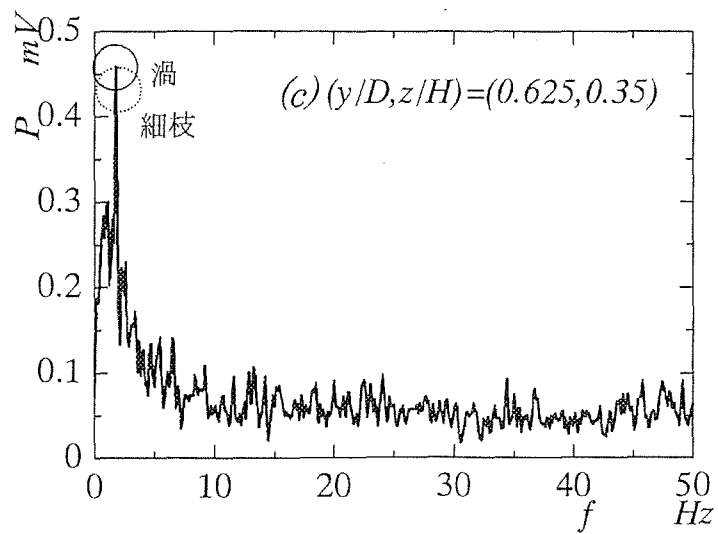
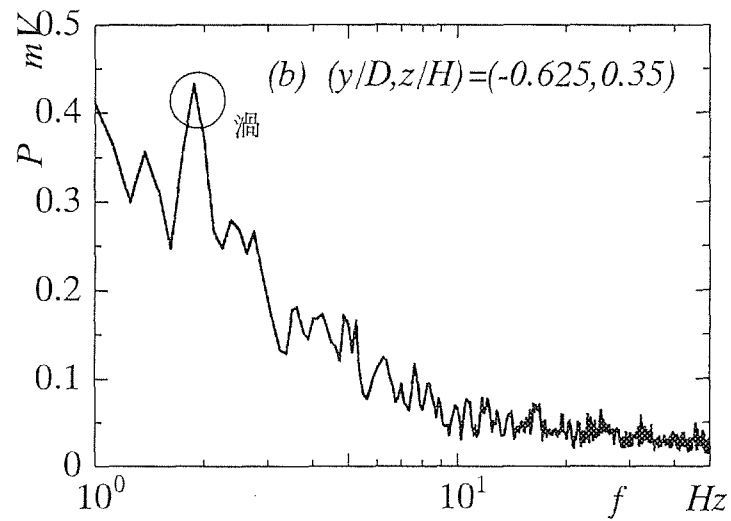
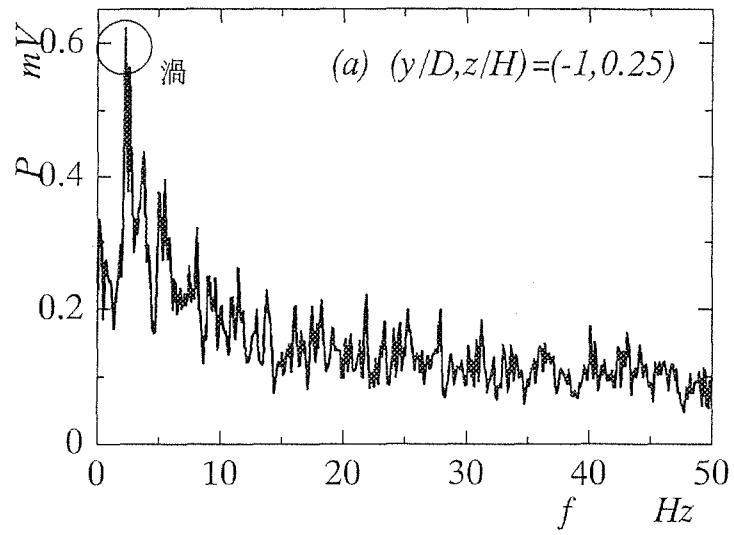


図10.20 乱れのスペクトル ($U_\infty = 5\text{m/s}$,

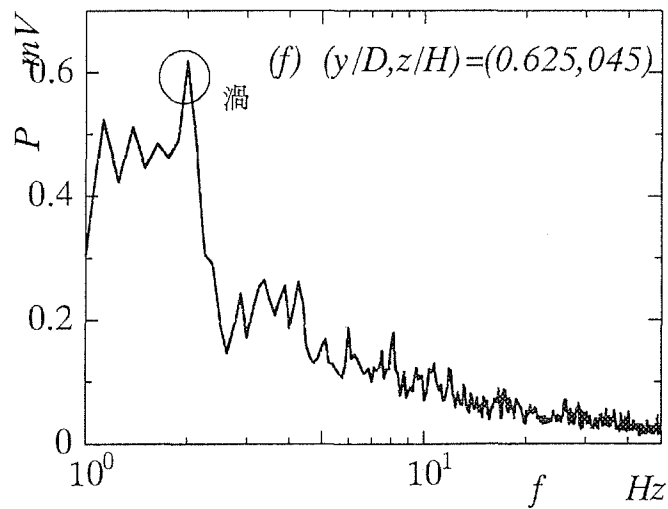
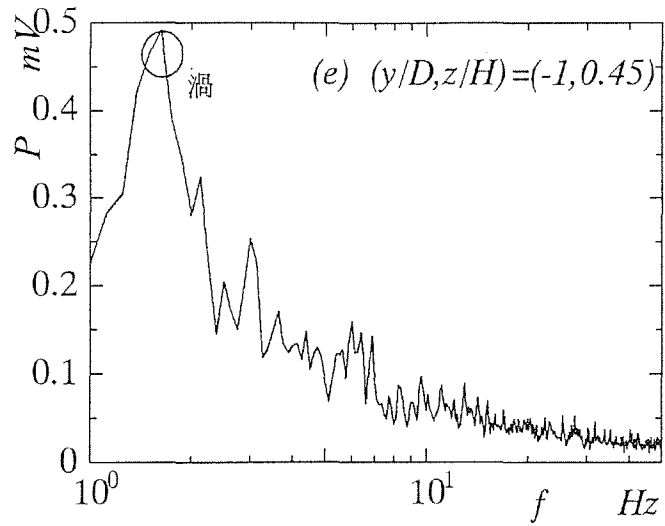
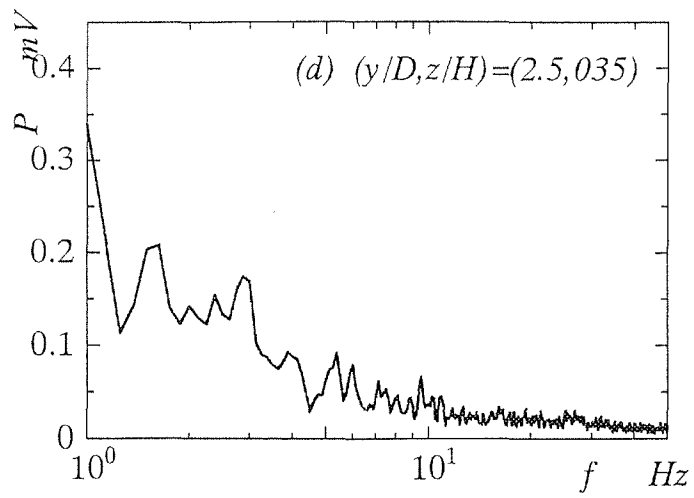


図10.20 乱れのスペクトル (続き) ($U_\infty=5\text{m/s}$, $x/H=1.8$)

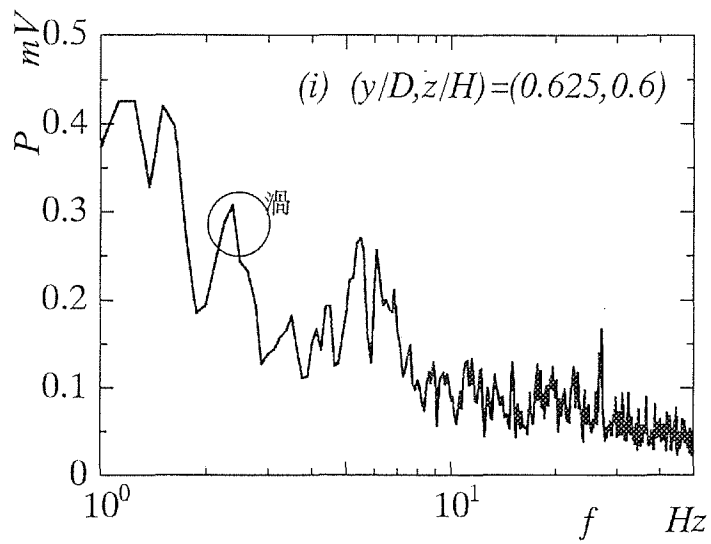
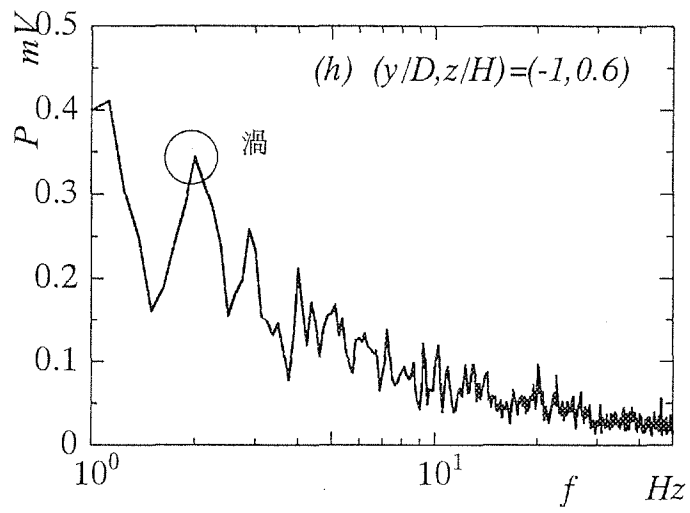
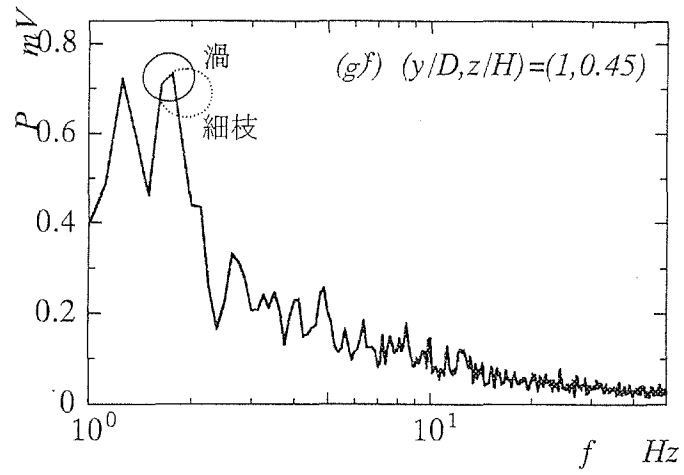


図10.20 乱れのスペクトル(続き) ($U_\infty = 5\text{m/s}$, $x/H = 1.8$)

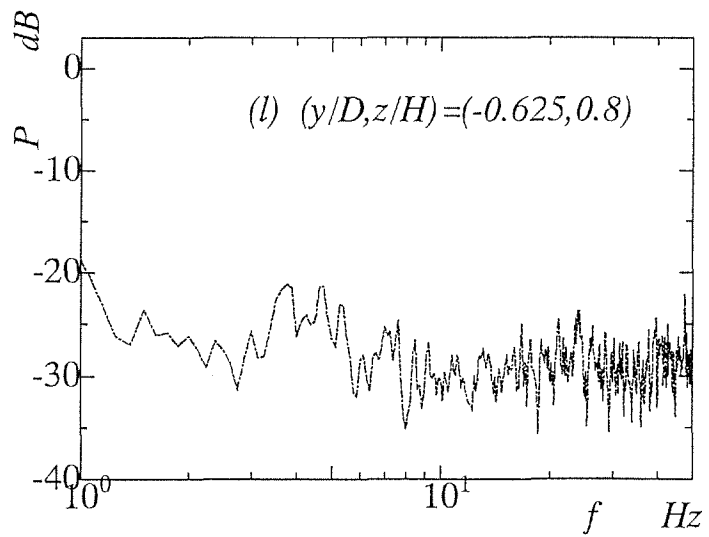
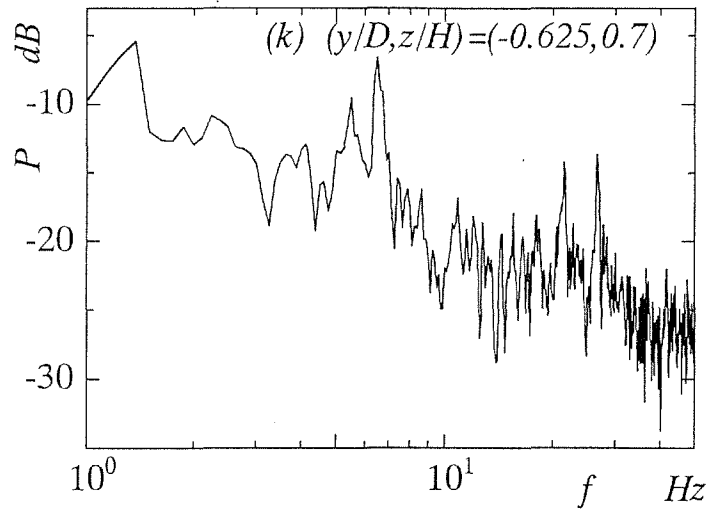
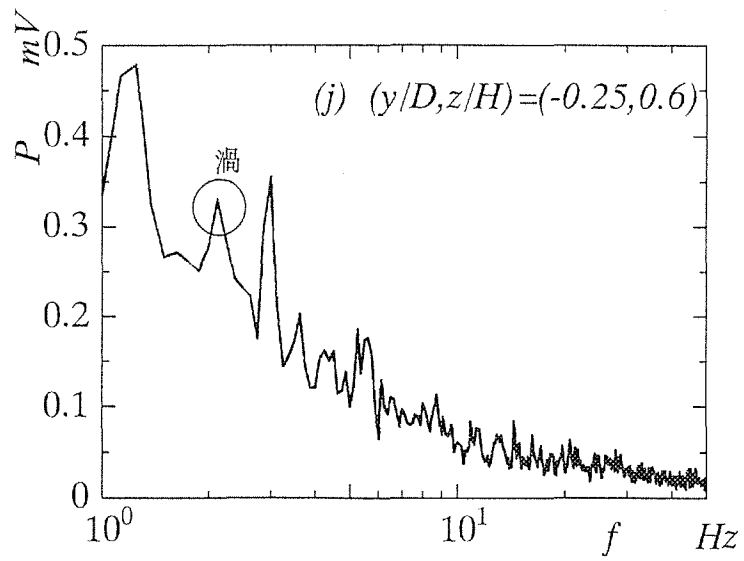


図10.20 乱れのスペクトル (続き) ($U_\infty = 5\text{m/s}$, $x/H = 1.8$)

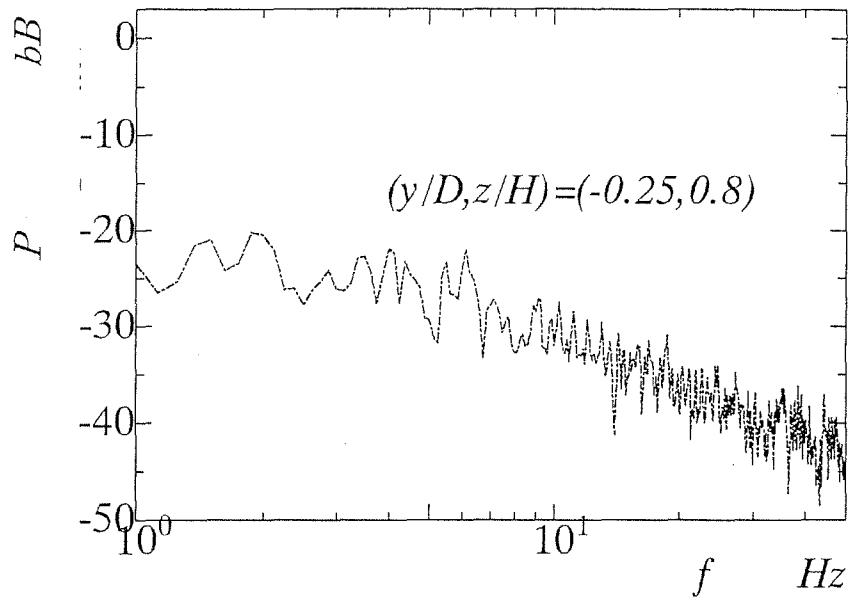


図10.20 乱れのスペクトル(続き) ($U_\infty=5\text{m/s}$, $x/H=1.8$)

10.2.3 樹木のしなりと変形が流れに及ぼす影響について

曳航風洞の実験では、走っている台車上の樹木を真横から観測し、その変形を明らかにすることができない。樹木にどの程度の主流速度が流入する時に、どの程度のしなりや変形を生ずるのかを明らかにするために、主流速度が樹木のしなり・変形に及ぼす効果を乱流風洞を用いて調べた。

しかし、3.1節で記述したように、乱流風洞測定部の高さは1.8mであり、供試樹木が入りきらない。このため、樹木の先端部を中心として主流を当てることにより、樹木のしなりを調べた。

図10.21に、主流速度に対するしなり角度を示す。ただし、しなり角度は樹木静止時の幹の位置からの角度を表す。

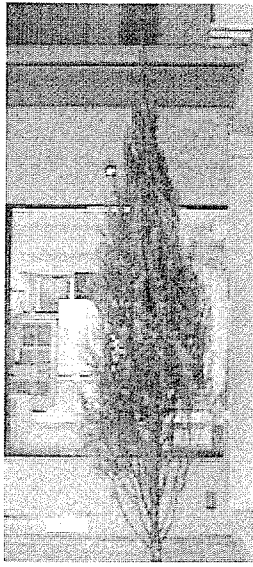
主流速度 (m/s)	しなり角度(°)
5	5
7	7
10	9
15	16

図 10.21 主流速度に対する樹木のしなり角度

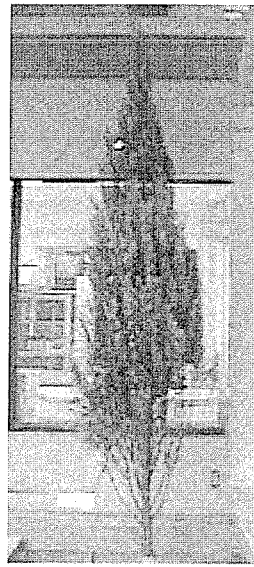
図10.22に各主流における樹木のしなり具合を示す。

このしなり角度から主流速度が5m/sの時は、樹木の各高さの位置が下流方向に17.5cmずれる。また主流速度が10m/sの時は下流方向に28.1cmずれる。また、樹木の下流方向から見た主流中における樹木の幅の変化を図10.23に示す。下流方向から見ると、元の形から若干変形している部分が見られる。更に、今回の実験では樹木の真上からの撮影をすることができなかった。しかし、下流方向及び樹木幅方向の変化から推測して、真上からの形状としてはすでに円形ではなく、楕円のように変形されているのではないかと考えられる。図10.24にそのイメージ図を示す。この樹木断面形状の変形のために、流れ中の渦のはく離の仕方まで異なってくると考えられる。

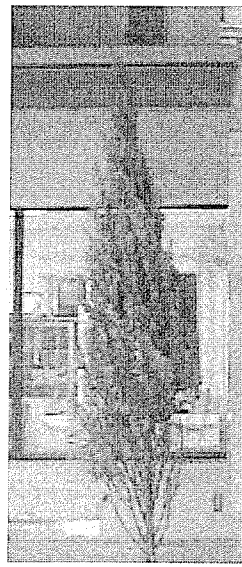
これらのように樹木が変形する要因から、樹木の代表長さ d の変化が渦放出周波数の変化と実験の再現性の困難に結びついていくことは明らかである。乱れのスペクトルと樹木の振動スペクトルの関連について考察する場合に、データ誤差やばらつき、また解析が困難となるデータを生む一つの原因である。



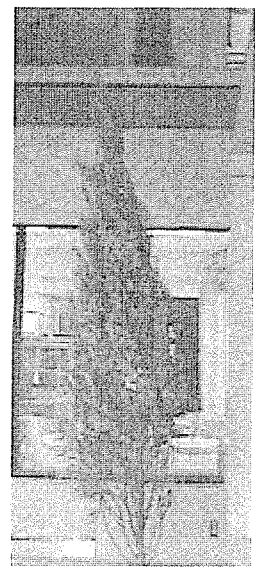
$U_{\infty}=0\text{m/s}$



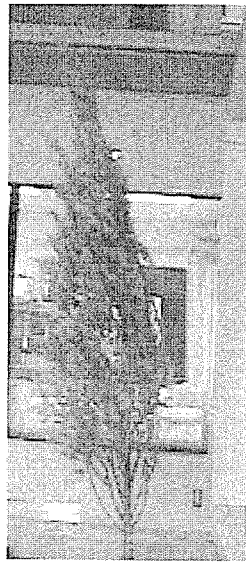
$U_{\infty}=3\text{m/s}$



$U_{\infty}=5\text{m/s}$



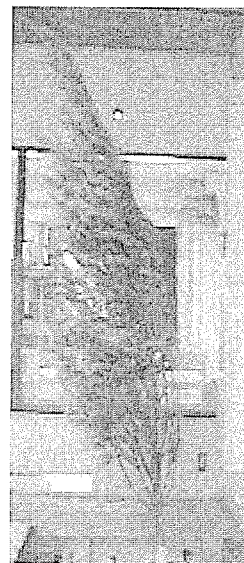
$U_{\infty}=7\text{m/s}$



$U_{\infty}=10\text{m/s}$

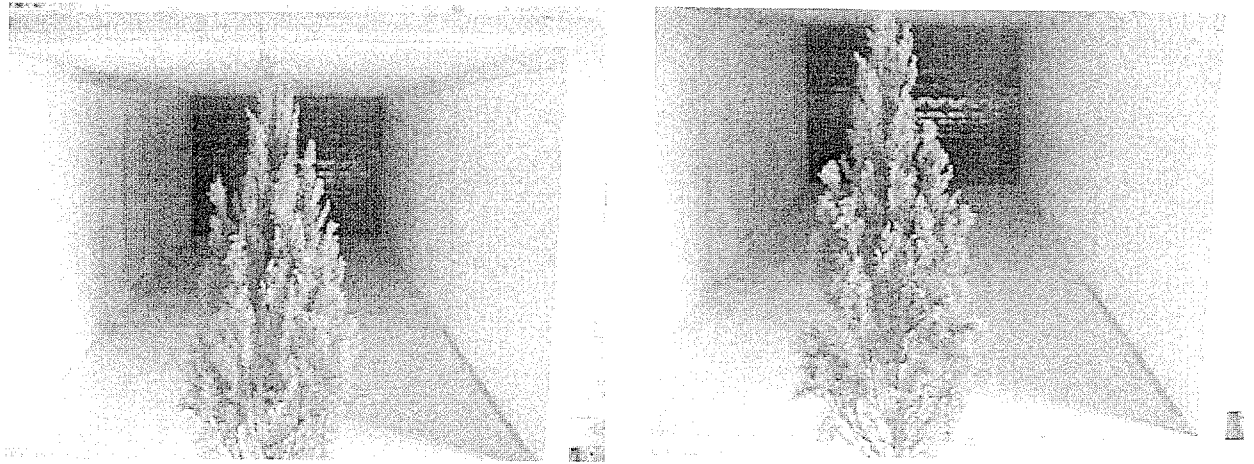


$U_{\infty}=13\text{m/s}$



$U_{\infty}=15\text{m/s}$

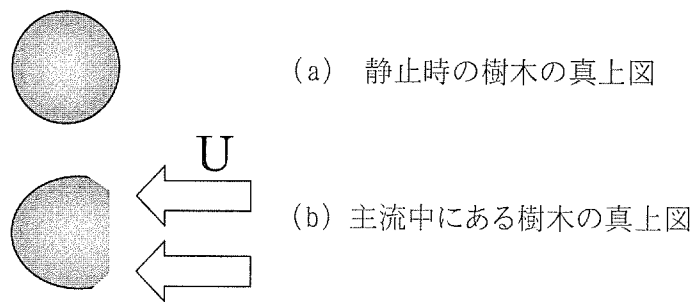
図10.22 主流速の変化に対する供試樹木のしなり具合



(a) $U_{\infty}=0\text{m/s}$

(b) $U_{\infty}=5\text{m/s}$

図10.23 下流方向から見た樹木幅の変化



(a) 静止時の樹木の真上図

(b) 主流中にある樹木の真上図

図10.24 静止時と主流中での樹木形状の違い

第 11 章 まとめ

第 2 部の本実験では、曳航風洞の施設を利用して成長した針葉樹（モミの樹）を供試樹木として、枝葉の揺れや幹のしなり、風の透過性までを含めて現実的な測定条件を再現し、風に対する樹木の反応とそれに対応する樹木下流域における流れ場の特長を探ることを目的とした。以下に本実験で得られた主な結果を示す。

- (1) 下流域の流れ場において、主流速度が 10m/s で供試樹木に近い $x/H=0.9$ の位置における平均主流方向速度の分布より、顕著にその防風効果、即ち大きな速度欠損が測定された。特に 最大樹木幅の高さ位置 ($z/H=0.35\sim 0.45$) の下流では、樹木幅に見合っただけで横方向の速度欠損領域は広く、また最大速度欠損率は 85%程度になっている。また、同じ主流速度において、樹木高さの約 2 倍程度下流位置 ($x/H=1.8$) での平均速度の測定結果より、最大樹木幅付近での速度欠損率は 30%程度に減少している。
- (2) 一方、主流速度が 5m/s で供試樹木に近い位置 ($x/H=0.9$) の場合、最大樹木幅の高さ位置 ($z/H=0.35$) で、明確な防風効果を示す結果が得られた。最大速度欠損率は、やはり 80%程度は見られた。この主流速度でにおいて、さらに樹木の約 2 倍程度下流位置 ($x/H=1.8$) での測定結果では、最大樹木幅下流付近での速度欠損率は 20%程度しか生じていない。
- (3) 主流速度が 10m/s で、供試樹木に近い $x/H=0.9$ の時では、防風効果の強い樹木の下流範囲では、乱れ強度は 10%程度に抑えられている。しかし、樹木幅の下流位置 ($y/D=\pm 1$) では、乱れ強度は 30%~40%程度となる。これは、主流が樹木を通過する時に生じる後流型速度分布の幅端近傍の急激な速度勾配による乱れの生成が原因と考えられる。
- (4) 樹木の約 2 倍程度下流位置 ($x/H=1.8$) での測定になると、樹木の下流にもかかわらず乱れはほとんど抑えられず、乱れ強さは、全体的に樹木横幅方向にほぼ一定の強さで、高さ方向の範囲 ($z/H=0.35\sim 0.7$) で約 35%の強い状態となっている。これは、樹木幅の両端から出た渦が原因なのではいかと考えられる。また樹木の先端位置 ($z/H=0.8, 0.85$) の下流では、樹木が細く柔らかいため、25%程度と低めの乱れ強さの状態となっている。
- (5) 樹木は、幹、枝、細枝に対応してそれぞれ固有振動数を持っているが、台

車上に設置させ曳航させた場合には、固有振動数では振動はしない。風速 2m/s 程の風速の低い自然風などには固有振動数で揺れることもある。路面から伝わる振動も、樹木には強く反映される。

- (6) 幹のすぐ下流において測定された主流方向乱れの速度成分のスペクトルを測定した。その結果、幹からの発生した渦に起因すると想定される 40Hz の周波数におけるスペクトルピークはあまり卓越性がない。これは、幹からの距離が幹の直径に対して十分長く、スペクトルピークはこの下流位置までに減衰してしまっていると考えられる。また、それ以外に 2 つのピークがあるが、これは幹からではなく、幹と樹幹の境目の部分から出た渦のスペクトルであると考えられる。
- (7) 樹木の下流位置 $x/H=0.9$ で流れに垂直な断面内において、 $(y/D, z/H)=(-0.25, 0.25) \sim (y/D, z/H)=(-0.625, 0.7)$ までは樹木から渦が剥離する時の振動スペクトルのピーク周波数と、その剥離した渦が下流で検出される乱れスペクトルピークの周波数との数値がよく合致している。これは、樹木の揺れがその下流域の乱れに大きく影響する重大な要素の一つである。特に、樹木高さが高いところほど、細枝のスペクトル値と合致して行く傾向にある。また、この範囲の高さでは下流の測定位置 ($x/H=1.8$) まで、低めであるがこの乱れスペクトルピークが検出される。しかし樹木の振動スペクトルには合致しない。
- (8) 流れの下流位置 x/H に関わらず $z/H=0.7$ 以上の樹木高さ、また $y/D=\pm 2$ 以上の樹木幅位置では、乱れ成分のスペクトルにおいて明確なピークは測定されなかった。樹木高さの先端部分では、樹木自体の剛性が小さく柔らかく、また細い幹が中心になることから、主流の中に樹木が置かれることにより樹木は非常に“しなって”しまい、樹木から発生すると予想されたカルマン渦的な渦によるスペクトルピークを計測することは困難であった。
- (9) 主流速 5m/s において、下流位置の $x/H=0.8$ と $x/H=1.9$ における流れ場の測定結果を比較した場合、乱れのスペクトルピークが測定された場合には、樹木に近い $x/H=0.8$ のピーク値が若干強めの値として検出された。これは樹木に近い場所の方が急激な速度勾配の変化が大きいためと考えられる。また同じ測定位置での流速を比較した場合、同様の理由で主流速が 10m/s における乱れスペクトルピークの方が一般的に大きな値を示す。

(10)主流中に樹木がある場合には，“しなり”をはじめとして樹木の変形が生じる。この変形は当然ながら主流速によって異なる。

主流速度が 5m/s の時は，樹木の各高さの位置が下流側に 17.5cm ずれる。また主流速度が 10m/s の場合の下流側へのずれは 28.1cm となっている。

さらに，樹木の幅も若干変化し，全座標系において，樹木の形状が変化する事がわかった。

(11)樹木下流域において流れの乱れスペクトルと樹木の振動スペクトルを比較検討して結果，これらのような樹木変形，追い風などの強風，台車の振動など多様な要因がお互いに影響をし合って，流れと振動の複雑な連成系を構築している。

おわりに

本研究では、大きく実験手法により二つの分けられる。

第1部で大型乱流風洞を利用して、くし型列状配置されたキャノピーモデルの葉面積指数の変化が流れ場に及ぼす影響を明らかにすることを目的にした。

一方、第2部では曳航風洞の施設を利用して、成長した針葉樹（モミの樹）の枝の揺れや幹のしなり、風の透過性まで現実性のある状況を再現し、風に対する樹木の反応と、それに対応する樹木下流の流れ場との関連性を明らかにすることを目的とした。

以下に、本実験で得られた主な結果を示す。

- (1) 第1部での大型乱流風洞を使用したキャノピーモデル実験において、全体的に樹高の3.5倍の下流域までは、適度に葉面積指数LAIが低い(LAI=4.5, 3.0)と乱れが最も大きくなる。これは、このLAIでは、くし型配列の形においての樹冠部分からはく離れた境界層が再付着する限界点がほぼ樹高の3.5倍程度であることによる。樹高の5.5倍程度の下流域では、葉面積指数が高い順に乱れも大きくなることがわかった。また本実験では、下流方向の測定範囲が樹高の5.5倍までであったので、LAI=9.0での再付着点を明確にすることができなかった。
- (2) キャノピーモデル下流の測定範囲の領域において、乱れ強さの減衰傾向として、LAI=9.0の場合は下流になるほど乱れ強さの最大ピークは大きくなり約8%程度増加する。これは、樹冠部分からはく離れたせん断層が再付着する領域が広いことを意味し、本実験では領域限界点を明らかにすることはできなかった。
一方、LAI=4.5, 3.0の場合は、徐々に乱れは大きくなるが、樹高の5.5倍の下流域に達すると乱れが低くなる。これもやはり、くし型配列の形においての樹冠部分からはく離れたせん断層が再付着する限界点が3.5倍程度のためと考えられる。
- (3) 葉面積指数が防風効果に及ぼす効果として、最終測定位置でLAI=9.0の森林模型の場合と比較してLAI=1.8の模型の場合は約40%程度まで防風効果率が下がる。また下流方向に向けて葉面積指数に対する防風効果減衰率の変化は、LAI=9.0の森林模型が測定可能な最下流の位置に達するまで約12%、LAI=1.8の森林模型に関しては約25%減衰していることが分かった。

- (4) 第2部での曳航風洞施設を利用しての、供試樹木周りの流れ場の実験では、主流速度が10m/sで $x/H=0.9$ の時は、特に最大樹木幅の下流において $z/H=0.35\sim 0.45$ で、最大速度欠損率が約85%となった。また、同じ主流速度でより下流位置の $x/H=1.8$ では、最大樹木幅付近での速度欠損率として30%程度しか見られなかった。
- (5) 主流速度が5m/sに対して $x/H=0.9$ の時は、最大樹木幅位置で高さ $z/H=0.35$ で、最大速度欠損率として80%程度が生じている。また、同じ主流速度で $x/H=1.8$ では最大樹木幅付近での速度欠損率は20%程度しか見られなかった。
- (6) $x/H=0.9$ では $(y/D, z/H)=(-0.25, 0.25)\sim (y/D, z/H)=(-0.625, 0.7)$ までは、樹木から渦がはく離する時の振動スペクトルとそのはく離れた渦が下流域で検出される乱れスペクトルのピーク周波数の数値がよく合致している。これは、樹木の揺れが、その下流域の乱れに大きく影響する重大な要素の一つであると考えられる。
- (7) 主流中に樹木がある場合のしなり具合は風速によって異なり、主流速度が5m/sの時は供試樹木の各高さの位置が下流方向に17.5cmずれる。また主流速度が10m/sの時は、同じく下流方向に28.1cmずれる。また、樹木幅も若干変化し、樹木の形状全体が変化することがわかった。これらのような樹木変形、追い風などの強風、さらに台車の振動など様々な要因から、データ上の誤差や再現性の確保への困難に繋がった。

参考文献

- (1) 平野公孝, 菊地正憲, 森林キャノピー模型の下流域における流れ方向速度分布の三次元構造, 宮崎大学工学部紀要, 28(1999).
- (2) 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.
- (3) 平野公孝, 平川雅啓, 菊地正憲, 森林キャノピーを過ぎる流れの数値シミュレーション, 日本流体力学会年会'99講演論文集, p. 513~p. 514.
- (4) 中山泰喜, 流体の力学, 養賢堂発行
- (5) 白倉昌明, 大橋秀雄, 流体力学(2), コロナ社
- (6) 真木太一, 風と自然, 開発社.
- (7) 畑野健一, 佐々木恵彦, 樹木の生長と環境, 養賢堂.
- (8) 堤利夫, 森林生態学, 朝倉書店.
- (9) 荒木真之, 森林気象, 川島書店.
- (10) M.P.Coutts, J.Grace, WIND AND TREES.
- (11) D.J.Tritton, Physical Fluid Dynamics.
- (12) 石川仁, 越山顕一郎, 望月修, 樹木の流体力学特性について