

2004 年度 修 士 論 文

地理情報システムに基づく平均風速鉛直分布の評価
Estimation of the mean wind profile
based on Geographic Information System

菅野 宏紀
Kanno, Hiroki

東京大学大学院新領域創成科学研究科
環境学専攻 社会文化環境コース

目次

1 . 序論	1
1 . 1 はじめに	2
1 . 2 平均風速鉛直分布の評価の現状	3
1 . 3 本論文の目的と構成	6
2 . 地理情報システムに基づく東京 2 3 区における地表面粗度分析	10
2 . 1 既往の研究における地表面粗度の定量的評価	11
2 . 2 地表面粗度を表すパラメータ	13
2 . 3 解析結果と考察	15
2 . 3 . 1 解析手法	15
2 . 3 . 2 解析結果	15
2 . 3 . 3 考察	21
2 . 4 まとめ	22
3 . 全体抗力測定実験	24
3 . 1 はじめに	25
3 . 2 実験概要	26
3 . 2 . 1 風洞設備	26
3 . 2 . 2 抗力測定装置	28
3 . 2 . 3 床面抗力とせん断力の関係	30
3 . 2 . 4 実験手法	32
3 . 3 粗度パラメータの違いによる抗力の変化	34
3 . 3 . 1 高さ一定の場合	34
3 . 3 . 2 高さ変化を加えた場合	35
3 . 4 レイノルズ応力と抗力の関係	47
3 . 5 まとめ	50
4 . 粗度パラメータによる抗力係数の評価	52
4 . 1 実験結果からの抗力係数の評価	53
4 . 2 統計解析手法による確認	62
4 . 3 まとめ	64

5 . 平均風速鉛直分布パラメータの評価式	65
5 . 1 境界層理論	66
5 . 2 平均風速鉛直分布の近似式について	68
5 . 2 . 1 対数則について	68
5 . 2 . 2 べき指数則について	71
5 . 2 . 3 境界層暑さ・べき指数の吹送距離方向変化について	73
5 . 3 抗力係数と平均風速鉛直分布の関係	74
5 . 3 . 1 関連指標間の関係式について	74
5 . 3 . 2 抗力係数と風速分布パラメータの関係	76
5 . 3 . 3 抗力係数と風速分布パラメータの関係その2	78
5 . 3 . 4 実験スケールにおける抗力係数の持つ意味	79
5 . 4 まとめ	83
6 . 地理情報システムに基づく平均風速鉛直分布の評価	85
6 . 1 既往の観測結果・実験結果との比較	86
6 . 2 地表面粗度マップの作成	92
6 . 3 まとめ	96
7 . まとめ	98
付録	101
あとがき	

第 1 章

序論

1．序論

1．1 はじめに

建築物荷重指針(2004)においては、建築物とは適切な安全性と使用性を有するべきであり、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ある。安全性という観点においては、近年気候変動や urbanization による自然環境の消失等によって、自然災害は増加の歩を辿っている。昨年に限ってみても、多くの台風の襲来や新潟やインドネシアにおける地震被害は記憶に新しいところである。また、国家的防災、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、限界状態設計法に代表されるように近年、安全性に加え、使用性を考える必要についてうたわれている。(例えば限界状態設計法の挑戦(2004)) 建築物に関わる詳細な荷重評価は、こういった使用性の評価に加えて、構造設計においての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、最近では、不動産や保険を交えたりリスク評価として PML(Probable Maximum Loss)の評価にとって必要不可欠である。

本論で扱う内容は、このような背景のある構造設計の一部である耐風設計のうち平均風速鉛直分布の評価である。特に、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はなく、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。

建築物の耐風設計を考える上でのフローは主に図 1 のように区分されるが、本論で扱う対象である平均風速鉛直分布の評価は、設計風速の決定及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や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焦点として、話を展開する。以降では、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、その上で問題点と本研究の目的を明らかにする。

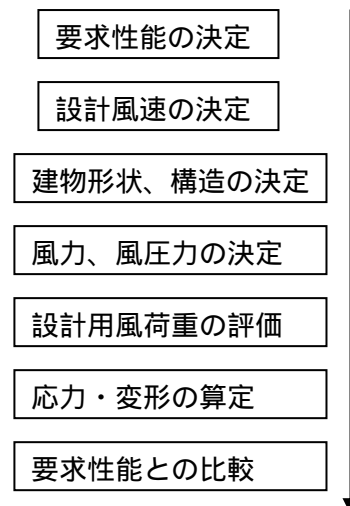


図 1.1 耐風設計のフロー

1.2 平均風速鉛直分布評価の現状

地表面付近の風速は、建築物、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。地表面の粗さによって、平均風速は地表面に近づくほど低減するようになる。これは、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。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って変化する。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は、べき乗則（式 1.1）と対数則（式 1.2）がある。

べき乗則	$U_z = U_{z_r} (Z / Z_r)^\alpha$	(1.1)
対数則	$U_z = u_* / \kappa \ln(Z / Z_0)$	(1.2)
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 κ : カルマン定数 Z_0 : 粗度長		

基本的に、地表面が荒いほど（市街地であれば、密集していればしているほど）べき指数、摩擦速度、粗度長は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。

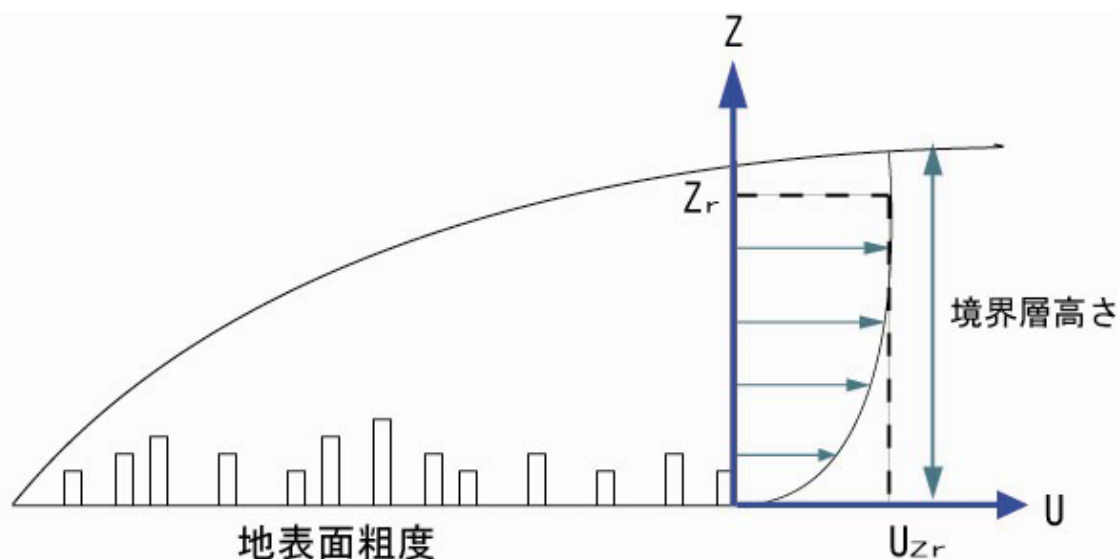


図 1.2 平均風速鉛直分布のモデル

建築学会の荷重指針では、設計風速 U_H を式 (1.3) によって定めている。

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

基本風速 U_0 (m/s)は、地表面粗度区分 (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 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)で表される。

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

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を考慮するのに用いられている。 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段階に設定されている。鉛直分布係数は、5段階の地表面粗度区分により、式(1.5)、図1.5により算定される。

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

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

以上が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 1.2 風速の鉛直分布を定めるパラメータ

粗度区分					
Z_b	5	5	10	20	30
Z_G	250	350	450	550	650
	0.1	0.15	0.2	0.27	0.35

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	海面・湖面のようなほとんど障害物のない地域
	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
粗	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
	中層建築物(4~9階)が主となる市街地
	高層建築物(10階以上)が密集する地域



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

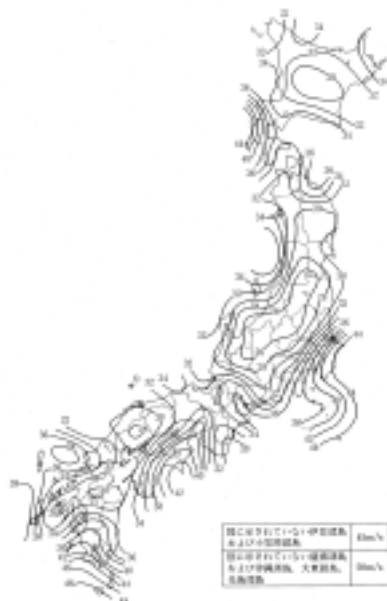


図 1.3 風速マップ

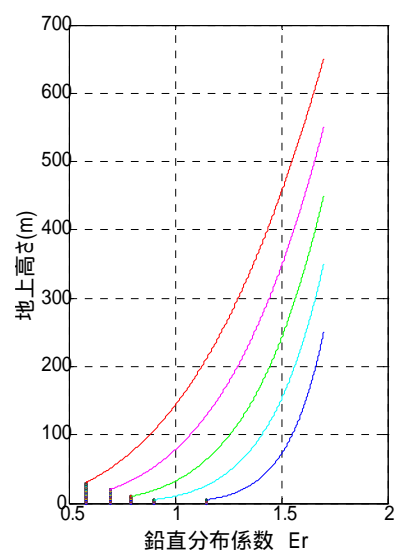


図 1.5 鉛直分布係数

1.3 本論文の目的と構成

平均風速鉛直分布の設計等に対する影響については、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、地表面粗度区分に対しての動的風荷重の評価にスポットを当てているが、勿論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状での排ガス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ので、平均風速鉛直分布の推定が必要となる。

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のみであるが、中村ら(2003)や山崎ら(2004)は風向別基本風速マップ作成を試みている。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いう点が指摘されている。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 および を仮定し、シミュレーションを行っているが、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(例えば勝地ら(2004))においては、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言える。

以上に述べたように平均風速鉛直分布の影響する範囲は、広範囲・多岐にわたる中、既往の平均風速鉛直分布評価の現状を簡単にまとめる。詳細については、各章に関連して随時とりあげることとする。

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 Review には Davenport(1960)や Counihan(1975)、国内のものでは崔(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)は空間平均操作をほどこした k -モデルによるシミュレーションを行い、気流性状の推定をした。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、以下にあげる問題点を抱えている。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。中村は、4階以上の建物の割合によりばらつきの評価に変えてはいるものの、定量的であるとは言い難い。

以上をまとめると、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が本論文の目的ということである。また、既往の研究においては、地表面粗度の高さのばらつきに関する定量的評価については事例がなく、特に高さのばらつきの平均風速鉛直分布に対する影響の評価に重きを置く。

以下本論文の構成を述べる。

第2章では、GISを用いて東京23区において、地表面粗度を評価する粗度パラメータを抽出し、建物高さのばらつきと他指標との相関を調べたほか、地表面粗度の平均化面積に関する考察を行った。

第3章、第4章では、風洞実験において、ターンテーブル上の粗度形状を変化させた時のターンテーブル上全体に作用する抗力を測定し、ターンテーブル上の粗度形状から得られる粗度パラメータと抗力の関係式を評価した。

第5章では、理論式および既往の経験式により、3, 4章で扱った抗力と風速分布、特にべき指数との関係式を導いた。

第6章では、第2～5章で得られた評価式を元に、東京23区における地表面粗度評価に対するマップを作成した。

最後に第7章において、得られた結論をまとめ、今後の展望を示す。

また参考として本論文の構成の模式図を図1.6にまとめる

研究チャート

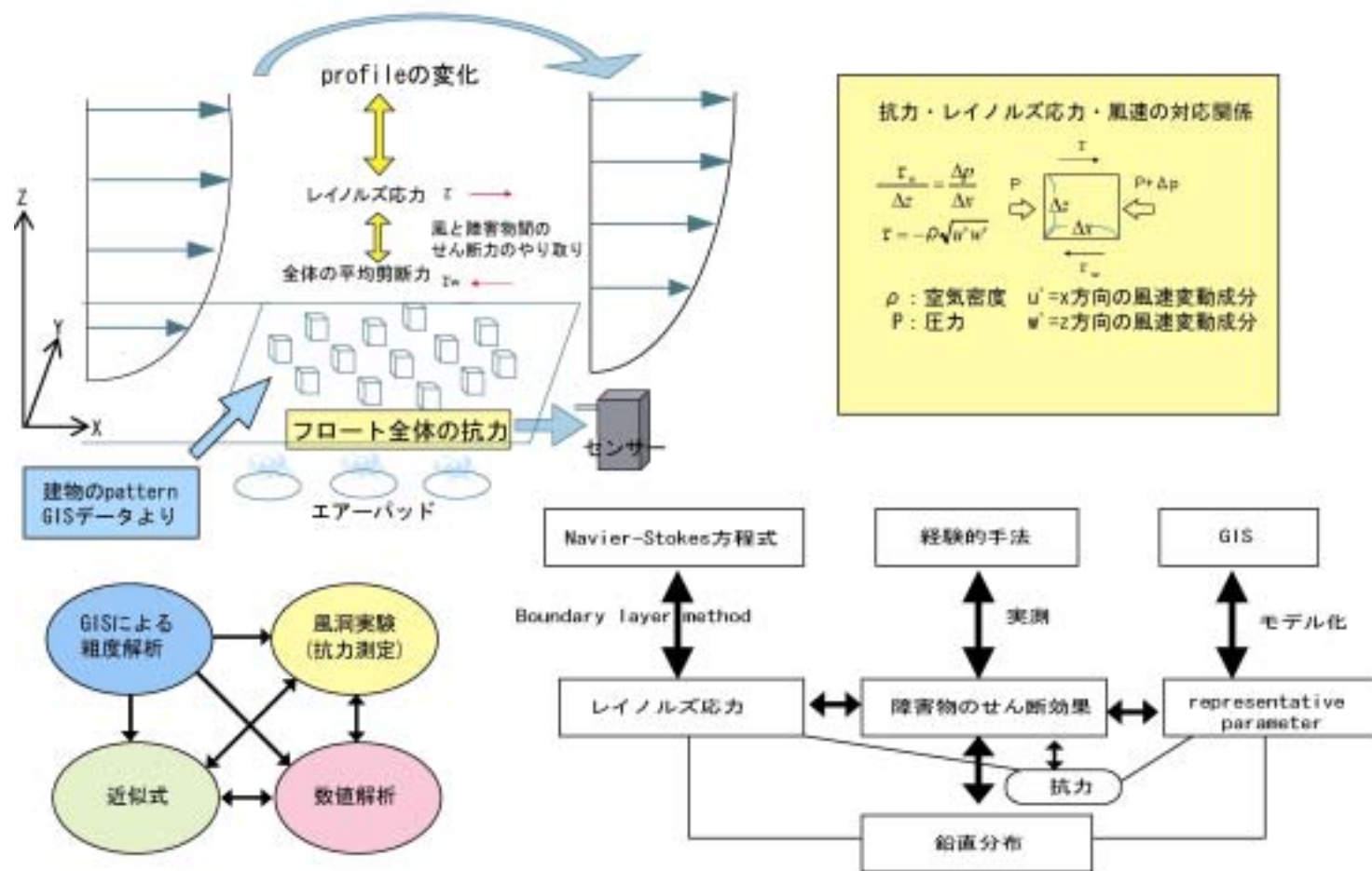


図 1.6 研究模式図

参考文献	
日本建築学会	「建築物荷重指針・同解説」 2004 改訂版
神田順他	「限界状態設計法の挑戦」 建築技術 2004
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
佐田	「火力発電所からの排ガス拡散の数値計算」 日本風工学会誌 vol75 1998 pp.13-18
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 vol97 2003 pp.121-136
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 ,2003,9,pp39-40
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
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
崔恒 神田順	「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
亀井勇 丸田栄蔵	「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
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

第 2 章

地理情報システムに基づく

東京 23 区における地表面粗度分析

2. 地理情報システムに基づく東京 23 区における地表面粗度分析

2. 1 既往の地表面粗度の定量的評価

現在の基規準において、設計風速は建築物周辺の地表面粗度を 3 ~ 5 段階に区分して評価されている。(第 1 章に示した建築学会の荷重指針では 5 段階に区分している。)しかし、それは定性的な評価であり、風向の影響を考慮する等詳細な風荷重を知る上で十分ではない。

近年の都市のマクロ的風況評価例とその問題点をあげる。

- ・田中らは風上側の粗度密度をパラメータとした近似式(亀井・丸田の式(5 章にて後述))を利用し、大阪市のメッシュデータを用いた平均風速鉛直分布特性(ベキ指数 および乱れ強さ)の解析手法を提案した。問題点としては、メッシュデータが粗度評価のためではなく、都市計画や課税用のものであるために厳密性にかけるということ、亀井・丸田の式の近似精度及び使用方法(適用範囲つまり吹送距離をどう考えるか)の問題があげられる。

- ・糸井らは、同じく亀井・丸田の式により GIS データからベキ指数 を求め、既往のドップラーソーダによる観測記録との比較を行った。糸井による比較範囲においては、亀井・丸田の式の粗度パラメータに用いる平均化距離(考慮する吹送距離に相当)を 5km、10km に対して計算を行っているが両者に大差がないことが述べられている。また、亀井・丸田の式における平面密度が 0.2~0.3 以上の場合が考慮されてないということを観測記録との相違によって示している。

- ・丸山敬らは空間平均操作を用いた k- モデルによってベキ指数の推定を行った。このモデルで用いる粗度パラメータは、平面密度 0.4 以上の場合について問題がある。また、空間平均操作に関しては、ある観測点に対し平均化面積(メッシュ)の大きさを変えることによって平面密度がどのように変化するかを考察し、メッシュを大きくし平面密度が一定となってしまう程度のメッシュの大きさを採用している。

また、市街地の地表面粗度評価という観点においては以下のような論文がある

- ・大熊らは、住居地域、商業・住居混在地域、商業地域に対し、現地調査を行い、建物高さと建物の長辺長さ、短辺長さを割り出した。高さ・面積の標準偏差の計算は行っているが、そのデータ自体は実験には用いられていない。

- ・田村らは、経年的な風速逓減に着目し、それは地表面粗度の増加が原因であるという仮説を立て、固定資産税台帳および航空写真により、建物密度(容積率)に対する考察を行い、経年的な風速逓減傾向と建物密度の逓増の間の相関関係を示した。

- ・奥田らは、航空機レーザを使ったりリモートセンシング技術による精度 10cm 単位の細密地表面粗度データを用い、首都圏 3 地域における一部の地表面粗度の定量的評価を行い、LES による風況分析の一例を示した。

- ・中村らは、東京都が作成した都市計画地理情報システムを利用し、各粗度パラメータについて解析を行った。平均風速鉛直分布には、建物密度以外に高さのばらつきが多分に影響する(例えば大熊)

という報告がなされてきているなか、ここでは高さのばらつきを 4 階以上の建物の割合で表す中高層化率という指標を提案し、分析している。また各粗度パラメータの相関などについては、観察されてはいるものの数値的な分析はあまり行われていない。

・丸山勇らは、地表面の凹凸を曲線に置き換え、その曲線の粗さにより、地表面粗度を置き換えるという提案を行っている。提案した粗度粗さは、一般的に考えられている粗度の評価と一致したという報告がなされている。

・丸山敬は、航空写真により作成された地図及び現地調査によって、地表面粗度を分析し、数値計算を行った。ここで、他論文と異なる点は、陸屋根と勾配屋根の区別、及び建築物の使用用途に応じて階高に変化を付けた点である。

以上が既往の地表面粗度の定量的評価である。最後に本章の背景としてまとめ、本章の目的を述べる。

これらの研究は、地表面をあるメッシュで分割し、そのメッシュ内における粗度の代表パラメータによりべき指数の推定を行ったものであるが、丸山にも考察されているように、当然メッシュの大きさにより推定値は異なる。本章では、既往の研究で取り入れられたパラメータを基に、メッシュの大きさによりどの程度粗度パラメータが変化するかを調べる。

また、幾何学的粗度長（亀井・丸田の式に用いられるパラメータ）をパラメータに空間平均操作を行うと、同じパラメータでもばらつきの度合いによって違った境界層の発達と考えられる。これは、大熊、丸山敬等による報告にもあるとおり、高さのばらつきが平均風速鉛直分布に大きな影響を及ぼすということと一致する。中村による東京 23 区の地表面粗度分析では中高層化率による高さのばらつきの評価は行われているが、ばらつきそのものの解析は行われていない。そのため、各メッシュの大きさ毎の建物のばらつきの評価も行う。

本章における内容は、中村による東京 23 区の地表面粗度分析と重複する点もあるが相違点を以下に記す。

- ・中村によるものは、東京都の数値地図情報を利用したものであり、本論文のものは ZENRIN による数値地図情報である。
- ・各粗度パラメータの相関を数値的に明らかにする
- ・各粗度パラメータの頻度分布と共に、その確率論的特性値を明らかにする

以上が主な相違点である。また、本章における解析結果は、第 3 章における全体抗力測定実験および第 6 章における地理情報システムを利用した平均風速鉛直分布評価にも利用する。

2.2 地表面粗度を表すパラメータ

2.1においては、度々粗度パラメータという言葉を用いたが、これは、地表面粗度を評価する上で、重要となるパラメータの事を指す。本節では、この粗度パラメータについて説明をする。本論文では、既往の研究で提案された粗度パラメータに加え、高さのばらつき、高さの平均値についても評価を行う。以下、粗度パラメータの定義について、式(2.1)～式(2.7)および図 2.1 に示す。

但し、式(2.7)における 3.5 という数字は、2.3.1で規定する本論における解析条件、平均階高は一律 3.5m とするということに起因する。

建蔽率(平面密度)	$R_m = \sum \frac{a_i}{A}$	(2.1)
建物面積の平均値	$MA_m = \frac{\sum a_i}{\max(i)}$	(2.2)
建物面積の標準偏差	$VA_m = \left(\frac{\sum (a_i - \text{mean}(a_i))^2}{\max(i)} \right)^{0.5}$	(2.3)
建物高さの平均値	$MH_m = \frac{\sum z_i a_i}{\sum a_i}$	(2.4)
建物高さの標準偏差	$VH_m = \left(\frac{\sum (z_i - MH_m)^2 \cdot a_i}{\sum a_i} \right)^{0.5}$	(2.5)
幾何学的粗度長 (建物密度・roughness 密度)	$h_m = \sum \frac{z_i a_i}{A}$	(2.6)
中高層化率	$r_m = \frac{\sum a(z_i - 4 \times 3.5)}{\sum a_i}$	(2.7)

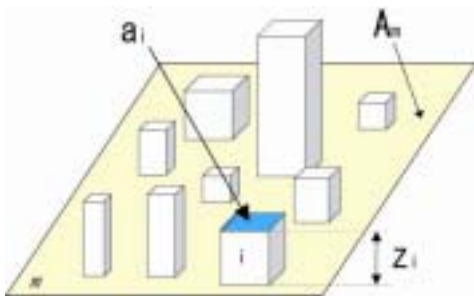


図 2.1 絵で見る粗度パラメータ

a_i : 建物の個別面積
 z_i : 建物の個別高さ
 A : メッシュの面積
 m : メッシュ番号

次に粗度パラメータの計算例を示す。

100m × 100mのメッシュ内に

i	a	z
1	50m ²	2F 建て
2	30m ²	2F 建て
3	50m ²	4F 建て
4	70m ²	6F 建て

の建物があるとする。

この場合実際に計算を行ってみると

$$R_m = \sum \frac{a_i}{A} = \frac{50 + 30 + 50 + 70}{100 \times 100} = 0.2$$

$$MA_m = \frac{\sum a_i}{\max(i)} = \frac{50 + 30 + 50 + 70}{4} = 50$$

$$VA_m = \left(\sum (a_i - \text{mean}(a_i))^2 \right)^{0.5} = \sqrt{\frac{(50 - 50)^2 + (30 - 50)^2 + (50 - 50)^2 + (70 - 50)^2}{4}} = 20$$

$$MH = \frac{\sum z_i a_i}{\sum a_i} = \left(\frac{50 \times 2 + 30 \times 2 + 50 \times 4 + 70 \times 6}{50 + 30 + 70 + 50} \right) \times 3.5 = 13.65$$

$$\begin{aligned} VH_m &= \left(\frac{\sum (z_i - MH_m)^2 \cdot a_i}{\sum a_i} \right)^{0.5} \\ &= \sqrt{\frac{(2 - 3.9)^2 \times (50 + 30) + (4 - 3.9)^2 \times 50 + (6 - 3.9)^2 \times 70}{50 + 30 + 70 + 50}} \times 3.5 \\ &= 2.99 \times 3.5 = 10.465 \end{aligned}$$

$$h_m = \sum \frac{z_i \times a_i}{A} = \frac{2 \times 3.5 \times (50 + 30) + 4 \times 3.5 \times 50 + 6 \times 3.5 \times 70}{100 \times 100} = 2.73$$

$$r_m = \frac{\sum a_i (z_i - 4 \times 3.5)}{\sum a_i} = \frac{50 + 70}{50 + 30 + 50 + 70} = 0.6$$

2.3 東京23区における地表面粗度分析

2.3.1 解析手法

本節では、GISにて1998年度版の電子住宅地図ZMAPTOWN（ゼンリン）を用い、東京23区を100m、200m、500m、1km、2kmのメッシュに分け、そのデータをプログラムにより計算し、各粗度パラメータの平均値・分散・尖度・歪度を解析した。メッシュ分割のイメージを図2.2に示す。解析を行う内容は、2.2節であげた粗度パラメータのうち、建蔽率、幾何学的粗度長、各メッシュにおける建物面積と高さのばらつき、中高層化率である。なお、本データには建物の階数データしかないため、建築物を平均階高は3.5mと仮定し、また10m以下の建築物に関しては階数のデータがない建物が多く、階数データがない建物に関しては一律に高さ7m（2階建て）と仮定した。また、標高データが含まれていないので標高は考慮していない。本論文では公園や海岸等の粗度評価は検討にいたっていないこともあり、各粗度パラメータの頻度分布とその確率論的特性値を求める場合には、1メッシュの建蔽率が1%以下のものに関しては除外した。（地図上にマッピングをする際には除外していない。）また、中村らの行った粗度分析ではメッシュにより分割されてできた微小建物を除外して分析を行っているが、空間平均操作時にはメッシュによって分割された微小建物も含まれるという観点から微小建物の除外は行わなかった。

2.3.2 解析結果

メッシュの大きさによる各粗度パラメータの分布の変化について、建蔽率の場合を図2.3に、建築高さの平均値の場合を図2.4に、建築高さの標準偏差の場合を図2.5に、幾何学的粗度長の場合を図2.6にそれぞれ示す。

また、各粗度パラメータの分布のメッシュの大きさごとの確率論的特性値（平均値、標準偏差、尖度、歪度、最大値）について、表2.1～表2.4に示す。



図 2.2 メッシュ分割イメージ図

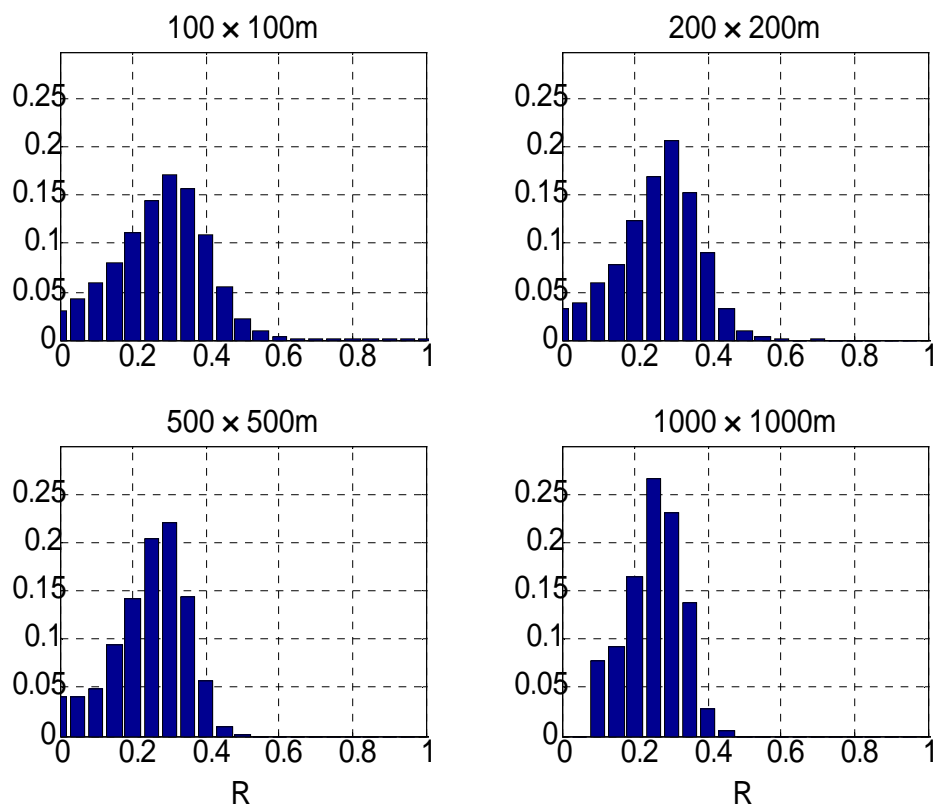


図 2.3 建蔽率のヒストグラム

表 2.1 建蔽率の確率論的特性値

	100m	200m	500m	1000m
平均値	0.30	0.29	0.27	0.28
標準偏差	0.12	0.11	0.10	0.08
尖度	3.17	2.86	2.92	2.63
歪度	-0.08	-0.40	-0.58	-0.29
最大値	1.00	0.72	0.54	0.49

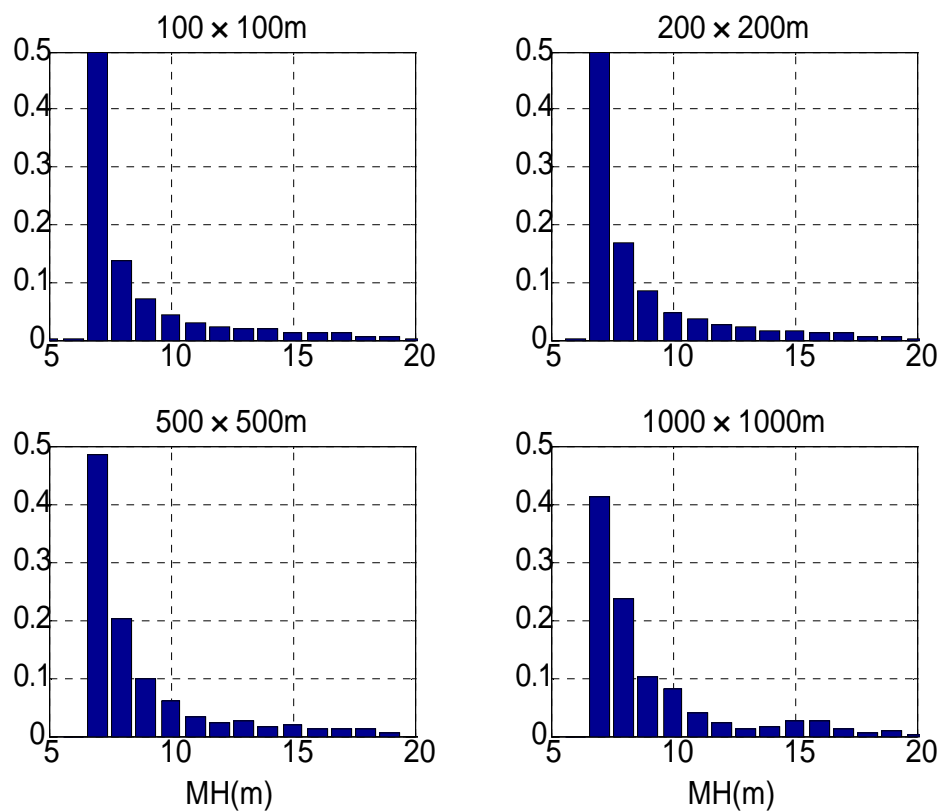


図 2.4 建物高さの平均値のヒストグラム

表 2.2 建物高さの平均値の確率論的特性値

	100m	200m	500m	1000m
平均値	9.51	9.67	9.76	9.61
標準偏差	5.30	5.09	4.36	3.32
尖度	59.87	60.58	20.16	11.50
歪度	5.70	5.72	3.55	2.61
最大値	114.00	112.00	46.60	30.80

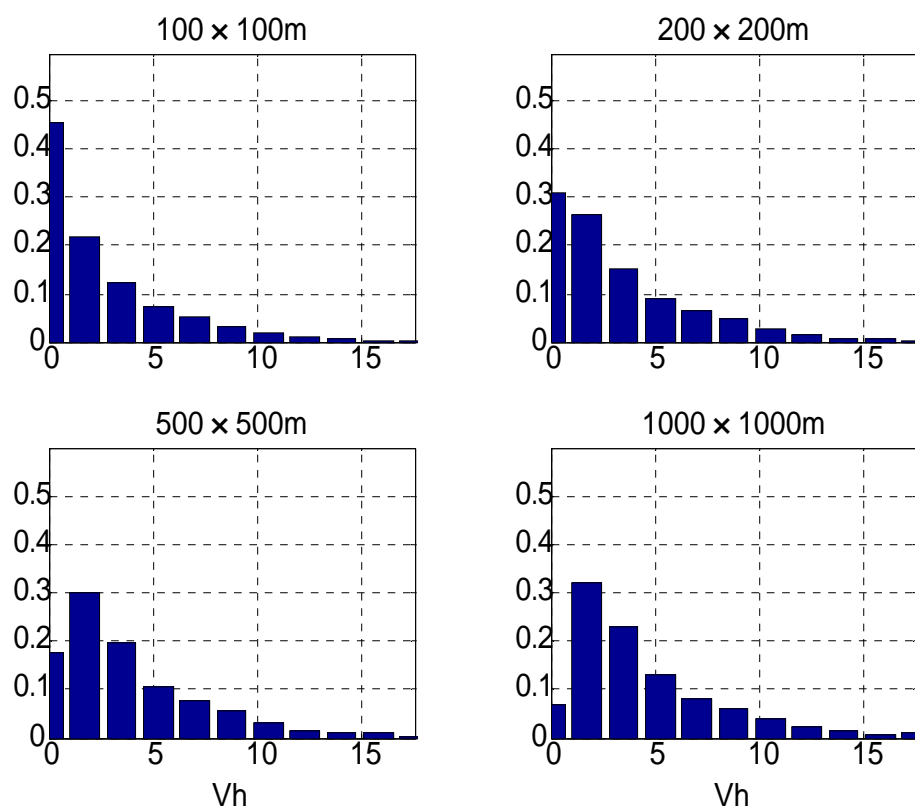


図 2.5 建物高さの標準偏差のヒストグラム

表 2.3 建物高さの標準偏差の確率論的特性値

	100m	200m	500m	1000m
平均値	3.20	4.09	4.95	5.41
標準偏差	3.73	4.05	4.48	3.88
尖度	21.43	19.66	18.77	6.82
歪度	2.89	2.85	2.97	1.75
最大値	59.70	53.40	49.50	25.50

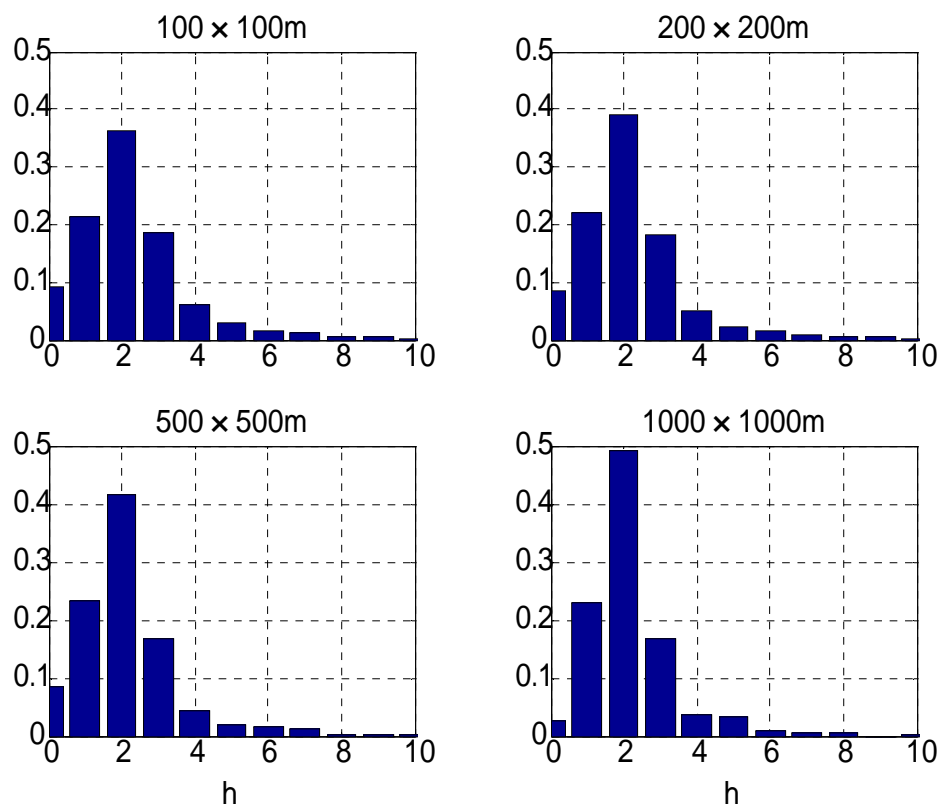


図 2.6 幾何学的粗度長のヒストグラム

表 2.4 幾何学的粗度長の確率論的特性値

	100m	200m	500m	1000m
平均値	2.85	2.73	2.58	2.64
標準偏差	2.16	1.74	1.42	1.16
尖度	74.92	24.19	11.26	11.14
歪度	5.51	3.20	1.99	2.16
最大値	63.30	25.70	13.00	10.20

また、500m×500mメッシュにおける各粗度パラメータの相関係数を表 2.5 に示す。

表 2.5 粗度パラメータ間の相関係数

	R	MH	VH	h	r
R	1	-0.1134	-0.0502	0.6816	-0.0476
MH	-0.1134	1	0.8798	0.5447	0.88
VH	-0.0502	0.8798	1	0.5223	0.7478
h	0.6816	0.5447	0.5223	1	0.592
r	-0.0476	0.88	0.7478	0.592	1

東京 23 区を、千代田区を中心として、東西南北に分けた場合の幾何学的粗度長の分布を図 2.7 に示す。(このケースに関しても 500m×500m のメッシュ)

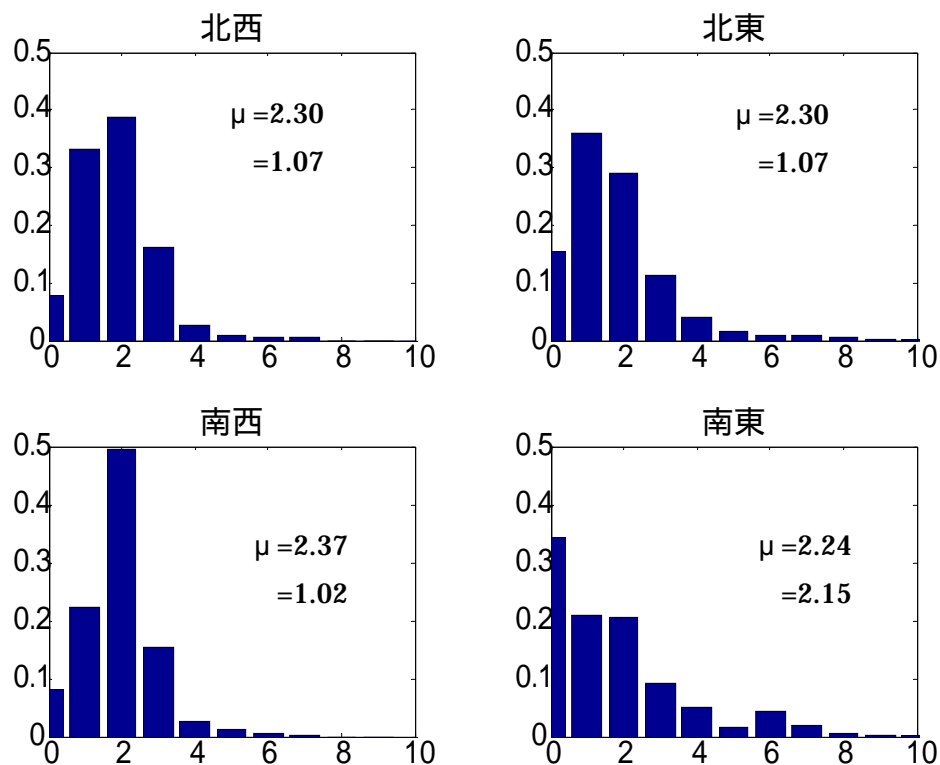


図 2.7 東西南北四分割時の幾何学的粗度長の分布

2.3.3 考察

- ・各粗度パラメータの分布における最大値は、メッシュを大きくすると単調減少する。
メッシュが細かい方が局所的な粗度をとらえるということである。
- ・幾何学的粗度長に関して、局所的に大きな値を除き、メッシュの大きさによらず概ね似たような分布を示した。
- ・メッシュ内における建物のばらつき具合の指標となる建物面積の標準偏差および建物高さの標準偏差は、100m、200m のメッシュにおいては、メッシュを建物がほぼ埋め尽くすケースが多くなるので 0 近辺の頻度が多い
- ・東京 23 区において千代田区を中心として東西南北に分けた場合、その幾何学的粗度長の分布には西ブロックに高層建物が少ないという点を除いては概ね似たような分布を示した。例えば崔⁵⁾によれば東京都においては風向範囲によりべき指数の違いがあると言われている。べき指数評価式として亀井・丸田の近似式を用いれば東西南北方向ともに、似たようなべき指数となることが予想されることと相反する。原因として考えられるのは、近隣の粗度ではなく、遠方からの流入条件の違いによりべき指数の違いが生まれている可能性である。また平均値では相違ないが、建物容積の分布に相違があるので既往の研究における風上側を一様に平均化する近似の問題が指摘できる。
- ・既往の中村⁴⁾の研究では高さのばらつきを考慮するため中高層化率を提案している。その中高層化率と建物高さの平均値と建物高さのばらつきの相関は非常に高い値を示すことから建物高さの平均値によって、より簡易的にばらつきを評価できる可能性が確認できた。付随的であるが、建物高さの平均値と建物高さの標準偏差をプロットしたものを図 2.8 に示す。相関係数は、高いものの高い相関性を有するとは言い難いことはわかる。

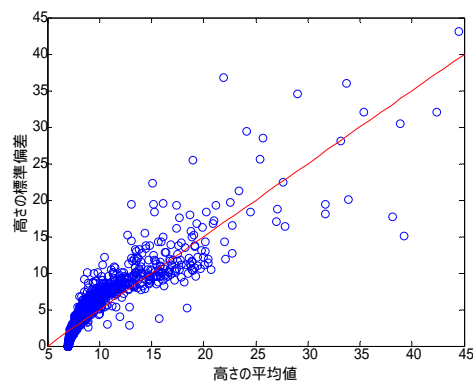


図 2.8 高さの平均値と標準偏差の関係

2.4 まとめ

本章では、地表面粗度分析に関する既往の研究をまとめたうえで、そこで欠けている高さのばらつきの評価および、各粗度パラメータの分布の分析を行った。

既往の研究で平均風速鉛直分布に対する影響が大きいと報告されている高さのばらつきに対する評価は、他の粗度パラメータのうち、既往の研究で用いられているパラメータである建蔽率、高さの平均値、幾何学的粗度長、中高層化率だけでは評価できないことを数値的に示すことが出来た。また、本章においては東京 23 区における粗度パラメータのマップを示さず、第 6 章において、べき指数の推定マップ等とあわせて示すこととする。

参考文献	
菅野宏紀他	「地理情報システムに基づく地表面粗度の空間平均特性」日本建築学会学術講演梗概集構造 ,2004,pp41-42
田中洋他	「都市域における風特性マップの作成」第 15 回風工学シンポジウム論文集,1998,pp143-148
糸井達哉他	「地理情報システムを用いた地表面粗度の定量的評価に関する予備研究」日本風工学会誌,vol95,2003,pp13-14
亀井勇 丸田栄蔵	「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
丸山敬	「市街地上空における気流性状の数値計算その 1、その 2」 日本建築学会構造系論文報告集第 474 号,1995,pp49-58 日本建築学会構造系論文報告集第 513 号,1998,pp59-64
	「複雑な粗度形状をもつ粗面の粗度評価についてその 1、その 2」 京都大学防災研究所年報第 33 号 B-1,1990,pp1-12 京都大学防災研究所年報第 34 号 B-1,1991,pp1-8
	「市街地上空の乱流境界層のシミュレーション」 京都大学防災研究所年報第 35 号 B-1,1992,pp1-15
中村修	「東京 23 区の土地利用数値情報に基づく地表面粗度としての街並実状分析」 日本風工学会誌,No84,2000,pp59-69
田村幸雄他	「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報告集第 400 号,1989,pp101-111
崔恒 神田順	「高密度市街地における平均風速鉛直分布に関する予備的検討」日本建築学会梗概集,1986,pp65-66
奥田康雄他	「都市の地表面粗度評価のための細密地表面粗度データの利用」第 17 回風工学シンポジウム論文集,2002,pp13-18
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 9 回風工学シンポジウム論文集,1986,pp61-66
丸山勇祐他	「地表面凹凸の数値化に関して - 岡山市外の実測結果への適用 」日本風工学会誌,vol71,1997,pp35-36

第 3 章

全体抗力測定実験

3．全体抗力測定実験

本章では、境界層の発達の原因となる風と地表面との間に発生するせん断力を評価する事を目的とする。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、粗度形状によって変化する抗力を調べる。

3．1 はじめに

地表面に発達する乱流境界層は、地表面との摩擦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。逆に考えると、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って、地表面と空気との間に発生するせん断力を求めることができるということである。以下、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平面密度および風向方向に対する角度を変え、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。その実験結果を粗度要素の抵抗を考慮した k -モデルに当てはめ、数値計算を行った。Y.Jia(1998)は、立方体粗度ブロックを用い、平面密度を変え、千鳥状・格子状に並べ、抗力の変化を調べた。

以上、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、高さ方向の変化を扱った論文は見当たらない。また、第2章でも述べた高さ方向のばらつきに対する抗力の変化についても評価を試みる。加えて、参考文献の中で特に丸山によるものは、床面に発生する抗力について多角的に、詳細に分析が行われているので参照されたい。

3.2 実験概要

3.2.1 風洞設備

実験は、東京大学工学系研究科建築学専攻所有の風環境シミュレータ風洞内にある小風洞を用いて行った。この風洞は図 2.1 に示すように、ゲッチングン型回流式風洞であり、測定洞はターンテーブル中心まで長さ 4200mm×幅 1000mm×高さ 700mm である。主な性能を表 3.1 に、風洞の図面を図 3.1 に示す。風洞に関する紹介は斉藤ら（1991）によりされている。但し、本風洞は竣工当時エッフェル型風洞であったが、その後ゲッチングン型に、またトラバース装置についても手動から電動に変わっている。

次に全体抗力測定装置の模式図を図 3.2 に示す。

表 3.1 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	17.5m	直径	1.2m
測定部断面	1.0m×0.7m	流量	10.5m ³ /s
測定洞長さ	5.1m	電動機	
縮流比	4:1	出力	直流電動機
風速範囲	0.5～15.0m/s	回転数	35～1150rpm

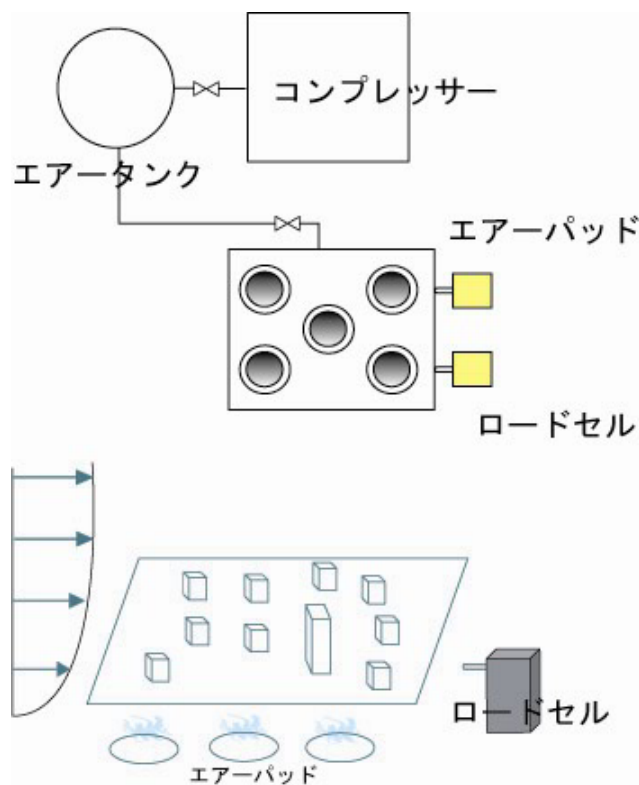


図 3.2 実験模式図

3.2.2 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、風洞内である部分（以下フロート）を浮かせ、フロート部にかかる下面との抵抗をほぼゼロとした状態で、フロート上の粗度に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る装置である。フロート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。測定装置の成り立ちについて、順を追って説明する。

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。

そのエアーをエアークッションに流す。エアークッションは鋳物で特殊加工されたものであり、フロートは、その上の粗度密度によるものの、約 $100\mu\text{m}$ 安定して浮上する。エアーの流量によるフロートの振動は、風力による振動に比べ十分小さく、抗力測定に対して問題はないと言える。

エアークッションは 5 個設置しており、それぞれにエアークッション用減圧弁がついており、5 つの口から出るエアーの流量は調整できる。フロート上の粗度形状が一樣でない場合には、この減圧弁により流量を調整することで、フロートの浮きを平行に保つことにより、主流方向の抗力を正確に測ることができる。

風速ゼロの状態において、フロート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。

風を吹かせると、風とフロート全体の間には摩擦力が発生し、フロート全体に加わる抗力が 2 個付いているロードセルの出力の和として得られる。

本実験では、主流方向の抗力しか計測していないが、丸山の実験によると主流方向の抗力に比べ、主流直角方向の抗力は約 5 % 程度であり、またフロート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おり、本実験の測定方法に問題はないと考えられる。

抗力測定装置の写真を図 3.3 から図 3.6 に示す

また、測定装置の性能試験の一環として行った同様の粗度形状に対して、風速を変化させたときに、抗力 F は速度圧に比例するのかを確認したものを図 3.7 に示す。

但し、抗力 F 基準風速 U_0^2 とともに最大のもので基準化してある。



図 3.3 エアーパッド



図 3.4 エアーパッド減圧弁



図 3.5 ロードセル設置状況



図 3.6 フローティングテーブル

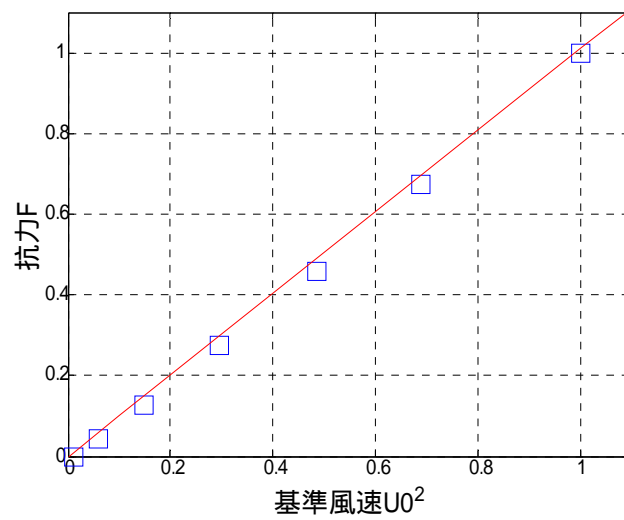


図 3.7 抗力と基準風速の関係

3.2.3 床面抗力とせん断力の関係

床面抗力とせん断力の関係を以下に示す。但し、本実験においてフロート上のラフネスは、千鳥状に配置されており、その場合を想定したものである。フロート全体に作用する抗力 F とせん断力 τ_w の関係、またそれに伴う関連変数を図 3.7 にまとめる。

以下、実験に用いる変数の関係式を示す。

床面抗力は次式で表される床面抗力係数 C_D により比較する。

$$C_D = \frac{\tau_w}{Q_0} \quad (3.1)$$

基準速度圧 Q_0 は、フロート全縁、境界層上部($x=3500, y=200\text{mm}, z=2500\text{mm}$)に設置したピトー管により求めた。

$$Q_0 = \frac{1}{2} \rho U_0^2 \quad (3.2)$$

但し ρ (空気密度)=1.185 とした

フロートの受ける力 F は

$$F = N f_{roughness} + \tau_{surface} (S_0 - N S_r) \quad (3.3)$$

但し $f_{roughness}$: 粗度要素一個が受ける力

(= 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 : フロート上の粗度要素の個数

S_0 : フロートの面積 S_r : 粗度ブロックの一面の面積

一方、千鳥上配列での粗度要素一個あたりの床面積 S より求まるフロート全体の平均せん断力 τ_w は

$$\tau_w = \frac{f_{roughness}}{S} + \tau_{surface} (S - S_r) \frac{1}{S} \quad (3.4)$$

(3.3)式の両辺を NS で割ると、

$$\frac{F}{NS} = \frac{f_{roughness}}{S} + \tau_{surface} \left(\frac{S_0}{NS} - \frac{S_r}{S} \right) \quad (3.5)$$

(3.4)、(3.5)式より τ_w は

$$\tau_w = \frac{F}{NS} + \tau_{surface} \left(S - \frac{S_0}{N} \right) \frac{1}{S} \quad (3.6)$$

ここで、 $\tau_{surface}$ は、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小さいと仮定し、粗度形状における $\tau_{surface}$ の差を無視し、 $\tau_{surface}$ をフロート上に粗度要素が存在しない場合の、床面摩擦力 $\tau_{surface0}$ によって一律に表すと

$$\tau_{surface} = \tau_{surface0} = \frac{F_{surface0}}{S_0} (= C_{surface0} Q_0) \quad (3.7)$$

結局、求めるべき床面抗力係数 C_D は、式(3.1)、(3.6)、(3.7)より

$$C_D = \frac{F}{NSQ_0} + C_{surface0} \left(1 - \frac{S_0}{NS} \right) \quad (3.8)$$

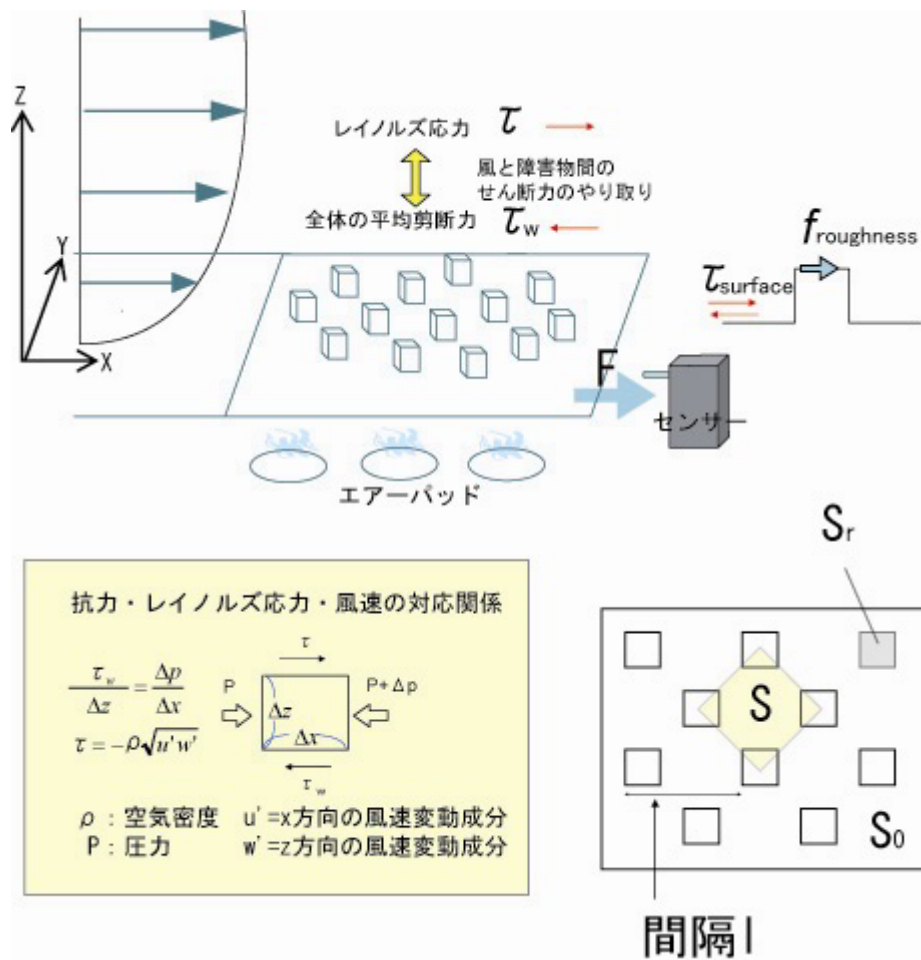


図 3.7 実験における変数の図示

3.2.4 実験手法

本実験では、 $30\text{mm} \times 30\text{mm} \times 30\text{mm}$ の立方体粗度ブロックを最小単位として、配列形状を千鳥上配列とし、平面密度・平均高さ・高さの標準偏差を変化させることにより床面抗力の変化を調べた。丸山(1989)による市街地模型に関する抗力測定実験においては、市街地模型に対する抗力係数は、平面密度に関してほぼ千鳥上配列によって近似可能だと考えられる。また、菅野(2003)による1次元不規則粗度に対する風速プロファイルもまた、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いう結果が出ている。したがって、本実験において、平面密度の再現方法に関し、配列形状を千鳥上配列に限り行ったことはそれなりの妥当性を持つと考えられる。

抗力測定時には、フロート上とフロート前縁フロート一枚分(900mm)の部分について粗度形状を変化させ、同様の接近流に対して、抗力の変化を測定した。測定洞内の粗度ブロックの配置を図 3.8 に示す。但し、フロート前縁フロート一枚分(900mm)の部分に関しては、フロート上と同密度の千鳥上配列（一辺 30mm の立方体粗度ブロックによる）とし、高さはすべてブロック一個分(30mm)とした。

図 3.9 に流入風の性状を示す。平均風速の鉛直分布に関しては、ベキ指数 0.33 でほぼ近似が可能である。乱れのスケールに関しては自己相関関数の積分により求めた。また荷重指数値とあわせて考えると自然風の $1/1000 \sim 1/500$ 程度の乱れが再現されていると推定される。

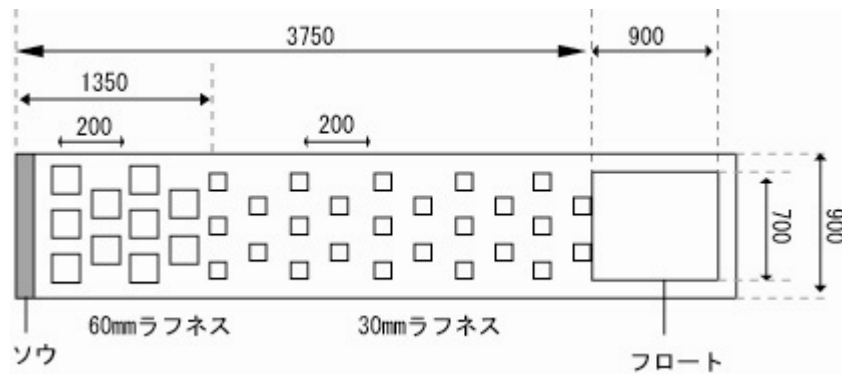
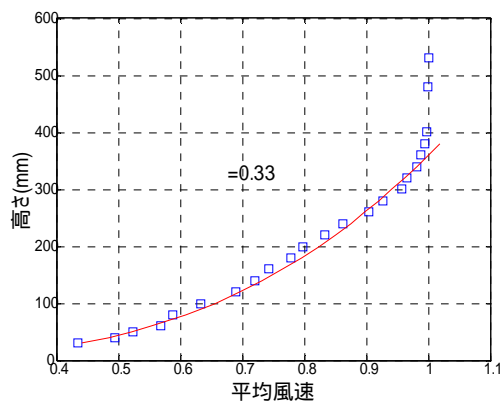
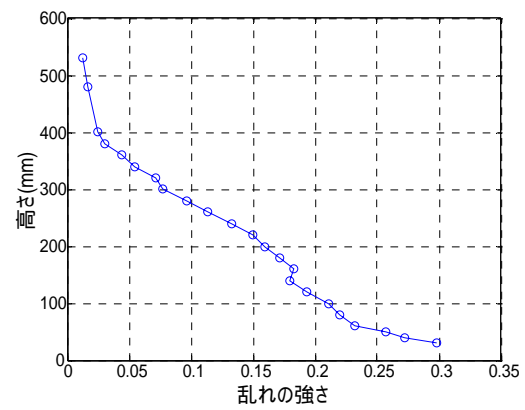


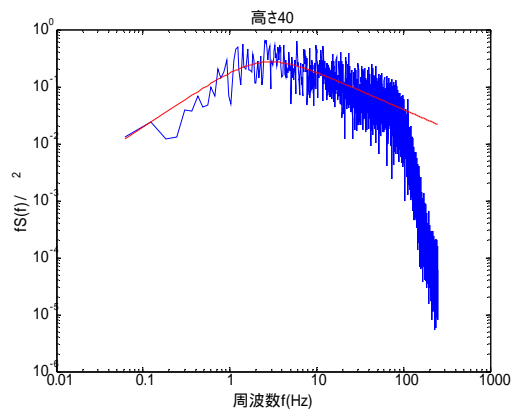
図 3.8 測定洞粗度ブロック設置状況



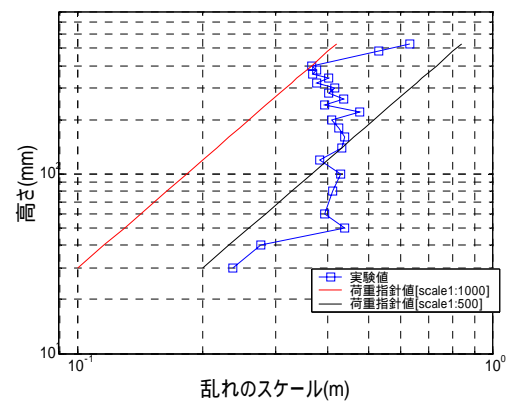
(a) 平均風速 Mean wind speed



(b) Turbulence intensity



(c) パワースペクトル Power spectrum



(d) 乱れのスケール Turbulence scale

図 3.9 接近流の気流性状

3.3 粗度パラメータの違いによる抗力の変化

3.3.1 高さ一定の場合

30mm×30mm×30mm の立方体粗度ブロックを千鳥上配列に並べ、平面密度を 2%から 40%まで変化させた時の床面抗力の変化を調べた。平面密度と千鳥上配列における粗度間隔の組を表 3.2 に示す。同様の測定結果は、丸山(1989)および Y.Jia(1998)によるものがあるので、抗力係数の形で合わせて比較したのを図 3.10 に示す。

抗力係数 C_D は平面密度 $R=0.2 \sim 0.3$ で最大値を取ったあとその後減少するという他の研究と同様の現象が確認できた。この現象は密度が大きくなると、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ってしまうこと、また乱れの渦が、粗度ブロック間の隙間に入れなくなるためだと考えられる。また、他実験との抗力係数の絶対量の違いは、一点目に実験スケール及び使用した粗度ブロックの大きさの違い、2 点目に境界層流の違いがあげられる。

表 3.2 平面密度と間隔の組

密度(%)	間隔(mm)		密度(mm)	間隔(%)
2	300		18	100
4.5	200		25	85
8	150		32	75
11.5	125		40	67.5

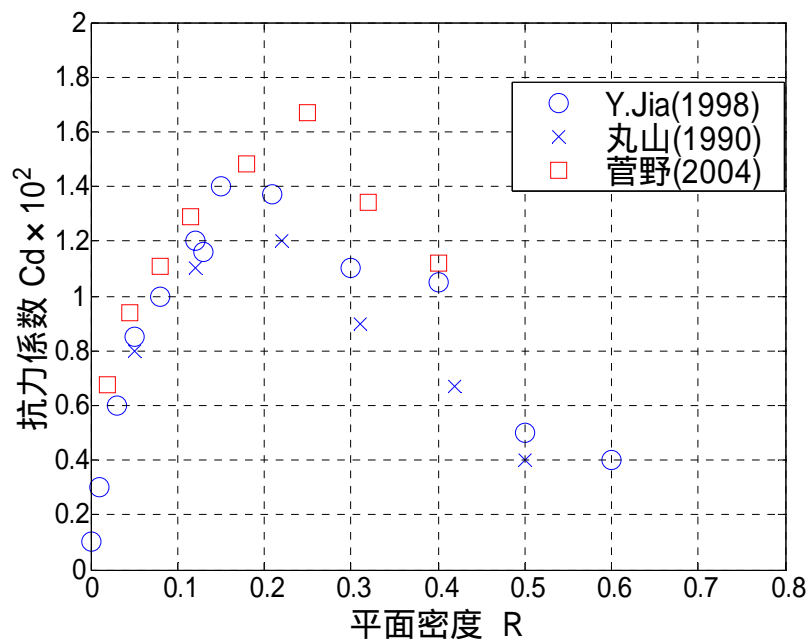
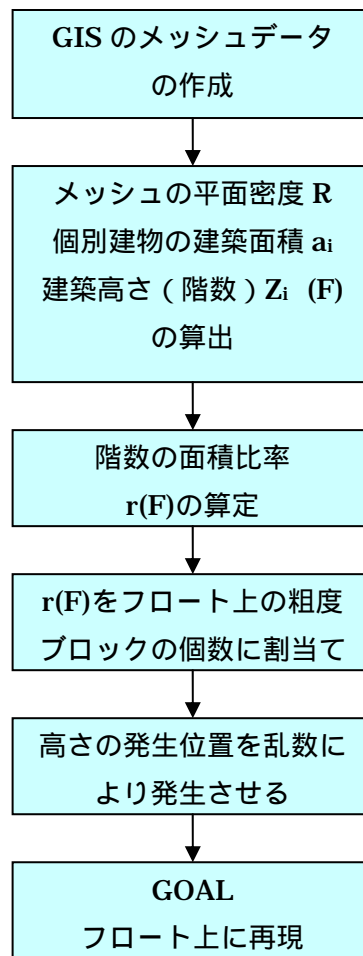


図 3.10 抗力係数と平面密度 R の関係

3.3.2 高さ変化を加えた場合

次に同様の一辺 30mm の立方体粗度ブロックを使い、平面的には千鳥上配列を用いて高さ方向に変化を加えた粗度形状に対する抗力の変化を調べた。平面密度については、高さ方向一定の場合と同様に 2% から 40% 変化させた。高さ方向の変化については、東京 23 区の GIS データ 100m × 100m メッシュのものから抽出する。本モデルでは、実市街地における 2 階立て (7m) を実験における 30mm に割り当てる。スケールの問題については、5 章 5.3.3 節にて後述する。GIS の市街地データモデル化フローについて図 3.11 に示す。また、このフローチャートの計算例を以下に示す。



但し、階数の面積比率
$$r(F_i) = \frac{\sum a_i}{\sum_{F=Fi} a_i}$$

図 3.11 GIS 市街地データのモデル化フロー

1. 100m×100m のメッシュデータに以下の4つの建物があったとすると

建築面積 a	階数 F
5m ²	2
3m ²	2
5m ²	4
7m ²	6

$$R=(5+3+5+7)/100=20\%$$

$$r(2F)=(5+3)/(5+3+5+7)=40\%$$

$$r(4F)=(5)/(5+3+5+7)=25\%$$

$$r(6F)=(7)/(5+3+5+7)=35\%$$

2. r(F)をフロート上の粗度ブロックの個数に割当て

R=20%の場合 $1m \times 1m \times 0.2 \div (4cm \times 4cm) = 125$ 個から

2F 125 個 $\times 40\% = 50$ 個

4F 125 個 $\times 25\% = 31.25$ 個 31 個

6F 125 個 $\times 35\% = 43.75$ 個 44 個

3. 高さの発生位置を乱数により発生させる

125 個の粗度ブロックに対し、乱数を割り当てる

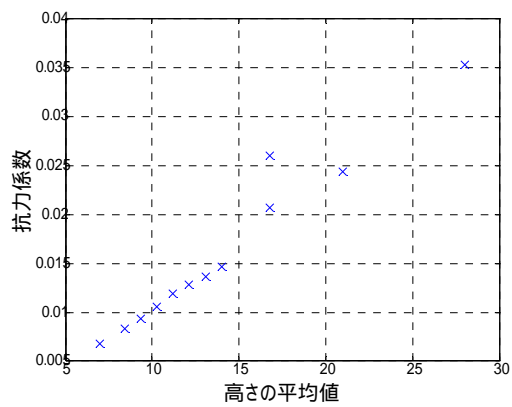
place=random(125)

上位 44 個の位置に対し 6F(粗度ブロック 3 個)

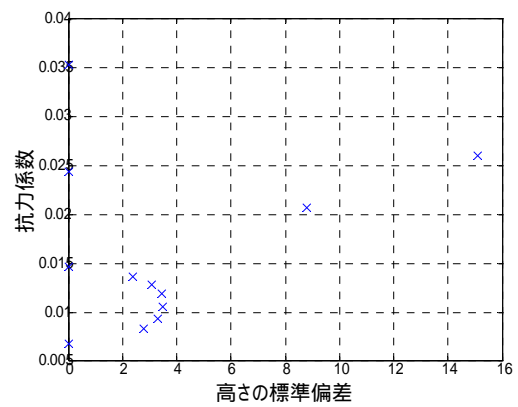
中位 31 個の位置に対し 4F(粗度ブロック 2 個)

中位 31 個の位置に対し 4F(粗度ブロック 1 個)を割り当てる

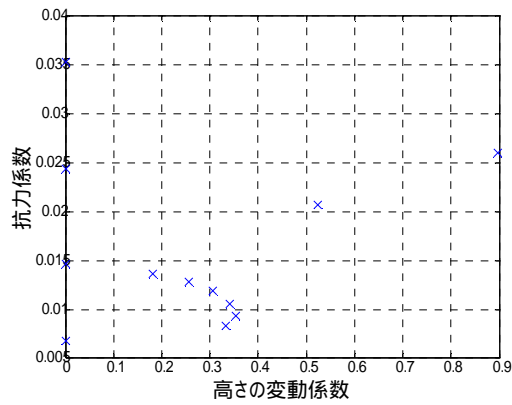
以上のようにして、GISによる市街地データをメッシュ上にモデル化した。但し、階数が奇数の場合、本モデルでは立方体粗度ブロック一個分の高さを2階建て分と規定しているので問題が生じてしまう。そこで、奇数部分については、一度、r(F)によって粗度ブロックの個数に割り当てた上で、粗度高さの平均値および粗度高さの標準偏差が一致するようなすべての粗度高さが偶数となるようなケースに置き換えた。この手法を用いて、実験したケースについては巻末の付録に示す。平面密度については高さ一定の場合と同様に2%,4%,8%,12%,18%,25%,32%,40%の8ケースである。また実験ケースの8割はGISにより求められたデータであるが、残り2割は粗度形状に対する特徴を調べるために人工的に作ったデータである。各平面密度にわけて、高さの平均値、高さの標準偏差、高さの変動係数、中高層化率に対する抗力のプロットを図3.12～図3.19に示す。加えて、全データに関して、高さの平均値、高さの標準偏差、変動係数、中高層化率、幾何学的粗度長に対する抗力のプロットを図3.20に示す。



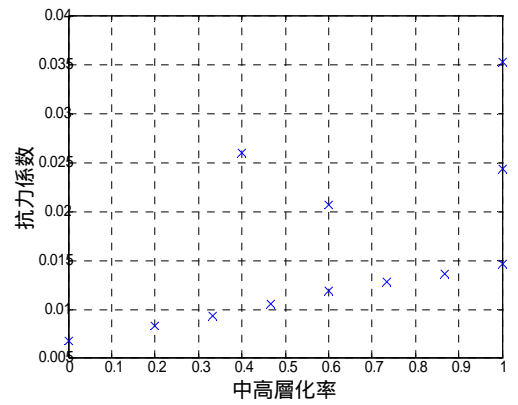
(a) 高さの平均値と抗力係数の関係

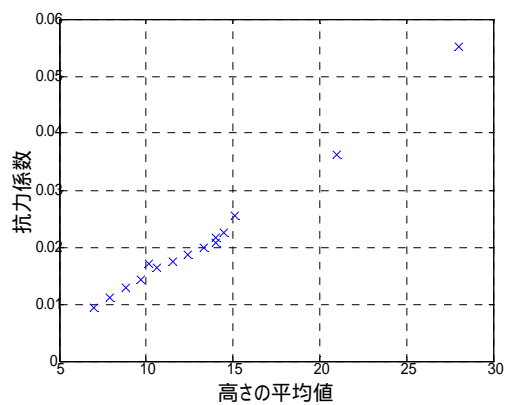


(b) 高さの標準偏差と抗力係数の関係

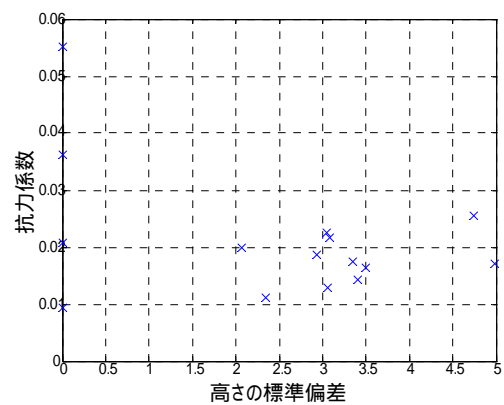


(c) 高さの変動係数と抗力係数の関係

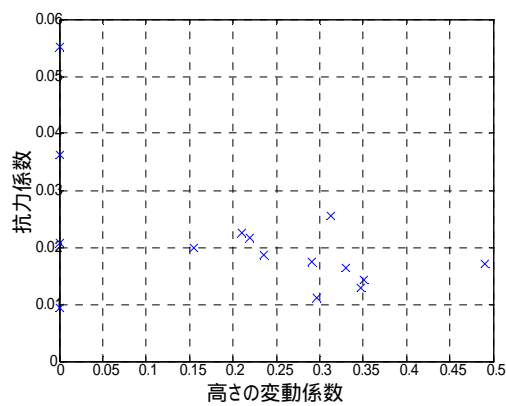




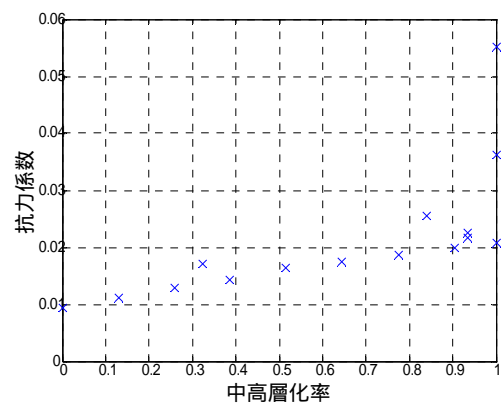
(a) 高さの平均値と抗力係数の関係



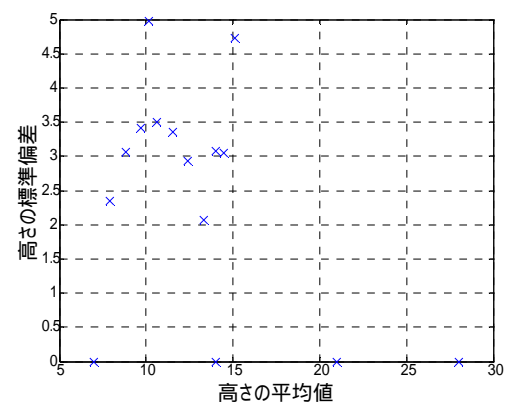
(b) 高さの標準偏差と抗力係数の関係



(c) 高さの変動係数と抗力係数の関係

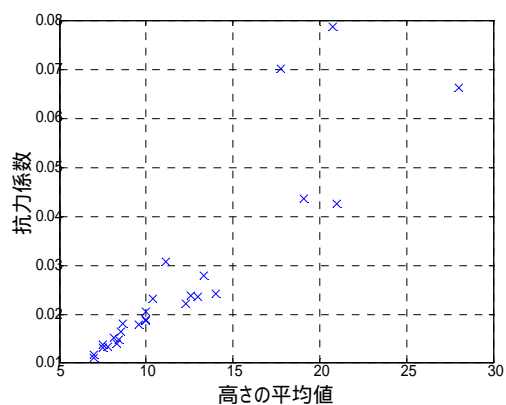


(d) 中高層化率と抗力係数の関係

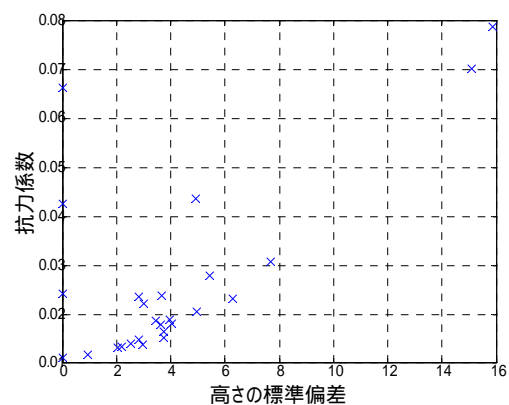


(e) 高さの平均値と標準偏差の組

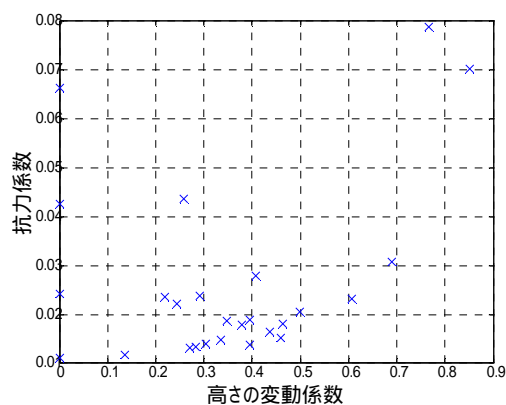
図 3.13 平面密度 4% の場合



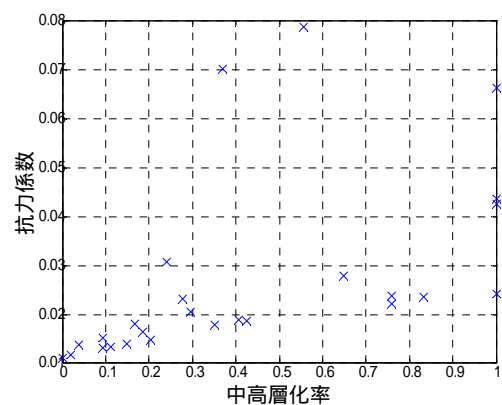
(a) 高さの平均値と抗力係数の関係



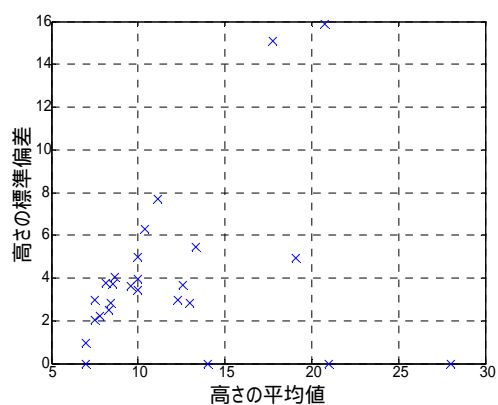
(b) 高さの標準偏差と抗力係数の関係



(c) 高さの変動係数と抗力係数の関係

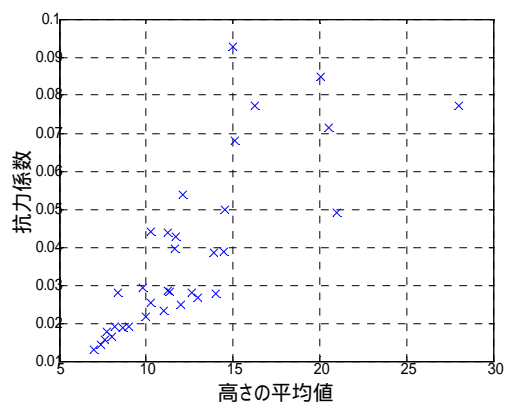


(d) 中高層化率と抗力係数の関係

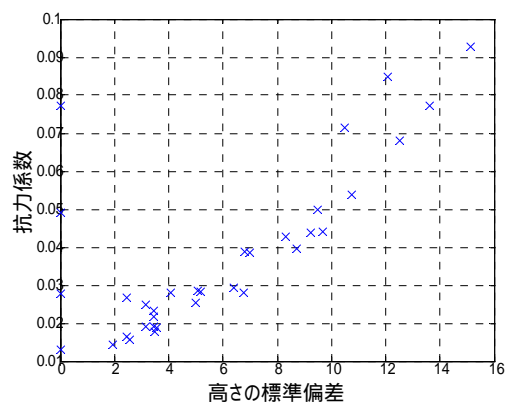


(e) 高さの平均値と標準偏差の組

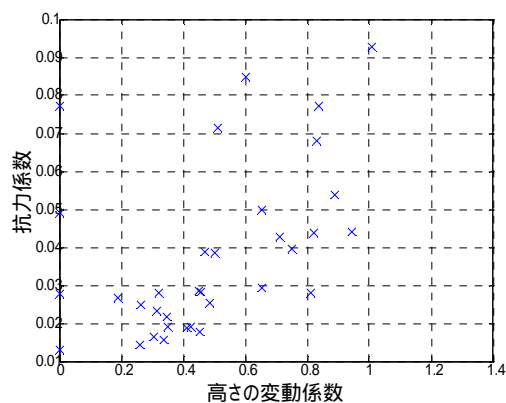
図 3.14 平面密度 8% の場合



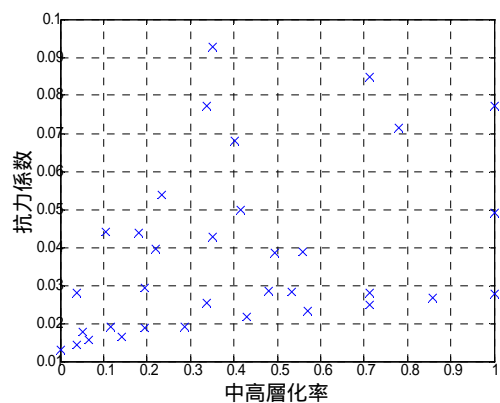
(a) 高さの平均値と抗力係数の関係



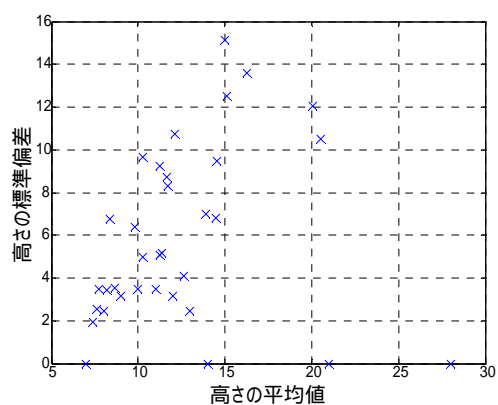
(b) 高さの標準偏差と抗力係数の関係



(c) 高さの変動係数と抗力係数の関係

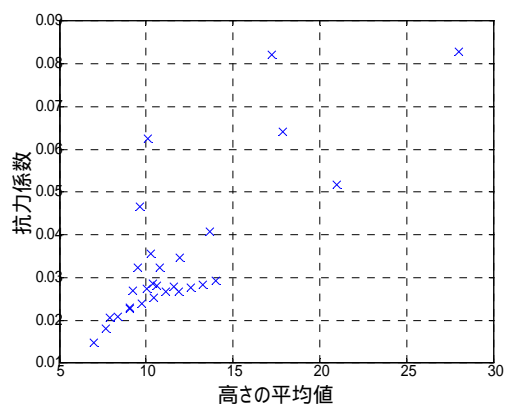


(d) 中高層化率と抗力係数の関係

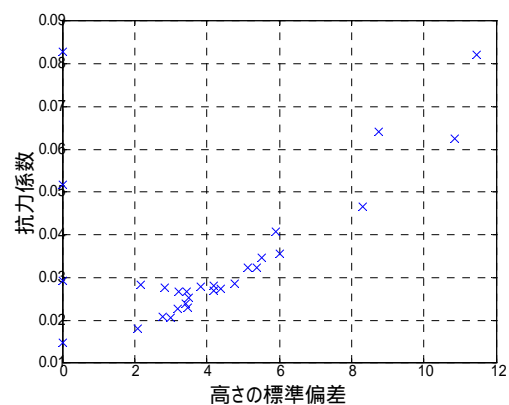


(e) 高さの平均値と標準偏差の組

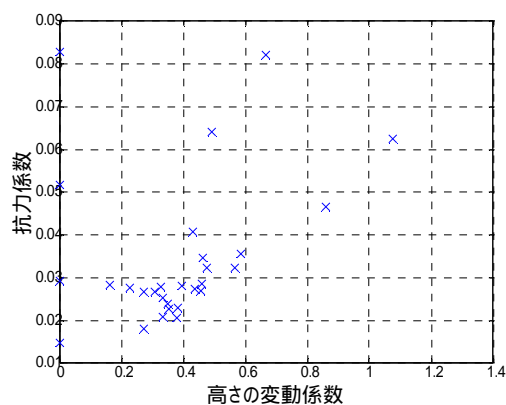
図 3.15 平面密度 12% の場合



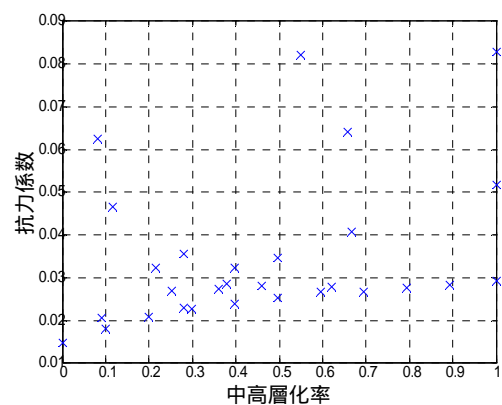
(a) 高さの平均値と抗力係数の関係



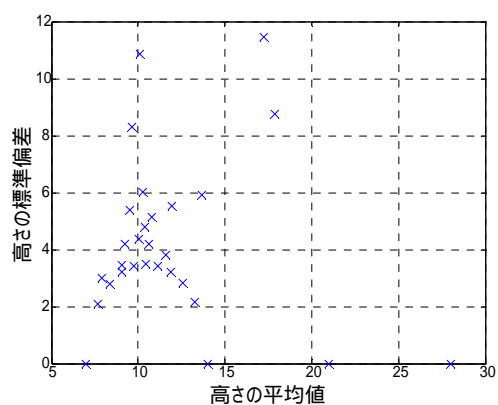
(b) 高さの標準偏差と抗力係数の関係



(c) 高さの変動係数と抗力係数の関係

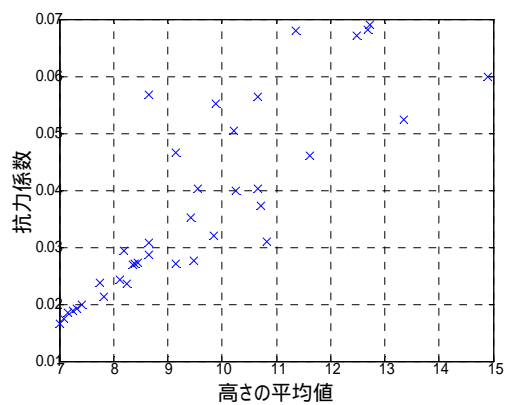


(d) 中高層化率と抗力係数の関係

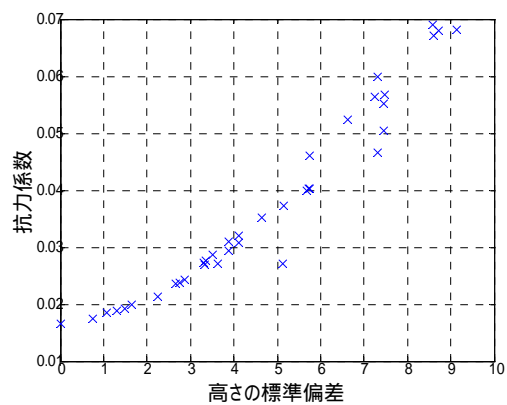


(e) 高さの平均値と標準偏差の組

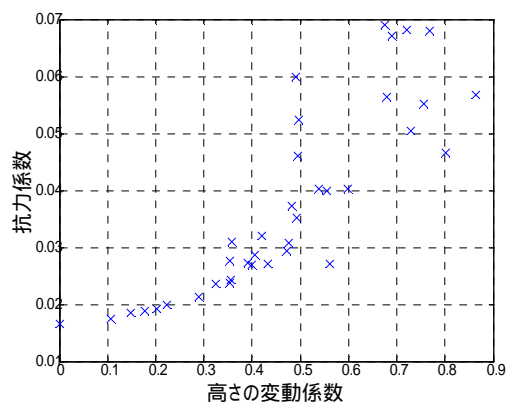
図 3.16 平面密度 18% の場合



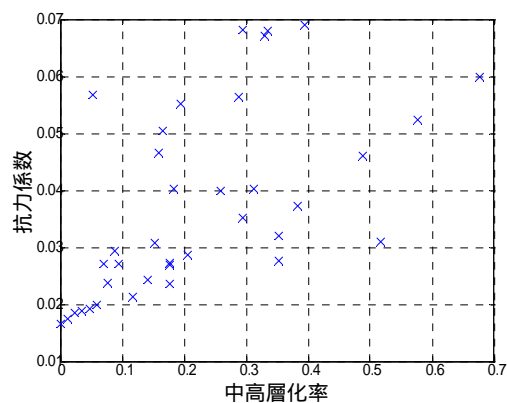
(a) 高さの平均値と抗力係数の関係



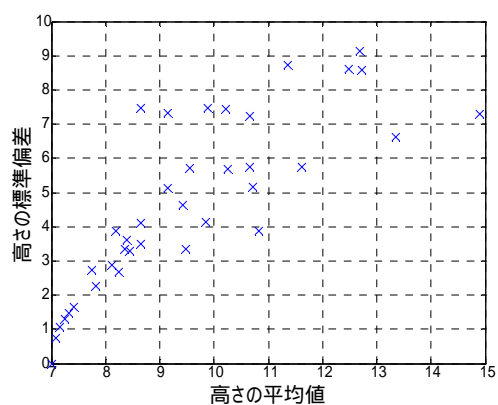
(b) 高さの標準偏差と抗力係数の関係



(c) 高さの変動係数と抗力係数の関係

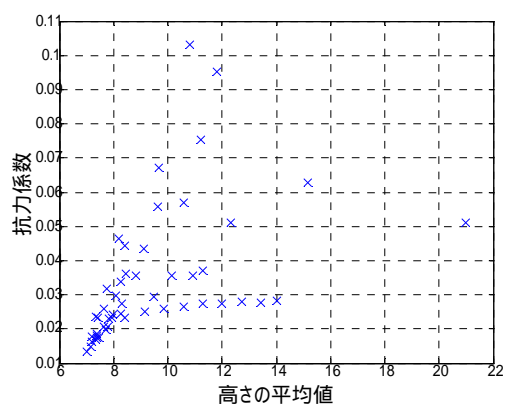


(d) 中高層化率と抗力係数の関係

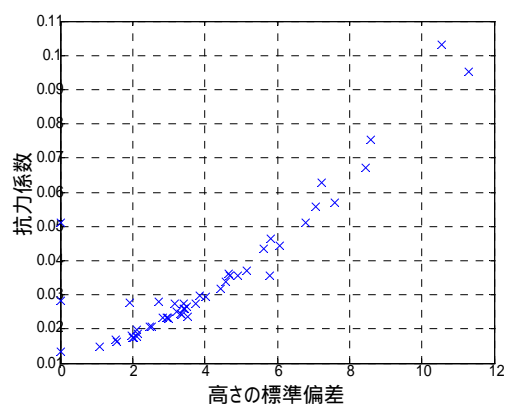


(e) 高さの平均値と標準偏差の組

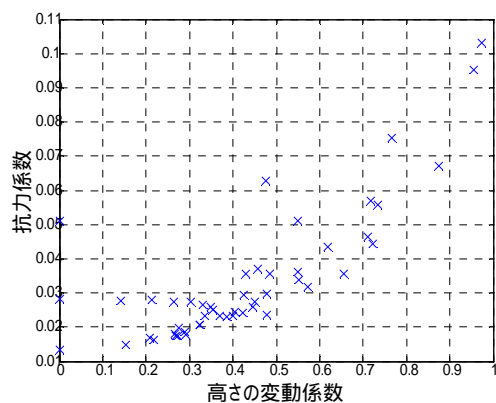
図 3.17 平面密度 25%の場合



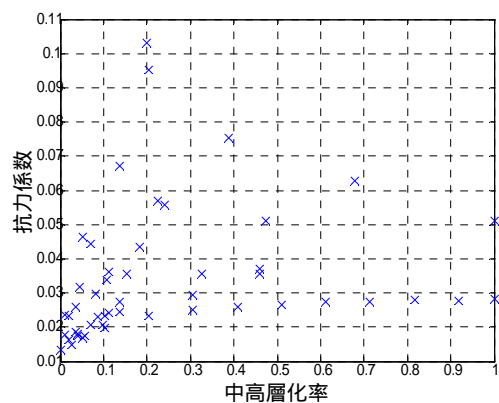
(a) 高さの平均値と抗力係数の関係



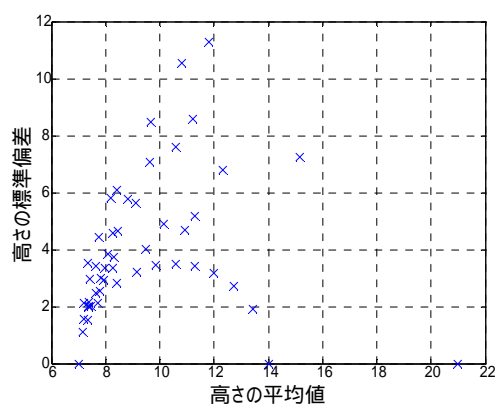
(b) 高さの標準偏差と抗力係数の関係



(c) 高さの変動係数と抗力係数の関係

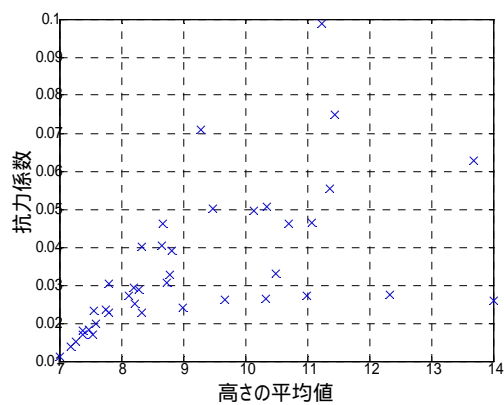


(d) 中高層化率と抗力係数の関係

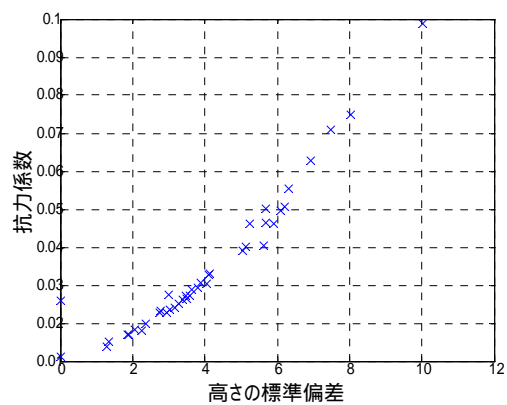


(e) 高さの平均値と標準偏差の組

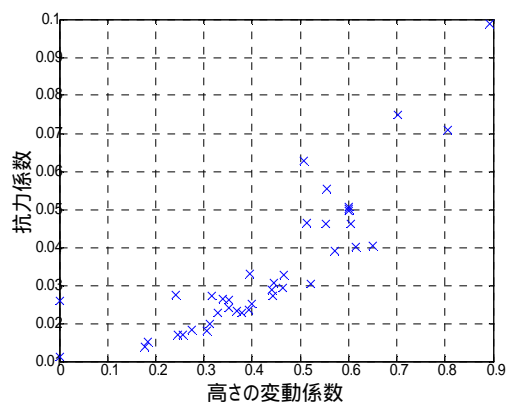
図 3.18 平面密度 32%の場合



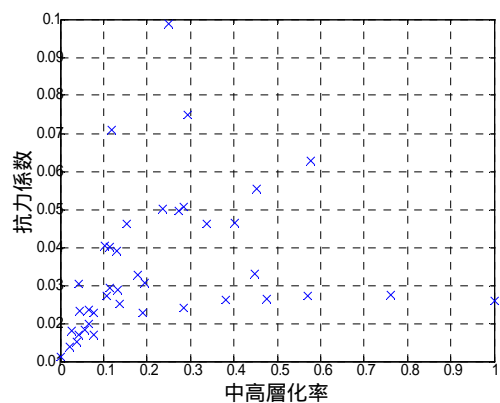
(a) 高さの平均値と抗力係数の関係



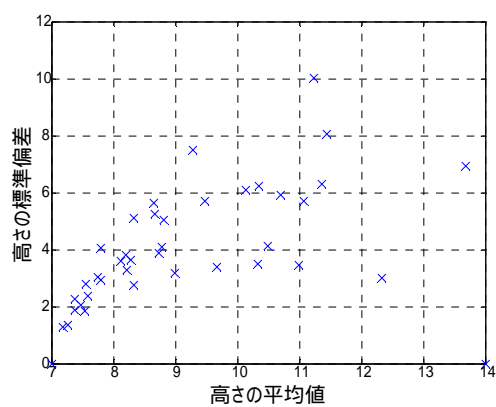
(b) 高さの標準偏差と抗力係数の関係



(c) 高さの変動係数と抗力係数の関係

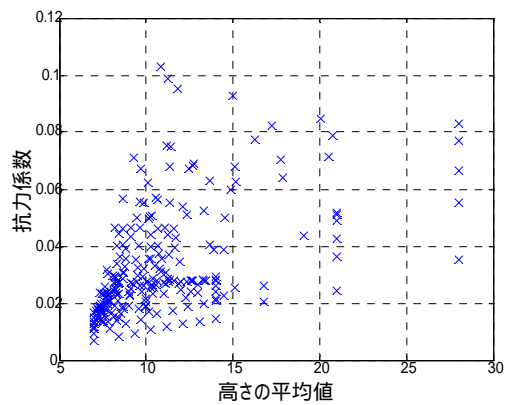


(d) 中高層化率と抗力係数の関係

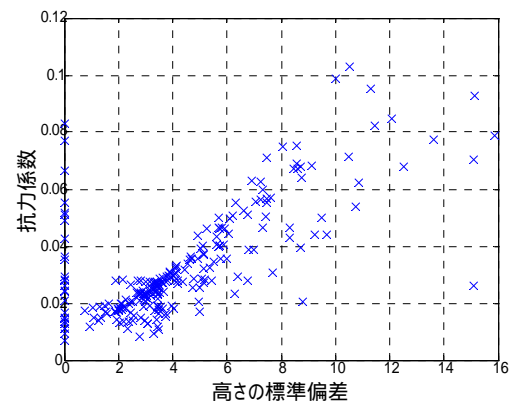


(e) 高さの平均値と標準偏差の組

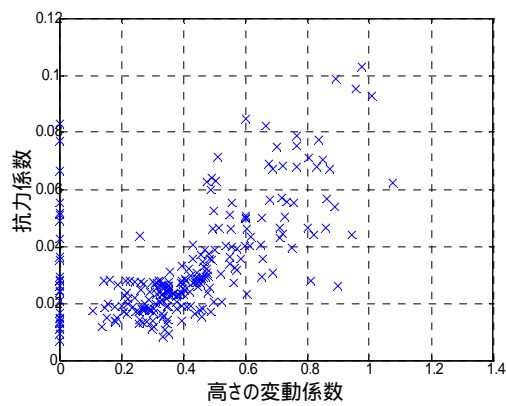
図 3.19 平面密度 40%の場合



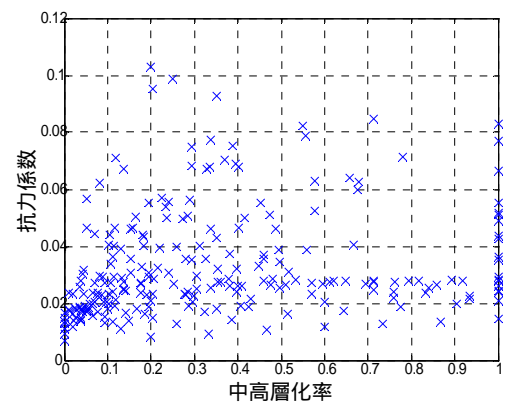
(a) 高さの平均値と抗力係数の関係



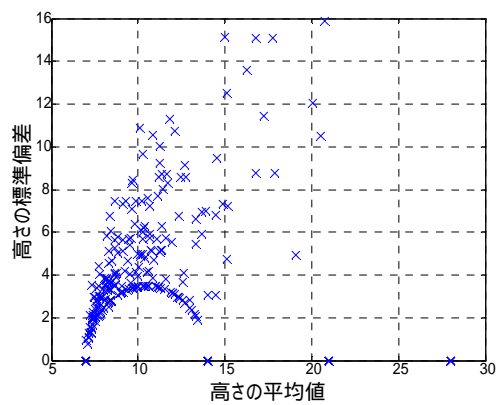
(b) 高さの標準偏差と抗力係数の関係



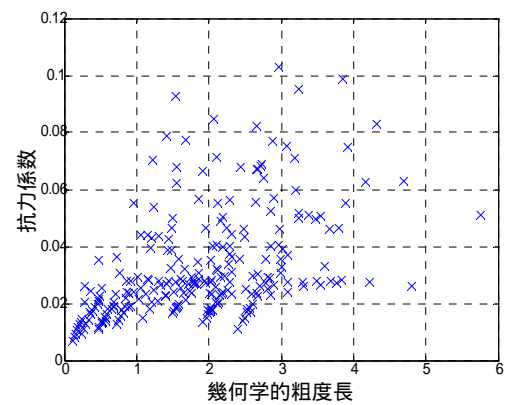
(c) 高さの変動係数と抗力係数の関係



(d) 中高層化率と抗力係数の関係



(e) 高さの平均値と標準偏差の組



(f) 幾何学的粗度長と抗力係数の関係

図 3.20 全データに関して

各粗度パラメータに対する抗力との関係性について考察を行う。

- ・高さの平均値は、平面密度 2%、4% では、抗力と非常に良い相関を見せ、密度 12% までは、かろうじて高さの平均値をパラメータに抗力が導けそうである。しかし、密度がそれ以上大きくなった場合には、傾向的には抗力が高さの平均値に対して単調増加しているものの、高さの平均値が抗力の主要パラメータとなっているとは考えにくい。

- ・高さの標準偏差は、抗力に対し、高さの平均値と逆の関係性を示し、平面密度 2%、4% では、抗力との関係性はグラフから見て取ることはできないが、密度 8% 以上の場合、密度が高ければ高いほど、抗力との相関関係が増しているように感ずる。

- ・高さの変動係数は、無次元量であり、パラメータという観点から言えば非常に魅力的な変数である。しかし、抗力との対応関係については際立ったものが見られない。

- ・中高層化率は、平面密度 2%、4% では、抗力と対応関係が見て取れ、それ以上の密度においては抗力との関係性は見られない。これは、図 3.21、図 3.22 に示すように中高層化率は平均値 + の成分を持つことから説明できることである。

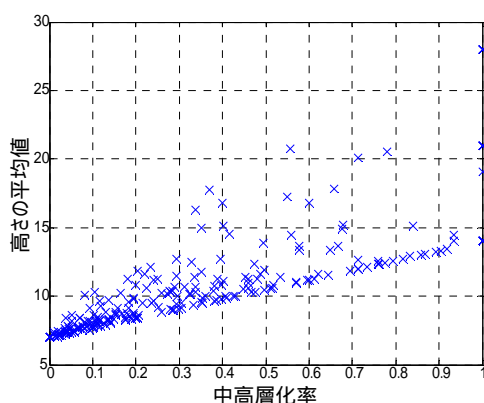


図 3.21 中高層化率と高さの平均値

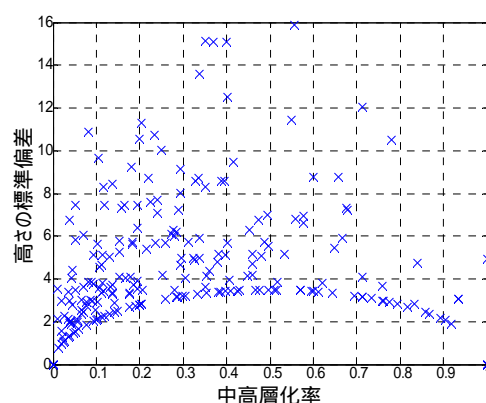


図 3.22 中高層化率と高さの標準偏差

- ・亀井・丸田による既往の研究で用いられている粗度パラメータ、幾何学的粗度長に対する抗力の変化は、単調増加の傾向は見られるもののそのばらつきが大きく、抗力を表すパラメータとしては十分とは考えられない。

3.4 レイノルズ応力と抗力の関係

3.3節で求めた抗力は、空気との摩擦力によって上層と力を交換し、レイノルズ応力と次式により釣り合う

$$C_D = \frac{\tau_w}{Q_0} \quad (3.9)$$

$$\tau_w = \tau = -\rho \overline{u'w'} \quad (3.10)$$

τ_w : 床面に加わるせん断力 τ : レイノルズ応力

ここでは、3次元プローブを用いて、レイノルズ応力を測定し、床面抗力との対応関係を調べる。本論文では、レイノルズ応力と風速分布の関係など詳細な検討にはいたっておらず、抗力測定装置の性能検定の意味合いが強いことを追記しておく。

測定は、密度 18%、8%、4%について、高さ一定の場合と、高さが粗度ブロック 2 個分のものを密度の半分、規則的に混ぜたものについて行った。吹送距離は 2.4m とし、各ケースにおいて粗度ブロックを主流方向一様に千鳥上配列にて並べた。レイノルズ応力の測定値は、対数領域が薄かったこともあり、評価するには十分とは言えないが、高さ方向に一定となっていると思われる領域の値より算定した。

各ケースのレイノルズ応力と抗力測定装置により測った抗力係数との関係を図 3.23 に、密度 18% 高さ一定、密度 18% 高さ混合～密度 4% 高さ一定までのレイノルズ応力および平均風速の鉛直分布を図 3.24 から図 3.29 に示す。やはり、レイノルズ応力の算定方法が不明確、また十分な空間平均をとれていないために、べき指数に見ることのできる境界層の発達状況とレイノルズ応力の対応関係が一樣ではない。(例えば図 3.27) しかし、図 3.23 から分かるように、レイノルズ応力と抗力測定装置からの抗力係数の対応関係はある程度

とれ、またオーダー的には正しく評価できているので、本実験装置の整合性は確保されたといえる。

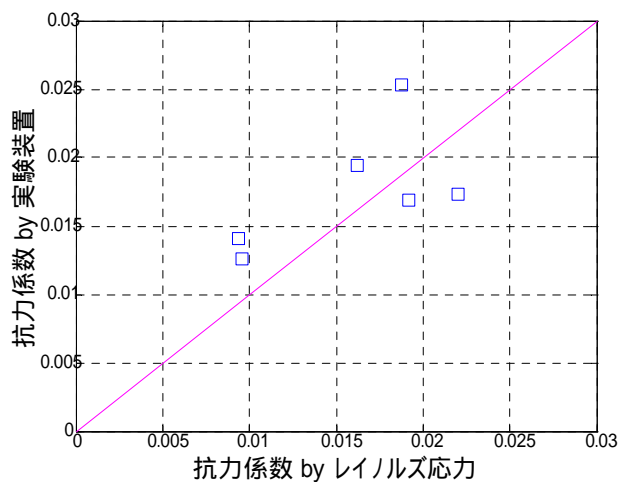
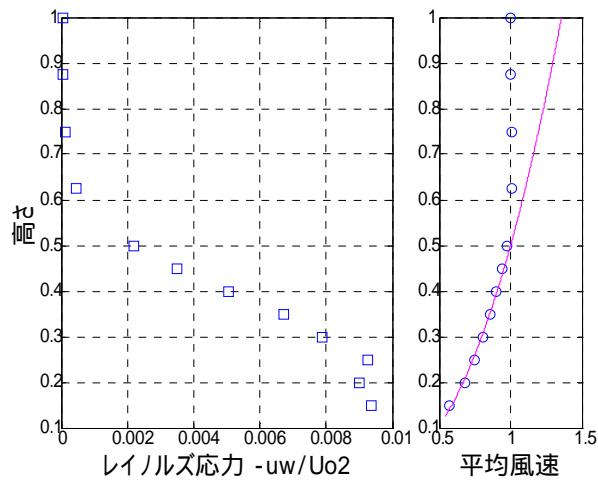


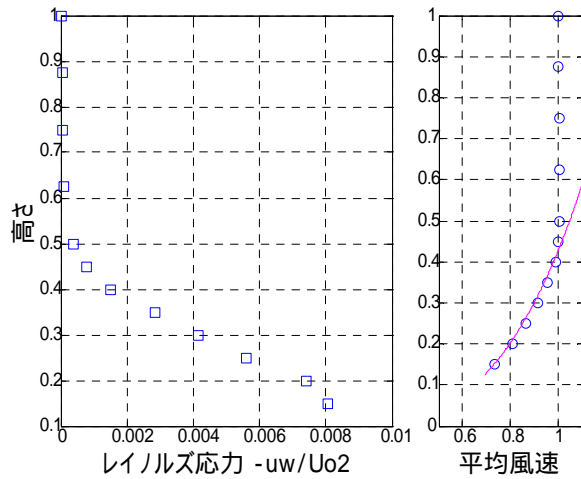
図 3.23 抗力測定とレイノルズ応力の対応



べき指数 = 0.44

$$\frac{\overline{-u'w'}}{U_0^2} = 0.0094$$

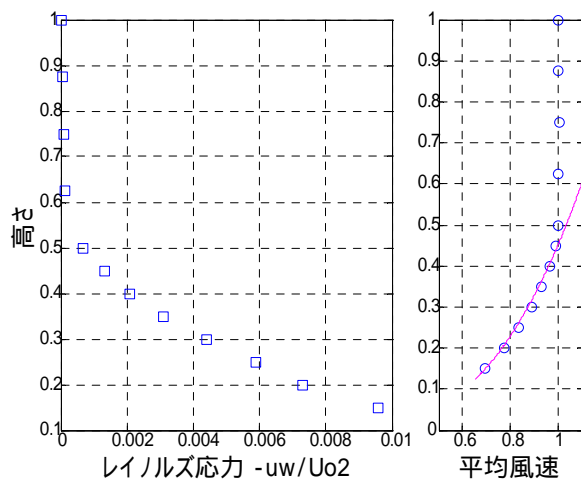
図 3.24 平面密度 18% (高さ混合の場合)



べき指数 = 0.30

$$\frac{\overline{-u'w'}}{U_0^2} = 0.0081$$

図 3.25 平面密度 18% (高さ一定の場合)



べき指数 = 0.33

$$\frac{\overline{-u'w'}}{U_0^2} = 0.0096$$

図 3.26 平面密度 8% (高さ混合の場合)

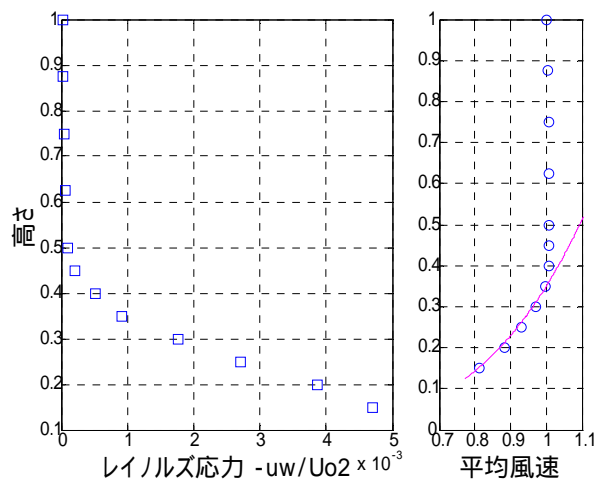


図 3.27 平面密度 8% (高さ一定の場合)

べき指数 = 0.25

$$\frac{-\overline{u'w'}}{U_0^2} = 0.0047$$

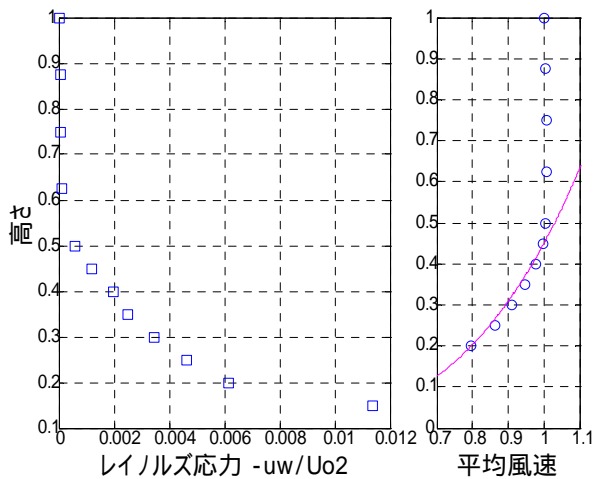


図 3.28 平面密度 4% (高さ混合の場合)

べき指数 = 0.28

$$\frac{-\overline{u'w'}}{U_0^2} = 0.011$$

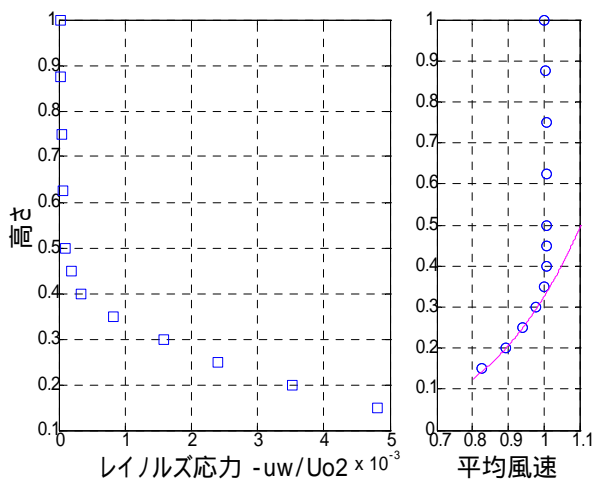


図 3.29 平面密度 4% (高さ一定の場合)

べき指数 = 0.23

$$\frac{-\overline{u'w'}}{U_0^2} = 0.0048$$

3.5 まとめ

本章では、平均風速鉛直分布の評価のために、ターン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、ターンテーブルと下面の摩擦を少なくし、風によってターンテーブル全体にかけられる抗力を測定し、地表面粗度によって変化するせん断力を求めた。始めに高さ一定とし、平面密度を変化させた地表面粗度による抗力の変化を調べ、既往の研究との比較を行った結果、既往の研究と同様に、地表面粗度がうけるせん断力は、平面密度が 20%～30%で最大値をとりその後減少するという事がわかった。

次に、高さ方向を変化させた地表面粗度に加わる抗力の変化を調べた。高さ方向のデータは、GISによる市街地データをモデル化することにより与えた。抗力の変化に影響すると思われる粗度パラメータである高さの平均値、高さの標準偏差、高さの変動係数、中高層化率、幾何学的粗度長に対する抗力の変化を図示して見たところ、密度が 8～12%以下の場合には高さの平均値と、密度が 8～12%以上の場合には高さの標準偏差となんらかの対応関係を持っていることがわかった。

また 3.4 節では、まだ補足的ではあるものの、レイノルズ応力と抗力測定装置によって測った抗力係数の比較を行い、対応関係を示した。

次章においては、このような性質を元に、粗度パラメータによって地表面粗度に作用する抗力を表すための解析を行う。

参考文献	
Wooding et al	「 Drag due to regular arrays of roughness elements of varying geometry 」 Boundary-Layer Meteorology,vol5,1973,pp285-308
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
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
斉藤知生 神田順	「 東京大学工学部建築学科小型境界層風洞の基本特性 」 No.49,1991.11,pp47-53

第 4 章

粗度パラメータによる

抗力係数の評価

4．粗度パラメータによる抗力係数の評価

本章では、3章で求められた粗度形状によって変化する抗力係数を粗度パラメータにより評価することを試みる。また、実験データは、平面密度 2%から 40%の間の離散値であるが全密度に対する抗力係数の評価を試みる。

4．1 実験結果からの抗力係数の評価

3章においての実験結果（図 3.21～図 3.29）より

平面密度が $\left\{ \begin{array}{l} 8\%以下では高さの平均値 \\ 8\%以上では高さの標準偏差 \end{array} \right\}$ のみをパラメータに抗力係数を評価できると仮定する。

（1）密度が 8%以下の場合

密度が 8%以下の場合においては、高さの平均値との相関が高いといえる。これは、高い粗度ブロックの風下となっている粗度ブロックに作用する風力が弱まり、結果抗力が減少するという密度の高い場合に多く起こると思われる現象が起りにくいためと考えられる。また、同様の理由により、粗度ブロックの高さがばらついているときに、ある範囲において大きな抗力を生むという現象が起こらないために、高さの標準偏差との相関は低くなっているのだと思われる。

さてグラフのプロットから見るに、高さの平均値と抗力係数の関係は、高さの平均値を変数とした 2 次関数 or 1 次関数の形で近似できると考えられるので、高さの平均値を $100x$ 抗力係数を y としたときに、

$$\left\{ \begin{array}{l} y = ax^2 + bx + c \\ y = bx + c \\ y = ax^2 + c \end{array} \right.$$

の 3 ケースを仮定し最小二乗法により密度 2%、4%、8%に対し近似を試みたものを図 4.1～図 4.3 に、各場合における変数 a, b, c の値および標準誤差 $s.e.$ を表 4.1～表 4.3 に示す。高さの平均値を $100x$ と置いたのは、抗力係数と高さの平均値のオーダーの違いによる計算上の都合である。最終的には調整を行う。

式 による近似精度は他に比べて明らかに低いことがわかる。一方式、式 による近似精度はほぼ同じである。密度 8%以下の全密度に対する抗力係数の評価を考える場合には、変数が少ない方が好ましい。またこの密度範囲においては、密度が 8%に近づくにつれて、平均値が大きくなった場合の抗力係数の増分が少なくなる現象(具体的には表 3.3 における a が負になるという状況)が起こってしまい、全密度に対する変数評価が困難になってしまう。この 2 点の理由により、密度 8%以下の場合については式 により抗力係数の評価を試みる。

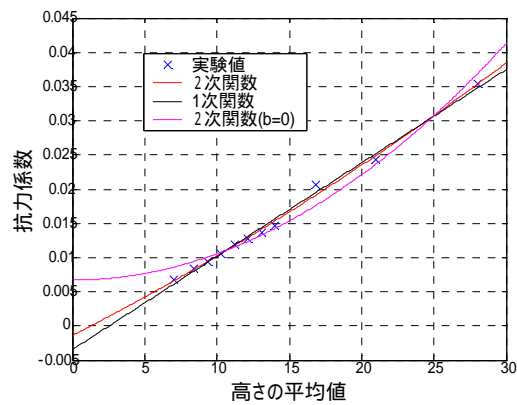


図 4.1 平面密度 2%

表 4.1 推定変数(平面密度 2%)

a	0.0827	0	0.3848
b	0.108	0.1366	0
c	-0.0014	-0.0035	0.0067
s.e.	0.0006	0.0008	0.0085

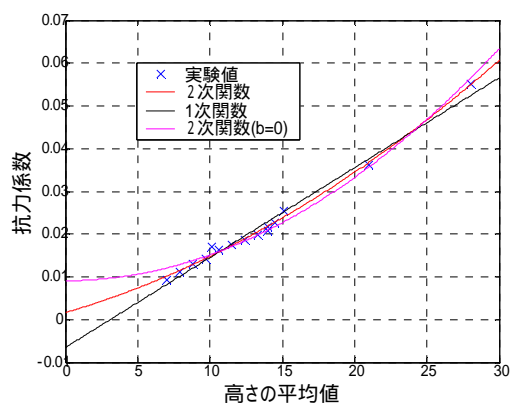


図 4.2 平面密度 4%

表 4.2 推定変数(平面密度 4%)

a	0.3261	0	0.6038
b	0.0988	0.2105	0
c	0.0016	-0.0065	0.0091
s.e.	0.0007	0.0015	0.0086

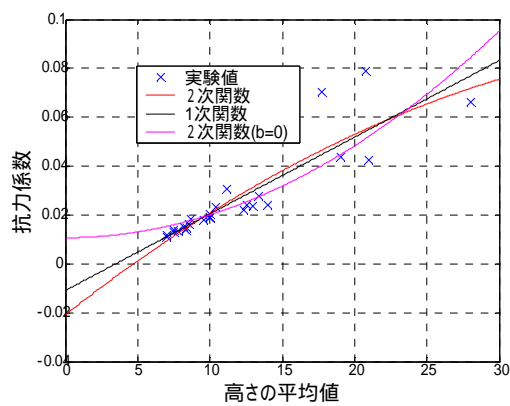


図 4.3 平面密度 8%

表 4.3 推定変数(平面密度 8%)

a	-0.4769	0	0.9408
b	0.4644	0.3139	0
c	-0.0208	-0.0109	0.0107
s.e.	0.0014	0.0014	0.0097

始めに 3.3.1 節における高さ一定（粗度ブロック 1 個分）の場合の床面抗力係数と平面密度の関係から、式 (4.1) を満たすべき (x, y) の一点を導く。図 3.10 に示した関係から、抗力係数を平面密度の 3 次関数、2 次関数として最小二乗法により近似すると図 4.4 のようになる。但し、ここでの近似では平面密度 0 % すなわち床面のみの場合の抗力係数に関するデータは用いなかった。本研究のターゲットとなるのは市街地であるということ、また郊外であっても平面密度が 2% 以下の状況は想像しにくく、ここにおける近似は平面密度 2 % 以上の場合において満たせば十分で、平面密度 0% の場合を除外して近似した方が平面密度 2% 以上において精度が高くなるからである。図 4.4 から、3 次関数と 2 次関数による近似精度の差異は感じられないので、2 次関数による近似式を採用し、抗力係数は

$$C_d = -0.1787R^2 + 0.0848R + 0.0056 \quad (4.1)$$

と評価することができた。

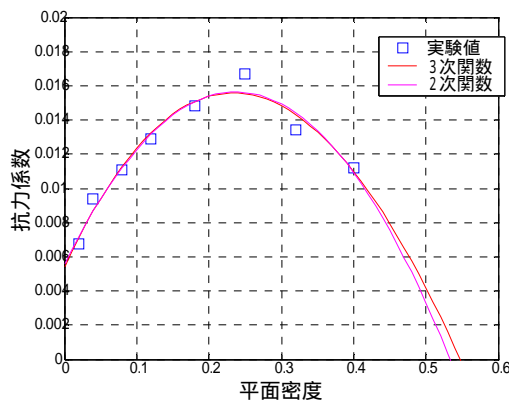


図 4.4 抗力係数と平面密度（高さ一定）

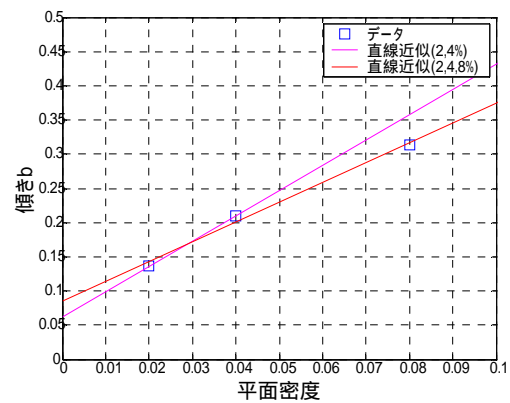


図 4.5 傾き b と平面密度

次に傾き b の評価を行う。これについては、密度に対して b の値をプロットした図 4.5 を見ていただきたい。傾き b が平面密度に対しほぼ線形に単調増加していることがわかる。平面密度 2,4% と平面密度 2,4,8% から傾き b を直線近似により導いた。図 4.3 における抗力係数に対する高さの平均値の 1 次関数による近似が良くプロットにのっているとは言えないが、図 4.5 による差異と、密度が 8% に近づくにつれて、平均値が大きくなった場合の抗力係数の増分が少なくなるという考察に基づき、平面密度 2,4,8% からの傾き b を採用し、 $b = 2.9025R + 0.0849$

$$(4.2)$$

を得た。式 (4.1)、(4.2) の C_d, b より平面密度 8% 以下の場合の抗力の近似式は

$$y = b(x/100 - 7) + C_d \quad (4.3)$$

但し x は高さの平均値 y は抗力係数とする。

式(4.3)から得られる抗力係数と各密度の実験データ及び各密度の実験データから得られた1次関数による抗力係数を図4.6から図4.8に示す。

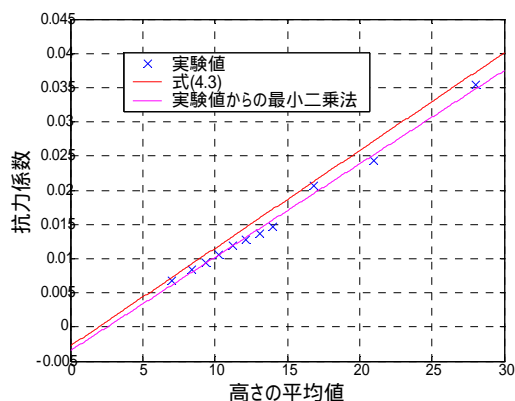


図 4.6 平面密度 2%

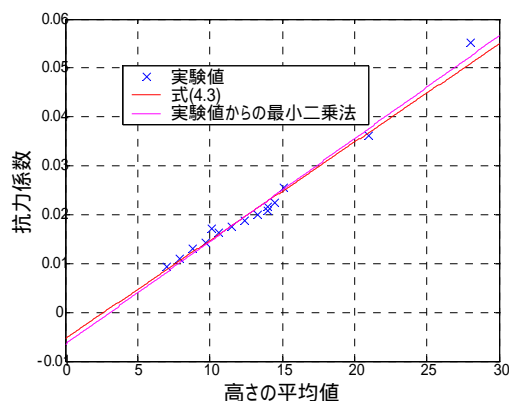


図 4.7 平面密度 4%

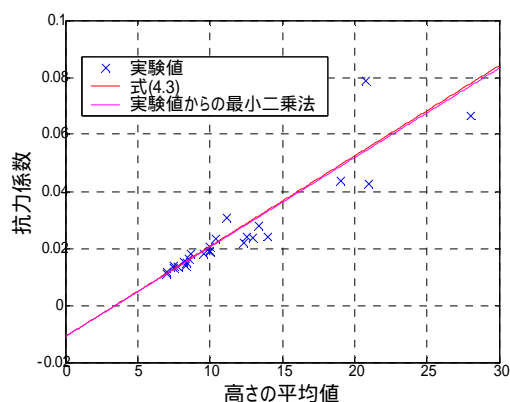


図 4.8 平面密度 8%

図4.6～図4.8を見ると、仮説により導いた全密度に対応する評価式(4.3)は、実験値と良い対応をみせたので、式(4.3)を平面密度8%以下の場合の抗力係数の評価式として採用する。

(2) 平面密度8%以上の場合

密度が8%以上の場合においては、高さの標準偏差との相関が高いといえる。理由については、(1)について述べた事と同様である。高さの標準偏差と抗力についても2次関数or1次関数の形で近似できそうなので、(1)の場合と同様の式による近似を試みる。密度8%、12%、18%、25%、32%、40%に対し近似を試みたものをそれぞれ図4.9～図4.14に、各場合における変数a,b,cの値および標準誤差s.e.を表4.4～表4.9に示す。但し、高さの標準偏差が0で、高さの平均値が7m以外のものは、排除して考えた。

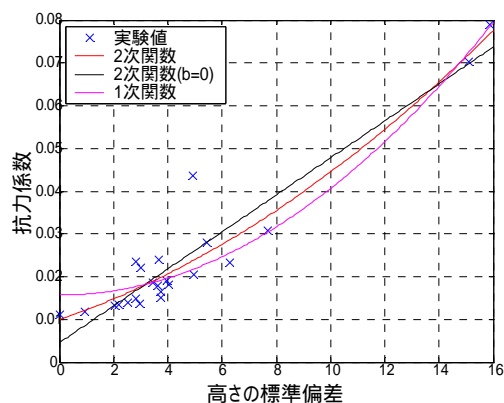


図 4.9 平面密度 8%

表 4.4 推定変数(平面密度 8%)

a	1.2974	0	2.4925
b	0.215	0.4328	0
c	0.01	0.0045	0.0157
s.e.	0.0054	0.0059	0.0058

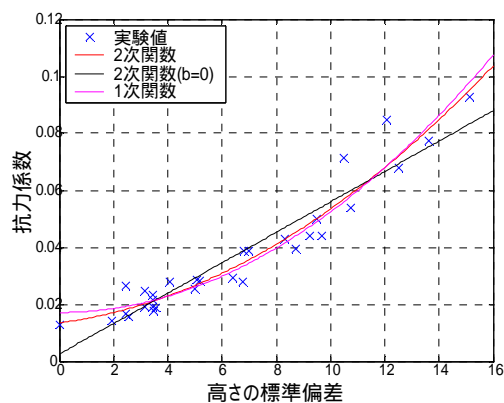


図 4.10 平面密度 12%

表 4.5 推定変数(平面密度 12%)

a	2.7445	0	3.5308
b	0.1249	0.5338	0
c	0.0135	0.0026	0.0172
s.e.	0.0056	0.0069	0.0057

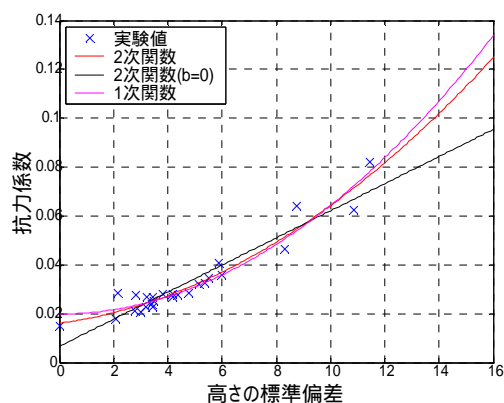


図 4.11 平面密度 18%

表 4.6 推定変数(平面密度 18%)

a	3.3029	0	4.4534
b	0.1516	0.5551	0
c	0.0161	0.0066	0.0199
s.e.	0.0039	0.005	0.0041

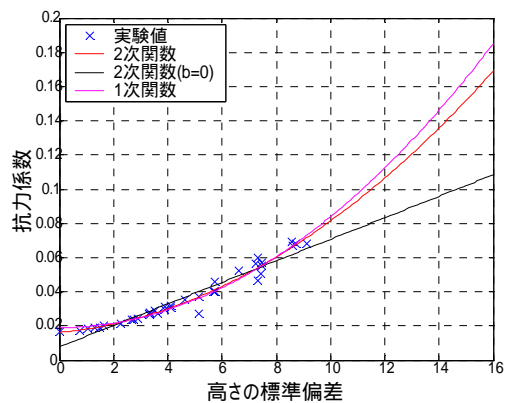


図 4.12 平面密度 25%

表 4.7 推定変数(平面密度 25%)

a	5.0649	0	6.4902
b	0.1452	0.6293	0
c	0.0162	0.0078	0.019
s.e.	0.0029	0.0043	0.0031

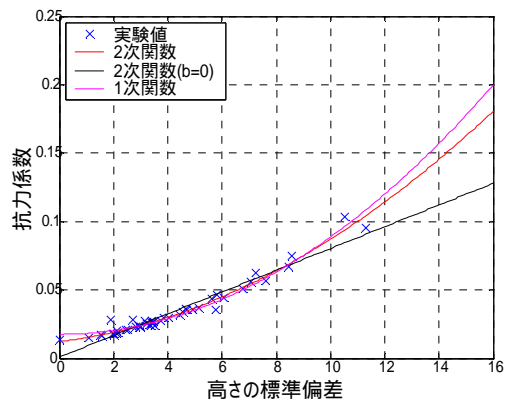


図 4.13 平面密度 32%

表 4.8 推定変数(平面密度 32%)

a	5.0818	0	7.1284
b	0.2415	0.795	0
c	0.0122	0.0008	0.0175
s.e.	0.0032	0.005	0.0036

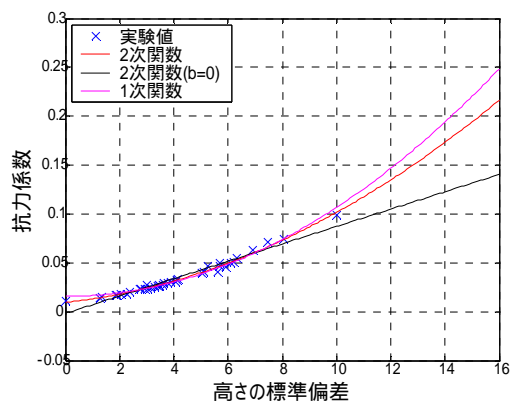


図 4.14 平面密度 40%

表 4.9 推定変数(平面密度 40%)

a	6.2263	0	9.1014
b	0.2981	0.8894	0
c	0.0095	-0.0018	0.0157
s.e.	0.0019	0.0042	0.0026

式による近似精度が見た目、標準誤差どちらから見た場合も良いことがわかるので、密度 8% 以上の場合については、2 次関数の形による近似を採用し、(1) の場合と同様に全密度に対する抗力係数の評価を試みる。

始めに y 切片 c については、(1) の場合の式(4.1)により評価する。(2) の場合は、変数が標準偏差であり、標準偏差がゼロの時、平均高さが 7m となり、y 切片 c がそのまま式(4.1)における C_d となる。しかし、ここで式(4.1)では、平面密度が 50% 超において抗力係数が負になってしまうという問題がある。そこで、3 章における図 3.10 で示した Y.Jia による平面密度 0.5、0.6 の時の抗力係数と平面密度が 1 の時の抗力係数は床面に作用する抗力係数に等しいと考え、この 3 点における直線近似を行ったものを式(4.4)に示す。

$$C_d = -0.0074R + 0.0086 \quad (4.4)$$

Y.Jia による抗力係数を採用したのは、平面密度全体にわたって抗力係数の絶対値が本実験と良く一致している、すなわち粗度ブロックと境界層流のスケールが本実験とほぼ等しいと考えられるからである。また、平面密度が 1 の時は、粗度ブロック間に隙間がまったくない状態であり、その時フロートに作用するせん断力は、粗度ブロックの上面に加わる摩擦力のみとなる。したがって、床面に作用する抗力係数と等しいと考えられる。式(4.2)、(4.4) 並びに本実験と Y.Jia による抗力係数を図 4.15 に示す。直線近似を用いたのは、2 次関数以上で最小二乗法により近似を行うと平面密度 0.5 ~ 1 において抗力係数が単調減少しなくなってしまうためである。また指数関数による近似に対しても、単調減少という点は満たすものの、3 点に対して関数をのせるのは難しいこと、仮に指数関数で評価した場合も直線近似に限りなく近いという理由があげられる。

このようにして式(4.4)により平面密度の大きい場合での抗力係数を求めることとするが、

平面密度に対して抗力係数は連続であることが望ましい。そこで式(4.1)と式(4.4)の交点を求め、平面密度がそれ以下においては式(4.1)それ以上においては式(4.4)により抗力係数を評価することとする。交点は(0.4811,0.0050)となっている。

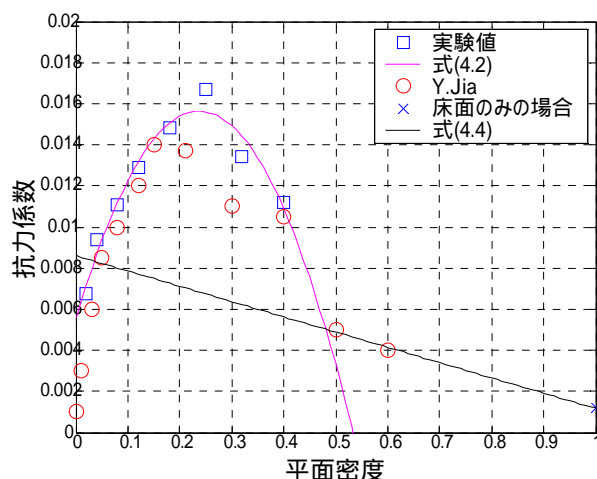


図 4.15 高さ一定の場合の平面密度と抗力係数

次に係数 a, b に関しては、(1)の場合と同様に密度に対する変化をそれぞれ図 4.16、図 4.17 に示すと

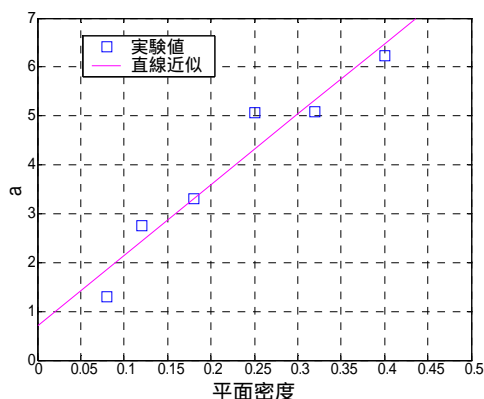


図 4.16 a と平面密度

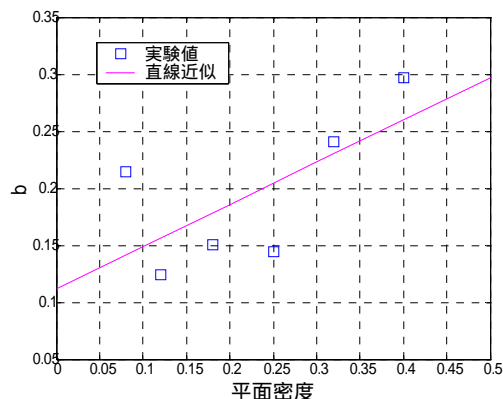


図 4.16 b と平面密度

a、b ともに平面密度に対しほぼ線形に単調増加していることがわかる。従って、a、b は

$$a = 14.4461R + 0.7026 \quad (4.5)$$

$$b = 0.3715R + 0.1125 \quad (4.6)$$

平面密度 8% 以上の場合の抗力の近似式は、式(4.1)、(4.4)による C_d および式(4.5)、(4.6)による a、b によって

$$y = a \left(\frac{x}{100} \right)^2 + b \left(\frac{x}{100} \right) + C_d \quad (4.7)$$

但し x は高さの標準偏差 y は抗力係数とする。

となる。式(4.7)から得られる抗力係数と各密度の実験データ及び各密度の実験データから得られた 2 次関数による抗力係数を図 4.17 から図 4.22 に示す。

仮説により導いた全密度に対応する評価式(4.7)は、実験値と良い対応をみせた。平面密度 32% におけるずれは、式(4.1)による y 切片の誤差である。(図 4.15 参照)

しかし、そのずれもオーダーが一つ小さいので無視できる範囲内であろう。

以上より、式(4.7)を平面密度 8% 以上の場合の抗力係数の評価式として採用する。

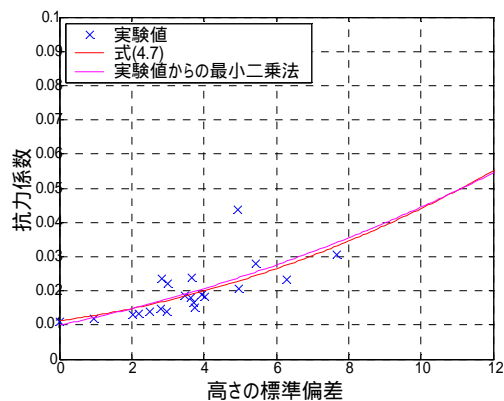


図 4.17 平面密度 8%

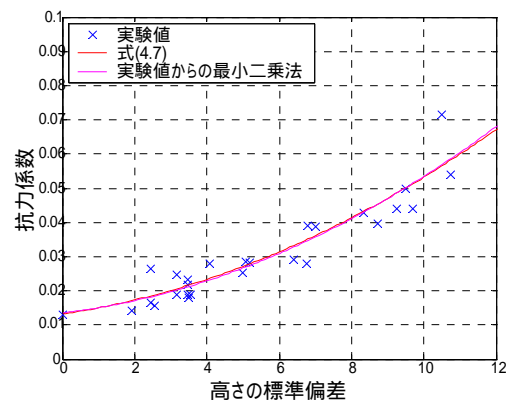


図 4.18 平面密度 12%

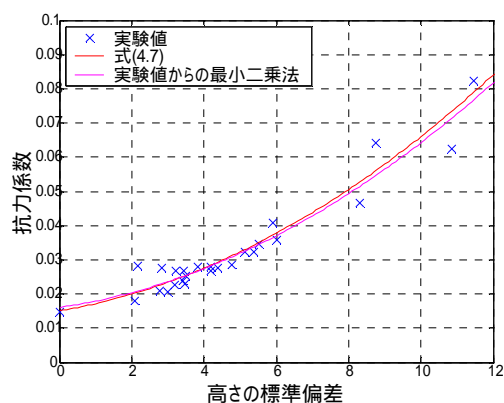


図 4.19 平面密度 18%

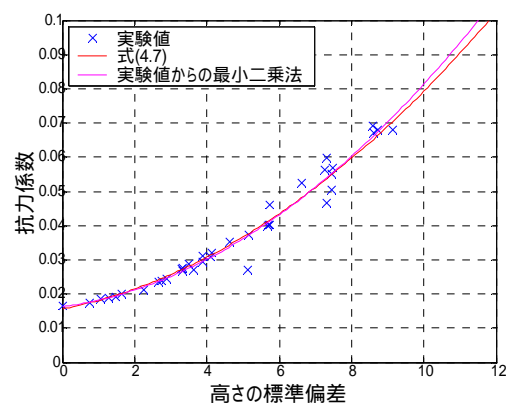


図 4.20 平面密度 25%

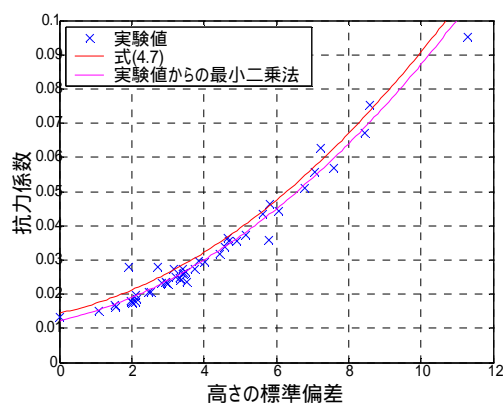


図 4.21 平面密度 32%

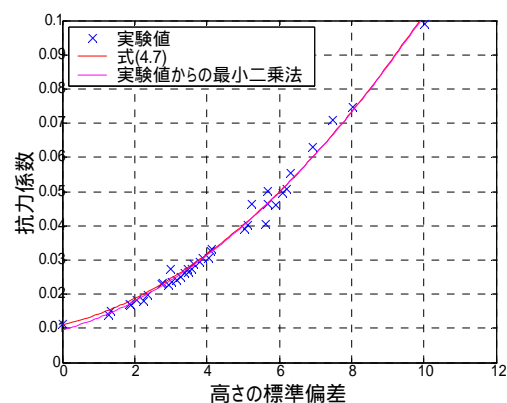


図 4.22 平面密度 40%

4.2 統計解析手法による評価

4.1 節により求められた抗力係数 C_d の評価式をまとめると

密度 8 % 未満の場合

$$b = 2.9025R + 0.0849$$

$$C_d(MH) = b \left(\frac{MH - 7}{100} \right) + c$$

密度 8 % 以上の場合

$$a = 14.4461R + 0.7026$$

$$b = 0.3715R + 0.1125$$

$$C_d(VH) = a \left(\frac{VH}{100} \right)^2 + b \left(\frac{VH}{100} \right) + c$$

$$\text{但し } c = -0.1787R^2 + 0.0848R + 0.0056 \quad (R < 0.4811)$$

$$c = -0.0074R + 0.0086 \quad (R \geq 0.4811)$$

MH : 高さの平均値 VH : 高さの標準偏差

4.1 節では、密度 8 % 以下では、高さの平均値により、密度 8 % 以上では高さの標準偏差により抗力係数が求められるという仮説を立てたが、高さの平均値から高さの標準偏差へ主要パラメータが変遷する過渡範囲である密度 8%、12%においては両方のパラメータに動かされている傾向がある。そこで、今抗力係数を寄与率 を用いることにより

$$C_d = \beta \cdot C_d(MH) + (1 - \beta) \cdot C_d(VH) \quad (4.8)$$

と表し、最小二乗法により最適な を求め、 の密度に対する変化を調べたものを図 4.23 表 4.10 に示す。 の値により、平面密度 2%、4%においては、高さの平均値による寄与率が 0.8 から 1 と高くなっている。平面密度 8% ~ 40%においては、高さの標準偏差による寄与率が高く、0.75 ~ 0.99 である。平面密度 2%の場合において、高さの平均値の寄与率が低めに出たのは、図 4.24 より、抗力係数の値が 0.005 ~ 0.015 の範囲で高さの標準偏差に対する抗力係数の値はばらついているにもかかわらず、偶然に近い値を持っていることによると思われる。また、図 4.25 に平面密度が 8%の場合の実験による C_d と $C_d(MH)$ 、 $C_d(VH)$ の比較を示す。抗力係数が低い場合には $C_d(MH)$ の方が、高い場合には $C_d(VH)$ の方が近似精度が良い。しかし、全体でみると $C_d(VH)$ の方が良いと思われる。

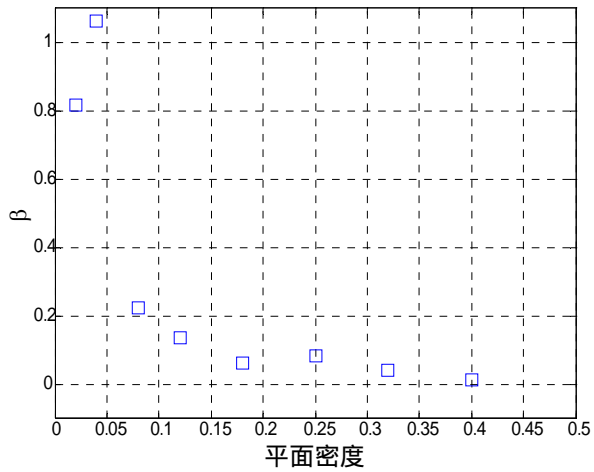


図 4.23 平面密度に対する

表 4.10 平面密度に対する

平面密度	
0.02	0.8172
0.04	1.0641
0.08	0.2248
0.12	0.138
0.18	0.0636
0.25	0.0853
0.32	0.0409
0.4	0.0151

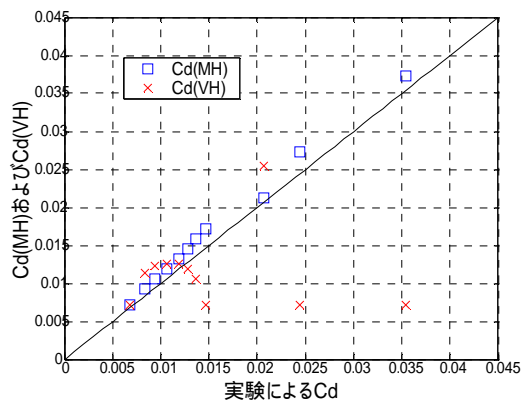


図 4.24 平面密度 2%の場合

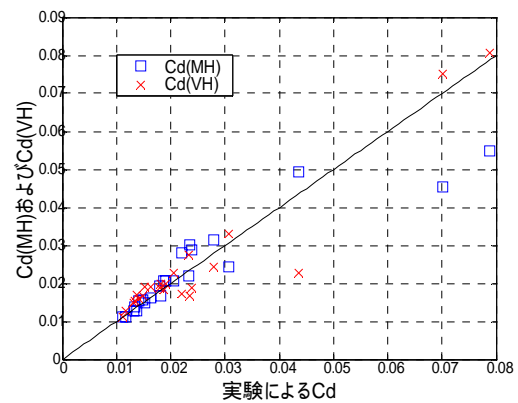


図 4.25 平面密度 8%の場合

また、平面密度 4%において、 $\beta = 1.06$ となっていることより、少なくとも平面密度 4%までは、高さの平均値が主要パラメータとして卓越していると言え、 C_d (MH)が平面密度 8%においても、実験による C_d に対しそれなりの近似精度を保っているので、4.1 節において仮説を立てた通り、密度 8%未満の場合には C_d (MH)により、密度 8%以上の場合には C_d (VH)により抗力係数を評価できるということを検証できた。

4.3 まとめ

本章では、粗度パラメータによる抗力係数の評価を試みた。3章による実験結果により、密度8%未満においては高さの平均値、密度8%以上では高さの標準偏差により抗力係数が評価できるという仮説を立て、それぞれの場合において高さの平均値・高さの標準偏差に対する抗力係数の増分は密度に比例すると仮定することによって、全密度に対する抗力係数の評価式を導いた。但し、本実験においては平面密度40%までしか測定を行っておらず、それ以上の密度に関しては想像の域を過ぎない。ただ、少なくとも50%程度までは、同様の傾向が保たれることは予想できる。2章でのGISによる解析では、95%以上の範囲が密度50%以内にあると言えるので、GISを用いた平均風速鉛直分布の評価という本論文のターゲットに対する条件は十分に満たしているといえるであろう。

また、4.2節では統計解析の手法を用いて、4.1節における仮説の検証をおこなった。

参考文献	
松原望著	「統計の考え方」 財団法人放送大学教育振興会
	「統計学入門」 東京大学出版会
Ang,Tang	「土木・建築のための確率・統計の基礎」 丸善

第 5 章

平均風速鉛直分布パラメータの評価式

5．平均風速鉛直分布パラメータの評価式

5．1 境界層理論

本論文のターゲットとなる強風時には、温度勾配が小さくなり、対流効果がほとんどなくなるか、風のせん断応力の影響が温度勾配よりかなり大きくなり、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。本論文では、基本的にこの中立状態を仮定したうえで、議論を進めるものとする。

自然界に存在する風況を予測する場合、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 $R_e \rightarrow \infty$ 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いえる。この物体の表面近くの粘性の作用を無視し得ない薄い層を境界層という。

(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境界層方程式を導いた。なおこの項の式展開や内容に関する詳細は「流体力学 日野幹雄著」等を参考にされたい。

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \\ 0 &= -\frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0 \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x}\end{aligned}\tag{5.1}$$

Blasius(1908)は、上記式(1)に基づいて一様流中の平板に沿う流れについて解いた。

ここでは、途中の式展開や仮定は省略し、今後の展開に必要となる式を列記する。

但し、 u, v は流速分布 u, v をまとめた流関数であり、 x, y をまとめた変数、 ν は動粘性係数である。

$$\begin{aligned}u &= \frac{\partial \psi}{\partial y} = \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial y} = U_{\infty} f'(\eta) \\ v &= -\frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\nu U_{\infty}}{x}} \{ \eta f'(\eta) - f(\eta) \}\end{aligned}\tag{5.2}$$

式(5.2)とその導関数を式(5.1)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（ゼロ面変移） δ^* にかんしては

$$\begin{aligned}\delta(x) &\approx 5.0\sqrt{\nu x/U_\infty} \\ \delta(x) &\approx 1.73\sqrt{\nu x/U_\infty}\end{aligned}\tag{5.3}$$

と求められた。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

$$\begin{aligned}\tau_0(x) &= 0.332\mu U_\infty \sqrt{\frac{U_\infty}{\nu x}} \\ C_D &= 0.664 \sqrt{\frac{\nu}{U_\infty x}} = 3.32 \frac{\nu}{U_\infty \delta}\end{aligned}\tag{5.4}$$

一方、Karman(1921)は、層流という仮定を用いずに、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。

$u/U_\infty = f(y/\delta(x))$ という流速分布を仮定すると

$$\begin{aligned}\delta(x) &= \sqrt{\frac{2\beta_1}{\alpha_1}} \sqrt{\frac{\nu x}{U_\infty}} \\ C_D &= 2 \sqrt{\frac{2\alpha_1\beta_1\nu}{U_\infty l}}\end{aligned}\tag{5.5}$$

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

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 により推論され、

摩擦速度 $U_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$ 無次元長さ $\eta = U_* y/\nu$ によって

$\bar{u}(y)/U_\infty = f(U_* y/\nu)$ と表すことができる。

流体の運動方程式に、主流方向の流速の時間的・空間的变化は 0 で、せん断応力 τ_0 が一定である範囲を対象とすると対数流速分布が導ける

$$\frac{u(y)}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{U_* y}{\nu}\right) + C\tag{5.6}$$

但し、 κ はカルマン定数、 C は積分定数

上(5.6)式は、壁面が滑らかな場合であり、壁面が粗い場合には、式(5.5)における壁法則の代表長さ $\eta = U_* y/\nu$ が粗度の代表高さ Z_0 によって書き換えなければならない。ここで、高さ y を Z と書き換え、 C を Z_0 の中に含めると、耐風工学で用いられる対数則となる

$$U(Z) = \frac{U_*}{\kappa} \ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)\tag{5.7}$$

5.2 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及び観測結果ならびに実験結果との対応については、1980年代以前のものに関しては、国外では Counihan(1972)、国内では崔(1990)によりよくまとめられている。また、それ以後のものに関して、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・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。

5.2.1 対数則について

対数則は5.1で示した式(7)である。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修正対数則がある。

$$U(Z) = \frac{U_*}{\kappa} \left\{ \ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right) + 5.75\left(\frac{Z}{Z_g}\right) - 1.875\left(\frac{Z}{Z_g}\right)^2 - 1.333\left(\frac{Z}{Z_g}\right)^3 + 0.25\left(\frac{Z}{Z_g}\right)^4 \right\} \quad (5.8)$$

但し、 Z_g は境界層高さである。2項目以降を考慮しない場合が式(5.7)となる。

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ている。崔(1990)より一部を表5.1に示す。

表5.1 粗度長の推定値

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

また、地表面粗度の粗度パラメータからの粗度長 Z_0 の推定も行われている。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推定されている。Letau(1967)が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。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。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を近似した。Y.Jia(1998)は有効見つけ面積という概念を導入し、粗度長を評価した。またPeterson(1997)は鉄工所の模型に対し、類似の実験を行った。以上の中から立方体粗度に関する近似式を式(5.9)から式(5.12)に、近似式で用いられた粗度パラメータについて図5.1に示す。

Letau	$\frac{Z_0}{h} = 0.5 \frac{A_f}{S}$	(5.9)
Counihan	$\frac{Z_0}{h} = 1.08 \frac{A_f}{S} - 0.08 + 8.2 \frac{h}{x}$	(5.10)
Theurer	$\frac{Z_0}{h} = 1.6 \frac{A_f}{S} (1 - 1.67 \frac{A_p}{S})$	(5.11)
Macdonald	$\frac{Z_0}{h} = \exp \left[-0.5 \left(\frac{C_D}{\kappa^2} \frac{A_f}{S} \right)^{0.5} \right] \quad C_D = 1.2$	(5.12)

A_f : 風向方向見つけ面積
 A_p : z軸方向投影面積
 S : 粗度要素一個当たり面積
 h : 粗度要素の高さ
 x : 吹送距離

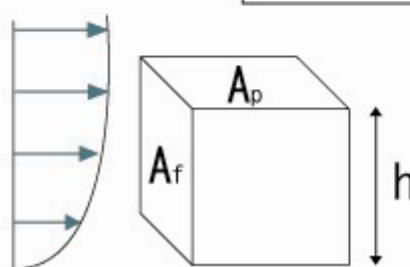
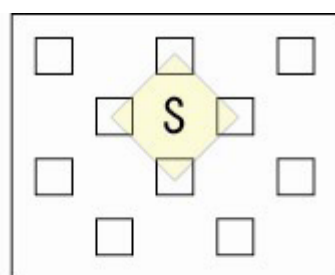


図 5 . 1 粗度パラメータ

また、式(5.9)から式(5.12)と、参考文献から読み取った実験値を図 5.2 に示す。

粗度長は見付け面積密度 0.2 ~ 0.3 で最大値をとりその後減少することが実験データから読み取れる。Letau, Counihan による近似式はそれぞれ各々の実験値と見つけ面積密度 25% 以下において良い対応を示しているが、それ以上の密度において粗度長の現象についてとらえられていない。Theurer による近似式は、Counihan の実験値と非常により対応を示すが見つけ面積密度が 0.6 以上において粗度長の値が負になってしまうという欠点を持つ。Y.Jia による近似式は、実験値との対応と同時に密度が 1 において粗度長が Z_0 となるようにした近似式であるが、その分、密度が 0.25 以上における粗度長減少の勾配が小さくなっている。第 2 章における地表面粗度の平面密度の分布解析においては、そのほとんどの場合が 0.5 ~ 0.6 以下になっていることを考えると、実用的観点から見た場合 Y.Jia の近似式のように平面密度が 1 の場合に粗度長が 0 となるように考慮する必要はないと考えられる。したがって、粗度長を近似する場合には、Theurer の場合のように、2 次式あるいは 3 次式による近似で十分であるといえるであろう。

またこれらの近似式は、平面密度 0 の場合、粗度長が 0 となるように立てられているが、実際は障害物が存在しなくても、地表面（風洞実験の場合床面）との摩擦力によって、風速 Profile は発達するので、粗度長が 0 ということは有り得ない話である。

したがって、実際の耐風設計への応用を考える場合には、表 5.1 における粗度区分 の最小値を定数項として加えるとよいであろう。その定数項は、他の部分に対して十分に小さいので、近似式全体としての精度に対しても問題はないと思われる。

この事に関しては、5.3 抗力と風速 profile の関係でさらなる考察を行う。

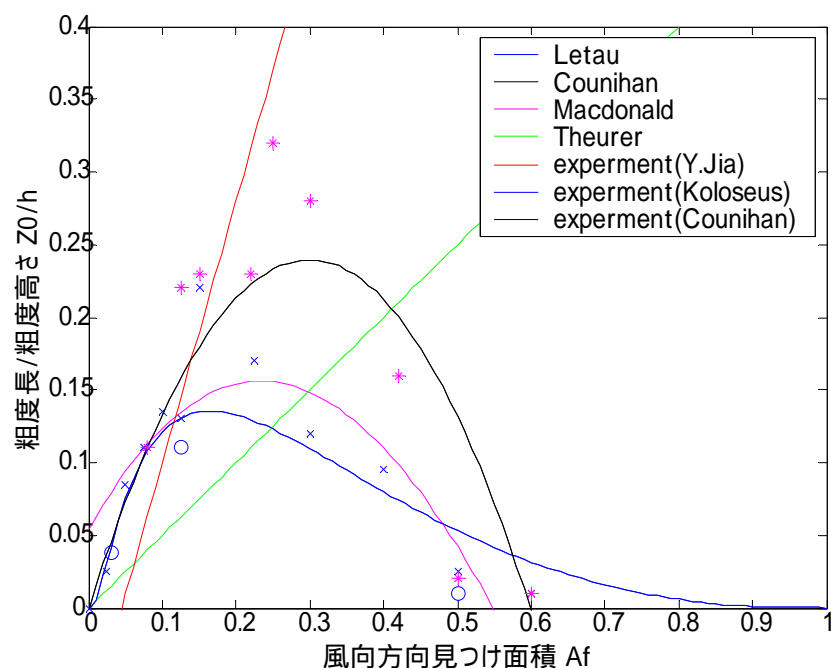


図 5 . 2 粗度長近似式の比較

5.2.2 ベキ指数則について

ベキ指数則については、第1章でも示したが、ここではゼロ面変位 d を加えた形のものを再び示す。 $d=0$ の場合が式(1.1)である。

$$\frac{U(z)}{U_R} = \left(\frac{Z-d}{Z_R-d} \right)^\alpha \quad (5.13)$$

再び、崔(1990)よりベキ指数の推定の一部を表 5.2 に示す。

ここでのベキ指数 は 5.3.1 にて後述するベキ指数と粗度長の関係式から求められたものも含まれる。

表 5.2 ベキ指数の推定値

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

地表面粗度の粗度パラメータからのベキ指数 の推定については実例が少なく、亀井・丸田 (1978) が見当たるくらいである。

$$\gamma = \frac{A_p \cdot h}{S \cdot Z_{10}} \text{ で表される roughness 密度 に対し} \quad (\text{但し } Z_{10} = 10m)$$

$$\alpha = 0.682 \sqrt{2\gamma - \gamma^2} \quad (5.14)$$

この亀井・丸田の式(5.14)と、大熊(1986)による平面密度に対する実験値と菅野(2003)による平面密度に対する数値解析から求めた離散値を図 5.3 に示す。但し、式(5.14)における は実測値に則した設定となっているので、大熊・筆者の値と同グラフ上にプロットするには仮定と変換が必要である。まず、 が平面密度に比例することは確かである。亀井・丸田の論文では、実測値においては $Z_{10} = 10m$ と規定されているが、実験においてどのような仮定のもとに を求めたのかは記載されていない。そのため

$$\gamma = \frac{A_p \cdot h}{S \cdot Z_{10}} = c \times (\text{平面密度})$$

とし、変数 c を 0.5、1、2 と変化させたものをプロットする。大熊の実験の縮尺率を大まかに考えると、 c は 1 前後の値をとると考えられること、また亀井・丸田の式は平面密度が約 0.2 以下における実験値から外挿されたものであることを付け加えておく。

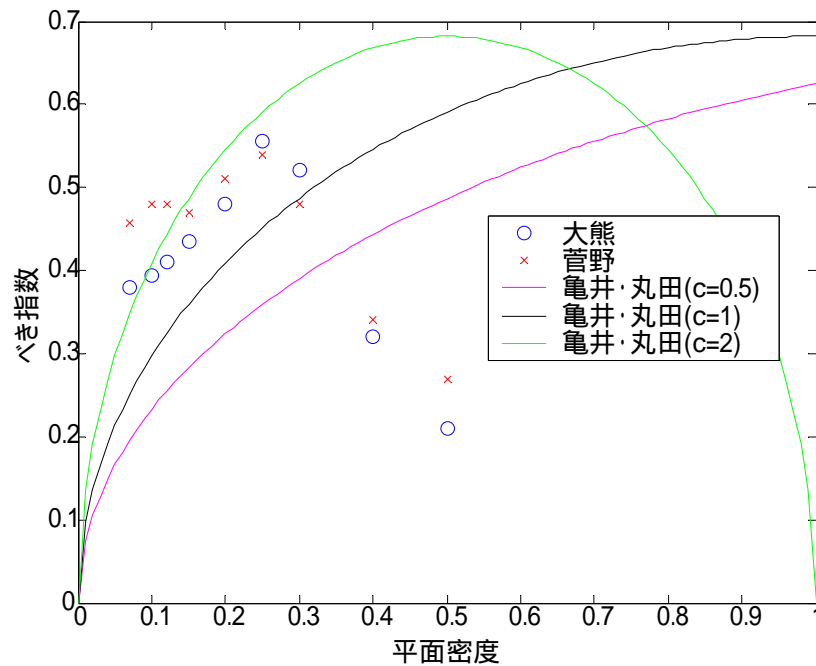


図 5 . 3 ベき指数と平面密度

大熊による 2 次元ラフネスの実験、及び筆者による数値解析結果では、本論文における抗力実験と粗度長の推定結果と同様に、平面密度 0.2 ~ 0.3 においてベき指数は最大値をとる。亀井・丸田の式は、 $c=2$ 近傍で、平面密度が低い場合に限って他の値と整合している。亀井・丸田の式は、roughness 密度 を高さ 10m で無次元化しているということで、実験値との合致を計るのは、スケールなどの点で少々難儀である。また、大熊・菅野による値は、実験スケールにおいて吹送距離 6m の場合であり、一方亀井・丸田の実験では吹送距離 8m の場合である。境界層の発達とともに、ベき指数は減少していくという傾向 (5.3 においてとりあげる) からすると、本来のスケールから想定される c の値 (1 前後) における正しい値であるとも言える。

5.2.3 境界層厚さ・べき指数の吹送距離方向の変化について

(1) 境界層厚さについて

境界層厚さの吹送距離方向変化については、理論・実験・数値解析によって調べられている。理論的には、5.1 の式(5.3)により、吹送距離の 0.5 乗に比例して増加する。

また、大熊(1986)は風洞実験による解析によって

$$\delta/h \propto (x/h)^{0.5} \quad (5.15)$$

一方、丸山(1989)の数値解析によれば

$$\delta/h = 0.97(x/h)^{0.45} \quad (5.16)$$

菅野(2002)は、不規則粗度上に発達する境界層に対し

$$\delta/h = 1.192(x/h)^{0.44} \quad (5.17)$$

(2) べき指数について

同様の粗度が続く場合、例えば千鳥状に並べられたラフネスが続く場合、べき指数は吹送距離方向に減少することが知られている。丸山(1989)は、密度を変化させた千鳥状に並べた粗度ブロックに対して実験・数値解析を行い吹送距離方向の変化を比較した。吉田ら(2003)は、市街地を再現した模型によってその各部でのべき指数を測定した。この場合は粗度の密度・高さは吹送距離方向に変化しているが定性的な変化としては、参考とできるであろう。菅野(2003)は、密度、高さのある分布関数により定義し、不規則ではあるが、定性的には同様な粗度が続くとみなせる、板状ラフネスに対して、実験・数値解析を行い吹送距離方向の変化を比較した。糸井(2004)は、密度一定で、粗度高さを変動係数 0.3 および 0.6 の対数正規分布により発生させ、数値解析を行った。

べき指数に対しては、近似式等は示されていない。これは、べき指数に関しては、境界層厚さに比べ、対象地点直前の粗度により値が上下し、近似式を提案することは極めて難解であるという理由もある。しかし、平均風速鉛直分布の評価には、必要不可欠な問題であり、今後より一層の発展が望まれる。

5.3 抗力係数と平均風速鉛直分布の関係

5.3.1 関連指標間の関係式について

境界層高さについては、粗度長および摩擦速度を用いて、以下のような関係式がある。

E.S.D.U では

$$Z_g = 1000 Z_0^{0.18} \quad (5.18)$$

Blackadar(1962)や Deave ら(1978)、Australia 基準においては

$$Z_g = B U_* / f \quad (B \text{ は定数}) \quad (5.19)$$

という式が提案されている。式(5.19)における B は 0.2 ~ 0.3 程度の値がとられている。

また、この粗度長 Z_0 とべき指数 α の関係についてであるが、対数則の適用範囲はレイノルズ応力が一定となる高さ範囲であり、べき指数則の適用範囲は、ある高さから境界層高さまで（対数則に比べ境界層下部において近似精度は低い）と言われているが共に同じ平均風速の鉛直分布に対して、一定の近似精度を持っていると考えたと両者の間に関係があることは想像できる。Counihan(1975)は既往の観測結果を用いた近似により

$$\alpha = 0.096 \log Z_0 + 0.0156 (\log Z_0)^2 + 0.24 \quad (5.20)$$

Deave ら(1978)は、修正対数則とべき法則を関連付け

$$\alpha = \left[1.16 + \left(\frac{7.0}{U_G} \right) \right] / \ln \left(\frac{150}{Z_0} \right) \quad (5.21)$$

また、石崎(1971)は、150m以下の高さ範囲における平均風速の鉛直分布は対数則に従うとし、べき指数の最適値を次式により定めた。

$$\alpha = \left\{ \ln \left(\frac{Z_a}{Z_0} \right) \right\}^{-1} \quad (5.22)$$

Z_a に関しては、石崎は基準高さ（10m や 20m）を用い、Davenport は 30m を用いた。

また、崔はべき指数則と対数則が 10m から 200m で同等とみなせると仮定し以下の式展開により Z_a を導いた。但し、ここでは一般化のために高さ Z_1 から Z_2 の範囲内においてべき指数則と対数則が同等みなせるという仮定のもと式展開を行う。

$$\begin{aligned} \frac{U(Z_2)}{U(Z_1)} &= \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right)^\alpha = \ln \left(\frac{Z_2}{Z_0} \right) / \ln \left(\frac{Z_1}{Z_0} \right) \\ \alpha &= \frac{1}{\ln(Z_2 / Z_1)} \ln \left\{ \ln \left(\frac{Z_2}{Z_0} \right) / \ln \left(\frac{Z_1}{Z_0} \right) \right\} \end{aligned} \quad (5.23)$$

ここで $\ln x$ の級数展開式

$$\ln x \cong 2\left\{\left(\frac{x-1}{x+1}\right) + \frac{1}{3}\left(\frac{x-1}{x+1}\right)^3 + \frac{1}{5}\left(\frac{x-1}{x+1}\right)^5 + \dots\right\} \cong 2\left(\frac{x-1}{x+1}\right) \quad (x > 0) \quad (5.24)$$

を用いると は以下の式で表される。

$$\alpha = \frac{2}{\ln(Z_2/Z_1)} \cdot \frac{\ln(Z_2/Z_1)}{\ln(Z_1 Z_2 / Z_0^2)} \quad (5.25)$$

$$\alpha = \left\{ \ln\left(\frac{\sqrt{Z_1 Z_2}}{Z_0}\right) \right\}^{-1} \quad (5.26)$$

ここで式(5.26)に関する問題点が浮かび上がる

例えば、崖の場合の通り $Z_1=10$ 、 $Z_2=200$ とすると(1)式は $Z_1=10$ 、 $Z_2=15$ でも成立しうるので、極限的には式(4)は

$$\left\{ \ln\left(\frac{\sqrt{Z_1 Z_1}}{Z_0}\right) \right\}^{-1} < \alpha < \left\{ \ln\left(\frac{\sqrt{Z_2 Z_2}}{Z_0}\right) \right\}^{-1} \quad (5.27)$$

このようにばらついてしまう理由については第一に、をどの区間で評価したかが問題となるであろう。第2には、(5.24)における級数展開による近似が考えられるが、その差はごく微小である。ただ、べき指数則の境界層内のほぼ全範囲にて相応な値を推定可能であるという利点を考慮すると、崖のようにべき指数則と対数則が同等とみなせる範囲において上記式(5.26)の通りに考えることが、相応しいと考えられ得る。

崖の $Z_1=10\text{m}$ 、 $Z_2=200\text{m}$ の場合、

$$\alpha = \left\{ \ln\left(\frac{50}{Z_0}\right) \right\}^{-1} \quad (5.28)$$

崖によると式(5.21)および式(5.28)は既往の観測結果（1990年以前）とよく一致している。

5.3.2 抗力係数と風速分布パラメータの関係

抗力係数と地表面と自然風の間が生じるせん断力ならびに摩擦速度・レイノルズ応力は以下のような関係式で結ばれている。

この式(5.29)～式(5.31)は、定義であり確定的な要素である。

$\tau_0 = C_D \cdot (1/2\rho \cdot U_0^2)$	抗力係数とせん断力の関係	(5.29)
$\tau_0 = \rho u_*^2$	せん断力と摩擦速度の関係	(5.30)
$u_* = \sqrt{-u'w'}$	摩擦速度とレイノルズ応力の関係	(5.31)

また対数則とべき指数則をもう一度列記する

式(5.32)、式(5.33)は定義ではあるが、その適用範囲・近似精度の問題が発生する式である。

$\frac{U_0}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \log\left(\frac{z}{z_0}\right)$	対数則	(5.32)
$\frac{U(z)}{U_R} = \left(\frac{Z}{Z_R}\right)^\alpha$	べき指数則	(5.33)

さて、ここでの目的は抗力係数 C_D から平均風速鉛直分布の指標となるべき指数 または粗度長 Z_0 を導くことである。以下、ここまでにあげた式の展開により、それを試みる。

式(5.22)より

$$\frac{1}{\alpha} = \left[\log\left(\frac{z}{Z_0}\right) + \log\left(\frac{Z_a}{z}\right) \right] \quad (= \log\left(\frac{Z_a}{Z_0}\right)) \quad (5.34)$$

ここでの z は対数則の満たされる任意高さとする。

これを対数則（式(5.32)）に代入すると

$$\frac{U(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \left[\frac{1}{\alpha} - \log\left(\frac{Z_a}{z}\right) \right] \quad (5.35)$$

一方、式(5.29)、(5.30)より 摩擦速度 u_* は抗力係数 C_D を用いて

$$u_* = U(Z_G) \sqrt{\frac{C_D}{2}} \quad (5.36)$$

(5.26)を式(5.25)に代入して

$$\frac{U(z)}{U(Z_G)} \sqrt{\frac{2}{C_D}} = \frac{1}{\kappa} \left[\frac{1}{\alpha} - \log\left(\frac{Z_a}{z}\right) \right] \quad (5.37)$$

$$\frac{1}{\alpha} = \kappa \frac{U(z)}{U(Z_G)} \sqrt{\frac{2}{C_D}} + \log\left(\frac{Z_a}{z}\right) \quad (5.38)$$

式(5.38)にべき指数則（式(5.33)）を代入して

$$\frac{1}{\alpha} = \kappa \left(\frac{z}{Z_G} \right)^\alpha \sqrt{\frac{2}{C_D}} + \log\left(\frac{Z_a}{z}\right) \quad (5.39)$$

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なければならない。

本実験では、抗力測定時における接近流の境界層高さがピトー管の高さにおいて近似可能であるだろうという考察に基づき、式(5.29)におけるせん断力の風圧係数による基準化に用いている U_0 にはピトー管により計測される風速を用いた。また、本実験のピトー管の高さは 250mm である。

いま、 $z=250\text{mm}$ において、対数則およびべき指数則の両者が同等とみなせると仮定し、また崖による実スケールにおける予測値 $Z_a=50\text{m}$ を実験スケール（1 : Scale）により $Z_a=50 \times \text{Scale}/1000\text{mm}$ として適用し、 Z も 250mm をみなすと式(5.39)は、（この場合 z を実スケールに変換しても可）

$$\frac{1}{\alpha} = \kappa \sqrt{\frac{2}{C_D}} + \log\left(\frac{50 / \text{Scale} \times 1000}{250}\right) \quad (5.40)$$

また式(5.40)と式(5.22)より

$$Z_0 = 250 \left(\exp \left(\kappa \sqrt{\frac{2}{C_D}} \right) \right)^{-1} \quad (5.41)$$

以上により、風速分布を表す代表パラメータであるべき指数 および粗度長 Z_0 を抗力係数 C_D により表すことができた。

5.3.3 抗力係数と風速分布パラメータの関係その2

5.3.2では、べき指数則、対数則および崔によって得られたべき指数と粗度長の関係式、理論的背景をもとにべき指数と抗力係数の関係式を導いた。本節では、表面的に抗力係数と風速分布パラメータの関係を探る。5.2.1節と5.2.2節では、平面密度に対する粗度長及びべき指数の近似式あるいは実験結果・数値解析結果を示したが、粗度長及びべき指数が、平面密度0.2~0.3で最大値をとりその後減少する事は、第4章における抗力の解析においても非常に似たような現象が見られた。第4章で得られた抗力の近似式と粗度長及びべき指数の増減がどの程度類似しているか比較を試みる。比較をするにあたって、粗度長及びべき指数の比較対象となるのは、高さ変化のない平面密度の変化にたいする増減である。したがって、第4章の式(4.1)が比較対象に相当する。また、抗力係数

と粗度長ならびにべき指数は勿論異なる値であるので、それぞれの最大値で基準化した値を比較することとする。図5.4に粗度長と抗力係数の近似式による比較を、図5.5 Theurerの近似式と抗力係数の近似式による比較を、図5.6にべき指数と抗力係数の近似式による比較を示す。5.3.2で理論により示した関係性を定性的に見て取ることが出来る。

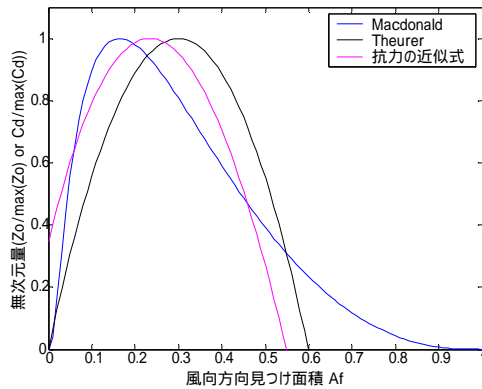


図 5.4 抗力と粗度長の比較

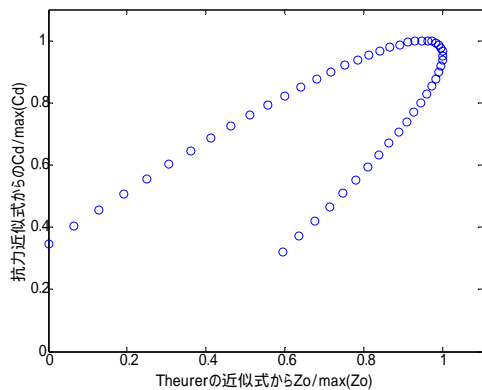


図 5.5 Theurer v.s 抗力の近似式

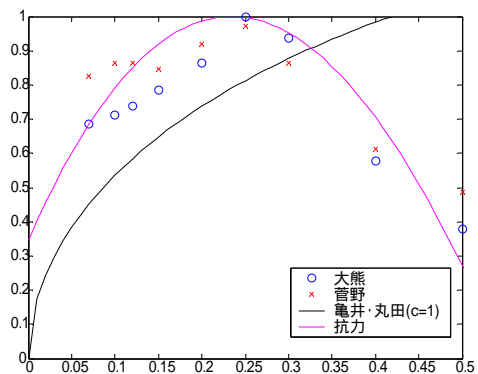


図 5.6 抗力とべき指数の比較

5.3.4 実験スケールにおける抗力係数の持つ意味

抗力測定実験においては、高さ 30mm のラフネスブロックを最小単位として実験を行った。小風洞の実験スケールは約 1 : 1 0 0 0 ~ 1 : 5 0 0 であることを考えると、最小単位である高さ 30mm のラフネスブロックは、実スケールにおいて 30m に相当する。(小風洞の実験スケールが 1 : 1 0 0 0 の場合)

本論文の市街地のモデル化に関しては、GIS データでは 10m 以下の建物の階数データがほとんど存在していないために、10m 以下の建物に関してはほぼ一律に高さ 7m として解析を行っている。そのため、本論文における市街地のモデル化での建物高さの最小単位は、7m と考えて差し支えない。しかし、実験において確認できた最小単位は高さ 30m についてであり、測定した抗力を実市街地に適用することは困難となってしまう。本実験で求めた最小単位 30m が 7m であることが理想であり、 $7/30=0.23$ 倍の粗度ブロック単位に対する抗力係数が求まれば吉という結論に至る。そこで以下のような考察を行う。

今右図のようなケースを考える。同じ境界層流に対し、一辺 30mm のラフネスブロックと一辺 7mm のラフネスブロックがあるとき、高さ方向の倍率が風力としてどのような影響を及ぼすのか考えるために、高さ方向 Z に対し、風速 U^2 の積分を試みる。但し、接近流の風速 $U(z)$ は

$$\frac{U(Z)}{U(Z_h)} = \left(\frac{Z}{Z_h} \right)^\alpha$$

のべき指数則の形で表せるものとする。

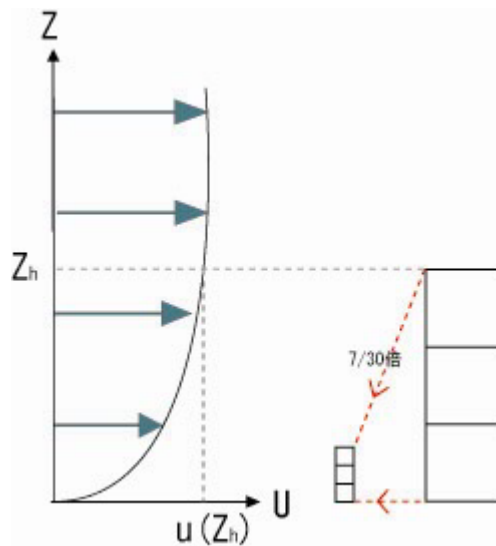


図 5.7 考察ケース

大きい方のラフネスブロックに関しては

$$\int_0^{Z_h} U^2(z) dz = \int_0^{Z_h} U^2(h) \left(\frac{Z}{Z_h} \right)^{2\alpha} dz = U^2(h) \left[\frac{1}{2\alpha+1} \left(\frac{Z}{Z_h} \right)^{2\alpha+1} \right]_0^{Z_h} = \frac{U^2(h)}{2\alpha+1}$$

小さいものについても同様に計算すると

$$\int_0^{rZ_h} U^2(z) dz = \int_0^{rZ_h} U^2(h) \left(\frac{Z}{Z_h} \right)^{2\alpha} dz = U^2(h) \left[\frac{1}{2\alpha+1} \left(\frac{Z}{Z_h} \right)^{2\alpha+1} \right]_0^{rZ_h} = \frac{U^2(h)}{2\alpha+1} \cdot r^{2\alpha+1}$$

粗度ブロックを千鳥状に配置した場合には、粗度ブロックの見つけ面積は、粗度ブロッ

クの大きさによらず、平面密度と同値である。

したがって、図 5.7 のような単純なモデルが、抗力測定実験においてフロート上に複雑に並べられた粗度ブロック群にも適用できると仮定すれば、

接近流のべき指数を α とするとき r 倍の粗度ブロックに対する抗力係数は

$$Cd(\text{実験ケース } r \text{ 倍を最小単位とした粗度ブロック}) \\ = r^{2\alpha+1} \cdot Cd(\text{実験ケース})$$

この仮定を適用すると、実験において用いた粗度ブロックの最小単位を、実スケールにおける建物の最小単位に合わせた、抗力係数を求めることが出来る。

本実験における抗力測定の接近流を描くと

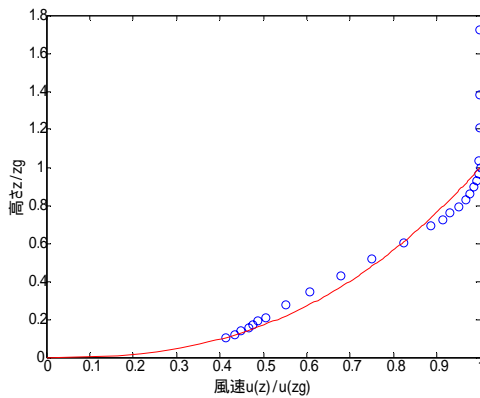


図 5.8 接近流の気流性状

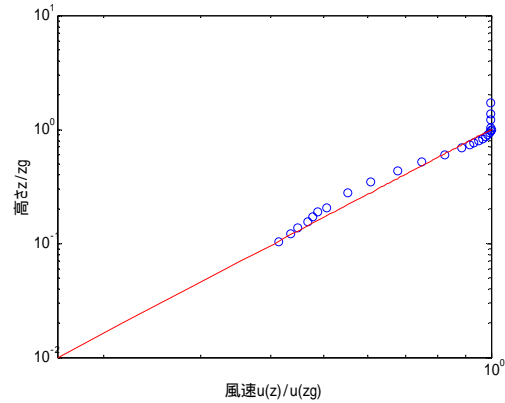


図 5.9 接近流の気流性状(logscale)

べき指数 $\alpha = 0.33$ に対しそれなりの近似精度をもっていることがわかる。

したがって、実験スケールを $(1 : \text{Scale})$ とすると

$$r^{\alpha+1} = (7 / (30 \times \text{Scale} / 1000))^{1.66} \quad (5.42)$$

この式(5.42)と式(5.40)により抗力係数 Cd に対するべき指数 α のプロットが得られる。

$$\frac{1}{\alpha} = \kappa \sqrt{\frac{2}{C_D}} + \log\left(\frac{50 / \text{Scale} \times 1000}{250}\right) \quad (5.40)$$

ここで、実験スケールとべき指数 α の値を適合させるために、3 . 4 節において求めた平均風速鉛直分布から得られるべき指数と、抗力測定装置から得られる抗力係数から求めたべき指数の Scale の違いによる対応関係を図 5.10 に示す。ただし、ここでの抗力係数は実験ケース自体への適用のため、式(5.42)とは関係がない。そのため、式(5.40)を利用した Scale の検討となる。

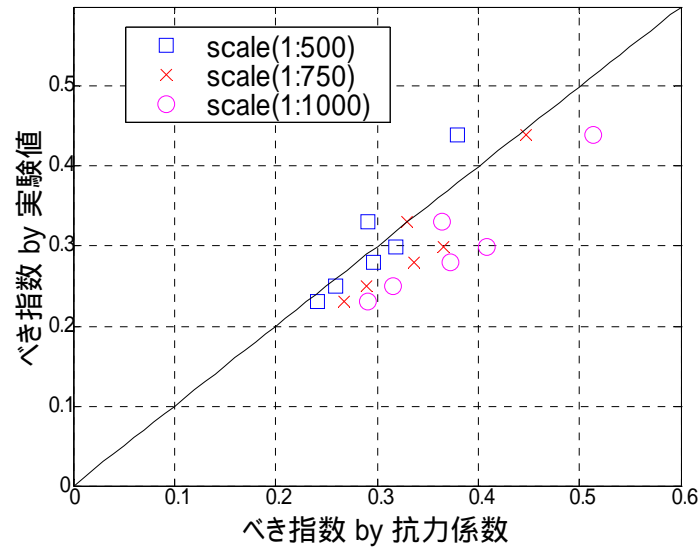


図 5.10 C_d に対する のプロット

実験スケールを 1 : 500 とみなした場合に、抗力係数からのべき指数の推定はよく一致している。従って、本論にて、行った実験のスケールは 1 : 500 であると考えられ、(スケールに関する考察は 3 . 2 . 4 の図 3.9 も参照されたい)

式(5.40)式(5.42)はそれぞれ

$$\frac{1}{\alpha} = \kappa \sqrt{\frac{2}{C_d}} + \log\left(\frac{100}{250}\right) \quad (5.43)$$

$$r^{\alpha+1} = (7 / (30 \times 500 / 1000))^{1.66} = 0.2822 \quad (5.44)$$

となる。

次に、この両式から得られる が、実測値に対してどの程度の範囲となっているのかを調べてみる。

第 3 章における抗力係数 C_d の推定では、 C_d の値は大まかに見積もって 0.005 ~ 0.1 の範囲 (床面のみの抗力係数は 0.0012) にある。この C_d を式(5.44)により実スケールに直すと、 C_d の範囲は、0.001 ~ 0.03 (床面のみの場合はこの章におけるスケールの検討は適用できない) となり、これを式(5.43)によりプロットしてみると図 5.11 のようになる。

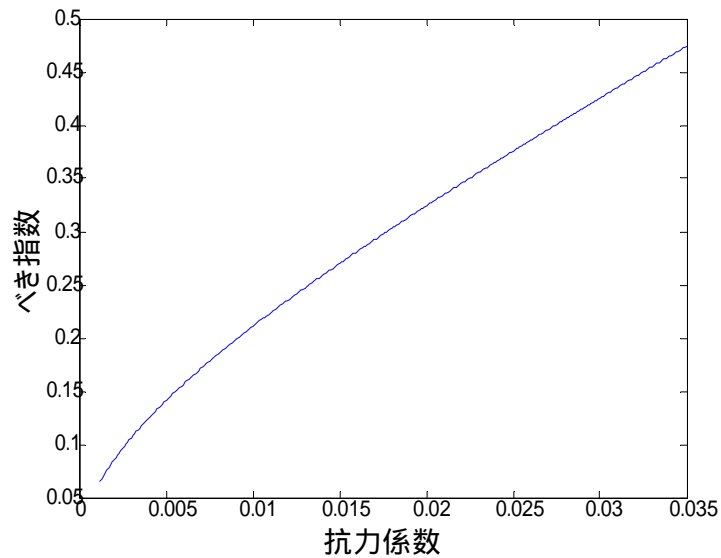


図 5.11 抗力係数に対するべき指数のプロット

床面のみの場合においてべき指数が 0.1 弱であり、高密度市街地においてべき指数が 0.5 程度となるということは、オーダー的には既往の観測結果に適合していることがわかる。また、式(5.43)においては 0.3811 以上において、べき指数がマイナスとなってしまうので、注意が必要であるが、実験から想定するに、そのような抗力係数は実市街地においても起こりえないと思われる。

5.4 まとめ

本章では、まず流体力学に基づく境界層に関する理論的背景をまとめ、次に既往の粗度長、べき指数に関する報告をまとめた。

理論的背景および既往の研究によるいくつかの式を用い、いくつかの仮説をたてることにより、べき指数 および粗度長 Z_0 と抗力係数 C_d の関係式を導いた。また、実験スケールと実スケールに関する考察を行い、実験スケールを実スケールに直した場合の、考えられうる抗力係数の範囲におけるべき指数の変化を図示し、既往の研究におけるべき指数の値とのオーダー的一致を確認した。

次章では、本章で導いたべき指数 および粗度長 Z_0 と抗力係数 C_d の関係式を用い、東京 23 区における既往の観測結果や市街地模型による風洞実験結果との検証を行うとともに、べき指数 による風速マップの提案を行う。

参考文献	
日野幹雄著	「流体力学」
J.Counihan	「Adiabatic Atmospheric Boundary Layers」: A Review and Analysis of Data from the period 1880-1972 ,Atmospheric Environment vol9,1975,pp871-905
崔恒 神田順	「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
H.Lettau	「Note on aerodynamic roughness-parameter estimation on the basis of roughness-element description」 Journal of Applied Meteorology vol8,pp828-832
J.Counihan	「Wind tunnel determination of the roughness length as a function of the fetch and the roughness density of three-dimensional roughness elements」 Atmospheric Environment vol5,pp637-642
L.Peterson	「A wind tunnel evaluation of methods for estimating surface roughness length at industrial facilities」 Atmospheric Environment vol31,No1,1997,pp45-57
Y.Jia	「Effects of surface roughness element spacing on boundary-layer velocity profile parameters」 Journal of W.E.I.A vol73,1998,pp215-230
Macdonald	「An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays」 Atmospheric Environment vol32,No11,1998,pp1857-1864
亀井勇 丸田栄蔵	「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
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
菅野宏紀他	「数値解析のための一次元不規則粗度」 日本建築学会大会梗概集構造 2003.9 pp-91-92
丸山敬	「粗度要素の抵抗および体積変化を考慮した k- モデルによる乱流境界層の数値計算」日本建築学会構造系論文報告集第 404 号,1989,10,pp75-81
吉田智哉他	「ドップラーソーダを用いた地表面粗度の異なる地点の風速の鉛直分布に関する研究」日本建築学会大会梗概集構造 2003,9,pp85-86
糸井達哉	「市街地上空の平均風速鉛直分布の評価手法」東京大学博士論文第 3 章 2004

第 6 章

地理情報システムに基づく

平均風速鉛直分布の評価

6．地理情報システムに基づく平均風速鉛直分布の評価

本章では、4章で求めた粗度パラメータによる抗力係数の評価式と5章で求めた抗力係数とべき指数の係数の関係を用いて、2章で解析したGISメッシュデータを元に平均風速鉛直分布のマッピングを行う。

6．1 既往の観測結果・実験結果との比較

田村ら（2001）は、一連の研究において、ドップラーソーダにより地上高さ 50～350m の範囲における市街地の平均風速鉛直分布を測定し、風向ごとのべき指数を整理している。（2002 年度建築学会構造系梗概集他）それに付随して、吉田ら（2003）は、観測値まわりにたいして詳細な市街地模型を作成し風洞実験をおこなった。また、中村(2001)は、7種類の街並モデルを作成し、風洞実験を行い、第2章に前述の中高層化率との関係を模索している。市街地を模擬した風洞実験は他にもあるものの、本論文で選んだ、粗度パラメータについての詳細を知ることは困難であった。そのため本節では、田村ら、大気境界層研究会によるドップラーソーダを用いた実測記録から得られたべき指数のうち東京23区内のものと吉田らの風洞実験から得られたべき指数に対して、各章で評価した式から得られるべき指数との比較を行う。また、評価式に用いる粗度パラメータの平均化面積、すなわちメッシュの大きさに関する検討も行う。前章までで導いた評価式からのべき指数の評価方法を図 6.1 にフローチャートとしてまとめる。

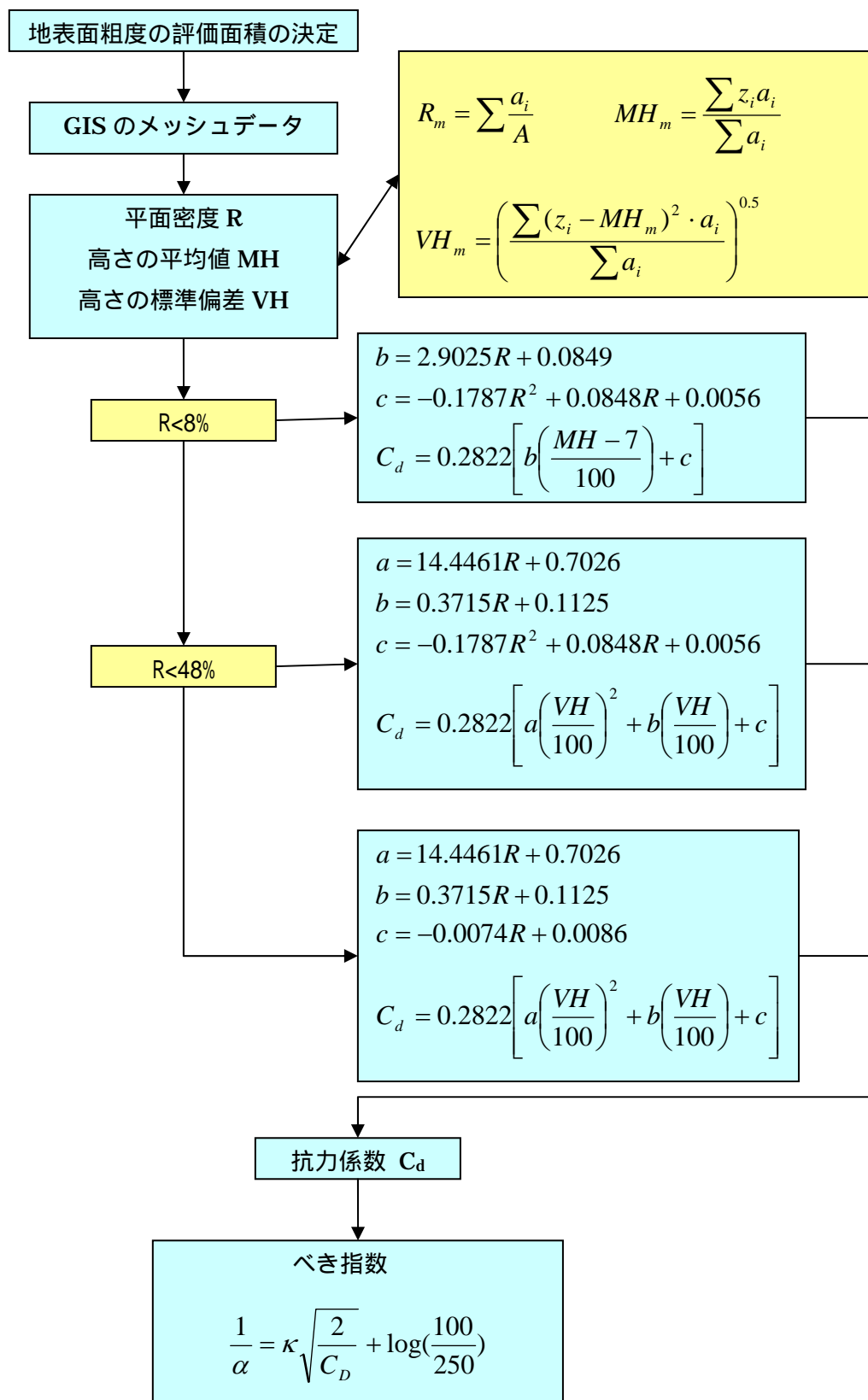


図 6.1 ベキ指数の評価フロー

地表面粗度評価による平均風速鉛直分布の推定においては、あるメッシュ内における粗度パラメータより、例えばべき指数を評価するが、市街地における地表面粗度は一様とはみなせないために、そのメッシュの大きさ、すなわち空間平均化面積によって、粗度パラメータの値は変わってしまう。建築物荷重指針（2002）では、地表面粗度区分の選定方法として、対象風向方向に、基準高さHの40倍と3kmの小さい方の半径をもった45度の扇型を描き、その地点における地表面粗度区分を評価するとしている。また、対象区間において粗度が急変する時には、滑から粗へ急変する場合には風上側の滑らかな地表面粗度区分を選択し、粗から滑へ変化する場合には、変化後の地表面粗度区分を選択するとなっている。また、主に亀井・丸田の式によるべき指数の解析では、糸井ら（2002）は、平均化距離（風向方向に）を5kmと10kmにより評価し、田中ら（1998）は約2kmとして評価している。そこで、本論における比較では、粗度の平均化距離2.5km、5km、7.5kmに対して評価を行う。

定めた地表面粗度の平均化距離に基づき、第2章において解析した東京23区の500m×500mのメッシュデータを用い評価を行う。但し、対象風向がメッシュに対して平行な場合には、平均化距離分のメッシュのデータを単純に平均化することによって粗度パラメータを求め、対象風向がメッシュに対して平行でない場合については、角度45度方向(例えば南東方向や北西方向)は、対角線上のメッシュの平均値から粗度パラメータを求めた。今回の比較では、16分割の風向(例えば南南西など)を比較対象とした場合は、参考値として角度45度方向により評価をおこなうこととした。

また、べき指数の観測値は、平均風速によって変化し、平均風速が強い方がべき指数の値は大きくなるという傾向がある。第5章における崔による近似式は、様々な風速時に観測されたデータからの近似式であるので、比較するデータは、可能な限りいくつかの風速グループから得られたべき指数の平均値とした。

それに付随して、本来、全比較対象と本論による提案方法との関係についても考慮したいところではあるが、各比較対象における境界層の発達状況は異なると考えられるので、全比較対象を同列として扱うことはできない。また、観測値の大気状況が、本論で提案した式に対する大気状況と一致しているとは限らないので、ここでは、絶対値ではなく、風向ごとのべき指数の相対的变化、又は吹送距離方向のべき指数の相対的变化に着目する。

(1) 東京タワーにおける観測値との比較 (中村 (2000))

東京タワーにおける観測値との比較を図 6.2 に示す。東京タワーの南側の市街地発達状況は、南南東側から南東 3km より東京湾があり、南から南南西にかけてには品川、南西は五反田あたりに相当する。風向 SSE は、海からの風の影響を拾える平均化距離 5km 以上において、べき指数の値が下がっていることがわかる。従って、平均化距離 5km では、方位 S および方位 SSE のべき指数の関係が観測値と一致している。

また方位 SSW に関しては、観測値では風向 S よりべき指数が大きいですが、本論の提案式では風向 S より小さくなってしまった。今回の比較では南南西を南西と置き換えて考えているため、品川周辺の高層ビル街の粗度を把握できなかったことがあげられる。また、風向 S 方向の地表面粗度を仮に扇型で評価すると粗度として、東京湾も含むこととなるので風向 S に関しての本来のべき指数はもう少し低い値となることもあげられる。

中村らは、風向方向に風上側 22.5 度の扇型の範囲内に入るメッシュによる平均値により粗度パラメータを解析しているのので、実際にその方法により計算を行ってみた。すると風向 SSW の値が相対的に大きくなることがわかった。また、平均化距離が大きくなったために、遠方の地表面粗度の小さい地域をとらえたためにべき指数の絶対値は小さくなった。

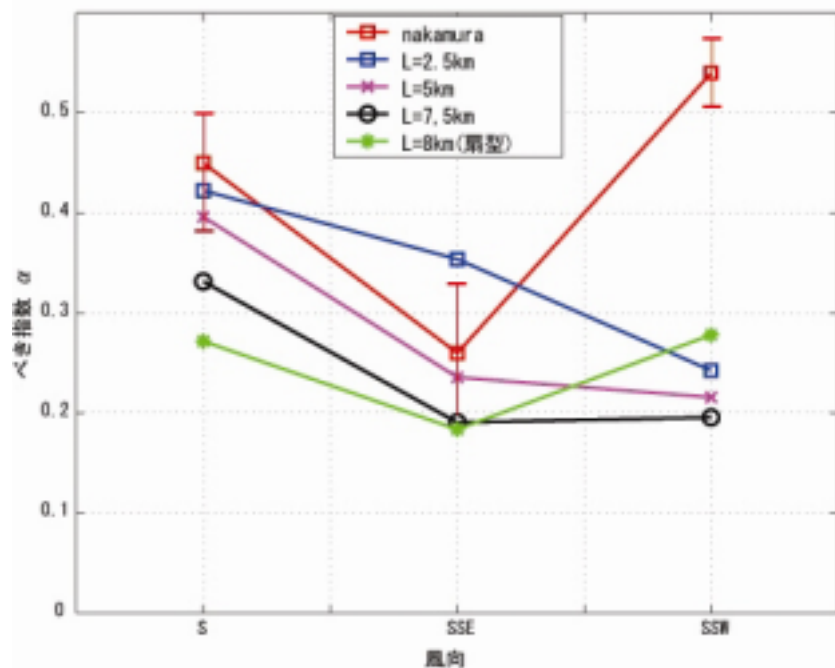


図 6.2 方位別・平均化距離別のべき指数の比較(東京タワー)

(2) 江東区台場から荒川区にかけての風洞実験との比較 (吉田(2003))

江東区台場から荒川区にかけての風洞実験による風向 S に対する、べき指数変化との比較を図 6.3 に示す。風洞実験の模型の範囲は、 $1.8\text{km} \times 13.6\text{km}$ であるので、平均化面積の幅は $500\text{m} \times 500\text{m}$ メッシュ 3 個分とした。はじめに、断っておかなければならないのは、風洞実験においては、観測点 3、4 の地域が大規模建築地域となっているが、本論で使用した GIS データではそのような建物群はあまり見受けられない。これは、GIS データが江東区湾岸区域のデータに関して十分でないことと、近年の湾岸地域の市街地の発展が急速であることが理由だと思われる。

海岸部のべき指数については、海風は一様に発達したもので、本論文の提案と合致する状況であるということもあって、平均化距離にかかわらず合致している。観測点 5 ~ 9 についても、GIS データから計算した抗力の値は、観測点 5 ~ 9 であまり変わらないため、平均化距離による差は顕著にはみられない。各観測点間の距離は 1.5km であり、観測点 3 ~ 4 のデータに不備があることを考えると、観測点 3 以降のデータですべての平均化距離において、有効であると考えうるデータは、観測点 8、9 のみとなる。その観測点 8、9 において相応の一致を見せている。

また、豊洲や月島における最近のマンションやビルの開発を考えれば、高さの標準偏差は、大きくなっていることが想定され、その結果は実験結果と一致すると思われる。

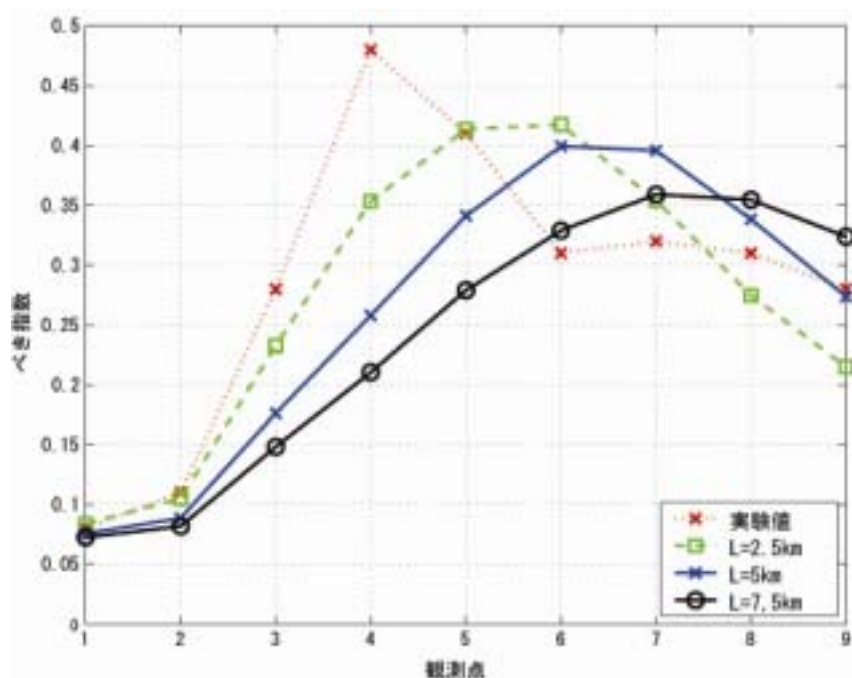


図 6.3 吹送距離別・平均化距離別のべき指数の比較(有明～荒川)

(3) 荒川区における観測値との比較 (宮下ら (2002))

荒川区における観測値との風向比較を図 6.4 に示す。風向 N 群は、風上側が東京 23 区外となってしまうので、ここでは、風向 S E , S , S W について比較を行った。前述したように、ベキ指数値は、風速によって変化する。宮下らのデータは、風速 0m/s から 25m/s まで 5m ごとに風速をグループ分けし、風速グループごとのベキ指数を評価している。本論文における比較対象は、地表面粗度によるベキ指数値の違いであるので、各風向ごとに 5 つの風速グループにおけるベキ指数の平均値を求め、そのベキ指数との比較を行った。

どの空間平均においても、風向ごとのベキ指数の相対的变化をよく表すことができた。

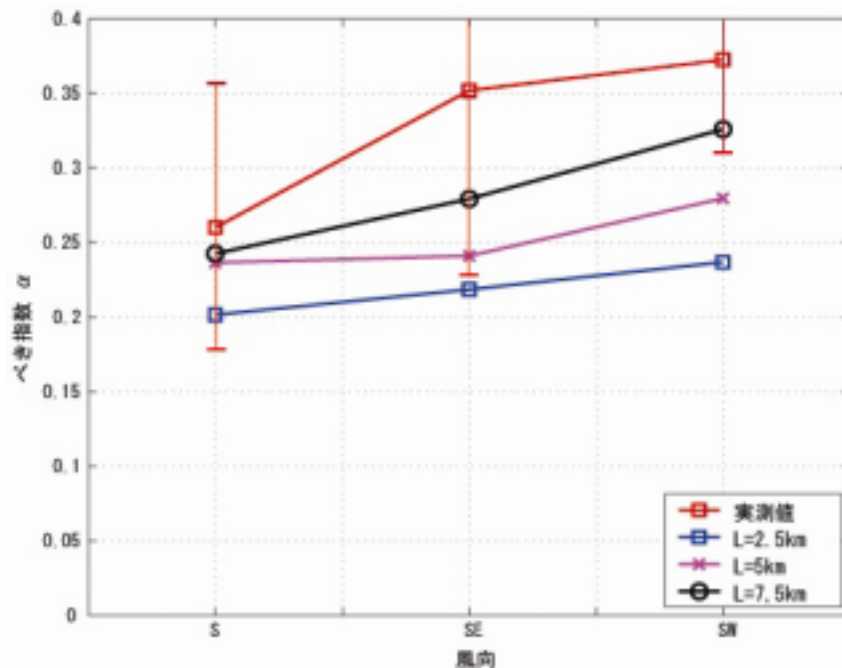


図 6.4 方位別・平均化距離別のベキ指数の比較(荒川区)

(1) から (3) において、観測値との比較を行った。(1) (3) における方位別のベキ指数の比較では、地表面粗度によるベキ指数値の違いを大まかに表すことができた。

(2) に関しては、データの不備もあり、評価として入れることはできないが、吹送距離方向のベキ指数変化、特に粗度が大幅に変化していく場合については、評価手法が不十分であるといえる。また、ベキ指数の絶対値については、風速等によっても変化し、不明な部分が多い。加えて、建築密度の平均値および標準偏差は、3 章における実験ではメッシュ内の重み付け平均値ならびに重み付け標準偏差により求めたが、本節の比較検討にいたっては、各メッシュの加重平均値により求めた。3 章における実験のフロート部の面積と、実験スケールの事を考えると、フロート部に再現された面積は、 $900\text{mm} \times 700\text{mm} \times 500^2 = 450\text{m} \times 350\text{m}$ と考えられ、 $500\text{m} \times 500\text{m}$ と近いと考えられる訳だが、粗度が吹送距離方向に変化する場合に対する検討が不十分であるために、その計算方法については、不明瞭な部分が多い。

6.2 地表面粗度マップの提案

6.1 節において、ある程度の比較を行い、地表面粗度の評価という点に関しては、本論文の手法の有効性を示すことができた。べき指数値を評価するには十分であるとは言えないが、粗度の相対的評価と、今後に向けた提案の意味も込め、地表面粗度マップを提案する。また、市街地の発達状況を確認する上で、100m×100m メッシュに関しても、考察を行う。本論におけるべき指数値の評価に用いたパラメータである、メッシュ内の平面密度、重み付け平均値、重み付け標準偏差についてのマップとそのメッシュ内の粗度がある程度一様に続いた場合に推定されるべき指数のマップを500mメッシュについて図6.5から図6.8に、100mメッシュについて図6.9から図6.12にそれぞれ示す。加えて、既往の亀井・丸田の式によって推定されるべき指数マップも参考のために図6.13、6.14に示す

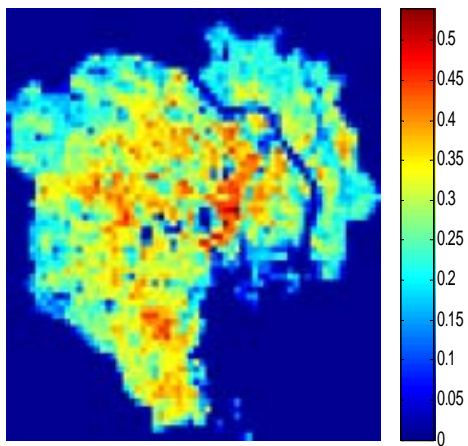


図 6.5 平面密度(500m メッシュ)

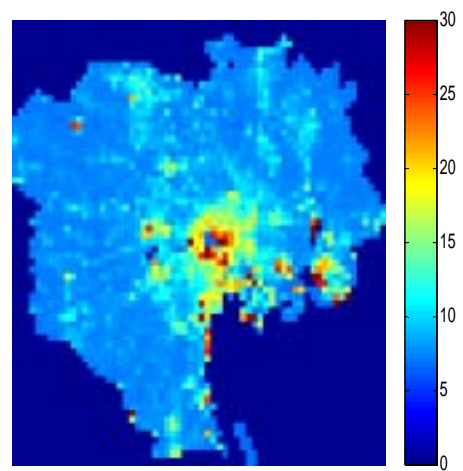


図 6.6 高さの平均値(500m メッシュ)

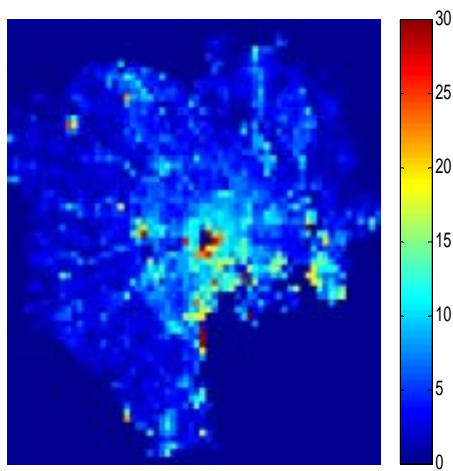


図 6.7 高さの標準偏差(500m メッシュ)

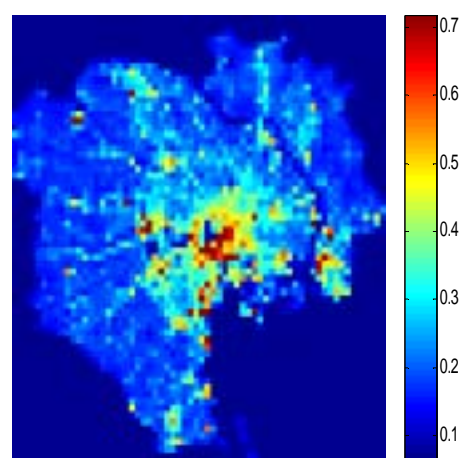


図 6.8 べき指数(500m メッシュ)

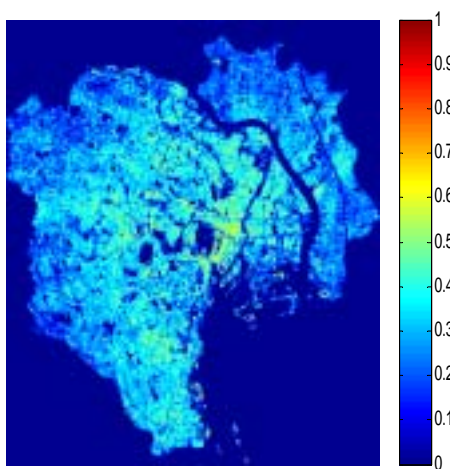


図 6.9 平面密度(100m メッシュ)

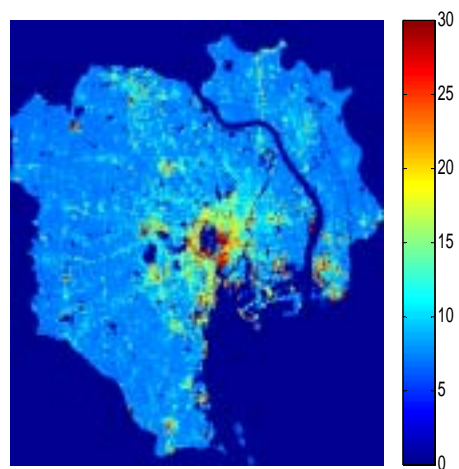


図 6.10 高さの平均値(100m メッシュ)

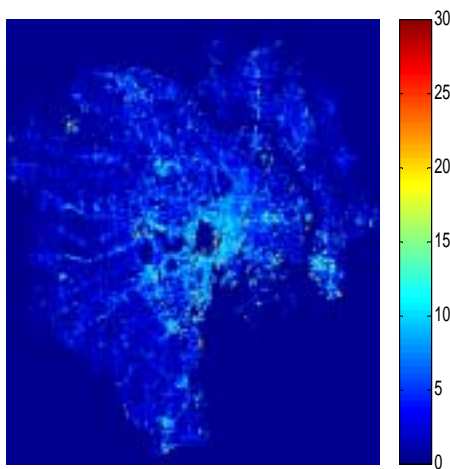


図 6.11 高さの標準偏差(100m メッシュ)

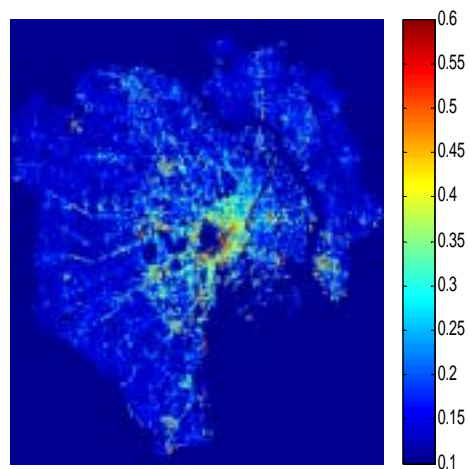


図 6.12 ベキ指数(100m メッシュ)

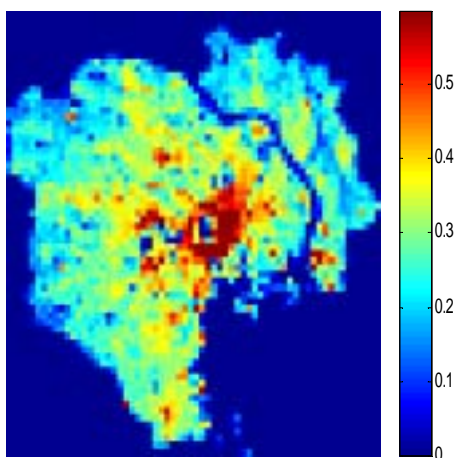


図 6.13 亀井・丸田の式による
べき指数(500m メッシュ)

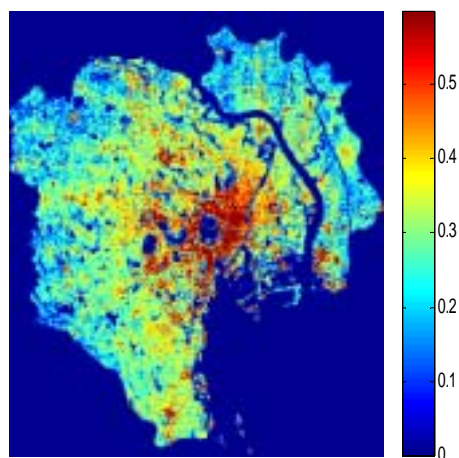


図 6.14 亀井・丸田の式による
べき指数(100m メッシュ)

[考察]

従来、粗度パラメータとして取り上げられていた、平面密度および高さの平均値は、郊外と都心の地表面粗度の差異をあまり感知できないパラメータであることがわかる。そのことは、亀井・丸田の式による図 6.13、図 6.14 との比較によってもわかる。亀井・丸田の式では、粗度パラメータとして平面密度・高さの平均値を用いているために、郊外におけるべき指数が大きめに推定されてしまう嫌いがある。一方、本論におけるべき指数の推定では、郊外におけるべき指数はおおむね 0.15～0.2 程度を推定し、都心におけるべき指数の推定では、0.3～0.6 程度となっている。

6.3 まとめ

本章では、2章で解析したGISデータ、4章で評価した抗力係数の評価式、および5章で導いたべき指数と抗力係数の関係式を用いて、東京23区におけるべき指数値の推定を行った。既往の観測結果との比較では、べき指数値の絶対値についての一致をはかることはできなかったが、風向方向の相対的な地表面粗度の影響については、相応の一致をはかることができた。また、べき指数の絶対値については、崖によるべき指数と粗度長の関係の評価式の Z_a の値を変化させることで変化する。崖による評価式は、1990年以前の観測結果に基づいており、1990年以前と以後の市街地における風速の計測方法や評価手法の違いが仮にあるとすれば、べき指数値の絶対値の不一致を説明することができる。また、対象風速グループをどう設定するかもべき指数の絶対値には大いに影響をもたらす。

これに伴い、地表面粗度の影響、およびべき指数の相対的变化について評価する意味で、東京23区におけるべき指数値の推定値をマッピングした。従来の亀井・丸田によるべき指数の近似式との比較では、郊外において特に違いをみせ、郊外と都心のべき指数値の違いを評価することができた。これによって、例えば山手線内の都心においては、少なくともべき指数値0.3程度を用いても問題ないのではないかと提案できる。

参考文献	
野々村善民	「東京都北区志茂における風観測」 日本建築学会大会梗概集構造 1996.9 pp127-128
日比一喜	「ドップラーソーダによる風速鉛直分布の実測」 日本建築学会大会梗概集構造 1996.9,pp155-156
菅沼信也他	「都市域における地表面付近の風速変化に関する風洞実験」 日本建築学会大会梗概集構造 2000.9,pp123-124
中村修他	「都市域における平均風速鉛直分布の検討」 日本建築学会大会梗概集構造 2000.9,pp125-126
佐々木他	「ドップラーソーダを用いた地表面粗度の異なる地点の風速鉛直分布に関する研究その15」 日本建築学会大会梗概集構造 2000.9,pp127-128
岩谷他	「ドップラーソーダを用いた地表面粗度の異なる地点の風速鉛直分布に関する研究その18」 日本建築学会大会梗概集構造 2002.8,pp101-102
宮下他	「ドップラーソーダを用いた地表面粗度の異なる地点の風速鉛直分布に関する研究その19」 日本建築学会大会梗概集構造 2002.8,pp103-104
須田他	「ドップラーソーダを用いた地表面粗度の異なる地点の風速鉛直分布に関する研究その20」 日本建築学会大会梗概集構造 2002.8,pp105-106
中村修	「都市の土地利用数値情報を用いた風速鉛直分布の評価方法に関する研究」 2001.3 東北大学博士論文

第 7 章

まとめ

7. まとめ

本論文では、地理情報システムに基づく平均風速鉛直分布の評価を目的に、GISデータから地表面粗度パラメータを、実験から地表面粗度パラメータと平均風速鉛直分布を表すパラメータの関係を評価することによって、GISデータからのべき指数値の推定を行った。以下に各章のまとめと結論を述べる。

第1章では、平均風速鉛直分布に関する既往の研究と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。またべき指数は、建物高さのばらつきの影響を受けるという報告はあるものの、そのばらつきについての検討はほとんど行われていない事を問題点として指摘した。

第2章では、地理情報システムに基づき、地表面粗度を定量的に分析した。特に、既往の研究では扱われていない建物高さの標準偏差についての評価と、各粗度パラメータの相関について評価を行った。粗度パラメータとしては、平面密度、建物高さの平均値、建物高さの標準偏差、幾何学的粗度長、中高層化率をとりあげた。

第3章では、地表面と空気の間相互作用するせん断力に着目し、模型を載せたターンテーブル全体を空気による力で地面から持ち上げることで摩擦を少なくし、風による抗力全体を計測する実験装置によって、粗度形状の違いによる抗力（せん断力）の変化を測定した。抗力の変化は、粗度パラメータのうち平面密度の小さい場合には高さの平均値と、平面密度の大きい場合には高さの標準偏差と最も関係が深いことが明らかになった。

第4章では、第3章の結果に基づき、いくつかの仮説を立て、粗度パラメータによって抗力の評価式を提案した。用いる粗度パラメータは、平面密度、高さの平均値、高さの標準偏差で、平面密度8%未満、平面密度8%以上48%未満、平面密度48%以上に対してそれぞれ異なった評価式を提案した。また、本実験で行ったケースは、密度2%~40%までであり、密度40%以上の場合については予測の域を過ぎない。ただ、第2章におけるGISデータの解析によると、市街地の平面密度は概ね50%以内に収まっているので、市街地の平均風速分布の評価というターゲットに関しては、一応の評価式となっていることとした。

第5章では、抗力と平均風速鉛直分布の関係を明らかにすることを目的として、既往の理論式および経験式により、抗力係数からべき指数を推定する評価式を提案した。また、第3章における実験を実市街地に適用する際の相似則についても検討を行った。

第 6 章では、第 2 章から第 5 章で求められた、市街地における粗度パラメータ値、粗度パラメータ値からの抗力係数の評価式、抗力係数からのべき指数の評価式を用いて、市街地におけるべき指数の推定を行い、東京 23 区における地表面粗度評価用のマッピングを行った。各章における評価式からのべき指数の推定のまとめとしては、図 6.1 を参照されたい。また、推定されたべき指数と実測記録から得られたべき指数の比較では、絶対値での一致をはかることはできなかったが、風向ごとの相対的な変化については一致をはかることができた。

今後の課題

各章における不確定要因について列記することで今後の課題とかえる。

第 2 章において用いた GIS データは、完全に整合性のとれたデータではなく特に階数データ等について不十分な点がある。また、本論文では標高の考慮を行っていないが、平均風速鉛直分布を評価するにあたって、標高がどの程度影響するのかを考慮する必要がある。

第 3 章における抗力測定実験では、同様の接近流に対する抗力係数の変化を計測したが、実市街地では、対象地点によって接近流はまちまちであり、接近流の違いによる抗力係数の変化も考慮する必要がある。また、平面密度についても 2% ~ 40% の限られたデータしか計測していないので、これについても今後適用範囲を増やす余地がある。

第 5 章における理論式・経験式から導いた抗力係数とべき指数の関係式については、対数則・べき指数則の適用範囲や境界層高さに関する検討が十分ではない。また、べき指数の評価式は、地表面粗度が風上側に一樣である場合に対するものであるため、実市街地への適用に関して十分ではない。風洞実験や数値解析において、地表面粗度の吹送距離方向変化によってもたらされるべき指数の変化に関する検討が必要である。

また、第 6 章において、比較した観測データについては、より多くの自然風中での観測と、より正確な測定方法によって、数多く蓄積されることがと望まれる。

付録

A.第3章における実験ケース

第3章における実験ケースを平面密度別に表A.1～A.8に示す

表A.1 平面密度2%の場合

階数	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
case1	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case2	6	1	4	4	0	0	0	0	0	0	0
case3	9	0	2	3	0	0	0	0	1	0	0
case4	12	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case5	10	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case6	8	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case7	6	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case8	4	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case9	2	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case10	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case11	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0
case12	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0

表A.2 平面密度4%の場合

階数	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
case1	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case2	21	6	4	0	0	0	0	0	0	0	0
case3	2	28	0	1	0	0	0	0	0	0	0
case4	5	16	10	0	0	0	0	0	0	0	0
case5	2	25	4	0	0	0	0	0	0	0	0
case6	27	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case7	23	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case8	19	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case9	15	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case10	11	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case11	7	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case12	3	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case13	0	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0

case14	0	0	31	0	0	0	0	0	0	0	0
case15	0	0	0	31	0	0	0	0	0	0	0

表 A.3 平面密度 8%の場合

階数	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
case1	54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case2	52	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case3	52	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
case4	48	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case5	48	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case6	48	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case7	49	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0
case8	43	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case9	44	9	0	1	0	0	0	0	0	0	0
case10	45	5	4	0	0	0	0	0	0	0	0
case11	35	18	1	0	0	0	0	0	0	0	0
case12	31	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case13	38	9	7	0	0	0	0	0	0	0	0
case14	31	20	2	0	0	0	0	0	0	0	0
case15	39	8	3	4	0	0	0	0	0	0	0
case16	41	1	5	7	0	0	0	0	0	0	0
case17	13	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case18	13	40	0	1	0	0	0	0	0	0	0
case19	9	44	1	0	0	0	0	0	0	0	0
case20	19	21	14	0	0	0	0	0	0	0	0
case21	0	54	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case22	0	0	54	0	0	0	0	0	0	0	0
case23	0	0	0	54	0	0	0	0	0	0	0
case24	34	0	5	1	0	14	0	0	0	0	0
case25	0	23	23	8	0	0	0	0	0	0	0
case26	24	11	0	0	0	19	0	0	0	0	0

表 A.4 平面密度 12%の場合

階数	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
case1	77	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case2	66	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case3	55	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case4	44	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case5	33	44	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case6	22	55	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case7	11	66	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case8	0	77	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case9	0	0	77	0	0	0	0	0	0	0	0
case10	0	0	0	77	0	0	0	0	0	0	0
case11	74	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
case12	72	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0
case13	73	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0
case14	68	5	4	0	0	0	0	0	0	0	0
case15	74	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0
case16	62	6	2	7	0	0	0	0	0	0	0
case17	62	12	3	0	0	0	0	0	0	0	0
case18	69	0	0	0	4	4	0	0	0	0	0
case19	51	16	10	0	0	0	0	0	0	0	0
case20	63	0	0	10	3	1	0	0	0	0	0
case21	36	38	0	2	1	0	0	0	0	0	0
case22	40	28	8	1	0	0	0	0	0	0	0
case23	60	0	0	17	0	0	0	0	0	0	0
case24	50	14	8	0	3	2	0	0	0	0	0
case25	59	5	3	0	5	5	0	0	0	0	0
case26	22	48	7	0	0	0	0	0	0	0	0
case27	39	0	38	0	0	0	0	0	0	0	0
case28	34	4	39	0	0	0	0	0	0	0	0
case29	45	4	5	23	0	0	0	0	0	0	0
case30	46	14	0	0	10	7	0	0	0	0	0
case31	50	13	3	0	0	0	8	3	0	0	0
case32	51	0	0	14	0	12	0	0	0	0	0

case33	22	3	34	13	1	0	0	2	2	0	0
case34	17	23	0	22	15	0	0	0	0	0	0

表 A.5 平面密度 18%の場合

階数	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
case1	111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case2	100	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case3	89	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case4	78	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case5	67	44	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case6	56	55	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case7	45	66	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case8	34	77	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case9	23	88	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case10	12	99	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case11	0	111	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case12	0	0	111	0	0	0	0	0	0	0	0
case13	0	0	0	111	0	0	0	0	0	0	0
case14	101	6	4	0	0	0	0	0	0	0	0
case15	83	22	5	1	0	0	0	0	0	0	0
case16	98	2	5	0	0	6	0	0	0	0	0
case17	87	12	8	4	0	0	0	0	0	0	0
case18	80	29	2	0	0	0	0	0	0	0	0
case19	102	1	0	0	0	0	8	0	0	0	0
case20	71	32	8	0	0	0	0	0	0	0	0
case21	69	30	12	0	0	0	0	0	0	0	0
case22	80	16	9	6	0	0	0	0	0	0	0
case23	60	45	6	0	0	0	0	0	0	0	0
case24	67	28	16	0	0	0	0	0	0	0	0
case25	42	65	4	0	0	0	0	0	0	0	0
case26	56	32	23	0	0	0	0	0	0	0	0
case27	37	47	22	5	0	0	0	0	0	0	0
case28	50	18	8	16	15	4	0	0	0	0	0
case29	38	9	29	35	0	0	0	0	0	0	0

表 A.6 平面密度 25%の場合

階数	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
case1	157	8	5	0	0	0	0	0	0	0	0
case2	146	21	3	0	0	0	0	0	0	0	0
case3	155	1	14	0	0	0	0	0	0	0	0
case4	140	29	0	0	1	0	0	0	0	0	0
case5	168	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0
case6	170	6	0	10	0	0	0	0	0	0	0
case7	171	6	0	0	0	0	0	0	3	0	0
case8	140	25	5	0	0	0	0	0	0	0	0
case9	135	31	3	1	0	0	0	0	0	0	0
case10	144	12	14	0	0	0	0	0	0	0	0
case11	143	22	0	0	0	0	5	0	0	0	0
case12	120	47	0	0	3	0	0	0	0	0	0
case13	139	6	19	6	0	0	0	0	0	0	0
case14	110	51	9	0	0	0	0	0	0	0	0
case15	137	17	7	3	0	6	0	0	0	0	0
case16	110	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case17	142	3	0	25	0	0	0	0	0	0	0
case18	126	9	35	0	0	0	0	0	0	0	0
case19	105	40	25	0	0	0	0	0	0	0	0
case20	121	24	20	0	0	5	0	0	0	0	0
case21	117	17	36	0	0	0	0	0	0	0	0
case22	82	83	5	0	0	0	0	0	0	0	0
case23	113	43	0	0	7	7	0	0	0	0	0
case24	87	59	22	0	1	1	0	0	0	0	0
case25	114	7	28	16	3	2	0	0	0	0	0
case26	120	6	0	44	0	0	0	0	0	0	0
case27	103	26	18	19	0	4	0	0	0	0	0
case28	72	55	30	13	0	0	0	0	0	0	0
case29	55	62	33	16	4	0	0	0	0	0	0
case30	170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case31	168	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case32	166	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0

case33	164	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case34	162	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case35	160	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case36	150	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case37	140	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 A.7 平面密度 32%の場合

階数	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
case1	196	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case2	191	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case3	186	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case4	176	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case5	156	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case6	136	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case7	116	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case8	96	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case9	76	120	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case10	56	140	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case11	36	160	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case12	16	180	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case13	0	196	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case14	0	0	196	0	0	0	0	0	0	0	0
case15	194	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
case16	192	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0
case17	194	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
case18	189	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0
case19	188	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0
case20	192	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0
case21	189	7	0	1	0	0	0	0	0	0	0
case22	185	9	2	0	0	0	0	0	0	0	0
case23	182	10	4	0	0	0	0	0	0	0	0
case24	189	0	3	4	0	0	0	0	0	0	0
case25	177	16	3	0	0	0	0	0	0	0	0
case26	187	6	0	0	0	3	0	0	0	0	0

case27	176	14	6	0	0	0	0	0	0	0	0
case28	179	13	2	2	0	0	0	0	0	0	0
case29	174	20	1	0	0	1	0	0	0	0	0
case30	180	5	8	3	0	0	0	0	0	0	0
case31	186	3	1	1	0	5	0	0	0	0	0
case32	169	19	8	0	0	0	0	0	0	0	0
case33	175	12	7	0	0	2	0	0	0	0	0
case34	169	20	4	3	0	0	0	0	0	0	0
case35	174	10	6	5	1	0	0	0	0	0	0
case36	182	5	1	4	0	3	1	0	0	0	0
case37	166	21	5	1	0	1	2	0	0	0	0
case38	160	25	5	2	2	2	0	0	0	0	0
case39	149	40	2	0	0	0	5	0	0	0	0
case40	169	15	0	0	0	12	0	0	0	0	0
case41	136	50	10	0	0	0	0	0	0	0	0
case42	132	40	24	0	0	0	0	0	0	0	0
case43	152	15	10	11	8	0	0	0	0	0	0
case44	106	70	20	0	0	0	0	0	0	0	0
case45	157	20	0	10	3	1	0	0	5	0	0
case46	106	60	30	0	0	0	0	0	0	0	0
case47	106	60	0	0	8	8	0	0	0	0	0
case48	156	15	1	1	0	23	0	0	0	0	0
case49	103	55	20	18	0	0	0	0	0	0	0
case50	63	65	40	28	0	0	0	0	0	0	0

表 A.8 平面密度 40%の場合

階数	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
case1	263	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case2	253	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case3	243	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case4	213	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case5	188	75	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case6	163	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case7	138	125	0	0	0	0	0	0	0	0	0

case8	113	150	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case9	63	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case10	0	263	0	0	0	0	0	0	0	0	0
case11	257	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0
case12	252	8	3	0	0	0	0	0	0	0	0
case13	256	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0
case14	248	12	3	0	0	0	0	0	0	0	0
case15	251	5	5	2	0	0	0	0	0	0	0
case16	246	12	5	0	0	0	0	0	0	0	0
case17	248	11	4	1	1	0	0	0	0	0	0
case18	252	1	4	3	3	0	0	0	0	0	0
case19	243	10	10	0	0	0	0	0	0	0	0
case20	235	17	8	3	0	0	0	0	0	0	0
case21	233	20	5	5	0	0	0	0	0	0	0
case22	227	26	10	0	0	0	0	0	0	0	0
case23	233	25	0	0	0	5	0	0	0	0	0
case24	228	25	7	3	0	0	0	0	0	0	0
case25	236	5	16	3	1	0	2	0	0	0	0
case26	212	39	10	2	0	0	0	0	0	0	0
case27	223	32	2	0	3	3	0	0	0	0	0
case28	216	27	20	0	0	0	0	0	0	0	0
case29	229	9	16	9	0	0	0	0	0	0	0
case30	232	14	0	3	7	7	0	0	0	0	0
case31	201	45	11	2	0	4	0	0	0	0	0
case32	191	45	10	15	2	0	0	0	0	0	0
case33	145	105	13	0	0	0	0	0	0	0	0
case34	188	37	30	5	1	2	0	0	0	0	0
case35	174	50	28	11	0	0	0	0	0	0	0
case36	157	67	31	8	0	0	0	0	0	0	0
case37	144	95	10	10	1	3	0	0	0	0	0
case38	186	17	46	5	2	7	0	0	0	0	0
case39	197	40	5	0	3	11	7	0	0	0	0
case40	111	72	66	9	5	0	0	0	0	0	0

あとがき

本研究を書き上げるにあたっては、第一に指導教官である崔恒助教授の助けが必要不可欠でした。崔先生は、耐風工学や風洞実験に関する知識が皆無であった私に一からご指導してくださいましたし、そのするどい洞察力には幾度となくあっと、驚かされると同時に僕の思考への良い刺激となりました。また、私生活にいたる部分でも色々と相談にのっていただき、色々なお話を聞かせていただきました。当研究室の神田順教授には、研究室会議や時には貴重なお時間をさいていただき、研究の目的や耐風設計全般に対する議論をかわしていただきました。同高田毅士教授には、研究全般に関する心構えについてよくお話いただけましたし、また研究がうまくいかないときには励ましていただきました。同岩崎良二助手には、風洞実験を手伝っていただいたり、業者との仲介役をしていただきました。同高橋弘子秘書官には、風洞実験設備導入時や出張時には、いつもお世話になりました。

京都大学防災研究所の丸山敬助教授には、本論文全般に対する貴重なご意見を頂きました。加えて実験装置の使用法などについても教えていただきました。東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻浅見泰司教授には論文の副査を担当していただきました。特に第4章の粗度パラメータからの抗力係数の推定に関しては、情報解析学の見地から貴重なご意見を頂きました。東京大学空間情報センターの柴崎亮介教授には、共同研究として、東京23区のGISデータを使用させていただきました風工房、栗田氏・加藤氏には、実験装置の作成にあたって、こちらの我儘な要望を最後まで真摯に受け止めて頂きました。この実験装置なくして、本論文は完成しませんでした。またこの実験等は、科学技術研究費補助金（代表：神田順）の援助を受けた研究の一部であります。

また、元当研究室博士の糸井達哉さんの存在がなければこの論文は存在しなかったと思います。思えば、私が学部4年生の時に風の研究にかかわり始めたのも糸井さんの影響が大きく、また研究・実験等いろいろな面についてサポートをしていただきました。加えて、本論文における抗力測定実験は糸井さんの考案されたものであります。同元修士の濱田知考さんには、風洞実験や風観測にて大変お世話になりました。また、卒業された先輩方には、コンピューター全般、統計学全般など様々な事を教えていただきました。この2年間で学べたことは数え切れません。後輩の皆や同学年である前川直之君、西川直良君、畑奈緒未さんのおかげで、2年間本当に楽しい研究生活を送ることができました。

最後にこの2年間、研究をする環境を整えてもらった両親に感謝して、この論文をしめたいと思います。

2005年1月30日

菅野 宏紀