

2006年度 修士論文

都市部強風特性評価のための空気力学的粗度の定量化

Quantification of the aerodynamic roughness
for the estimation of high wind property in the urban area

須藤 亘平

Kouhei, Sudoh

東京大学大学院 新領域創成科学研究科

環境学研究系 社会文化環境専攻

目次

1. 序論	p. 3
1.1 はじめに	p. 4
1.2 平均風速鉛直分布の評価の現状	p. 5
(1) 基本風速	p. 8
(2) 鉛直分布係数	p. 10
1.3 研究の目的	p. 11
■参考文献	p. 13
2. 風速及び床面抗力測定実験	p. 15
2.1 はじめに	p. 16
2.2 実験概要	p. 17
(1) 風洞設備	p. 17
(2) 抗力測定装置	p. 19
(3) 床面抗力とせん断力の関係	p. 22
(4) 実験方法	p. 25
(5) 測定ケース	p. 27
2.3 実験結果	p. 30
(1) 風速測定位置の違いに関する考察	p. 30
(2) 基準風速の変化に関する考察	p. 34
(3) 粗度パラメータによる抗力の変化	p. 36
2.4 まとめ	p. 40
■参考文献	p. 41
3. 平均風速鉛直分布の評価	p. 42
3.1 はじめに	p. 43
(1) 平均風速の鉛直分布モデル	p. 44
(2) 平均風速鉛直分布の予測手法	p. 46
3.2 境界層理論	p. 48
3.3 平均風速鉛直分布の近似式について	p. 51
(1) 対数則	p. 51
(2) べき指数則	p. 53
3.4 実験結果からの鉛直分布係数の評価	p. 54
(1) 粗度長 Z_0	p. 54
(2) べき指数 α	p. 69
3.5 まとめ	p. 89
■参考文献	p. 90

4. レイノルズ応力	p. 92
4.1 はじめに	p. 93
4.2 抗力係数と平均風速鉛直分布の関係	p. 94
4.3 実験結果からのレイノルズ応力の評価	p. 97
4.4 まとめ	p.110
■参考文献	p.111
5. 内部境界層の発達	p.112
5.1 はじめに	p.113
5.2 境界層高さについて	p.113
5.3 実験結果からの内部境界層高さの評価	p.117
5.4 まとめ	p.121
■参考文献	p.122
6. まとめ	p.124

付録

謝辞

■ ■ 1. 序論

1. 1 はじめに

近年、気候変動や urbanization による自然環境の消失等により、自然災害は増加の歩を辿っている。新潟やインドネシアにおける地震被害、また多くの台風の襲来や北海道の竜巻被害等は記憶に新しい。建築物荷重指針（2004）では、建築物とは適切な安全性と使用性を有すべきであり、またその安全性と使用性の程度の検討にあたっては、社会性・経済性なども考慮するとしてある。これらに加え、国家的防災また地域的な防災という観点においても、災害危険度の評価は必要不可欠なものとなってきている。

また近年では、限界状態設計法の挑戦（2004）等で、限界状態設計法に代表されるような、安全性に加えて使用性を考える必要性が謳われている。建築物に関わる詳細な荷重評価は、このような使用性の評価のみならず、構造設計における環境負荷削減効率の評価（華表 2003）や総費用最小化を考慮した評価、また不動産や保険を交えたリスク評価としての PML（Probable Maximum Loss）の評価にとって必要不可欠なものである。

本論文で扱う内容は、以上のような背景がある構造設計の一部の耐風設計のうち、平均風速鉛直分布の評価である。特に、これからも増加し続けるであろう高層建築物の耐風設計を行う場合には、終局限界状態だけでなく、居住性などの使用限界状態に対応した設計を行う必要がある。建築物の耐風設計は図 1.1 のようなフローにまとめることが出来るが、本論文で扱う対象である平均風速鉛直分布の評価は、設計風速の決定および設計用風荷重の評価に関連している。高層建物の使用限界状態の設計においては、風による応答評価が重要であり、そこにおいて風向ごとの強風発生頻度や平均風速鉛直分布、また風速乱れの鉛直分布を適切に評価しなければならない。しかし、それらに多大な影響を与える風向ごとの地表面粗度および局所地形については明らかにされていない。そこで、本論文では市街地における地表面粗度の違いによる平均風速鉛直分布の評価をテーマとしてまとめる。本章では、以降に平均風速鉛直分布の評価に関する現状と既往の研究をまとめ、それらを受けての本研究の目的を記す。

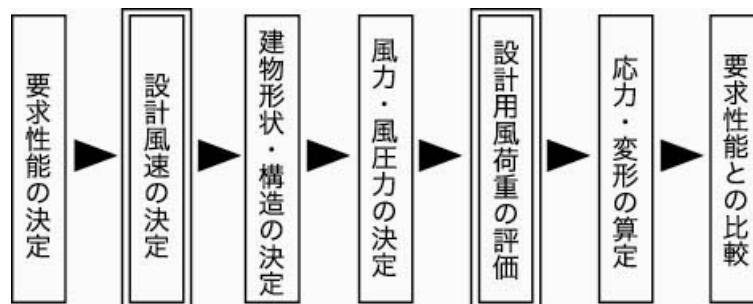


図 1.1 耐風設計のフロー

1. 2 平均風速鉛直分布の評価の現状

地表面付近の風速は、建築物や樹木などの地表面の地物や凹凸、および地形の起伏などの影響を受けて変化する。地表面の地物・凹凸は地表面の粗さ、すなわち地表面粗度による摩擦として、また地形の起伏は収束や遮蔽効果として、地表面から上空にかけての風に影響を与える。地表面の粗さにより、平均風速は上空から地表面に近づくほど低減することになる。このことは、上空の風が地表面から摩擦を受けているとみなすことができ、その効果は地表面の粗さの程度、すなわち地表面粗度として評価される。この地表面粗度の影響が及ぶ範囲は境界層と呼ばれ、境界層内部の平均風速の鉛直分布は地表面粗度により変化する。また、境界層厚さは吹送距離が長くなるにつれて厚くなる。

このような平均風速鉛直分布のモデルとして、以下に示すべき乗則（1.1）式と対数則（1.2）式がある。

$$\text{べき乗則} \quad U_Z = U_{Z_0} \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^\alpha \quad (1.1)$$

$$\text{対数則} \quad U_Z = \frac{1}{k} u_* \ln \left(\frac{Z}{Z_0} \right) \quad (1.2)$$

ここで、

U_Z : 高さ Z での平均風速 U_{Z_0} : 基準高さ Z_0 での平均風速 α : べき指数

u_* : 摩擦速度 k : カルマン定数 Z_0 : 粗度長

これらのべき指数、摩擦速度、粗度長は、基本的に地表面が粗いほど（市街地であれば建物が密集していればいるほど）大きくなる傾向がある。境界層の発達の様子の模式図と変数を図 1.2 に示す。

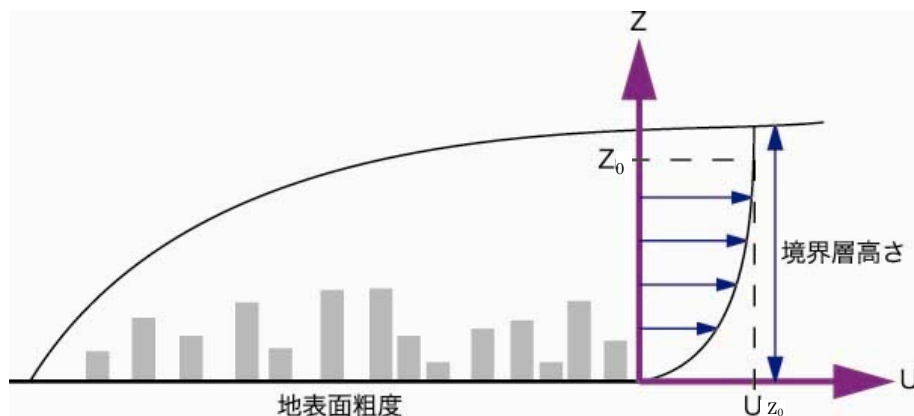


図 1.2 平均風速鉛直分布のモデル

建築学会の荷重指針では、設計風速 U_H を次式 (1.3) により定めている。

$$U_H = U_0 K_D E_H k_{rw} \quad (1.3)$$

基本風速 U_0 (m/s) は、地表面粗度区分Ⅱ (後述) の場合の、地上 10m における 10 分間平均風速の再現期間 100 年に対する値を基本風速マップ (図 1.3) により表している。

風向係数 K_D は、建築物の建設地の地理的位置や大規模地形の影響などにより、全国の主要都市に対して 8 風向に、0.85~1 の値が定められている。

再現期間換算係数 k_{rw} は、再現期間 500 年の基本風速マップと基本風速 U_0 の比によって設計用再現期間に対応するような値を定めている。

E_H は、建築物の建設地の地表面の状況に応じた基準高さ H における値であり、式 (1.4) により求められる。

$$E_H = E_r E_l \quad (1.4)$$

E_l は、小地形による風速割り増し係数で、傾斜地や屋根状地形での風速の増分の考慮に用いられている。

E_r は、風速の鉛直分布係数である。建設地の地表面の状況は、地表面粗度区分 (表 1.1 及び図 1.4) により 5 段階に設定されており、鉛直分布係数はその 5 段階の地表面粗度区分により、式 (1.5) で算定される。

$$\begin{aligned} E_r &= 1.7 \left(\frac{Z}{Z_G} \right)^\alpha & Z_b < Z \leq Z_G \\ &= 1.7 \left(\frac{Z_b}{Z_G} \right)^\alpha & Z \leq Z_b \end{aligned} \quad (1.5)$$

Z は地表面からの高さで、 Z_b 、 Z_G 、 α はパラメータとして表 1.2 に示す。

以上が、建築物荷重指針による平均風速の鉛直分布に対する規定である。

表 1.1 地表面粗度区分

粗度区分		風上側の地表面の状況
滑	I	海面・湖面のようなほとんど障害物のない地域
	II	田園地帯や草原のような農作物程度の障害物のある地域、 樹木・低層建築物の散在している地域
	III	樹木・低層建築物が多数存在する地域、 あるいは中層建築物(4~9 階)が散在している地域
	IV	中層建築物(4~9 階)が主となる地域
粗	V	高層建築物(10 階以上)が密集する地域

表 1.2 風
分布を定
メータ

粗度区分	I	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	V
Z _b	5	5	10	20	30
Z _G	250	350	450	550	650
α	0.10	0.15	0.20	0.27	0.35

速の鉛直
めるパラ

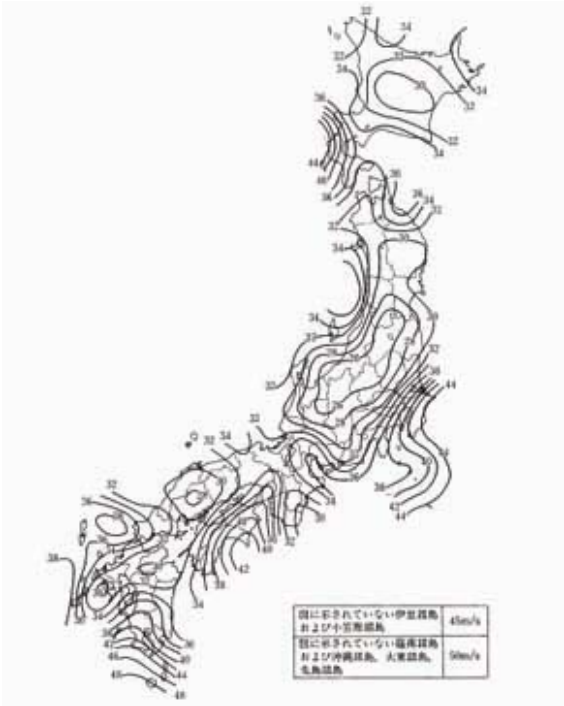


図 1.3 風速マップ



地表面粗度区分Ⅰ



地表面粗度区分Ⅱ



地表面粗度区分Ⅲ



地表面粗度区分Ⅳ



地表面粗度区分Ⅴ

図 1.4 地表面粗度区分

以下では、耐風設計における風荷重の設定について各国の規基準の比較を行う。設計風荷重の確立・統計的な評価に関しては古くより論じられている（例えば Davenport 1983）。各国の設計規基準で風荷重評価に用いられる式はおおむね統一されており、以下のような式が用いられる。

$$W = qC_eC_pC_g\mu \quad (1.6)$$

ここで、 $q(=1/2\rho U_0^2)$ は基準速度圧、 C_e は鉛直分布係数、 C_p は平均風力（風圧）係数、 C_g はガスト影響係数、そして μ はモデル化誤差である。近年ではこれらの係数のほかに強風発生と構造物の風応答の風向依存性を考慮した係数（風向係数）が用いられる場合もある。以下ではそれぞれのパラメータについて各規基準の比較を行うが、特に規基準間での差異が見られる基本風速および鉛直分布係数に関して記す。

（１）基本風速

表 1.3 に各規基準における基本風速設定の比較を示す。評価時間（平均化時間）に関しては 10 分（あるいは 1 時間）と 3 秒に大別される。10 分（あるいは 1 時間）を評価時間とする根拠は、スペクトルを見た場合に長周期変動と短周期変動の境目がちょうど 10 分から 1 時間のあたりにあること（Van der Hoven 1957）や、また日本では気象データが 10 分間平均であることなどによる。気象データ処理の平均化時間として 10 分を用いると、台風などによる強風評価を考えた場合には平均化時間を 3 秒とするよりも統計的に優れており、合理的であると考えられる。一方で、基本風速の評価時間に 3 秒を使うことの根拠は、雷雨に伴う強風（thunderstorm）などの突発的な気象現象を適切に表現できることや地表面の影響を受けにくいことなどが考えられる。

また別の観点としては基準期間中の最大風速の確率分布の問題がある。近年様々な観点から従来通りの Gumbel 分布（極致 I 型分布）を用いることに対する疑問が出てきている。

（例えば Cook 1982、Palutikof et al 1999）。強風の発生に複数の成因がある場合には、強風危険度評価の際に成因別解析（Gomes & Vickery 1978）を行うことは一般的になりつつある。これらの問題はいずれもそれぞれ密接に関わっていると言える（例えば Choi & Tanurdjaja 2002）。

次に、規基準における基本風速の再現期間に関しては、ほとんど 50 年が用いられている。しかし、基本風速をそのまま設計風速として用いる場合もあれば、荷重係数と組み合わせで用いる場合もあり、また材料安定率との関係もあるために、再現期間が建築物の安全性と必ずしも一対一には対応しない。

また、基本風速を求める際の統計的不確定性に関しては明示されていないが、ほとんどの場合で考慮されていないものと考えられる。

本研究では以上の問題点についての直接的な議論は行わないが、本研究で行う議論の基本となることからここで取り上げた。

表 1.3 各規基準における基本風速設定の比較

規基準名	評価時間	再現期間
日本建築学会建築物荷重設計指針(2004)	10 分	100 年
建築基準法施行令	10 分	50 年
ASCE7-02(2002)	3 秒	50 年
AS/NZ 1170.2(2002)*	3 秒	100~2000 年
BS6399 Part2(1995)	1 時間	50 年
ISO4354(1997)	10 分	50 年
EUROCODE(ENVI 1991-2-4, 1995)	10 分	50 年

*AS/NZ では建物の設計供用期間に応じて設計荷重の再現期間を変化させる仕組みを採用している。

表中の値は設計供用期間が 50 年の場合。

(2) 鉛直分布係数

先にも述べたが、鉛直分布係数は地表面粗度の影響や地形の影響などを考慮する係数である。ただし、ここでは地形の影響などの議論は行わない。

鉛直分布係数を定量的に評価するためには建築物を含めた地表面の凹凸が風速鉛直分布に与える影響を適切にモデル化する必要がある。建築構造物の設計風荷重の評価において、風速の鉛直分布は二度用いられる。ひとつはここで示す鉛直分布係数の評価のためであり、もうひとつは構造骨組の荷重効果の評価におけるガスト影響係数算出においてである。前者は設計建物の高さよりも上部の風速分布を必要とするのに対して、後者は設計建物高さ以下の風速分布を必要とする。したがって、本来これらは別々に評価を行う必要があると考えられる。しかし、建築物荷重指針（2004）ではこれらに対して一律の評価を行っており、鉛直分布係数の評価の際に建物高さの 40 倍程度の範囲の地表面より地表面粗度区分を評価すると定めている。

また各国・地域の規基準においては、鉛直分布係数の定量的な評価法は存在せず、主観的な分類法にとどまっていることも問題点として挙げられる（表 1.1、表 1.4）。そこで、本研究では地表面の凹凸の性状の違いによる上空風の風速分布の違いを把握することを大きな目的とする。

表 1.4 に各規基準における風速鉛直分布評価法の比較を示す。設計においては前述のべき指数分布と対数分布という考え方がそれぞれ用いられていることがわかる。本研究においては、これまでわが国での設計においてはべき指数分布が用いられてきていることから、べき指数分布を用いることを前提とする。

表 1.4 各規基準における鉛直分布係数の比較

規基準名	風速鉛直分布	粗度区分数	修正対象	備考
日本建築学会 建築物荷重設計指針(2004)	べき指数	I ~ V	風速	
建築基準法施行令	べき指数	I ~ IV	風速	
ASCE7-02(2002)	べき指数	A ~ D	速度圧	
AS/NZ 1170.2(2002)	対数	1 ~ 4	風速	cyclone と non-cyclone を区別
BS6399 Part2(1995)	対数	a ~ c	風速	effective height を導入
ISO4354(1997)	べき指数/対数		速度圧	
EUROCODE(ENVI 1991-2-4, 1995)	対数	I ~ IV	風速	

1. 3 研究の目的

現在、信頼性設計法を用いた建築構造物の設計が実用化されつつある。建物設計時に建物構造物に作用する強風などの外力の大きさを確定的に予測することは不可能であり、その不確定性を確率論的に評価する必要がある。一方、設計に関しては、構造物の応答が風向特性を有するため風向ごとの強風発生頻度や風速分布を適切に評価しなければならない。しかし、都市部においてそれらに多大な影響を与える風向ごとの地表面粗度および局所地形については明らかにされていない部分が多い。また、風速値そのものについては確率的な扱いが認知されているが、風速の鉛直分布の不確定性の扱いに関しては神田（1982）が指摘している程度である。

平均風速鉛直分布の設計等に対する影響について、例えば浅見は、構造骨組用の等価静的風荷重に対し、高層建物を対象とした検討を行っている。ここでは、地表面粗度区分Ⅲに対しての動的風荷重の評価が焦点となっているが、もちろん平均風速鉛直分布および乱れの鉛直分布が変化すれば風荷重自体も変化するので、平均風速鉛直分布の評価の重要性が浮かび上がる。また、都市環境の研究分野では、都市の温熱効果に関するシミュレーションや排気ガスの拡散シミュレーションが行われているが、そこにおいても市街地における熱拡散効果や複雑地形での排気ガスの拡散効果の評価には、自然風による拡散効果が影響してくるため、平均風速鉛直分布の推定が必要となる。

建築物荷重指針における設計風速の規定では、風向に対しては風向係数による考慮しか行わないが、中村ら（2003）や山崎ら（2004）は風向別基本風速マップの作成を試みている。ここにおいては、全風向の基本風速の場合に比べて、風向別の場合には前方の地形影響についてより詳細に検討する必要があると指摘されている。この基本風速マップ作成においては、地表面粗度区分としてⅠおよびⅢを仮定し、シミュレーションが行われているが、地表面粗度区分によって評価が変わってくることが指摘できる。台風シミュレーションにおいて（例えば勝地ら 2004）は、上空でのシミュレーションにおける風速を地上の風速値に換算して実際の評価とするために、平均風速鉛直分布を用いることが必要となるので、台風時の平均風速鉛直分布の評価もまた耐風設計において重要な意味を持つといえる。

このように、平均風速鉛直分布の影響する範囲は、広範囲で多岐にわたる。既往の平均風速鉛直分布評価の現状としては、観測結果や実験値をとりまとめ、地表面粗度の状況と式（1.1）、（1.2）にあげたべき指数および粗度長や境界層高さ、乱れの強さについてまとめたものとして Davenport（1960）や Counihan（1975）、国内のものでは崔ら（1990）によるものがあげられるが、地表面粗度の評価については定性的なものにとどまっている。

地表面粗度の定量的評価に関する試みは少なく、亀井・丸田（1978）は、建築密度を用いたべき指数の近似式を提案し、大熊ら（1986）は平面密度を変化させた場合のべき指数の変化を実験により求め、丸山（1990）は空間平均操作を施した $k-\varepsilon$ モデルによるシミュレーションを行い、気流性状の推定を行った。また、中村（2001）は東京都の土地利用数値情報を用いて地表面粗度を分析し、既往の観測例との比較を行った。

しかし、これらの地表面粗度評価はどの例に関しても、地表面粗度を平面密度及び平均容積によって均一化したケースを扱っており、地表面粗度のばらつきに関しては評価されていないという問題点がある。中村は、4 階以上の建物の割合によりばらつきの評価に代えているが、定量的であるとは言い難い。

地表面粗度の高さのばらつきに関する定量的評価としては、菅野（2004）がこれまでの平面密度に加え建物の平均高さ、高さの標準偏差といったパラメータを考慮した研究を行っているが、その他に事例はなく、より定量的な評価が必要である。

そこで本研究では、耐風設計や環境解析にとって重要な要素となる平均風速鉛直分布の定量的な評価を行う。

平均風速鉛直分布に影響を及ぼす地表面粗度に関する影響因子を菅野により提案された平面密度、建物の平均高さ、建物の高さの標準偏差といった 3 つのパラメータとして設定し、風洞実験によりランダムで不均質な都市部の建物群などの地表面粗度による平均風速鉛直分布を評価する手法を提案することを目的とする。

また、これまでに提案されてきた平均風速鉛直分布に関わる粗度パラメータおよびレイノルズ応力に代表される物理的パラメータの理論的な対応関係を実験により定量的に明らかにし、それらの結びつきを確認し評価することを目的とする。

■参考文献

- 日本建築学会 : 「建築物荷重指針・同解説」 2004 改定版
- 神田順 他 : 「限界状態設計法の挑戦」 建築技術 2004
- 華表良介 : 「構造種別間の環境負荷削減効率の比較」
日本建築学会大会学術講演梗概集構造 I , 2003, 9, pp39-40
- 神田順 : “HEIGHT DEPENDENCE OF THE LONGITUDINAL
TURBULENCE CHARACTERISTICS IN STRONG WINDS”
日本建築学会論文報告集 第 229 号・昭和 56 年 1 月
- 浅見豊 : 「建築物における等価静的風荷重の高さ方向分布に関する検討」
日本風工学会誌 vol.98 2004 pp.151-158
- 中村秀治 他 : 「風向別基本風速マップ作成の試み」 日本風工学会誌
vol75 1998 pp.13-18
- 山崎智之 他 : 「送電用鉄塔の耐風設計のための風向別基本風速に関する検討」
日本風工学会論文集 vol29, No3 (No.100) , 2004, 7, pp19-34
- 勝地弘 他 : 「海面水温の影響を導入した台風シミュレーション」
日本風工学会論文集 vol29, No3 (No.100) , 2004, 7, pp1-18
- 崔恒 : 「風荷重評価のための平均風速と乱れの強さの鉛直分布特性」
日本風工学会誌 vol45, 1990.8, pp23-43
- 神田順
亀井勇 : 「高層建築物周辺に生ずる強風領域の実験的研究」
日本建築学会論文報告集 第 264 号, 1978, 2, pp31-39
- 丸田栄蔵
大熊武司 他 : 「市街地を対象とした乱流境界層の風洞実験による基礎的研究」
第 10 回風工学シンポジウム 1986, pp61-66
- 丸山敬 : 「市街地上空における耐風設計用気流性状の予測に関する研究」
1993 京都大学博士論文
- 菅野宏紀 : 「地理情報システムに基づく平均風速鉛直分布の評価」
2004 東京大学修士論文
- Davenport, A.G. : “The Relationship of Reliability to Wind Loading” ,*Journal of Wind
Engineering and Industrial Aerodynamics*, 13, 3-27 1983
- Van der Hoven : “Power Spectrum of Horizontal Wind Speed in the Frequency Range
from 0.0007 to 900 cycles per hour” ,*Journal of Meteorology*,
14, 160-164 1957
- Cook, N.J. : “Towards better estimation of extreme winds” ,*Journal of Wind
Engineering and Industrial Aerodynamics*, 9, 295-323 1982

- Paltikof, J.P. : “A review of methods to calculate extreme wind speeds”
 Brabson, B.B. ,*Meteorological Applications*, 6, 119-132 1999
 Lister, D.H.
 Adcock, S.T.
 Gomes, L. : “Extreme Wind Speeds in Mixed Wind Climates” ,*Journal of*
 Vickery, B.J. *Industrial Aerodynamics*, 2, 1978, 331-344 1978
 Choi, E.C.C. : “Extreme wind studies in Singapore. An area with mixed weather
 Tanurdjaja, A. system” , *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*
 , 90, 1611-1630 2002
 Davenport : “Rationale for determining design wind velocities” ,*Proc. ASCE*,
 Vol86, No.St5, 1960, pp39-68
 J.Counihan : “Adiabatic Atmospheric Boundary Layers” ,*A Review and Analysis of*
Data from the period 1880-1972, Atmospheric Environment
 vol9, 1975, pp871-905

■ ■ 2. 風速及び床面抗力測定実験

2. 1 はじめに

本章では、本研究における風洞実験の方法と測定データの扱いについて述べる。本実験は、風速データと共に、境界層の発達の直接の原因となる風と地表面との間に発生するせん断力を把握することを目的とする。風洞内のある部分を空気により浮かせることにより、そのフロート部分全体にかかる抗力を測定し、粗度形状による抗力の変化を調べる。

地表面に発達する乱流境界層は、地表面との摩擦力すなわち地表面とのせん断力により運動量が高さ方向に交換されることで形成される。この地表面とのせん断力は、地表面に加わる抗力と釣り合うが、その大きさは粗度形状によって変化する。このことは、地表面に存在する粗度形状にしたがって発生する地表面に加わる抗力を測定することにより、地表面と空気の間には発生するせん断力を求めることができると考えることもできる。以下に、粗度形状と抗力との関係を調べた既往の文献をまとめる。

Wooding (1973) は、様々な粗度形状に伴うせん断力を実験結果によりまとめた。丸山 (1989) は、立方体粗度ブロックを用いて平面密度及び風向方向に対する角度を変え、粗度ブロックを千鳥状・格子状・ランダムに並べ、それに伴う抗力の変化を調べた。またその実験結果を粗度要素の抵抗を考慮した $k-\varepsilon$ モデルにあてはめ、数値計算を行った。Y.Jia (1998) は、立方体粗度ブロックを用い平面密度を変化させ、配列を千鳥状・格子状として抗力の変化を調べた。

以上が主な粗度形状と抗力に関する実験であるが、粗度形状に対する取り扱いに関し、ここでも高さ方向の変化を扱ったものは存在しない。

2. 2 実験概要

(1) 風洞設備

実験は、東京大学工学系研究科建築学所有の風環境シミュレータ風洞内にある小風洞に行った(図 2.1)。風洞形式はゲッチングン型回流式であり、測定洞はターンテーブルまでの長さ 4200mm×幅 1000mm×高さ 700mm である。主な性能を表 2.1 に示す。また、風洞の図面を図 2.2 に示す。

この風洞に関しては、斉藤ら(1991)により紹介がなされている。ただし、本風洞は竣工当時はエッフェル型風洞であったが、その後現在のゲッチングン型に変えられたものである。

表 2.1 風洞性能

風洞本体		送風機	
形式	ゲッチングン型風洞	形式	軸流送風機
全長	17.5 m	直径	1.2 m
測定部断面	1.0 m×0.7 m	流量	10.5 m ³ /s
測定洞長さ	5.1 m	電動機	直流電動機
縮流比	4:1	回転数	35~1150 rpm
風速範囲	0.5~15.0 m/s		

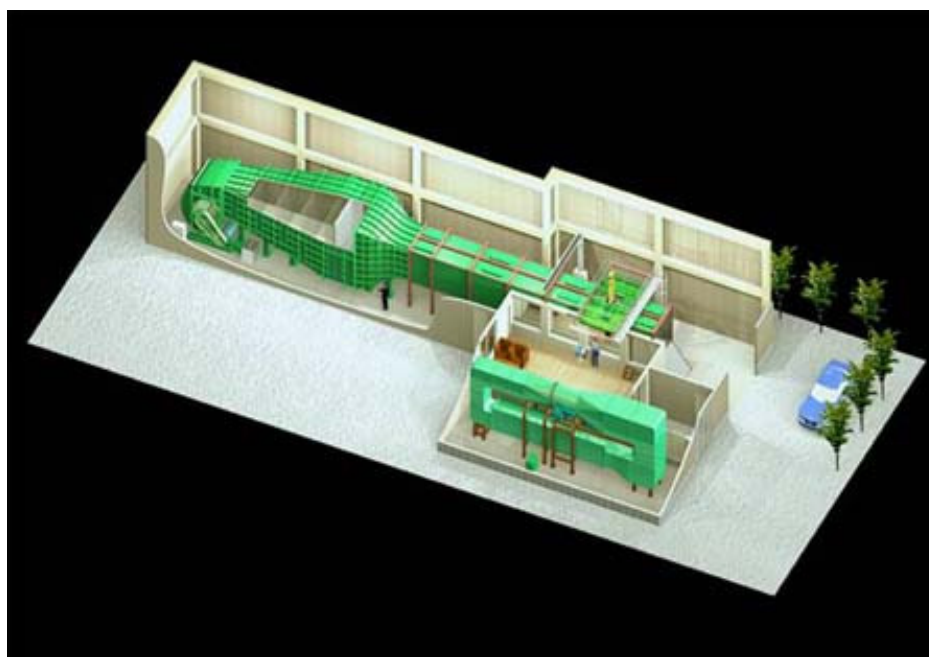


図 2.1 風環境シミュレータ

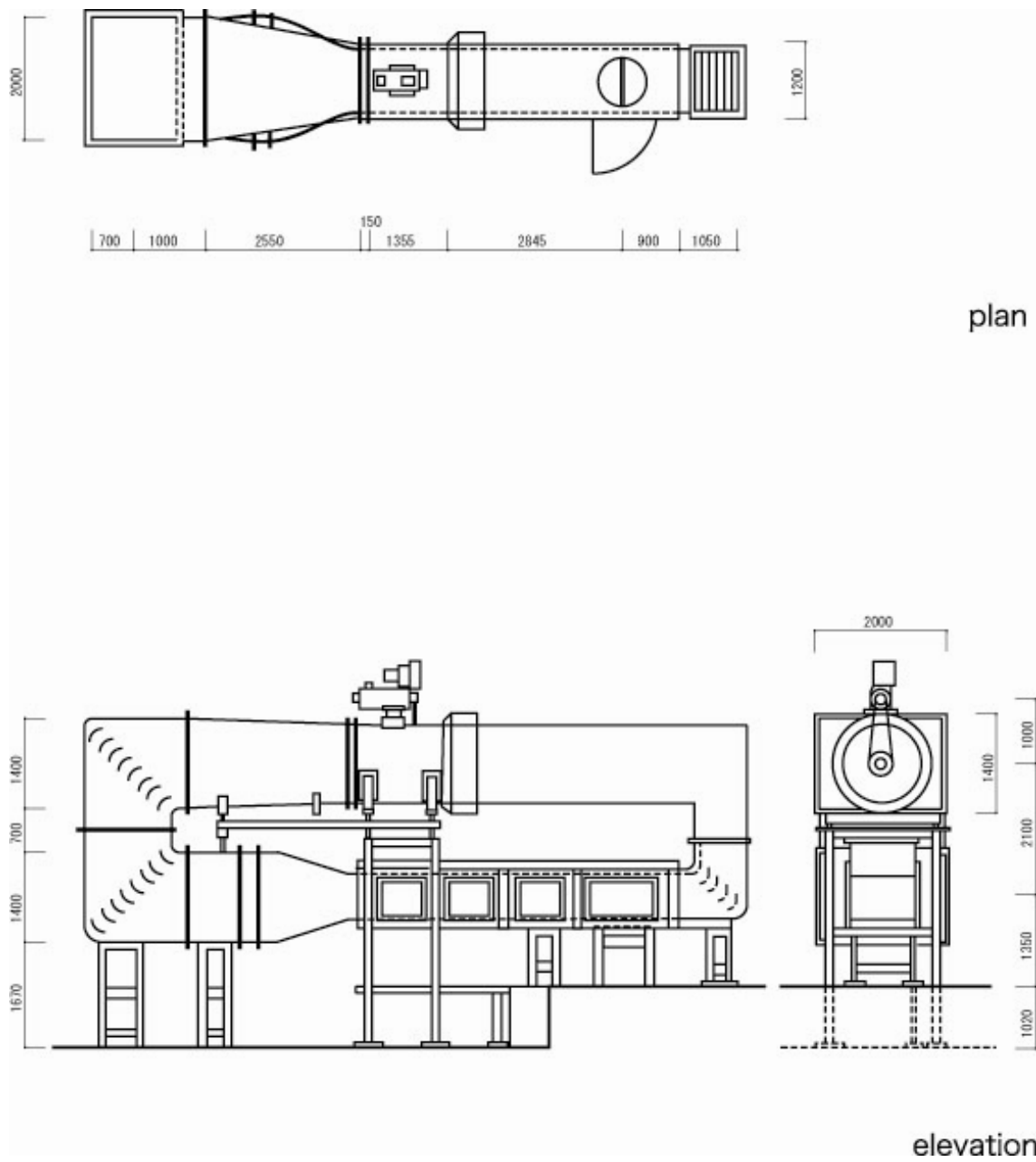


图 2.2 小風洞图

（２）抗力測定装置

抗力測定装置に関する説明を行う。本装置は、風洞内のある部分（以下フロートテーブル）を空気により浮かせ、フロートテーブル部にかかる下面との摩擦力をほぼゼロにした状態で、フロートテーブル上の粗度により風力を与えることで抗力を発生させ、その抗力をロードセルセンサーにより測定する装置である。これは、フロートテーブル上の粗度形状を変化させ、それに伴う抗力の変化を調べるのが目的である。抗力測定装置の模式図を図 2.3 に示す。

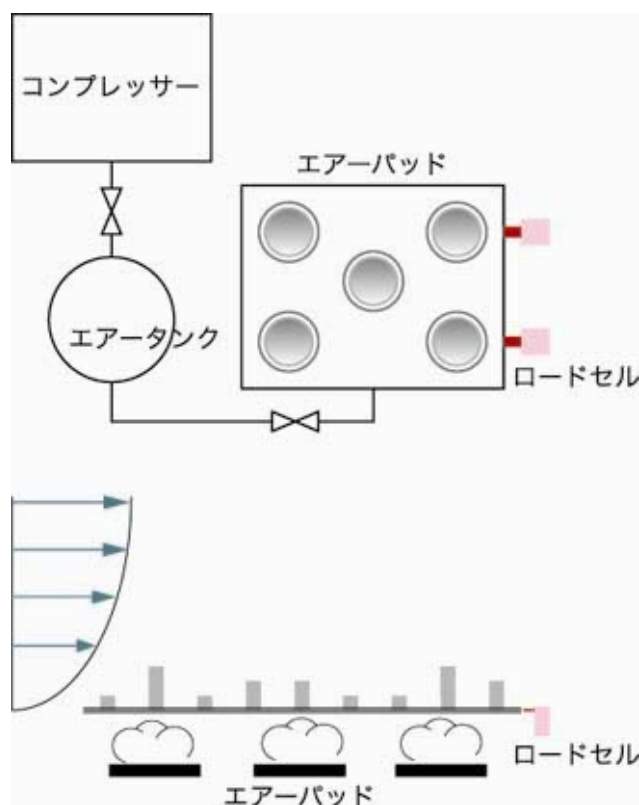


図 2.3 全体抗力測定装置模式図

次に、測定装置の成り立ちを順に追って記す。

- ① コンプレッサーにより圧力を発生させ、エアータンク内に貯める。
- ② ①で貯めたエアーをエアパッドに流す。このエアパッドは鋳物で特殊加工されたものであり、フロートテーブルはその上の粗度形状によるものの、およそ 0.15 (MPa) で安定して浮上する。エアーの流量によるフロートテーブルの振動は風力による振動に比べて十分小さく、抗力測定における問題は無いといえる。

- ③ エアーパッドは 5 個設置してあり、それぞれにエアーパッド用減圧弁がついている。これにより、5 つの口から出るエアーの流量はそれぞれ個別に調節することができる。フロートテーブル上の粗度形状が一様でない場合には、この減圧弁により流量を調節し、フローとテーブルの浮き方を平行に保つことにより、主流方向の抗力を正確に測定することができる。
- ④ 風速ゼロの状態において、フロートテーブルがロードセルに接するように空気圧およびロードセルの取り付け位置を調整し、ロードセルのゼロ点調整を行う。
- ⑤ 風洞内に風を吹かせると、風とフロート全体に摩擦力が発生し、フロートテーブル全体に加わる抗力が、2 個設置されたロードセルの出力の和として得られる。

図 2.4 から図 2.7 に、抗力測定装置の各部の写真を示す。



図 2.4 エアーパッド



図 2.5 フロートテーブル

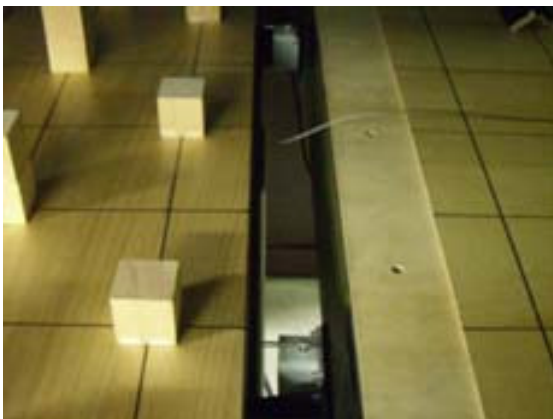


図 2.6 ロードセル



図 2.7 エアーパッド減圧弁

本実験においては、主流方向の抗力のための測定となる。しかし、丸山の実験によると、主流方向の抗力に対して主流直角方向の抗力は約 5% 程度であり、またフロートテーブルに加わるモーメントも十分に小さいという考察がなされている。したがって、本実験の測定方法で十分な評価が行うことが出来ると考えられる。

最後に、ロードセルセンサーの性能試験結果として、抗力とセンサーの出力の関係を示す（図 2.8）。これは、フロートテーブルにある特定の抗力を分銅にて与えたときに、センサーの出力がどのような値を示すかを確認したものである。

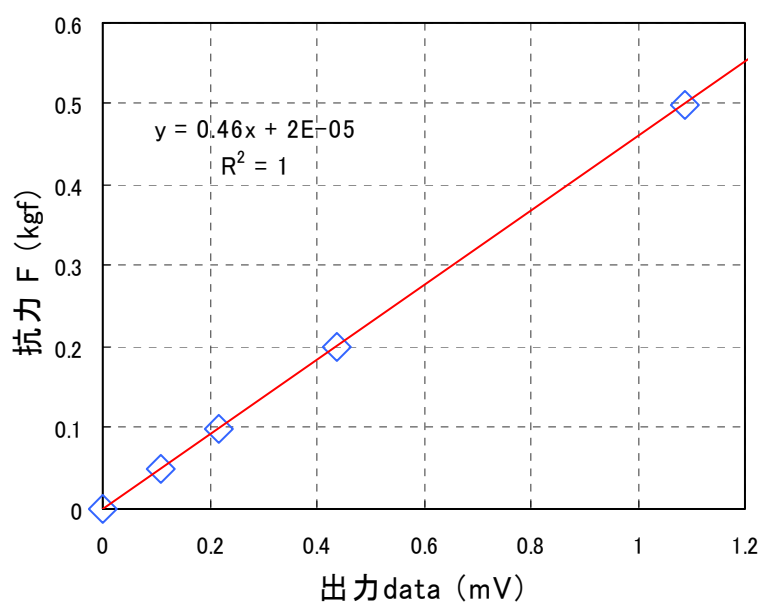


図 2.8 抗力とセンサー出力データの関係

(3) 床面抗力とせん断力の関係

ここでは、本研究で扱う床面抗力とせん断力の関係を示す。ただし、本実験ではフロートテーブル上のラフネスブロックの配置を千鳥状としたので、以下は千鳥状配置の場合を想定している。

図 2.9 に実験で扱う変数、及びフロートテーブル全体に作用する抗力 F とせん断力 τ_w の関係を示す。

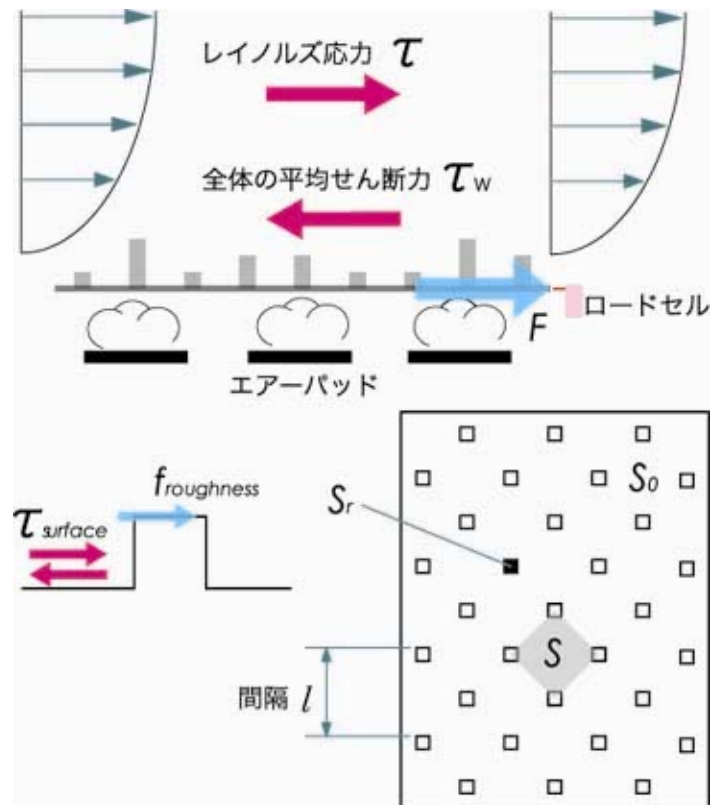


図 2.9 抗力測定実験で扱う変数

変数の関係式は、以下のように書ける。

風によりフロートテーブルが受ける力 F は

$$F = Nf_{roughness} + \tau_{surface}(S_0 - NS_r) \quad (2.1)$$

ここで、 $f_{roughness}$: 粗度要素 1 個が受ける力

(=粗度要素の表面に加わる摩擦力+粗度要素に加わる圧力)

$\tau_{surface}$: 床面に加わる摩擦力

N : フロートテーブル上の粗度要素の個数

S_0 : フロートテーブルの面積

S_r : 粗度要素の床面積

また、千鳥状配置における粗度要素 1 個あたりの床面積 S から求まる、フロートテーブル全体の平均せん断力 τ_w は

$$\tau_w = \frac{f_{roughness}}{S} + \tau_{surface} \left(S - S_r \right) \frac{1}{S} \quad (2.2)$$

(2.1) 式の両辺を NS で割ると

$$\frac{F}{NS} = \frac{f_{roughness}}{S} + \tau_{surface} \left(\frac{S_0}{NS} - \frac{S_r}{S} \right) \quad (2.3)$$

(2.2) 式および (2.3) 式より

$$\tau_w = \frac{F}{NS} + \tau_{surface} \left(S - \frac{S_0}{N} \right) \frac{1}{S} \quad (2.4)$$

ここで、粗度要素の有無による床面摩擦力の変化は、床面抗力全体に対して十分に小さい。

そこでフロートテーブル上の粗度形状の変化による $\tau_{surface}$ の差を無視し、 $\tau_{surface}$ をフロート

テーブル上に粗度要素を設置しなかった場合の床面抗力 ($\tau_{surface0}$) により一律に表すと、

$\tau_{surface}$ は次のようになる。

$$\tau_{surface} = \tau_{surface0} = \frac{F_{surface0}}{S_0} \quad (2.5)$$

したがって、(2.4) 式および (2.5) 式より、フロートテーブル全体の平均せん断力 τ_w は

$$\tau_w = \frac{F}{NS} + F_{surface0} \left(1 - \frac{S_0}{NS} \right) \frac{1}{S_0} \quad (2.6)$$

となる。

また、床面抗力の比較には次式で表される床面抗力係数 C_D を用いることができる。

$$C_D = \frac{\tau_w}{Q_0} \quad (2.7)$$

ここで、 Q_0 : 基準速度圧

本研究では、基準速度圧 Q_0 はピトー管（フロートテーブル前縁、境界層上部（ $x=3500\text{mm}$, $y=200\text{mm}$, $z=2500\text{mm}$ ）に設置）により求める。

$$Q_0 = \frac{1}{2} \rho U_0^2 \quad (2.8)$$

ただし、 ρ = (空気密度) = $1.225[\text{kg}/\text{m}^3]$

(気圧 : 1 気圧 = 1hPa , 気温 : 15°C) とした。

ここで、(2.5) 式が

$$\tau_{surface} = \tau_{surface0} = \frac{F_{surface0}}{S_0} (= C_{surface0} Q_0)$$

となることから、(2.6) 式および (2.7) 式より

$$C_D = \frac{F}{NSQ_0} + C_{surface0} \left(1 - \frac{S_0}{NS} \right) \quad (2.9)$$

と書ける。

(4) 実験方法

本実験では、粗度要素の平面密度・平均高さ・高さの標準偏差をパラメータとして設定した。これらを変化させたことによる、風速および床面抗力の変化を調べる。

粗度要素は $30\text{mm} \times 30\text{mm} \times 30\text{mm}$ の立方体粗度ブロックを最小単位とし、配置形状を千鳥状配置とした。丸山（1989）による市街地模型に関する抗力測定実験では、市街地模型に対する抗力係数は、平面密度に関する千鳥状配置により近似可能だと考えられている。また、糸井（2003）による 1 次元不規則粗度に対する風速プロファイルにおいて、これも規則的な粗度に対する風速プロファイルにより近似可能であるとされている。したがって、本実験における平面密度の再現として配置形状を千鳥状配置としたことに関し、問題は無いといえることができる。

測定洞内の粗度ブロックの配置（図 2.10 及び図 2.11）は、菅野（2004）の実験における条件をそのまま再現した。フロートテーブル前縁の粗度ブロックの配置は、平面密度 4% の場合の千鳥状配置となっており、高さは粗度ブロック 1 個分（60mm および 30mm）で一律としてある。

そして、測定は測定ケースごとの粗度パラメータにより、フロートテーブル上の粗度形状を変化させて行う。ただし、いくつかの粗度形状については、フロートテーブル上およびフロートテーブル前縁のフロートテーブル 2 枚分（1800mm）の部分についても粗度形状を変化させた条件下での実験も行った。

風速は一定（ $=250\text{rpm}$ ）とする。フロートテーブル上の粗度形状がフロートテーブル前縁と等しい状態での風速の鉛直分布を示す（図 2.12）。このとき、ベキ指数 $\alpha=0.32$ でほぼ近似が可能である。

測定データは風速と床面抗力の 2 つである。床面抗力は前述の抗力測定装置で測定し、また風速データの測定には X 型プローブを用い、2 次元の風速データを測定した。

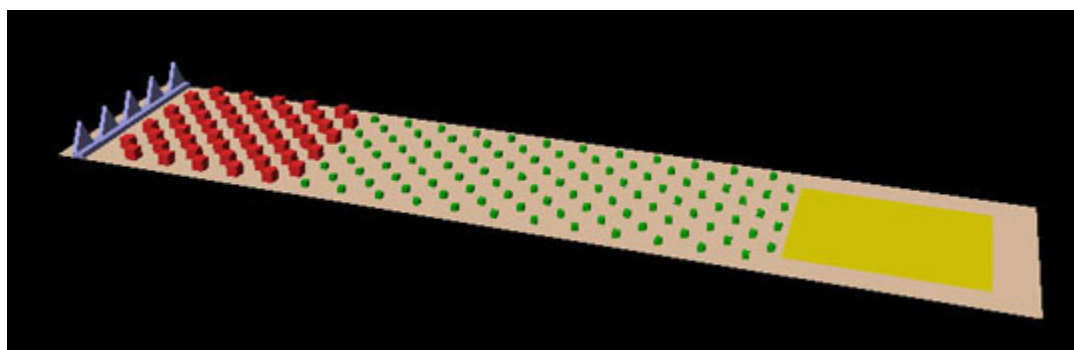


図 2.10 測定洞内の粗度ブロック設置状況

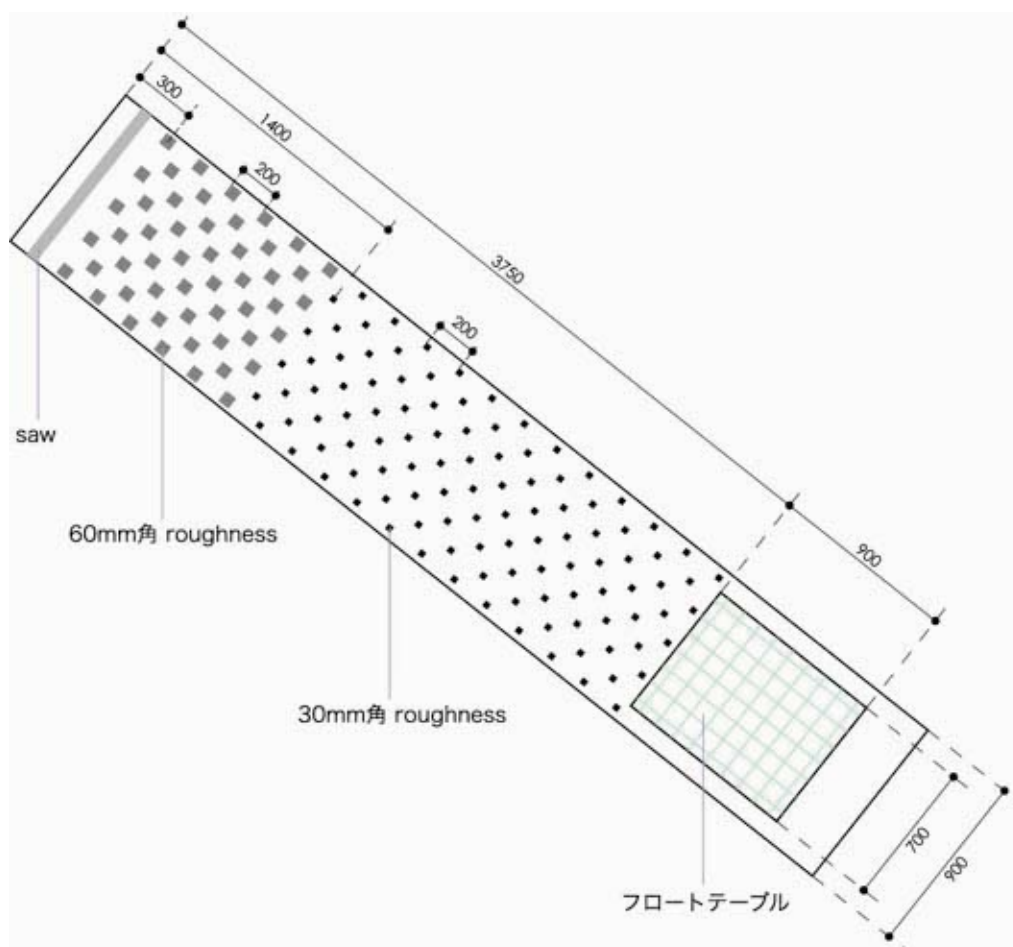


図 2.11 測定洞内の実験条件

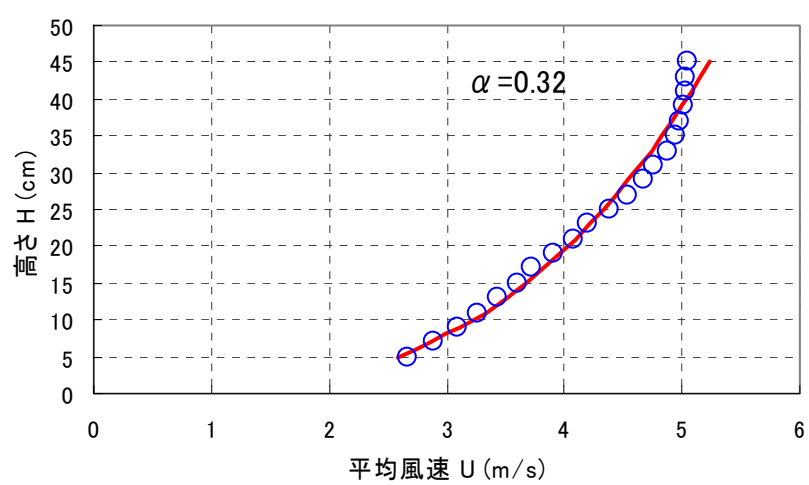


図 2.12 気流性状(平均風速)

(5) 測定ケース

本実験では、30 パターンの粗度形状について測定を行った（表 2.2）。各パターンの粗度形状の詳細については、本論文の最後に付録として掲載する。

測定ケースの粗度パラメータは、平面密度・平均高さ・高さの標準偏差の3つである。平面密度は、郊外、中小都市、大都市のモデル化として、それぞれ 4%、12%、25% の3種類とした。また、本研究での平均高さおよび高さの標準偏差は、それぞれ面積で重み付けしたものをを用いる。平均高さは 30mm～65mm、また高さの標準偏差は 0mm～40mm の範囲でそれぞれ変化させた。尚、本実験での長さの縮尺は 1/200 を想定している。これより、本実験の測定ケースの平均高さを実際の高さに換算すると 6m～13m となり、建築物が散在している東京都の特徴をよく反映した値だといえる（菅野（2004）参照）。

以下に、粗度パラメータの定義を示す（(2.10) 式～ (2.12) 式および図 2.13）。

- ・平面密度（建蔽率） R_m

$$R_m = \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{A_d} \quad (2.10)$$

- ・面積で重み付けした建物高さの平均値 h_{am}

$$h_{am} = \frac{\sum_{i=1}^N H_i A_i}{\sum_{i=1}^N A_i} \quad (2.11)$$

- ・面積で重み付けした建物高さの標準偏差 σ_h

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N A_i (H_i - h_{am})^2}{\sum_{i=1}^N A_i}} \quad (2.12)$$

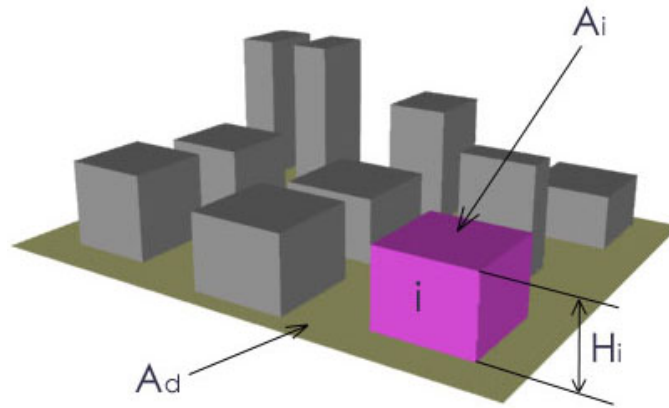


図 2.13 変数の定義

表 2.2 測定ケース

case_name	平面密度	平均高さ ham (mm)	標準偏差 σ_h (mm)	実スケール換算	
				ham (m)	σ_h (m)
case04001	4%	33.9	10.1	6.8	2.0
case04002	4%	37.7	13.1	7.5	2.6
case04003	4%	41.6	14.6	8.3	2.9
case04004	4%	43.5	21.3	8.7	4.3
case04005	4%	45.5	15.0	9.1	3.0
case04006	4%	49.4	14.4	9.9	2.9
case04007	4%	53.2	12.5	10.6	2.5
case04008	4%	57.1	8.9	11.4	1.8
case04009	4%	60.0	13.2	12.0	2.6
case04010	4%	60.0	0.0	12.0	0.0
case12001	12%	30.0	0.0	6.0	0.0
case12002	12%	31.6	8.2	6.3	1.6
case12003	12%	33.1	15.0	6.6	3.0
case12004	12%	34.3	10.5	6.9	2.1
case12005	12%	35.1	14.8	7.0	3.0
case12006	12%	38.6	13.6	7.7	2.7
case12007	12%	44.0	21.4	8.8	4.3
case12008	12%	48.3	39.6	9.7	7.9
case12009	12%	51.4	13.6	10.3	2.7
case12010	12%	59.6	30.0	11.9	6.0
case25001	25%	30.0	0.0	6.0	0.0
case25002	25%	31.8	7.1	6.4	1.4
case25003	25%	33.5	9.7	6.7	1.9
case25004	25%	34.8	12.3	7.0	2.5
case25005	25%	35.3	11.4	7.1	2.3
case25006	25%	35.8	14.3	7.2	2.9
case25007	25%	37.1	15.0	7.4	3.0
case25008	25%	40.4	19.9	8.1	4.0
case25009	25%	45.7	31.1	9.1	6.2
case25010	25%	54.4	39.2	10.9	7.8

また本実験では、1つの測定ケースについて、3箇所にて風速の測定を行った（図 2.14）。A 位置、B 位置および C 位置のそれぞれにおいて、粗度ブロックの上部 20～430mm の間を 10～50mm ピッチで測定した。

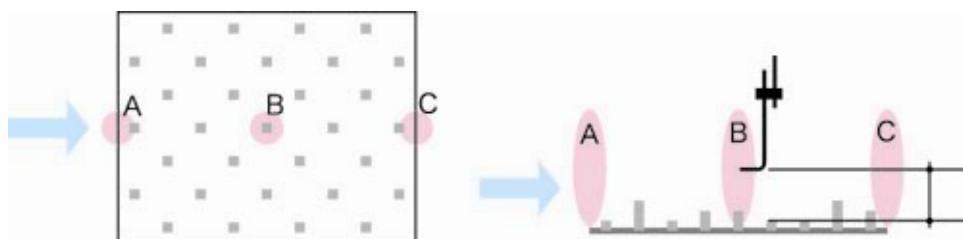


図 2.14 風速測定位置

最後に、本実験で使用した平面密度 4%、12%および 25%に関して、平面密度と千鳥状配置における粗度ブロックの間隔の組を表 2.3 に示す。また、そのときのフロートテーブル上の粗度ブロックの配置状況を図 2.15 に示す。

表 2.3 平面密度と粗度ブロック間隔の組

平面密度 (%)	粗度間隔 (mm)
4	200
12	125
25	85

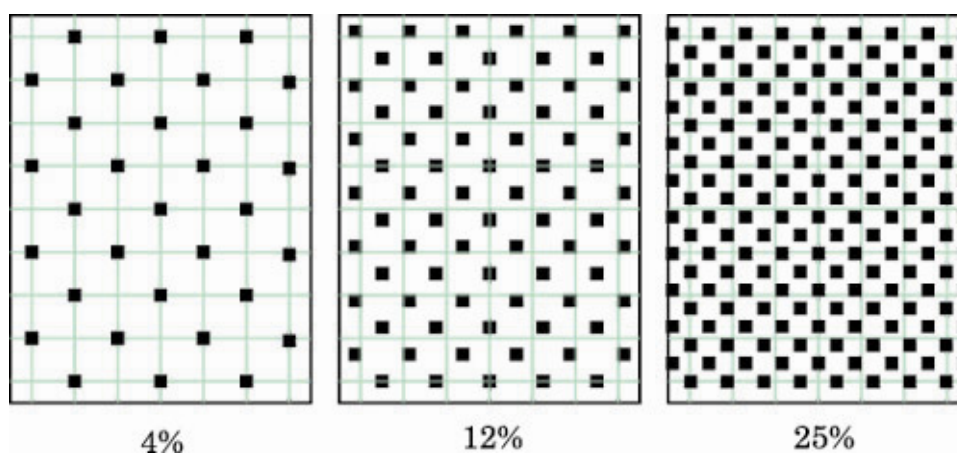


図 2.15 粗度ブロック配置状況

2. 3 実験結果

本節では、本実験により得られた測定結果について、平均風速鉛直分布の評価を行うにあたって必要となるデータの妥当性に関する考察を行う。これは、フロートテーブル上の粗度形状の変化による平均風速鉛直分布の特性を、適切に取り出し評価することを目的とする。以下に、平均風速の評価については風速測定位置および風速を一定としたことに対する考察、また抗力の評価については既往の研究との比較を示す。

(1) 風速測定位置の違いに関する考察

2. 2 節 (5) で述べたように、本実験では粗度ブロック上部 20~430mm の高さにおける風速データをフロートテーブル上の 3 箇所（フロートテーブル前縁 A 位置、中央 B 位置、および後縁 C 位置）について測定した（図 2.14）。ここでは、その 3 箇所ごとの平均風速鉛直分布を比較し、フロートテーブル上の粗度形状による平均風速鉛直分布を評価するのに最適な測定位置に関する考察を行う。

図 2.16~図 2.18 に、各平面密度において粗度ブロックを高さ一定（30mm）の千鳥状配置にした場合の平均風速鉛直分布を示す。ここで、図 2.16 に示す平面密度 4% のケースは、フロートテーブル上の粗度形状がフロートテーブル前方部分の粗度形状と等しい状態のものである。また、各平面密度においてフロートテーブル上の粗度形状に高さ変化を与えた場合の平均風速鉛直分布を図 2.19~図 2.21 に示す。図における横軸は、風速を基準風速 U_0 により無次元量に基準化した値である。また、縦軸の高さの目盛の範囲は、ここでの考察において着目する部分の比較を行いやすくするために、地表面付近の 0mm~140mm の間に限定した。

図 2.16~図 2.18 から、粗度ブロックが高さ一定（30mm）の千鳥状配置の場合では 3 箇所のどの位置でもほとんど同じ鉛直分布が測定できることが分かる。しかし、粗度形状に高さ変化を与えた場合の図 2.19~図 2.21 を見ると、測定位置によって鉛直分布形状は異なり、ベキ指数 α の評価に影響があるといえる。その影響は特に平面密度が大きくなるにつれて増大する傾向がある。

フロートテーブル後縁 C 位置での測定結果に着目してみると、フロートテーブル上の粗度形状がフロートテーブル前方部分の粗度形状と等しい状態である図 2.16 以外のケース（図 2.17~図 2.21）において、鉛直分布が他の 2 箇所における分布よりも水平方向に寝てきている（ベキ指数 α が大きくなることに相当）。これは、測定洞内の条件が C 位置の後部では粗度ブロックが何も無い状態になっており、この影響により地表面付近の風速が回復し始

めたためであると予測することが出来る。この測定位置の後部の粗度形状による鉛直分布への影響は、測定位置前部の条件が等しい A 位置での鉛直分布が図 2.16～図 2.21 のケースごとに変化していることから確認できる。

以上より、フロートテーブル上の粗度形状による平均風速鉛直分布を評価するのには、今回測定を行った 3 箇所のうち、フロートテーブル中央部の B 位置が最適であると判断できる。したがって、これ以降の本研究における風速の評価は特別に断りが無い限り B 位置での測定結果についての評価として話を展開することを基本とする。

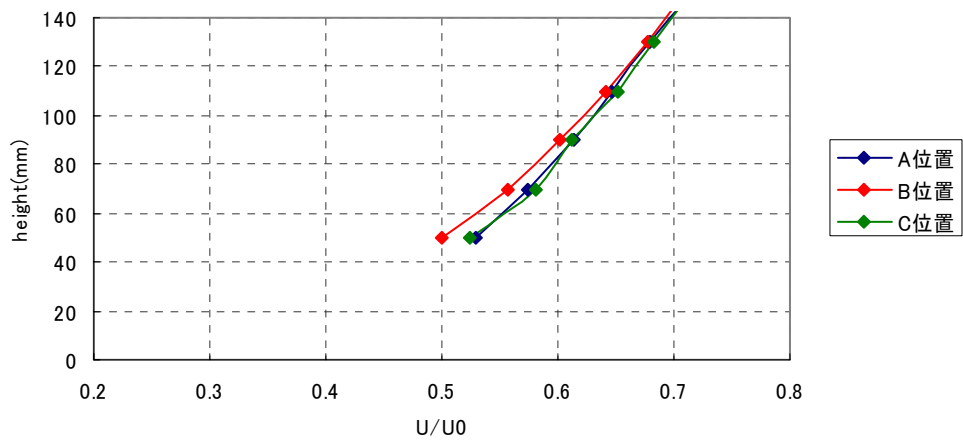


图 2.16 平均風速鉛直分布 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 30\text{mm}$, $\sigma_h = 0.0\text{mm}$)

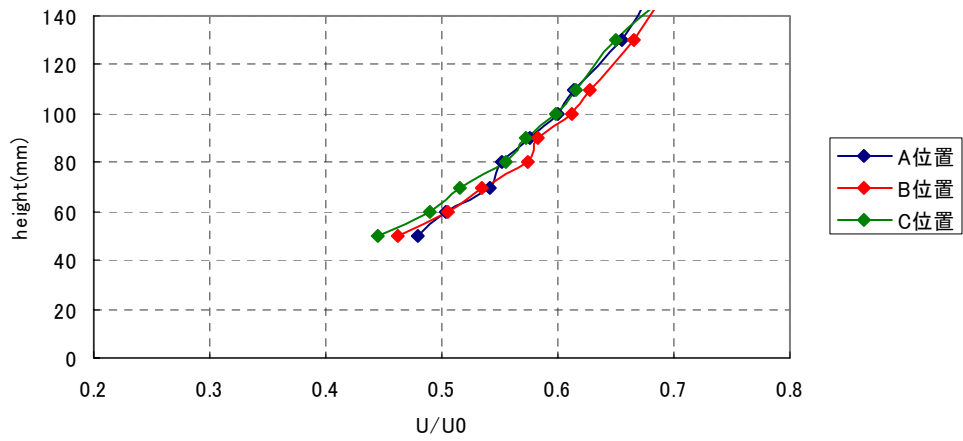


图 2.17 平均風速鉛直分布 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 30\text{mm}$, $\sigma_h = 0.0\text{mm}$)

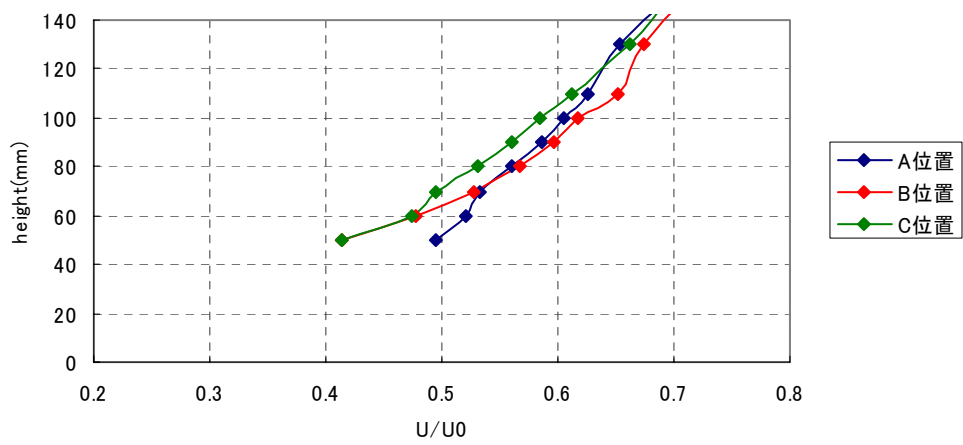


图 2.18 平均風速鉛直分布 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 30\text{mm}$, $\sigma_h = 0.0\text{mm}$)

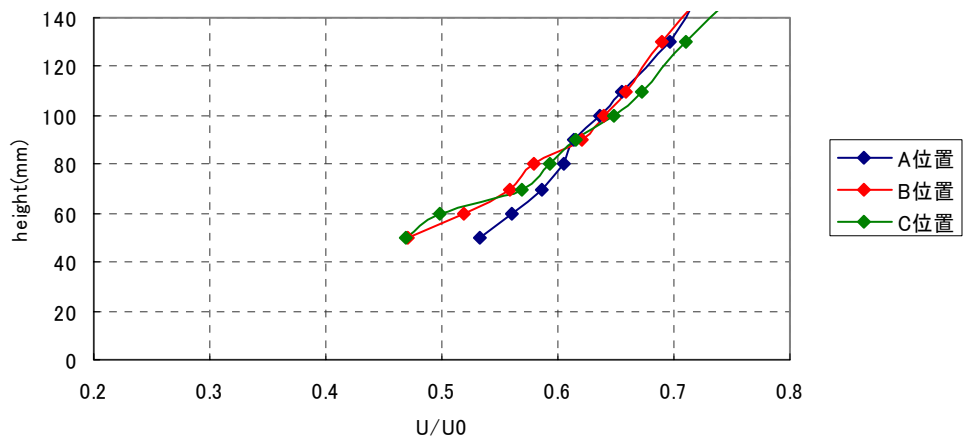


图 2.19 平均風速鉛直分布 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 45.5\text{mm}$, $\sigma_h = 15.0\text{mm}$)

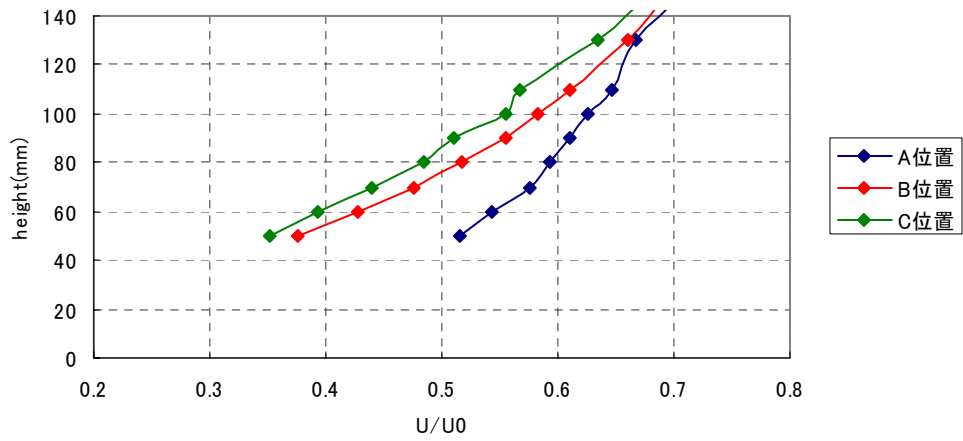


图 2.20 平均風速鉛直分布 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 44.0\text{mm}$, $\sigma_h = 21.4\text{mm}$)

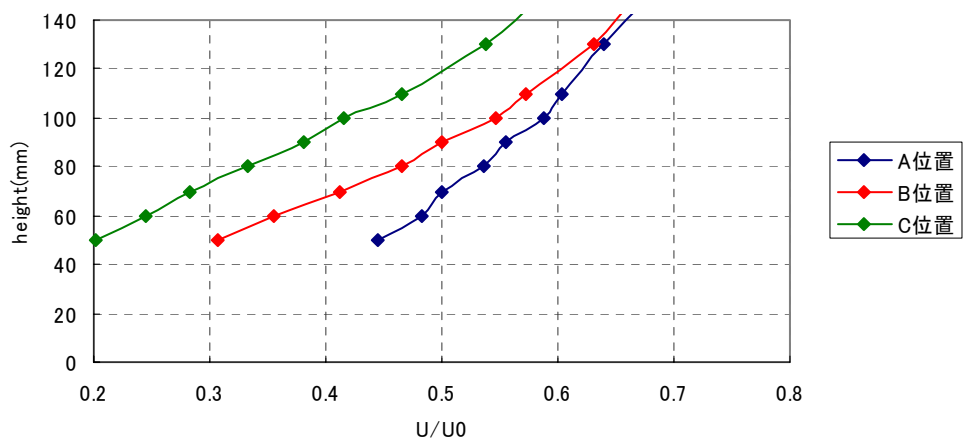


图 2.21 平均風速鉛直分布 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 45.7\text{mm}$, $\sigma_h = 31.1\text{mm}$)

(2) 基準風速の変化に関する考察

本実験は、2.2節(4)で述べたように風速は一定(=250rpm)の条件下で測定を行った。ここでは、ある粗度形状($R_m = 4\%$, $h_{am} = 45.5\text{mm}$, $\sigma_h = 15.0\text{mm}$)において風速を変化させた場合の測定結果を用いて、本研究において一定風速の下で実験を行ったことの妥当性についての検証を行う。

図 2.22～図 2.24 に考察に用いる平均風速鉛直分布を示す。図 2.22 は、4 種類の基準風速(200rpm、250rpm、300rpm、350rpm)における平均風速をそれぞれプロットしたものである。そして、この平均風速鉛直分布の横軸をそれぞれの基準風速によって基準化したものが図 2.23 になる。また、図 2.24 はフロートテーブル前部も粗度形状をフロートテーブル上と同条件に変化させた場合の平均風速鉛直分布である。

図 2.23 より、どのような基準風速の条件下においても、その基準風速により平均風速を基準化することで、その粗度形状における平均風速鉛直分布がほとんど同形状で得られることが分かる。このことは、粗度形状をフロートテーブル上のみでなくフロートテーブル前部においても変化させた場合でも同様であることが図 2.24 よりいえる。

これより、粗度形状の変化による平均風速鉛直分布の変化をべき指数 α により評価する本研究において、実験条件を風速一定としたことに問題はなく、十分な妥当性があるということが出来る。

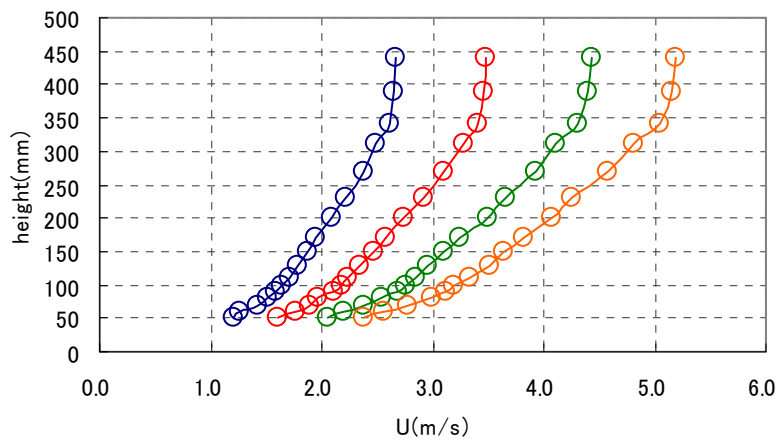


図 2.22 各基準風速での平均風速鉛直分布

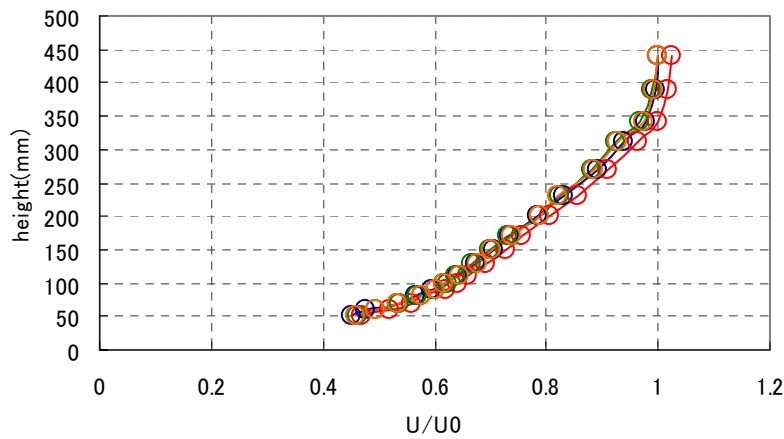


図 2.23 基準風速で基準化した平均風速鉛直分布

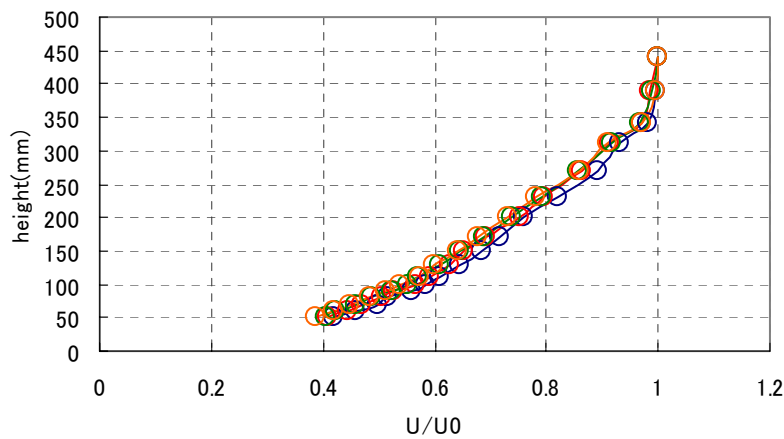


図 2.24 フロートテーブル前部も粗度形状を変化させた場合の平均風速鉛直分布

(3) 粗度パラメータによる抗力の変化

実験の各ケースで測定した床面抗力について、値の妥当性とその特性を考察する。測定値の妥当性については、同様の測定結果が丸山 (0989) および Y.Jia (1998)、また菅野 (2004) といった既往の研究にあるので、抗力係数の形でそれらの値との比較を行う。

まず、粗度形状を高さ一定 (30mm) の千鳥状配置とした場合について、平面密度 R_m と抗力係数 C_D の関係を示す (図 2.25)。他の研究から、抗力係数 C_D は平面密度 $R_m = 0.2 \sim 0.3$ の間で最大値をとり、その後減少するという現象が確認されている。この原因は、平面密度が大きくなることにより、風上側の粗度ブロックにより風が遮られ主流方向に受ける圧力が減少することと、また乱れの渦が粗度ブロック間の隙間に入り込めなくなるためであると考えられる。本研究での実験対象平面密度では、この現象を確認する範囲には至らなかったが、測定値のプロットの傾向は他の研究との整合性が取れていると判断できる。また、抗力係数 C_D の絶対量の違いは、実験スケールおよび使用した粗度ブロックの大きさの違い、また境界層流の違いによるものだと考えられる。

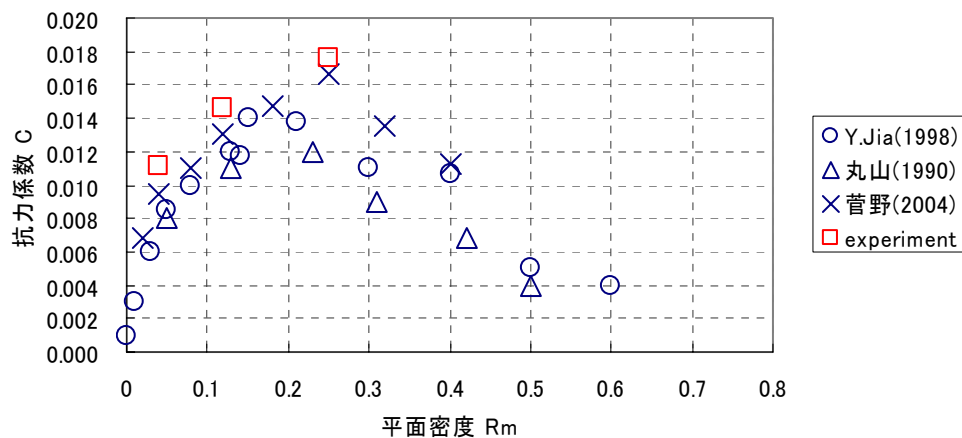


図 2.25 平面密度 R_m と抗力係数 C_D の関係

次に、粗度形状を千鳥状配置の平面に対し高さ方向に変化を加えた場合の床面抗力について調べる。図 2.26～図 2.31 に高さの平均値 h_{am} または高さの標準偏差 σ_h と、抗力係数 C_D の関係を平面密度 R_m ごとに示す。

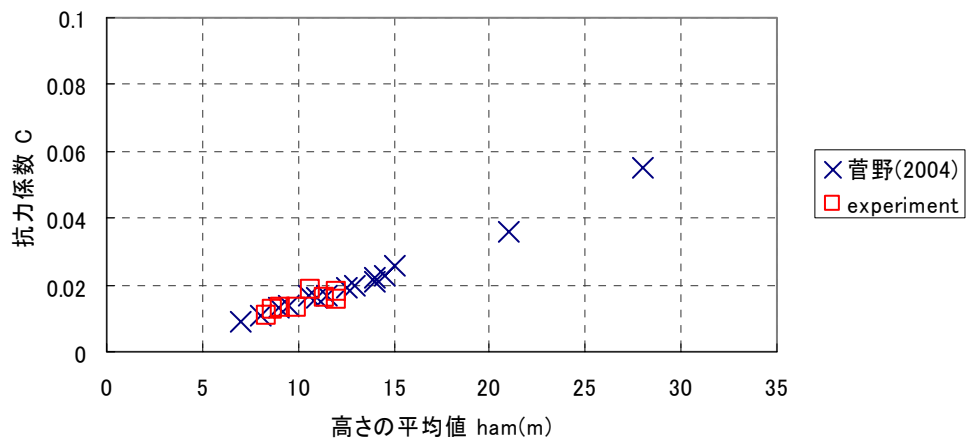


図 2.26 高さの平均値 h_{am} と抗力係数 C_D の関係 (平面密度 $R_m = 4\%$)

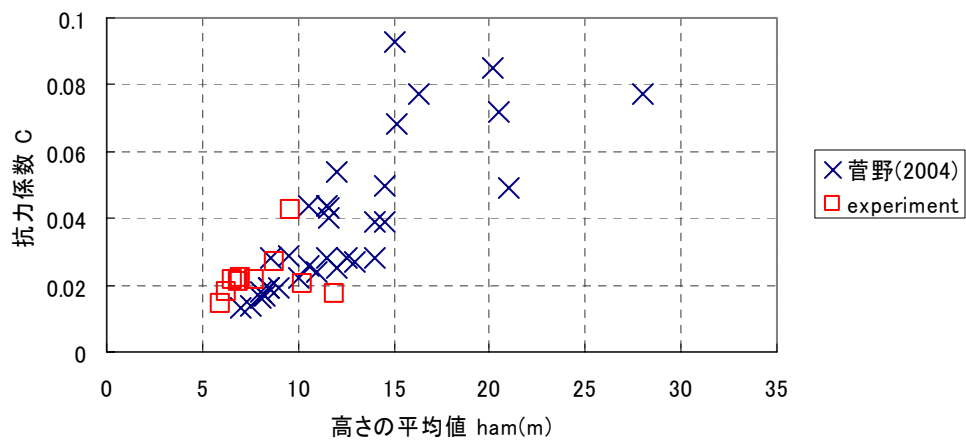


図 2.27 高さの平均値 h_{am} と抗力係数 C_D の関係 (平面密度 $R_m = 12\%$)

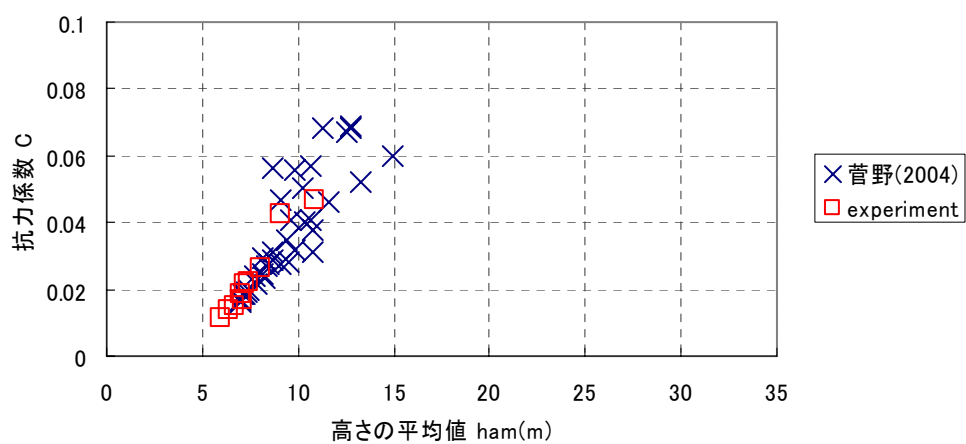


図 2.28 高さの平均値 h_{am} と抗力係数 C_D の関係 (平面密度 $R_m = 25\%$)

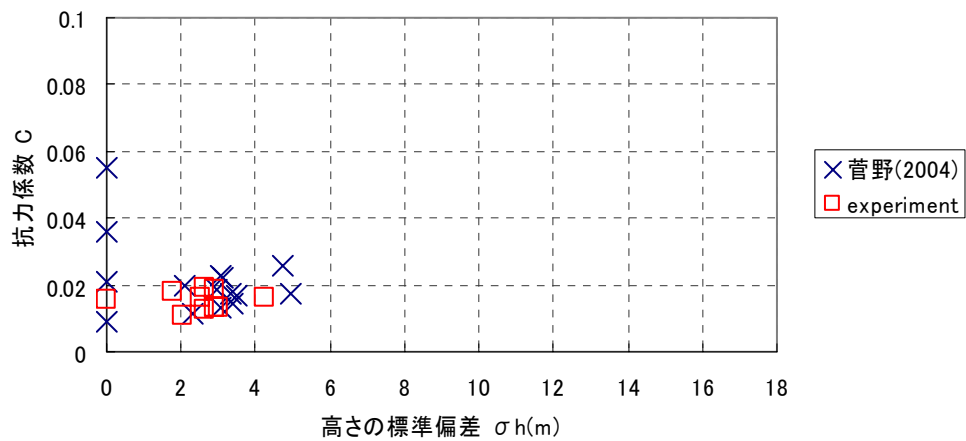


図 2.29 高さの標準偏差 σ_h と抗力係数 C_D の関係 (平面密度 $R_m = 4\%$)

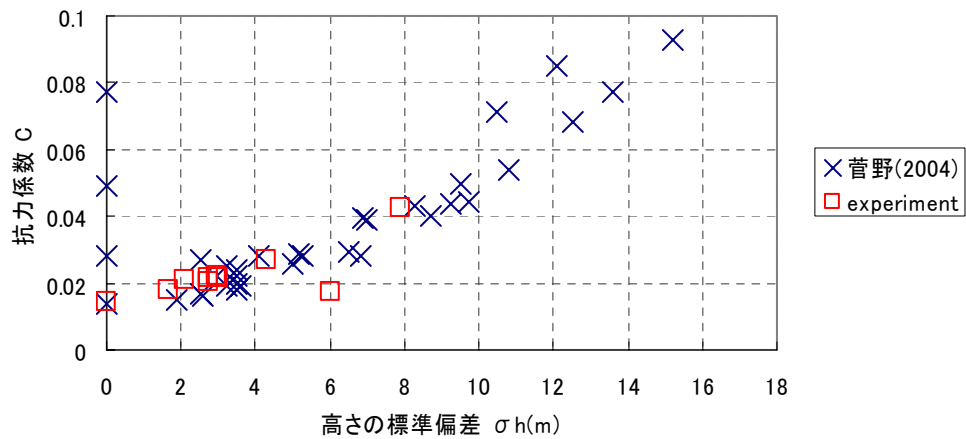


図 2.30 高さの標準偏差 σ_h と抗力係数 C_D の関係 (平面密度 $R_m = 12\%$)

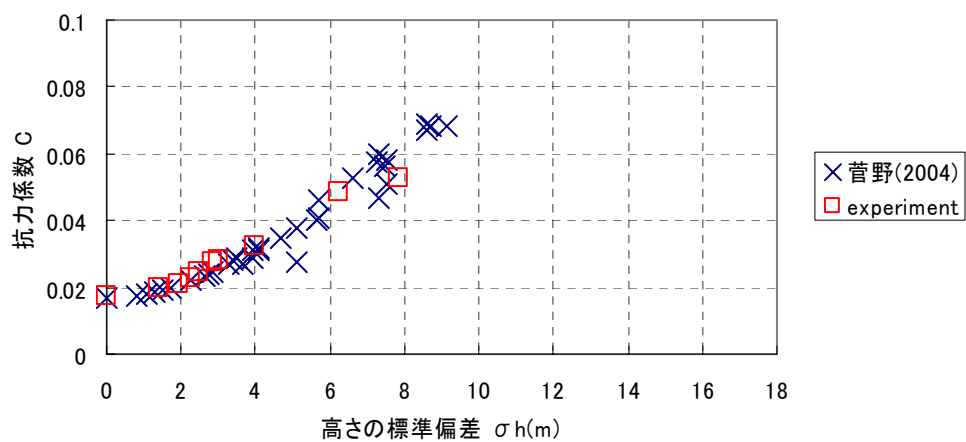


図 2.31 高さの標準偏差 σ_h と抗力係数 C_D の関係 (平面密度 $R_m = 25\%$)

測定値の妥当性に関しては、菅野（2004）の値と比較する限り問題ないと判断できる。以下では、粗度パラメータ（高さの平均値 h_{am} および高さの標準偏差 σ_h ）に対する抗力との関係性についての考察を行う。

高さの平均値 h_{am} は、図 2.26 より平面密度 $R_m = 4\%$ では抗力と非常に良い相関を見せることが分かり、高さの平均値をパラメータに抗力を導くことが出来そうである。しかし、平面密度が 12% および 25% と大きくなった場合には、傾向的に抗力は高さの平均値に対して単調増加するが、高さの平均値が抗力決定の主要なパラメータになっているとは言い難い。平面密度 $R_m = 25\%$ についてはかろうじて高さの平均値をパラメータに用いることが出来そうではあるが、特に平面密度 $R_m = 12\%$ においては値のばらつきが大きい。しかし、この抗力のばらつきの範囲は、平面密度 4% の場合の値と 25% の場合の値との間に納まるといった傾向がある（図 2.32）。

高さの標準偏差 σ_h は、高さの平均値とは逆の関係性を示し、平面密度 $R_m = 4\%$ では抗力との相関性をグラフより読み取ることは出来ないが（図 2.29）、平面密度 $R_m = 12\%$ および 25% を見ると、平面密度が大きくなるにつれて抗力との相関関係が強くなっているという事が出来る。

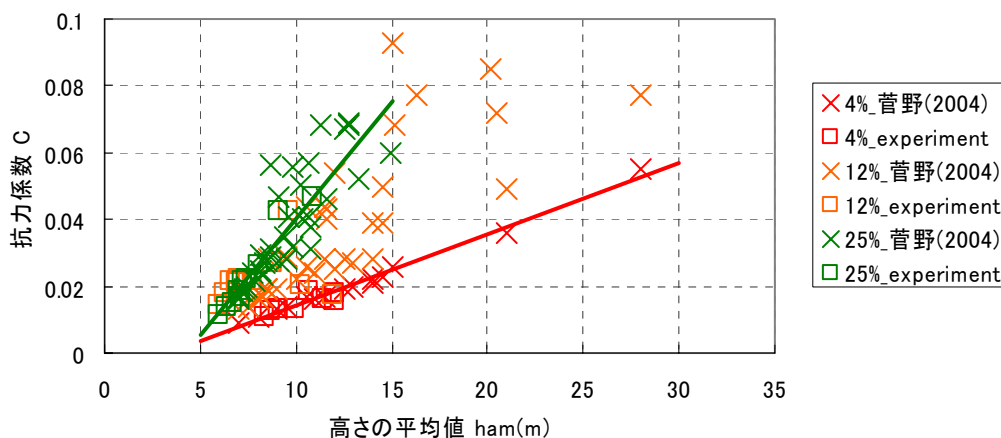


図 2.32 高さの平均値 h_{am} と抗力係数 C_D の関係

2. 4 まとめ

本章では、地表面に発達する乱流境界層と地表面とのせん断力の関係について既往の研究を挙げながら述べた上で、本研究における実験の概要の説明を行った。

実験では X 型プローブにより 2 次元の風速データを高さ方向に変化させながら 3 つの地点について測定し平均風速の鉛直分布を得たほか、フロートテーブル全体を空気による力で持ち上げる実験装置によってフロートテーブルと下面の摩擦をほとんど無くし、風によってフロートテーブル全体にかけられる抗力を測定し、地表面粗度により変化するせん断力を求めた。

平均風速鉛直分布については、その測定位置の後部の粗度形状により分布に影響があることが分かり、本研究において評価する平均風速鉛直分布を得るために最適の測定位置を断定した。また、本実験において風速を一定とすることの妥当性も確認することができた。抗力測定装置により測定した床面効力に関しては、まず始めに測定値の妥当性が菅野 (2004) の値との比較により確認された。そして高さの平均値 h_{am} および高さの標準偏差 σ_h といった本研究で用いる粗度パラメータとの対応関係も、粗度の平面密度 R_m ごとに特徴を把握することができた。

次章では、本実験により得られた各測定ケースの平均風速鉛直分布について鉛直分布係数を算出し、粗度パラメータとの対応関係を調べる。

■参考文献

- 丸山敬 : 「粗度要素の配列形状による床面抗力の変化に関する風洞実験」
京都大学防災研究所年報 第 33 号 B-1, 1989, pp1-15
- 斉藤知生 : 「東京大学工学部建築学科小型境界層風洞の基本特性」
- 神田順 日本風工学会誌 No.49, 1991, 11, pp47-53
- 糸井達哉 : 「限界状態設計法に基づく建築物外装材の設計荷重評価」
2003 東京大学博士論文
- 菅野宏紀 : 「地理情報システムに基づく平均風速鉛直分布の評価」
2004 東京大学修士論文
- Wooding et al : “Drag due to regular arrays of roughness elements of varying geometry” ,*Boundary-Layer Meteorology*, vol5, 1973, pp285-308
- Y.Jia et al : “Effect of surface roughness element spacing on boundary-layer velocity profile parameters” ,*Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol73, 1998, pp215-230

■ ■ 3. 平均風速鉛直分布の評価

3. 1 はじめに

建物建設地点における設計風速の予測、また強風発生時の風向依存性の評価のためには、台風などによる強風発生現象の発生評価だけでなく、風速鉛直分布に関する定量的評価法が必要であることは、先に述べたとおりである。また、その不確定性に関してもあわせて評価する必要がある。平均風速分布にべき指数分布を採用する場合、鉛直分布係数の不確定性は、第一に傾度風高さ Z_G の空間的不確定性、第二にべき指数 α の空間的不確定性、第三にパラメータ評価式の推定残差、そして第四に風速鉛直分布（べき指数分布）モデルの平均的な誤差として分類することが出来る。評価式に関してはいくつか提案されている式があるが、その適用性や精度に関してはそれほど議論されていない。傾度風高さ Z_G 、べき指数 α については、現状では工学的な判断により定められていることもその一因である。本研究では平均風速鉛直分布としてべき指数分布を前提とした議論を行う。べき指数分布モデルの誤差については特に地表面近傍で合わないという議論があるが、建物の設計法という観点からはある高さ以下の風速は一定値であるという安全側の仮定を行うことで対処しており、それほど問題にはならないということが出来る。

本章では、強風時平均風速の鉛直分布について既往のモデルおよび研究に関してのまとめを行ったあとに、実験より得られた高さ方向の変化を与えた粗度形状に対する平均風速鉛直分布の鉛直分布係数を算出し、評価を行う。

(1) 平均風速の鉛直分布モデル

図 3.1 に平均風速の鉛直分布の模式図を示す。工学的には平均風速の鉛直分布をあらわす式に関して、対数分布とべき指数分布があり、相互にそれぞれの利点があることは第 1 章で述べたとおりである。また、対数分布に関しては理学的にも粗面上の乱流境界層 (Rough-wall turbulence boundary layer) に関して多くの研究が行われており、例えば Raupach ら (1991) による理論的・実験的研究のレビュー論文がある。対数分布には理論的背景が存在し、地表面上の障害物高さよりもある程度上空で成り立つとされる。Raupach ら (1991) によると、障害物の高さを h とすると対数分布は $z = 2h \sim 5h$ より上の高さで成立するとされる。それより地表面側で成立しない原因のひとつとしては、風速値の空間的なばらつきが考えられる。対数分布では高さ z における平均風速 $U(z)$ を以下のように表す。

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \log \frac{z - z_d}{z_0} \quad (z > z_0 + z_d) \quad (3.1)$$

ここで、

u_* : 摩擦速度 k : カルマン定数 (=0.4)

z_0 : 粗度長 z_d : ゼロ面変位

尚、本研究では \log は \log_e を意味する。また、ゼロ面変位 z_d を考慮しない式も良く用いられている。

一方、べき指数分布には理論的な背景は存在しないが、大気境界層の比較的広い範囲をひとつの式で表すことが可能であることや、式計算が容易であることなどから工学的に広く用いられている。べき指数分布は以下のように表される。

$$U(z) = U_G \left(\frac{z}{z_G} \right)^\alpha \quad (z > 0) \quad (3.2)$$

ここで、

α : べき指数 z_G : 傾度風高さ U_G : 傾度風風速

しかし、地表面近傍において、風速分布は観測地点近隣のごく一部の建物の影響を受けるため、鉛直分布はべき指数分布には従わない。よって前述のように設計においてはある高さ z_B よりも下部では一定風速であるような風速分布を与えることも多い。また研究段階ではあるが、地表面付近で実際の値に適合させるためにべき指数分布とゼロ面変位を組み合わせた分布式も比較的多く用いられる。

$$U(z) = U_G \left(\frac{z - z_d}{z_G - z_d} \right)^\alpha \quad (z \geq z_d) \quad (3.3)$$

対数分布とべき指数分布を結びつけるものとして、粗度長 z_0 とべき指数 α の経験的な関係式が提案されている。これらの対応関係を考えるときには、ゼロ面変位 z_d の取り扱いを2つの分布において揃えた方が明確であるように思われるが、実際に提案されている式に関しては、必ずしもこの点は明確ではない。しかし、粗面上の風速分布に対して実験、実測の両方に用いることの出来るような普遍的な式はこれまでには提案されていない。

例えば、Counihan (1975) による以下に示す式がよく用いられている。

$$\alpha = 0.096 \log_{10} z_0 + 0.016 (\log_{10} z_0)^2 + 0.24 \quad z_0 [m] \quad (3.4)$$

また、Deaves ら (1978) は、べき指数 α が低風速時にやや大きくなることを考慮し、以下のような式を提案している。

$$\alpha = \frac{1.16 + \frac{7.0}{U_G}}{\log \frac{150}{z_0}} \quad z_0 [m], U_G [m/s] \quad (3.5)$$

また崔・神田 (1990) は、Ishizaki (1971) の式と類似した

$$\alpha = \left\{ \log \frac{50}{z_0} \right\}^{-1} \quad z_0 [m] \quad (3.6)$$

なる式を提案している。ただし、ここでの適用高さは 200m までとされている (崔 2004)。また、孟ら (1995, 1996) は、数値解析により Counihan の式に加えて次のような提案をしている。

$$\alpha = 0.27 + 0.09 \log_{10} z_0 + 0.018 (\log_{10} z_0)^2 + 0.0016 (\log_{10} z_0)^3 \quad z_0 [m] \quad (3.7)$$

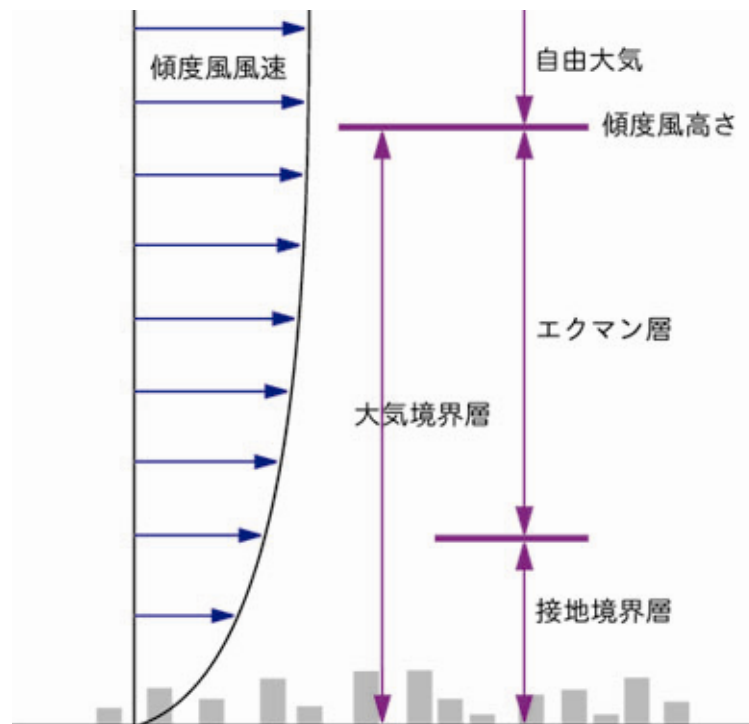


図 3.1 平均風速鉛直分布(区分に関しては、竹内・近藤(1981)による)

(2) 平均風速鉛直分布の予測手法

ここでの風速分布については、耐風設計での使用という観点から、わが国でこれまで用いられているべき指数分布を主に扱うものとする。設計に用いるべき指数 α の推定に関しては、2通りの方法が考えられる。ひとつは実測に基づく評価であり、もうひとつは地表面の凹凸の特徴から評価する手法である。

実測によりべき指数 α を求めるためには、ドップラーソーダによる観測などが考えられているが、時間的また経済的に全ての建設対象地点において実施することは極めて困難である。一方、気象庁などの観測記録を用いた評価も考えられる。例えば、Counihan (1975) による粗度長 z_0 、田村・西村 (1992) によるべき指数 α のように乱れの強さや突風率を用いて評価する手法である。この手法は一点の高さの風速記録をもとに評価することが可能であるため容易である。また、基準値との相対的な差として評価することが可能なため、手法として閉じており、設計法の枠組みを考えた場合には有効な方法である。実際、この田村・西村 (1992) と同様の手法が建築物荷重指針 (日本建築学会 2004) の設計風速評価

に用いられている。しかし、風速分布モデル、特に傾度風高さ z_G の設定に大きく依存するため、これが実情を正確に表している保証はない。また比較的長期間の観測データが必要であるためこの手法においても全ての場所において評価することは不可能である。また観測データが近隣建物の影響を受ける場合には、大きな評価誤差を生じる懸念もある。

一方、地表面の凹凸の特徴より風速の鉛直分布を予測しようとする研究もある。実際、十分に境界層が発達している大気境界層内部においては、風速の鉛直分布は風上側の建物群から決まると考えられる。例えば、田村ら（1989）が示しているように、市街化が進むことによって市街地で観測される風速が小さくなっていることも、このことに対する根拠のひとつである。ただし、境界層が完全に発達するまでの距離は、例えば ESDU82026（1982）によれば 100m、大熊ら（1996）によれば数 km 以上の吹送距離が必要とされている。よって、わが国で観測されている市街地上空の風速分布はまだ十分に境界層が発達していないことも多いと予想される。

他方、わが国においても都市部における地表面の凹凸に関するデータの整理も進んでおり（例えば、安岡 2004）、それらのデータをさまざまな形で利用した平均風速鉛直分布の評価が行われるようになってきている。

3. 2 境界層理論

本研究の対象となる強風時には、温度勾配が小さくなり、対流効果がほとんどなくなるか、または風のせん断応力の影響が温度勾配よりもはるかに大きくなり、温度勾配による対流のメカニズムが壊れるようになる。このような大気状態に関する数学的近似を中立状態または断熱状態という。本研究においては、この中立状態を仮定した上で議論を進めることを基本とする。

自然界に存在する風状を予測する場合、その流れはレイノルズ数の大きな流れである。レイノルズ数が大きいということは、ナビエ・ストークス方程式の粘性項の影響が小さいことであり、その極限レイノルズ数 $Re \rightarrow \infty$ では流れはポテンシャル流に他ならない。しかし、物体の表面での流速はゼロであり、壁付近においては急激な流れの変化が起こっていると考えられる。この物体の表面近くの粘性の作用を無視できない薄い層を、境界層と呼ぶ (Prandtl 1904)。

Prandtl はこの境界層という概念より、層流境界層内における方程式を、ナビエ・ストークス方程式にオーダー比較による条件を与えることで以下に示す境界層方程式を導いた。(日野幹雄著「流体力学」参照)

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \\ 0 &= -\frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0 \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial U}{\partial x} + U \frac{\partial U}{\partial x}\end{aligned}\tag{3.8}$$

Blasius (1908) は、式 (3.8) に基づいて、一様流中の平板に沿う流れについて解き、以下の式を導いた。ここでは途中の式展開や仮定は省略して記す。

$$\begin{aligned}u &= \frac{\partial \psi}{\partial y} = \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial y} = U_{\infty} f'(\eta) \\ v &= -\frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\nu U_{\infty}}{x}} \{ \eta f'(\eta) - f(\eta) \}\end{aligned}\tag{3.9}$$

ここで、

ψ : 流速分布 u, v をまとめた流関数

η : x, y をまとめた変数

ν : 動粘性係数

式 (3.9) とその導関数を式 (3.8) に代入し、さらに級数展開・摂動近似により解が求められた。

また、境界層厚さ δ 、排除厚さ（ゼロ面変位） δ^* については、次のように求められた。

$$\begin{aligned}\delta(x) &\approx 5.0 \sqrt{\frac{\nu x}{U_\infty}} \\ \delta^*(x) &\approx 1.73 \sqrt{\frac{\nu x}{U_\infty}}\end{aligned}\tag{3.10}$$

また壁面に働く粘性摩擦力に関して、壁面でのせん断応力 $\tau_0(x)$ は以下のように表される。

一方、Karman (1921) は層流という仮定を用いず、境界層方程式の積分を行うことで、境界層の運動方程式を導いた。

$$\begin{aligned}\frac{u}{U_\infty} &= f\left(\frac{y}{\delta(x)}\right) \text{ という流速分布を仮定すると} \\ \delta(x) &= \sqrt{\frac{2\beta_1}{\alpha_1}} \sqrt{\frac{\nu x}{U_\infty}} \\ C_D &= 2 \sqrt{\frac{2\alpha_1\beta_1\nu}{U_\infty l}}\end{aligned}\tag{3.11}$$

ここで、

$$\alpha_1 = \int_0^1 f(1-f) dy \qquad \beta_1 = f'(0)$$

また Prandtl (1932) は、壁面の摩擦応力を用いて壁法則を導いた。

壁面近くの流れは、密度 ρ 、動粘性係数 ν 、壁面摩擦応力 τ_0 、壁からの距離 y により推論することが出来、

$$\text{摩擦速度} \qquad u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$$

$$\text{無次元長さ} \qquad \eta = \frac{u_* y}{\nu} \text{ により}$$

$$\frac{\bar{u}(y)}{u_\infty} = f\left(\frac{u_* y}{\nu}\right)$$

と表すことができる。

流体の運動方程式において、主流方向の流速の時間的・空間的変化がゼロ、およびせん断応力 τ が一定である範囲を対象とすると、対数流速分布が以下のように導かれる

$$\frac{u(y)}{u_*} = \frac{1}{k} \log \left(\frac{u_* y}{\nu} \right) + C \quad (3.12)$$

ここで、

k : カルマン定数 (=0.4)

C : 積分定数

式 (3.12) は壁面が滑らかな場合についての式であり、壁面が粗い場合には、式 (3.11) における壁法則の代表長さ $\eta = \frac{U_* y}{\nu}$ が粗度の代表高さ z_0 によって書き換えられなくてはならない。そこで、高さ y を z と書き換え、 C を z_0 の中に含めると、式 (3.1) で挙げた耐風工学で用いられる対数則が導かれる。

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \log \frac{z - z_d}{z_0} \quad (3.13)$$

3. 3 平均風速鉛直分布の近似式について

自然風中の乱流境界層内における平均風速鉛直分布の近似式および観測結果、ならびに実験結果との対応については、国外のものとしては Counihan (1972)、また国内のものとしては崔 (1990) によりまとめられている。また、それ以降のものに関して、主だったものを以下にまとめる。ここでいう平均風速鉛直分布の近似式とは、べき指数則および対数則とともに、地表面粗度（粗度パラメータ）に対する平均風速鉛直分布（分布に関するパラメータ）の推定を含む。

(1) 対数則

対数則については、3. 1 で式 (3.1) また 3. 2 で式 (3.13) として示した。

また、大気境界層までを適用範囲とするために、4 次の多項式によって対数則を補正したものとして、以下に示す修正対数則がある。

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \left\{ \log \left(\frac{z}{z_0} \right) + 5.75 \left(\frac{z}{z_g} \right) - 1.875 \left(\frac{z}{z_g} \right)^2 - 1.333 \left(\frac{z}{z_g} \right)^3 + 0.25 \left(\frac{z}{z_g} \right)^4 \right\} \quad (3.14)$$

ここで、

z_g : 境界層高さ

この式 (3.14) の 2 項目以降を考慮しない場合が式 (3.13) であるということも出来る。

対数則における粗度長 z_0 の推定は、実測・実験の両面からまとめられたものが存在する。ここでは、崔 (1990) よりその一部を表 3.1 に示す。

表 3.1 粗度長の推定値

粗度区分	Davenport	Simiu	I.S.O	崔
I	0.0002~0.004	0.0001~0.004	0.003	0.0005~0.04
II	0.01~0.06	0.001~0.03	0.03	0.003~0.2
III	0.2~0.9	0.04~1.0	0.3	0.1~1.0
IV	1.2	0.75~1.5	3.0	0.4~2.0
V	1.6			1.5~4.0

また、地表面粗度の粗度パラメータから粗度長 z_0 を推定することもいくつか行われている。これについては、主に立方体粗度ブロックを用いた千鳥状配置の地表面粗度に対する実験値からの推定という形で行われている。Letau (1967) は立方体の見つけ面積によって 1 次式による粗度長の近似を行った (式 (3.15))。Counihan (1971) は、Lego ブロックによる実験を行い、Letau の式に定数項を加えた式を導いた (式 (3.16))。Macdonald (1998) は立方体の見つけ面積と密度を用い、指数関数によって粗度長 z_0 を近似した (式 (3.18))。Y. Jia (1998) は有効見つけ面積という概念を導入し、粗度長 z_0 を評価した。また Peterson (1997) は鉄工所の模型に対し、類似した実験を行っている。

式 (3.15) ～ (3.18) に示した近似式は、立方体粗度に関するものである。近似式で用いられる粗度パラメータについて図 3.2 に示す。

$$\bullet \text{ Letau} \quad \frac{z_0}{h} = 0.5 \frac{A_f}{S} \quad (3.15)$$

$$\bullet \text{ Counihan} \quad \frac{z_0}{h} = 1.08 \frac{A_f}{S} - 0.08 + 8.2 \frac{h}{x} \quad (3.16)$$

$$\bullet \text{ Theurer} \quad \frac{z_0}{h} = 1.6 \frac{A_f}{S} \left(1 - 1.67 \frac{A_p}{S} \right) \quad (3.17)$$

$$\bullet \text{ Macdonald} \quad \frac{z_0}{h} = \exp \left[-0.5 \left(\frac{C_D}{k^2} \frac{A_f}{S} \right)^{0.5} \right] \quad C_D = 1.2 \quad (3.18)$$

ここで、

A_f : 風向方向見つけ面積 A_p : z 軸方向投影面積

S : 粗度要素一個あたりの面積 h : 粗度要素の高さ x : 吹送距離

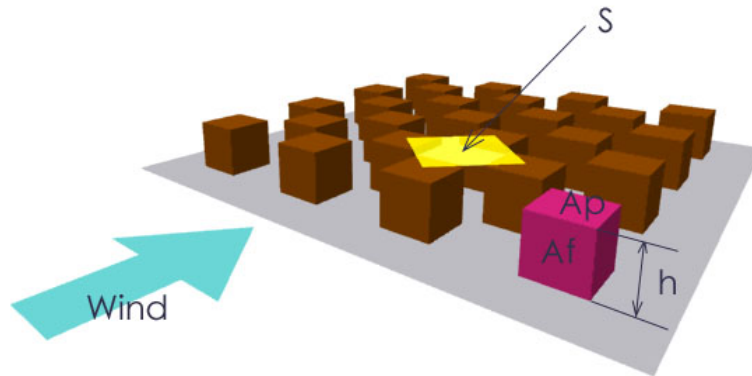


図 3.2 粗度パラメータ

(2) ベキ指数則

ベキ指数則については、3. 1 で式 (3.2) および式 (3.3) として示したが、参考の為に再掲する。

$$U(z) = U_G \left(\frac{z}{z_G} \right)^\alpha \quad (z > 0) \quad (3.2)$$

$$U(z) = U_G \left(\frac{z - z_d}{z_G - z_d} \right)^\alpha \quad (z \geq z_d) \quad (3.3)$$

ここで、

α : ベキ指数 z_G : 傾度風高さ

U_G : 傾度風風速 z_d : ゼロ面変位

式 (3.2) は、式 (3.3) において $z_d = 0$ の場合のものである。

ベキ指数の推定に関して、再び崔 (1990) よりその一部を表 3.2 に示す。ただし、ここでのベキ指数 α には、3. 1 (1) で示したベキ指数 α と粗度長 z_0 の関係式から求められたものも含まれる。

また、ベキ指数 α の地表面粗度の粗度パラメータからの推定に関しては、実例がほとんどなく、以下に示す亀井・丸太 (1978) によるものくらいである。

$\gamma = \frac{A_p \cdot h}{S \cdot z_{10}}$ で定義される roughness 密度 γ (但し、 $z_{10} = 10m$) に対して、

$$\alpha = 0.682 \sqrt{2\gamma - \gamma^2} \quad (3.19)$$

表 3.2 ベキ指数の推定値

粗度区分	Counihan	A.I.J	I.S.O	崔
I	0.16	0.10	0.11	0.10~0.15
II		0.15	0.14	0.16~0.20
III	0.28	0.20	0.22	0.21~0.25
IV				0.25~0.35
V	0.40	0.30	0.43	0.35~0.50

3. 4 実験結果からの鉛直分布係数の評価

本節では、本実験より得られた各測定ケースの平均風速鉛直分布の鉛直分布係数（粗度長 z_0 およびべき指数 α ）の算定を行い、結果をまとめる。

（１）粗度長 z_0

粗度長 z_0 の算定を式 (3. 20) の下で行う。

$$U_z = \frac{1}{k} u_* \ln \left(\frac{Z}{Z_0} \right) \quad (3. 20)$$

算定結果を図 3.3～図 3.32 に示す。図には粗度長 z_0 と摩擦速度 u_* をあわせて記した。算定にあたっては、測定位置近傍の粗度ブロックの直接的な影響を受けていると判断される風速データを除き、対数則が成立する間の範囲の平均風速データを用いた。一次式への近似は、最小二乗法で行った。

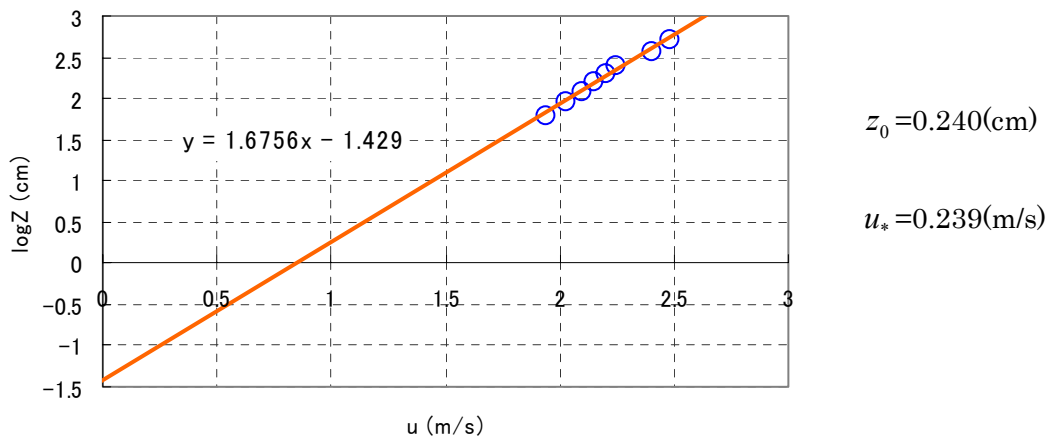
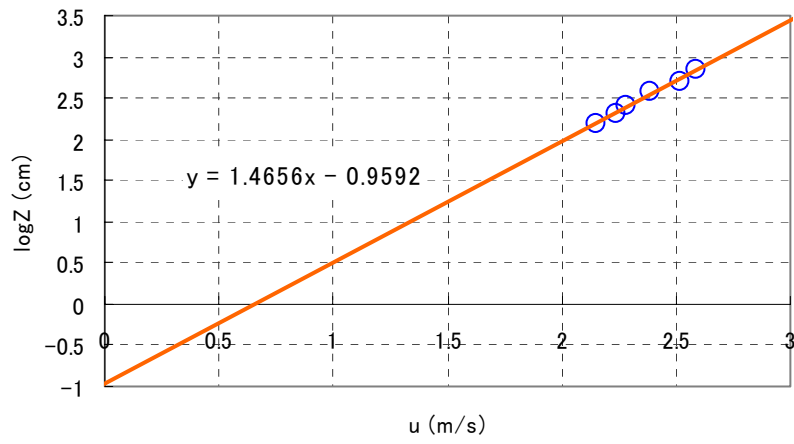


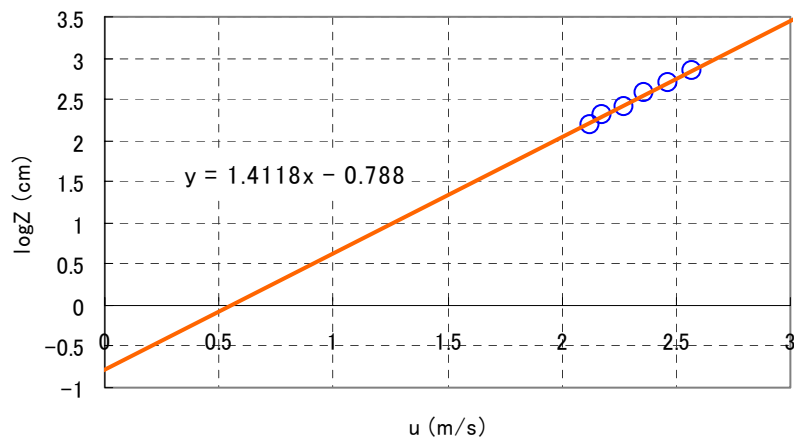
図 3.3 case04001 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 33.9\text{mm}$, $\sigma_h = 10.1\text{mm}$)



$$z_0 = 0.383(\text{cm})$$

$$u_* = 0.273(\text{m/s})$$

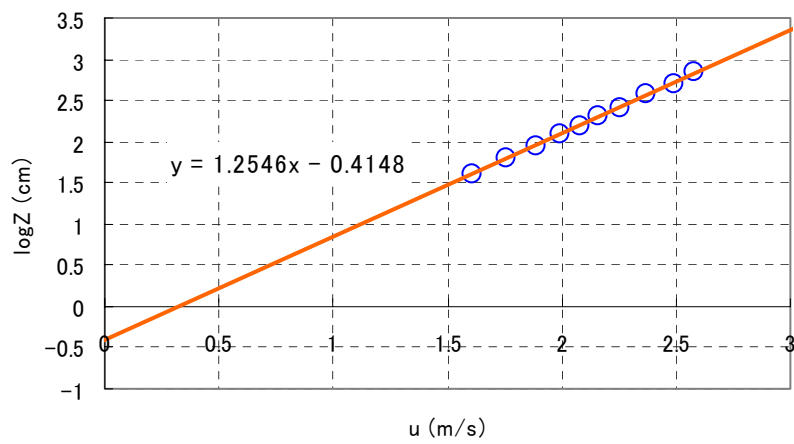
图 3.4 case04002 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 37.7\text{mm}$, $\sigma_h = 13.1\text{mm}$)



$$z_0 = 0.455(\text{cm})$$

$$u_* = 0.283(\text{m/s})$$

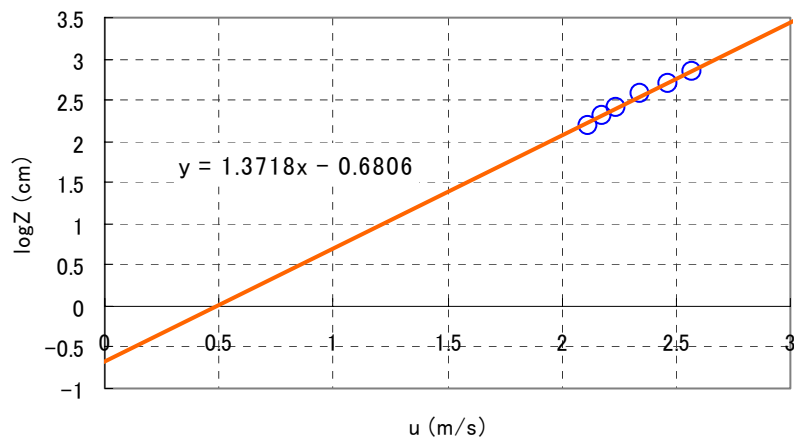
图 3.5 case04003 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 41.6\text{mm}$, $\sigma_h = 14.6\text{mm}$)



$$z_0 = 0.660(\text{cm})$$

$$u_* = 0.319(\text{m/s})$$

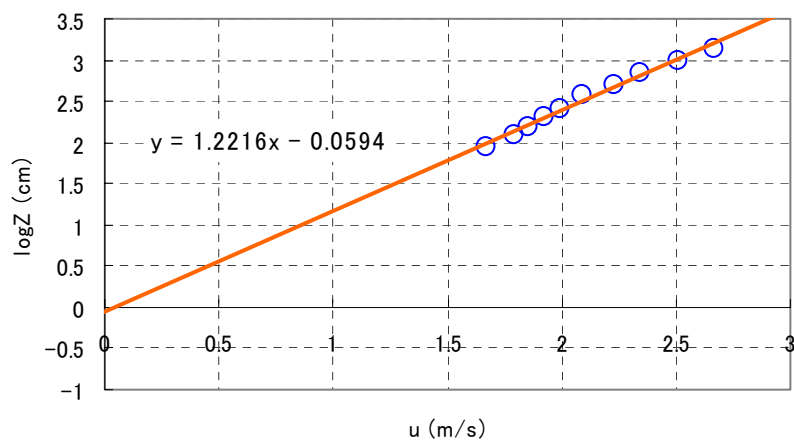
图 3.6 case04004 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 43.5\text{mm}$, $\sigma_h = 21.3\text{mm}$)



$$z_0 = 0.506(\text{cm})$$

$$u_* = 0.292(\text{m/s})$$

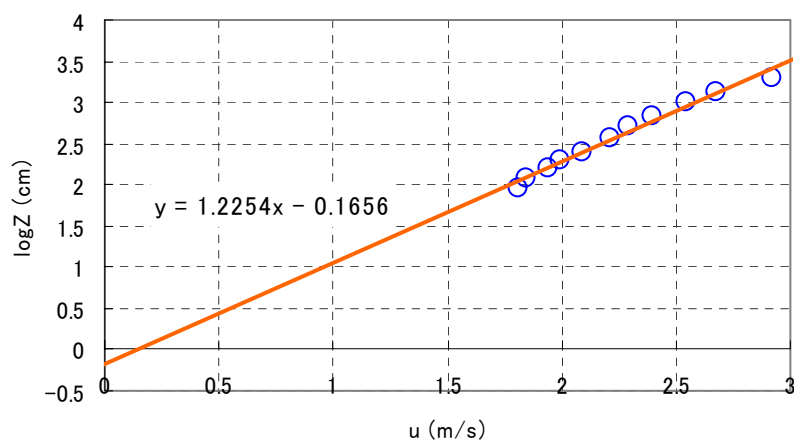
图 3.7 case04005 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 45.5\text{mm}$, $\sigma_h = 15.0\text{mm}$)



$$z_0 = 0.942(\text{cm})$$

$$u_* = 0.327(\text{m/s})$$

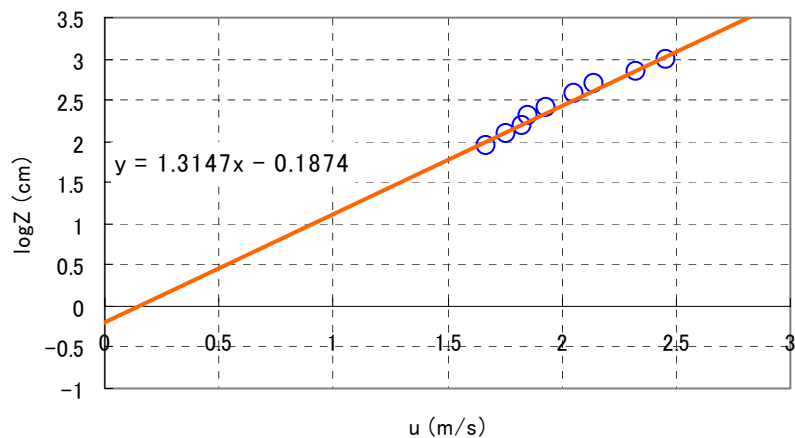
图 3.8 case04006 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 49.4\text{mm}$, $\sigma_h = 14.4\text{mm}$)



$$z_0 = 0.668(\text{cm})$$

$$u_* = 0.326(\text{m/s})$$

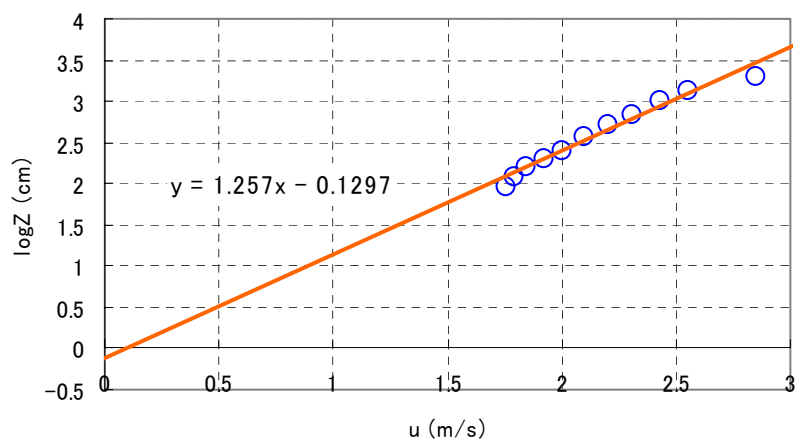
图 3.9 case04007 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 53.2\text{mm}$, $\sigma_h = 12.5\text{mm}$)



$$z_0 = 0.847(\text{cm})$$

$$u_* = 0.304(\text{m/s})$$

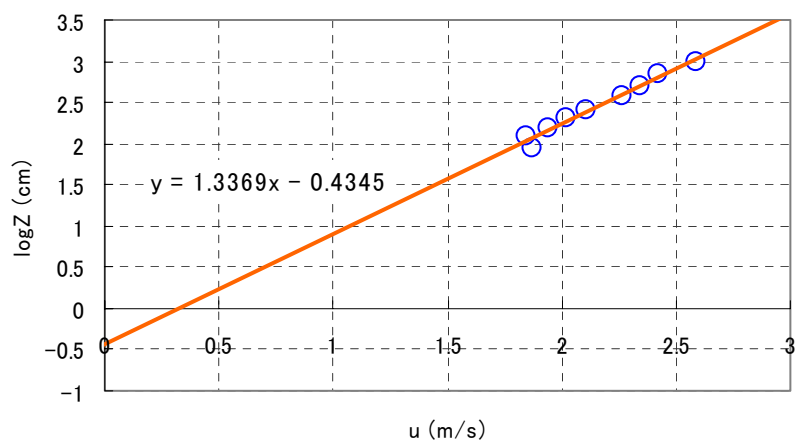
图 3.10 case04008 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 57.1\text{mm}$, $\sigma_h = 8.9\text{mm}$)



$$z_0 = 0.878(\text{cm})$$

$$u_* = 0.318(\text{m/s})$$

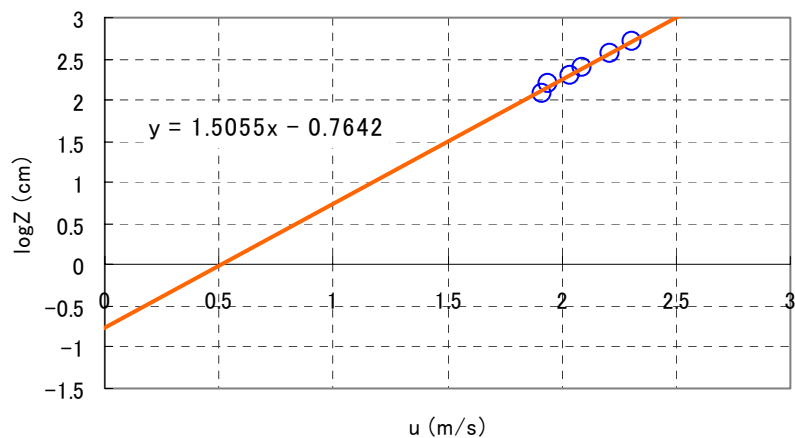
图 3.11 case04009 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 60.0\text{mm}$, $\sigma_h = 13.2\text{mm}$)



$$z_0 = 0.648(\text{cm})$$

$$u_* = 0.299(\text{m/s})$$

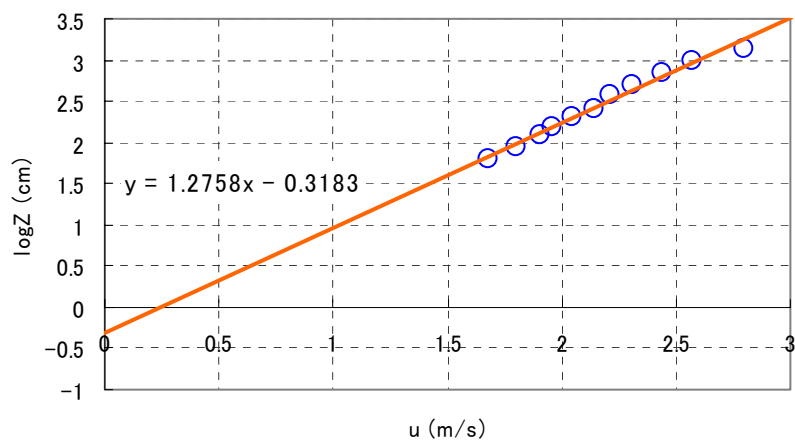
图 3.12 case04010 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 60.0\text{mm}$, $\sigma_h = 0.0\text{mm}$)



$$z_0 = 0.466(\text{cm})$$

$$u_* = 0.266(\text{m/s})$$

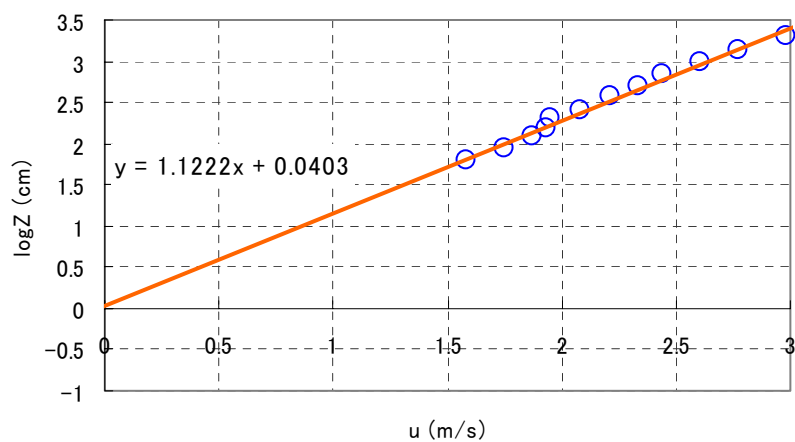
图 3.13 case12001 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 30.0\text{mm}$, $\sigma_h = 0.0\text{mm}$)



$$z_0 = 0.727(\text{cm})$$

$$u_* = 0.314(\text{m/s})$$

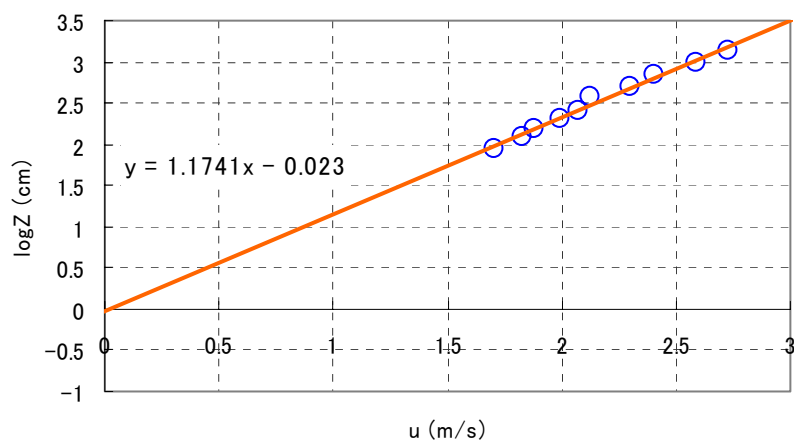
图 3.14 case12002 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 31.6\text{mm}$, $\sigma_h = 8.2\text{mm}$)



$$z_0 = 1.041(\text{cm})$$

$$u_* = 0.356(\text{m/s})$$

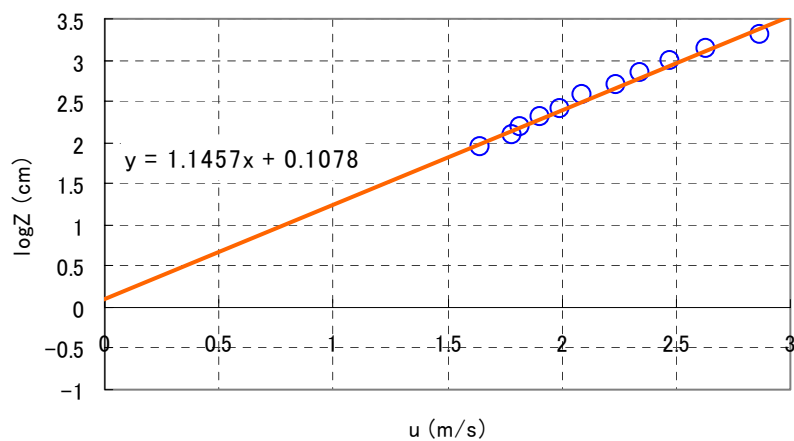
图 3.15 case12003 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 33.1\text{mm}$, $\sigma_h = 15.0\text{mm}$)



$$z_0 = 1.023(\text{cm})$$

$$u_* = 0.341(\text{m/s})$$

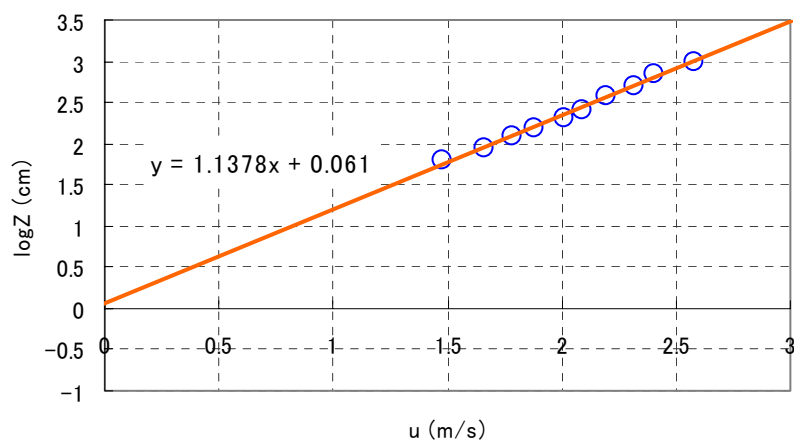
图 3.16 case12004 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 34.3\text{mm}$, $\sigma_h = 10.5\text{mm}$)



$$z_0 = 1.114(\text{cm})$$

$$u_* = 0.349(\text{m/s})$$

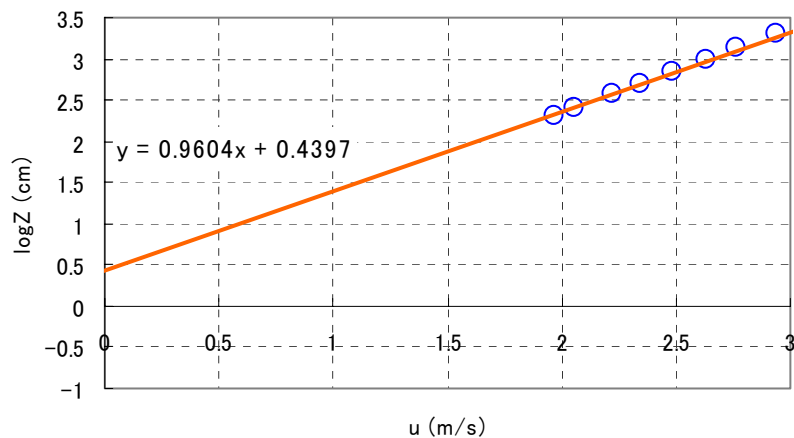
图 3.17 case12005 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 35.1\text{mm}$, $\sigma_h = 14.8\text{mm}$)



$$z_0 = 1.063(\text{cm})$$

$$u_* = 0.352(\text{m/s})$$

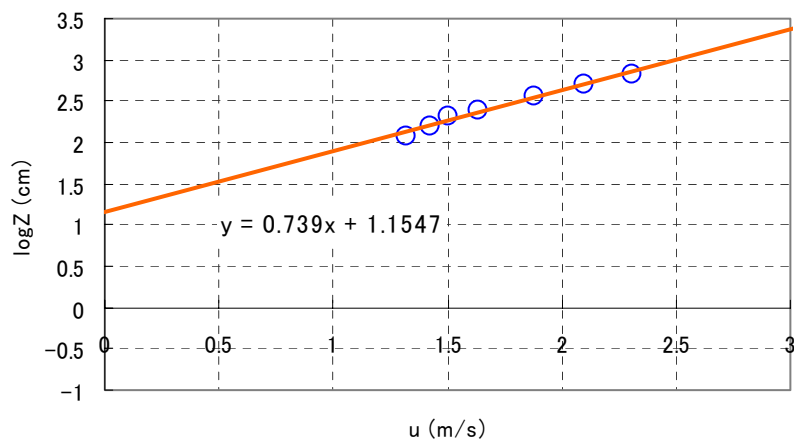
图 3.18 case12006 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 38.6\text{mm}$, $\sigma_h = 13.6\text{mm}$)



$$z_0 = 1.552(\text{cm})$$

$$u_* = 0.416(\text{m/s})$$

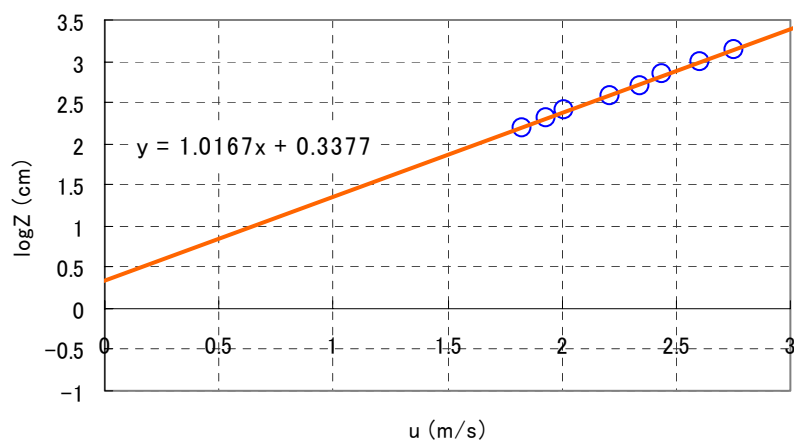
图 3.19 case12007 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 44.0\text{mm}$, $\sigma_h = 21.4\text{mm}$)



$$z_0 = 3.173(\text{cm})$$

$$u_* = 0.541(\text{m/s})$$

图 3.20 case12008 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 48.3\text{mm}$, $\sigma_h = 39.6\text{mm}$)



$$z_0 = 1.402(\text{cm})$$

$$u_* = 0.393(\text{m/s})$$

图 3.21 case12009 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 51.4\text{mm}$, $\sigma_h = 13.6\text{mm}$)

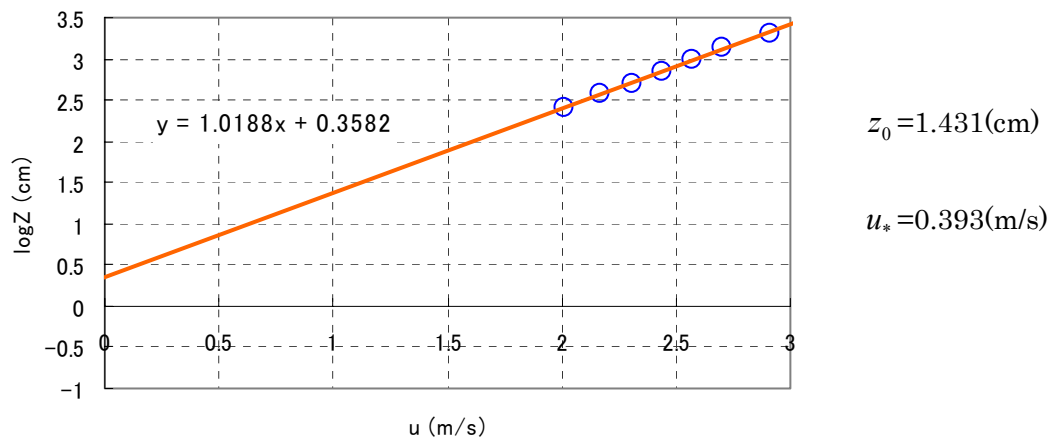


图 3.22 case12010 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 59.6\text{mm}$, $\sigma_h = 30.0\text{mm}$)

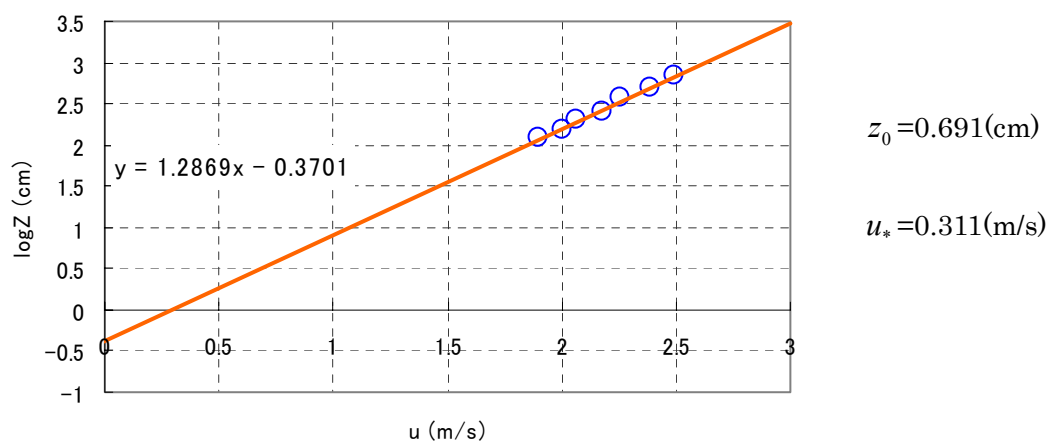


图 3.23 case25001 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 30.0\text{mm}$, $\sigma_h = 0.0\text{mm}$)

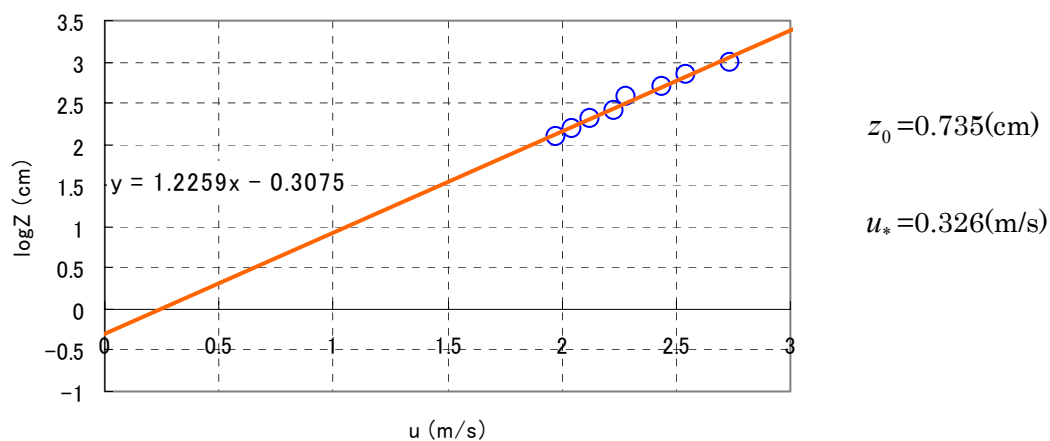


图 3.24 case25002 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 31.8\text{mm}$, $\sigma_h = 7.1\text{mm}$)

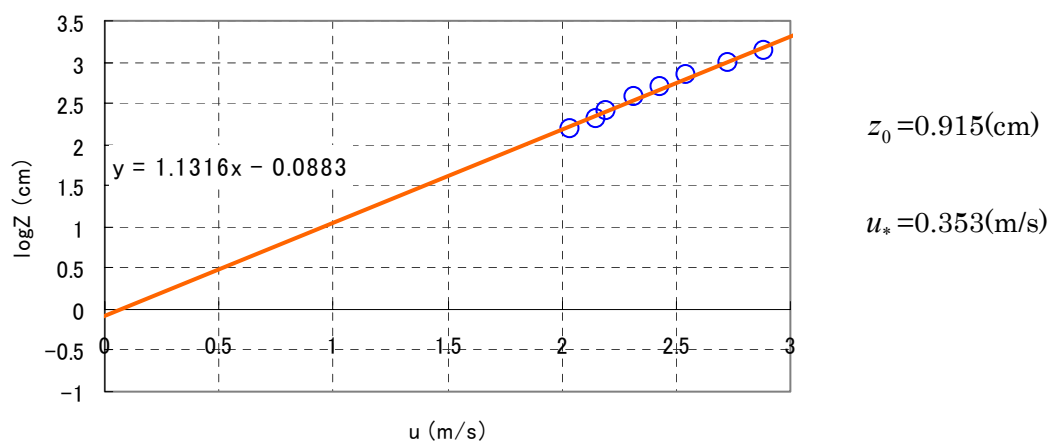


图 3.25 case25003 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 33.5\text{mm}$, $\sigma_h = 9.7\text{mm}$)

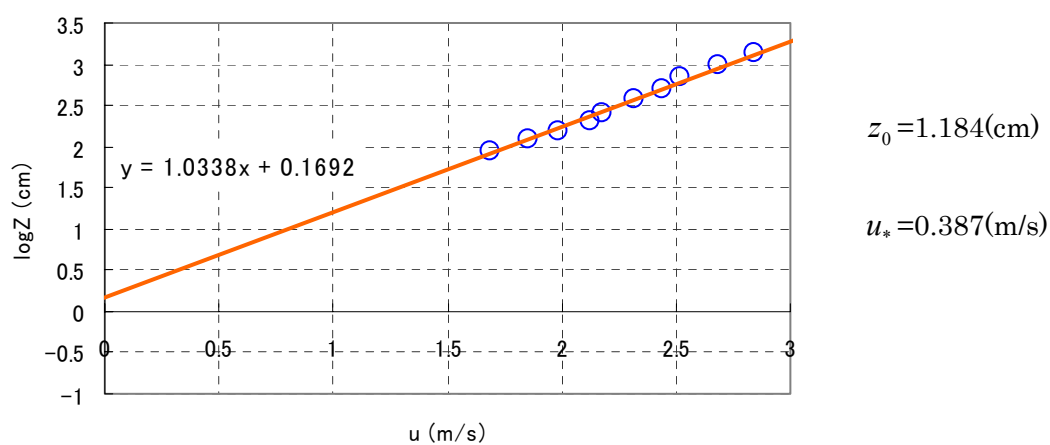
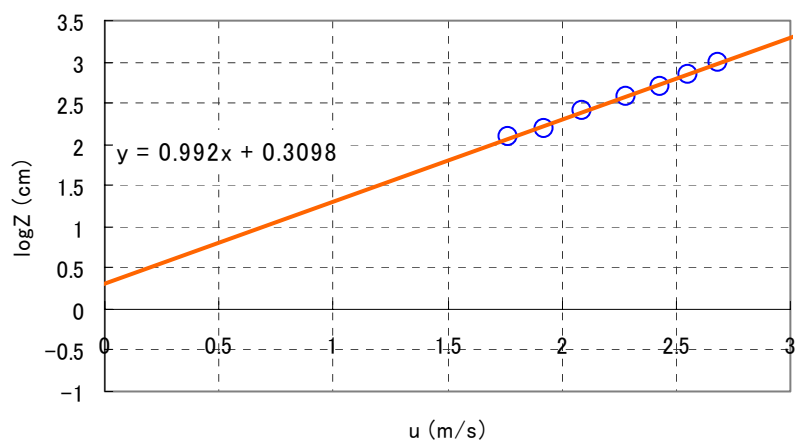


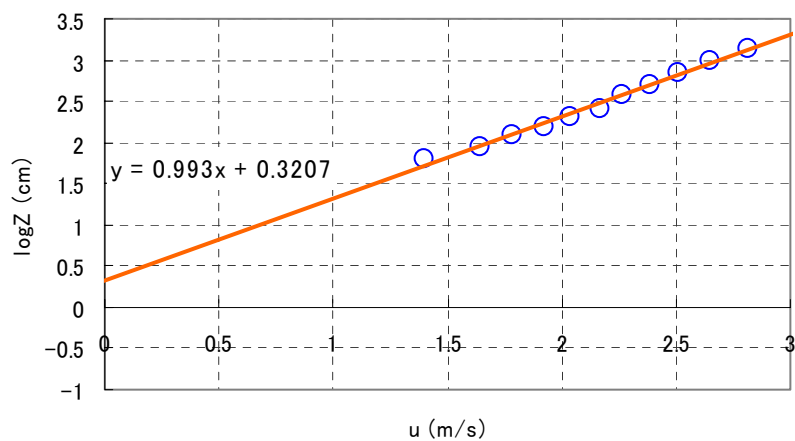
图 3.26 case25004 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 34.8\text{mm}$, $\sigma_h = 12.3\text{mm}$)



$$z_0 = 1.363(\text{cm})$$

$$u_* = 0.403(\text{m/s})$$

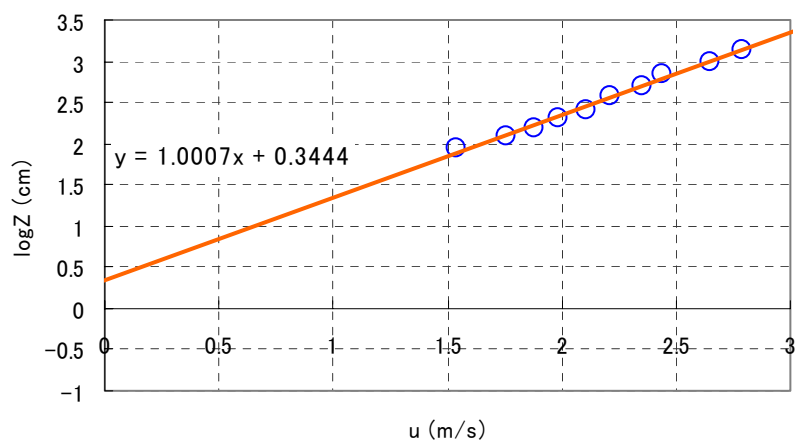
图 3.27 case25005 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 35.5\text{mm}$, $\sigma_h = 11.4\text{mm}$)



$$z_0 = 1.378(\text{cm})$$

$$u_* = 0.403(\text{m/s})$$

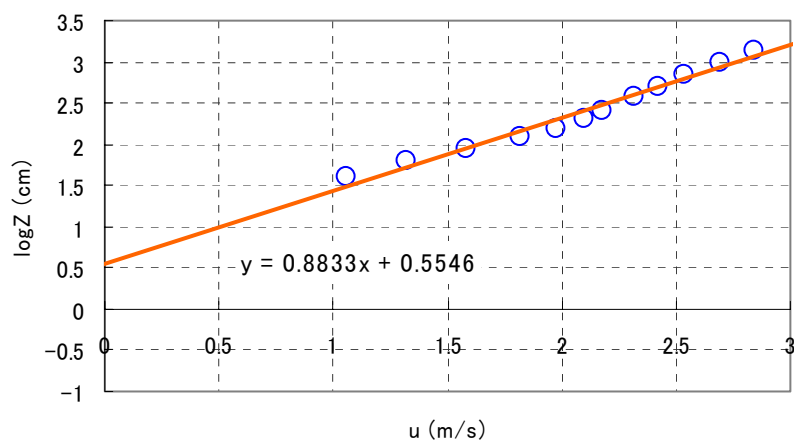
图 3.28 case25006 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 35.8\text{mm}$, $\sigma_h = 14.3\text{mm}$)



$$z_0 = 1.411(\text{cm})$$

$$u_* = 0.340(\text{m/s})$$

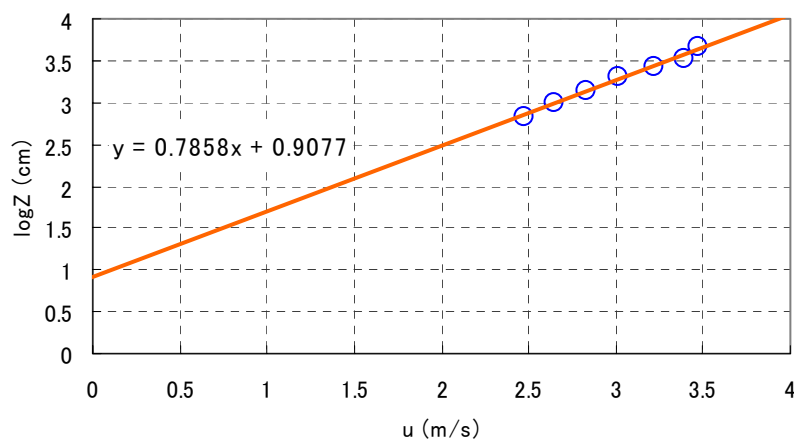
图 3.29 case25007 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 37.1\text{mm}$, $\sigma_h = 15.0\text{mm}$)



$$z_0 = 1.741(\text{cm})$$

$$u_* = 0.453(\text{m/s})$$

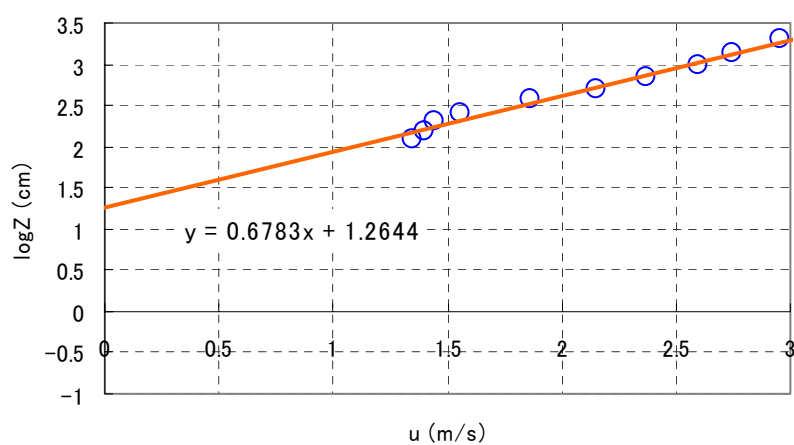
图 3.30 case25008 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 40.4\text{mm}$, $\sigma_h = 19.9\text{mm}$)



$$z_0 = 2.700(\text{cm})$$

$$u_* = 0.509(\text{m/s})$$

图 3.31 case25009 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 45.7\text{mm}$, $\sigma_h = 31.1\text{mm}$)



$$z_0 = 3.541(\text{cm})$$

$$u_* = 0.590(\text{m/s})$$

图 3.32 case25010 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 54.4\text{mm}$, $\sigma_h = 39.2\text{mm}$)

次に、以上の結果をまとめ、考察を行う。図 3.33～図 3.35 に高さの平均値 h_{am} と粗度長 z_0 の関係、また図 3.36～図 3.38 に高さの標準偏差 σ_h と粗度長 z_0 の関係を平面密度 R_m ごとに示す。

高さの平均値 h_{am} は、図 3.33、図 3.35 より平面密度 $R_m = 4\%$ および $R_m = 25\%$ では粗度長 z_0 と良い相関を見せることが分かり、高さの平均値をパラメータに粗度長を導くことが出来そうである。ここで、平面密度 $R_m = 4\%$ の場合は 25% の場合と比較するとその相関性は劣ると言うことも出来るが、粗度長 z_0 の値の分布自体が 0.0～1.0 の範囲内であるので、それほど問題ではないと評価できる。しかし、平面密度 $R_m = 12\%$ の場合には、傾向的に粗度長 z_0 は高さの平均値に対して増加すると言うことが出来るが、粗度長 z_0 の決定に高さの平均値が主要なパラメータになっているとは言い難い。

高さの標準偏差 σ_h は、高さの平均値の場合とはまた別の傾向を見せ、平面密度 $R_m = 12\%$ および 25% の場合において指数近似により粗度長 z_0 と良い相関性を示すことが分かった（図 3.37, 図 3.38）。しかし、平面密度 $R_m = 4\%$ の場合には、粗度長 z_0 と高さの標準偏差 σ_h の相関性をグラフより読み取ることは出来ない。

また、高さの平均値 h_{am} および高さの標準偏差 σ_h に対する粗度長 z_0 を平面密度間で比較すると（図 3.39, 図 3.40）、平面密度が大きくなるにつれて粗度長 z_0 も大きくなることが分かる。図 3.34 では評価することの出来なかった平面密度 $R_m = 12\%$ の場合の高さの平均値 h_{am} に対する粗度長 z_0 の値も、図 3.39 よりその分布が平面密度 $R_m = 4\%$ と 12% の値の分布の間に納まることが分かる。

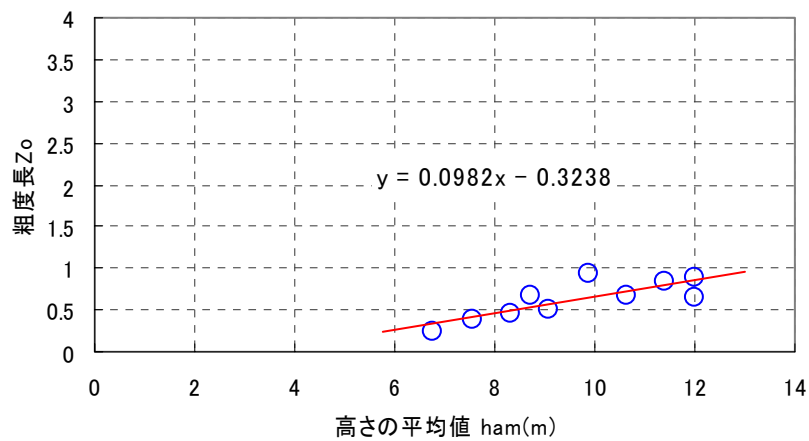


図 3.33 高さの平均値 h_{am} と粗度長 z_0 の関係 (平面密度 $R_m = 4\%$)

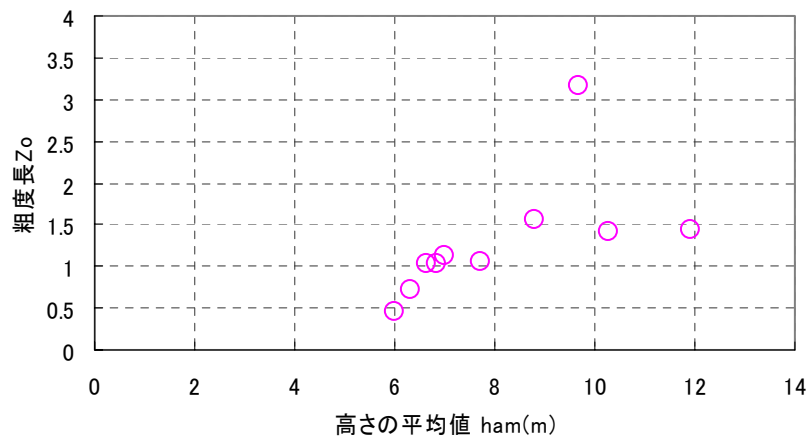


図 3.34 高さの平均値 h_{am} と粗度長 z_0 の関係 (平面密度 $R_m = 12\%$)

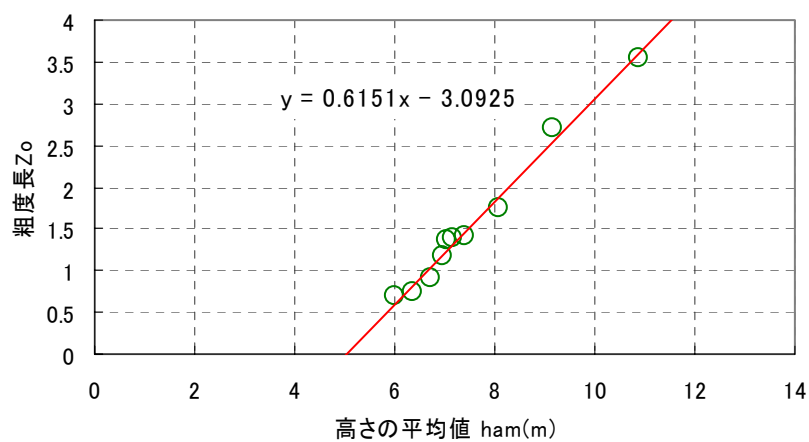


図 3.35 高さの平均値 h_{am} と粗度長 z_0 の関係 (平面密度 $R_m = 25\%$)

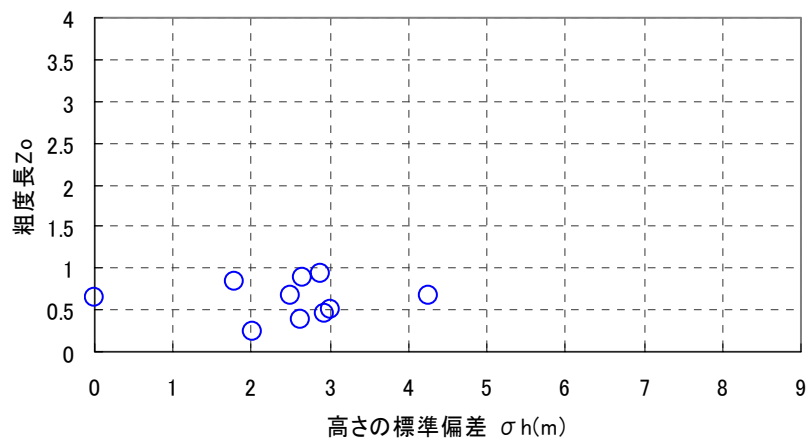


図 3.36 高さの標準偏差 σ_h と粗度長 z_0 の関係 (平面密度 $R_m = 4\%$)

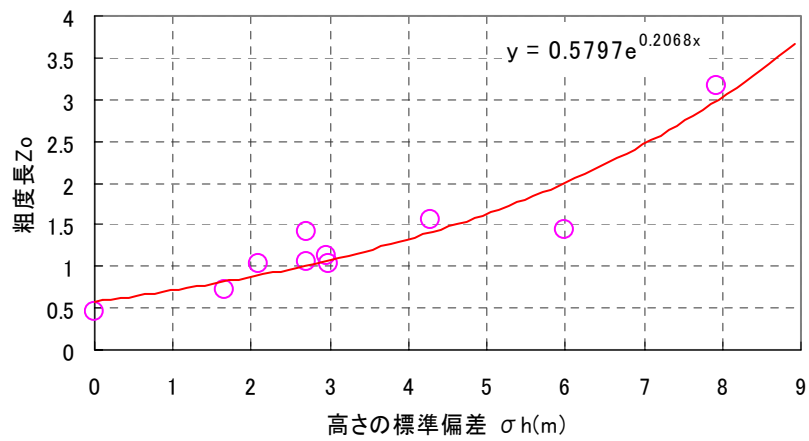


図 3.37 高さの標準偏差 σ_h と粗度長 z_0 の関係 (平面密度 $R_m = 12\%$)

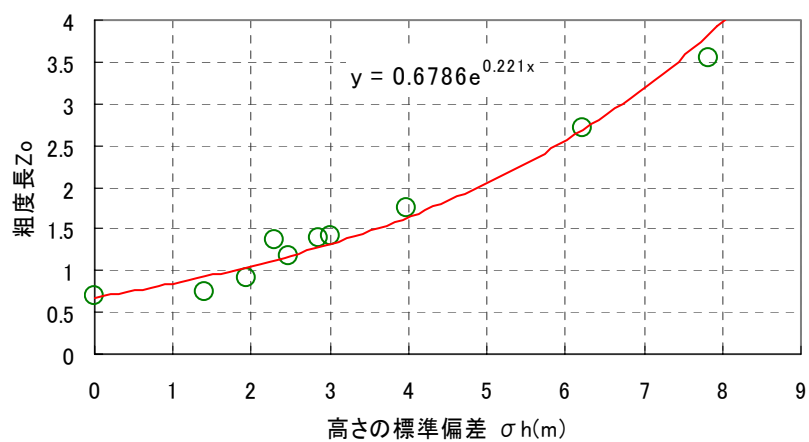


図 3.38 高さの標準偏差 σ_h と粗度長 z_0 の関係 (平面密度 $R_m = 25\%$)

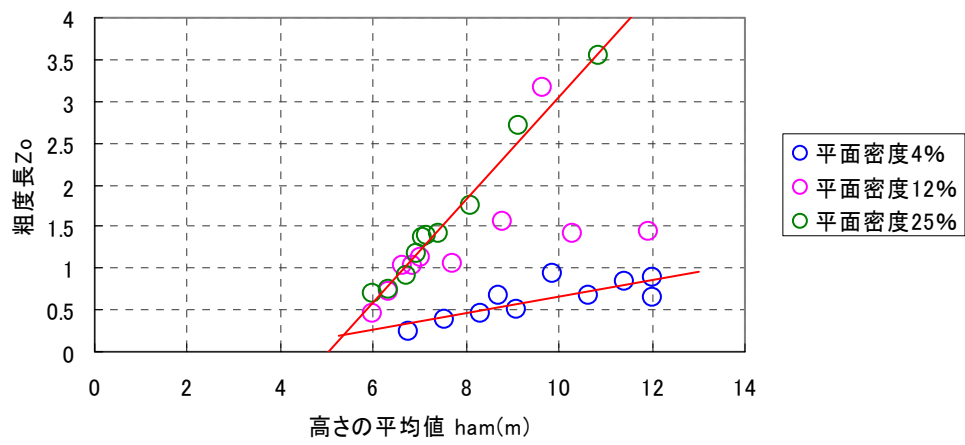


図 3.39 高さの平均値 h_{am} と粗度長 z_0 の関係

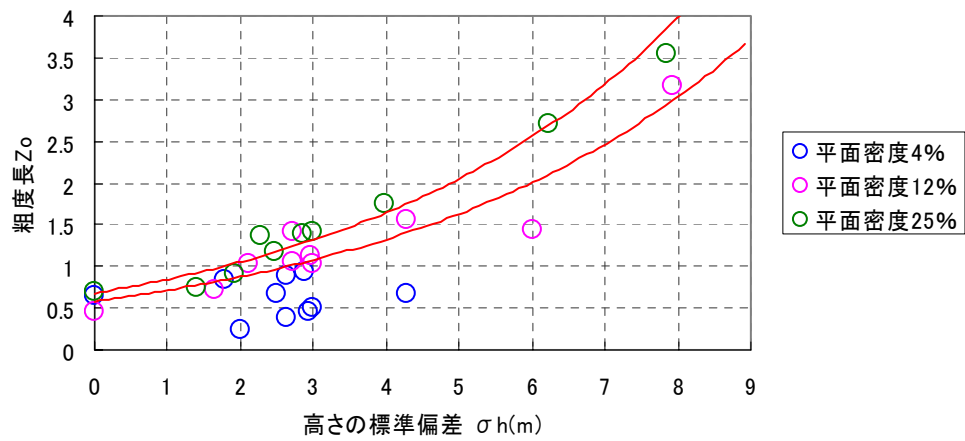


図 3.40 高さの標準偏差 σ_h と粗度長 z_0 の関係

(2) べき指数 α

べき指数 α の算定を式 (3.21) の下で行う。

$$U(z) = U_G \left(\frac{z}{z_G} \right)^\alpha \quad (3.21)$$

算定にあたっては、測定位置近傍の粗度ブロックの直接的な影響を受けていると判断される風速データを除き、フロートテーブル上の粗度形状の変化により発達した内部境界層内の平均風速鉛直分布と判断できる高さまでの範囲の平均風速データを用いた。この地表面の凹凸の急変による内部境界層の発達の様子の模式図を図 3.41 に示す。平均風速プロットの累乗近似は、最小二乗法で行った。

算定結果を図 3.42～図 3.71 に示す。図の横軸は、平均風速 U を基準風速 U_0 で基準化した値となっている。また、得られたべき指数 α の値を図とともに記す。

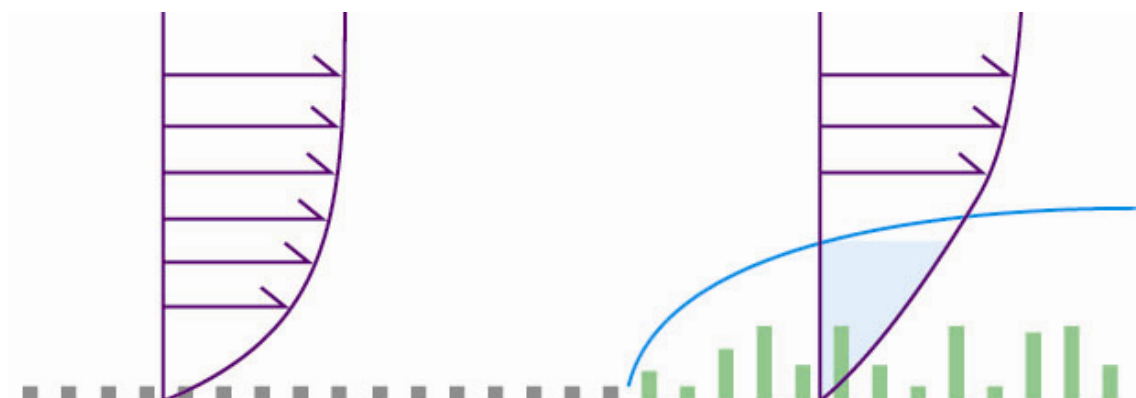


図 3.41 地表面凹凸の急変と内部境界層の発達の模式図

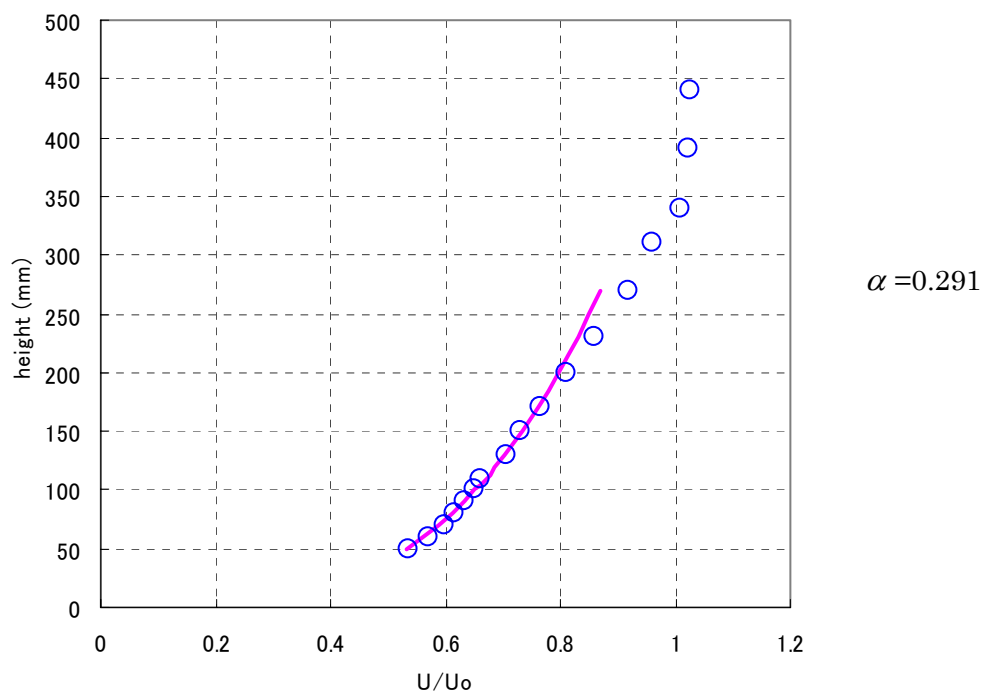


图 3.42 case04001 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 33.9\text{mm}$, $\sigma_h = 10.1\text{mm}$)

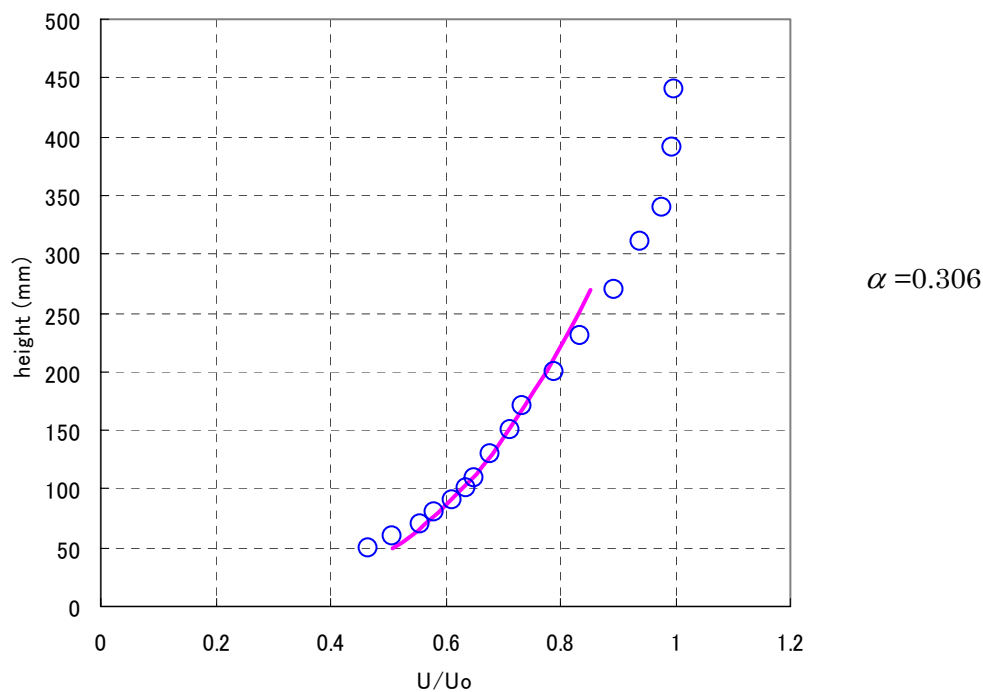


图 3.43 case04002 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 37.7\text{mm}$, $\sigma_h = 13.1\text{mm}$)

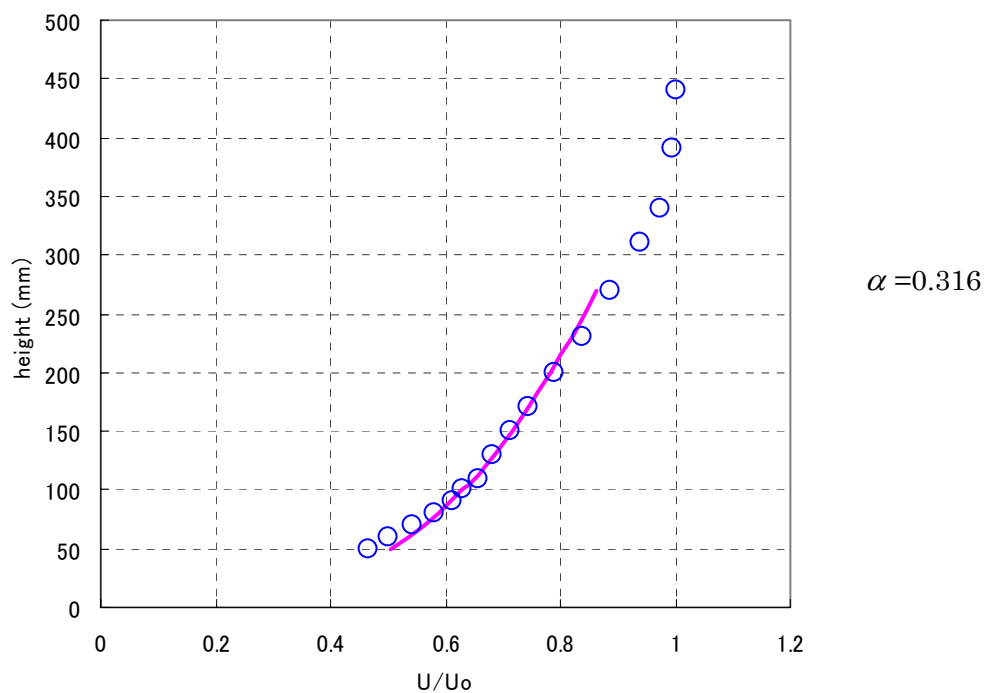


图 3.44 case04003 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 41.6\text{mm}$, $\sigma_h = 14.6\text{mm}$)

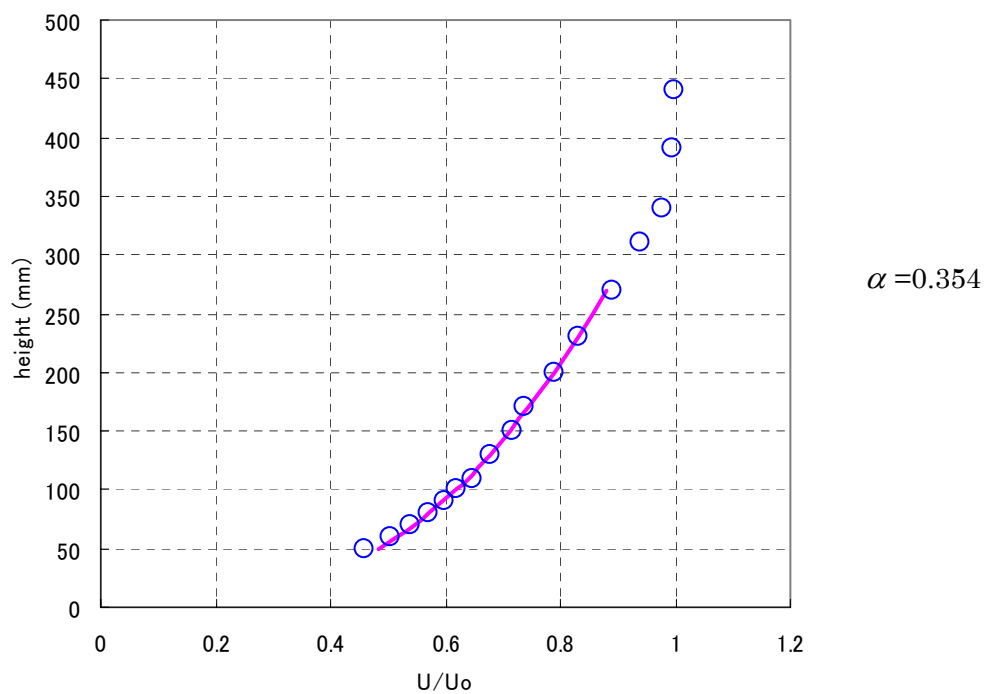


图 3.45 case04004 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 43.5\text{mm}$, $\sigma_h = 21.3\text{mm}$)

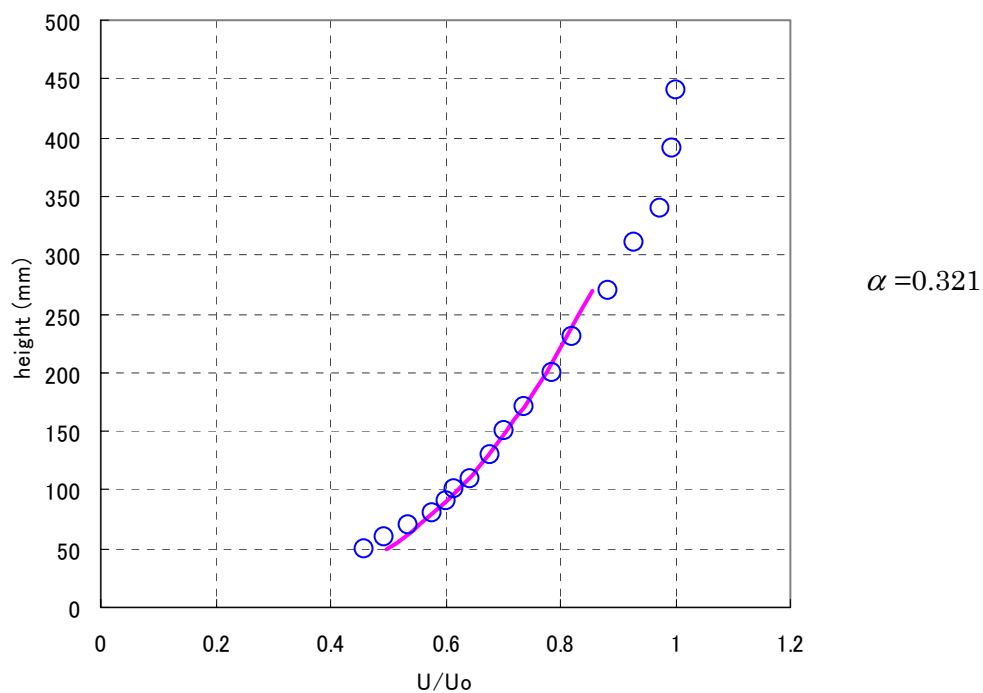


图 3.46 case04005 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 45.5\text{mm}$, $\sigma_h = 15.0\text{mm}$)

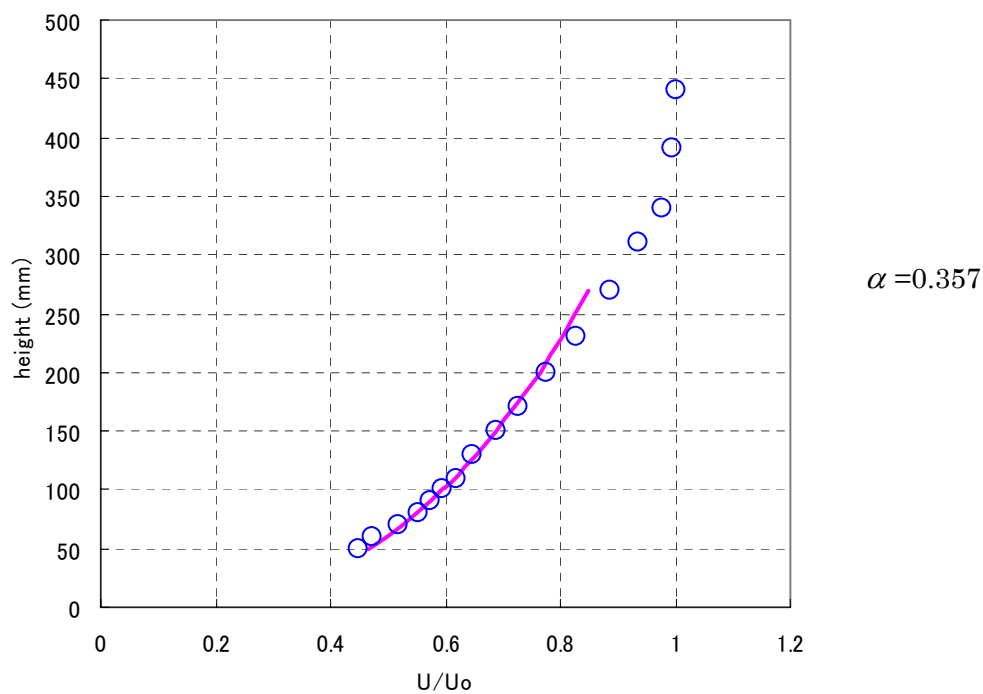


图 3.47 case04006 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 49.4\text{mm}$, $\sigma_h = 14.4\text{mm}$)

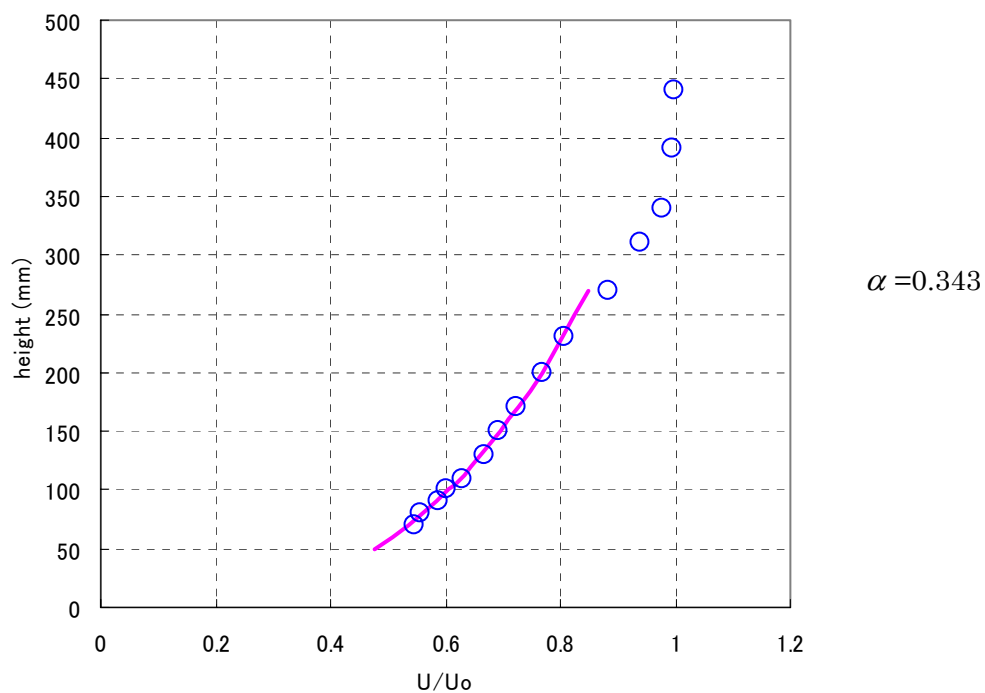


図 3.48 case04007 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 53.2\text{mm}$, $\sigma_h = 12.5\text{mm}$)

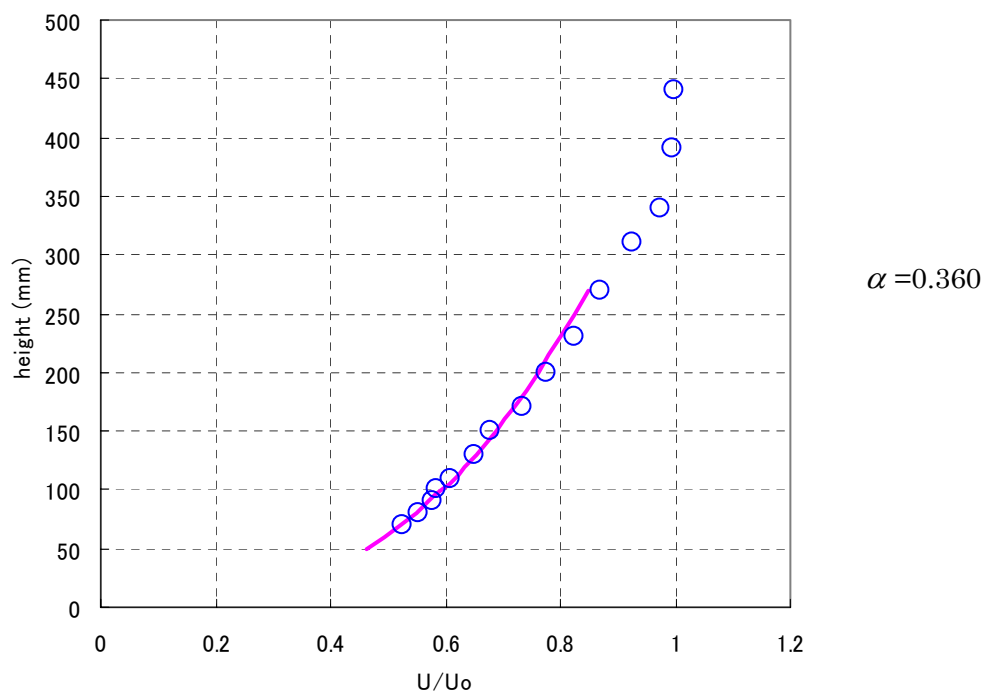


図 3.49 case04008 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 57.1\text{mm}$, $\sigma_h = 8.9\text{mm}$)

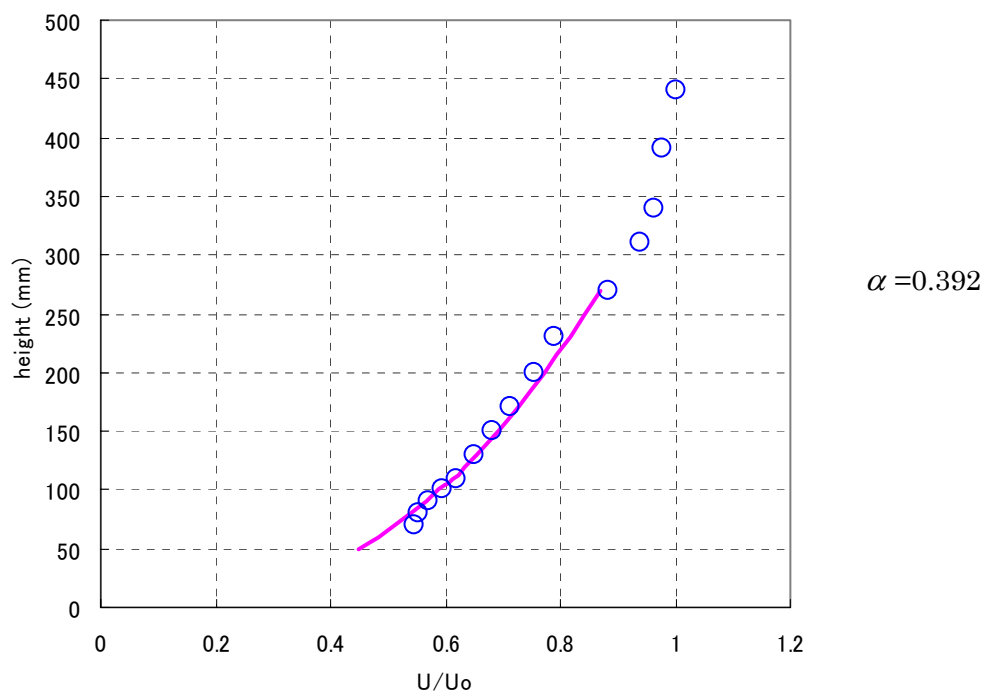


図 3.50 case04009 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 60.0\text{mm}$, $\sigma_h = 13.2\text{mm}$)

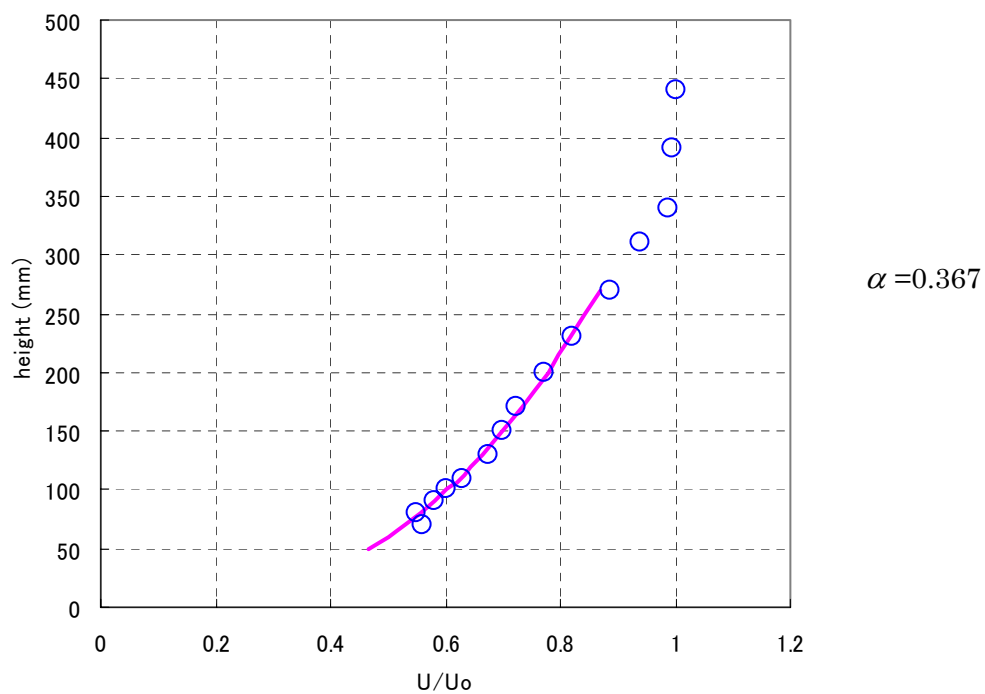


図 3.51 case04010 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 60.0\text{mm}$, $\sigma_h = 0.0\text{mm}$)

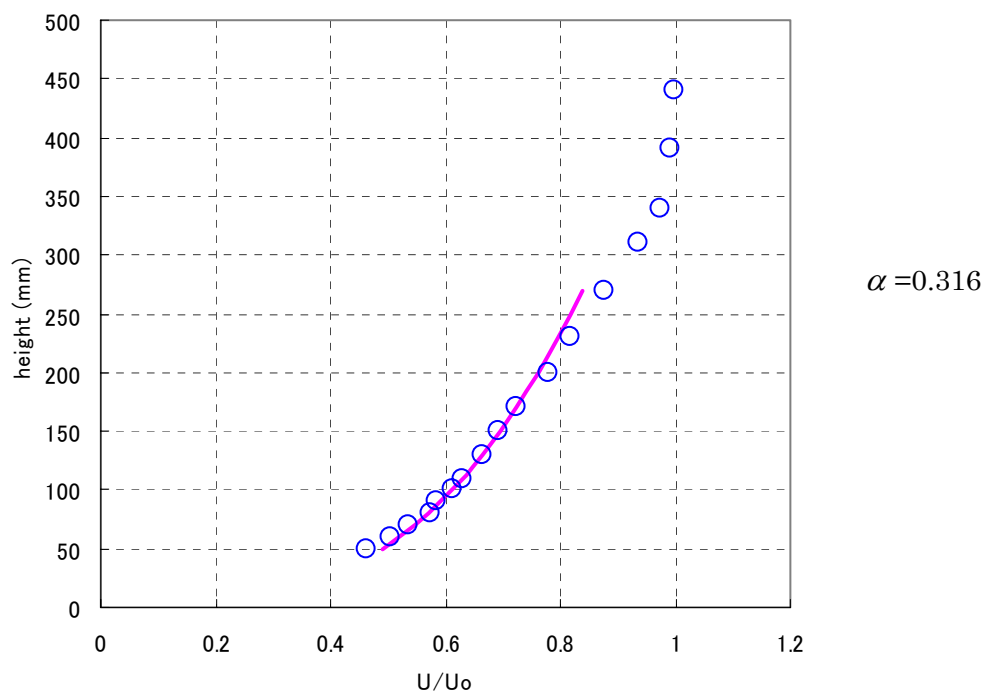


図 3.52 case12001 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 30.0\text{mm}$, $\sigma_h = 0.0\text{mm}$)

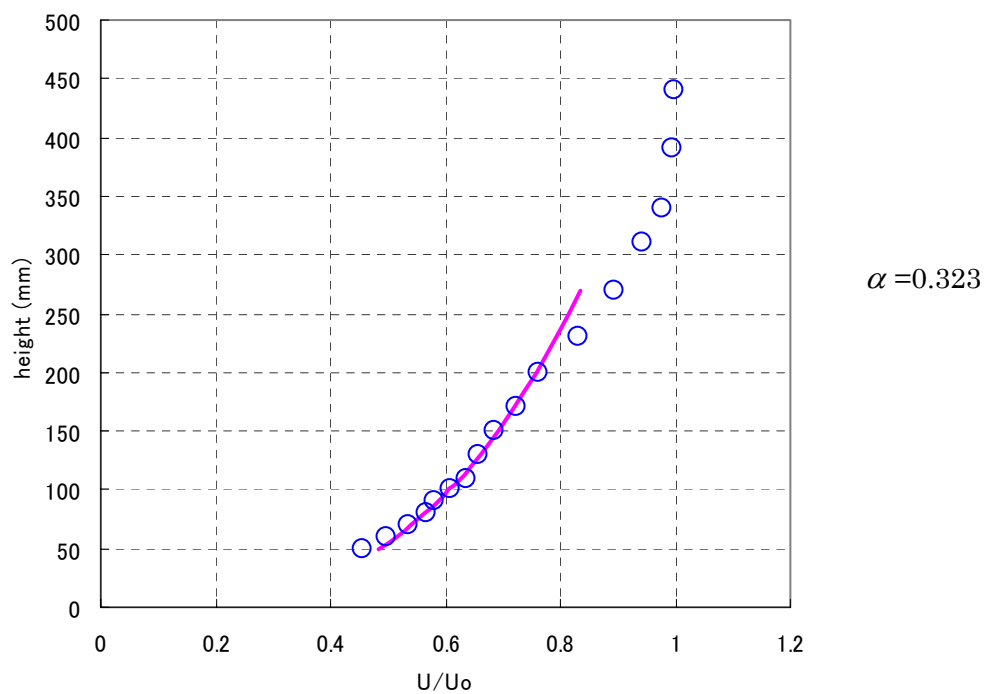


図 3.53 case12002 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 31.6\text{mm}$, $\sigma_h = 8.2\text{mm}$)

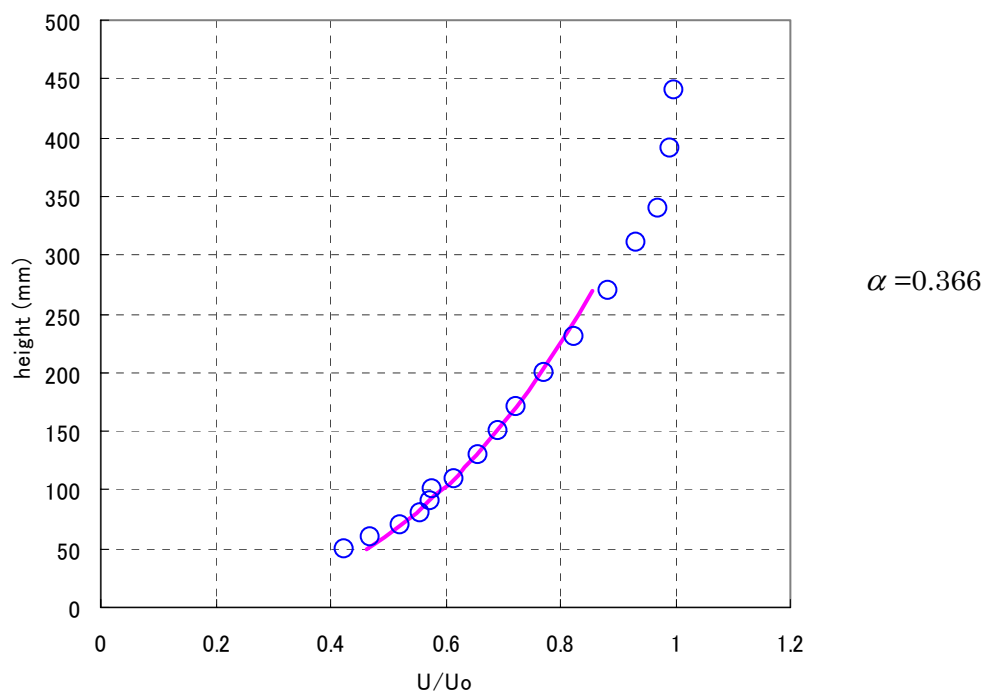


图 3.54 case12003 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 33.1\text{mm}$, $\sigma_h = 15.0\text{mm}$)

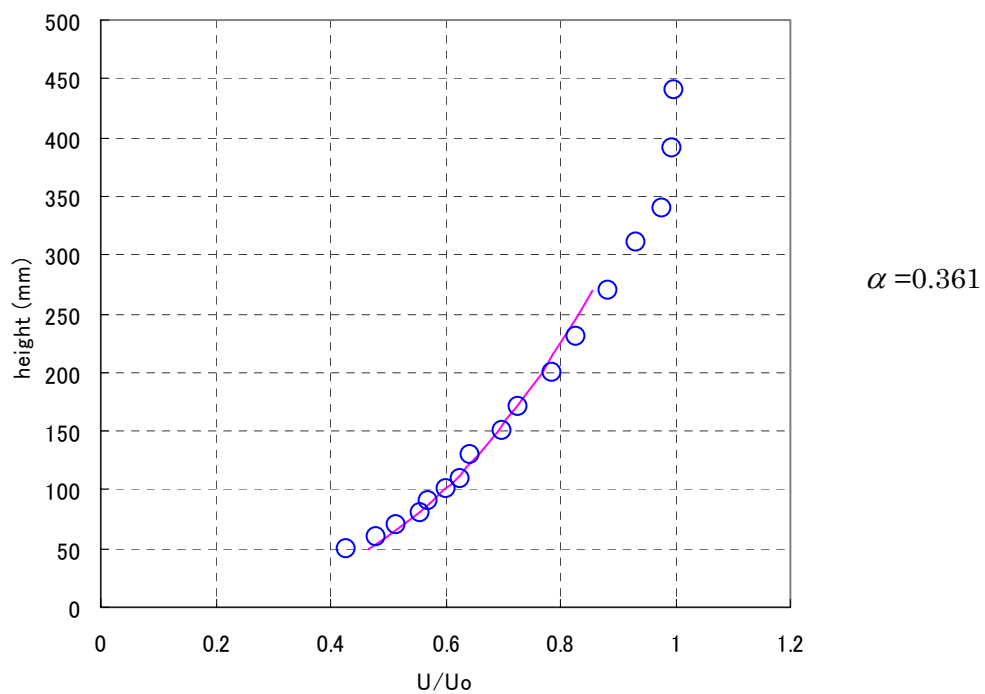


图 3.55 case12004 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 34.3\text{mm}$, $\sigma_h = 10.5\text{mm}$)

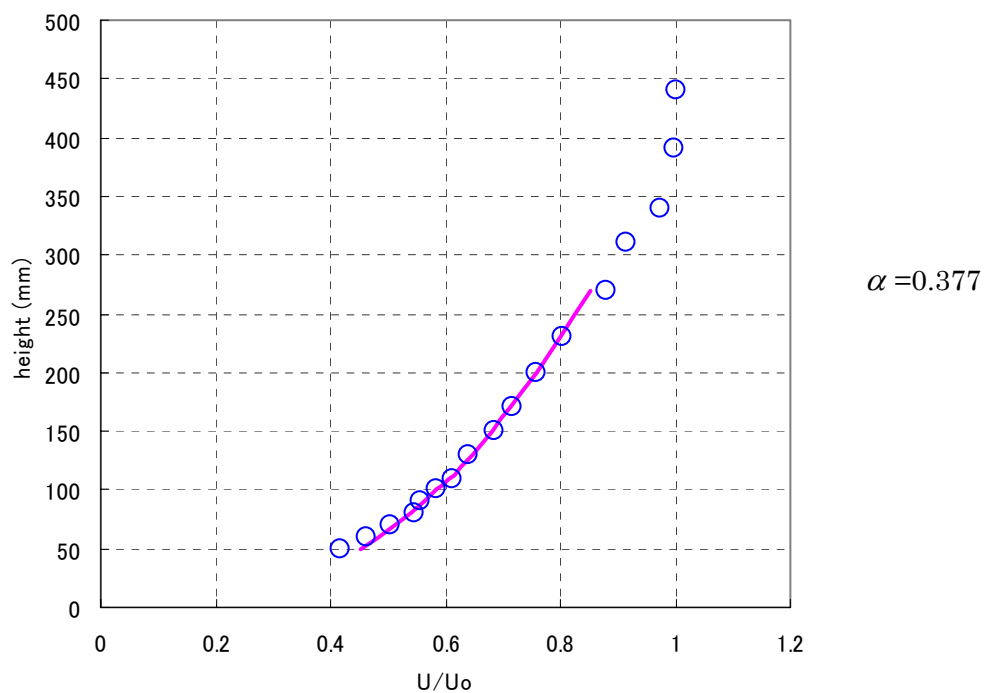


图 3.56 case12005 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 35.1\text{mm}$, $\sigma_h = 14.8\text{mm}$)

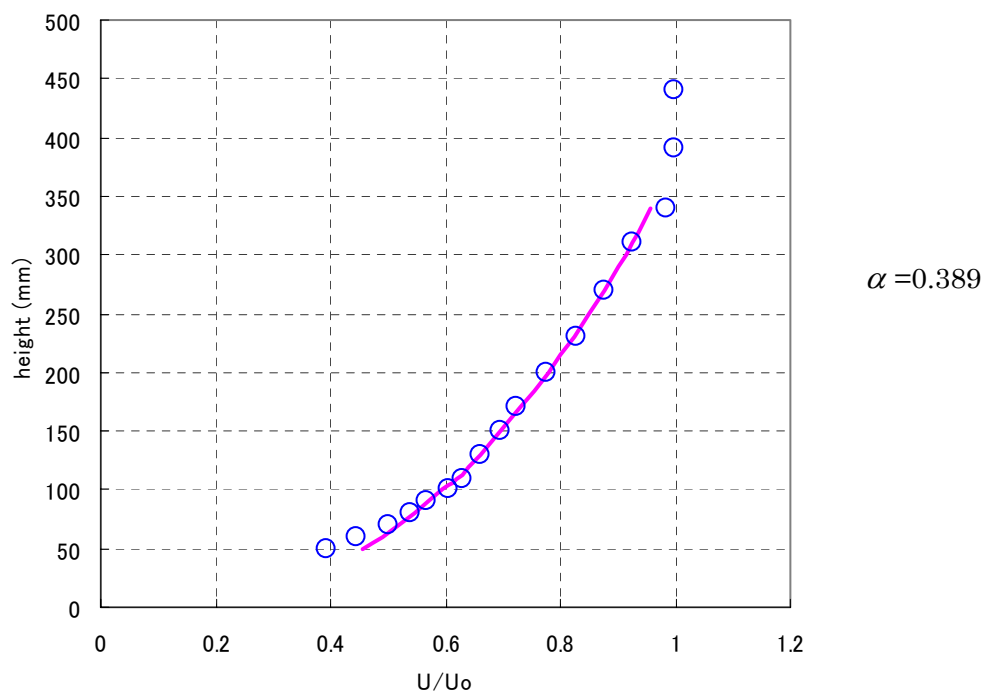


图 3.57 case12006 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 38.6\text{mm}$, $\sigma_h = 13.6\text{mm}$)

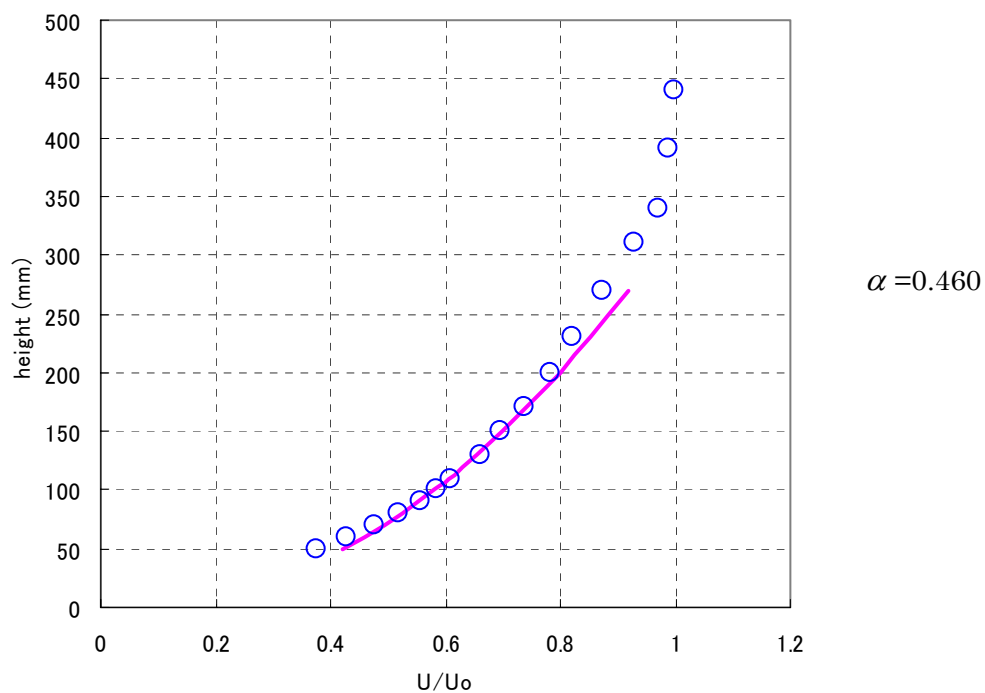


图 3.58 case12007 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 44.0\text{mm}$, $\sigma_h = 21.4\text{mm}$)

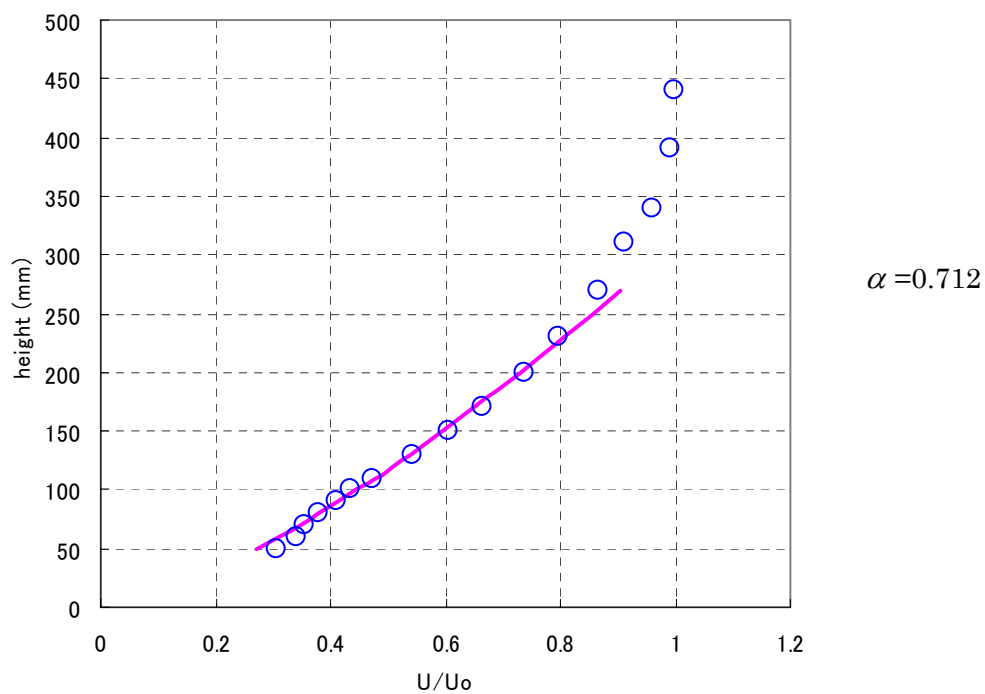


图 3.59 case12008 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 48.3\text{mm}$, $\sigma_h = 39.6\text{mm}$)

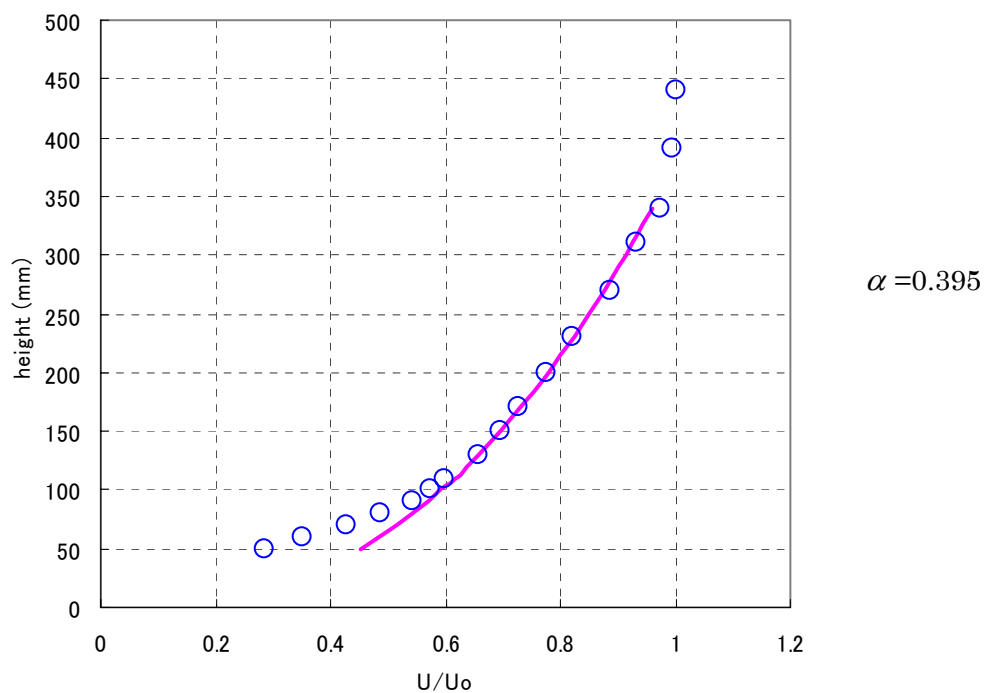


図 3.60 case12009 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 51.4\text{mm}$, $\sigma_h = 13.6\text{mm}$)

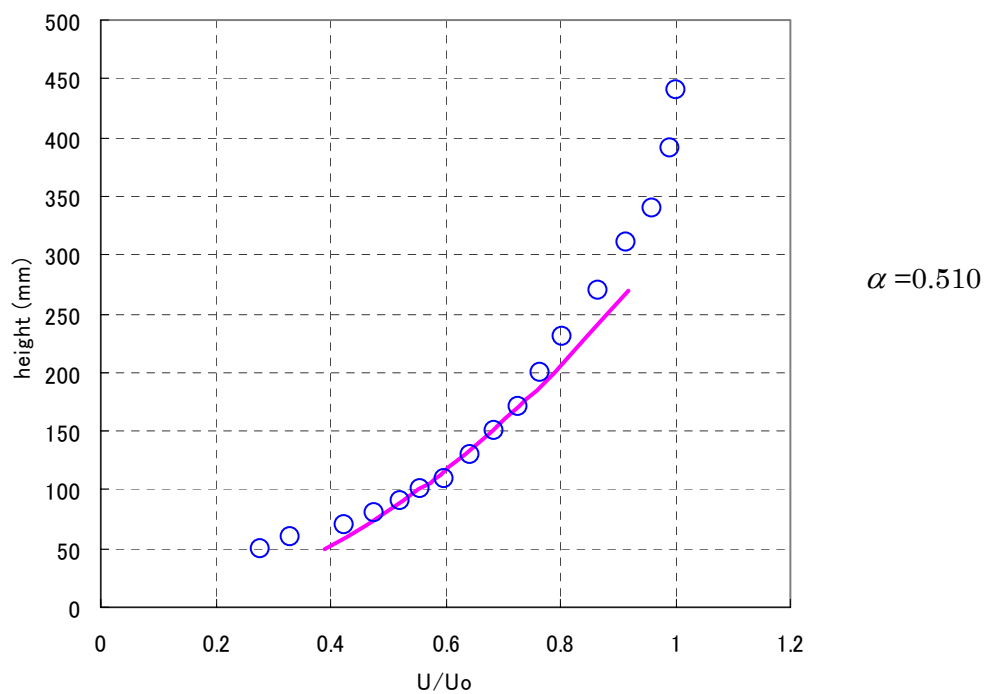


図 3.61 case12010 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 59.6\text{mm}$, $\sigma_h = 30.0\text{mm}$)

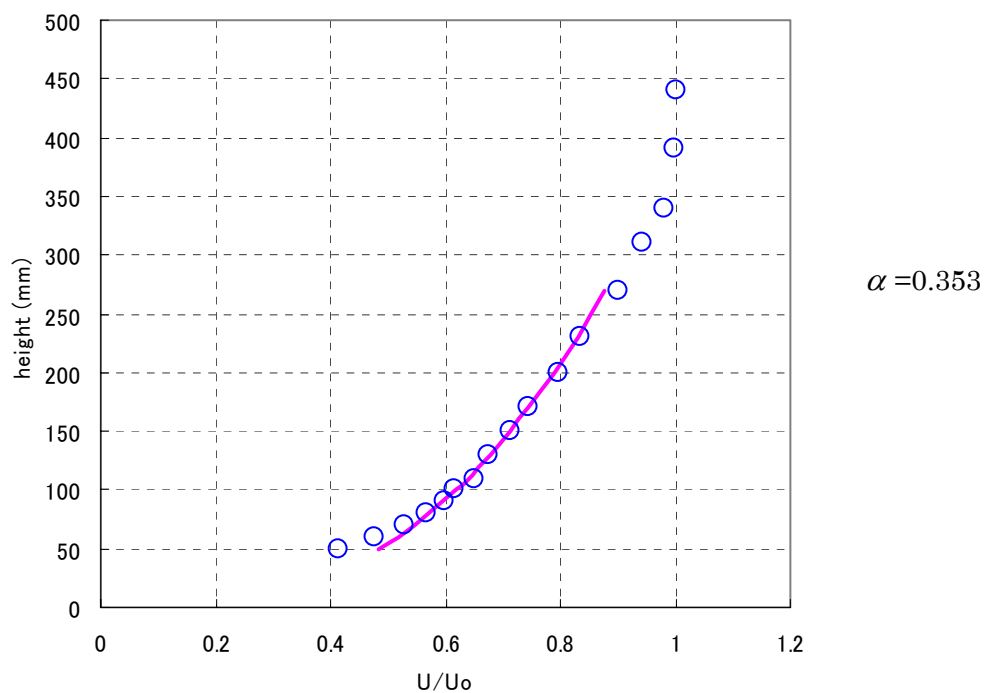


図 3.62 case25001 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 30.0\text{mm}$, $\sigma_h = 0.0\text{mm}$)

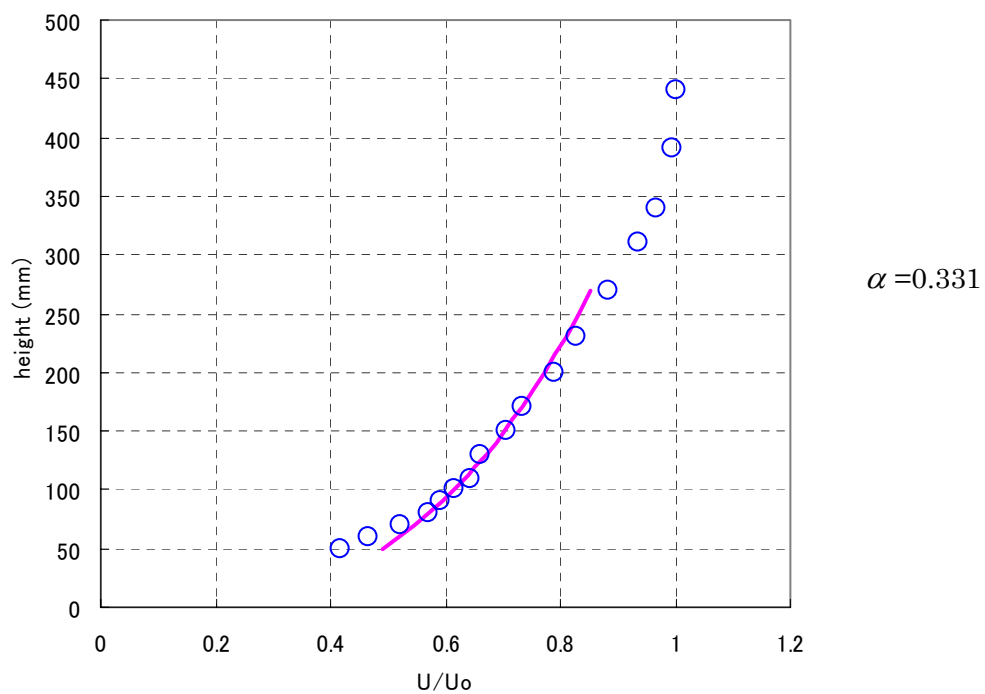


図 3.63 case25002 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 31.8\text{mm}$, $\sigma_h = 7.1\text{mm}$)

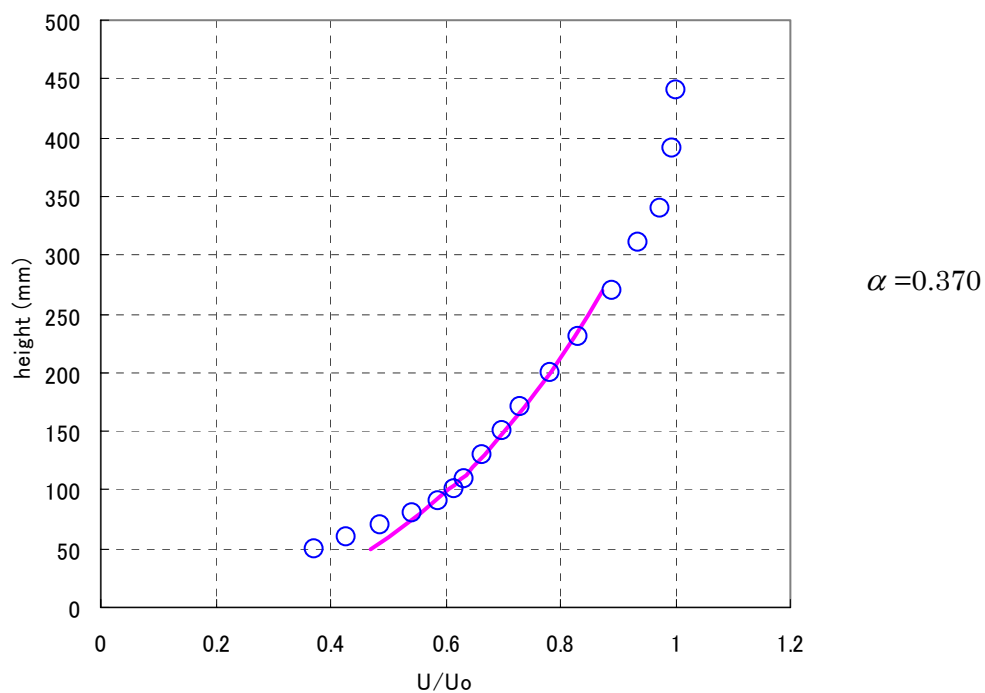


図 3.64 case25003 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 33.5\text{mm}$, $\sigma_h = 9.7\text{mm}$)

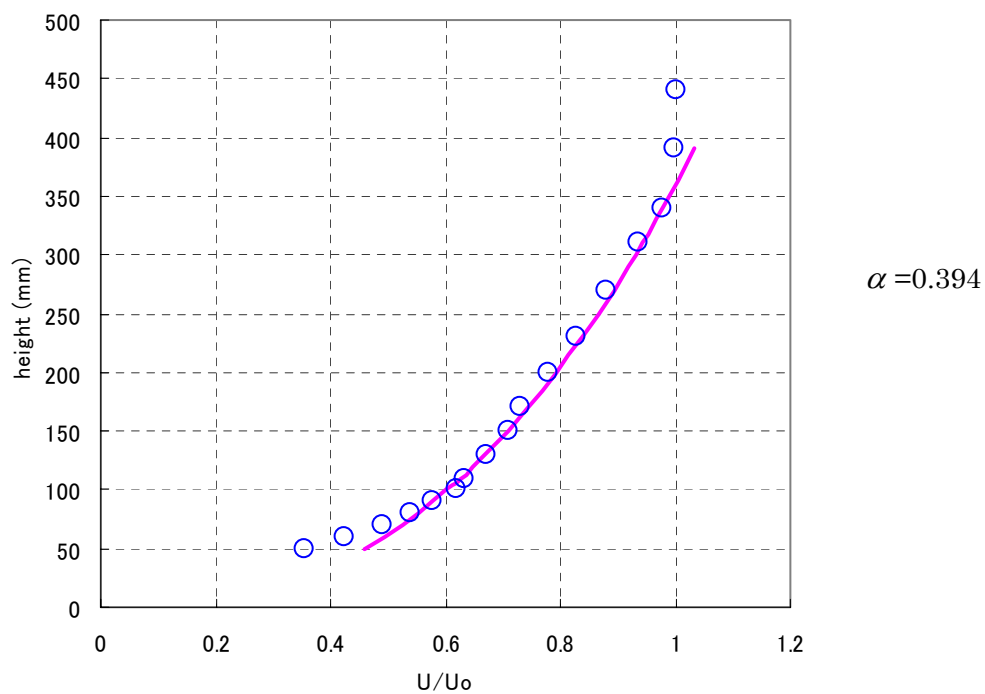


図 3.65 case25004 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 34.8\text{mm}$, $\sigma_h = 12.3\text{mm}$)

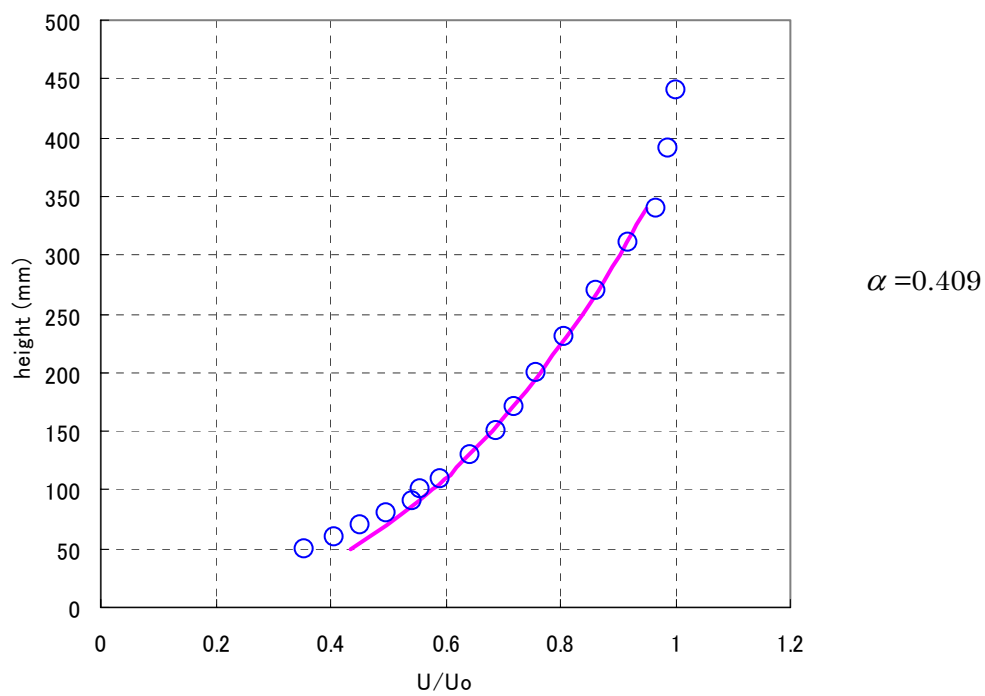


图 3.66 case25005 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 35.5\text{mm}$, $\sigma_h = 11.4\text{mm}$)

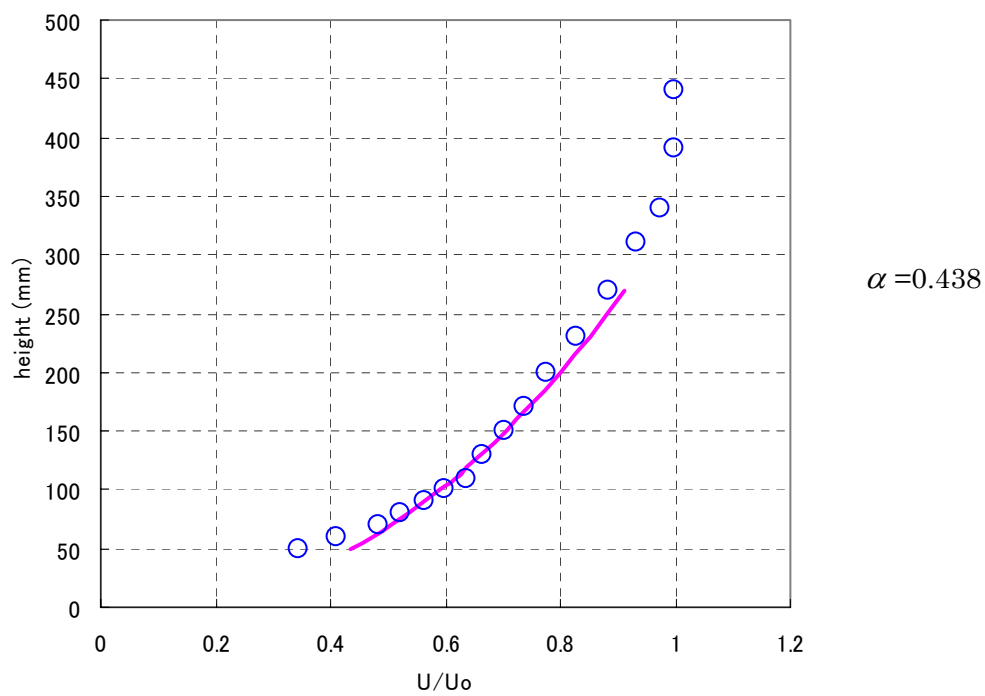


图 3.67 case25006 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 35.8\text{mm}$, $\sigma_h = 14.3\text{mm}$)

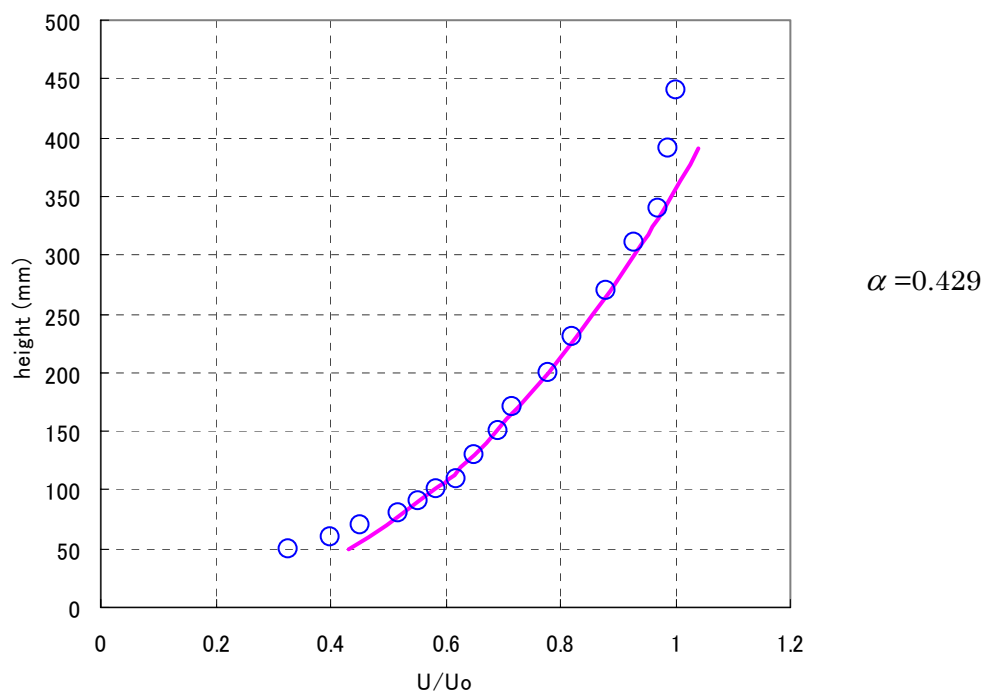


図 3.68 case25007 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 37.1\text{mm}$, $\sigma_h = 15.0\text{mm}$)

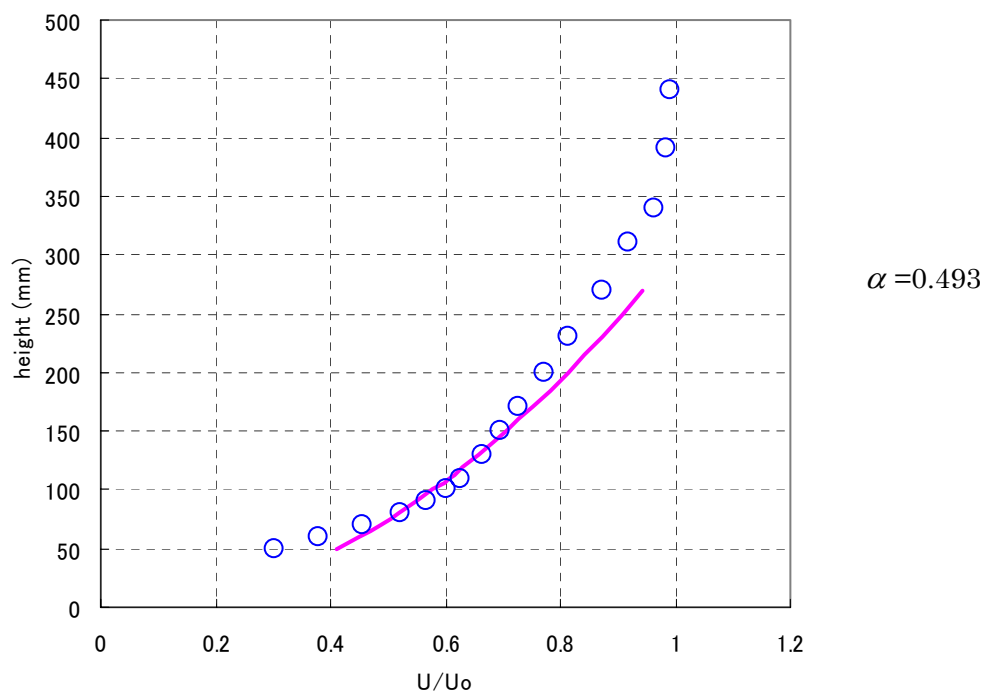


図 3.69 case25008 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 40.4\text{mm}$, $\sigma_h = 19.9\text{mm}$)

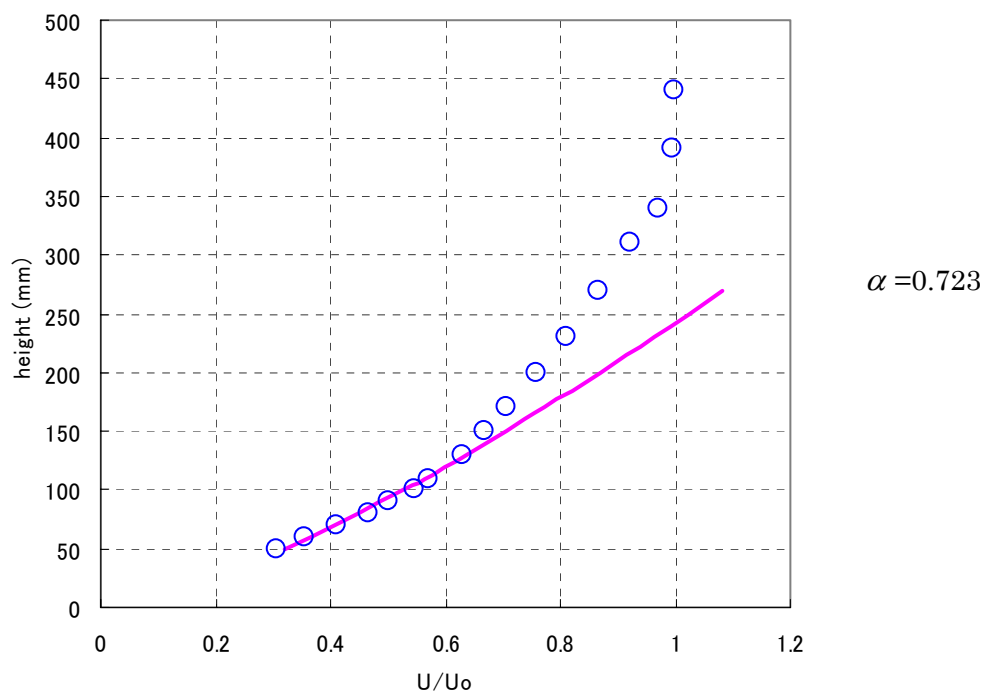


図 3.70 case25009 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 45.7\text{mm}$, $\sigma_h = 31.1\text{mm}$)

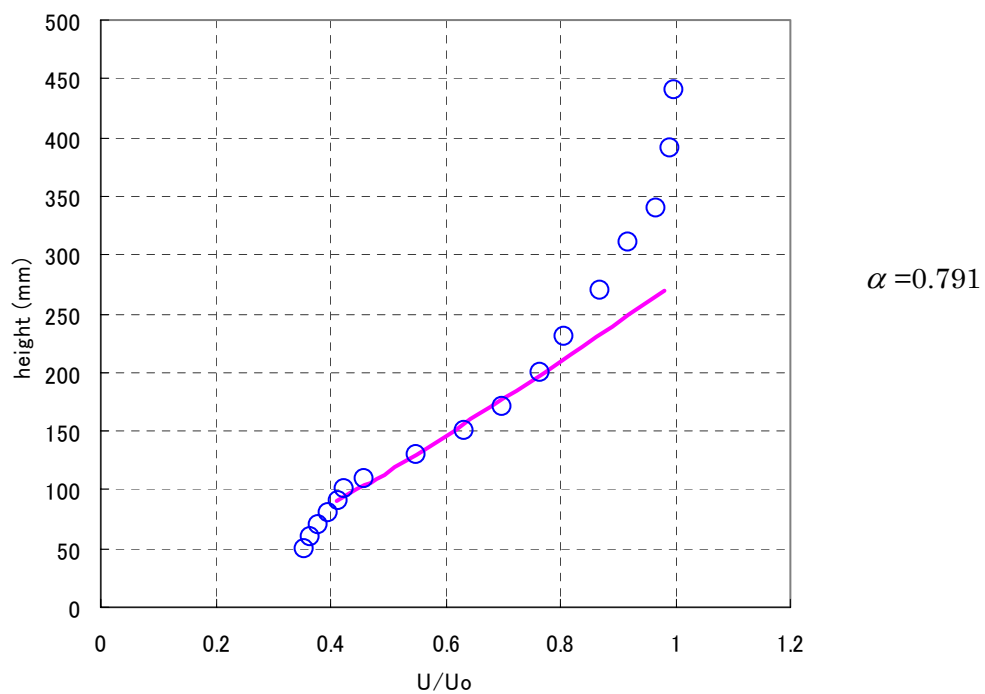


図 3.71 case25010 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 54.4\text{mm}$, $\sigma_h = 39.2\text{mm}$)

次に、以上の結果をまとめ、考察を行う。図 3.72～図 3.74 に高さの平均値 h_{am} とべき指数 α の関係、また図 3.75～図 3.77 に高さの標準偏差 σ_h とべき指数 α の関係を平面密度 R_m ごとに示す。

高さの平均値 h_{am} は、図 3.72、図 3.74 より平面密度 $R_m = 4\%$ および $R_m = 25\%$ ではべき指数 α と良い相関を見せることが分かり、高さの平均値をパラメータにべき指数を導くことが出来そうである。ここで、平面密度 $R_m = 4\%$ の場合は 25% の場合と比較するとその相関性は劣るということも出来るが、べき指数 α の値の分布自体が 0.3～0.4 の範囲内であるので、それほど問題ではないと評価できる。しかし、平面密度 $R_m = 12\%$ の場合には、傾向的にべき指数 α は高さの平均値に対して増加すると言うことが出来るが、べき指数 α の決定に高さの平均値が主要なパラメータになっているとは言い難い。

高さの標準偏差 σ_h は、高さの平均値の場合とはまた別の傾向を見せ、平面密度 $R_m = 12\%$ および 25% の場合において指数近似によりべき指数 α と良い相関性を示すことが分かった（図 3.76、図 3.77）。しかし、平面密度 $R_m = 4\%$ の場合には、べき指数 α と高さの標準偏差 σ_h の相関性をグラフより読み取ることは出来ない。

また、高さの平均値 h_{am} および高さの標準偏差 σ_h に対するべき指数 α を平面密度間で比較すると（図 3.78、図 3.79）、平面密度が大きくなるにつれてべき指数 α も大きくなることが分かる。図 3.73 では評価することの出来なかった平面密度 $R_m = 12\%$ の場合の高さの平均値 h_{am} に対するべき指数 α の値も、図 3.78 よりその分布が平面密度 $R_m = 4\%$ と 12% の値の分布の間に納まることが分かる。

以上の考察は、(1) での粗度長 z_0 に対する評価と一致している。それぞれ同じ風速のプロファイルに対しての鉛直分布係数なので、これは当然の結果であるが、対数則およびべき指数則の両方について適切な評価を行うことが出来たということを表している。

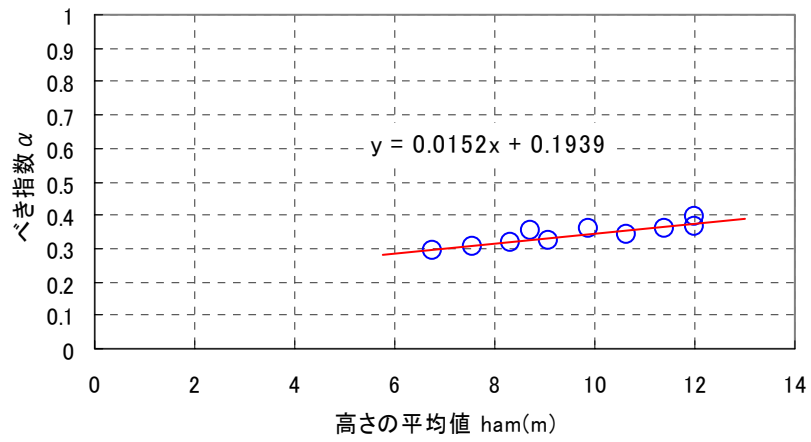


図 3.72 高さの平均値 h_{am} とべき指数 α の関係 (平面密度 $R_m = 4\%$)

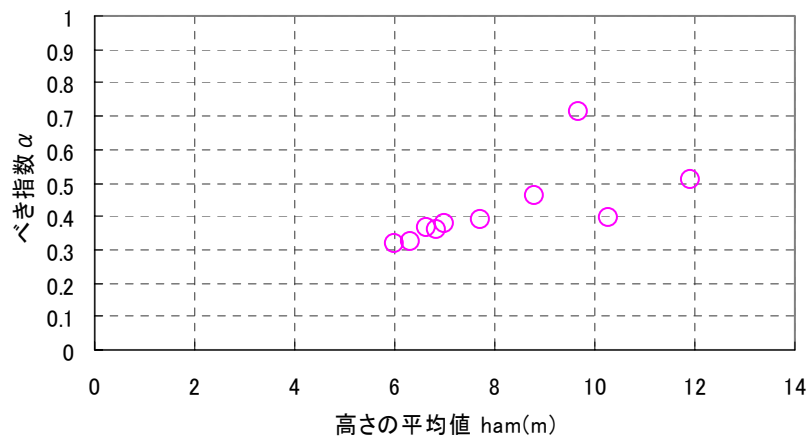


図 3.73 高さの平均値 h_{am} とべき指数 α の関係 (平面密度 $R_m = 12\%$)

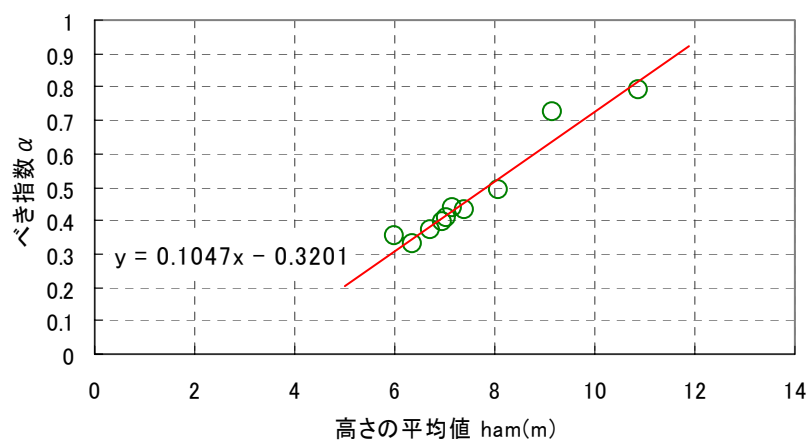


図 3.74 高さの平均値 h_{am} とべき指数 α の関係 (平面密度 $R_m = 25\%$)

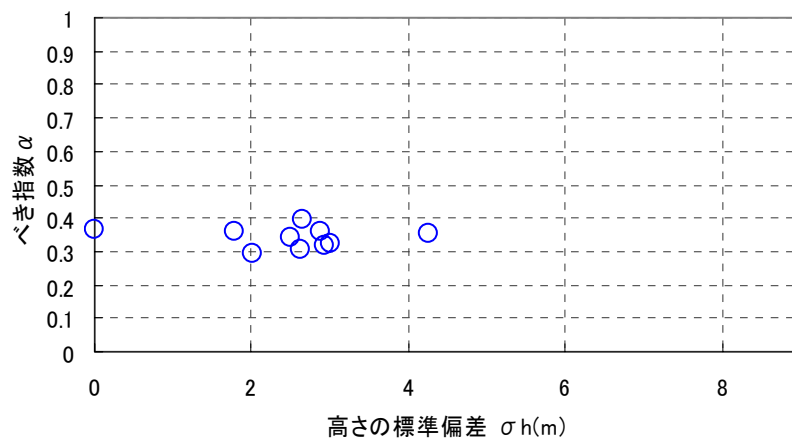


図 3.75 高さの標準偏差 σ_h とべき指数 α の関係 (平面密度 $R_m = 4\%$)

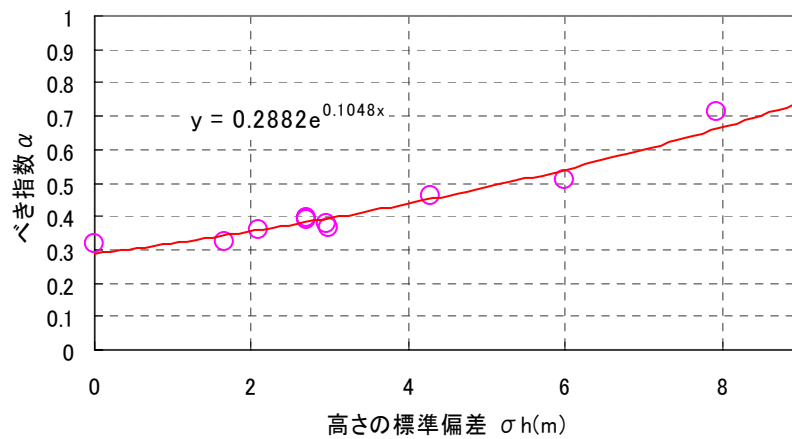


図 3.76 高さの標準偏差 σ_h とべき指数 α の関係 (平面密度 $R_m = 12\%$)

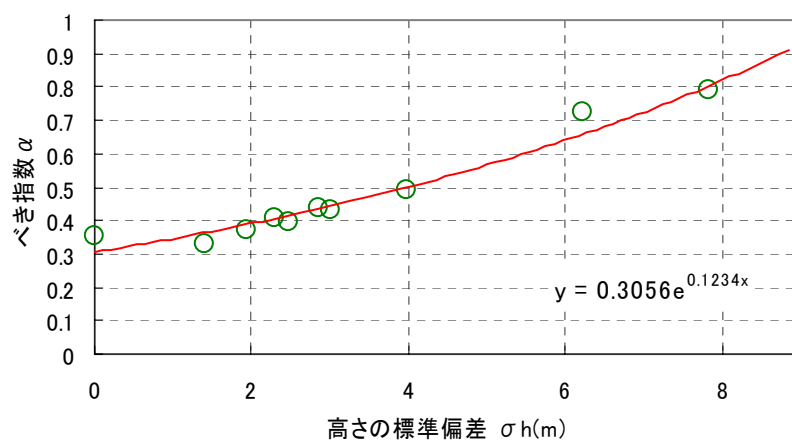


図 3.77 高さの標準偏差 σ_h とべき指数 α の関係 (平面密度 $R_m = 25\%$)

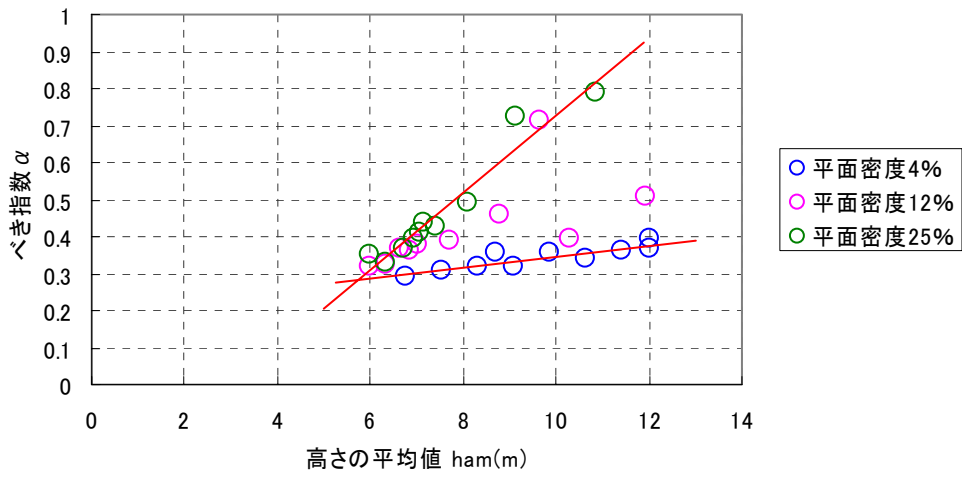


図 3.78 高さの平均値 h_{am} とべき指数 α の関係

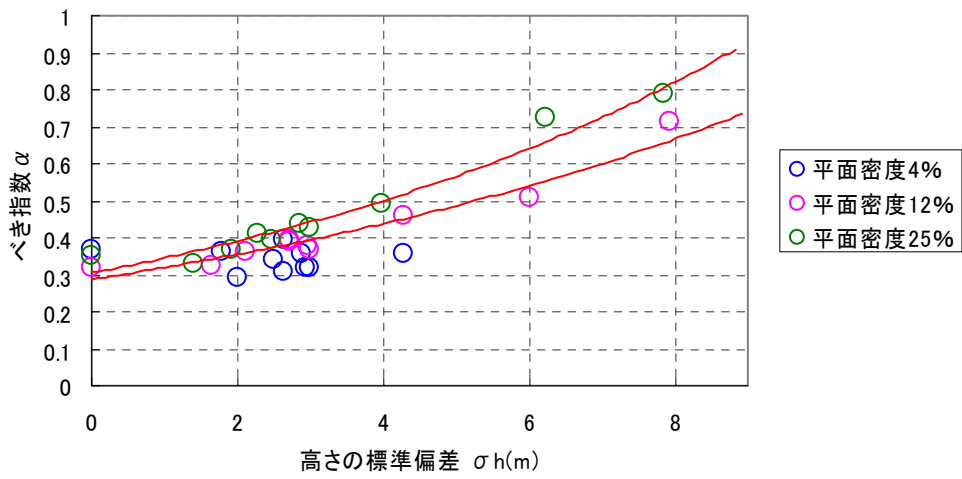


図 3.79 高さの標準偏差 σ_h とべき指数 α の関係

3. 5 まとめ

本章では、強風時平均風速の鉛直分布について、既往のモデルおよび研究に関してのまとめを行い、理論的な結びつきとその推定の現状を明らかにした後に、本実験より得られた高さ方向の変化を与えた粗度形状に対する平均風速鉛直分布の鉛直分布係数を、粗度長 z_0 およびべき指数 α のそれぞれについて算出し、粗度パラメータとの対応関係の評価を行った。

鉛直分布係数である粗度長 z_0 およびべき指数 α は、高さの平均値 h_{am} および高さの標準偏差 σ_h に対して平面密度ごとに全く同様の傾向見せることを結果として得た。これはそれぞれ同じ風速のプロファイルに対しての鉛直分布係数なので当然の結果ではあるが、不確定性が問題となる対数則およびべき指数則の両方について、適切な評価を行うことが出来たということを表している。そして、それらの傾向は、2章で明らかにされた抗力係数の示す傾向とも等しいことが分かった。

これにより、本研究における粗度パラメータと平均風速鉛直分布の鉛直分布係数の対応関係が明らかにされた。

次章では、2章で扱った床面抗力と本章で得られた鉛直分布係数の関係についての評価を行う。

■参考文献

- 崔恒 : 「風荷重評価のための平均風速と乱れの強さの鉛直分布特性」
 神田順 日本風工学会誌 第 45 号 23-43 (1990)
 孟岩 : 「中立時の大気境界層における強風の鉛直分布特性」
 松井正宏 その 1 非台風時の強風 日本風工学会誌 第 65 号 1-15 (1995)
 日比一喜
 孟岩 : 「中立時の大気境界層における強風の鉛直分布特性」
 松井正宏 その 2 台風時の強風 日本風工学会誌 第 66 号 3-14 (1996)
 日比一喜
 田村幸雄 : 「地表面粗度の永年変化の簡単な推定方法について」
 西村恵子 日本風工学会誌 第 51 号 107-111 (1992)
 日本建築学会 : 「建築物荷重指針・同解説 2004 年改訂版」 (2004)
 田村幸雄 : 「設計基準風速についての一考察 建物密度の経年変化を考慮した年最大風速の均質化」 日本建築学会構造系論文集 第 400 号 101-111
 須田健一 (1989)
 松井源吾
 大熊武司 : 「建築物の耐風設計」 鹿島出版会 (1996)
 神田順
 田村幸雄
 安岡善文 : 「リモートセンシング技術の新たな展開」 土木学会誌 89(1) 6-7
 (2004)
 日野幹雄 : 「流体力学」
 Raupach, M.R. : “Rough-Wall Turbulent Boundary Layers” , *Applied Mechanics*
 Antonia, R.A. *Reviews*, Vol.44, No.1, 1-25 (1991)
 Rajagopalan, S
 Counihan, J : “Adiabatic Atmospheric Boundary Layers : A Review and Analysis
 of Data from The Period 180-1972” , *Atmospheric Environment*,
 Vol.9, 871-905 (1975)
 Ishizaki, I : “Storm Frequency and Wind Load Problems” , *Proceedings of 3rd*
ICWE, 539-548 (1971)
 Engineering Science Data Unit (ESDU)
 : “Strong winds in the atmospheric boundary layer
 Part1:mean-hourly wind speeds” , ESDU82026, 6-7 (1982)

- Counihan, J : “Wind tunnel determination of the roughness length as a function of the fetch and the roughness density of three-dimensional roughness elements” , *Atmospheric Environment*, Vol.9, 871-905 (1972)
- Lettau, H : “Note on aerodynamic roughness-parameter estimation on the basis of roughness-element description” , *Journal of Applied Meteorology*, vol.8, pp828-832 (1967)
- Peterson, L : “A wind tunnel evaluation of methods for estimating surface roughness length at industrial facilities” , *Atmospheric Environment*, vol.31, 1997, pp45-57 (1997)
- Y.Jia : “Effects of surface roughness element spacing on boundary-layer velocity profile parameters” , *Journal of W.E.I.A*, vol.73, 1998, pp215-230 (1998)
- Macdonald : “An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays” , *Atmospheric Environment*, vol.32, No.11, 1998 pp1857-1864 (1998)

■ ■ 4. レイノルズ応力

4. 1 はじめに

本章では、本研究の実験で測定した床面に発生する抗力と平均風速鉛直分布を結びつけるものとして、レイノルズ応力を扱う。ここではまず始めに、このレイノルズ応力と抗力の関係について示す。

2. 3 (3) にて求めた抗力は、空気との摩擦力によって上層と力を交換し、レイノルズ応力と以下の式により釣り合うとされている。また、抗力とレイノルズ応力および風速の対応関係を図 4.1 に示す。

$$\tau = -\overline{\rho u' w'} \quad (4.1)$$

$$\tau_w = \tau \quad (4.2)$$

$$C_D = \frac{\tau_w}{Q_0} \quad (4.3)$$

ここで、

τ : レイノルズ応力

τ_w : 床面に加わるせん断力

u' : x 方向の風速変動成分

w' : z 方向の風速変動成分

ρ : 空気密度

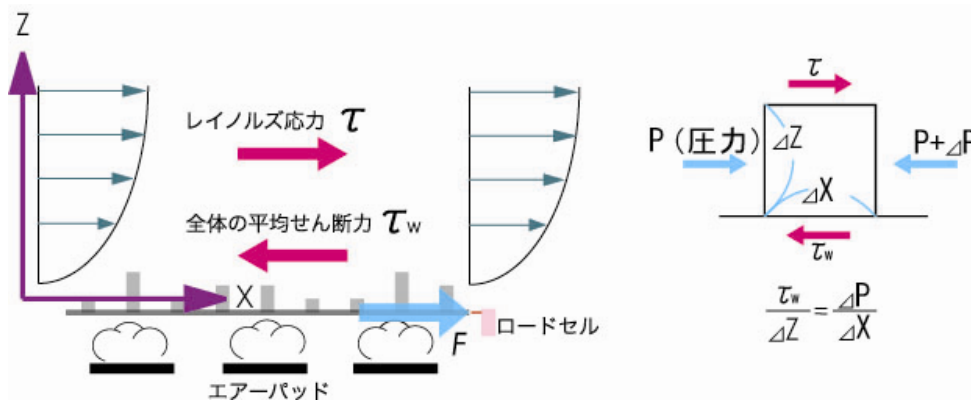


図 4.1 抗力・レイノルズ応力・風速の対応関係

本研究の実験では、X型熱線プローブを用いたことでX方向とZ方向の2次元の風速データが測定されている。これにより、各方向の風速変動成分 u' , w' を求め、レイノルズ応力の評価を4. 3節で行う。

4. 2 抗力係数と平均風速鉛直分布の関係

抗力係数と地表面と自然風の間を生じるせん断力、ならびに摩擦速度 u_* 、レイノルズ応力 τ は、以下のような関係式で結ばれている（式（4.4）～式（4.6））。

これらの式は定義であり、確定的な要素である。

- ・ 抗力係数とせん断力の関係

$$\tau_0 = C_D \cdot \left(\frac{1}{2} \rho \cdot U_0^2 \right) \quad (4.4)$$

- ・ せん断力と摩擦速度 u_* の関係

$$u_* = \left(\frac{\tau_0}{\rho} \right)^{0.5} \quad (4.5)$$

- ・ 摩擦速度とレイノルズ応力 $\tau = -\rho \overline{u'w'}$ の関係

$$\sqrt{-\overline{u'w'}} = u_* \quad (4.6)$$

そこで、ここではこれらの抗力と、平均風速鉛直分布の分布係数である粗度長 z_0 としてべき指数 α とを理論的に結びつけることを目的とする。そのために、前述の対数則とべき指数則を改めて以下に再掲する（式（4.7）、式（4.8））。この両者も定義ではあるが、その適応範囲・近似精度の問題を内包する式である。

- ・ 対数則

$$U(z) = \frac{1}{k} u_* \log \frac{z}{z_0} \quad (4.7)$$

- ・ べき指数則

$$\frac{U(z)}{U_G} = \left(\frac{z}{z_G} \right)^\alpha \quad (4.8)$$

まず、抗力係数 C_D と粗度長 z_0 とを結びつけることを考える。

式（4.4）、（4.5）より、摩擦速度 u_* は抗力係数 C_D を用いて以下のように表される。

$$u_* = U_G \sqrt{\frac{C_D}{2}} \quad (4.9)$$

これを、式（4.7）の対数則に代入すると、

$$\frac{U(z)}{U_G} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{C_D}{2}} \cdot \log \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (4.10)$$

3. 1 (1) にて前述した、崔・神田 (1990) が提案している粗度長 z_0 とべき指数 α を結びつける以下の式

$$\alpha = \left\{ \log \frac{50}{z_0} \right\}^{-1} z_0 [m] \quad (4.11)$$

ここではこの式を採用し、以下の形に変形する。

$$\frac{1}{\alpha} = \left[\log \left(\frac{z}{z_0} \right) + \log \left(\frac{50}{z} \right) \right] \quad (4.12)$$

式 (4.10) に式 (4.12) およびべき指数則 (式 (4.8)) を代入すると、

$$\begin{aligned} \left(\frac{z}{z_G} \right)^\alpha &= \frac{1}{k} \sqrt{\frac{C_D}{2}} \cdot \left[\frac{1}{\alpha} - \log \left(\frac{50}{z} \right) \right] \\ \frac{1}{\alpha} &= k \left(\frac{z}{z_G} \right)^\alpha \sqrt{\frac{2}{C_D}} + \log \left(\frac{50}{z} \right) \end{aligned} \quad (4.13)$$

ここで、任意高さ z は対数則およびべき指数則の両者をみたす範囲内である必要がある。

本実験においては、3. 4 節にて示した風速のプロファイルより、 $z = z_G$ と置き換えることが可能であると判断される。これにより、本研究において式 (4.13) は次のように書き換えることができ、べき指数 α と抗力係数 C_D の関係式が導ける。

$$\frac{1}{\alpha} = k \sqrt{\frac{2}{C_D}} + \log \left(\frac{50}{z_G} \right) \quad (4.14)$$

またこの式 (4.14) に対して式 (4.11) をもう一度用いると、粗度長 z_0 は次のように表される。

$$z_0 = z_G \left\{ \exp \left(k \sqrt{\frac{2}{C_D}} \right) \right\}^{-1} \quad (4.15)$$

以上により、本研究において風速分布を表す代表パラメータであるべき指数 α および粗度長 z_0 を抗力係数 C_D により理論的には表すことができた。

ここで、式 (4.14) および式 (4.15) を用いて抗力係数 C_D より導いた鉛直分布係数と、3 章で風速のプロファイルから算出した鉛直分布係数の対応関係を明らかにし (図 4.2, 図 4.3)、理論的に導いた式 (4.14) および式 (4.15) の精度を評価する。

図 4.2 および図 4.3 より、上で導いたべき指数 α および粗度長 z_0 と抗力係数 C_D の関係式（式 (4.14), 式 (4.15)）は、実際の平均風速鉛直分布から算定した各鉛直分布係数と、3 種類の平面密度全てにおいて非常によく対応しており、なかなかの精度が保たれているといえる。

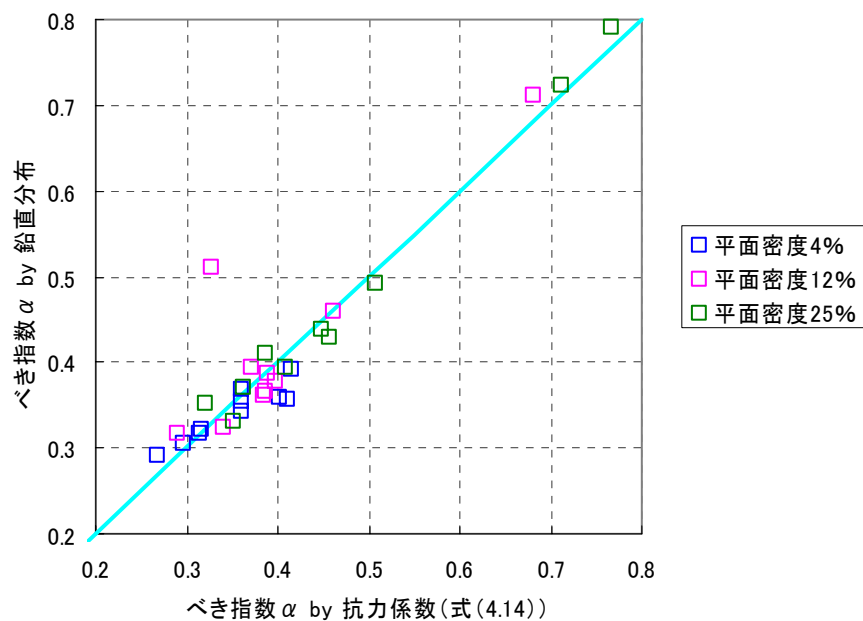


図 4.2 べき指数 α の算定結果と式(4.14)の対応

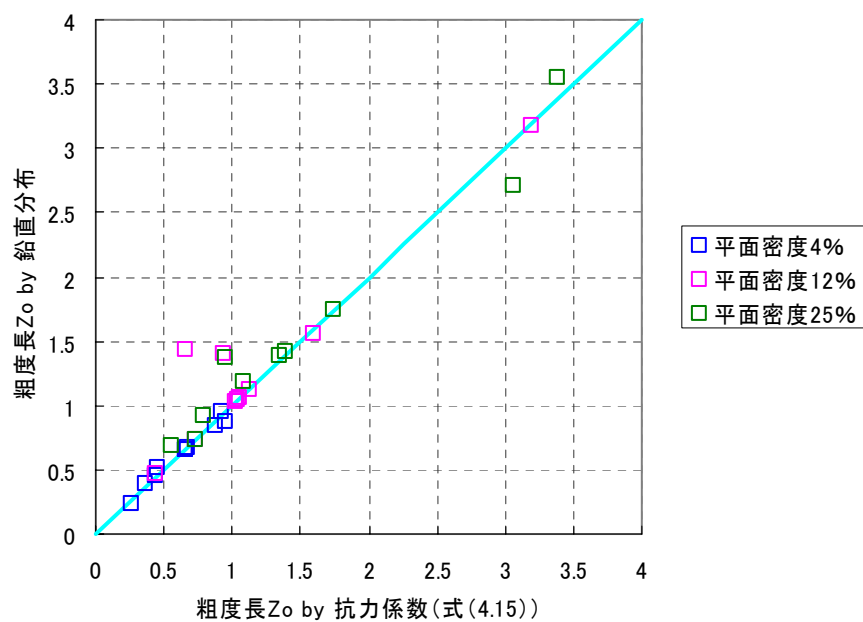


図 4.3 粗度長 z_0 の算定結果と式(4.15)の対応

4. 3 実験結果からのレイノルズ応力の評価

4. 2節では、べき指数則、対数則および崔・神田（1990）によって得られたべき指数 α と粗度長 z_0 の関係式、これらの理論的背景をもとにべき指数 α および粗度長 z_0 と抗力係数 C_D の関係式を導いた。そしてこの関係式の精度も確認され、床荷面に加わるせん断力と平均風速鉛直分布とを結びつけることが出来た。本節では、本実験より得られたX方向（主流方向）とZ方向（鉛直方向）の2次元の風速データから得られるレイノルズ応力 τ の算定を行い、風速データから床面に加わるせん断力に対してまた別の視点からのアプローチを試みる。

レイノルズ応力 τ の算定を前述の式（4.1）の下で行う。

$$\tau = -\overline{\rho u' w'} \quad (4.1)$$

算定結果を図4.4～図4.33に示す。図には床面抗力との対応を示すために、抗力測定装置（load cell）にて測定された抗力、および前述の式（4.5）を変形することで得られる式（4.16）を用いて3.4（1）で求めた摩擦速度 u_* から得られる抗力の値を合わせてプロットする。これら2つの抗力のプロットに関しては、図の縦軸である高さ方向に分布しているという意味ではないことをここに注記する。また、レイノルズ応力の測定値は、分布が高さ方向に一定となっていると思われる領域の代表値より算定し、その値を図とともに記す。

$$\tau_0 = \rho \cdot u_*^2 \quad (4.16)$$

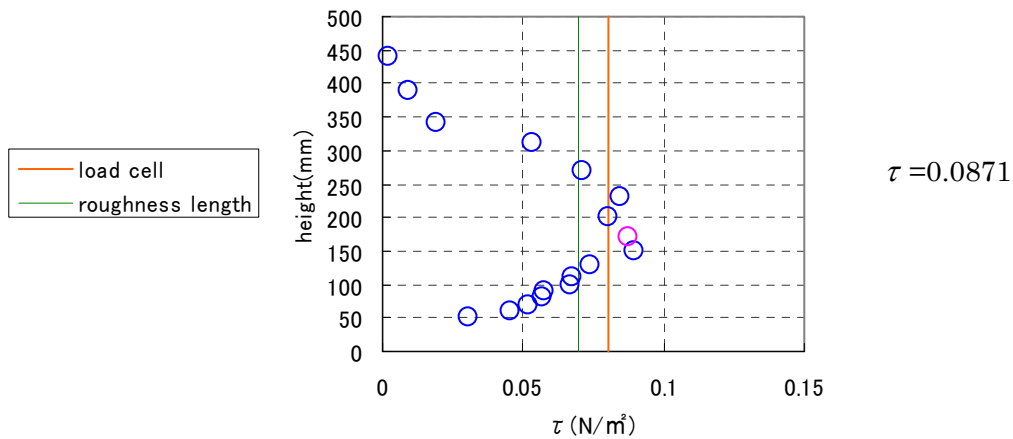


図 4.4 case04001 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 33.9\text{mm}$, $\sigma_h = 10.1\text{mm}$)

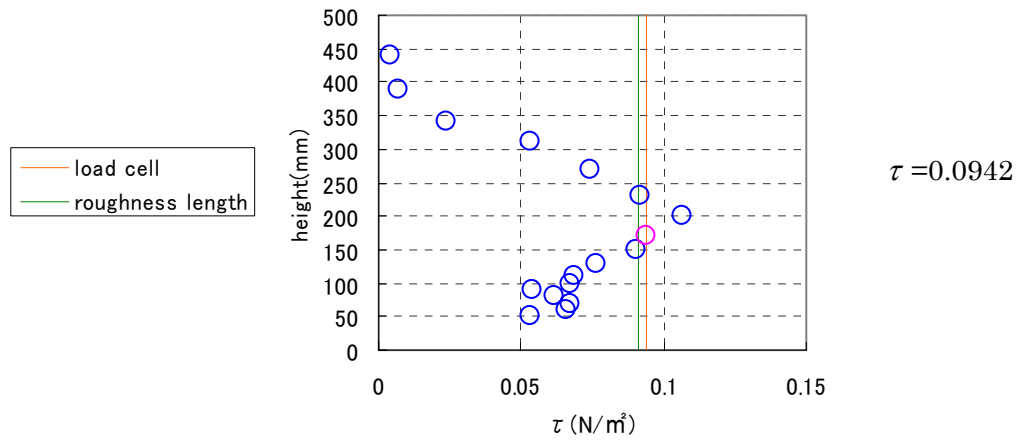


図 4.5 case04002 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 37.7\text{mm}$, $\sigma_h = 13.1\text{mm}$)

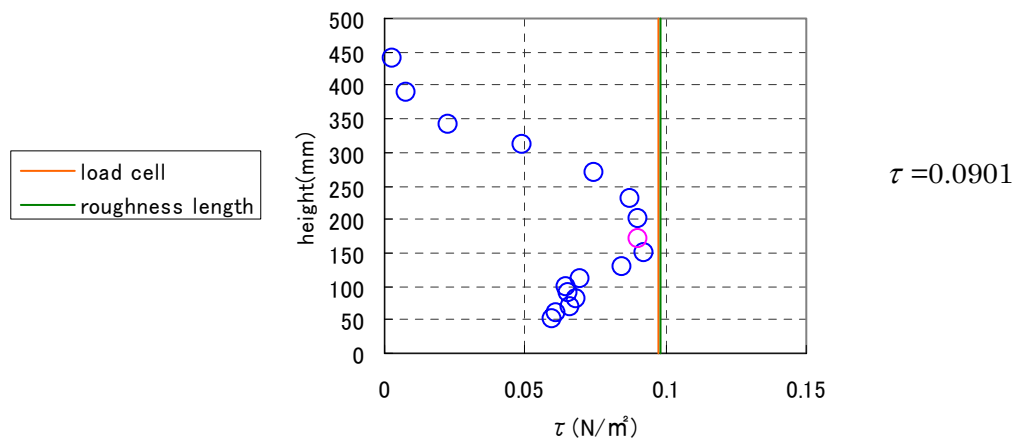


図 4.6 case04003 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 41.6\text{mm}$, $\sigma_h = 14.6\text{mm}$)

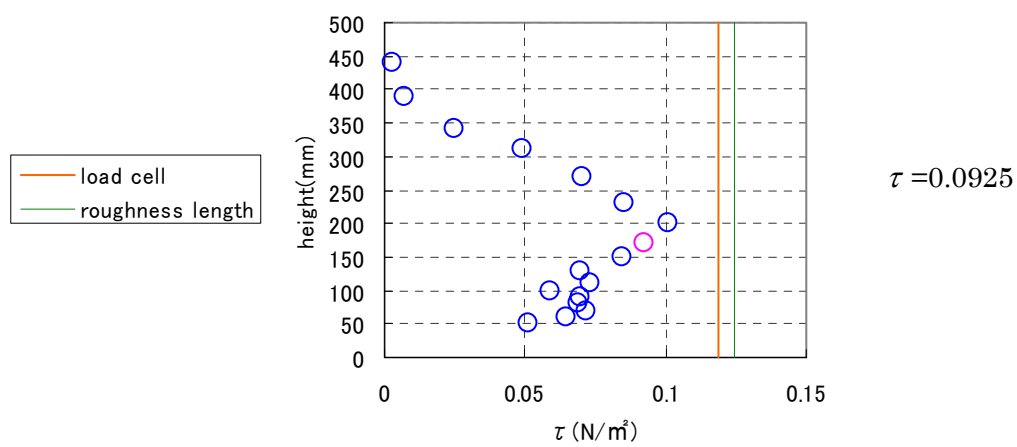


図 4.7 case04004 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 43.5\text{mm}$, $\sigma_h = 21.3\text{mm}$)

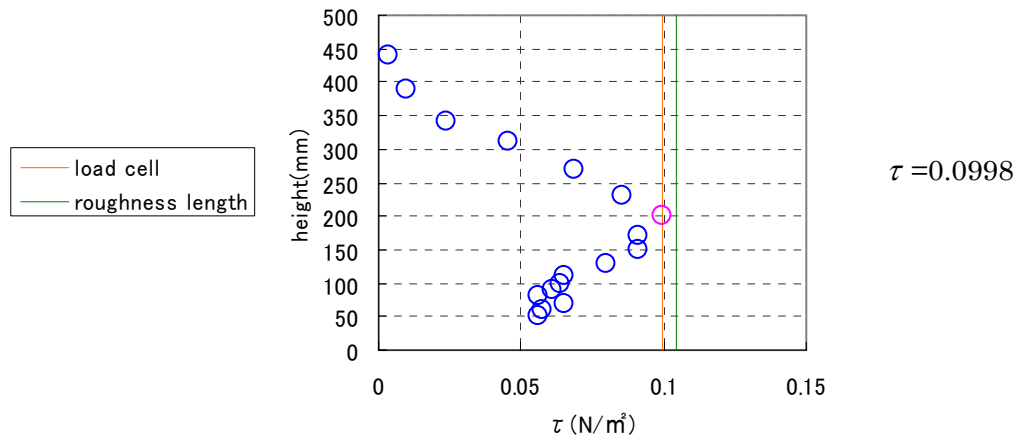


図 4.8 case04005 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 45.5\text{mm}$, $\sigma_h = 15.0\text{mm}$)

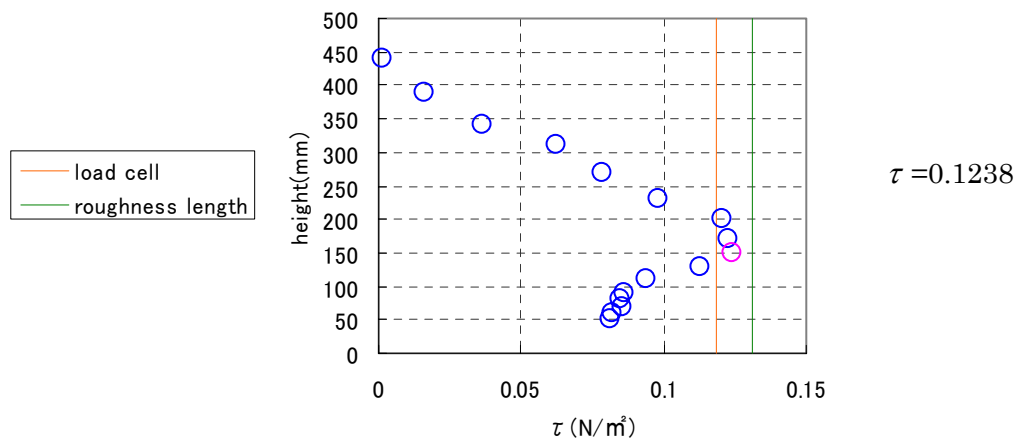


図 4.9 case04006 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 49.4\text{mm}$, $\sigma_h = 14.4\text{mm}$)

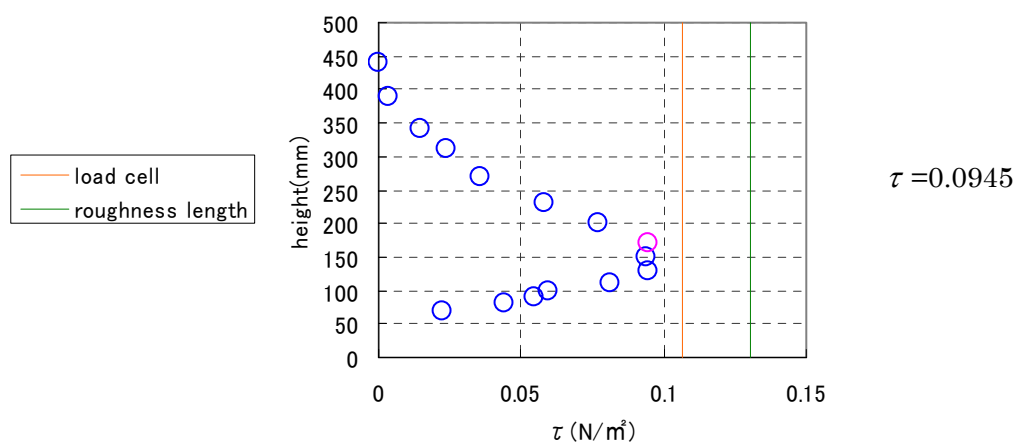


図 4.10 case04007 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 53.2\text{mm}$, $\sigma_h = 12.5\text{mm}$)

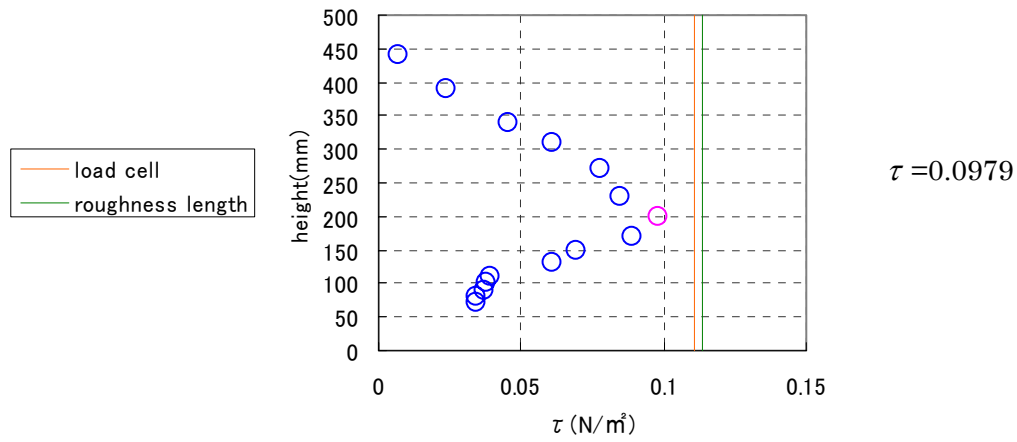


図 4.11 case04008 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 57.1\text{mm}$, $\sigma_h = 8.9\text{mm}$)

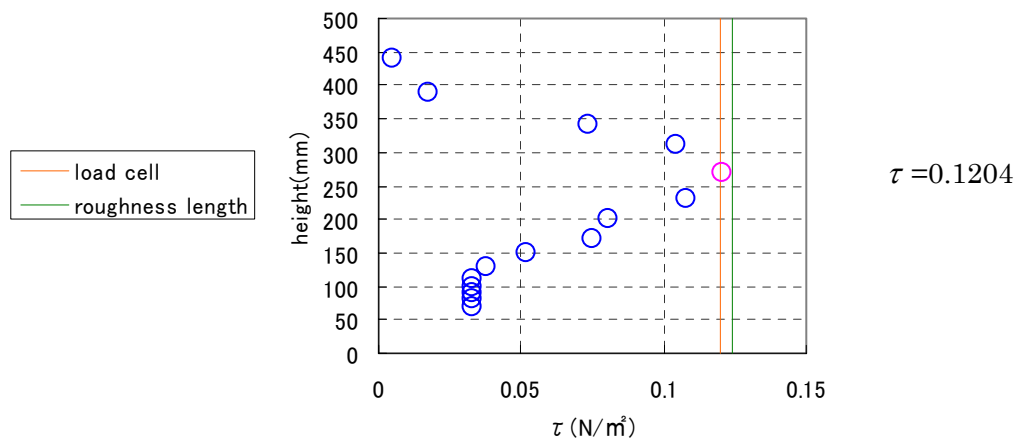


図 4.12 case04009 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 60.0\text{mm}$, $\sigma_h = 13.2\text{mm}$)

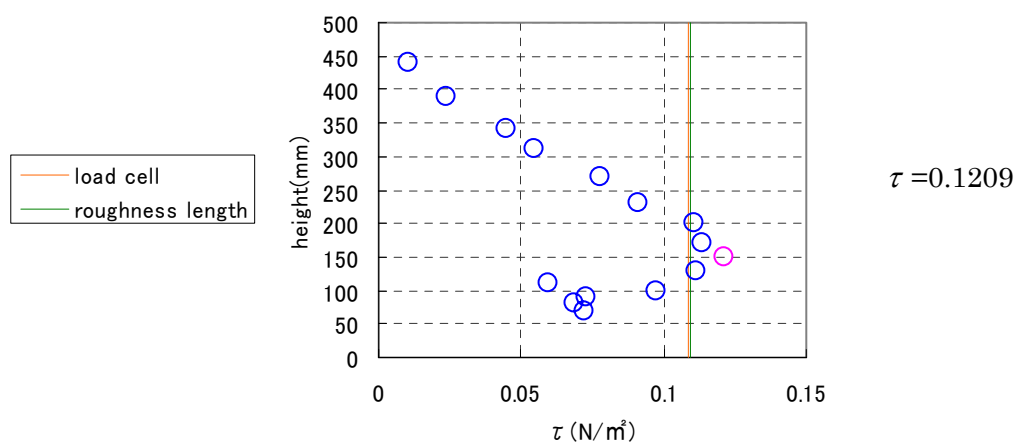


図 4.13 case04010 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 60.0\text{mm}$, $\sigma_h = 0.0\text{mm}$)

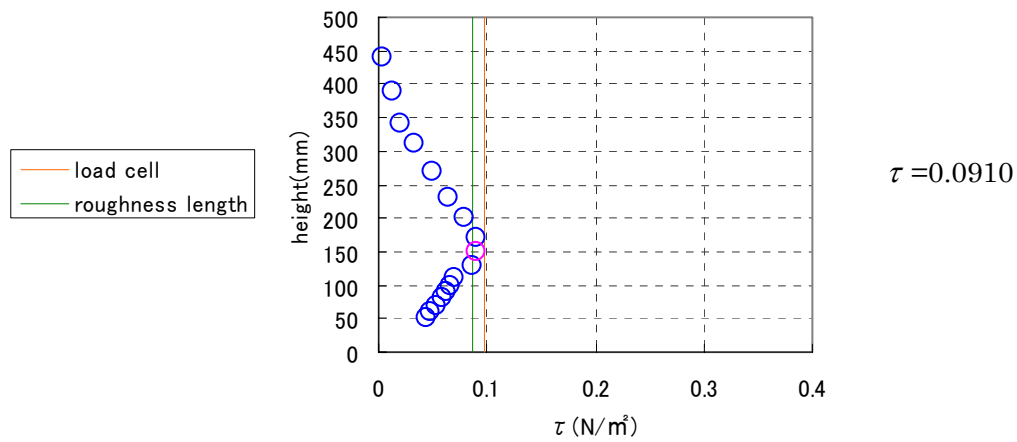


图 4.14 case12001 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 30.0\text{mm}$, $\sigma_h = 0.0\text{mm}$)

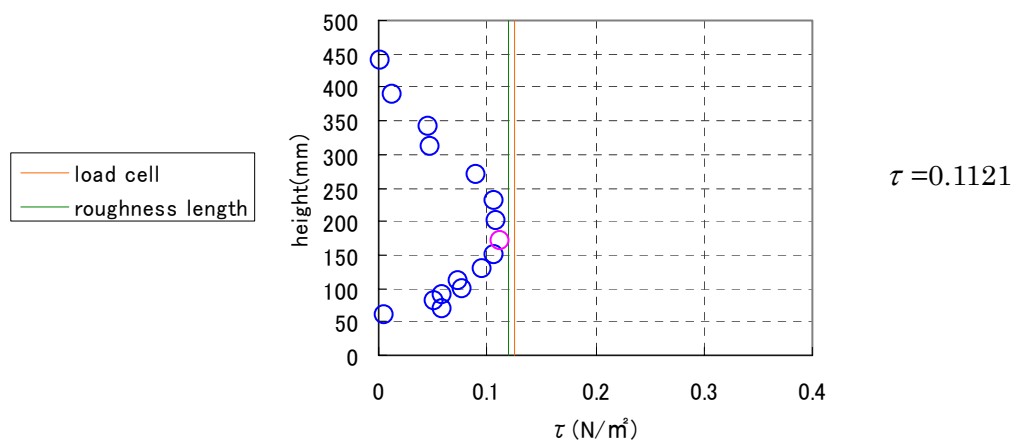


图 4.15 case12002 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 31.6\text{mm}$, $\sigma_h = 8.2\text{mm}$)

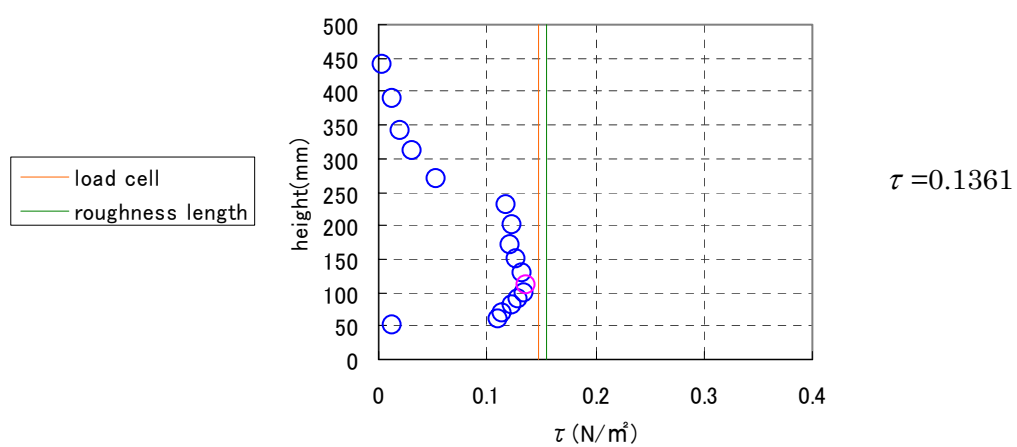


图 4.16 case12003 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 33.1\text{mm}$, $\sigma_h = 15.0\text{mm}$)

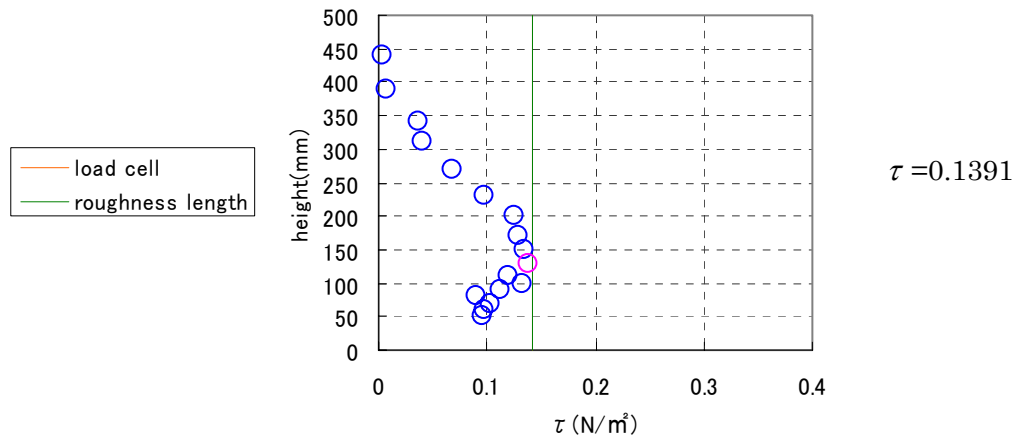


图 4.17 case12004 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 34.3\text{mm}$, $\sigma_h = 10.5\text{mm}$)

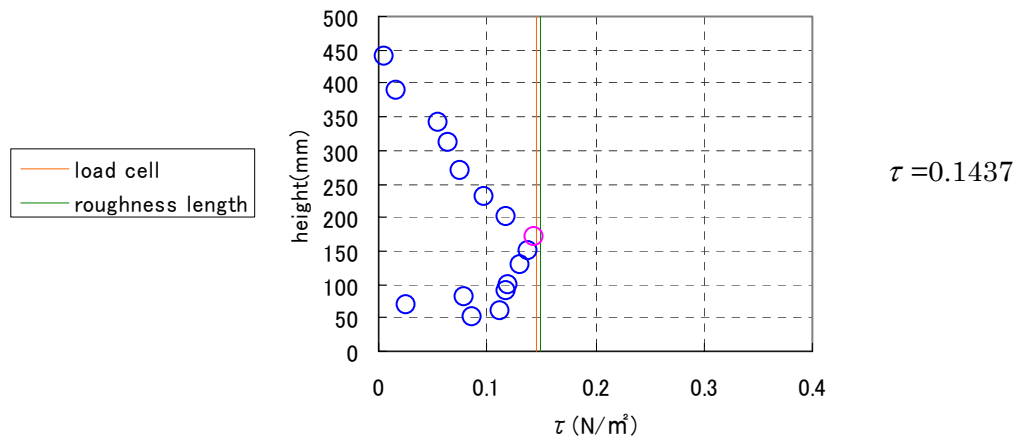


图 4.18 case12005 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 35.1\text{mm}$, $\sigma_h = 14.8\text{mm}$)

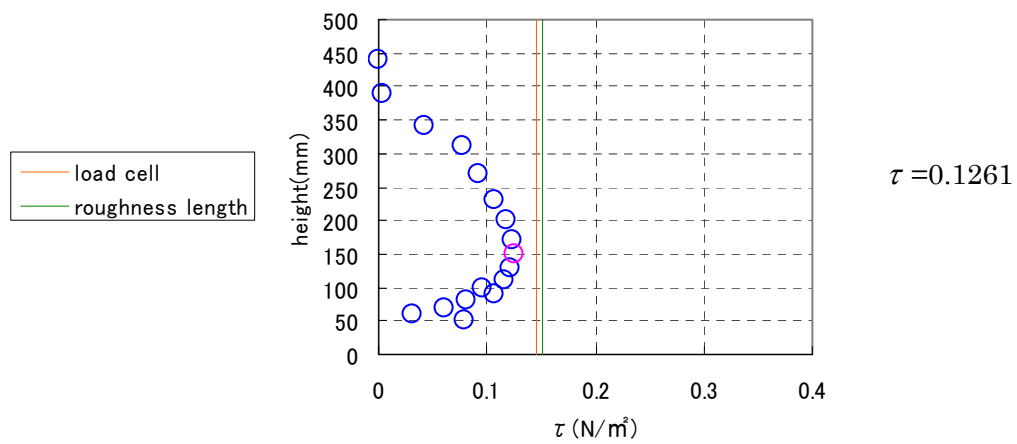


图 4.19 case12006 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 38.6\text{mm}$, $\sigma_h = 13.6\text{mm}$)

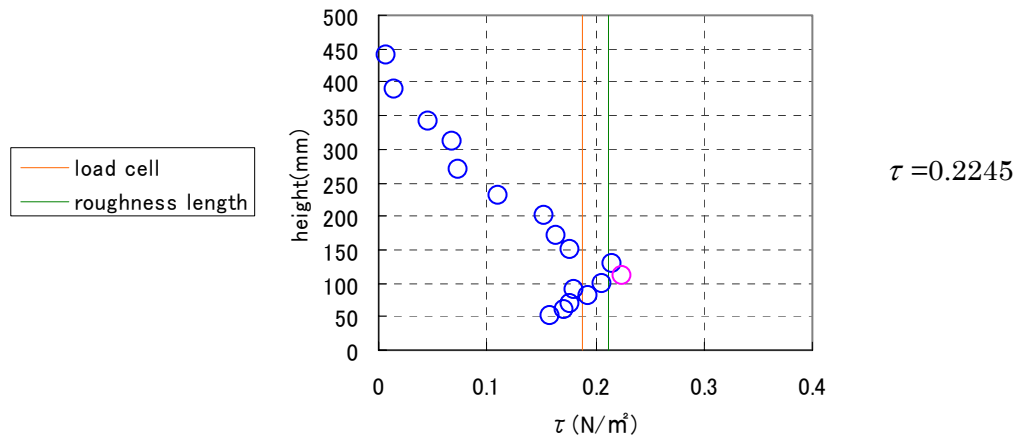


图 4.20 case12007 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 44.0\text{mm}$, $\sigma_h = 21.4\text{mm}$)

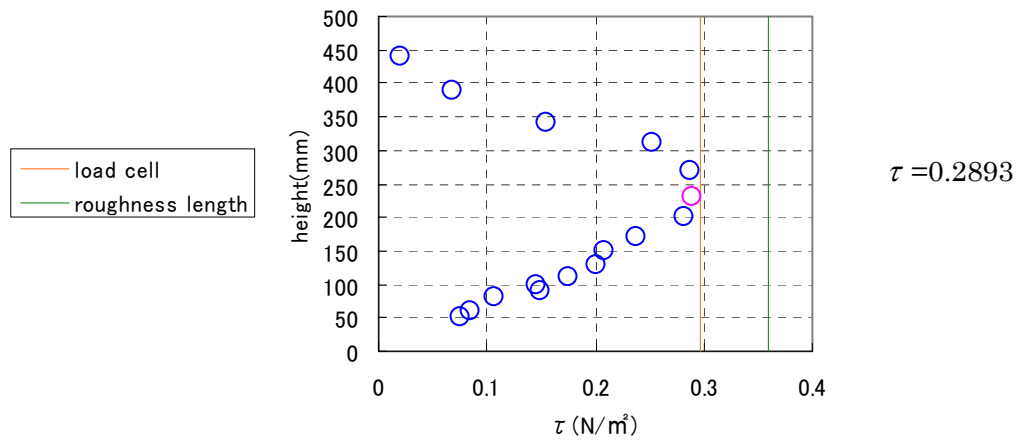


图 4.21 case12008 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 48.3\text{mm}$, $\sigma_h = 39.6\text{mm}$)

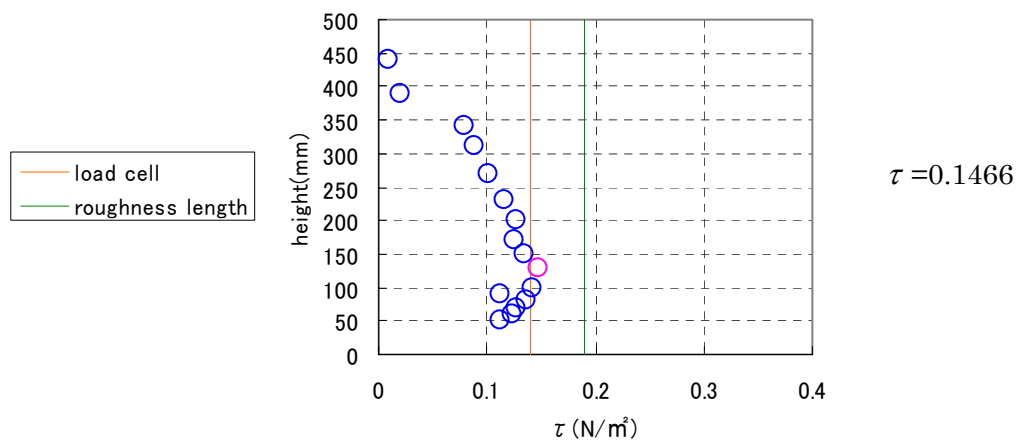


图 4.22 case12009 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 51.4\text{mm}$, $\sigma_h = 13.6\text{mm}$)

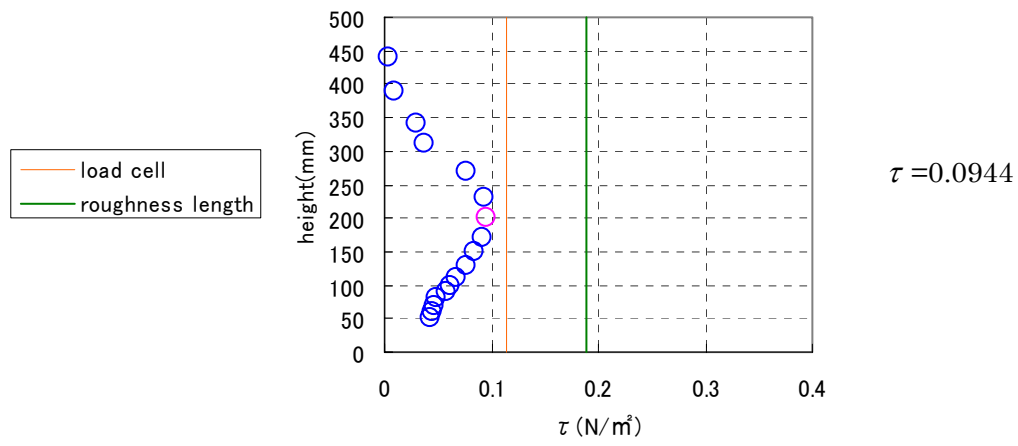


図 4.23 case12010 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 59.6\text{mm}$, $\sigma_h = 30.0\text{mm}$)

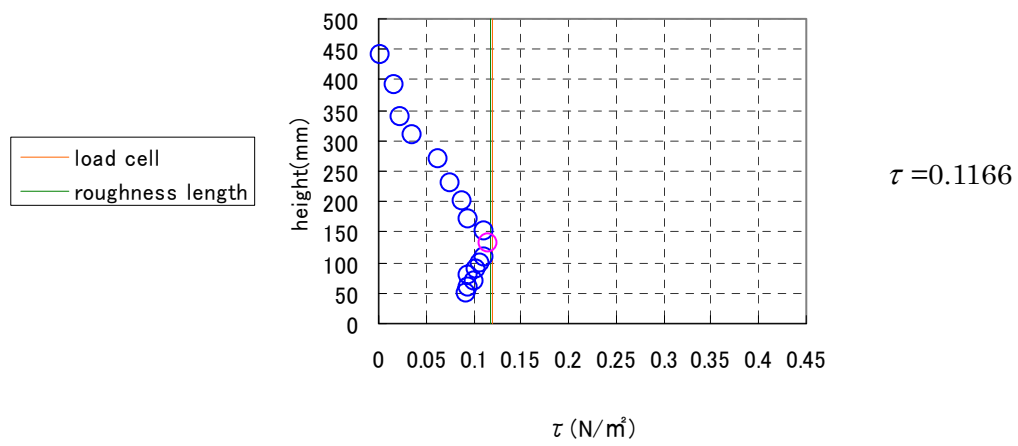


図 4.24 case25001 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 30.0\text{mm}$, $\sigma_h = 0.0\text{mm}$)

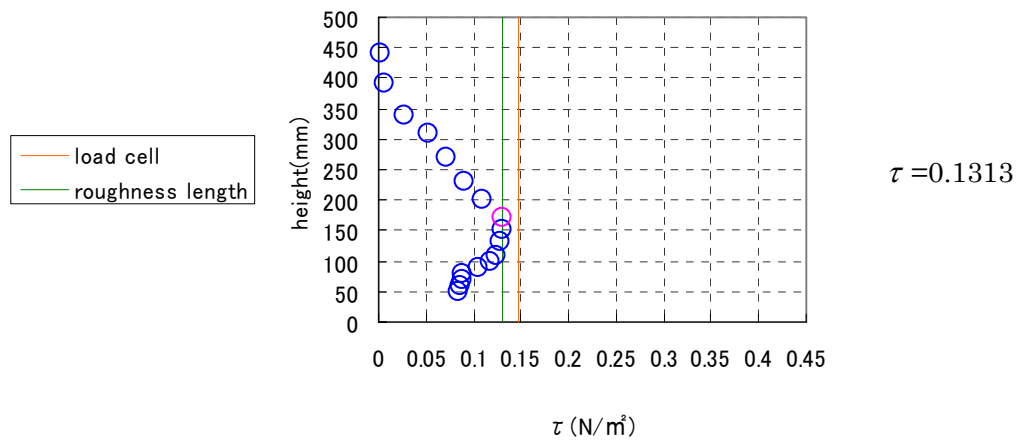


图 4.25 case25002 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 31.8\text{mm}$, $\sigma_h = 7.1\text{mm}$)

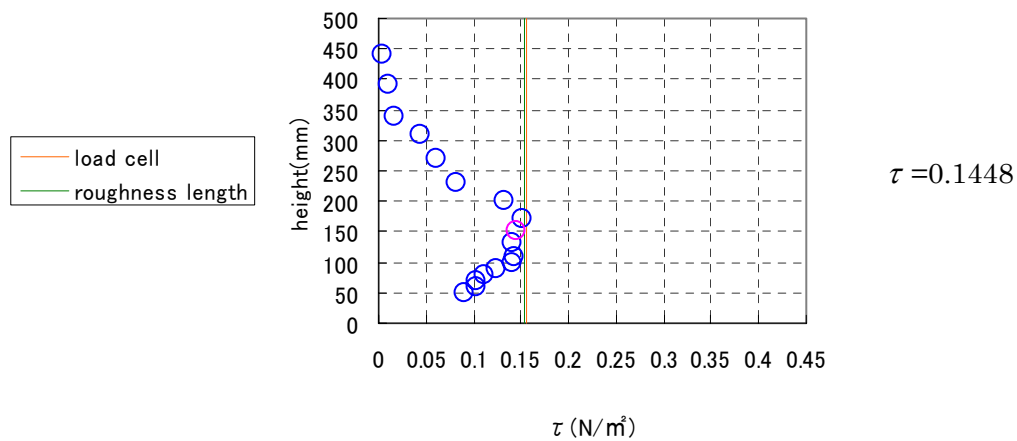


图 4.26 case25003 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 33.5\text{mm}$, $\sigma_h = 9.7\text{mm}$)

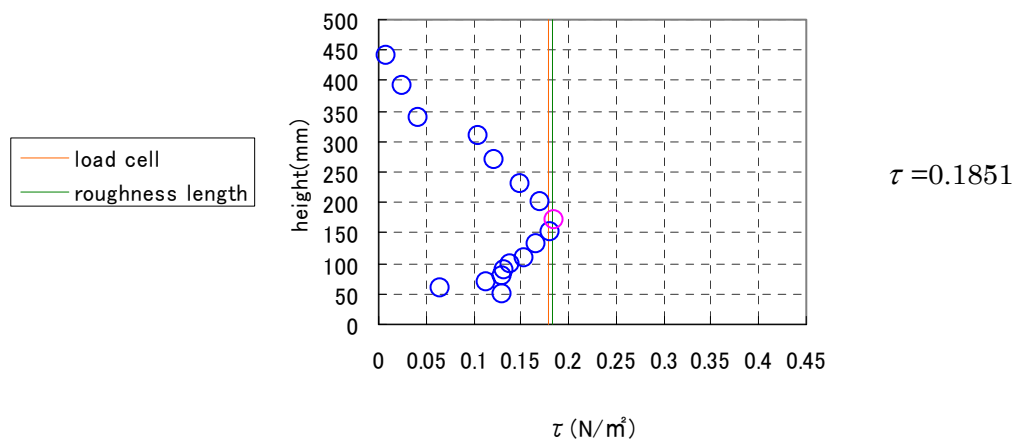


图 4.27 case25004 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 34.8\text{mm}$, $\sigma_h = 12.3\text{mm}$)

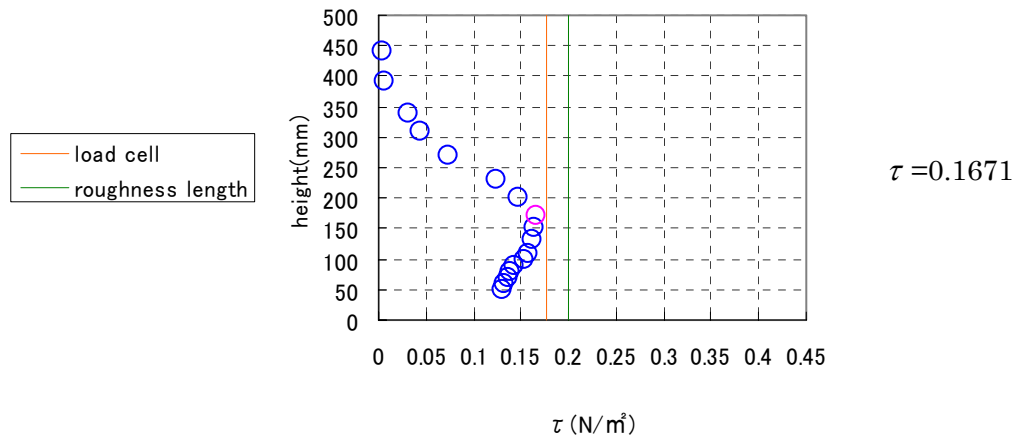


图 4.28 case25005 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 35.5\text{mm}$, $\sigma_h = 11.4\text{mm}$)

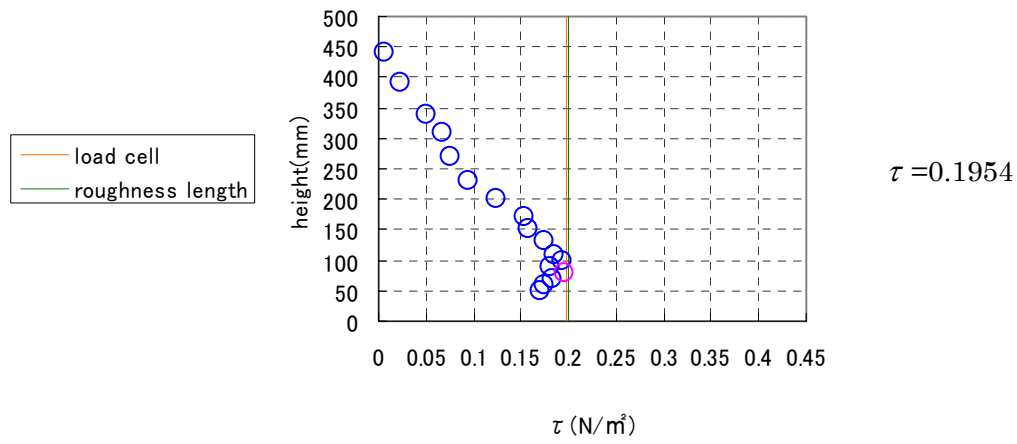


图 4.29 case25006 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 35.8\text{mm}$, $\sigma_h = 14.3\text{mm}$)

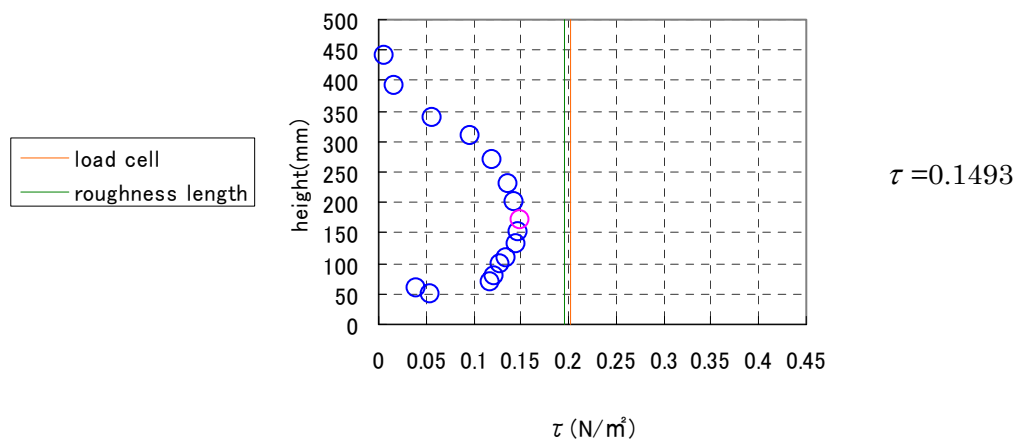


图 4.30 case25007 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 37.1\text{mm}$, $\sigma_h = 15.0\text{mm}$)

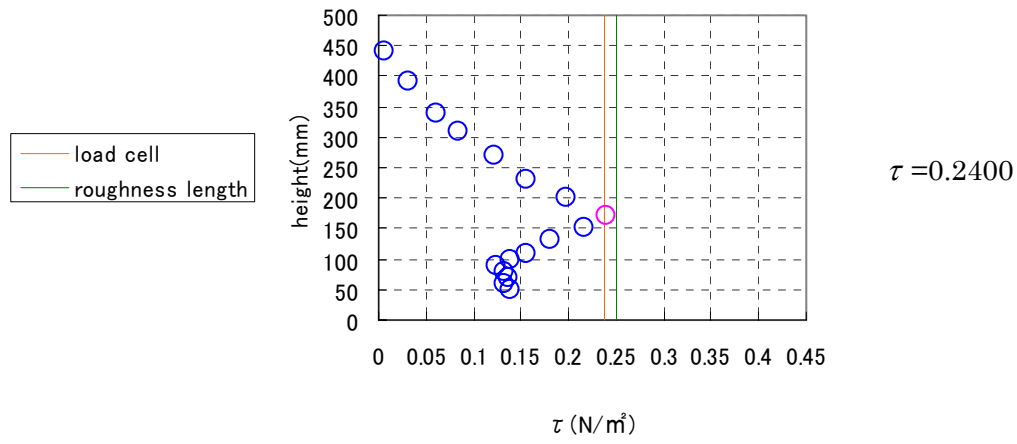


図 4.31 case25008 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 40.4\text{mm}$, $\sigma_h = 19.9\text{mm}$)

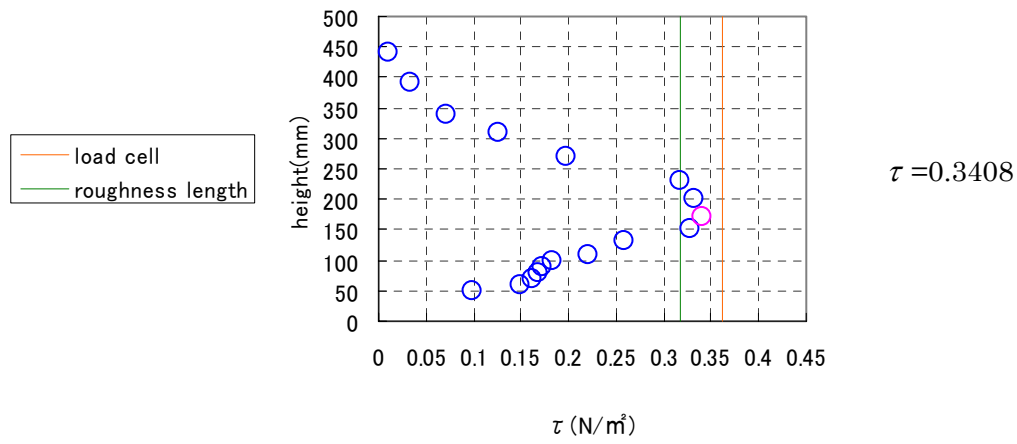


図 4.32 case25009 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 45.7\text{mm}$, $\sigma_h = 31.1\text{mm}$)

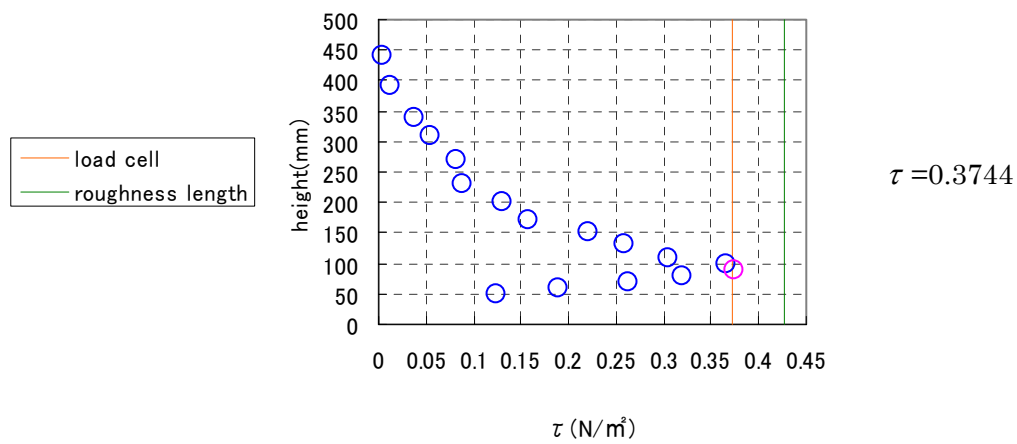


図 4.33 case25010 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 54.4\text{mm}$, $\sigma_h = 39.2\text{mm}$)

ここで、上で得られたレイノルズ応力の分布について考察するために、前述の式 (4.1) および式 (4.2) を再掲する。

$$\tau = -\overline{\rho u' w'} \quad (4.1)$$

$$\tau_0 = \rho \cdot u_*^2 \quad (4.16)$$

この2式より、摩擦速度 u_* とレイノルズ応力および地表面せん断応力 τ の間の関係を次のように示すことが出来る。

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \approx \sqrt{-\overline{u' w'}} \quad (4.17)$$

この式 (4.17) は、応力一定層 (stress constant layer) において摩擦速度は地表面せん断応力とレイノルズ応力のどちらからも評価できることを理論的には表している。しかし、この応力一定層について本実験の測定結果において確認できるのは図 4.4、図 4.6、図 4.9、図 4.10、図 4.14、図 4.21、図 4.25 および図 4.26 くらいであり、これらについてもその断定は難しい。その他の測定ケースのレイノルズ応力の分布では一定層は確認されず、あるピーク値をとった後に減少するという形状である (例えば図 4.33)。

以上より、地表面のように障害物の高さが一定ではなくランダムな場合には、レイノルズ応力が高さに対して一定となる応力一定層はほとんど存在しないと言うことができ、このため実際にはレイノルズ応力を用いて摩擦速度を評価することは難しいということが確認された。

しかし、上で述べたレイノルズ応力の分布がとるピークの値に着目すると、その値は抗力測定装置にて測定された抗力、および式 (4.16) を用いて摩擦速度 u_* から得られる抗力の値と良い対応を見せていると判断できる。各測定ケースにおけるこれら3種類の方法で求められた応力の対応を図 4.34 に示す。応力の絶対値について、本実験での3種類の平面密度間での比較では平面密度が大きくなるにつれて応力の絶対値も増加しているが、2章での考察 (p. 34) の通り平面密度がこれ以上に大きくなると応力は減少することが予想される。また、レイノルズ応力より求まる抗力係数と、抗力測定装置にて測定された抗力および摩擦速度から得られる抗力からの抗力係数の対応を、それぞれ図 4.35 および図 4.36 に示す。これよりレイノルズ応力の床面抗力に対する対応関係はある程度の精度を持っていることが分かる。そしてさらに、レイノルズ応力は抗力測定装置から評価する応力の方が比較的良好に対応すると言うことができる。したがって、本実験装置の整合性は確保されているといえることその他、やはり粗度長の評価にはその不確定性が問題として考えられるということができる。

以上より、前節 4.2 にて鉛直分布係数と結びつけることができた抗力係数に対し、2次元の風速データから求まるレイノルズ応力の結びつきも確認することができた。

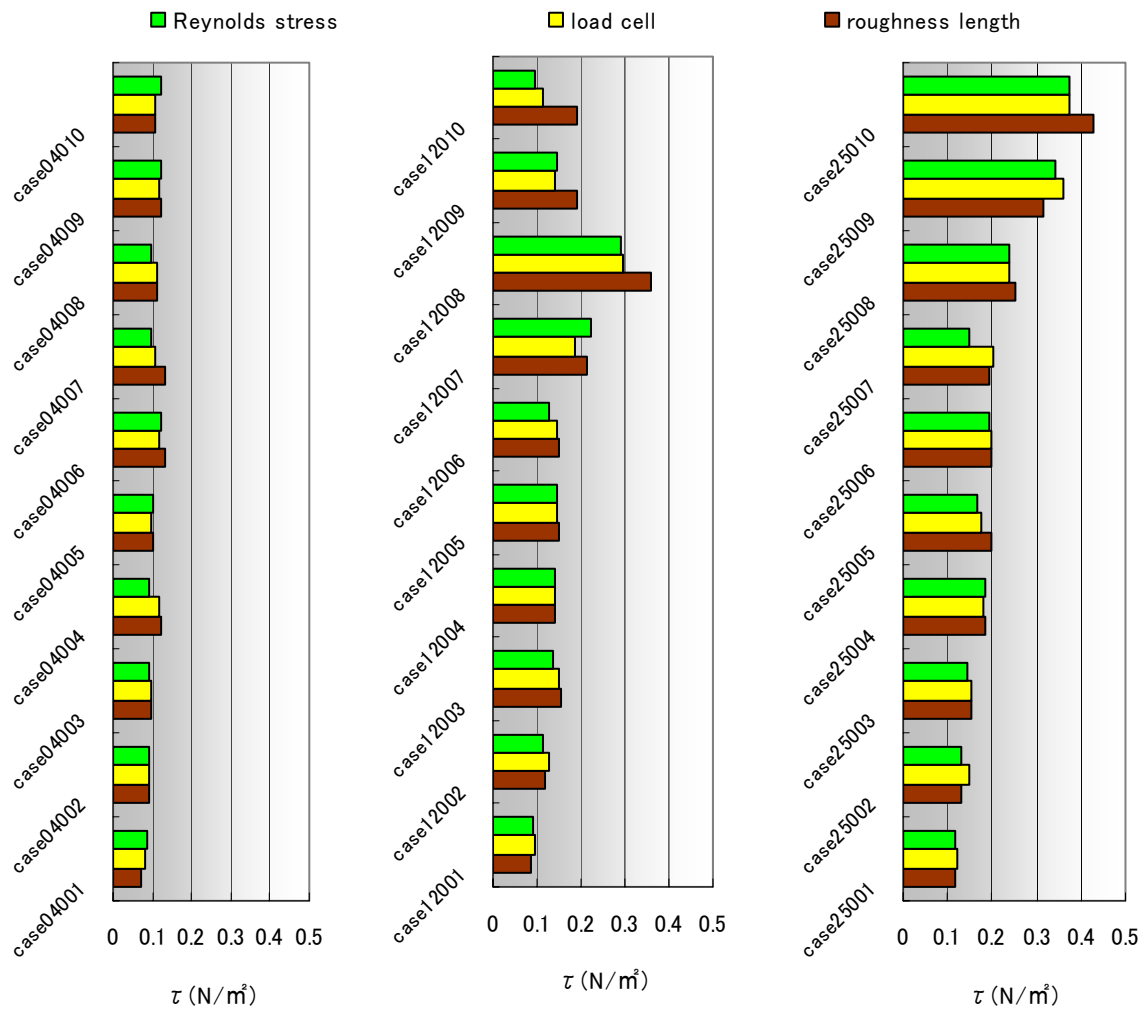


図 4.34 各測定ケースの応力の測定値

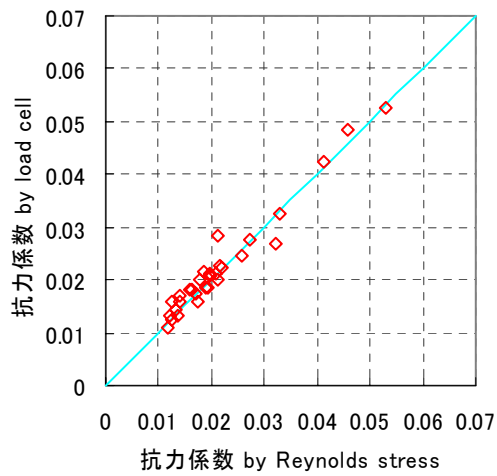


図 4.35 測定抗力とレイノルズ応力の対応

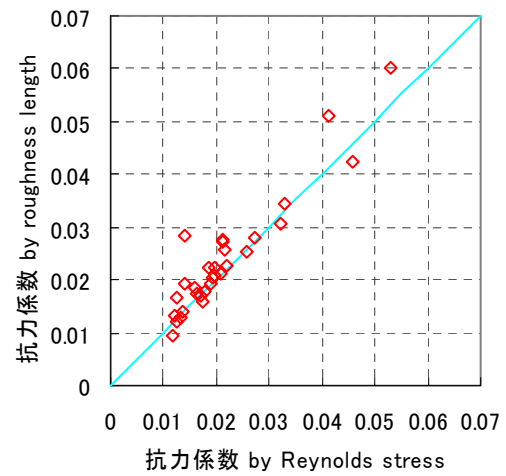


図 4.36 算出抗力とレイノルズ応力の対応

4. 4 まとめ

本章では、まず2章および3章において粗度パラメータとの相関関係が明らかになった、抗力係数と平均風速鉛直分布の鉛直分布係数とを理論的に結びつけることを試みた。そして、それより導かれたべき指数 α および粗度長 z_0 と抗力係数との関係式について、2章で得られた抗力係数と3章で得られた各鉛直分布係数との対応を評価し、得られた関係式の精度を確認することができた。これにより、本研究において抗力係数と鉛直分布係数とが結びついた。

さらに4. 2節では、本実験より得られたX方向（主流方向）とZ方向（鉛直方向）の2次元の風速データから得られるレイノルズ応力 τ の算定を行い、風速データから床面に加わるせん断力に対してまた別の視点からのアプローチを試みた。その結果、理論的に摩擦速度が地表面せん断応力とレイノルズ応力のどちらからも評価できるとされる応力一定層（stress constant layer）は、地表面のように障害物の高さが一定ではなくランダムな場合にはほとんどその存在が確認できないことが分かったが、しかしレイノルズ応力の分布がとるピークの値に着目すると、その値は抗力測定装置にて測定された抗力、および摩擦速度 u_* から算出して得られる抗力の値と良い対応を見せることが確認された。これにより、先に鉛直分布係数と結びついた抗力係数に関して、レイノルズ応力という物理的なパラメータの結びつきを示すことができた。

次章では、本研究で評価した平均風速鉛直分布について、特にべき指数分布での評価において重要となる内部境界層高さについての考察を行う。

■参考文献

- 崔恒 : 「風荷重評価のための平均風速と乱れの強さの鉛直分布特性」
神田順 日本風工学会誌 第 45 号 23-43 (1990)
菅野宏紀 : 「地理情報システムに基づく平均風速鉛直分布の評価」
2004 東京大学修士論文
- Ishizaki, I : “Storm Frequency and Wind Load Problems” , *Proceedings of 3rd ICWE*, 539-548 (1971)
- Choi, H : “Estimation of aerodynamic surface roughness based on drag force measurement” , *The Sixth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering (APCWE-VI)*, Seoul Korea, September 12-14, 2005
Kanda, J
Maruyama, T
Kanno, H pp564-585 (2005)

■ ■ 5. 内部境界層の発達

5. 1 はじめに

3章においても述べたが、本研究のように地表面の凹凸の特徴より風速の鉛直分布を予測しようとする場合、境界層の発達状況を把握することが重要である。境界層が発達するまでの距離は、例えば ESDO82026 (1982) によれば 100km、大熊ら (1996) によれば数 km 以上の吹走距離が必要とされている。よって本実験における風速の測定位置では、わが国で観測される市街地上空の風速分布と同様に、十分に境界層が発達していないことが予測される。このために、3. 4 (2) のべき指数 α の評価の際にもどの高さまでの平均風速について評価するかが問題であったことは前述の通りである。そこで本章では、平均風速鉛直分布を評価するうえで重要である、内部境界層の発達について扱う。

5. 2 境界層高さについて

設計風速を考えるにあたり、べき指数分布の場合には傾度風高さ z_G に関する検討も行う必要がある。これまで充分発達した風速分布の傾度風高さ z_G (または境界層高さ) に関してもいくつかの提案があり、それらは崔・神田 (1990) に詳しい。また、孟ら (1995、1996) は非台風時および台風時の大気境界層内の傾度風高さ z_G を与える統一的な式を提案している。

本研究では、図 3. 41 (p. 66) に示すような地表面の凹凸が急変した際に発達する内部境界層を考察の対象とする。内部境界層高さ z_I の定義には様々なものが存在する。理学的には内部境界層は以下に示す 2 つに区別することができる (例えば、Schmid & Oke 1990、Simiu & Scanlan 1996)。ただし、以下の呼称は必ずしも統一されているものではない。

- ・ 適合域 (adapted region) : 風下側地表面に相当する風速分布にほぼ適合する部分、つまり摩擦速度 u_* と粗度長 z_0 が一定の領域
- ・ 遷移域 (transition region) : 平衡層の上空部にあり、風上側と風下側両方の地表面の影響を受ける領域

以下では、適合域の高さを z_A 、遷移域の高さを z_T とする。文献によっては、適合域の高さを内部境界層高さであると定義する場合もある (例えば、Deaves 1981)。また遷移域の定義にも応力分布から定義するものと風速分布から定義するものとがあり、応力から定義するものとがあり、応力から定義するものの方が高めになる傾向があることが指摘されている (例えば、Shir 1972)。

これらの高さに関して既往の研究において定義されている式のまとめを行う。まず、上述の二つの層を区別しない内部境界層高さ z_I の式を列挙する。Elliott (1958) は

$$\frac{z_I}{z_{02}} = \left(0.75 - \log \left(\frac{z_{02}}{z_{01}} \right) \right) \cdot \left(\frac{x}{z_{02}} \right)^{0.8} \quad (5.1)$$

のような式を提案している。ここに z_{01} 、 z_{02} はそれぞれ地表面の急変地点より風上側、風下側の部分の粗度長であり、 x は吹走距離である。ただし、 $\log \left(\frac{z_{02}}{z_{01}} \right)$ の影響は小さいことから、以下のような近似をしたものも広く用いられる（例えば、Walmsley 1989）。

$$\frac{z_I}{z_{02}} = 0.75 \left(\frac{x}{z_{02}} \right)^{0.8} \quad (5.2)$$

Panofsky & Dutton (1984) は Jackson (1976) の式と同様の形式をもつ式を提案している。

$$\frac{x}{z_{02}} = \left\{ \frac{z_I}{z_{02}} \left[\log \left(\frac{z_I}{z_{02}} \right) - 1 \right] + 1 \right\} \div 1.25k \quad (5.3)$$

Elliott (1958) の式と Panofsky & Dutton (1984) の式は Walmsley (1989) により比較がなされており、Elliott (1958) の式は (5.1) 式、(5.2) 式のいずれにおいても粗度長が大きいときに内部境界層高さ z_I を過大評価すると指摘されている。

一方、適合域高さ z_A に関して、Deaves (1981) は数値計算による応力分布をもとに以下のような式を提案している。本研究で扱うような滑面から粗面の場合には以下の式が得られた。

$$\frac{z_A}{z_{02}} = 0.36 \left(\frac{x}{z_{02}} \right)^{0.8} \quad (5.4)$$

また、Wood (1982) は、滑面から粗面、粗面から滑面のいずれにも適用できる式として

$$\frac{z_A}{z_{0r}} = 0.28 \left(\frac{x}{z_{0r}} \right)^{0.8} \quad (5.5)$$

なる式を提案している。ここに、 $z_{0r} = \max[z_{01}, z_{02}]$ である。Jensen ら (1984) によってもほぼ同様の式が提案されている (Bottema 1997)。

$$\frac{z_A}{z_{0r}} = 0.3 \left(\frac{x}{z_{0r}} \right)^{0.8} \quad (5.6)$$

また、遷移領域高さ z_T に関しては、同じく Deaves (1981) により応力分布をもとにしたものとして、以下の式が提案されている。

$$\frac{z_T}{z_{0r}} = 10 \left(\frac{x}{z_{0r}} \right)^{0.8} \quad (5.7)$$

この式から、上述のように応力分布をもとに境界層高さを評価すると、風速分布から評価するよりかなり大きな値になることがわかる。

最後に工学的内部境界層高さ z_i についての記述をまとめる。これは、工学的にべき指数分布を用いる場合に、平均風速の値が風上側の同一高さにおける風速値と等しくなる高さを内部境界層高さ z_i と定義したものであり、例えば孟ら（1995）による傾度風高さ z_G の定義とはほぼ同様のものである。Antonia & Luxton（1970）は一次元粗度上の風速分布について滑面から粗面への粗度変化による境界層高さについて

$$\frac{z_i}{z_{0r}} \propto \left(\frac{x}{z_{0r}} \right)^{0.79} \quad (5.8)$$

なる式を得た。これは風速鉛直分布から求めたものである。

藤本ら（1980）は、一様流流入下での千鳥配置のブロック上の境界層高さを風洞実験により求め、以下のような関係を得た。

$$z_i \propto x^{0.64} (z_0 = 2.8 \cdot 10^{-3}), x^{0.80} (z_0 = 1.2 \cdot 10^{-2}, 1.5 \cdot 10^{-1}) \quad (5.9)$$

ただし、吹走距離は模型建物高さの 300、150 倍程度までのデータを用いている。

Maruyama & Ishizaki（1988）は一様流流入下での市街地模型上の境界層高さを風洞実験により求め、以下のような関係を得ている。

$$\frac{z_i}{z_{0r}} \propto \left(\frac{x}{z_{0r}} \right)^{0.56} \quad (5.10)$$

ただし、吹走距離は模型建物高さの 100 倍程度であり、境界層はそれほど発達していない段階である。べき乗部分が 0.56 と他の式と比較して小さめになっているのは、そのことが原因であると考えられる。

次に規基準での取り扱いについてまとめる。Australia/New Zealand 基準においては、1 章で示したように対数分布が採用されており、Jensen ら（1984）の式（式（5.6））と同じ式が用いられている。

$$\frac{z_A}{z_{0r}} = 0.3 \left(\frac{x}{z_{0r}} \right)^{0.8} \quad (5.11)$$

ASCE7（2002）においてはべき指数分布が用いられているが、適切な文献に基づき考慮することとするにとどまっている。

また、古くは Denmark 規準 (DS 410.2 1997、JAWE 等 1982) において、適合領域高さ z_A 、遷移領域高さ z_T それぞれについて以下の式が用いられていた。

$$z_A = z_T \left(\frac{z_T}{200} \right)^3 + z_{02} \quad (z_A [m]) \quad (5.12)$$

$$\frac{z_T}{z_{02}} = 0.7 \left(\frac{x}{z_{02}} \right)^{0.8} \quad (5.13)$$

以上、境界層高さの式のまとめを行ったが、少なくとも本研究で扱うような滑面から粗面への粗度変化の場合には、粗面側の粗度長のみが境界層高さに影響を与えると考えて良いようである。

5. 3 実験結果からの内部境界層高さの評価

前節では境界層高さに関し、既往の研究についてのまとめを行った。本節では、本実験におけるフロートテーブル上の粗度変化による内部境界層の発達について、内部境界層高さ z_G の評価を行う。

内部境界層の発達の様子は、図 5.1 のように模式的に表すことができる。したがって、本実験における各測定ケースの内部境界層高さ z_G は、風速測定を行った 3 箇所（フロートテーブル A 位置、中央 B 位置、および後縁 C 位置）それぞれについて、平均風速鉛直分布をフロートテーブル上の粗度形状がフロートテーブル前方部分の粗度形状と等しい状態である高さ一様の平面密度 4% の場合の平均風速鉛直分布と比較し、分布形状が重なる位置と判断すればよいといえる。

この比較に関し、主だったケースについて図 5.2～図 5.4 に示す。これらの図から、フロートテーブルの前縁から後縁にかけて徐々に内部境界層が発達している様子が読み取れる。また、本研究において主に使用した B 位置での内部境界層高さに着目すると、およそ 170mm～220mm の高さの範囲であることが分かる。そしてその高さは粗度の平面密度 R_m が大きくなるにつれて高くなるといえる。これは、平面密度 R_m が大きくなると粗度長 z_0 が大きくなることと対応していると考えられる。

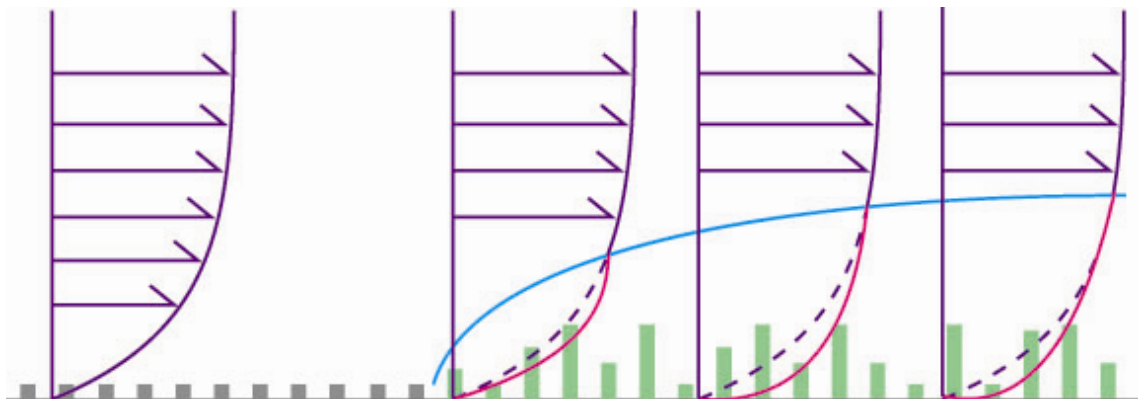


図 5.1 内部境界層の発達の模式図

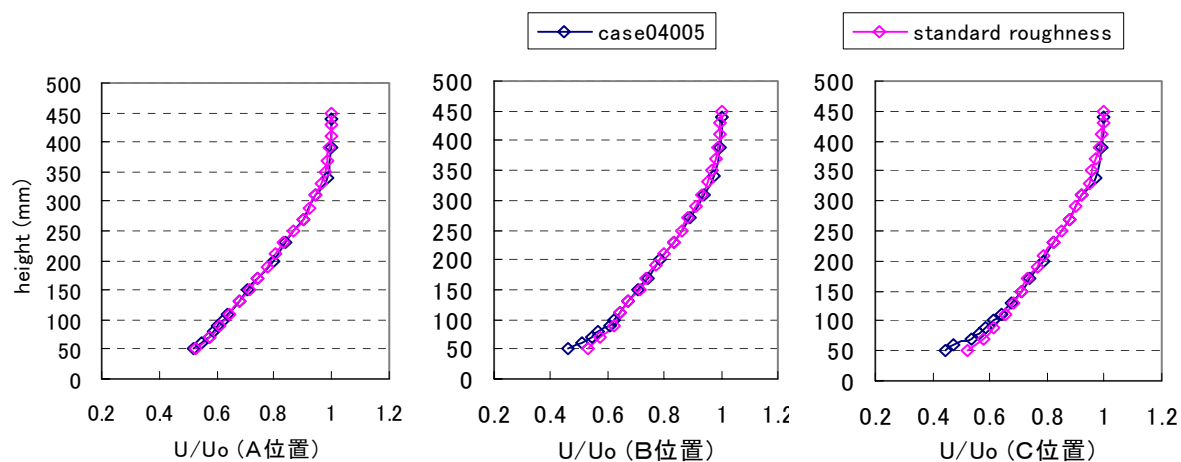


图 5.2 case04005 ($R_m = 4\%$, $h_{am} = 45.5\text{mm}$, $\sigma_h = 15.0\text{mm}$)

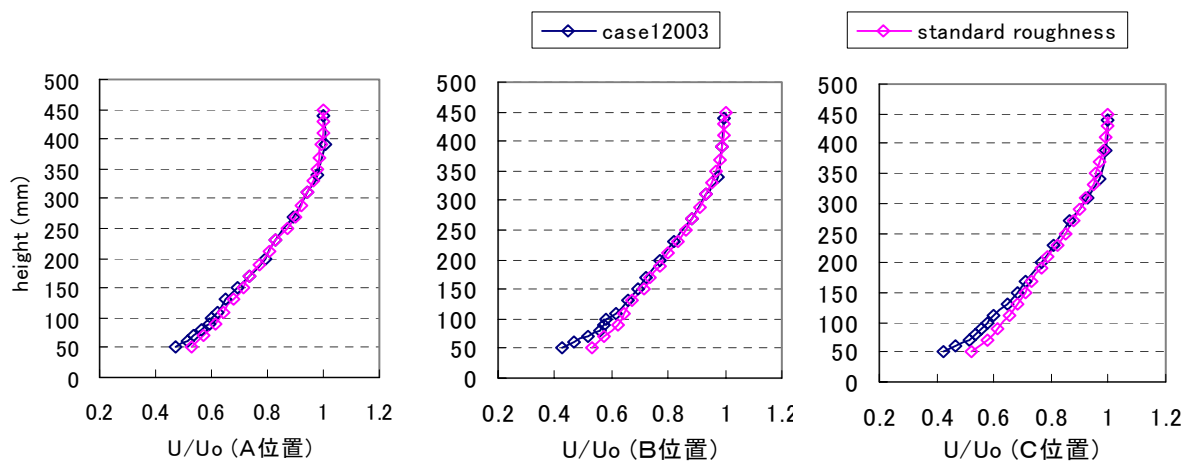


图 5.3 case12003 ($R_m = 12\%$, $h_{am} = 33.1\text{mm}$, $\sigma_h = 15.0\text{mm}$)

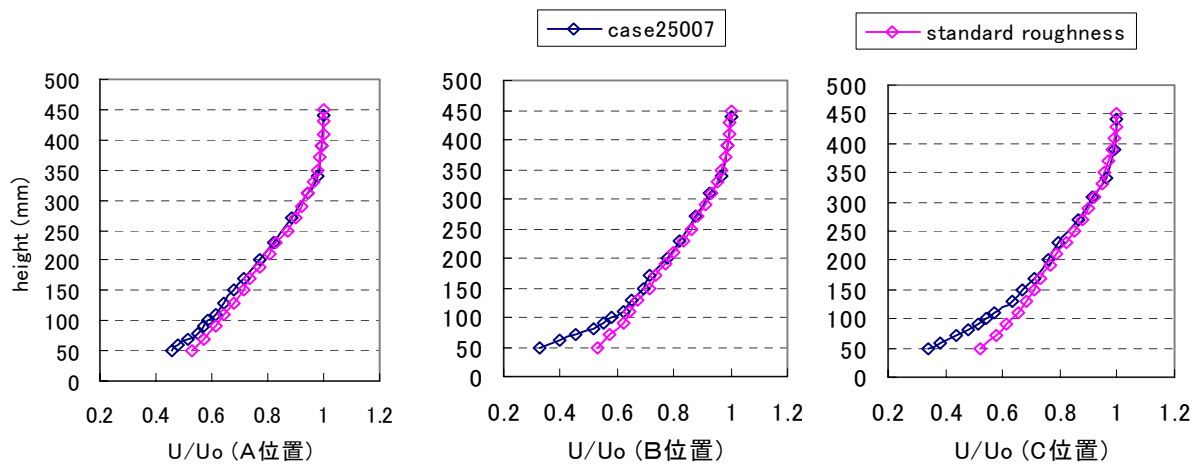


图 5.4 case25007 ($R_m = 25\%$, $h_{am} = 37.1\text{mm}$, $\sigma_h = 15.0\text{mm}$)

内部境界層高さ z_G の評価には、5. 2 で取り上げたように、以下のような形式の評価式が用いられることが多い。

$$\frac{z_G}{z_0} = A \left(\frac{x}{z_0} \right)^\delta \quad (5.14)$$

ただし、 A, δ は定数であり、ゼロ面変位 d は境界層高さ z_G に比べて充分小さいので無視する。

そこで、上の図 5.2～図 5.4 で示した方法で各測定ケースの内部境界層高さ z_G を求め、3 章にて算出した粗度長 z_0 を用いることで、式 (5.14) の定数 A, δ を評価することを試みる。

図 5.5 に各測定ケースのプロットと、最小二乗法による近似曲線を示す。

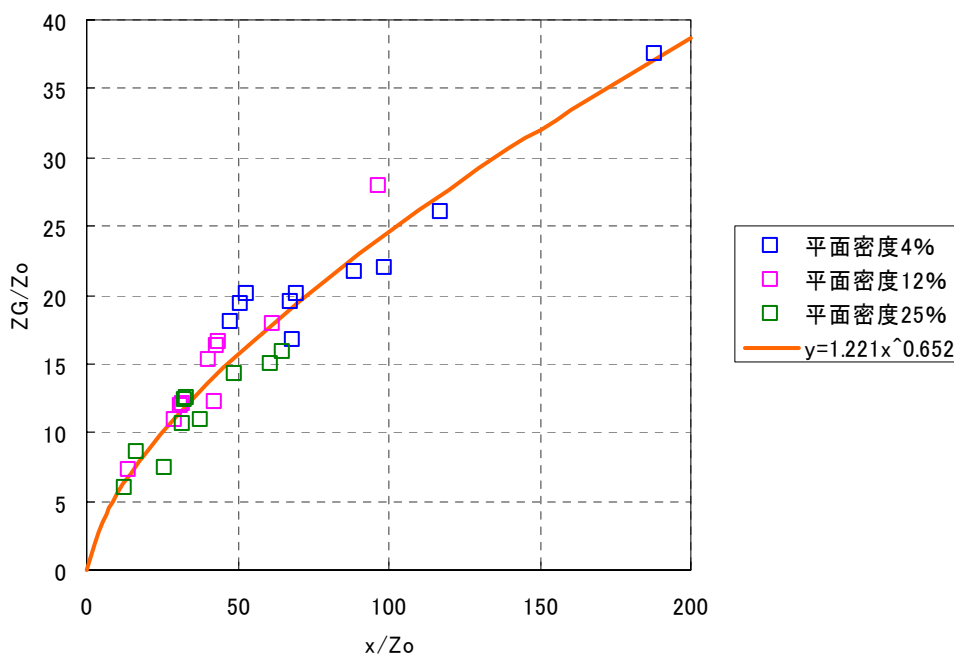


図 5.5 内部境界層高さと吹走距離の関係

図 5.5 より、本実験における内部境界層高さ z_G の評価式として以下の式を得る。

$$\frac{z_G}{z_0} = 1.221 \left(\frac{x}{z_0} \right)^{0.652} \quad (5.15)$$

式 (5.15) でのべき乗部分が 0.652 と既往の研究と比較して小さくなっていることから、フロートテーブル上でのみの粗度形状の変化を行った本実験において吹走距離は模型建物高さの 10 倍程度であり、境界層が発達段階であることが分かる。

ここで、本実験より得られた内部境界層高さの評価式 (5.15) を既往の研究による評価式と比較すると、図 5.6 のようになる。これを見ると、自然風を対象とした既往の提案式と本実験における評価式はよく対応しているといえる。

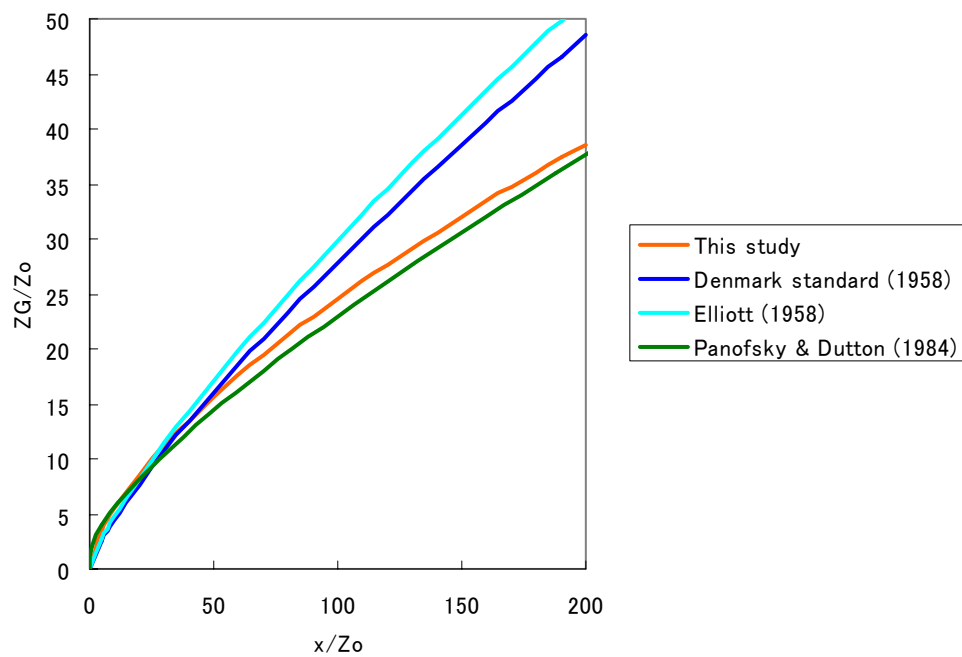


図 5.6 式 (5.15) と既往の内部境界層高さの式との比較

5. 4 まとめ

本章では、平均風速鉛直分布を評価するうえで重要な内部境界層高さについて、既往の研究をまとめその評価式を整理した後に、本実験におけるフロートテーブル上の粗度変化による内部境界層の発達について考察し、本研究の内部境界層高さの評価式を導いた。

平均風速鉛直分布をフロートテーブル上の粗度形状がフロートテーブル前方部分の粗度形状と等しい状態である高さ一様の平面密度 4% の場合の平均風速鉛直分布と比較し、分布形状が重なる位置を確認した結果、フロートテーブルの前縁から後縁にかけて徐々に内部境界層が発達している様子を読み取ることができた。

また、この方法で各測定ケースの内部境界層高さ z_G を求め、3 章にて算出した粗度長 z_0 を用いることで得られた本実験における内部境界層高さの評価式は、自然風を対象とした既往の研究の提案式とよく対応していることが分かった。

■参考文献

- 大熊武司 : 「建築物の耐風設計」 鹿島出版会 (1996)
- 神田順
- 田村幸雄
- 崔恒 : 「風荷重評価のための平均風速と乱れの強さの鉛直分布特性」
- 神田順 日本風工学会誌 第 45 号 23-43 (1990)
- 孟岩 : 「中立時の大気境界層における強風の鉛直分布特性
- 松井正宏 その 1 非台風時の強風」 日本風工学会誌 第 65 号 1-15 (1995)
- 日比一喜
- 孟岩 : 「中立時の大気境界層における強風の鉛直分布特性
- 松井正宏 その 2 台風時の強風」 日本風工学会誌 第 66 号 3-14 (1996)
- 日比一喜
- Engineering Science Data Unit (ESDU)
- : “Strong winds in the atmospheric boundary layer
Part1:mean-hourly wind speeds” , ESDU82026, 6-7 (1982)
- Schmid, H.P. : “A model to estimate the source area contributing to turbulent
Oke, T.R. exchange in the surface layer over patchy terrain” , *Quarterly
journal of the Royal Meteorological Society*, 116, 965-988 (1990)
- Simiu, E. : Wind Effects on Structures – Fundamentals and Applications to
Scanlan, R.H. Design, 3rd Edition, John Wiley & Sons (1996)
- Deaves, D.M : “Computations of Wind Flow over Changes in Surface Roughness” ,
Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 7, 65-94
(1981)
- Walmsley, J.L. : “Internal Boundary-Layer Height Formulae – A Comparison with
Atmospheric Data” , *Boundary-Layer Meteorology*, 47, 251-262
(1989)
- Panofsky, H.A. : *Atmospheric Turbulence : Models and Methods for Engineering
Dutton, J.A. Applications*, John Wiley & Sons (1984)
- Jackson, N.A. : “The Propagation of Modified Flow Downstream of a Change in
Roughness” , *Quarterly journal of the Royal Meteorological Society*,
102, 924-933 (1976)
- Wood, D.H. : “Internal Boundary-Layer Growth Following a Step Change in
Surface Roughness” , *Boundary-Layer Meteorology*, 22, 241-244
(1982)

- Bottema, M. : “Urban Roughness Modeling in Relation to Pollutant Dispersion” ,
Atmospheric Environment, Vol.31(18), 3059-3075 (1997)
- Maruyama, T. : “A Wind Tunnel Test on the Boundary Layer Characteristics above
 Ishizaki an Urban Area” , *Advances in Wind Engineering, Proceedings of the
 7th International Congress on Wind Engineering, Journal of Wind
 Engineering and Industrial Aerodynamics*, 28, 139-148 (1988)
- American Society of Civil Engineers (ASCE)
 : *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*,
 ASCE 7-2002 (2002)

■ ■ 6. まとめ

本研究では、平均風速鉛直分布に影響を及ぼす地表面粗度に関する影響因子を平面密度、建物の平均高さ、建物の高さの標準偏差といった 3 つのパラメータとして設定し、風洞実験によりランダムで不均質な都市部の建物群などの地表面粗度による平均風速鉛直分布の定量的な評価を行なった。また、これまでに提案されてきた平均風速鉛直分布に関わる粗度パラメータおよびレイノルズ応力に代表される物理的パラメータの理論的な対応関係を実験により定量的に明らかにし、それらの結びつきを確認し評価することを目的とした。以下に、各章のまとめと結論を述べる。

第 1 章では、平均風速鉛直分布の評価に関する既往の研究と規基準、そして現状についてまとめた。現状では、定量的な地表面粗度の評価手法は確立されていない。また、ベキ指数は建物高さのばらつきの影響を受けるという指摘がある一方で、その地表面粗度の高さ方向の変化についての検討がほとんどされていない事を問題点として取り上げた。

第 2 章では、地表面に発達する乱流境界層と地表面とのせん断力の関係について既往の研究を上げながら述べた上で、本研究における実験の概要の説明を行った。実験結果に関し、平均風速鉛直分布については、その測定位置の後部の粗度形状により分布に影響があることが分かり、本研究において評価する平均風速鉛直分布を得るために最適の測定位置を断定した。また、本実験において風速を一定とすることの妥当性も確認された。抗力測定装置により測定した床面効力に関しては、測定値の妥当性を確認するとともに、高さの平均値 h_{am} および高さの標準偏差 σ_h といった本研究で用いる粗度パラメータとの対応関係を、粗度の平面密度 R_m ごとに特徴を把握することができた。

第 3 章では、強風時平均風速の鉛直分布について、既往のモデルおよび研究に關してのまとめを行い、理論的な結びつきとその推定の現状を明らかにした後に、本実験より得られた高さ方向の変化を与えた粗度形状に対する平均風速鉛直分布の鉛直分布係数を、粗度長 z_0 およびベキ指数 α のそれぞれについて算出し、粗度パラメータとの対応関係の評価を行った。鉛直分布係数である粗度長 z_0 およびベキ指数 α は、高さの平均値 h_{am} および高さの標準偏差 σ_h に対して平面密度ごとに全く同様の傾向見せることを結果として得た。これより、不確実性が問題となる対数則およびベキ指数則の両方について、適切な評価を行うことが出来たということが示された。これにより、本研究における粗度パラメータと平均風速鉛直分布の鉛直分布係数の対応関係が明らかにされた。

第 4 章では、まず 2 章および 3 章において粗度パラメータとの相関関係が明らかになった、抗力係数と平均風速鉛直分布の鉛直分布係数とを理論的に結びつけることを試みた。そして、それより導かれたベキ指数 α および粗度長 z_0 と抗力係数との関係式について、2 章で得られた抗力係数と 3 章で得られた各鉛直分布係数との対応を評価し、得られた関係

式の精度を確認することができた。これにより、本研究において抗力係数と鉛直分布係数とが結びついた。さらにレイノルズ応力 τ の算定を行い、風速データから床面に加わるせん断力に対してまた別の視点からのアプローチを試み、その結果レイノルズ応力の分布がとるピークの値に着目すると、その値は抗力測定装置にて測定された抗力、および摩擦速度 u_* から算出して得られる抗力の値と良い対応を見せることが確認された。これにより、先に鉛直分布係数と結びついた抗力係数に関して、レイノルズ応力という物理的なパラメータの結びつきを示すことができた。

第5章では、平均風速鉛直分布を評価するうえで重要な内部境界層高さについて、既往の研究をまとめその評価式を整理した後、本実験におけるフロートテーブル上の粗度変化による内部境界層の発達について考察し、本研究の内部境界層高さの評価式を導いた。この本実験における内部境界層高さの評価式は、自然風を対象とした既往の研究の提案式とよく対応していることが分かった。

以上、本研究において理論的な結びつきを実験により定量的に評価し、相関関係を明らかにすることのできた各パラメータの関係をまとめると、以下に示す図 6.1 のようになる。

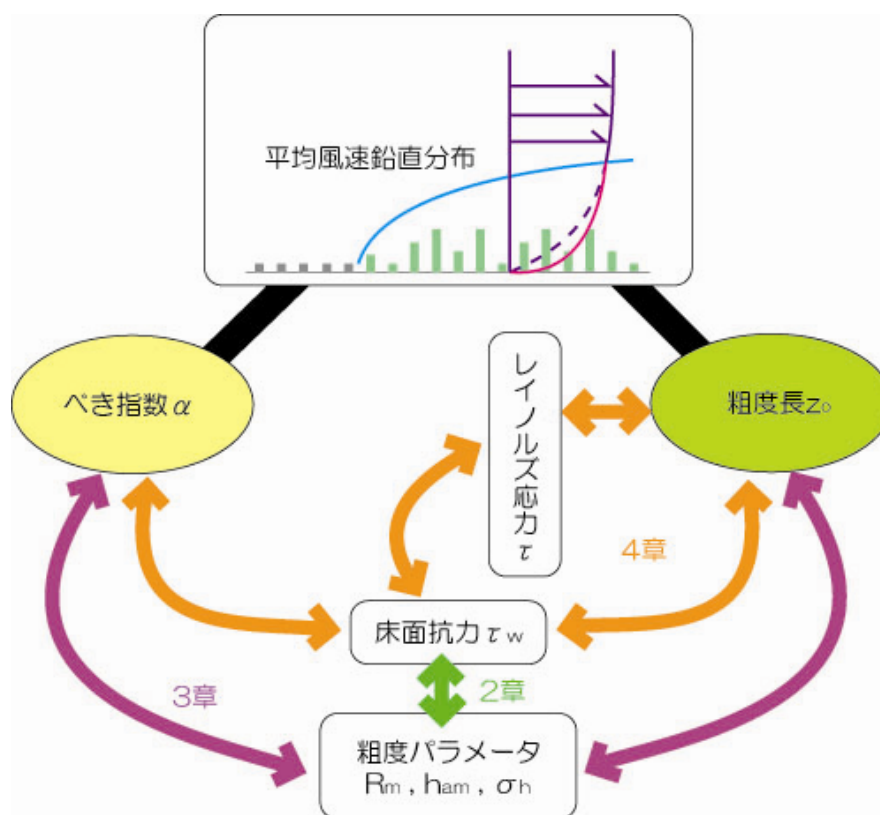


図 6.1 本研究の各パラメータの関係

■ ■ 付録

A. 第2章 2. 2 (5) における測定ケース

2. 2 (5) における測定ケースの詳細を示す。

まずは、測定ケースごとの高さの平均値 h_{am} および高さの標準偏差 σ_h を実現するためにランダムに決定した、粗度ブロックの割り当て個数を平面密度 R_m ごとに表 A.1-1～A.3-2 に示す。尚、本研究の実験では階数 2 に対して粗度ブロック (30mm×30mm×30mm) 1 個が相当する。

表 A.1-1 平面密度 $R_m = 4\%$ の場合 (1)

階数	case04001	case04002	case04003	case04004	case04005
2	27	23	19	21	15
4	4	8	12	6	16
6	0	0	0	4	0
8	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0
ブロック総数	35	39	43	45	47
高さの平均値 (mm)	33.9	37.7	41.6	43.5	45.5
高さの標準偏差(mm)	10.1	13.1	14.6	21.3	15.0

表 A.1-2 平面密度 $R_m = 4\%$ の場合 (2)

階数	case04006	case04007	case04008	case04009	case04010
2	11	7	3	2	0
4	20	24	28	28	31
6	0	0	0	0	0
8	0	0	0	1	0
10	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0
ブロック総数	51	55	59	62	62
高さの平均値 (mm)	49.4	53.2	57.1	60.0	60.0
高さの標準偏差(mm)	14.4	12.5	8.9	13.2	0.0

表 A.2-1 平面密度 $R_m = 12\%$ の場合 (1)

階数	case12001	case12002	case12003	case12004	case12005
2	77	74	73	66	68
4	0	2	2	11	5
6	0	1	0	0	4
8	0	0	2	0	0
10	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0
ブロック総数	77	81	85	88	90
高さの平均値 (mm)	30.0	31.6	33.1	34.3	35.1
高さの標準偏差(mm)	0.0	8.2	15.0	10.5	14.8

表 A.2-2 平面密度 $R_m = 12\%$ の場合 (2)

階数	case12006	case12007	case12008	case12009	case12010
2	55	51	63	22	39
4	22	16	0	55	0
6	0	10	0	0	38
8	0	0	10	0	0
10	0	0	3	0	0
12	0	0	1	0	0
14	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0
ブロック総数	99	113	124	132	153
高さの平均値 (mm)	38.6	44.0	48.3	51.4	59.6
高さの標準偏差(mm)	13.6	21.4	39.6	13.6	30.0

表 A.3-1 平面密度 $R_m = 25\%$ の場合 (1)

階数	case25001	case25002	case25003	case25004	case25005
2	170	160	150	146	140
4	0	10	20	21	30
6	0	0	0	3	0
8	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0
ブロック総数	170	180	190	197	200
高さの平均値 (mm)	30.0	31.8	33.5	34.8	35.3
高さの標準偏差(mm)	0.0	7.1	9.7	12.3	11.4

表 A.3-2 平面密度 $R_m = 25\%$ の場合 (2)

階数	case25006	case25007	case25008	case25009	case25010
2	140	135	120	121	120
4	29	31	47	24	6
6	0	3	0	20	0
8	0	1	0	0	44
10	1	0	3	0	0
12	0	0	0	5	0
14	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0
ブロック総数	203	210	229	259	308
高さの平均値 (mm)	35.8	37.1	40.4	45.7	54.4
高さの標準偏差(mm)	14.3	15.0	19.9	31.1	39.2

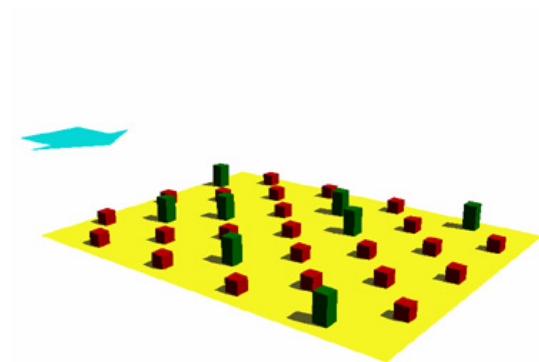
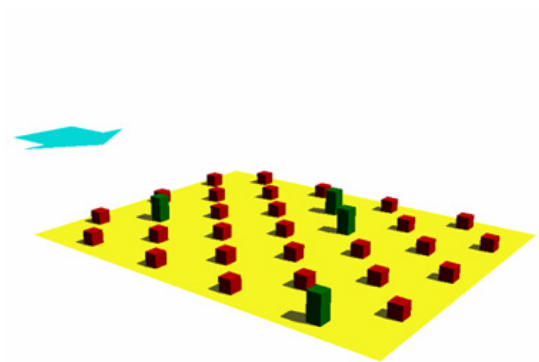
次に、表 A.1-1～A.3-2 で示した粗度ブロックの個数の割り当てを、千鳥状配置の平面に振り分けた様子を示す。これが、本研究の実験での実際の測定ケースとなる。

粗度ブロックの振り分けの位置は無作為を基本としているが、フロートテーブルの浮上に支障となる様な重心の偏った粗度形状や、風速測定位置の風に好ましくない影響を及ぼしそうな粗度形状となることは避けた。

粗度ブロックの振り分け

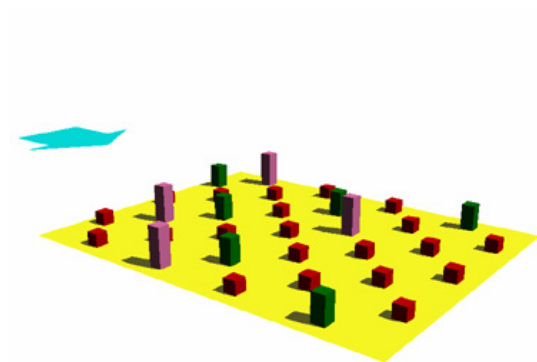
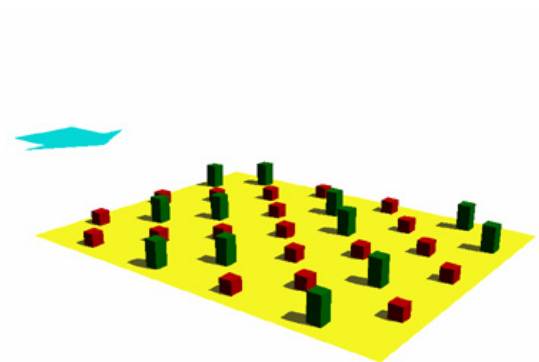
粗度形状イメージ

実験風景



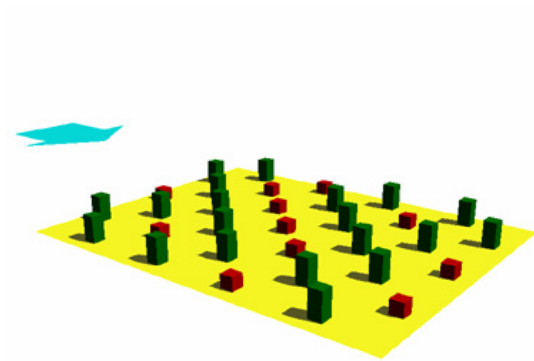
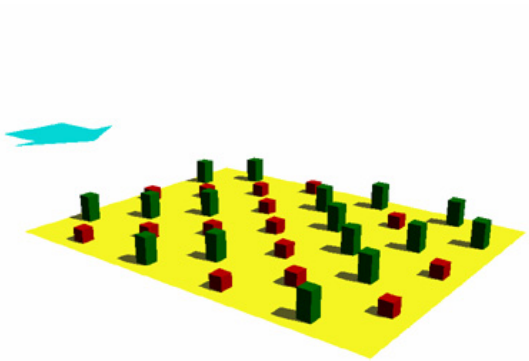
case04001

case04002

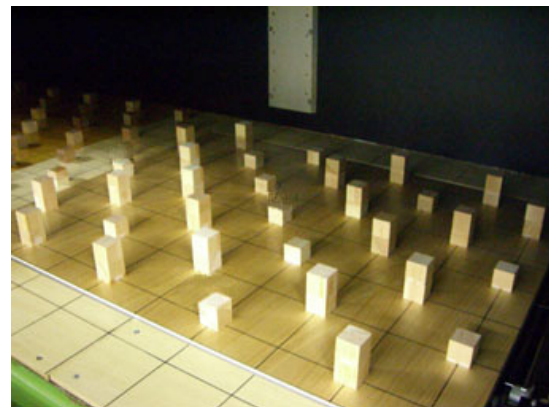


case04003

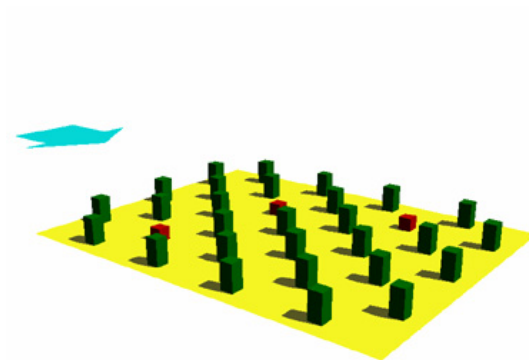
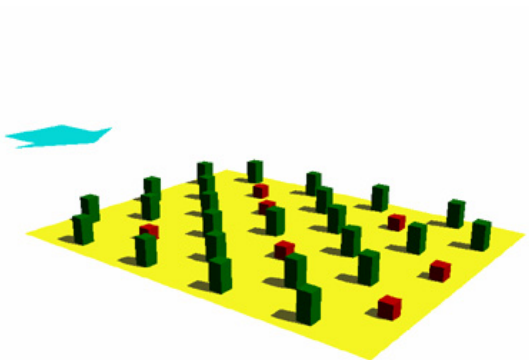
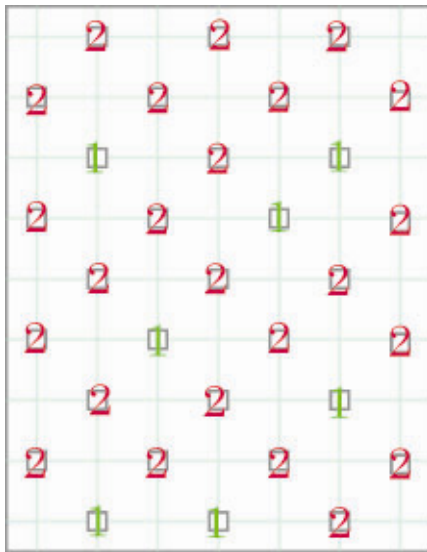
case04004



case04005

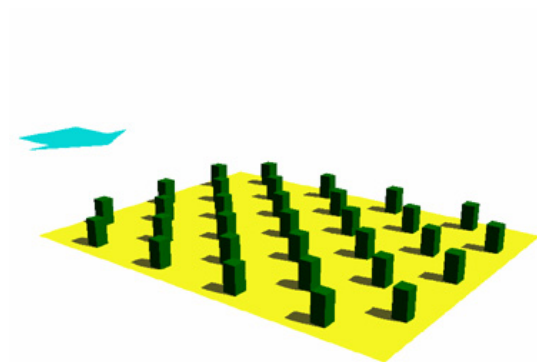
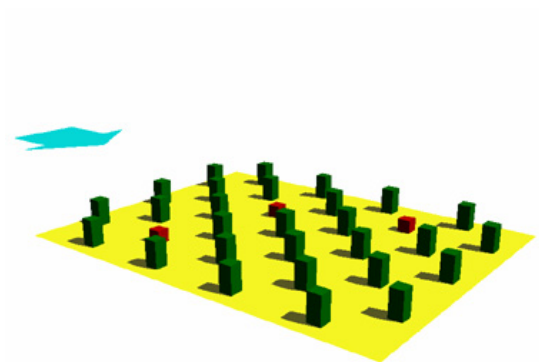
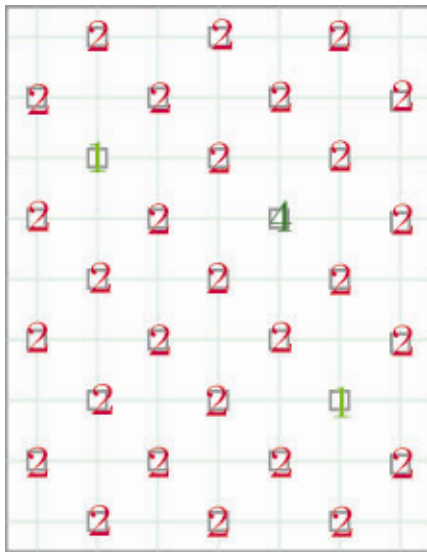


case04006



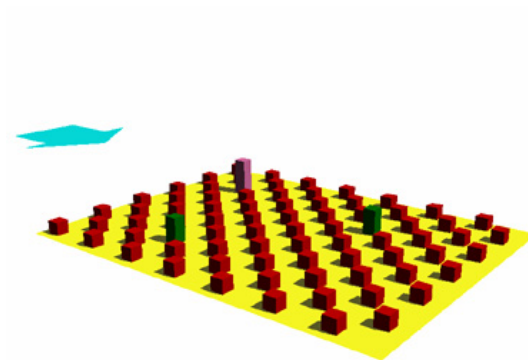
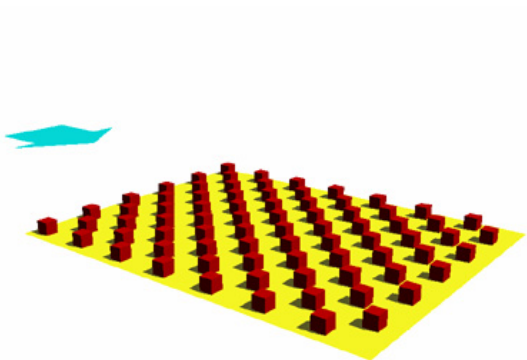
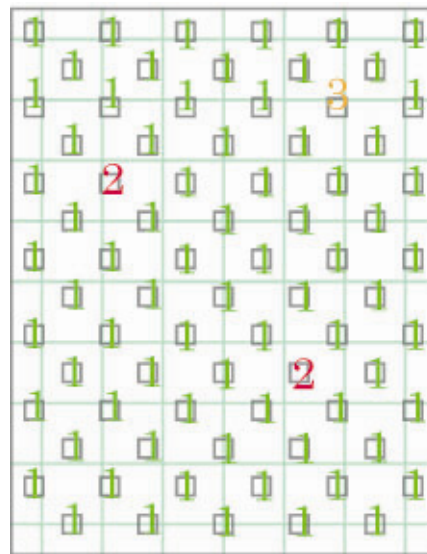
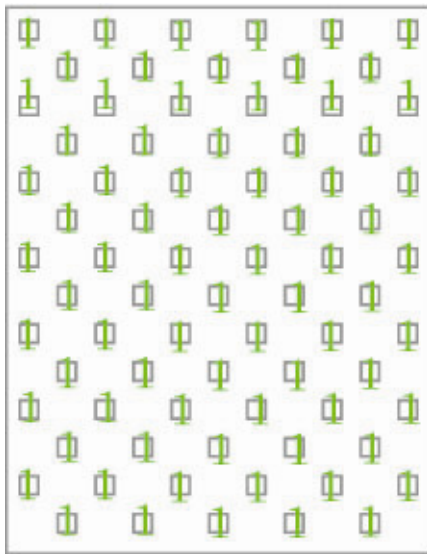
case04007

case04008



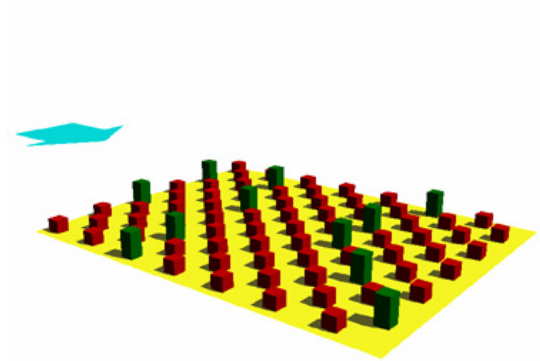
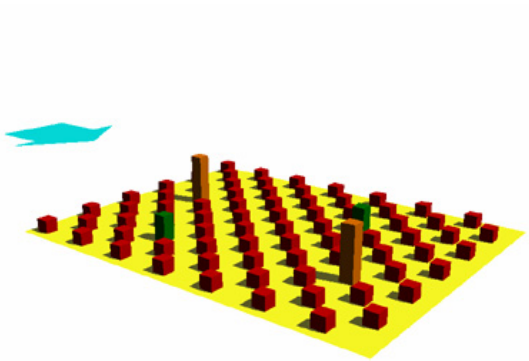
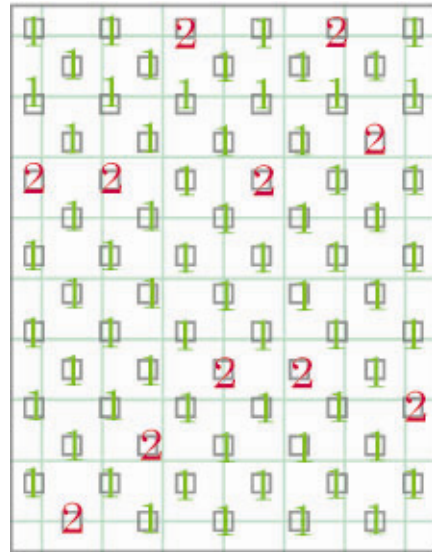
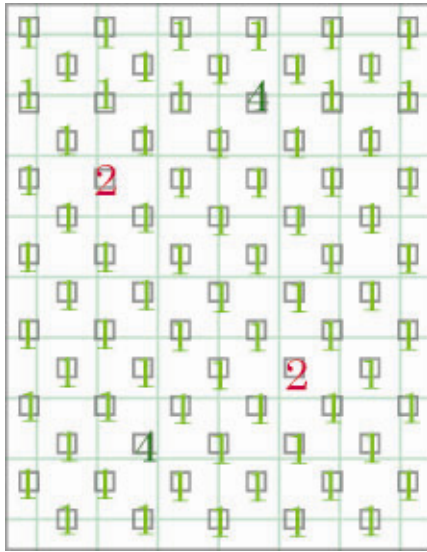
case04009

case04010



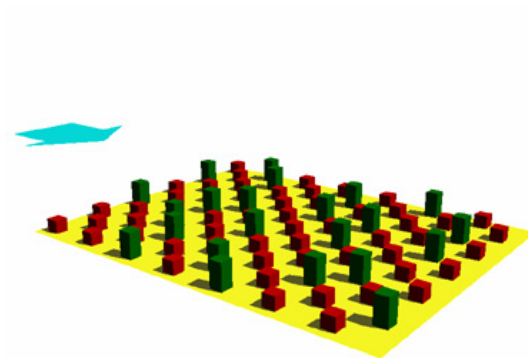
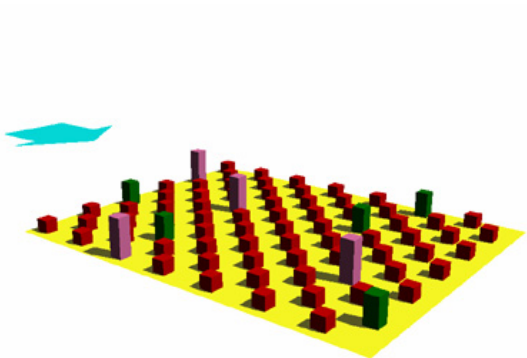
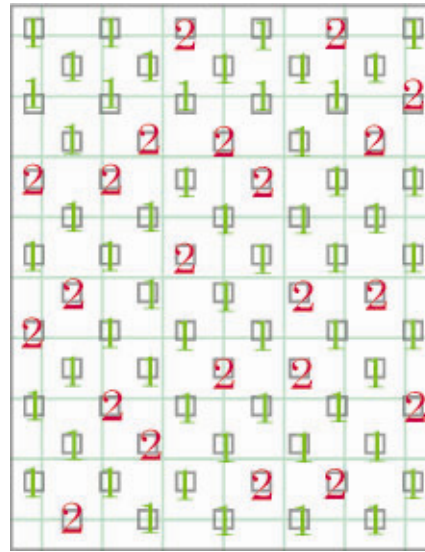
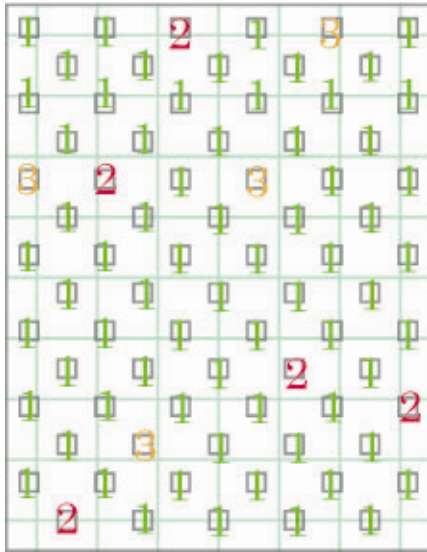
case12001

case12002



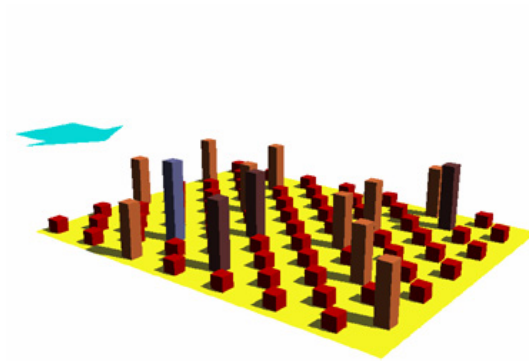
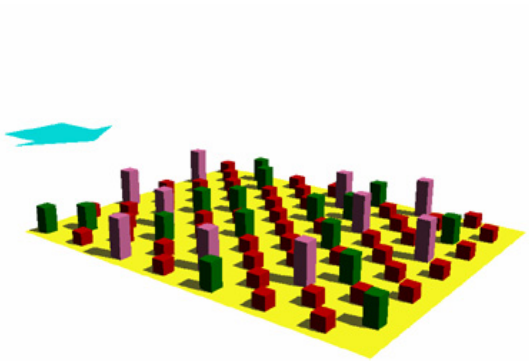
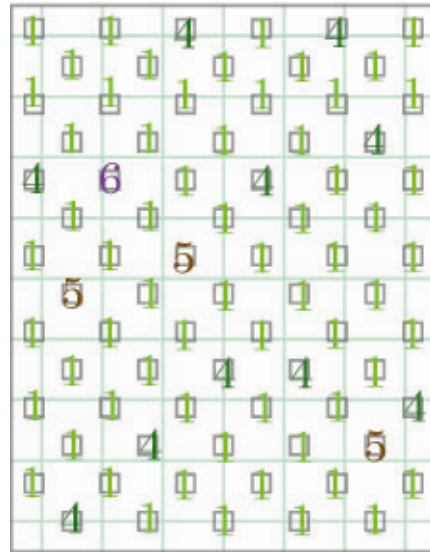
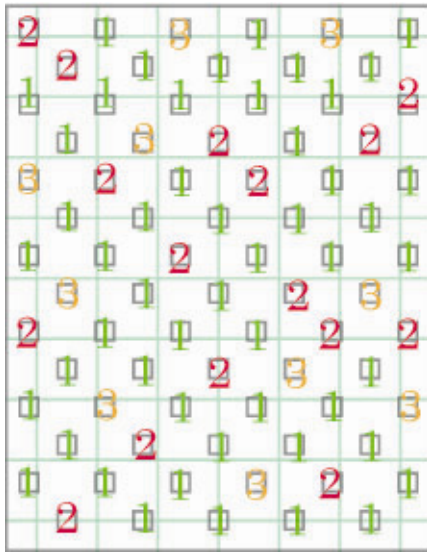
case12003

case12004



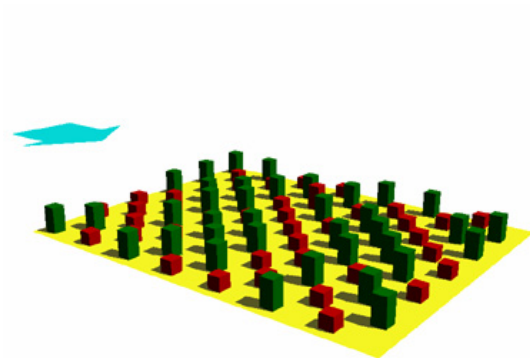
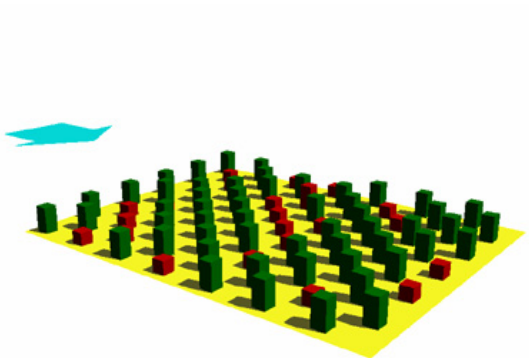
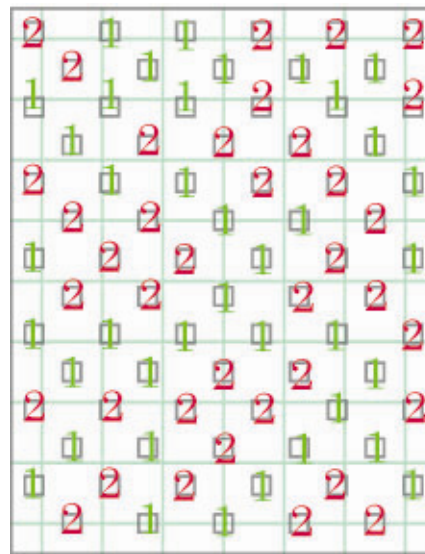
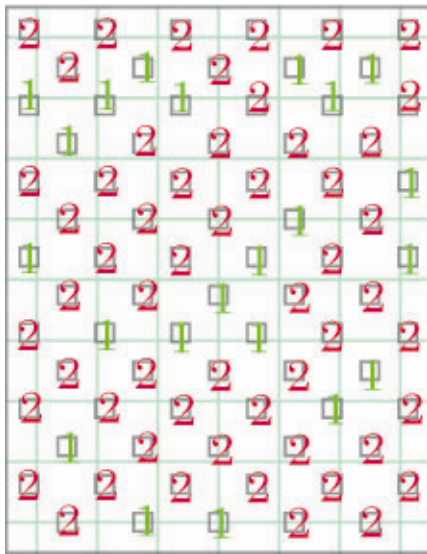
case12005

case12006



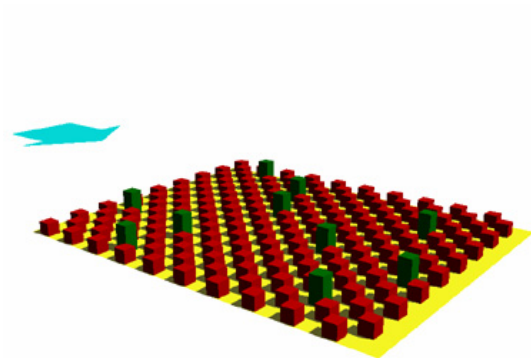
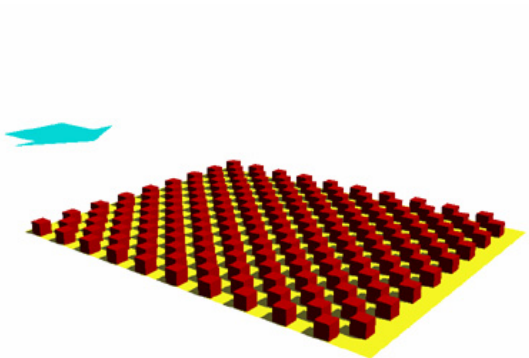
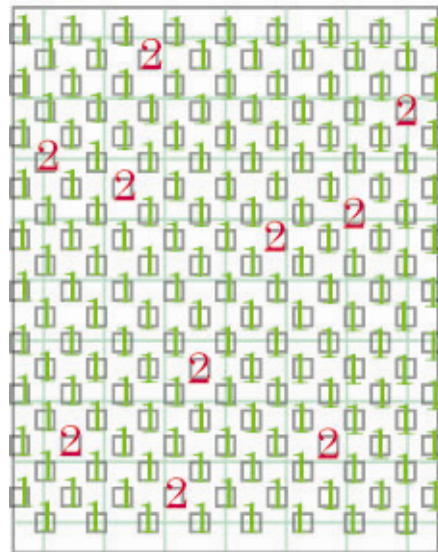
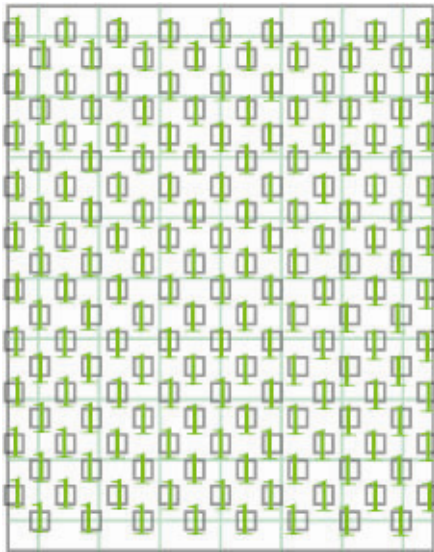
case12007

case12008



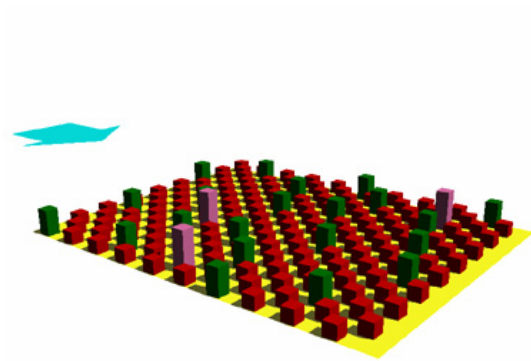
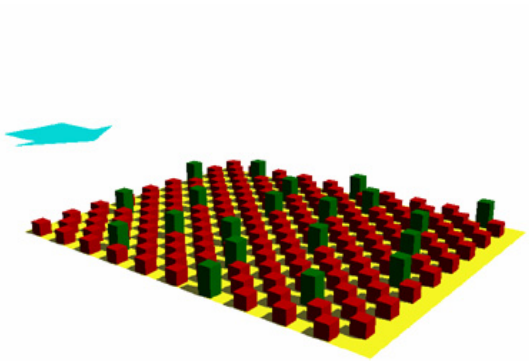
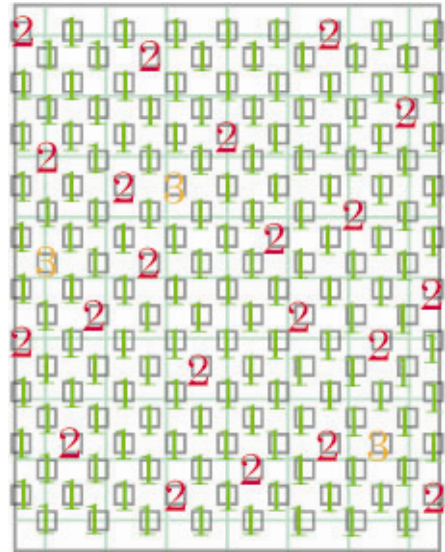
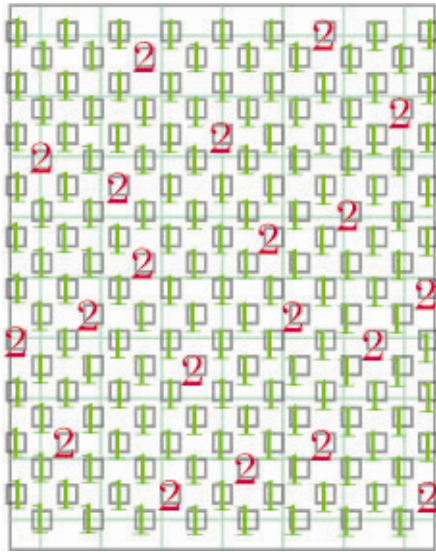
case12009

case12010



case25001

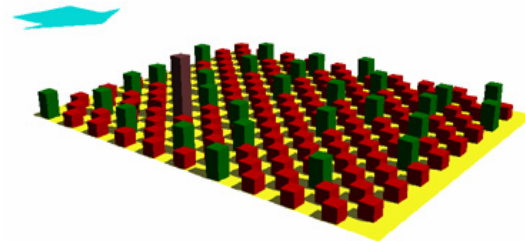
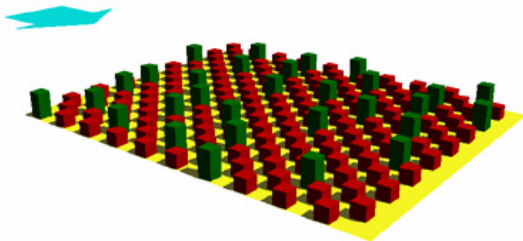
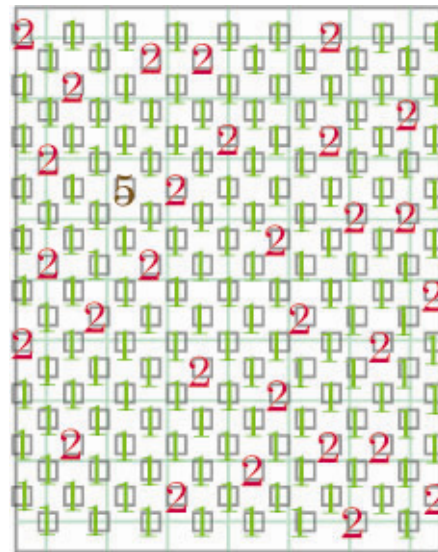
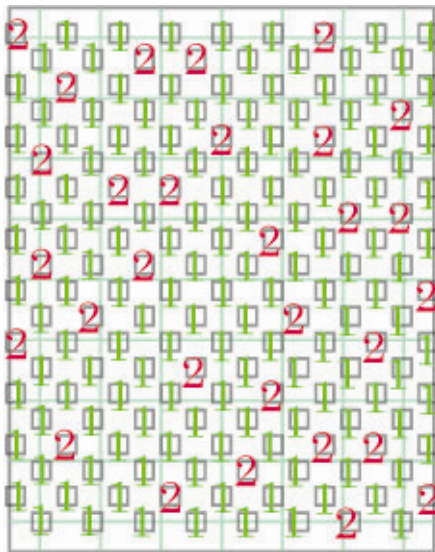
case25002



case25003

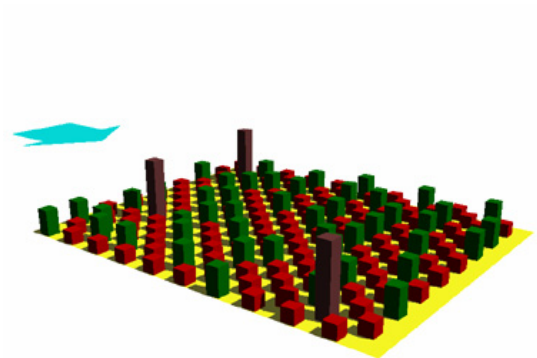
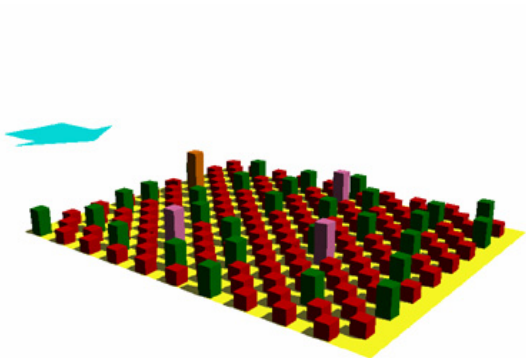
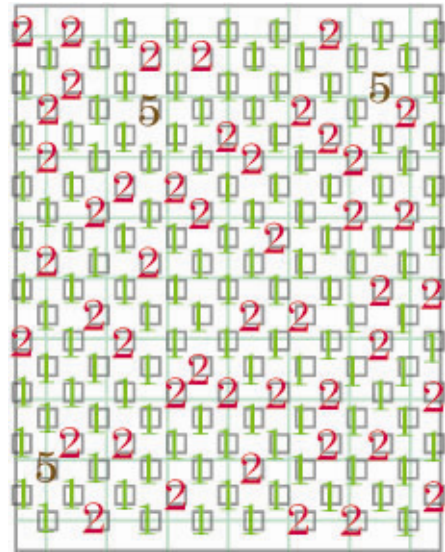
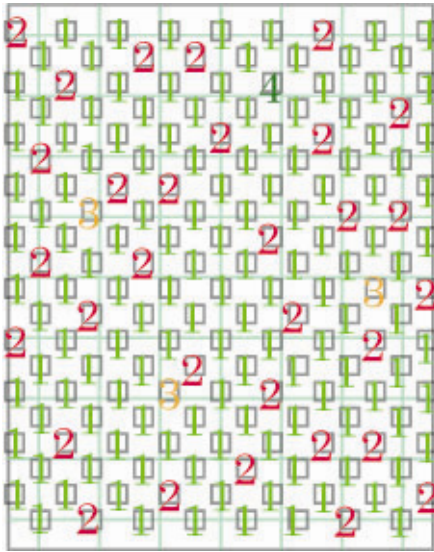


case25004



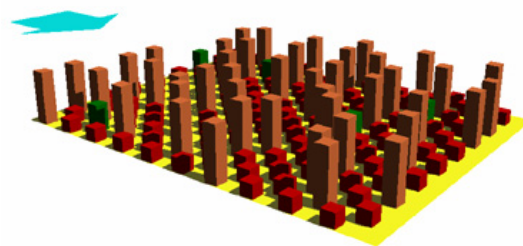
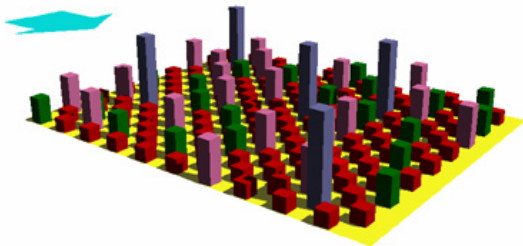
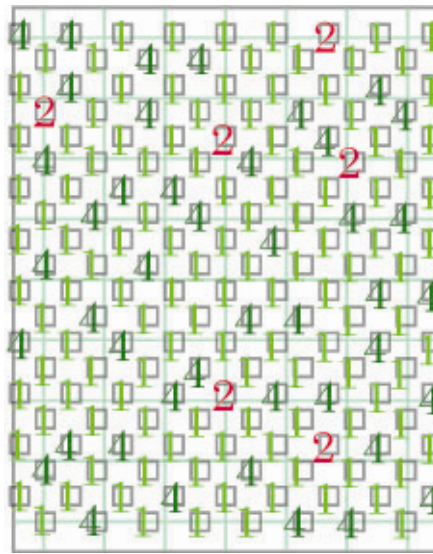
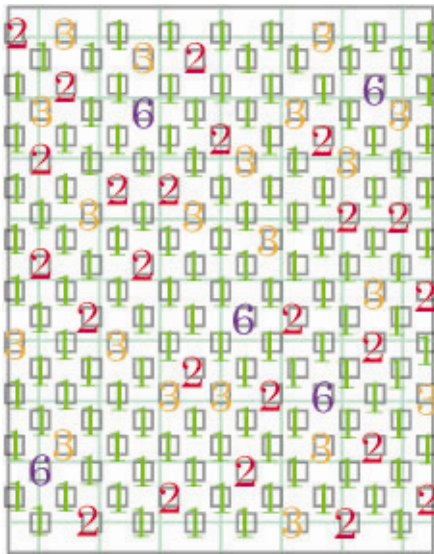
case25005

case25006



case25007

case25008



case25009

case25010

■ ■ 謝辭

本研究は、私が 2005 年度から 2006 年度の間、東京大学大学院環境学研究系社会文化環境学専攻修士課程に在籍し、その集大成の修士論文としてまとめたものです。本論文の作成は力不足の私にとって非常に困難なものではありましたが、新たな分野での研究に対する興味と好奇心を支えに、どうにかこの謝辞を書く段にまでたどり着くことが出来ました。このような貴重な経験が出来たのは、未熟な私を修士課程の学生として研究室に拾ってくださった当研究室の神田順教授のおかげであります。

神田順教授には指導教官として、研究の着眼点や関連する情報の提供など、本論文を書き上げるにあたって必要不可欠なご指導を頂きました。お忙しい中に貴重な時間をさいて研究を助けてくださった先生には、本当に感謝しております。また先生に応募を勧めていただいた都市再生 COE・B 部会研究費は、本研究を行う環境を整えるにあたり大変な助けとなりました。

当研究室の元助教授であり、現 GS Engineering & Construction 技術研究所首席研究員の崔恒氏には、直接的な教え子ではないにもかかわらず、研究テーマの示唆や風洞実験手法の指導など、とても親身に指導をしていただきました。同大学大学院工学系研究科・工学部 建築学専攻の高田毅士教授には、神田・高田研究室合同研究室会議や研究室合宿の場において、参考となる貴重な意見を頂き、また励まして頂きました。また本研究の全てである風洞実験において、技術的な助言や機器の使用方法などを教えてくださった、日本カノマックス株式会社の東山泰造氏には大変お世話になりました。

また、新参者であった私を受け入れ、様々な助言や楽しい大学院生活を与えてくださった神田研究室の諸先輩方にはとても感謝しております。中でも、風洞実験に関する知識が皆無であった私に、専門用語の意味から実験設備の使用方法に至るまで一から学ばせてくださった野口満美さん、曾我大輔さんには、2 年間を通してお世話になりっぱなしでした。さらに、風洞実験がなかなか思うように上手くいかず、精神的にも疲労困憊のときに実験を笑顔で手伝ってくれただけでなく、その他の生活面でも一生懸命支えてくれた外村光の存在なしにはこの論文の完成はありませんでした。また彼女のご家族および愛犬の笑顔にも、とても励まされました。

最後に、2 年間の大学院生活の環境を整えてくれた両親、そして両親とともに私の長い学生時代を見守り、支えてくれた弟、祖母と祖父母、伯父伯母と叔父叔母に心からの感謝を表して、この論文をしめたいと思います。本当にありがとうございました。

2007 年 1 月 29 日

澄んだ青空の東京大学柏キャンパスにて

須藤亘平