
塩分濃度法による不均一街区の平均交換係数 の風洞実験

(課題番号：18560580)

平成18・19年度科学研究費補助金
基盤研究(C)

研究成果報告書

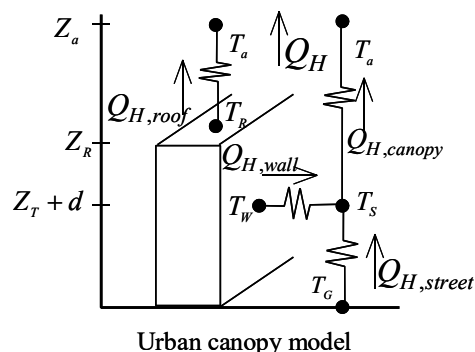
平成20年3月

研究代表者 成田 健一
(日本工業大学工学部・教授)

研究目的と背景

近年、「都市キャノピーモデル」と総称される、新しいメソスケールの地表面スキームの開発が行われてきている。都市キャノピーモデルは、建物群の凹凸を考慮した放射伝熱モデル、建物群による気流低減を表現した **drag force** モデル、建物屋根、壁、道路の表面温度の違いを考慮した対流・伝導モデルなど、多数のサブモデル群から成る統合モデルである。都市形状や建物壁面・道路の日射反射率などの都市計画、建築設計上の制御因子が説明変数として組み込まれているため、ヒートアイランド緩和策の比較検証を目的とした研究において盛んに用いられている。

このような都市キャノピーモデルの中で、現在大きな不確定要素として残されているのは、都市キャノピー表面とキャノピー大気間の顕熱フラックスの輸送効率を定義するキャノピー表面熱伝達率のモデリングである。右図は、代表的な都市キャノピーモデルである **single layer model** における輸送抵抗ネットワークの模式図である。都市キャノピーモデルには、キャノピー内を多層に分割した **multi-layer model** も提案されているが、メソスケールモデルとの連結を念頭に置くと、まず **single layer model** における輸送抵抗ネットワークをどのようにモデル化するかを検討するのが妥当な研究ターゲットと言える。



一般に、熱伝達率に関する実験方法は、大きく二つに分類できる。一つは対流以外の熱収支成分の測定値から残差項の対流成分を推定し、表面温度と空気温度との差で除すことで対流熱伝達率を直接求めるという熱収支法である。もう一つは、水の蒸発やナフタレンの昇華など、物質移動現象から物質伝達率を求め、熱移動と物質移動のアナロジーを利用して間接的に熱伝達率を把握しようとするものである。前者は、対流成分を残差として求めているため、放射や伝導のフラックスの測定誤差が集積してしまうこと、また対流フラックスの絶対値が小さくないと精度が得られないため、対象面を高温化せざるを得ない（従って自然対流成分を無視できない）こと、などが欠点として挙げられる。一方後者は、温度的な制限もなく、純粋に対流成分のみを直接測定するため、強制対流時のデータが安定して精度良く得られる利点がある。

最近 Barlowらは、このような都市キャニオンの熱伝達率のモデル化を目的としたナフタレン昇華法による風洞実験結果を報告している（BLM 113,2004）が、その検討は2次元キャニオンののみにとどまっている。最近の数値シミュレーションの結果によれば、立方体の3次元配列群において、いわゆる「組織乱流」の存在が示されており（Kanda *et al.* BLM 112,2004），2次元キャニオンとは本質的に異なる流れ場が形成されていると考えられる。申請者らは、これまで独自に開発した濾紙面蒸発を用いた物質伝達率測定法を駆使し、2次元キャニオンの詳細な伝達率分布、3次元配列における密度変化や風向による変化などについて系統的に明らかにしてきた。これらの成果は、世界的にも他に類を見ない貴重なデータとして注目されている（Narita, BLM, 2007）。

一方、現実の市街地は、このような単純形状のサイクリックにモデル化された市街地モデルよりも遥かに複雑な構造を有している。都市気候のモデリングでは、このような複雑な市街地形状をエリア平均での建ぺい率と平均建物高さを保存した均等街区にモデル化することがよく行われる。しかしながら、このようなモデル化した街区におけるエリア平均の伝達率が、実街区のそれと等しいかは不明である。

以上のように、市街地構造の不均一性がエリアのバルク抵抗係数あるいは熱や物質のバルク輸送係数にどのような影響を及ぼすかは、都市気候研究の大きな課題である。これに関する検討例は、今だほとんどないといっても過言ではないが、抵抗係数に関しては、唯一 Kanda(2004)で LES による検討結果が報告されており、建物高さのバラツキが大きな影響を及ぼすことが示されている。

研究分担者である九州大学の谷本・萩島は、現在風洞模型実験によるバルク抵抗係数の検討を進めている。これは、九州大学総合理工学研究科所有の回流式境界層型風洞において、ターンテーブルに埋設した歪みゲージにより、建物模型群に作用する抗力を直接計測するというもので、配列形態（整形・千鳥・ランダム）やグロス建ぺい率による抵抗係数の変化を系統的に検討すべく実験が行われている（萩島ほか、日本建築学会環境系論文報告集 619,2007）。

一方、バルク輸送係数に関しては、申請者が考案した「塩分濃度法」の利用が有効であると考えられる。これは、風洞に設置した浅い水槽に塩水を満たし、様々な模型配列状態における蒸発量を塩分濃度の変化から求め、エリア平均のバルク輸送係数を求めるという独自の実験方法である（成田ほか、日本建築学会計画系論文報告集 366,1986）。このなかで、建物高さのバラツキによる影響についても一部考察されており、容積率一定の条件下でも建物高さのバラツキが増大するとともにバルク輸送係数も増大し、建物高さの標準偏差が 0.5 の条件で最大 40%の増加が生じることが示されている。しかしながら、検討例はこの 1 ケースのみであり、模型配列も水槽内のみに限られており、境界層が未発達であるなど問題が残されている。

本研究では、すでにバルク抵抗係数に関する系統的な検討が進められている九州大学総合理工学研究科の風洞装置において、あらためて「塩分濃度法」によるバルク輸送係数の実験を行い、様々な模型群配列に対する計測を行おうとするものである。

まず均等高さにおける密度変化および配列形状（整形・千鳥・ランダム）による変化を検討し、バルク抵抗係数ならびにバルク輸送係数のモデル化において、グロス建ぺい率（ λp ）・街路縦横比（ H/W ）のいずれがパラメータとして妥当かを検討する。続いて建物高さが不均一になった場合の変化について検討を行い、 λp と建物高さの標準偏差をパラメータとした系統的な実験を行い、Kanda(2004)の LES による検討結果と比較検討する。以上のような形状パラメータの考察と平行して、抵抗係数および輸送係数におけるレイノルズ数依存性についても検討する。バルク係数の考え方は、そもそも十分に発達した境界層においては運動量や熱・スカラーの輸送がスケール長さ依存性を持たなくなることを前提としているわけであるが、この前提が都市境界層において本当に成り立つかどうかは未だ確かめられていない。この点は、風洞模型実験による結果を現実都市へスケール・アップする上で避けて通れない重要問題である。

エリア平均のバルク輸送係数を検討する手法は、現在のところ「塩分濃度法」による模型実験以外に考案されていない。また、同一の風洞装置において、バルク抵抗係数とバルク輸送係数の両者が測定された例は、諸外国も含め、これまで全く存在しない。都市キャノピーにおいて、バルク抵抗係数とバルク輸送係数との間に相似性があるか否かについては、これまでほとんどデータが存在しておらず、本研究による成果は、今後の都市気候のモデリングを進めていく上で非常に大きな貢献が期待される。

- 1) Barlow, J.F., Harman, I.N. and Belcher, S.E., Scalar Fluxes from urban street canyons Part 1: Laboratory simulation, *Boundary-Layer Meteorology*, **113**, 369 - 385, 2004
- 2) Kanda, M., R. Moriwaki, and F. Kasamatsu: 2004, 'Large Eddy Simulation of Turbulent Organized Structure within and above Explicitly Resolved Cube Arrays', *Boundary-Layer Meteorol.* **112**, 343-368, 2004
- 3) Narita, K-I, Experimental study of the transfer velocity for urban surfaces with a water evaporation method, *Boundary-Layer Meteorology*, **122**, 293-320, 2007
- 4) 萩島理、谷本潤、永山浩二、古賀正浩、高さの分布のある直方体粗度群の抗力係数に関する風洞実験、日本建築学会環境系論文集、No.619, pp 39-45 , 2007
- 5) 成田健一・関根 毅・徳岡利一：市街地の蒸発量に及ぼす建物周辺気流の影響に関する実験的研究（続報）、日本建築学会計画系論文報告集，第 366 号，pp.1-11，1986

研究組織

研究代表者：成田健一（日本工業大学・工学部・教授）

研究分担者：谷本 潤（九州大学大学院・総合理工学研究院・教授）

萩島 理（九州大学大学院・総合理工学研究院・准教授）

研究協力者：池谷直樹（九州大学大学院生）

末永 啓（九州大学大学院生）

研究経費

平成 18 年度 1, 9 0 0 千円

平成 19 年度 8 0 0 千円

合 計 2, 7 0 0 千円

研究発表

（１）学会誌等

- 1) K. Narita: Experimental Study of the Transfer Velocity for Urban Surfaces with Water Evaporation Method, *Boundary Layer Meteorology*, Vol.122,, 293-320, 2007.2
- 2) 萩島 理・谷本 潤・末永啓・池谷直樹・前田一行・成田健一：直方体粗度群の床面バルクスカラ係数に関する風洞実験、日本建築学会環境系論文集、(投稿中)

（２）口頭発表

- 1) 鈴木直人・成田健一：3 次元立方体配列の全構成面交換係数比率—都市域における各構成面別の交換係数に関する風洞実験（その 3）日本建築学会大会学術講演梗概集、D－1, pp.527-528、2006.9
- 2) 成田健一：建物高さが不均一な街区の交換速度—都市域における各構成面別の交換係数に関する風洞実験（その 4）日本建築学会大会学術講演梗概集、D－1、pp.749-750、2007.8
- 3) 末永 啓・萩島 理・谷本 潤・成田健一・前田一行：複雑形状都市におけるバルク輸送係数モデル化のための風洞実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、D－2、pp.685-686、2007.8

第1章 序論

1.1 従来の研究と本研究の位置づけ

近年、行政施策の目標としてヒートアイランド現象緩和が打ち出され、都市気候モデル¹⁾²⁾の計算結果が行政や設計者の意志決定の場面に引用される機会は非常に多くなってきている。しかし、様々な物理メカニズムを記述したサブモデルから構成される都市気候モデルの精度に関しては、まだ観測データとの比較検証³⁾の積み重ねが必要である。とりわけ、都市表面の大気加熱量の多寡を決定づける都市表面と大気間の熱や水蒸気などのスカラー輸送過程のモデリングは重要なポイントであるが、現時点では多くの課題が残されている。

例えば、建築環境工学の分野ではこれまで建物表面の対流熱伝達率と近傍風速または上空風速との関係に関して屋外観測に基づく多数の実験式が提示されてきた^{4)・6)}。しかし、建物表面の熱伝達率分布は周辺建物との間に形成される気流場の3次元的分布の影響を強く受けるため、熱伝達率－風速の実験式は研究者により様々で統一的な予測手法は確立していない⁷⁾。

一方、大気境界層の底部に位置する都市表面を流体力学的な「粗面」と捉えるならば、都市表面－大気のスカラー輸送機構は建築工学分野のみならず伝熱工学、流体力学、都市気候学など幅広い分野に関連する研究課題である。

例えば都市気候の分野では、Kanda et al. (2007)⁸⁾が屋外における様々な粗度サイズの大気境界層内の熱及び運動量フラックスの観測に基づき、熱粗度と運動量粗度の比に関するパラメータ κB^{-1} と粗度レイノルズ数の関係を提示している。また中立条件の風洞内において、ナフタレン昇華法により2次元キャノピーのバルク係数を測定したBarlow et al. (2004)⁹⁾、濾紙蒸発法により2次元キャノピーや3次元キャノピーのバルク係数を測定したNarita (2007)¹⁰⁾によって、都市形状とスカラー輸送効率の関連について議論が進められており、単層^{11)・12)}や多層^{13)・14)}の都市キャノピーモデルへの適用を想定したスカラー輸送モデル¹⁵⁾も提案されている。

一方、伝熱工学分野の関連研究としてはナフタレン昇華法に基づき2次元キャビティの物質伝達率分布を測定したChyu and Goldstein (1986)¹⁶⁾や、立方体粗度群の対流熱伝達率分布を測定したAliaga et al. (1994)¹⁷⁾などが挙げられる。

このような状況に対し本研究では、風洞模型実験により3次元キャノピーの幾何形状の影響が床面のバルクスカラー係数（以下、バルク係数）に及ぼす影響を明らかにすることを目標とする。バルク係数の測定にあたっては、成田らの開発した塩分法^{18)~20)}を用いる。

成田ら(1986)²⁰⁾は様々な建蔽率、高さ分布の直方体粗度群の床面伝達率を塩分法により測定し、粗度群の高さのバラツキ（標準偏差）の増加に伴い床面バルク係数が増加するという結果を得ている。一方で、ナフタレン昇華法により建蔽率25%の均一高さ粗度群と不均一高さ粗度群のバルク係数を測定したPascheke1 et al. (2008)²¹⁾によると、平均粗度高さが等しい場合、不均一高さ粗度群の方が均一高さ粗度群より境界層外の流速をreferenceとするバルク係数は小さくなる、という結果が報告されている。

この2つの実験結果は、粗度の建蔽率や模型形状の違い、測定部の風上側の模型配列状況

などが異なっているため、並べて単純比較することはできない。しかしいずれにせよ、粗度の高さのバラツキがバルク係数に与える影響については、現時点で統一的な見解は得られていない。これは、都市の幾何形状の制御により都市の熱環境を向上させよう、という近年流行の「風の道」の議論にも影響を与える可能性のある興味深いテーマである。

そこで本研究では、都市の幾何形状の中でも、とりわけ粗度高さの不均一性の影響について系統的な議論ができるように、様々な平面配列および建蔽率の模型配列条件でバルク係数の実験を行う。なお、運動量輸送とスカラー輸送の相似性と相違点についての考察を行うために、床面抗力係数（すなわち、バルク運動量輸送係数）についての萩島ら（2007）²²⁾の風洞実験と同じ模型配列としている。

1.2 本論の構成

第2章～第4章は、主テーマである「塩分濃度法」によるエリア平均の交換係数に関する実験結果で、九州大学大学院総合理工学研究院所属の風洞実験装置によるものである。この方法は、複雑形状のエリア平均値を測定できるというメリットがある反面、その変化が街区のどの部分で生じているかについての情報は得られない。そこで、本研究ではこの「塩分濃度法」と平行して、これまで実績のある「濾紙面水分蒸発法¹⁰⁾」による構成面別の交換係数に関する実験を行った。この濾紙法実験は、日本工業大学近郊の民間研究機関の風洞実験装置を用いて行った。この部分の成果を、第5章として報告する。なお第4章は、塩分濃度法を行った九州大学の風洞で補足的に行った濾紙法の結果を記述している。

参考文献

- 1) 例えば、Ashie, Y., Ca, V.T. and Asaeda, T., Building canopy model for the analysis of urban climate, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 81, pp.237-248, 1999
- 2) 例えば、近藤裕昭, 劉発華, 1次元都市キャノピーモデルによる都市の熱環境に関する研究、大気環境学会誌, 33(3), pp.179-192, 1998
- 3) 例えば、Grimmond, S. et al., International Urban Surface Energy Balance Model Comparison, <http://geography.kcl.ac.uk/micromet/ModelComparison/Index.htm>
- 4) 例えば、Ito, N., Kimura, K., Oka, J., A Field Experiment Study on the Convective Heat Transfer Coefficient on Exterior Surface of a Building, ASHRAE Trans, 78, 184-191, 1972
- 5) 例えば、小林定教, 黒谷靖雄, 夏期の屋上面对流熱伝達率に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 465, pp.11-17, 1994.11.
- 6) 例えば、Hagishima. A.; Tanimoto. J., Field measurements for estimating the convective heat transfer coefficient at building surfaces, Building and Environment, vol 38(7), pp 873 - 881, 2003.6
- 7) Hagishima. A., Tanimoto. J., Narita. K., Intercomparisons of experimental research on convective heat transfer coefficient of urban surfaces, Boundary-Layer Meteorology 117(3), 551-576, 2005

- 8) Kanda, M., Kanega, M., Kawai, T., Sugawara, H., and Moriwaki, R., Roughness lengths for momentum and heat derived from outdoor urban scale models, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46, 1067-1079, 2007
- 9) Barlow, J.F., Harman, I.N. and Belcher, S.E., Scalar Fluxes from urban street canyons Part 1 : Laboratory simulation, *Boundary-Layer Meteorology*, 113(3), pp.369 - 385, 2004
- 10) Narita, K-I, Experimental study of the transfer velocity for urban surfaces with a water evaporation method, *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 122(2), pp. 293-320, 2007.2.
- 11) H. Kusaka, H. Kondo, Y. Kikegawa and F. Kimura, A Simple Single-Layer Urban Canopy Model For Atmospheric Models: Comparison With Multi-Layer And Slab Models, *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 101(3), pp.329-358, 2004
- 12) V. Masson, A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models, *Boundary-Layer meteorology*, vol. 94(3), pp.357-397, 2000
- 13) V. T. Ca, Y. Ashie and Takashi Asaeda, A k-e Turbulence Closure Model For The Atmospheric Boundary Layer Including Urban Canopy, *Boundary-Layer Meteorology*, 102(3), pp.459-490, 2002
- 14) Kondo, H. , Genchi, Y., Kikegawa, Y., Ohashi, Y., Yoshikado, H., Komiyama, H., Development of a multi-layer urban canopy model for the analysis of energy consumption in a big city: Structure of the urban canopy model and its basic performance, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 116(3), pp.395-421, 2005
- 15) Harman, I.N., Barlow, J.F., Belcher, S.E., Scalar Fluxes from urban street canyons Part 2 : Model, *Boundary-Layer Meteorology*, 113(3), pp.387-410, 2004
- 16) Chyu, M.K., Goldstein, R.J., Local mass transfer in rectangular cavities with separated turbulent flow, 8th Int. Heat Transfer Conf. 3, 1065-1070, 1986
- 17) Aliaga, D.A., Lamb, J.P. and Klein, D.E., Convective heat transfer distributions over plates with square ribs from infrared thermography measurements, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol.37, pp.363-374., 1994
- 18) 成田健一, 関根毅, 徳岡利一, 地域蒸発量に及ぼすスケール効果に関する風洞実験, 日本建築学会中国支部研究報告集, No.13, pp.289-292., 1986
- 19) 成田健一, 関根毅, 徳岡利一, 市街地の蒸発量に及ぼす建物周辺気流の影響に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文集, No.361, pp.10-20.1986
- 20) 成田健一, 関根毅, 徳岡利一, 市街地の蒸発量に及ぼす建物周辺気流の影響に関する実験的研究 (続報), 日本建築学会計画系論文集, No.366, pp.1-10., 1986
- 21) Pascheke1, F., Barlow, J. F. and Robins, A., Wind-tunnel Modelling of Dispersion from a Scalar Area Source in Urban-Like Roughness, *Boundary -Layer Meteorology*, vol. 126(1), pp.1573-1472, 2008.1
- 22) 萩島理, 谷本潤, 永山浩二, 古賀正浩, 高さの分布のある直方体粗度群の抗力係数に関する風洞実験, 日本建築学会環境系論文集, No.619, pp 39-45 , 2007.9

第2章 実験内容

本章では本研究で使用した測定機器、風洞装置および粗度模型群について説明する。

2.1 測定機器

2.1.1 風速測定

風速測定にはピトー管、超音波風速計およびI型熱線流速形を使用した。それぞれの装置について以下に述べる。

(1) ピトー管および微差圧計

ピトー管（岡野製作所、LK-1S）は全圧孔と静圧孔をそれぞれ別のゴムチューブで沈鐘式微差圧計（柴田、ISP-3-20DS：以下、微差圧計）へ導き、その差圧 $P_T - P_s$ [Pa] から動圧 P_v [Pa] を出力するものである。微差圧計からの出力は電圧に変換されデータロガー（NEC 三栄、DC3100）を介してパーソナルコンピュータ（以下、PC）に取り込まれる。図 0-1 にピトー管、図 0-2 に微差圧計、図 0-3 にデータロガーおよびに微差圧計仕様を示す。

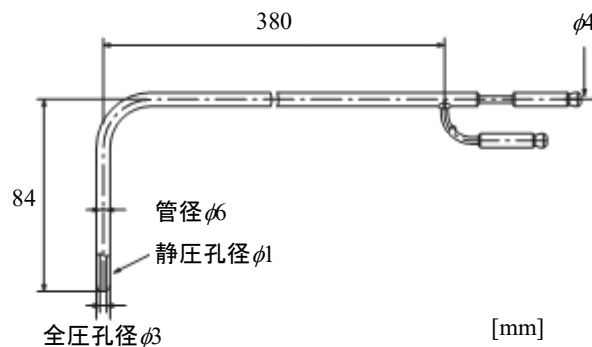


図 0-1 ピトー管



図 0-2 微差圧計（左：センサ部、右：モニタ部）



図 0-3 データロガー

表 0-1 微差圧計仕様

計測範囲[mmH ₂ O]		20
測定流体		気体専用
最高分解能[mmH ₂ O]		0.01
直線性[% of F.S. ± 1dig]		0.08
再現性[% of F.S. ± 1dig]		0.01
応答時間[sec]	FAST	0.06
	SLOW	0.8
記録計出力		20mmH ₂ O に対し 2VDC
使用温度範囲[K]		278~313
使用湿度範囲[% R.H.]		20~75
電源	電圧[V]	AC100±10%
	周波数[Hz]	50/60
消費電力[W]		30
重量[kg]		9
寸法[mm]	センサ部	φ110×150
	モニタ部	300×130×250

全圧と静圧、動圧の関係は

$$P_V = P_T - P_S \quad \text{式 0-1}$$

で表される。また、風速を U [m/s]、空気密度を ρ_{air} [kg/m³]とすると動圧 P_V は次のようにも表すことができる。

$$P_V = \frac{1}{2} \rho_{air} U^2 \quad \text{式 0-2}$$

よって風速 U は微差圧計の出力 $P_T - P_S$ で式 0-3のように変形できる。

$$U = C \times \sqrt{\frac{2(P_T - P_S)}{\rho_{air}}} \quad \text{式 0-3}$$

ここで、 C はピトー管係数を表し $C=1.0$ である。

微差圧計の出力電圧と動圧との関係を明らかにするため、実験前に 10,7,5,3[g]の分銅を用いて較正している。空気密度 ρ_{air} は気温、露点より求める。

(2) 超音波風速計

超音波風速計（株式会社カイジョー、DA-600）は流体間に超音波通過させ、そのドップラー効果から流速を測定するものである。図 0-4に超音波風速計の写真を、表 0-2に仕様を示す。



図 0-4 超音波風速計

表 0-2 超音波風速計仕様

測定方式	時分割送受切替型超音波パルス方式
測定範囲 m/s	0~20[m/s]
演算精度	1%以内
分解能	0.005m/s 以下

(3) 熱線流速計

熱線流速計はI型プローブ（KANOMAX、0251R-T5：図 0-5）をアンプ（TSI、IFA-100：図 0-6）に接続した定温度型である。熱線流速計の原理は以下の通りである。流体中に加熱された抵抗線をおくと熱が奪われ、流速が大きければ冷却はさらに速められる。このときの流速と奪われた熱の関係は「KINGの法則」として知られ、式 0-4で示される。

$$IR^2 = V^2/R = \left(a + bU^{1/2}\right)(T - T_a) \quad \text{式 0-4}$$

ここで I [A] : 電流、 R [Ω] : 抵抗、 V [V] : プロブ電圧、 U [m/s] : 風速、 T [K] : プロブ温度、 T_a [K] : 気温、 a, b : 定数である。

定温度型では図 0-7に示すように熱線を一辺にもつブリッジを組み、その不平衡出力電圧をアンプで増幅してブリッジに戻すことにより、熱線の温度を流速に関係なく一定に保つことが出来る。この状態で流れが熱線に当たると、回路に熱線を初期設定温度に保つように電流が流れる。熱線の抵抗値も一定になるため、ブリッジの電圧を測定する事により流速および変動分を検出することが出来る。ブリッジ電圧を E [V]、 A, B, C を定数として式 0-4を変形すると式 0-5が得られる。

$$U = AE^4 + BE^2 + C \quad \text{式 0-5}$$

熱線流速計の較正は、ピトー管により得られた風速とブリッジ電圧の出力値を図 0-8のようにプロットし、式 0-5の A, B, C を最小二乗法により求め行っている。

測定の際はアンプからの出力を、データロガー（NEC 三栄、DC3100）を介して PC に取り込んでいる。

標準直線プロブ
0251R-T5

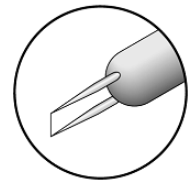
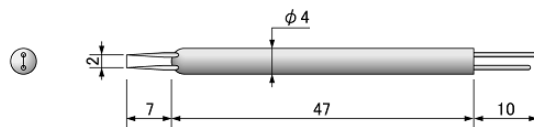


図 0-5 I 型プロブ



図 0-6 アンプ

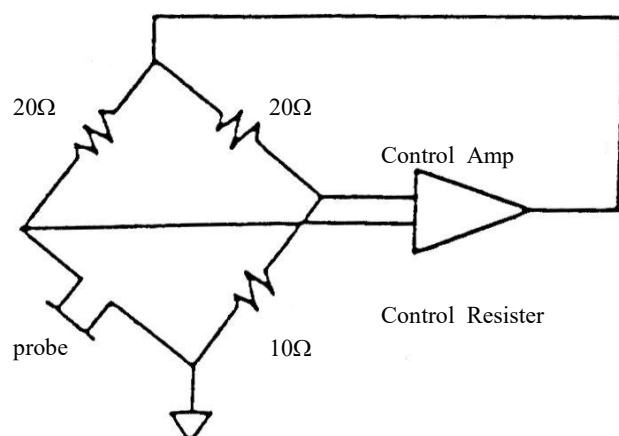
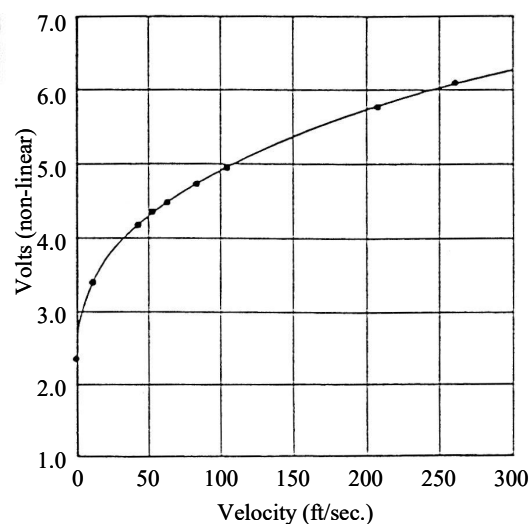


図 0-7 定温度型熱線流速計回路

図 0-8 風速と電圧の関係の例^[1]

2.1.2 気温及び蒸発面温度測定

気温および蒸発面の温度測定にはデジタル温度センサ（テクノセブン, DS101）を使用した。デジタル温度センサは、サーミスタセンサ（図 0-1）と温度・デジタル変換器から構成されている。

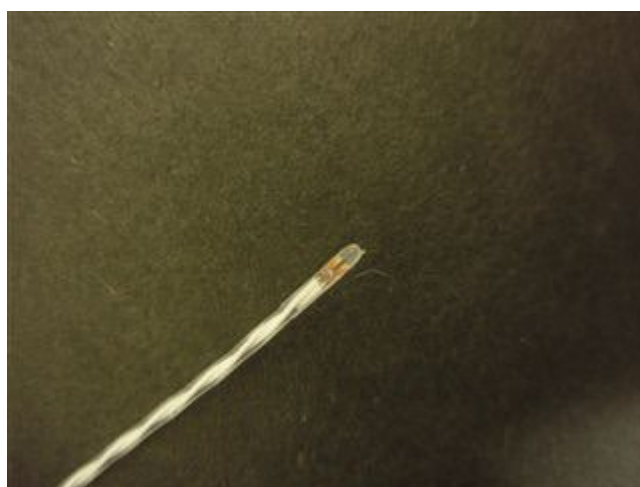


図 0-1 サーミスタセンサ

2.1.3 塩分測定

塩水濃度測定にはサリノメータ（Guildline Instruments Ltd., AUTOSAL 8400B）を使用した。この計器では、制御された温度（浴温）で塩性サンプルの導電率比を測定することができ、その導電率比よりサンプルの塩分を求めるというものである（式 0-1）。尚、サリノメータの測定精度を保つための、標準海水サンプルによる較正頻度は24時間毎である。

$$S = a_0 + a_1 \times Rt^{1/2} + a_2 \times Rt + a_3 \times Rt^{3/2} + a_4 \times Rt^2 + a_5 \times Rt^{5/2} + \frac{T-15}{1+k \times (T-15)} \times (b_0 + b_1 \times Rt^{1/2} + b_2 \times Rt + b_3 \times Rt^{3/2} + b_4 \times Rt^2 + b_5 \times Rt^{5/2})$$

$a_0 = 0.0080$	$b_0 = 0.0005$	$k = 0.0162$
$a_1 = -0.1692$	$b_1 = -0.0056$	
$a_2 = 25.3851$	$b_2 = -0.0066$	$\sum a = 35.0000$
$a_3 = 14.0941$	$b_3 = -0.0375$	$\sum b = 0.0000$
$a_4 = -7.0261$	$b_4 = 0.0636$	
$a_5 = 2.7081$	$b_5 = -0.0144$	

式
0-1

ここで、 $S[\text{psu}]$ ：塩水濃度、 $Rt[-]$ ：導電率比、 T ：試水温度 $[\text{°C}]$ である。また適用範囲は、 $-2\text{°C} \leq T \leq 35\text{°C}$ 、 $2\text{psu} \leq S \leq 42\text{psu}$ である。

なお、塩分の単位である psu は実用塩分で、 $15\text{°C} \cdot 1$ 気圧における塩化カリウム (KCl) 標準液 (1kg 中に 32.435g の KCl を含む水溶液) に対する試料の電気伝導度比 (K_{15}) で定義されるものであるが、実用上質量濃度 (溶液の質量に対する溶質の千分率) $[\text{‰}]$ として問題ない。サリノメータの仕様を示す。

表 0-1 サリノメータ仕様

測定範囲	0.005～42psu
精度	再標準化することなく 24 時間にわたって $\pm 0.002\text{psu}$ 以上
最大分解能	35psu で $\pm 0.0002\text{psu}$ 以上
サンプル量	要求最大量：100ml (サンプル間の相違が 3psu 以内の時は約 50ml)
浴温	3 $^{\circ}\text{C}$ 刻みで 18 $^{\circ}\text{C}$ から 33 $^{\circ}\text{C}$ まで選択可能、精度 $\pm 0.02\text{°C}$ 、安定性は 1 日当たり 0.001 $^{\circ}\text{C}$ (選択する範囲は〔周囲温度+4 $^{\circ}\text{C}$ 〕から〔周囲温度-2 $^{\circ}\text{C}$ 〕以内とすべきである)
目盛りの抑制	0 から 2.2 まで 22 段階の導電率比の直線的目盛りで、2.0 は 35psu の海水に相当する(最大の読みは 2.29999 で、これは約 42psu の塩度に相当する)。

2.1.4 湿度測定

(1) 絶対湿度および空気密度の算出

絶対湿度 $X[\text{kg/kg}']$ とは乾燥空気 1kg 中に含まれる水蒸気の質量であり、水蒸気圧より求められる。

$$X = \frac{n_v M_v}{n_d M_d} = \varepsilon \frac{n_v}{n_d} = \varepsilon \frac{e}{p - e}$$

$$\varepsilon = \frac{M_v}{M_d}$$
式 0-2

ここで $n[-]$: 分子数、 $M[\text{g/mol}]$: 分子量、 $\varepsilon[-]$: 気体の密度比、 $p[\text{Pa}]$: 湿り空気圧、 $e[\text{Pa}]$: 水蒸気圧、添え字 v 及び d はそれぞれ水蒸気および乾燥空気を示している。 p については

$$p \gg e$$
式 0-3

であるため、一定値として実用上問題ない。定数値はそれぞれ

$$\begin{aligned} M_v &= 18.051 & \varepsilon &= 0.622 \\ M_d &= 28.967 & p &= 101.3 \times 10^3 \end{aligned}$$

である。

また、空気密度 $\rho_{air}[\text{kg/m}^3]$ と X との関係は以下の式 0-4 が知られている。

$$\rho_{air} = \frac{1}{\gamma}$$

$$\gamma = T_{air} \times 287.055 \times (1 + 1.6078 \times X) / p$$
式 0-4

ここで、 $\gamma[\text{m}^3/\text{kg}]$: 比体積、 $T_{air}[\text{K}]$: 気温である。

(2) 露点

雰囲気中の露点は鏡面冷却式露点温度計 (SHINYEI, Dew Star S-1、図 0-2) を用いて測定した。出力はデータロガー (NEC 三栄、DC3100) を介して PC に取り込んだ。

鏡面冷却式露点温度計の原理は以下の通りである。測定する気体を検出部へ連続してサンプリングし、温度が制御されている内蔵の鏡面上を通過させる。鏡の温度を下げるとある温度で相対湿度が 100% になり結露が発生する。この温度を露点という。鏡面には LED 光が照射されており、その反射光を受光素子で捉え、結露による反射光量の減衰を検知する。その時露の発生及び露量を確認し、鏡面上が最適な結露状態になったときの温度を

Pt100Ωセンサが露点として検出する。

露点から水蒸気圧を求めるには式 0-5を用いる。

$$\begin{aligned}
 e &= p \times 10^a \\
 a &= -7.90298 \times (b-1) + 5.028081 \times \log_{10} b \\
 &\quad - 1.3816 \times 10^{-7} \times 10^{11.344 \times (1 - 1/b)} \\
 &\quad + 8.1328 \times 10^{-3} \times 10^{-3.4314 \times (b-1) - 1} \\
 b &= 373.15 / T_{sat}
 \end{aligned}
 \tag{式 0-5}$$

ここで、 $T_{sat}[\text{K}]$ は露点である。露点計の仕様を表 0-2に示す。



図 0-2 露点計

表 0-2 露点計仕様

露点計測範囲[K]		238~323
システム精度[K]		±0.2
再現性[K]		±0.05
サンプリング流量[L/min]		0.5~2.0
応答性[K/sec]		1.5
使用温度範囲[K]	センサ部	273~333
	モニタ部	273~313
使用圧力範囲[MPa]		0.0~0.6
電源	電圧[V]	AC90~240
	周波数[Hz]	50/60
消費電力[W]		50
重量[kg]		5
寸法[mm]	センサ部	351×105×130
	モニタ部	193×105×32

(3) 局所湿度

局所湿度を測定する場合、周囲の気流に影響を与えないよう測定部を十分小さくする必要があり、鏡面冷却式露点計では局所湿度は測定できない。また、市販の湿度計の測定部も模型に対して非常に大きい。そこで局所湿度測定用に測定部の小さな湿度計を自作した。これは乾湿球式湿度計を応用したもので、図 0-3のように通常の熱電対（以下、乾球）と濡らした薄い紙を巻いた熱電対（以下、湿球）からなるものである。熱電対はいずれも T 型である。



図 0-3 自作湿度計

この自作湿度計の測定原理は以下の通りである。雰囲気気温度が $T_d[\text{K}]$ 、水蒸気圧が e であるとき、乾球では気温 $T_d[\text{K}]$ が測定される。一方湿球では濡れた紙を空気が通過するため、潜熱 $L[\text{J/kg}]$ が奪われて乾球よりも低い温度 $T_w[\text{K}]$ が測定され、またごく近傍で水蒸気が飽和し水蒸気圧が $e_s[\text{Pa}]$ となる。ここで、式 0-2 および式 0-3 より

$$X \approx \varepsilon \frac{e}{p} \quad \text{式 0-6}$$

とすると乾球まわりと湿球まわりの水蒸気量の差、つまり濡れた濾紙を通過する際に増えた水蒸気量 $\Delta X[\text{kg/kg}]$ は

$$\Delta X = \varepsilon \frac{e_s}{p} - \varepsilon \frac{e}{p} \quad \text{式 0-7}$$

で表される。また空気が奪われた熱と水蒸気が得た熱は等しいので温度変化と水蒸気量の関係は

$$C_p(T_d - T_w) = L \times \Delta X \quad \text{式 0-8}$$

である。ここで、 $C_p[\text{J/kg/K}]$ は湿り空気の定圧比熱を表す。式 0-7を式 0-8に代入すると

$$e = e_s - \frac{C_p}{\varepsilon L} p(T_d - T_w) = e_s - C(T_d - T_w) \quad \text{式 0-9}$$

$$C = 662.25 \times 10^{-6}$$

となり、水蒸気圧 e が算出できる。ここで、 C は定数である。図 0-4に自作湿度計と露点計で同時に測定した絶対湿度の関係を示す。図からわかるように比較的良好な関係を示している。ただし、自作湿度計のほうが高い値を示している部分は紙が乾いてしまっているためであり、測定の際には十分な注意が必要である。

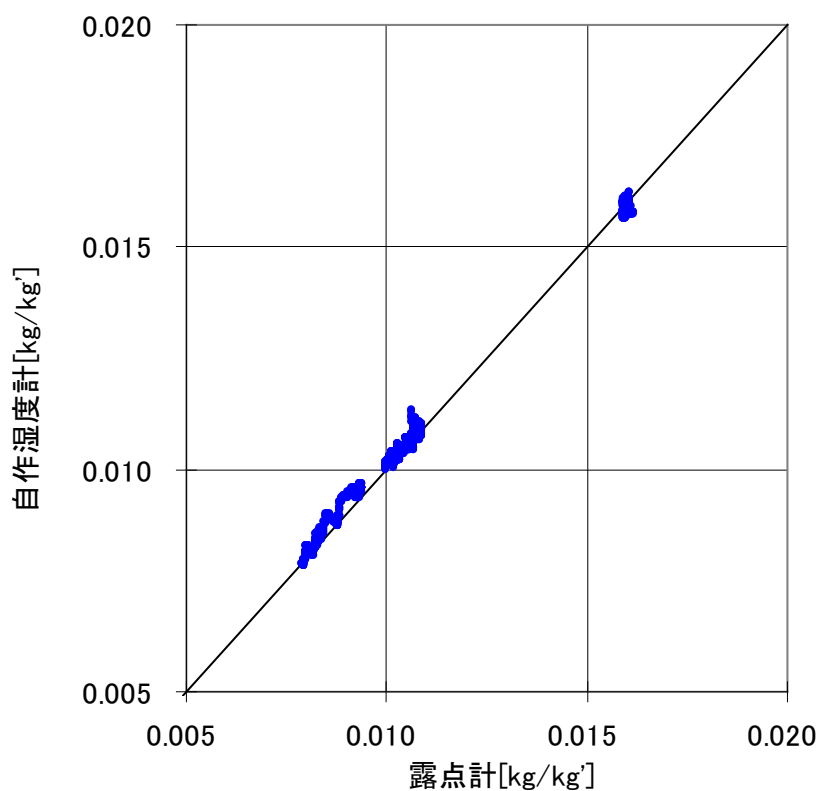


図 0-4 自作湿度計と露点計の測定値の関係

2.1.5 濾紙表面温度分布

表面温度分布測定には赤外線サーモグラフィカメラ（日本アビオニクス株式会社、Neo Thermo TVS-600：図 0-5）を使用した。赤外線サーモグラフィは、対象物から出ている赤外線放射を検出し、見かけの温度に変換して、温度分布を画像表示する方法である。

撮影された画像は 320×240 ピクセル、温度データとして保存される。



図 0-5 サーモカメラ

2.1.6 濾紙重量測定

濾紙の重量測定には分析用電子天秤（AND、GR-200：図 0-6）を用いた。測定の際にはわずかな静電気の帯電が誤差を招くため、その点に十分留意する必要がある。表 0-3に仕様を示す。なお、較正は内蔵分銅により自動で行われる。



図 0-6 電子天秤

表 0-3 電子天秤仕様

秤量	200g
最小表示	0.1mg
再現性（標準偏差）	0.1mg
直線性	±0.2mg
秤量室	178(W)×160(D)×233(H)mm

2.2 風洞装置

2.2.1 構造

風洞装置はその構造により図 0-7のように開放型と回流型に大別される。使用した空気を外気に放出する開放型風洞に比べ、一度使用した空気を再び回流させ使用する回流型風洞は同じ流速を得るのに必要なエネルギーが少ない。しかし後述する塩分法のように内部で水を蒸発させた場合、回流型風洞では一度蒸発した蒸気は風洞内を循環しとどまり続ける。一方で水面からは新たに蒸発がおこるので内部の水蒸気濃度は次第に上昇していく。風洞内の水蒸気濃度が高ければ十分な蒸発量が得られず、結果として大きな誤差を招くことになってしまう。そこで本研究では開放型の風洞を自作した。

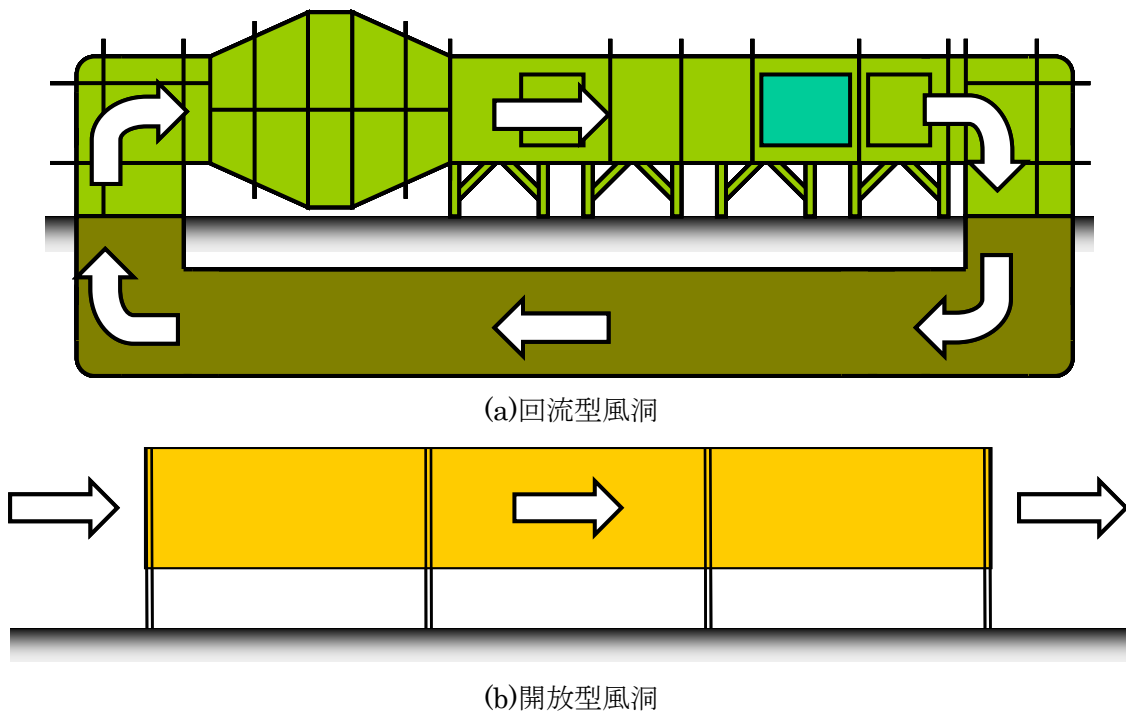


図 0-7 風洞装置の種類

骨組みには鉄製 L 字アングルを用い、壁面、天井及び上流部床面に 4mm 厚ベニヤ板を、模型（後述）設置部床に 5mm 厚塩化ビニル板をそれぞれ用いた。送風機（ナカトミ CV-3510）は同型のものを 4 台並列に設置した。風洞内部上流には整流用金網を、下流には水槽が設置してある。また水槽を使わない場合は水槽を取り外し周りの床と同じ塩化ビニ

ル板を敷くことで、この部分を床として使うことも出来る。風洞は温度管理の出来る室内に設置した。

また、図 0-9のように主流方向を x 、スパン方向を y 、鉛直方向を z と座標を定義する。

表 0-4 送風機仕様

型式	ナカトミ CV-3510	
電源	100V 60Hz	
速度	強	弱
回転数[rpm]	1550	1350
電流[A]	0.63	0.45
消費電力[W]	58	42
風速[m/min](m/sec)	192(3.2)	-
風量[m ³ /min](m ³ /sec)	78(1.3)	-
羽根径[mm]	350	
コード長さ	2m VCTF 0.75mm ²	
本体寸法（固定金具使用時）[cm]	幅 50×奥行 25×高 49	
本体重量[kg]	6.8	

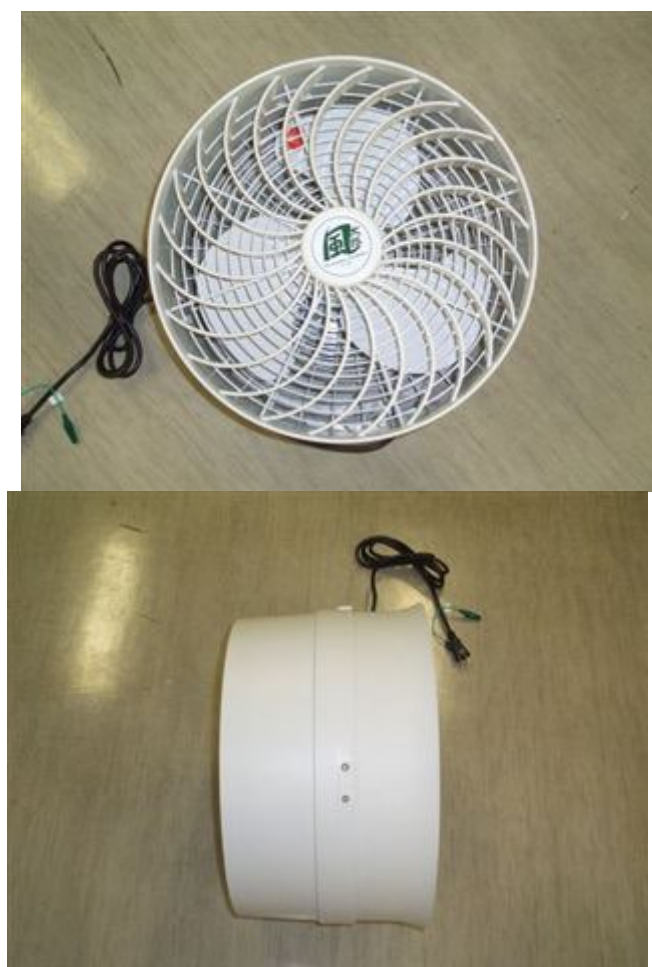


図 0-8 送風機

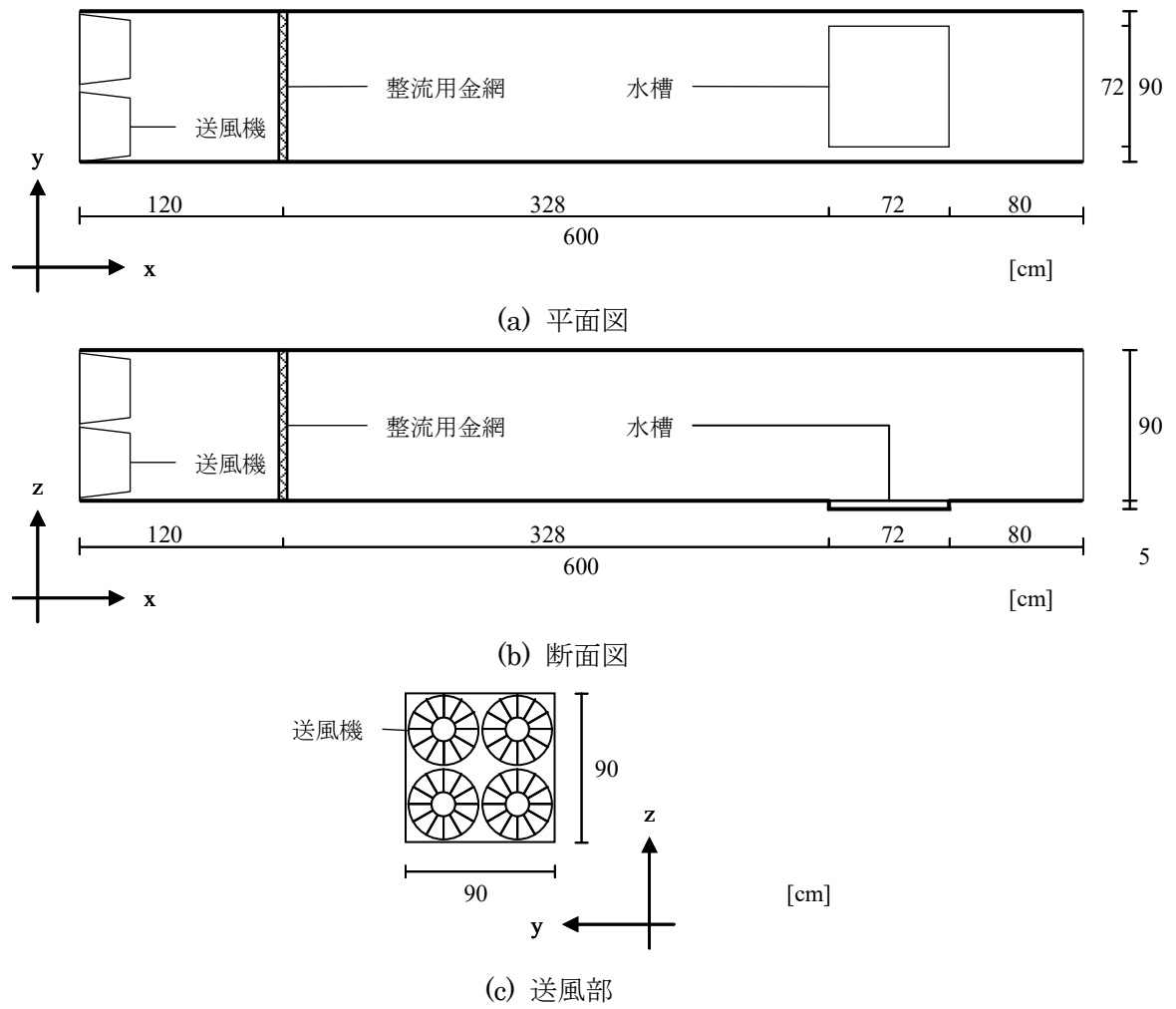


図 0-9 風洞概略図および座標の定義

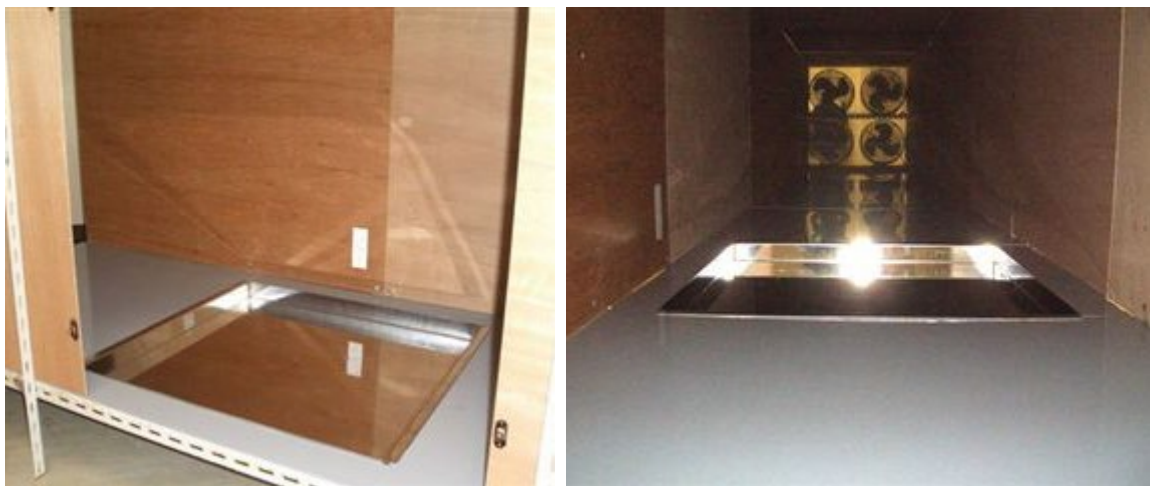


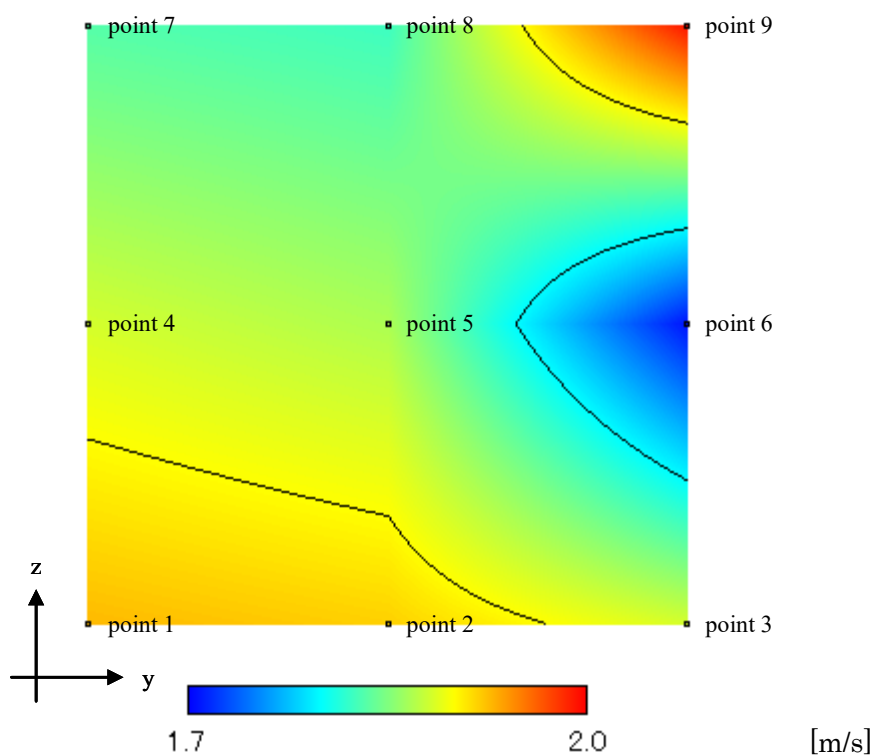
図 0-10 水槽設置時



図 0-11 床設置時

2.2.2 風速分布及び特性

風洞内部の風速分布を超音波風速計（株式会社カイジョー、DA-600）で測定した。測定位置は水槽の上流端断面で、 y 方向に3点、 z 方向に3点の計9点で行った。測定間隔は10Hz、測定時間は1点につき30秒である。各点で風速の絶対値を平均し空間分布を求めると、その変動係数は約4%であり、十分小さいと判断した。また乱れ強さは約5.7%である。

図 0-12 y - z 断面風速分布

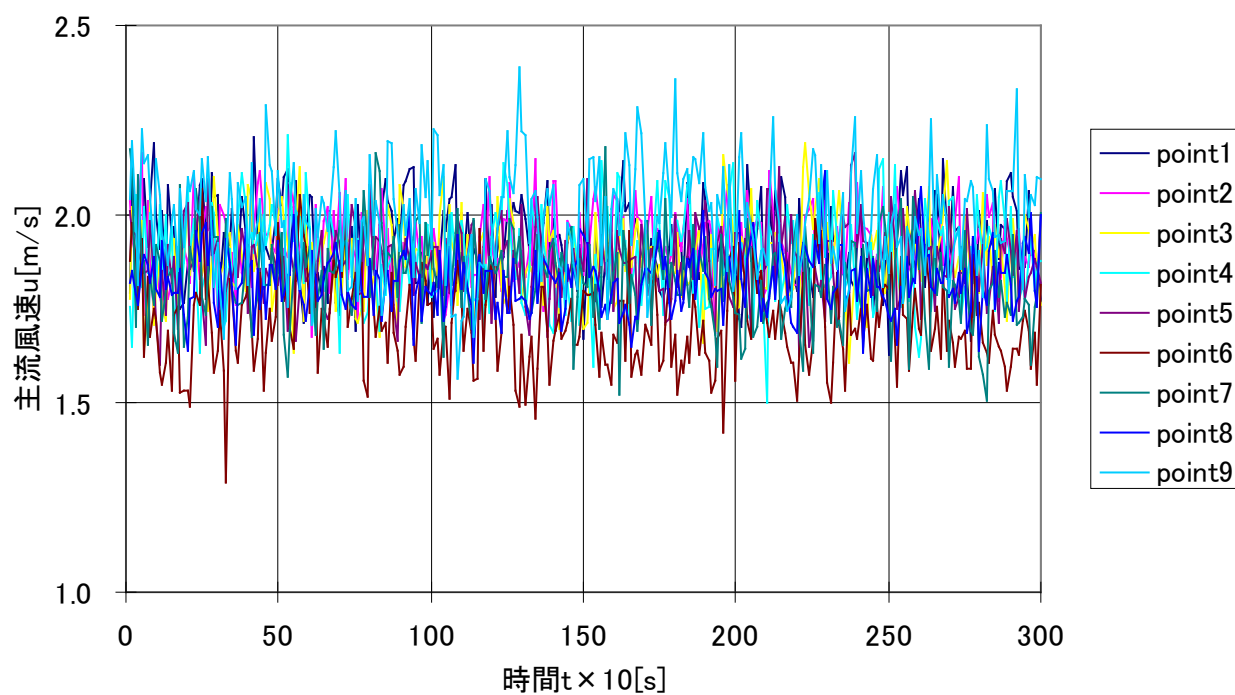


図 0-13 主流速度経時変化

表 0-5 風速特性

測定点	最大[m/s]	最小[m/s]	平均[m/s]	乱れ強さ[%]
1	2.21	1.63	1.93	5.50
2	2.16	1.68	1.92	4.64
3	2.19	1.60	1.88	5.44
4	2.21	1.50	1.88	6.24
5	2.16	1.60	1.87	5.17
6	2.07	1.29	1.71	6.88
7	2.18	1.51	1.83	6.29
8	2.11	1.61	1.82	4.41
9	2.39	1.56	1.99	6.88
平均	2.19	1.55	1.87	5.72

2.2.3 水槽

風洞内部に設置する水槽は図 0-14に示すような内寸 $720 \times 720 \times 50\text{mm}$ のステンレス製 (厚さ 2mm)である。

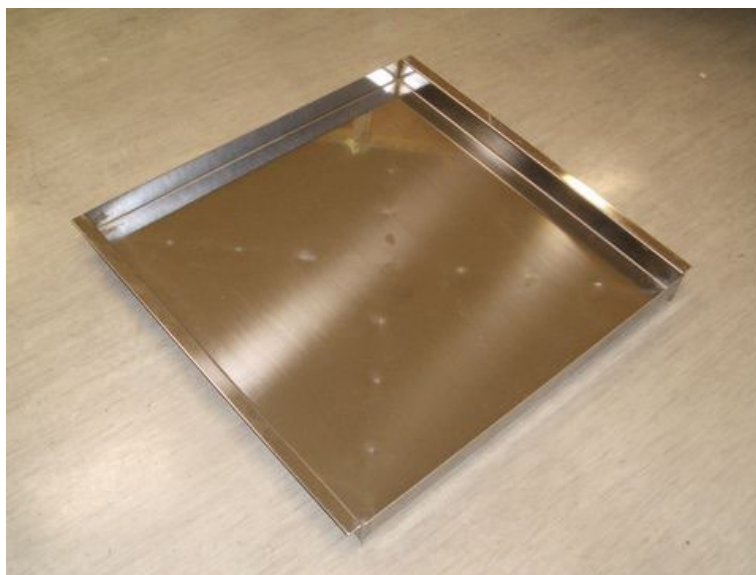
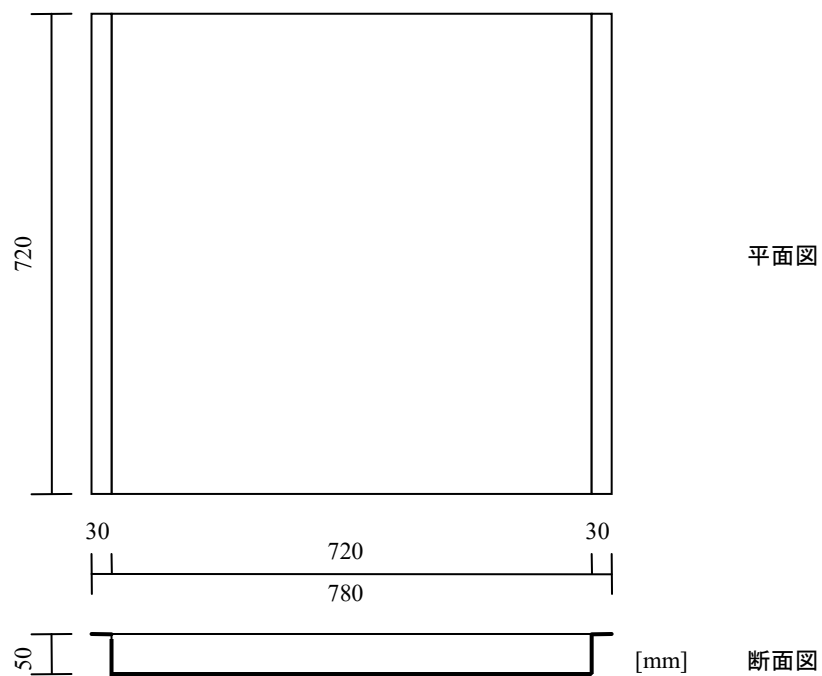


図 0-14 ステンレス製水槽

2.3 粗度模型群

本研究では都市を表現する縮小模型として直方体粗度模型群を測定部および、その周辺の風洞内床面に並べている。本節ではこの粗度模型群について説明する。

2.3.1 模型概要

(1) 水槽外模型

水槽外の粗度模型群は木製直方体模型を組み合わせて作成した。個々の模型は1辺が $25\text{mm} \equiv 1H$ の立方体および高さがその半分の $12.5\text{mm} = 0.5H$ の直方体である。これらを厚さ 1mm の塩化ビニルシートに両面テープで固定した。

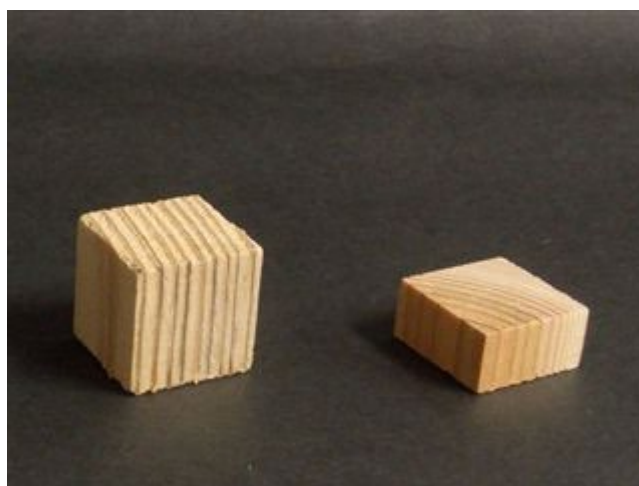


図 0-15 1H（左）および 0.5H（右）木製ブロック

(2) 水槽内模型

水槽内の粗度模型群は水に沈めて使用するために耐水性と密度を考慮してアクリル製および塩化ビニル製である（図 0-16）。個々の模型は $25\text{mm} \times 25\text{mm} \times 70\text{mm}$ の直方体である。また模型を配置すべき場所に水槽縁がかかる場合には $12.5\text{mm} \times 25\text{mm} \times 45\text{mm}$ のアクリル製模型と 1H 木製模型を組み合わせて使用した。これらを厚さ 5mm のアクリル板に両面テープ（ニチバン、ナイスタック NW-25）で固定した。水槽内にこの模型群を設置し水を満たした時、図 0-17のように水面と風洞床面、水槽内外の模型がそれぞれ同じ高さになるように十分留意している。

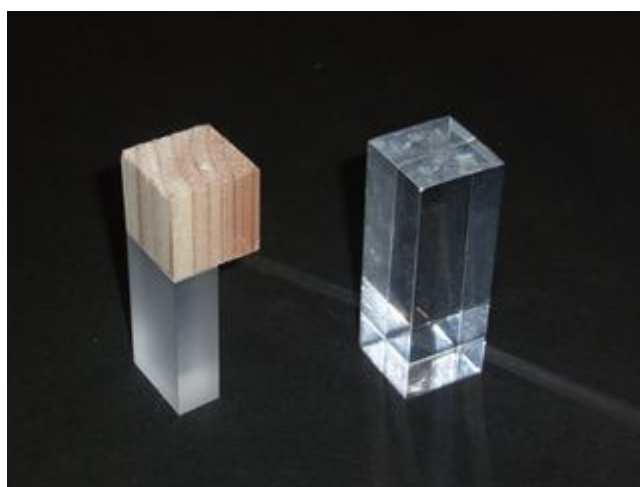


図 0-16 水槽用模型

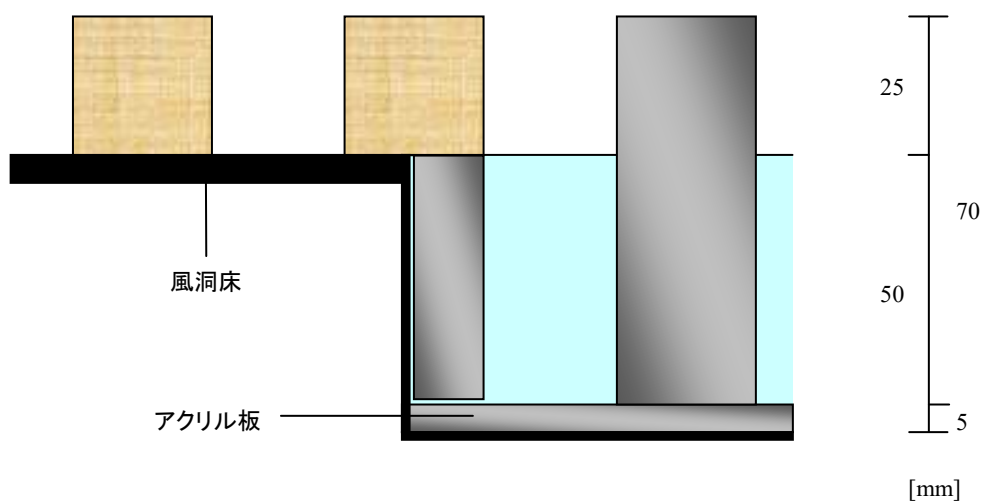
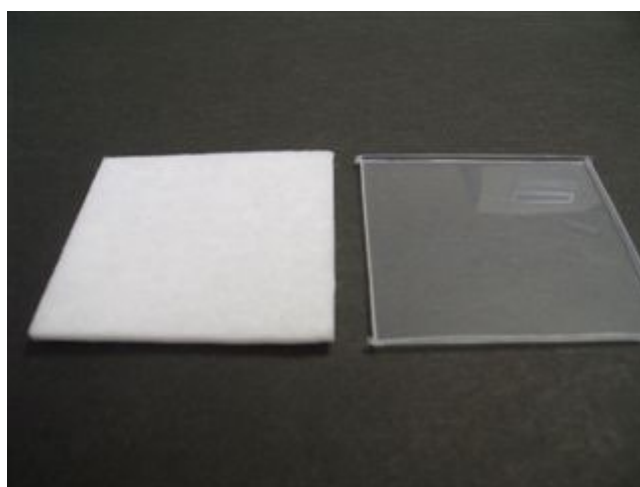
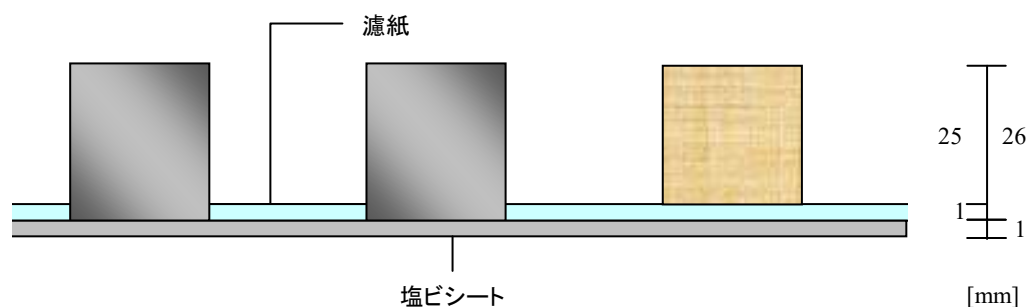


図 0-17 満水時の水面と床面高さ

(3) 濾紙法用模型

濾紙法では 1mm 厚の塩化ビニルシートの上に濾紙 (ADVANTEC No.424) をスプレー糊 (住友スリーエム株式会社 スプレーのり 99) で貼付した物に木製模型を並べている。ただし、測定街区とその周辺のみ水を吸わないようにアクリル製模型を用いた。このアクリル製模型は濾紙の厚みを考慮し、高さが 26mm である。また、測定部の濾紙は秤量のために取り外せるようになっており、厚さの無視できる十分薄いフィルムで作成したケースに入れられている。また、デジタル温度センサを挿入できるよう側面に穴がけられている。



2.3.2 配列

模型の配列条件は平面配列、模型高さおよび高さ分布、建蔽率を変化させている。これらの条件は永山²⁾の抗力係数 C_d 測定と同一の条件である。以下にそれぞれの条件について説明する。

(1) 平面配列

粗度の平面配列は街路が縦横に理想的に並んだ整形配列（N、図 0-20）と、それらを 1 列毎に互い違いに配した実際の都市形状により近い千鳥配列（S、図 0-21）の 2 種類である。

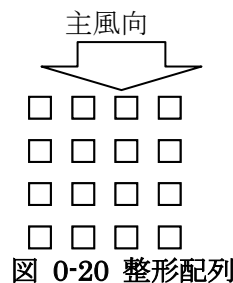


図 0-20 整形配列

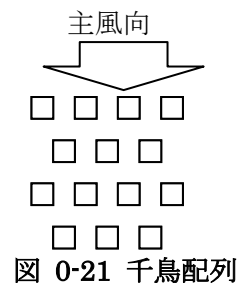


図 0-21 千鳥配列

(2) 模型平均高さおよび模型高さ分布

鉛直方向の幾何特性で粗度模型群を分類すると、高さに分布のない一様高さ粗度模型群と、高さに分布をつけた非一様高さ粗度模型群の 2 つに分けられる。

一様高さ粗度模型群は高さ $1H$ および $1.5H$ の 2 種類である。 $1.5H$ 模型は $1H$ 模型の上に $0.5H$ 模型を重ねて作成した。

非一様高さ粗度模型群は、高さ $1H$ の土台（低層模型）の上にさらに模型を重ね（高層模型）、 $1H$ 、 $2H$ 、 $3H$ の模型で構成されている。低層模型・高層模型それぞれの平面配列が整形配列と千鳥配列である。また、平均高さ $H_{av}[\cdot]$ は全て $1.5H$ である。

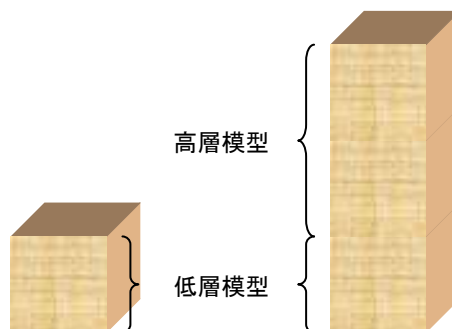


図 0-22 低層模型と高層模型の定義

(3) 配列名

(1)および(2)で説明した各幾何パラメータを組み合わせた計9種類の配列名を表 0-6 および図 0-23に示す。配列名は低層模型の配列を大文字で、高層部分の配列を小文字で、それぞれ $N \cdot n$ (Normal : 整形)、 $S \cdot s$ (Staggered : 千鳥) を表し、数値は模型平均高さを示している。

表 0-6 配列名

配列名	平均高さ H_{av}	平面配列		高さ分布	
		低層配列	高層配列	σ/H_{av}	
N1	1	整形		一様	0.00
S1		千鳥			
N1.5	1.5	整形		一様	0.00
S1.5		千鳥			
N1.5-s*		整形	千鳥*	非一様	0.33
N1.5-n			整形		0.58
N1.5-s			千鳥		
S1.5-n		千鳥	整形		
S1.5-s			千鳥		



N1.0



S1.0



N1.5



S1.5



N1.5-n



S1.5-n



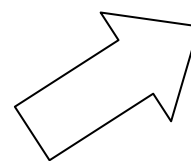
N1.5-s



S1.5-s



N1.5-s*



主風向

図 0-23 全配列条件

(4) グロス建蔽率と粗度立面積密度およびその定義

グロス建蔽率（以下、建蔽率） $\lambda_p[\%]$ は敷地面積 $A_d[\text{m}^2]$ に占める屋根面積 $A_p[\text{m}^2]$ の割合であり、地表面での粗度占有面積率に相当する。また粗度立面積密度 $\lambda_f[\%]$ は A_d に対する建物模型 1 個あたりの立面積（主風向の見つけ面積） $A_f[\text{m}^2]$ の割合である。

$$\lambda_p = \frac{A_p}{A_d}$$

$$\lambda_f = \frac{A_f}{A_d}$$
式 0-10

ここで模型幅 $B_w[\text{m}]$ 、模型長さ $B_l[\text{m}]$ 、模型高さ $h[\text{m}]$ 、街路幅 W_x および $W_y[\text{m}]$ とすると

$$A_d = (B_w + W_x) \times (B_l + W_y)$$

$$A_p = B_w \times B_l$$

$$A_f = B_w \times h$$
式 0-11

である。本実験では $B_w=B_l=H$ の底面が正方形である直方体模型を使用しており、単位街区も正方形で街路幅 $W_x=W_y=W$ である。また、主風向も変化しないため、

$$A_d = (H + W)^2$$

$$A_p = H^2$$

$$A_f = H \times h$$
式 0-12

と表せる。よって λ_p および λ_f は式 0-13で表される。

$$\lambda_p = \frac{H^2}{(H + W)^2}$$

$$\lambda_f = \frac{H \times h}{(H + W)^2}$$
式 0-13

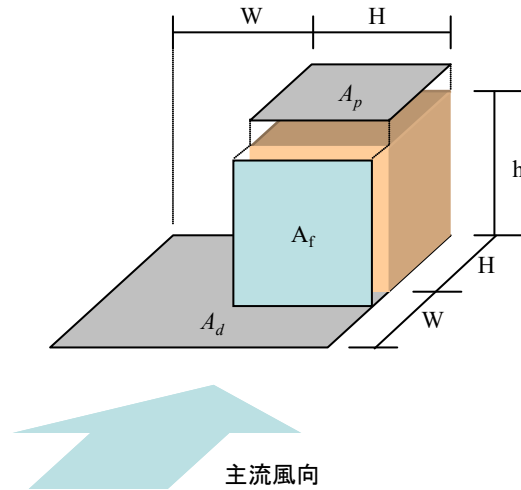


図 0-24 単位街区と建蔽率および粗度立面積密度の定義

表 0-7に本研究で用いた建蔽率と単位街区幅、街路幅、粗度立面積密度をまとめる。

表 0-7 建蔽率と粗度立面積密度

建蔽率 λ_p [%]	単位街区幅 $H+W$ [mm]	街路幅 W [mm]	粗度立面積密度 λ_l [%]	
			$H_{av}=1H$	$H_{av}=1.5H$
7.7	90	65	7.7	11.6
17.4	60	35	17.4	26.0
30.9	45	20	30.9	46.3

2.3.3 フェッチ

測定部よりも風上側の床面部分は、乱流境界層を発達させるためにフェッチ (fetch) と呼ばれる水平方向の吹送距離を設けている。地表面付近には地表面との水・熱・物質交換に大きな役割を果たす Surface layer が存在し、その層はフラックスが垂直方向に変わらない Inertial sub-layer(ISL)とフラックスが高さに依存する Roughness sub-layer(RSL)の大きく二つに分けられる^[3]。

本実験でのフェッチは測定部から風上約 3.3m (130H) とし、フェッチ部分の模型配列は、測定部の模型配列と同様の粗度形状にしている。これは、同じ条件の模型配列にすることで模型配列条件以外の因子が抗力係数に及ぼす影響を極力最小にするためである。

永山^[2]は同様な条件粗度形状でフェッチの長さを変化させた時のフェッチと基準風速 8m/s での抗力係数の関係を測定している (図 0-26)。本研究の模型配列条件はこれと同一であり、この図よりフェッチ長さ 3m は乱流境界層を発達させるために十分な距離であることが分かる。

測定エリアの境界層厚は、一般に既往の大熊^[4]などの風洞実験によって吹送距離の 0.5 乗に比例すると考えられ、本実験では約 250mm (10H) である。また MacDonald^[5]によると fetch 長さの 1/10 が粗度要素により生成される境界層厚、さらにその 1/10 が ISL である。よって基準風速を測定する高さは、床面の粗度要素からの影響が極めて少ない高さである

と考えられる 500mm (20H) とした。

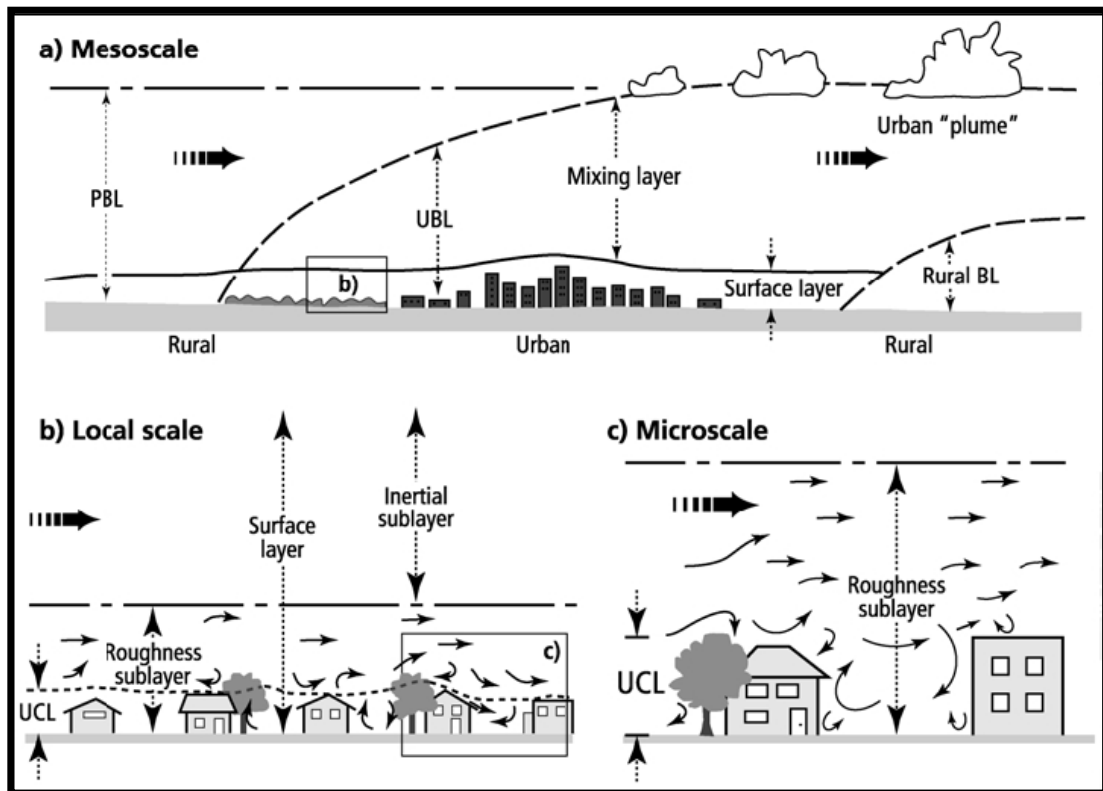


図 0-25 都市境界層の概要^[2]

(PBL:planetary boundary layer, UBL:urban boundary layer, UCL:urban canopy layer)

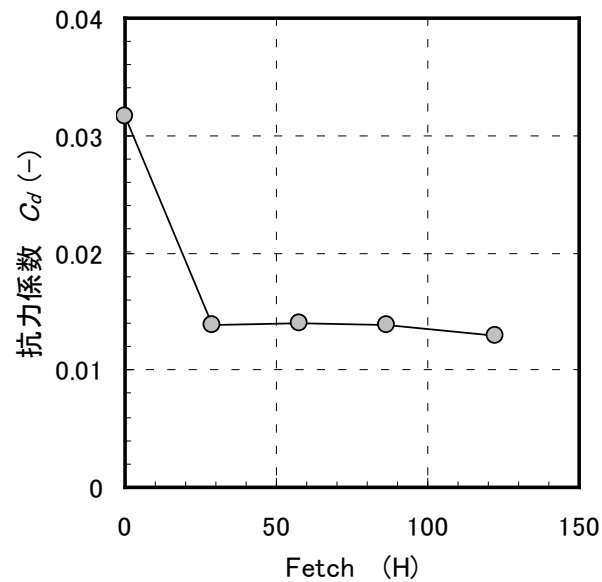


図 0-26 フェッチ長さと抗力係数の関係^[2]

第3章 塩分濃度法によるエリア平均交換係数

3.1 塩分法の原理

塩分法は蒸発により濃縮する食塩水の濃度変化から蒸発量を求める手法である。浅い水槽に食塩水を満たし一定時間曝露すると、水槽内の食塩水は水面と上空の空気との間の絶対湿度差（以下、飽差）をポテンシャルとして蒸発し、またそれにより濃縮する。水のみが蒸発し、食塩の量は変化しないとすると、蒸発量 $E[\text{kg}]$ と食塩水濃度 $S[\text{psu}]$ は以下のように表される。

$$E = W_B - W_A \quad \text{式 3.1-1}$$

$$W_B = \rho_{\text{water}} V \quad \text{式 3.1-2}$$

$$S_B = \frac{S^*}{W_B + S^*} \quad \text{式 3.1-3}$$

$$S_A = \frac{S^*}{W_A + S^*}$$

ここで、 $W[\text{kg}]$ ：水の質量、 $\rho_{\text{water}}[\text{kg/m}^3]$ ：水の密度、 $V[\text{m}^3]$ ：水槽容積、 $S^*[\text{kg}]$ ：食塩の質量、添え字 B、A はそれぞれ蒸発前、蒸発後を表す。これらより、蒸発量 E を蒸発前後の濃度 S_B 、 S_A で以下のように表すことが出来る。

$$E = \rho_{\text{water}} V \left(1 - \frac{S_B}{S_A} \frac{1 - S_A}{1 - S_B} \right) \quad \text{式 3.1-4}$$

この蒸発量 E を曝露時間 $\Delta t[\text{sec}]$ 、蒸発面面積 $A[\text{m}^2]$ 、飽差 $\Delta X[\text{kg/kg}']$ で除したものが物質移動係数 $k[\text{kg/m}^2/\text{sec}/(\text{kg/kg}')]$ である。

$$\Delta X = X_{\text{surf}} - X_{\text{ref}} \quad \text{式 3.1-5}$$

$$k = \frac{E}{\Delta X \Delta t A} \quad \text{式 3.1-6}$$

ここで、 $X_{\text{surf}}[\text{kg/kg}']$ ：水面ごく近傍の絶対湿度、 $X_{\text{ref}}[\text{kg/kg}']$ ：雰囲気の絶対湿度である。 X_{ref} は露点から、 X_{surf} は水面ごく近傍の空気は水蒸気が飽和していると仮定すると水面温度 $T_{\text{surf}}[\text{K}]$ から、それぞれ求めることが出来る。

さらにこの k を参照風速 $U_{\text{ref}}[\text{m/sec}]$ および湿り空気密度 $\rho_{\text{air}}[\text{kg/m}^3]$ で無次元化したものがバルクスカラー輸送係数 $CE[-]$ である。

$$C_E = \frac{k}{\rho_{air} U_{ref}} \quad \text{式 3.1-7}$$

なお、水の密度 ρ_{water} については T_{surf} から化学便覧により求めた。

3.2 予備実験

測定による誤差を見積もり、測定条件を決定するために以下の予備実験を行った。

3.2.1 曝露時間の決定

まず、サンプルごとの測定値のばらつきがどの程度であるか確認した。同時に作成した食塩水を bottle1～4 の 4 本のサンプル瓶に分けて入れ、その塩分を測定した結果が図 3.2-1 である。各瓶の値は 0.002psu 以内に収まっていることが確認できる。これはサリノメータの精度である 0.002psu と一致する。

次に、曝露時間を決定するために 19 時間曝露し蒸発量を測定した。測定条件および結果を表 3.2-1 に示す。式 3.1-4 より蒸発量を求めると 1.94kg であった。曝露時間が長くなれば蒸発量が多くなり、塩分変化に対するサンプルごとのばらつきによる誤差は小さくなる。しかし蒸発により水位が減少すると、風洞床面と水面に段差が生じ、また模型を設置している場合はその幾何条件が変化してしまう。これらのことを考慮に入れ、実験結果より曝露時間は 2 時間とした。この場合蒸発により塩分は約 0.2psu 上昇し、これに対するサンプルごとのばらつきによる誤差は約 1% となる。また水位変化は約 0.4mm であり、模型サイズに比べて十分に小さい。

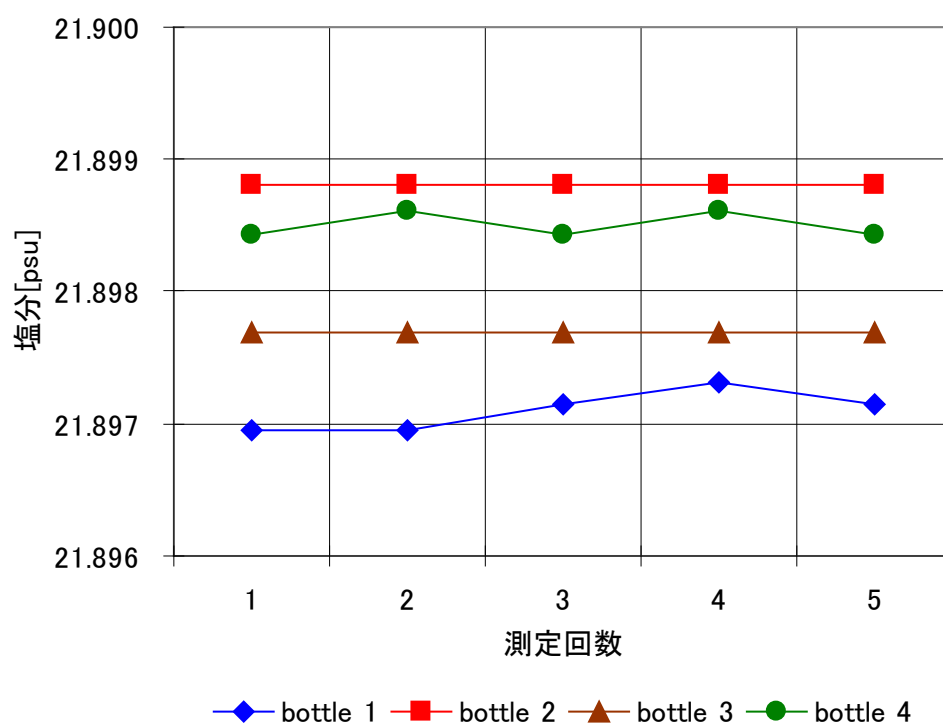


図 3.2-1 サンプル瓶ごとのばらつき

表 3.2-1 測定条件および結果

配列条件		模型なし
平均室温		22 °C
曝露時間		19 h
平均飽差		5.14 g/kg'
水位変化		-4 mm
塩分	蒸発前	21.898 psu
	蒸発後	23.631 psu

3.2.2 両面テープの影響

塩分を測定するサリノメータは試料の当量導電率比を塩分として換算する。そのため試料由来の Na^+ イオン、 Cl^- イオン以外のイオンが増減しても値に影響を及ぼす。しかし前述したとおり、水槽内で使用する模型は両面テープで基板に固定されており、その成分が試料に溶解することで測定結果に誤差を招く恐れがある。そこで両面テープによる塩分への影響を確認する実験を行った。

まず、同時に作成した食塩水を4本のサンプル瓶に満たした。このうち1本はそのまま、残りの3本には同じ長さの両面テープを入れ、それぞれ一定時間放置した後その塩分を各5

回連続で測定した。テープの長さは 5cm、10cm、12cm の 3 種類、放置時間は 30 分、60 分、120 分の 3 種類である。

図 3.2-2 に示すように、テープの塩分変化とテープの放置時間、テープの長さとの間には一定の相関が見られず、またその変化も非常に小さいことから、両面テープによる塩分の測定値への影響は極めて小さいことが確認された。

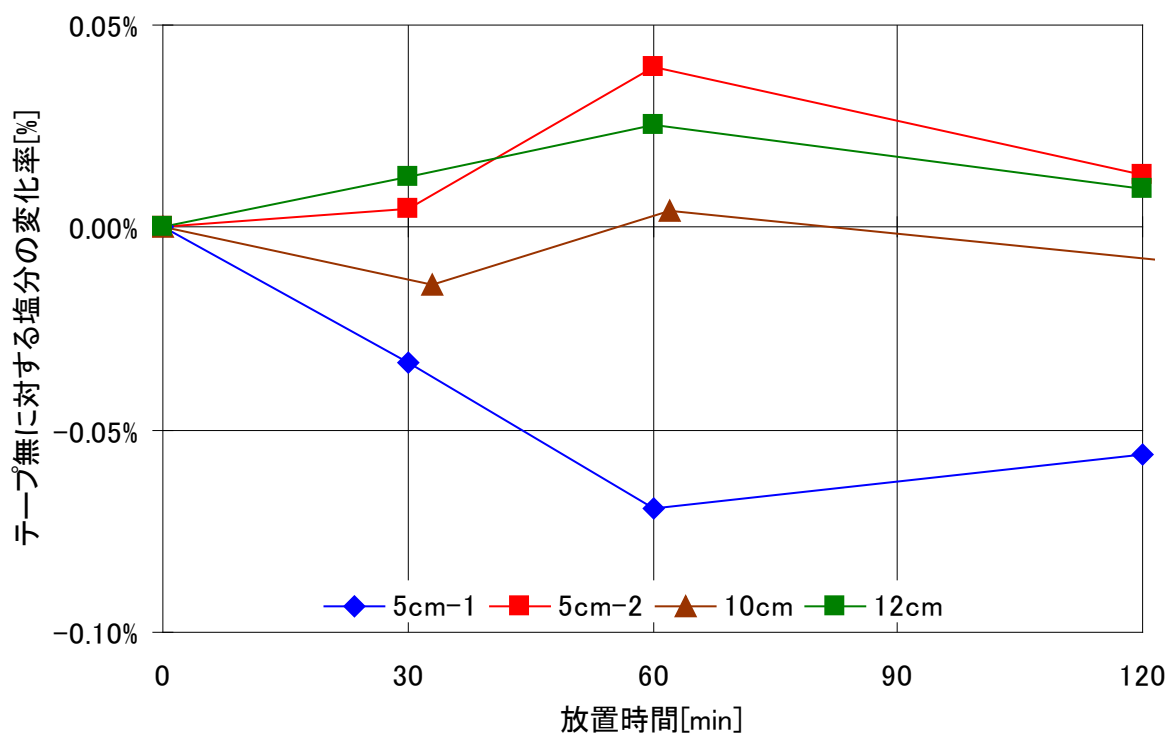


図 3.2-1 テープ放置時間と塩分変化の関係

3.3 測定手順および条件

塩分法による測定の概略を図 3.3-1 に示す。測定手順は以下のとおりである。まず、海水と同程度の塩分の食塩水を作成する。つづいてこれを模型が配置された風洞内の水槽に満たし、残りをサンプル瓶に採取して塩分を測定する。この時サンプル瓶の口まで試料で満たし、瓶内での蒸発を最小限に留めている。また、サンプル瓶および試料採取に使う道具は試料で十分に共洗いしている。次に風洞内に風を吹かせこれを曝露する。この間露点、水面温度、代表高さ気温、代表高さ風速を同時に測定する。曝露後再び試料をサンプル瓶に採取し、塩分を測定する。なお、水槽およびその内部で使用する模型は流水で洗浄したのち、十分に乾燥させている。配列条件は 2 章で述べた 9 配列 3 建蔽率および模型なし滑面の計 28 条件である。表 3.2-1 に各測定項目および条件を示す。風速は約 2m/s である。

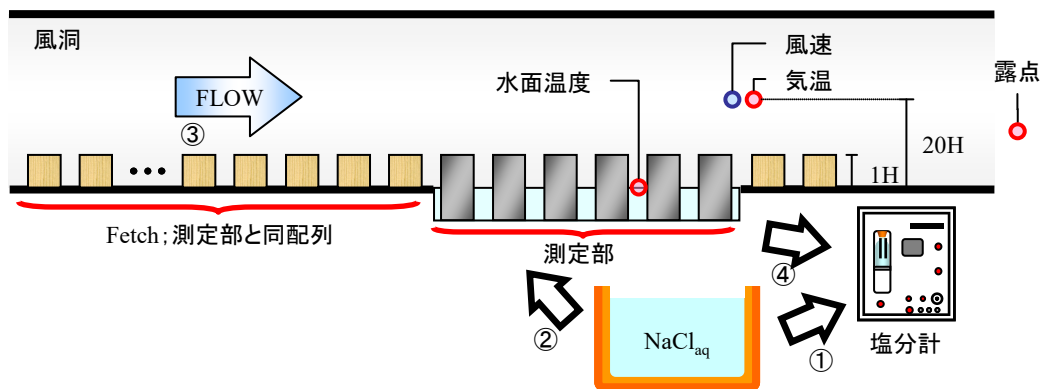


图 3.3-1 盐分法概略

表 3.3-1 鹽分法測定條件

項目	測定時間・回数	測定機器	測定位置
曝露時間	2 時間	-	-
塩分	1 瓶につき 5 回×4 本	サリノメータ	-
露点	30 秒間隔で 2 時間	露点計	風洞外
水面温度		デジタル温度センサ	水面
代表高さ気温			測定部下流端中央高さ 20H
代表高さ風速		ピトー管・微差圧計	

3.4 結果

床面バルクスカラー輸送係数の塩分法による測定結果を表 3.4-1 に示す。各配列パターンについて考察を行う。

表 3.4-1 バルク係数測定結果

建蔽率 λ_p [%]	バルク係数 $\times 10^3$ [-]									
	N1	S1	N1.5	S1.5	N1.5-n	S1.5-n	N1.5-s	S1.5-s	N1.5-s*	滑面
7.7	5.20	5.45	4.96	5.64	4.61	4.93	4.83	5.19	4.81	4.27
17.4	4.93	5.72	4.90	5.13	4.31	4.81	4.38	4.38	4.86	
30.9	4.84	4.96	3.71	3.82	3.79	4.09	3.90	4.00	4.37	

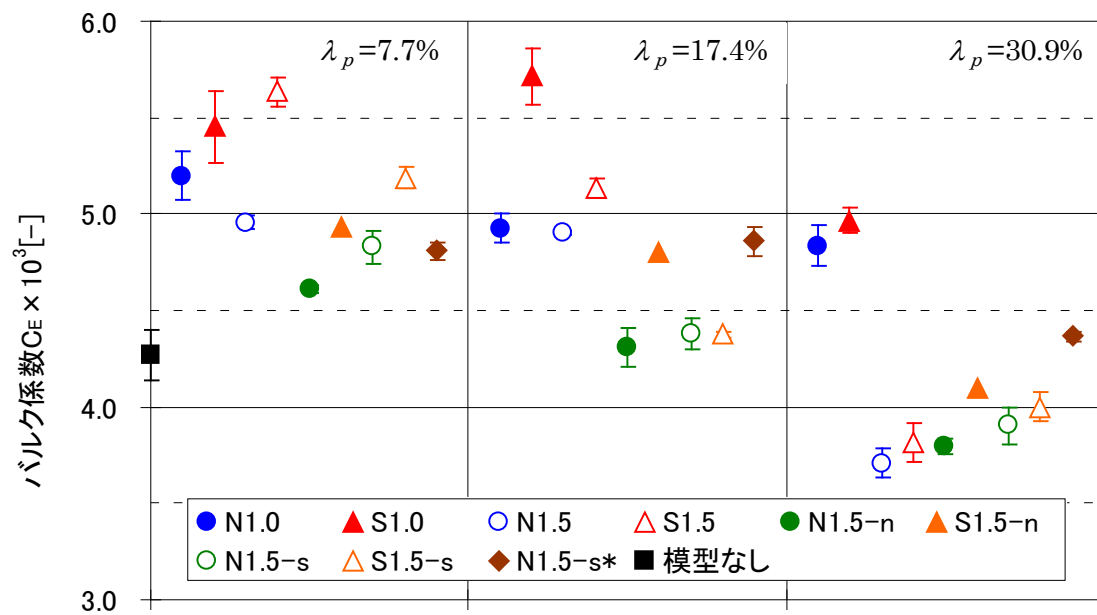


図 3.4-1 全測定結果

3.4.1 一様高さ粗度模型群のバルクスカラー輸送係数

図 3.4-2 に一様高さ粗度模型群の場のバルク係数 C_E と建蔽率 λ_p の関係を示す。いずれの配列でも C_E は一旦模型なし ($\lambda_p=0$) よりも大きな値をとり、 λ_p が増加すると減少している。また測定した全ての λ_p で、模型高さ 1H、1.5H いずれの場合においても整形配列 (N) よりも千鳥配列 (S) の方が大きな値をとっている。

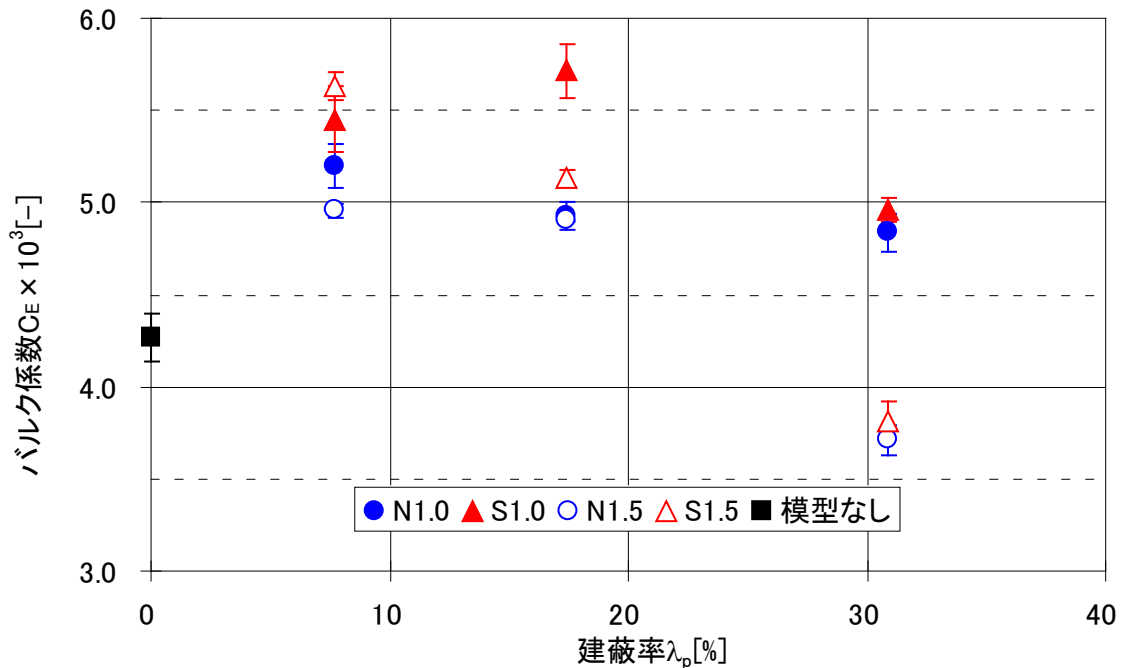


図 3.4-2 一様高さ粗度模型群のバルク係数 C_E と建蔽率 λ_p

(1) 建蔽率による比較

まず建蔽率による変化について考察を行う。Harman ら^[1]によると、立方体間の流れには風が循環する recirculation region と風が通り抜ける ventilated region とが存在するという (図 3.4-3)。Oke^[2]は立方体間の流れ場に関しては、模型高さ H と x 方向の模型間の距離 W との比である H/W の値が、 $H/W < 0.4$ 、 $0.4 < H/W < 0.7$ 、 $0.7 < H/W$ の場合においてそれぞれ isolated flow、wake interference flow、skimming flow と呼ばれる流れ場が形成されることを図 3.4-4 のような図で表現した。本研究で使用した一様高さ粗度模型群の H/W を表 3.4-2 に示す。ただし W は図 3.4-5 で定義され、整形配列と千鳥配列で異なる。また千鳥配列 $25\% < \lambda_p$ では主流方向から見て模型が重なる部分ができ、 x 方向に隣接する模型間の距離が W と W' の 2 通り存在するため、その定義は難しい。表 3.4-2 では千鳥配列 $\lambda_p = 30.9\%$ の値は図 3.4-5 での W の値を載せている。

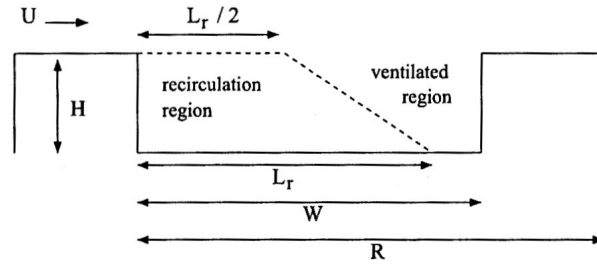


図 3.4-3 Harman らによる recirculation region および ventilated region の定義^[1]

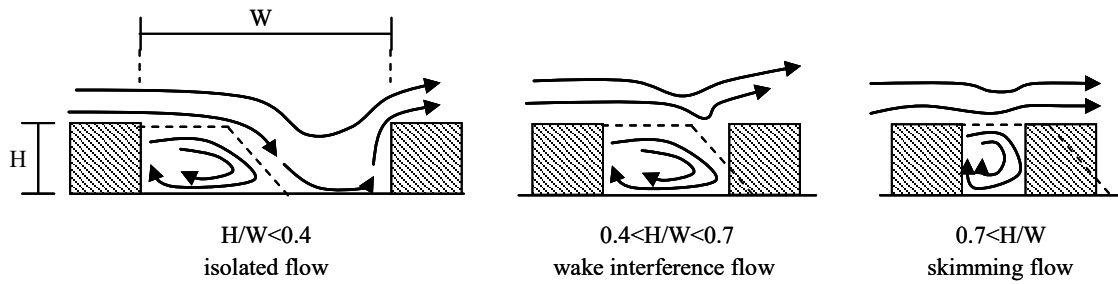


図 3.4-4 Oke による H/W と canyon 内の流れ場の関係^[2]

表 3.4-2 各配列の H/W

λ_p	N1	S1	N1.5	S1.5
7.7	0.38	0.16	0.58	0.24
17.4	0.71	0.26	1.07	0.39
30.9	1.25	(0.38)	1.88	(0.58)

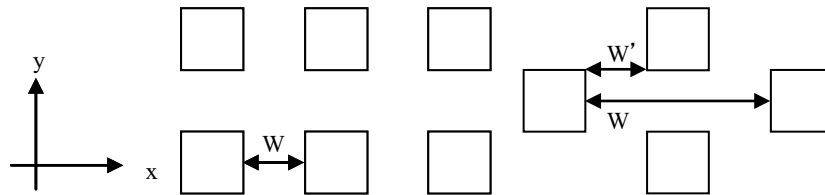


図 3.4-5 W の定義 (左：整形、右：千鳥)

ventilated region では図 3.4-4 のように上空の乾燥空気が床面に供給され蒸発が促進されることが考えられる。低 λ_p 時には λ_p が増加すると単位面積当たりの乾燥空気供給面の数が増加し、 C_E が増加する。

模型後部の recirculation region では高湿の空気が滞留し、また流速も小さいために蒸発が抑制されていると考えられる。 λ_p が増加すると wake interference flow や skimming flow になってこの傾向が強まり、 C_E を減少させる作用をもつ。

このように λ_p の増加は C_E に対して増加と減少の双方の作用を持ち、その重ね合わせによって C_E は λ_p が増加すると一旦増加し、その後減少するという挙動を示すと考えられる。

(2) 模型高さによる比較

次に模型高さによる変化について考察する。N1 と N1.5、S1 と S1.5 はそれぞれ平面配列が同じであり、その高さのみが異なっている。しかし図 3.4-2 では模型高さと C_E との間に一定の関係は見られなかった。模型の高さが増すと H/W が増加し、また主流方向から見た模型形状が正方形から縦長の長方形へ変化する。そこで C_E を λ_p でなく、模型高さを考慮した粗度立面積密度 λ_f で表したものが図 3.4-6 である。この図では模型高さにかかわらず、整形、千鳥両配列がそれぞれ 1 本の線上に乗っている。また、 H/W との関係を示したのが図 3.4-7 である。この図でも整形と千鳥はそれぞれほぼ 1 本の線上に乗っているように見え、模型高さによらずキャニオン形状を表す H/W や λ_f が C_E をモデル化する上で同一配列においては重要なパラメータであることを示す。しかし一方で $H/W=0.38$ の S1 と $H/W=0.39$ の S1.5 では、 H/W がほぼ同じであるにもかかわらず値がやや離れている。また、前述したように千鳥配列 $25\% < \lambda_p$ では W の定義自体が曖昧であり、 H/W は粗度模型形状による C_E への影響を表すパラメータとしてそれ単独では不十分である。

主流方向から見た模型形状の変化による影響については成田³⁾が単独模型で測定している。それによると、主流方向から見た模型形状が横長になり 2 次元キャノピーに近づくとき模型側方へ抜ける気流が減少して上方を抜ける気流が増加し、模型側方の蒸発量が減るといふ。これは 3 次元モデルでは模型形状や y 方向の模型間の流れも重要であることを示している。

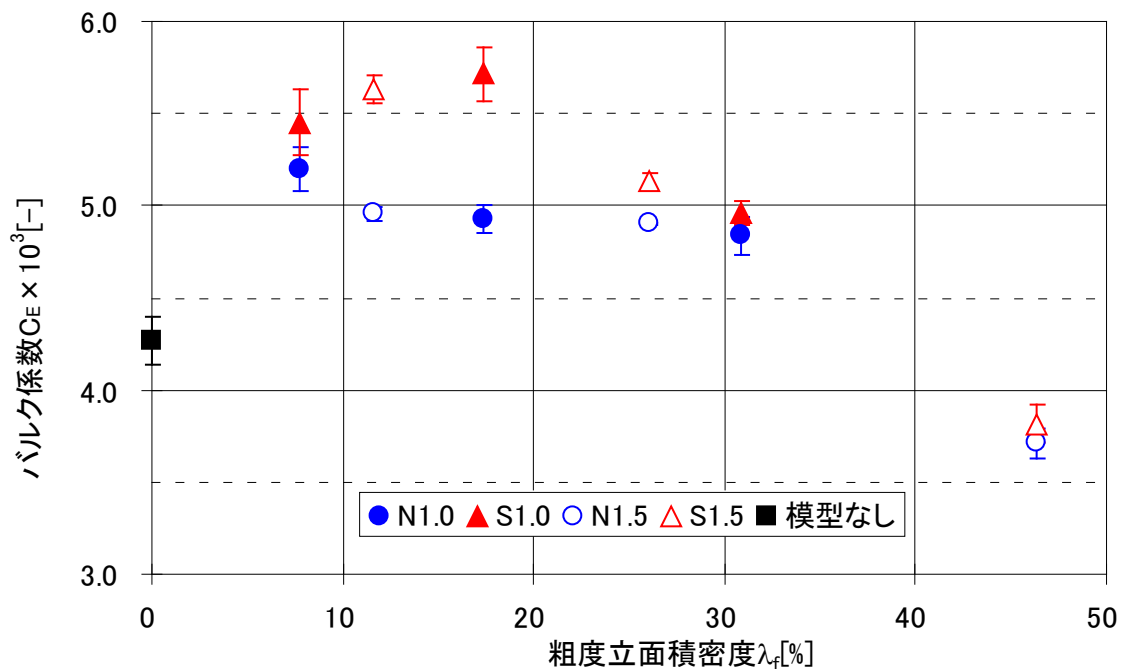
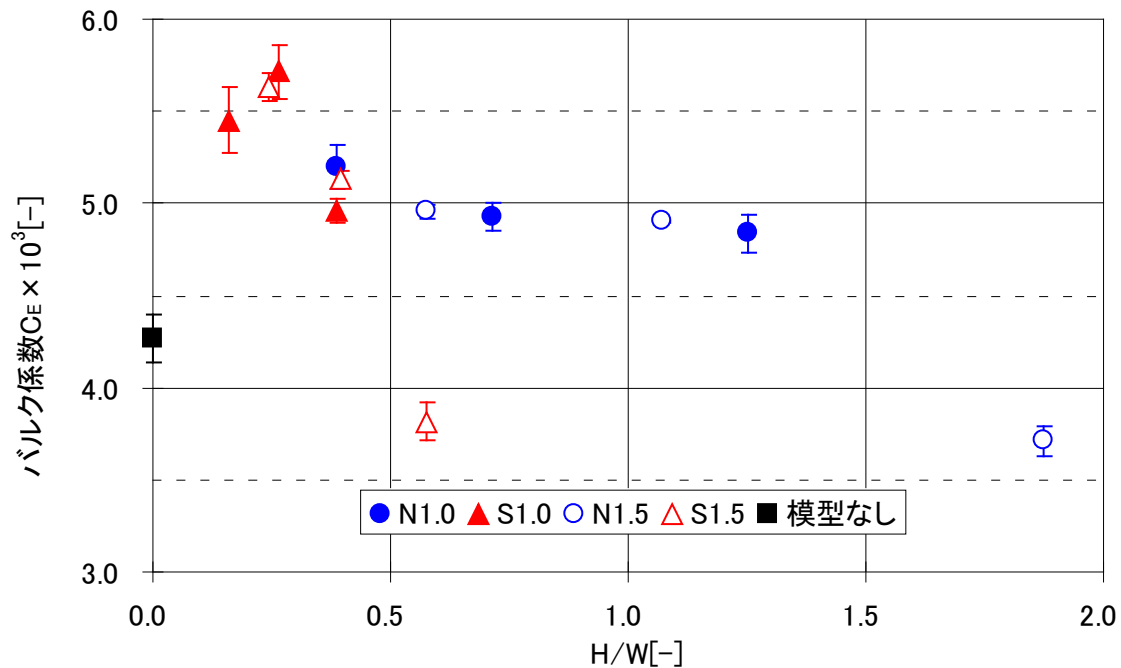


図 3.4-6 一様高さ粗度模型群のバルク係数 C_E と粗度立面積密度 λ_f


図 3.4-7 H/W と C_E の関係

(3) 平面配列による比較

続いて平面配列による違いについて考察を行う。図 3.4-6 では全体として整形配列よりも千鳥配列のほうが大きな値を示している。また、低 λ_f 領域 ($\lambda_f < 10\%$) および高 λ_f 領域 ($30\% < \lambda_f$) でそれぞれ整形配列と千鳥配列が近い値を示しているものの、中 λ_f 領域 ($10\% < \lambda_f < 30\%$) では千鳥はピークをとり整形はほぼ横ばいという全く異なった傾向を示している。

低 λ_f 時には整形、千鳥両配列ともに模型間隔が x 方向にも y 方向にも十分離れており、模型周辺気流は単独模型のそれに近い振る舞いを見せるために配列間の違いが現れにくいと考えられる。また高 λ_f 時には整形、千鳥ともに流れ場全体が **skimming flow** になってしまい、再び配列による違いが現れなくなると考えられる。孟、老川^[4]は千鳥状に配列された立方体模型近傍の流れ場と建蔽率との関係を、乱流測定を行うことで図 3.4-8 のような模式図に示し、建蔽率が 10%以下の場合 **isolated flow**、建蔽率が 30%以上の場合 **skimming flow**、その他の建蔽率の場合を **wake interference flow** とそれぞれ定義した。これによると、Oke による H/W での分類では **isolated flow** から **wake interference flow** に分類される S1、S1.5 の $\lambda_p = 30.9\%$ も、**skimming flow** に分類される。

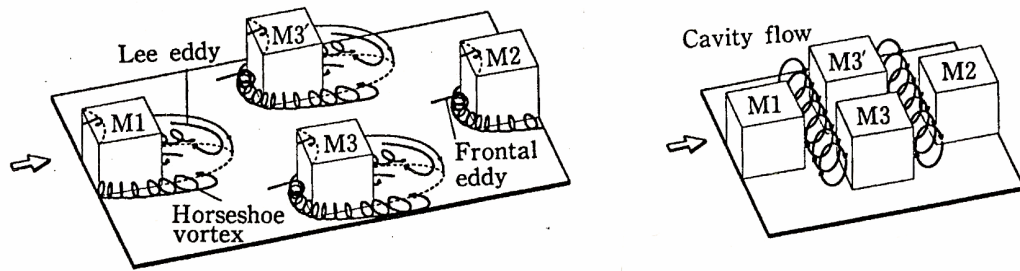


図 3.4-8 千鳥配列の流れ場の概要図（左： $\lambda_p < 10\%$ 、右： $30\% < \lambda_p$ ）^[4]

配列による違いが顕著な $10\% < \lambda < 30\%$ について考察する。建蔽率が同じまま整形配列から千鳥配列に変化すると、整形では模型に遮られずに見通せる街路（図 3.4-9：以下、街路）の部分に模型が移動するため次のような違いが現れる。

1. H/W が減少する
2. 乱れが増し、風速が弱まる
3. 流れが蛇行する

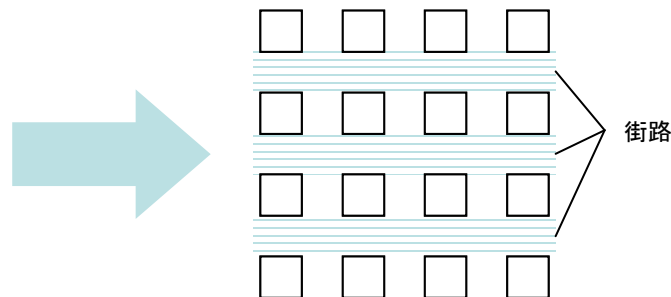


図 3.4-9 街路の定義

1 については表 3.4-2 に示したとおりである。2 については永山^[5]による本研究と同一の模型配列での抗力係数 C_d を測定している。それによれば整形配列の C_d よりも千鳥配列のそれ

の方が大きく、主流方向の速度が弱まっていることがわかる。3 については $\lambda_p = 25\%$ で Coceal ら^[6]が DNS（direct numerical simulation）により、千鳥配列、整形配列によける模型周辺気流の特性を明らかにしている。それによると、図 3.4-10 から図 3.4-12 でわかるように、整形の方が全体に流速が大きく、また y （スパン）方向への輸送が小さくチャンネル流の様相を呈する街路とキャニオン内で流れが二分されているのに対し、千鳥は全体が一様に乱れ y 方向の速度成分が大きい。

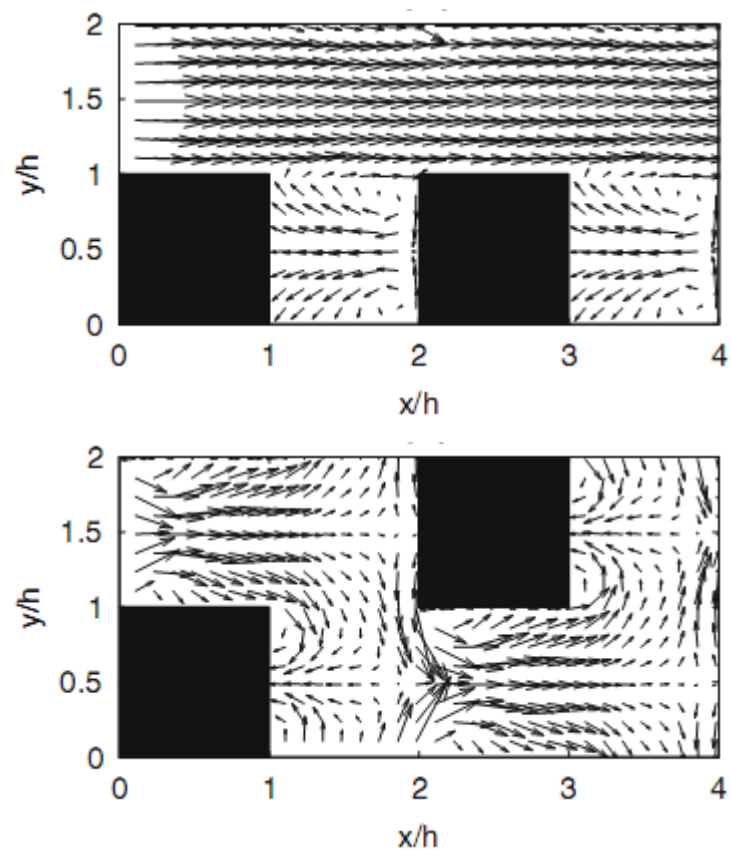


図 3.4-10 DNS による $\lambda_p=25\%$ 、高さ $0.25h$ での風速のベクトル図
(上：整形、下：千鳥) [6]

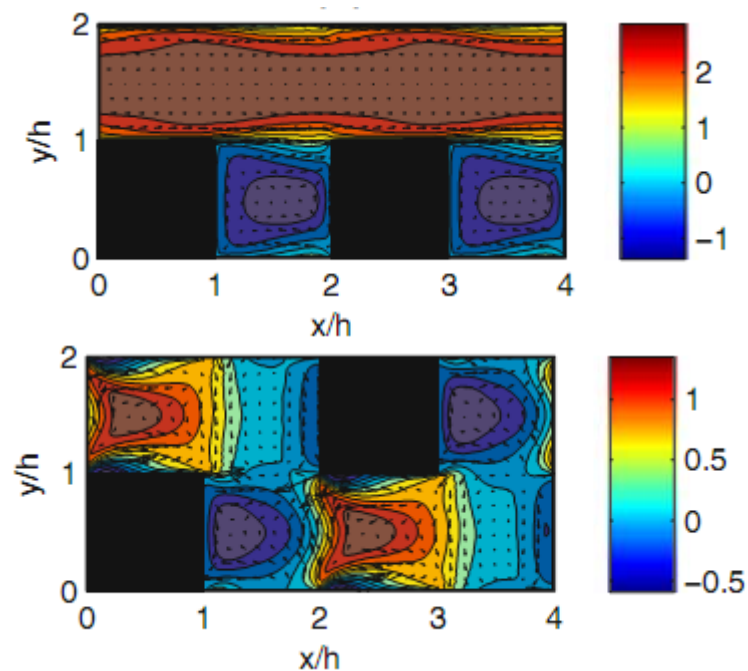


図 3.4-11 DNS による $\lambda_p=25\%$ 、高さ $0.25h$ での風速 u 分布 (上：整形、下：千鳥) [6]

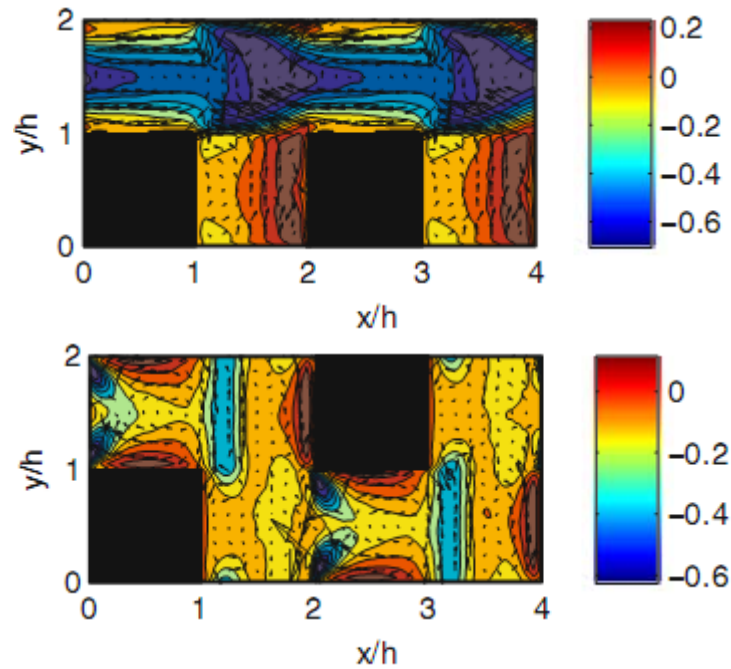


図 3.4-12 DNS による $\lambda_p=25\%$ 、高さ $0.25h$ でのレイノルズ応力 $\overline{u'w'}$ 分布
(上：整形、下：千鳥) [6]

整形配列では同 λ_f でも H/W が千鳥配列よりも大きく、流れ場が千鳥配列よりも低 λ_f で isolated flow から wake interference や flow skimming flow になるため、全体として C_E が千鳥配列よりも小さくなる。しかし図 3.4-7 からわかるとおり、これだけでは配列による違いを説明することはできない。中 λ_f 領域では λ_f の増加とともに模型後方の蒸発量が少ない recirculation region が蒸発面に占める割合が増える。しかしそれと同時に図 3.4-12 の街路部模型斜め後方 ($1 < x/h < 2$, $1 < y/h < 2$) の乱れの大きな部分、つまり蒸発の多い部分の数も増える。これら 2 つの作用が打ち消しあい、整形配列では中 λ_f 領域で C_E が横ばいになると考えられる。

一方、千鳥配列では中 λ_f 領域で C_E がピークを持っている。孟、老川^[4]によると、図 3.4-8 では wake interference flow の模式図は示されていないが、wake interference flow では図 3.4-8 (左) における上流側の模型の lee eddy と斜め後方の frontal eddy (例えば M1 の lee eddy と M3 の frontal eddy) が相互干渉することで、isolated flow の場合に比べて lee eddy が小さくなり frontal eddy がかなり大きくなるという。このことは図 3.4-11 の千鳥配列で模型後方の弱風域が整形配列のそれよりも小さくなっていることから確認できる。これにより、上空の乾燥空気は同建蔽率の整形配列よりも床面付近まで入り込みやすくなっており、さらには相互干渉により大きくなった frontal eddy が床面付近の空気と上空の乾燥空気との交換を促進する方向に働くため、バルク係数は λ_f に伴ってさらに大きくなると考えられる (図 3.4-13)。そして λ_f がさらに大きくなり流れ場が wake interference flow から skimming flow へと変化していくと、前述したように上空の乾燥空気が徐々に床面へ供給されなくなり C_E は急激に減少する。

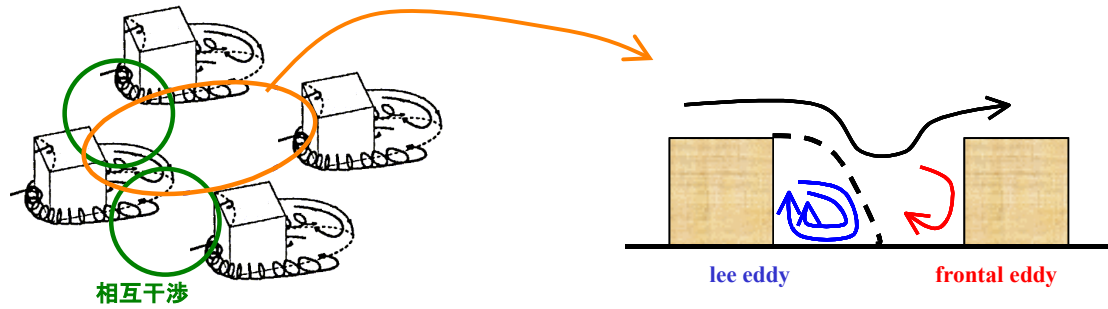


図 3.4-13 lee eddy と frontal eddy の相互干渉

3.4.2 非一様高さ粗度模型群のバルクスカラー輸送係数

平均模型高さ $1.5H$ の非一様高さ模型配列のバルク係数測定結果を図 3.4-14 に示す。模型高さ標準偏差が同じ (N1.5-n、N1.5-s、S1.5-n、S1.5-s の4つ: $\sigma_H/H_{av}=0.58$) 場合測定した全ての建蔽率 λ_p で、高層模型配列によらず低層模型配列が千鳥である配列 (S1.5-n、S1.5-s) の方が、低層模型配列が整形である配列 (N1.5-n、N1.5-s) よりも C_E が大きい。これは一様高さ模型配列と同じ傾向である。このことは床面に近く、また高層模型に対して数が多く密度も高い低層模型の配列が、床面からのスカラー輸送に対して高層模型配列よりも支配的であることを示唆している。

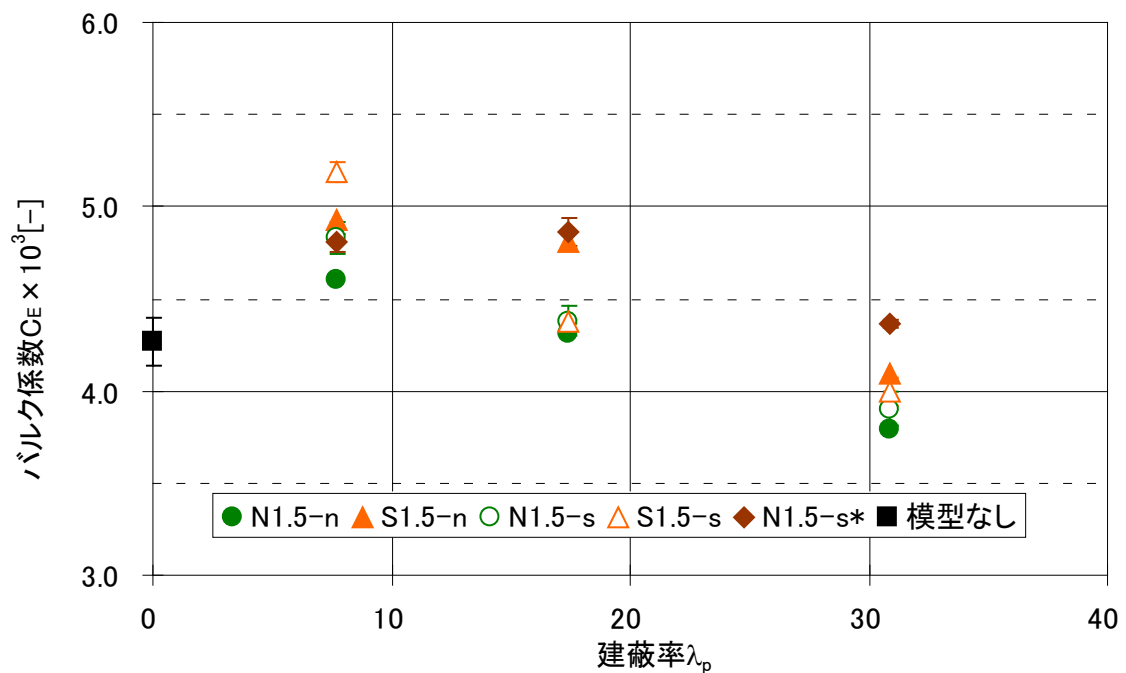

図 3.4-14 非一様高さ粗度模型群のバルク係数 C_E と建蔽率 λ_p

図 3.4-15、図 3.4-16 はそれぞれ低層模型配列が整形と千鳥で模型平均高さが 1.5 の場合の C_E と λ_p の関係を表している。いずれの場合でも $\lambda_p \leq 17.4\%$ では一様高さ配列 (N1.5 および S1.5) の C_E が非一様高さ配列のそれよりも大きい、 $30.9\% \leq \lambda_p$ ではそれが逆転して一様高さの方が小さくなっている。

そこで模型の高さの標準偏差を平均高さで無次元化した $\sigma_H/H_{av}[-]$ を横軸にとり、 λ_p ごとに比較したものが図 3.4-17 である。低層模型が整形では、 $0 < \sigma_H/H_{av} < 0.33$ 間の C_E の傾きが $7.7\% < \lambda_p < 17.4\%$ で緩やかになり、 $17.4\% < \lambda_p < 30.9\%$ ではその正負が逆転している。また、 $0.33 < \sigma_H/H_{av} < 0.58$ 間の C_E の傾きは λ_p の増加とともに負の方向に大きくなっている。千鳥でも $7.7\% < \lambda_p < 17.4\%$ で C_E の傾きが緩やかになり、 $17.4\% < \lambda_p < 30.9\%$ では傾きが負から正へと転じている。このことから λ_p が増加すると C_E のピークが高 σ_H/H_{av} 側へと推移することが推測される。

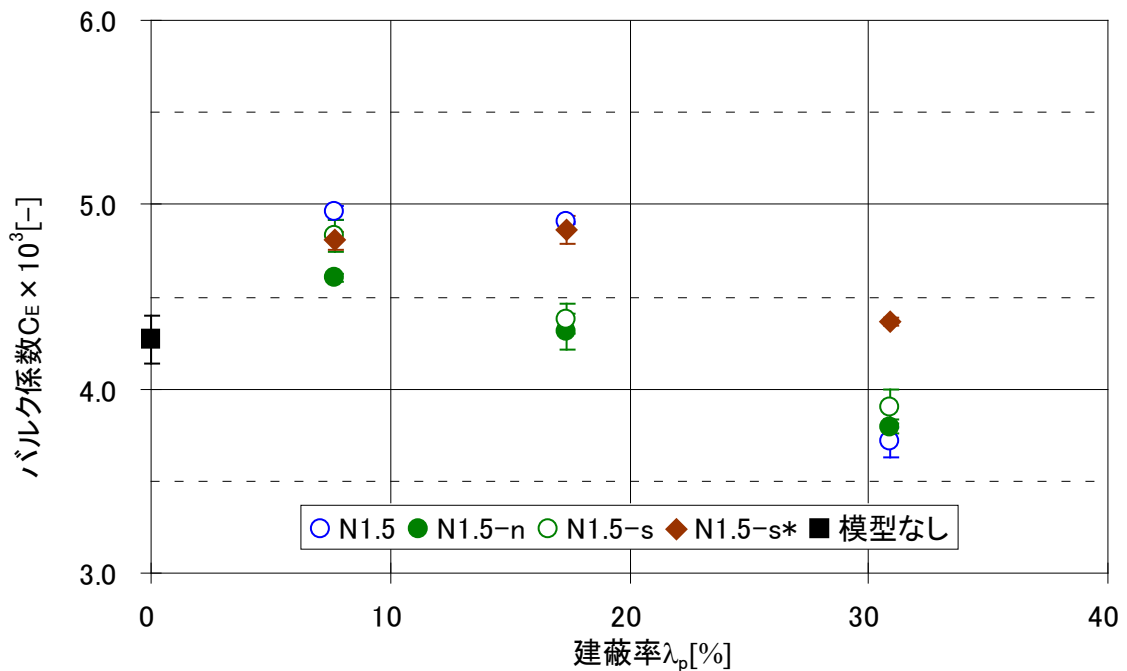


図 3.4-15 平均模型高さ 1.5H、低層模型配列が整形のバルク係数

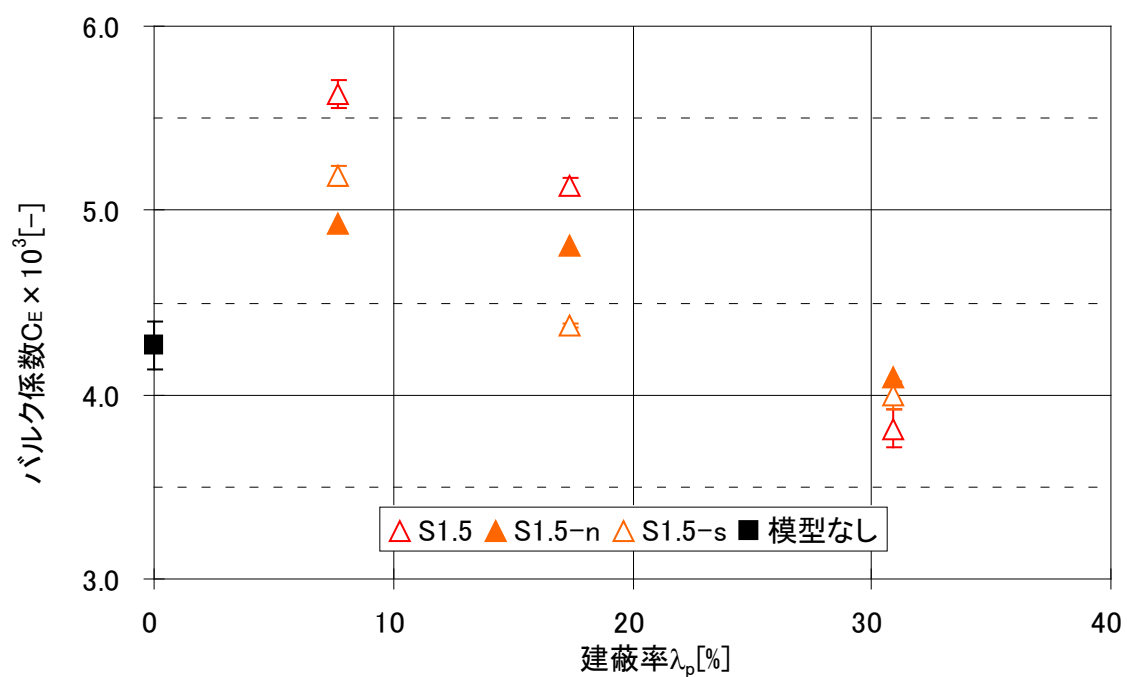


図 3.4-16 平均模型高さ 1.5H、低層模型配列が千鳥のバルク係数

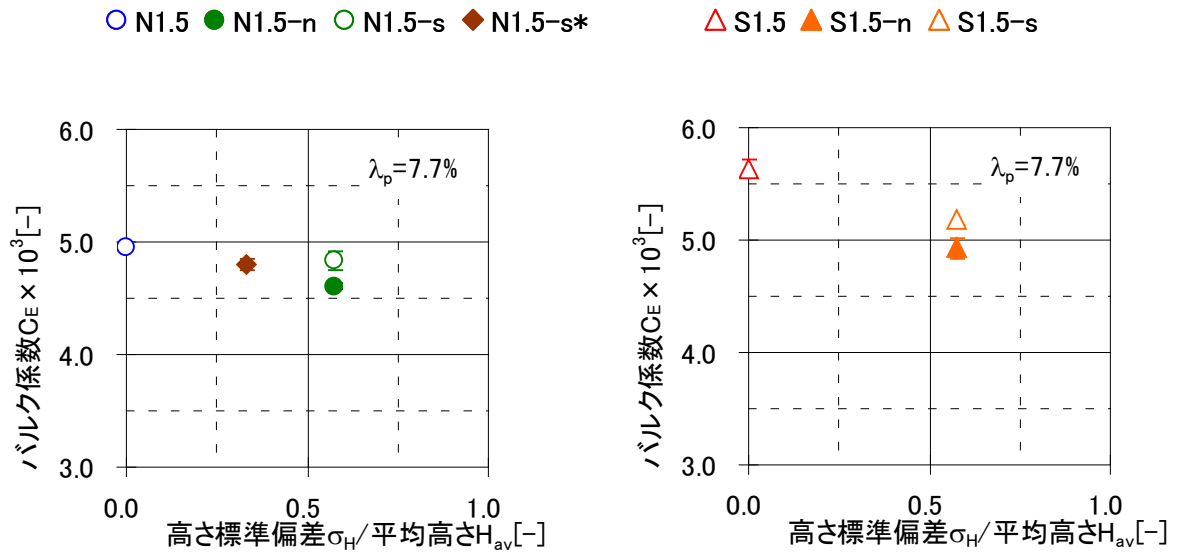


図 3.4-17 C_E と模型高さ標準偏差 σ_H / H_{av} の関係 (左: 整形配列、右: 千鳥配列)

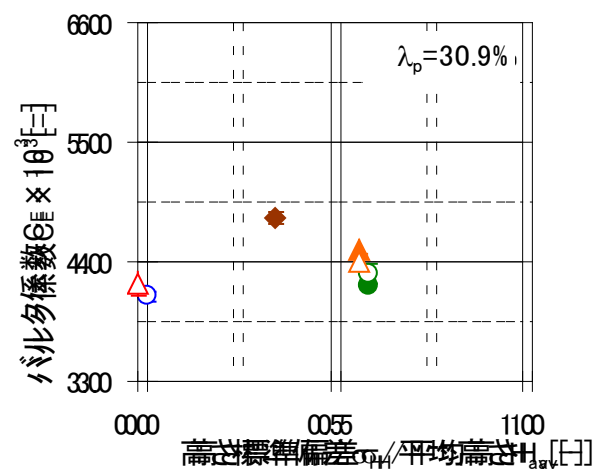
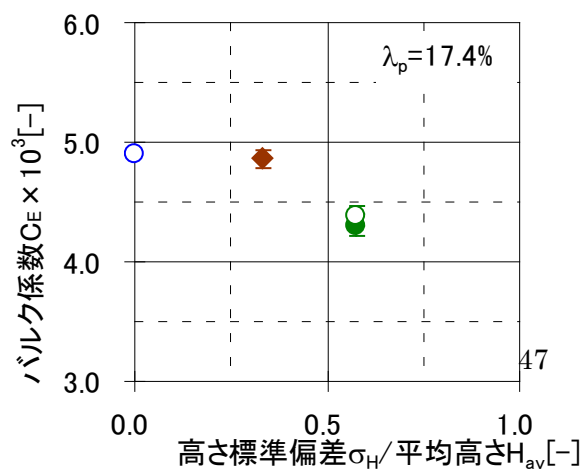
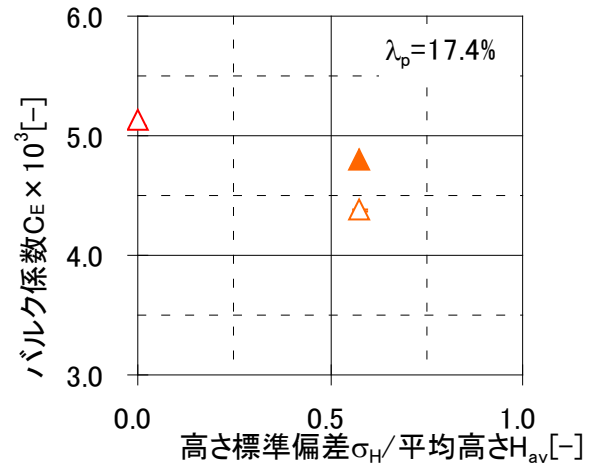


表 3.4-3 に一様・非一様高さ模型配列を比較した既往の研究の結果をまとめる。

表 3.4-3 非一様高さ模型配列での既往研究のまとめ

研究者	手法	模型配列 (対応する配列名)	λ_p [%]	結果
成田 ^[7]	濾紙法	整形 (N1)	25	スカラー輸送：非一様<一様 表面近傍風速：非一様<一様
Pascheke ^[8]	ナフタレン法	千鳥 (S1)	25	スカラー輸送：非一様<一様 表面近傍風速：非一様<一様
成田 ^[3]	塩分法定	整形 (N1)	36	スカラー輸送：一様<非一様
義江 ^[9]	温度分布測	整形 (対応する配列なし)	63	表面近傍風速：一様<非一様

低から中 λ_p の時、つまり一様高さ模型配列の流れ場が **isolated flow** から **wake interference flow** であるときは、境界層の厚い非一様高さ模型配列の方が一様高さ模型配列よりも流速が小さく、床面からの輸送は一様模型高さ配列>非一様模型高さ配列となる。成田（濾紙法）^[7]、Pascheke ら^[8]の模型は本研究と幾何形状が相似であり、また立方体で $\lambda_p=\lambda_f=25\%$ である。よって流れ場は **wake interference flow** であると推測される。

一方高 λ_p の時、つまり一様高さ模型配列の流れ場が **skimming flow** であるとき、非一様高さ模型配列は同 λ_p でも模型高さにより流れ場は **skimming flow** にはならない。萩島ら^[10]は高さの異なる直方体模型群の周辺気流を測定している。萩島ら^[10]の配列は模型が直方体であるものの、底面が正方形で平面配列や高さ分布は本研究の N1.5・s*と同様である。これによると、図 3.4-28 のように、高建蔽率でも流れは **skimming flow** にならず、キャニオン内に風が流れ込む。このため **skimming flow** である一様高さ模型配列よりも非一様高さ模型配列の方が床面近傍の風速が大きくなり、輸送も大きくなる。成田（塩分法）^[3]の模型配列本研究と幾何形状が相似で建蔽率は $\lambda_p=36\%$ と本研究より大きく、義江ら^[9]の模型は本研究のそれとは形状が異なるため単純に比較はできないが λ_p が非常に高いため、一様高さ模型配列の流れ場はそれぞれ **skimming flow** になっていると推測できる。

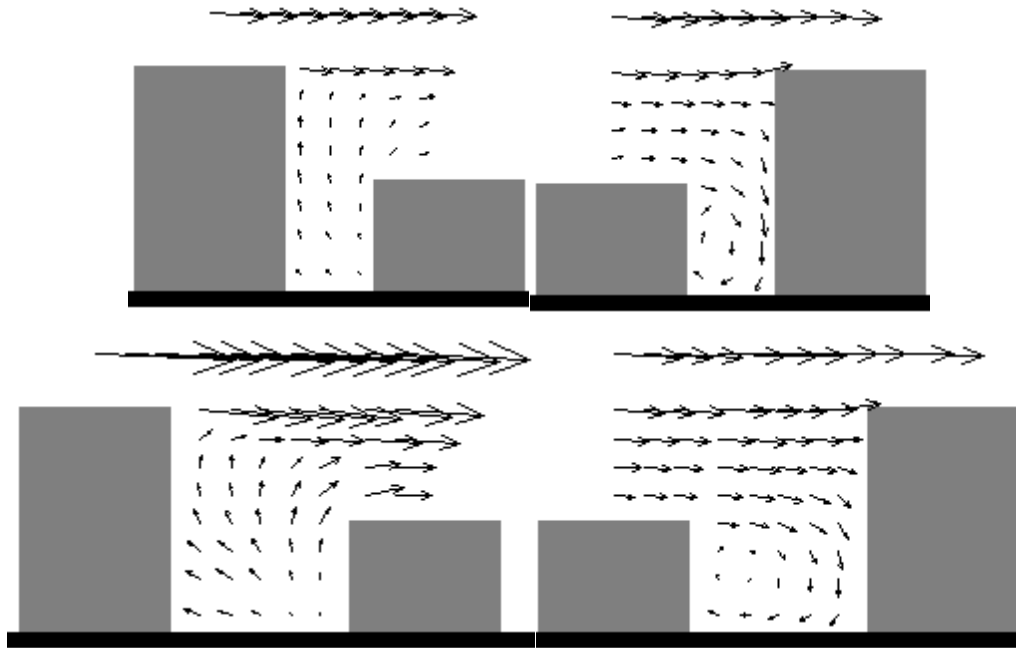


図 3.4-18 非一様高さ模型の流れ場の模式図（上： $\lambda_p=39.1\%$ 、下： $\lambda_p=20.7\%$ ）^[10]

以上のように一様高さ模型での流れ場が isolated flow から wake interference flow である低建蔽率では表面近傍風速の大きな一様高さ模型の方が C_E は大きくなる。建蔽率が増加し一様高さ模型での流れ場が skimming flow になる建蔽率では、同建蔽率でも skimming flow にならない非一様高さ模型の方が流速が大きく、加えて乱流拡散が大きいため C_E は非一様高さ模型の方が大きくなる。

3.4.3 抗力係数との比較

3.4.1、3.4.2 では粗度模型群の幾何特性変化による流れ場の変化から考察を行った。その流れ場の性状を表現するパラメータのひとつにバルク運動量輸送係数（以下、抗力係数） C_d がある。

地表面の乱流境界層の発達、地表面での摩擦または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成り立つ。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い、その抗力の大きさは粗度要素によって変化する^[11]。この地表面と上空とのせん断応力を τ_w [N/m²]、 ρ_{air} [kg/m³] を湿り空気密度、 U_{ref} [m/s] を参照風速とすると抗力係数 C_d は以下の式で表される。

$$C_d = \frac{2\tau_w}{\rho_{air}(U_{ref})^2} \quad \text{式 3.4-1}$$

本項では本研究と同一の模型配列条件で永山^[5]が測定した C_d と本研究のバルク係数 C_E [-]の比較を行う。図 3.4-29 に結果を示す。

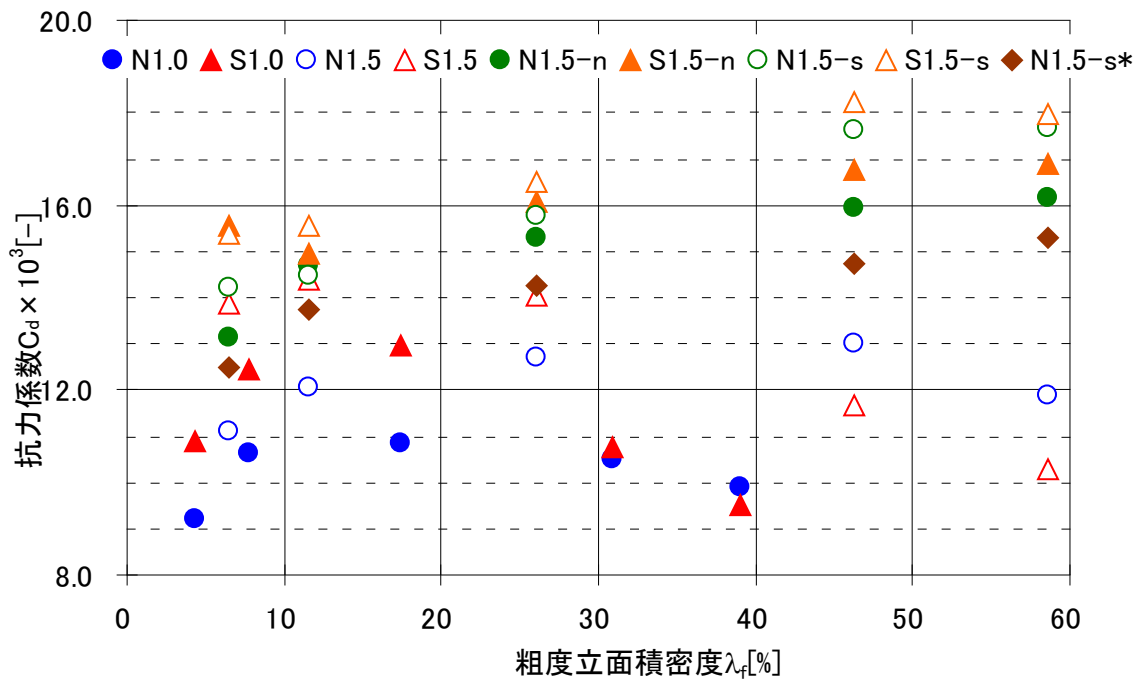


図 3.4-19 同一粗度模型配列条件における抗力係数 C_d の測定結果^[5]

まず λ_f で比較すると、いずれの配列でも λ_f が増加すると C_d も増加しピークをとった後、緩やかに減少している。また、一様模型高さ配列では全体的に整形よりも千鳥の方が大きな値を取っている。減少の傾向や高 λ_f で整形と千鳥の大小関係が逆転するなど細部は異なっているものの、これらは概ね C_E の傾向と一致している。

一様模型高さ配列で模型高さが 1H から 1.5H になった場合、 C_E は λ_f で比較すると整形と千鳥でそれぞれ 1 本の線上に乗っていたが、 C_d は全体に値が大きくなりピークが高 λ_f 側に移動している。また、非一様模型高さ配列で模型高さ標準偏差が同じ (N1.5-n、N1.5-s、S1.5-n、S1.5-s の 4 つ : $\sigma_H/H_{av}=0.58$) 場合、低層模型が同配列であれば、高層模型が整形よりも千鳥の方が C_d は大きい。

高さ分布の有無で比較すると、 C_E は低建蔽率では一様模型高さ配列の方が値が大きく、高建蔽率ではそれが逆転していた。一方 C_d は測定範囲で高さの標準偏差が大きいほど大きく、測定範囲よりも高建蔽率でも逆転しないと推測される。

これらのことは高層模型が C_d に与える影響が低層模型よりも支配的であることを示唆しており、 C_E とは異なる傾向である。この違いは、風上・風下壁面の **form drag** と床・屋根・側壁面の **friction drag** からなり前者が支配的と考えられる C_d と、床面ごく近傍における拡散現象を表す C_E が本質的に異なっていることに起因すると考えられる。

- [1] Ian N. HARMAN・Janet F. BARLOW・Stephen E. BELCHER : Scalar fluxes from urban street canyons. part II MODEL, Meteorol, 113, pp.387-409, 2004
- [2] Oke, T.R. : 1988, Boundary Layer Climates, Methuen, New York, pp435
- [3] 成田健一:市街地における地表面蒸発量の評価に関する基礎的研究,広島大学大学院博士論文,1987
- [4] 孟 岩・老川 進:建物群内における流れと拡散に関する実験的研究 その1. 流れ場の測定, 大気環境学会誌, 1997, 第32号(2), pp136-147
- [5] 永山浩二:複雑形状都市におけるバルク運動量輸送係数と気流性状に関する風洞模型実験,九州大学大学院修士論文,2007
- [6] Omduth Coceal・T. Glyn Thomas・Stephen E. Belcher : Spatial variability of flow statistics within regular building arrays, Boundary-Layer Meteorol, 125, pp.537-552, 2007
- [7] 成田健一:建物高さが不均一な街区の交換速度,日本建築学会大会学術講演梗概集(D-2),pp.749-750,2007
- [8] Frauke Pascheke・Janet F. Barlow・Alan Robins : Wind-tunnel of Dispersion from a Scalar Area Source in Urban-Like Roughness, Boundary-Layer Meteorol, 126, pp.103-124, 2008
- [9] 義江龍一郎・田中英之・白澤多一・小林剛:香港の高密集市街地における風通しに関する研究 その1 建蔽率と建物高さのバリエーション等が歩行者レベルの風速・気温分布に及ぼす影響,日本建築学会大会学術講演梗概集(D-2),pp.745-756,2007
- [10] 萩島理・片山忠久・谷本潤・森竹千景・江副紀子:高さの異なる直方体模型群の周辺気流特性に関する風洞実験,日本建築学会計画系論文集,538,pp.15-22,2000
- [11] 丸山 敬:立方体粗度ブロックの配列形状の違いによる抗力の変化について,日本風工学会誌, 1991, 第49号, pp15-24

第4章 濾紙法による床面交換係数分布の把握

3章では塩分法を用いて床面全体の蒸発量を測定した。塩分法は床面の形状にかかわらず床面全体の蒸発量を測定するのには適しているが、面内の蒸発量分布を測定するのには不向きである。本章では分割した床面それぞれからの蒸発量測定を濾紙法で行い、その結果について考察を行う。

4.1 濾紙法の原理

濾紙法は水を含んだ濾紙の蒸発による重量変化から蒸発量を求める手法である。蒸発量 $E[\text{kg}]$ は蒸発前後の重量で次のように表される。

$$E = (F_B + W_B) - (F_A + W_A) \quad \text{式 0-1}$$

ここで、 $W[\text{kg}]$ ：水の質量、 $F[\text{kg}]$ ：濾紙の質量、添え字 B、A はそれぞれ蒸発前、蒸発後を表す。物質移動係数 k およびバルクスカラー輸送係数 C_E の算出に関しては塩分法と同じである。

4.2 測定手順および条件

測定手順は以下の通りである。まず風洞内に設置してある模型を配置した濾紙表面全体を水で濡らし、飽和状態にする。続いて測定部濾紙試験体を取り外し秤量する。秤量後、濾紙にデジタル温度センサを挿入し、再び風洞内に設置する。次に風洞内に風を吹かせこれを曝露する。この間、露点、濾紙温度、代表高さ気温、代表高さ風速を同時に測定する。曝露後温度センサを取り除いた試験体を再び秤量する。秤量中の蒸発による計測誤差を小さくするため、濾紙試験体は蓋のできるガラス製シャーレの中に入れ秤量し、その都度シャーレ自体の重量も秤量してそれを差し引いている。

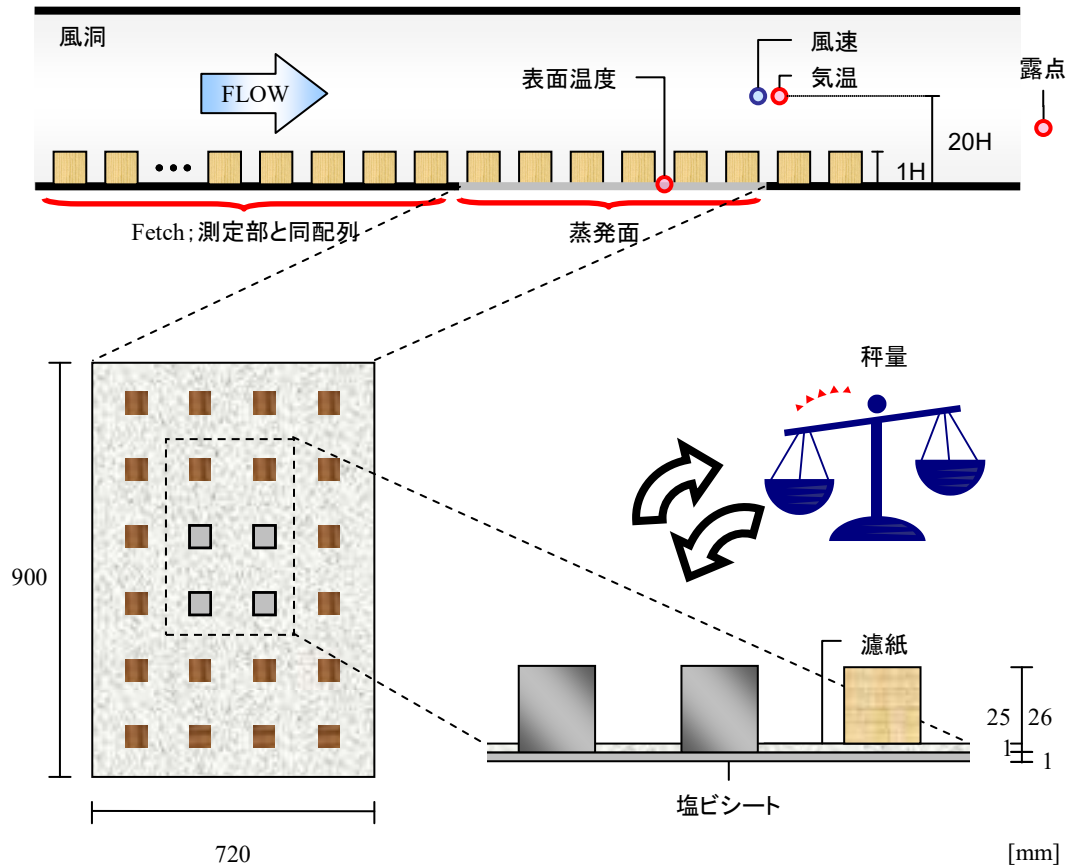


図 0-1 濾紙法測定部概要

蒸発面の x 方向の長さは塩分法と同じ 72cm とし、その中央に試験体を設置した。各測定条件を表 0-1 に示す。なお、風速は約 2m/s である。測定した配列は N1 および S1 の $\lambda_p=17.4\%$ である。分割した床面の名称は図 0-2 のように、模型の後を gap、スパン方向の模型間を street、残りの部分を intersection とした。N1、S1 両配列で gap 同士、street 同士、intersection 同士の面積はそれぞれ等しい。

表 0-1 濾紙法測定条件

項目	測定時間・回数	測定機器	測定位置
曝露時間	1 時間	-	-
濾紙重量		分析用電子天秤	-
露点	1 秒間隔で 1 時間	露点計	風洞外
水面温度		デジタル温度センサ	濾紙表面
代表高さ気温			測定部下流端中央高さ 20H
代表高さ風速		ピトー管・微差圧計	

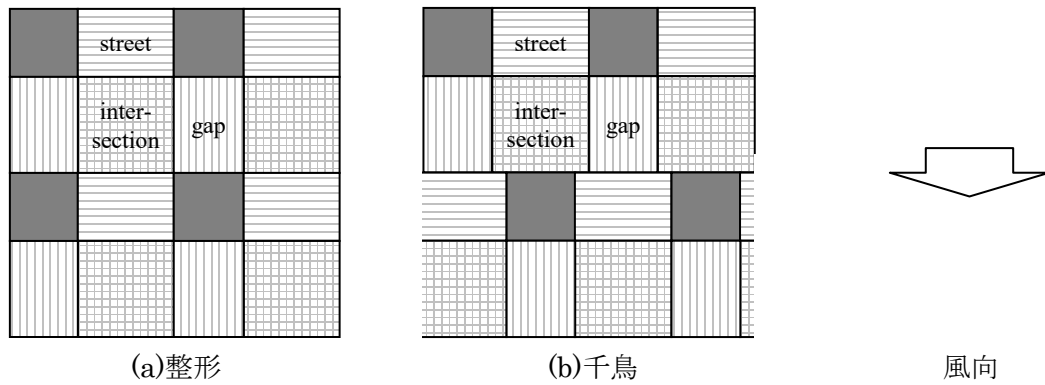


図 0-2 床面名称の定義



図 0-3 濾紙法測定の様子

4.3 結果

測定結果を図 0-1 に示す。濾紙法による平均値は、N1、S1 とともに塩分法による蒸発面全体の平均値とよい一致を示していることがわかる。なお、平均値およびその誤差は面積重み平均している。

N1 では gap のバルク係数がやや小さく、street と intersection がほぼ同程度である。整形配列の gap 部分は模型前面の吹きおろし流による蒸発の多い部分と、模型後方の蒸発の少ない recirculation region の両方の部分を含む。しかしながらそのバルク係数が床面全体の平均値よりも小さいということは、吹き降ろしによる蒸発促進効果よりも、recirculation region の蒸発抑制効果の方が大きいことを示している。3 章で考察した流れ場ではこの N1 $\lambda_p=17.4\%$ は wake interference flow に該当する。Oke^[1]の示した流れ場のパターンによれば、この配列は $H/W=0.71$ であり、wake interference flow から skimming flow に相当する。この状態は gap 部分の床面全体が recirculation region に含まれるため蒸発量が少ないと考えられ、この濾紙法の結果と一致する。

street および intersection は街路部分であるが、そのバルク係数は塩分法から得られた滑面のそれ（約 0.0043[-]）よりも大きな値となっている。このことは整形配列の街路部分の流れが滑面流とは異なり、粗度による乱れの生成で拡散が促進されたと推測される。この

街路部分からの蒸発により、recirculation region の蒸発量減少にもかかわらず $10\% < \lambda_p < 30\%$ の範囲でバルク係数がほぼ横ばいになったものと考えられる（3章）。

S1 では street、intersection、gap の順でバルク係数が大きい。Cceal^[2]は立方体間の流れを DNS（Direct Numerical simulation）で求めている。それによると、高さ $0.25H$ の風速が street、intersection、gap の順で大きい。本研究では $\lambda_p=17.4\%$ 、Cceal^[2]らは $\lambda_p=25\%$ と建蔽率の違いはあるものの、バルク係数と風速の傾向は非常に良く一致している。

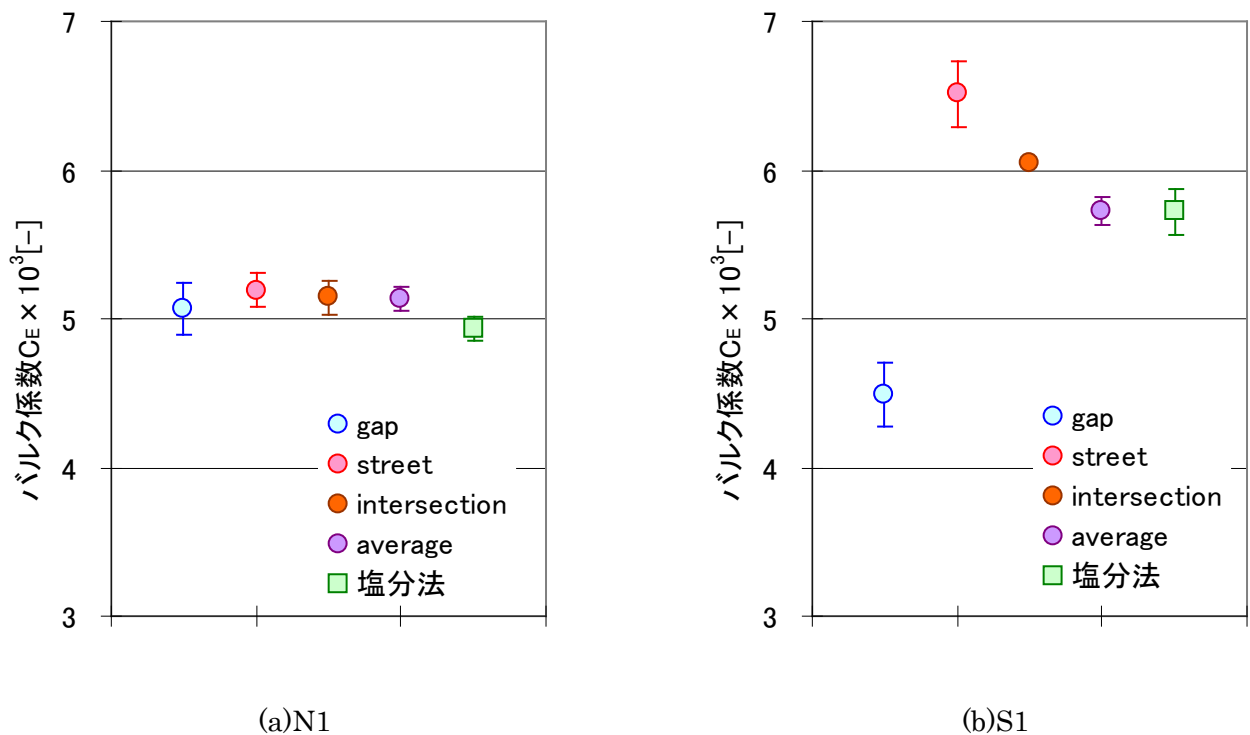


図 0-1 濾紙法測定結果

4章では濾紙法を用いて分割された床面の蒸発量を測定した。しかしこれもまたその面内の平均値であり、蒸発の詳細な分布を知ることは出来ない。本章では赤外線サーモグラフィ^[1]を用いて濾紙表面の温度分布を測定することでさらに詳細な蒸発量分布を考察する。

4.4 赤外線サーモグラフィーによる表面温度分布

4.4.1 観測の原理

模型がある蒸発面に風を吹かせると模型の影響によって、場所ごとに蒸発量に差が生じる。水が蒸発すると相変化により潜熱が奪われ温度が低下する。それに従い蒸発が多いところはより潜熱を奪われ温度低下し、面内に温度分布が生じる。この温度分布を赤外線サーモグラフィーを用いて撮影するというのがこの実験の原理である。

なお図 04-2 に示すように気温や露点に著しい変化がない場合、濾紙の温度は気温や露点の上昇に影響されずに低下し、その後熱平衡状態になるとほぼ一定となる。

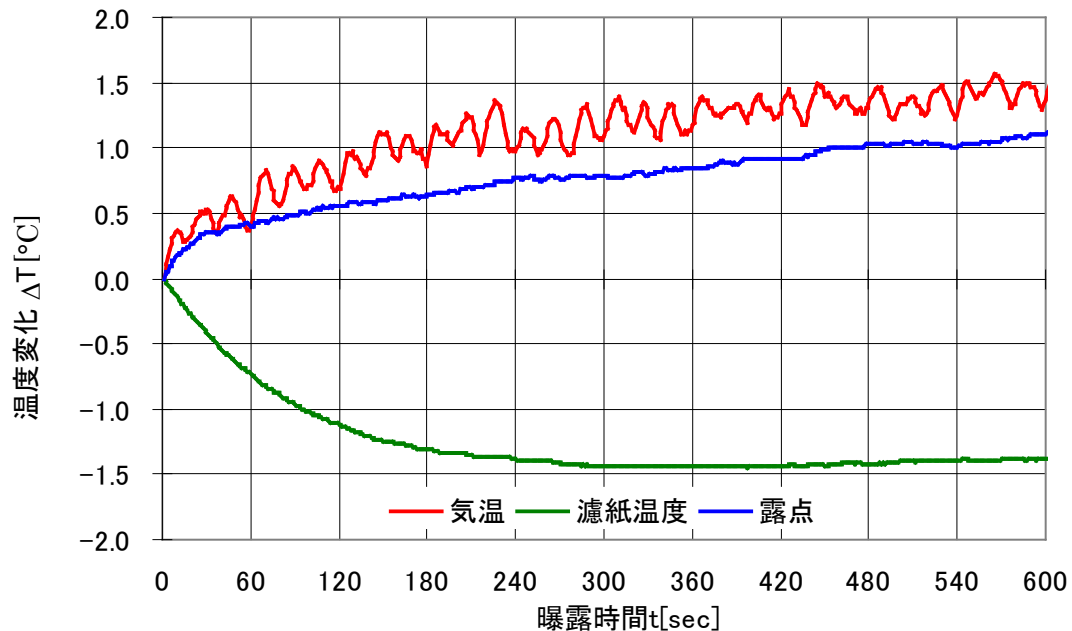


図 04-2 蒸発面の温度低下の様子

4.4.2 観測概要および条件

測定した配列は N1 および S1 の $\lambda_p=17.4\%$ である。この2つはバルク係数の差が大きく、配列による流れ場の違いが顕著に現れている。また濾紙法および水蒸気濃度分布の測定を行った配列でもある。

濾紙法で使用した模型付きの濾紙を濡らし、図 04-2 のように真上から撮影した。濾紙にはデジタル温度センサを挿入し、撮影結果の校正に用いた。また、高さ 20H で気温（デジタル温度センサ）および風速（ピトー管）を、風洞外で雰囲気露点（露点計）を測定した。風速はおよそ 2m/s である。



図 04-2 濾紙表面温度分布撮影状況

4.4.3 結果

撮影結果の中から、撮影時の気温および絶対湿度の条件が近かったものを比較する。ただしこの結果は曝露開始から十分に時間経過し定常状態に達しているとともに、濾紙が乾く前の状態である。撮影時の条件を表 04-1 に示す。

表 04-1 撮影時の条件

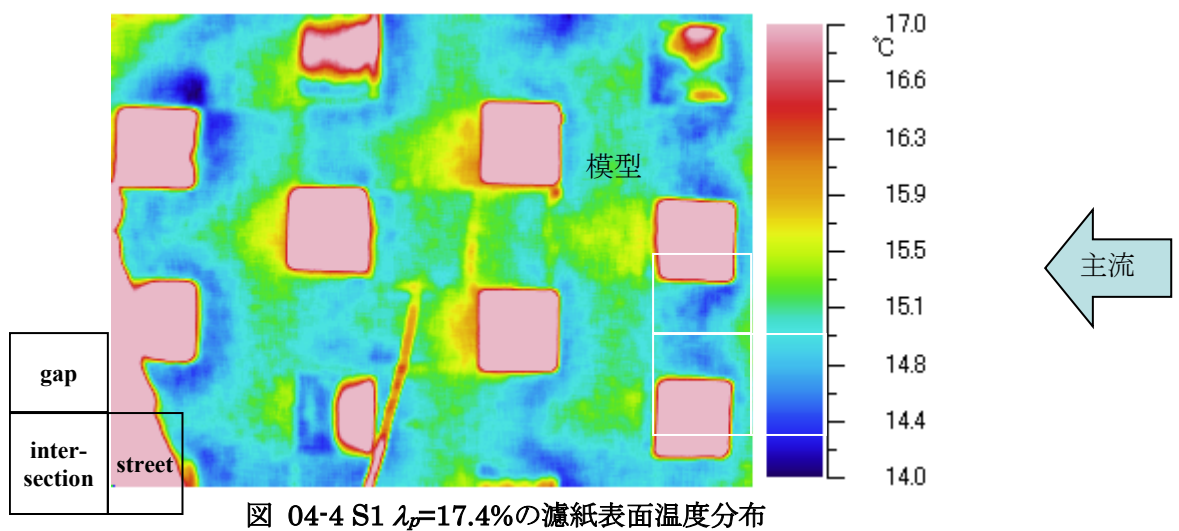
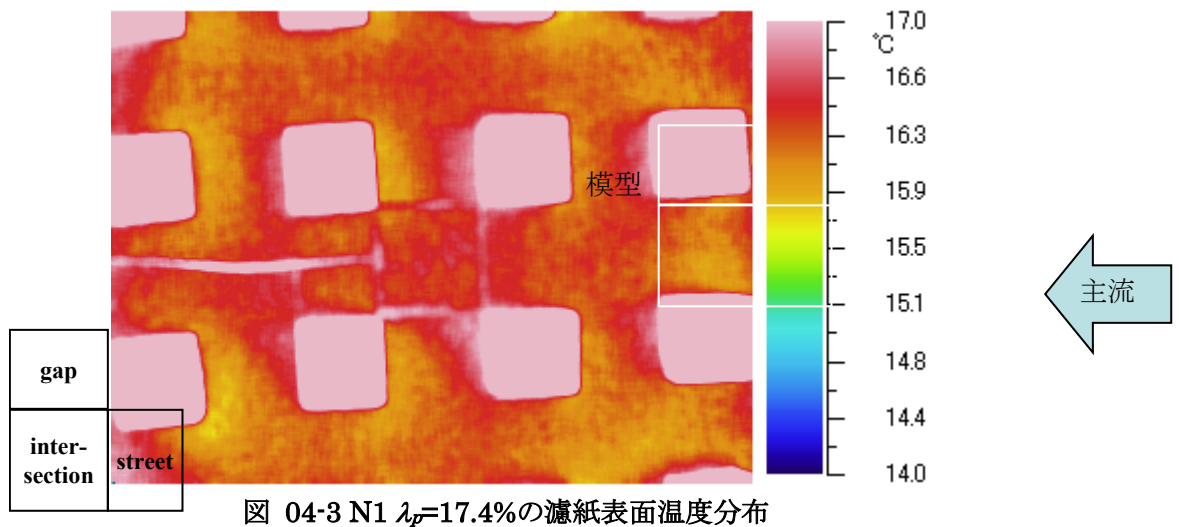
	N1	S1
気温[°C]	21.84	22.02
絶対湿度 $\times 10^3$ [kg/kg']	6.475	6.470

図 04-3、図 04-4 はそれぞれ N1、S1 の濾紙表面温度分布の測定結果である。なお、図中央から外側へ向かって伸びる高温の線はデジタル温度センサである。まず、N1 と S1 の比較を行う。全体に N1 のほうが S1 よりも温度が高く、蒸発が少ないことがわかる。これは塩分法によるバルク係数の測定結果とも一致する。

また両配列ともに模型前方に低温部、後方に高温部を持つ。しかしその形状は配列によって異なる。模型前方低温部は、S1 では模型側面まで回り込み y 方向に隣接する街区のそれと繋がってしまっているのに対し、N1 では側面への回り込みが少ない代わりに上流側へ広がっており街区ごとに単独である。低温部分は模型に衝突した流れを表していると考えられる。Coceal ら²⁾の DNS の結果と比較すると、千鳥では模型に衝突した流れは模型側面に流れ、整形では逆流となっており、この結果と一致する。模型後方高温部は、S1 では形状が三角形で x 方向に比較的長く伸びているのに対し、N1 では形状が x 方向に潰れており大きさが gap 部分の半分程度しかない。これは recirculation region を表していると考えられる。N1 の場合はこの高温部分だけでなく gap 全体が recirculation region であるため模型前方の低温部分も S1 よりも高温となったと考ええると、これまでの考察と矛盾せず自然である。

次に濾紙法との比較を行う。N1 では gap、street、intersection での温度の差が少ない。このことは図 04-5 に示す床面全体の温度ヒストグラムで分布の幅が狭いことから確認できる。これは濾紙法によるバルク係数 C_E の測定結果で C_E の差が gap、street、intersection でほとんどなかったことと一致する。

一方 S1 では場所による温度の差が大きく、それは図 04-6 に示すヒストグラムで分布の幅が広くピーク値が小さいことから確認できる。温度は低い方から、つまり蒸発の多いほうから順に street、intersection、gap となっており、これもまた濾紙法で測定した C_E の大小関係と一致する。



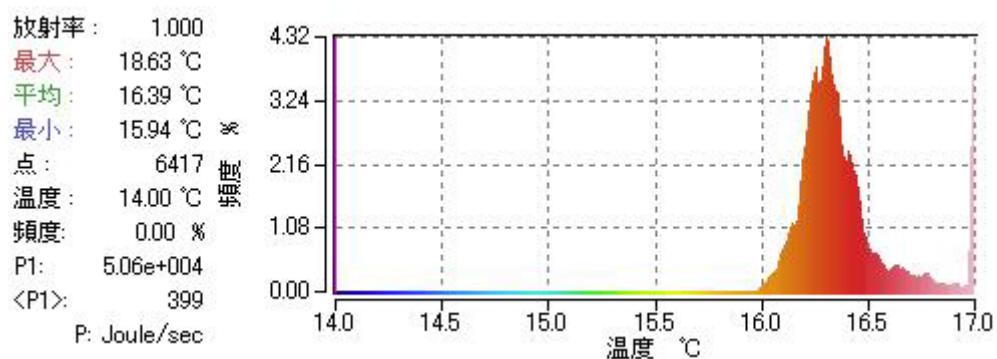


図 04-5 N1 $\lambda_p=17.4\%$ の床面温度ヒストグラム

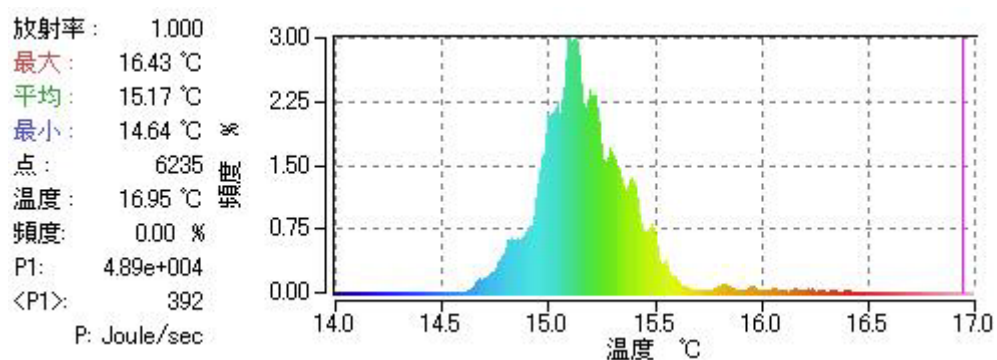


図 04-6 S1 $\lambda_p=17.4\%$ の床面温度ヒストグラム

以上のように本章では赤外線サーモグラフィによる蒸発面の温度分布を測定した。その結果から、これまでのバルク係数の挙動に関する考察は妥当であると判断した。

第5章 濾紙法による交換係数の全表面分布の検討

5.1 実験方法

5.1.1 風洞概要

本実験では、株式会社飛鳥建設技術研究所の大型風洞(密閉回流方境界層風洞)を使用した。風路の全長は約 90m あり、測定洞の風上から 17.8m の位置には直径 2m のターンテーブルを備えている。ターンテーブルは電動式で、角度の微調整が容易である。

- ・風路全長 ・ ・ ・ 90m
- ・測定部断面 ・ ・ ・ 2.6m(横)×2.0m(高さ)
- ・測定部長さ ・ ・ ・ 17.8m
- ・ターンテーブル ・ ・ ・ 直径 2 m
- ・縮流比 ・ ・ ・ 1 : 4
- ・送風機 ・ ・ ・ 直径 3m出力 110kw
 最大回転数 1450rpm
- ・最大風速 ・ ・ ・ 30m/s(無負荷)
- ・乱れの強さ ・ ・ ・ 0.4%



写真 5.1 送風機

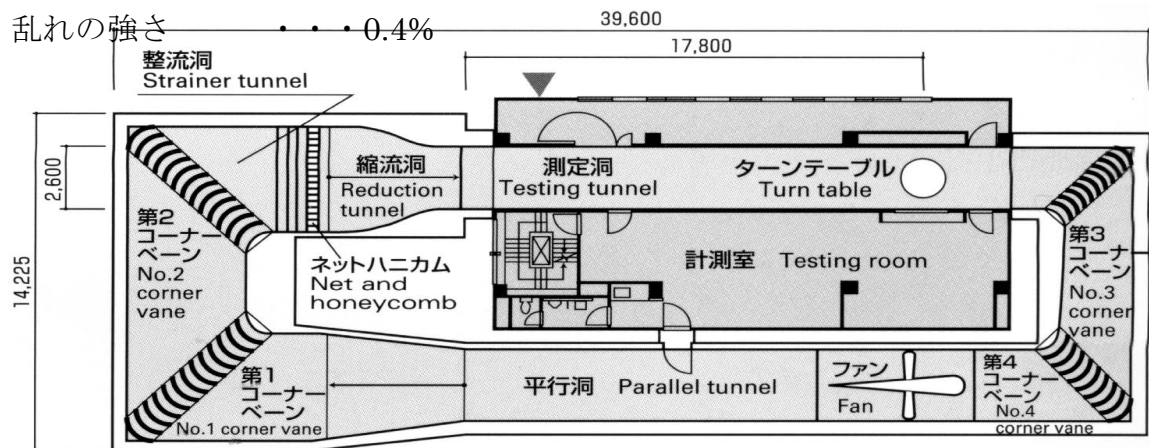


図 5.1 風洞平面図



写真 5.2 スパイヤー

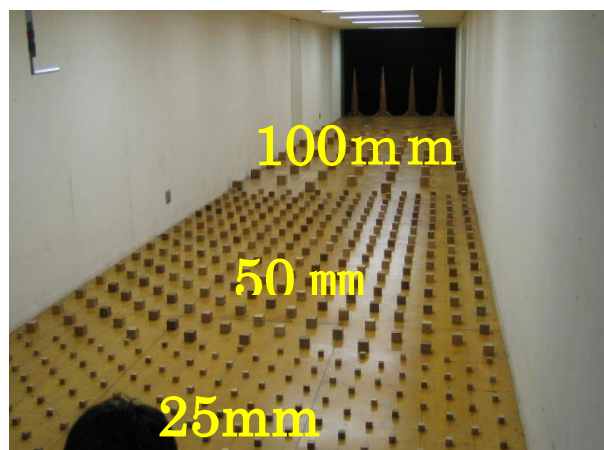


写真 5.3 ラフネス

5.1.2 測定装置

(a)蒸発量測定

● 電子天秤

濾紙面の蒸発量測定には、風防のサイドドア付きの天秤を使用し、精度 10^{-4} g まで測定できる。秤量中は試料を密閉容器に入れ、フタを空けないようにし、その間の水分蒸発を防ぐ。

- ・ エー・アンド・デイ社製 GR - 200 分析用電子天秤
- ・ 秤量 210 g
- ・ 最小表示 0.1mg

周辺環境に対して、自動校正を行なう。



写真 5.4 電子天秤

(b)試料表面温度測定

● サーミスタ温度センサ

濾紙面の温度測定には、サーミスタ温度計を厚さ 1mm の濾紙面に挿入させ、温度センサをデジタルレコードに接続し測定。測定間隔は 6 秒で収録。

- ・ 温度計 …… 素子変換式サーミスタセンサ ϕ 1mm
- ・ 接続計器 …… D642 (同時に 8 点測定可能)
- ・ 温度測定範囲 …… - 39.52~130.13 度
- ・ 絶対値誤差 …… $\pm 0.005^{\circ}\text{C}$
- ・ 分解能 …… 0.01°C

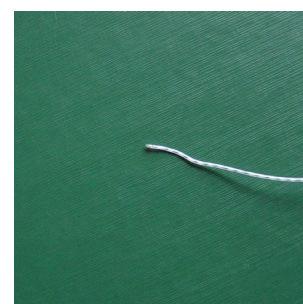


写真 5.5 サーミスタセンサ

● 1/100 高精度サーミスタ温度計本体 D642 [TECHNOL SEVEN]

PC に接続し、測定データを集録することが可能で、サンプリング間隔を 6 秒とし、表示器やプリンタに出力、表計算ソフトに読み込みが可能。最高 8 点まで接続が可能。

表 5.1

測定点数	2点(標準)(オプションにて8点まで拡張可能)	
入力	サーミスタ	(ROM互換)-20~+130 $^{\circ}\text{C}$
	確度	$\pm 0.02^{\circ}\text{C}$
	分解能	1/100 $^{\circ}\text{C}$
	直流電圧	$\pm 20\text{mV} \sim \pm 50\text{V}$



写真 5.6 D642

(c) 温湿度測定

● デジタル温湿度計

温湿度測定には、ターンテーブル中央から風上 3000mm のところに電子温湿度計を設置した。デジタルレコーダに接続し測定間隔は 1 秒で収録した。

温湿度計 神栄株式会社製 ネットワーク型温湿度計 TRH-7X

検出範囲 温度 -20～+80℃

湿度 10～95%

検出精度 温度±0.3℃

湿度±1.5%RH

検出素子 温度 サーミスタ PB3-43 型

湿度 高分子湿度センサ HPR-MQ 型

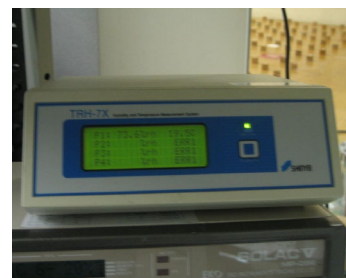


写真 5.7 TRH-7X

● SOLAC V [英弘精機株式会社]

濾紙面水分蒸発法を行うにあたり随時使用し、サンプリング間隔 1 秒とした。FD で収集したデータの解析は S5U でおこなった。



写真 5.8 SOLAC V

(d) 風速測定

● ピトー管

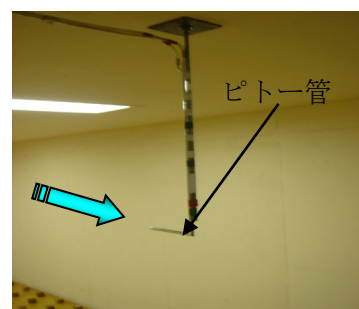
ダクト内や風洞実験など、気流の方向が一定している場合に用いられる。二重金属管の先端に全圧 (Pt) を受ける全圧孔と管側に気流方向に直角に静圧 (Ps) のみを受ける静圧孔を持っており、これに U 字マノメータを接続すると動圧 (Pv) と流速 (v) が求まる。

$$P_t = P_s + P_v \rightarrow P_v = P_t - P_s$$

$$P_v = \frac{\rho}{2} v^2$$

$$\text{よって、} v = \sqrt{\frac{2}{\rho} P_v}$$

ρ : 流体の密度 v : 流速



5.1.3 濾紙蒸発法による輸送速度の算出

(a)濾紙面水分蒸発量秤量法

本実験では、濾紙表面からの水分蒸発量を直接測定する濾紙面水分蒸発量秤量法を用いた。実験は、測定用試料の濾紙面に十分水を含ませ、濾紙面以外の水分を拭き取る。その後、試料を風洞内で3分間養生し、蒸発前の重量を電子天秤（0.1mg 精度）で秤量、再度試料を風洞内に設置し、その後30分間の水分蒸発量を測定した。移動中、秤量中は試料をガラス製の密閉容器に入れその間の蒸発を防いでいる。蒸発面の温度は、濾紙の表面直下にサーミスタ温度計を挿入し、6秒間隔で収録し、30分平均とした。蒸発量、表面温度、風洞内基準温湿度から物質輸送速度を求めた。

(b)物質輸送速度の算出方法

測定の基本原理は、水を含ませた濾紙の測定前後の重量差を測定するといういたって単純な測定である。物質輸送速度の算出式は、単位時間単位面積当たりの水分蒸発量から蒸発速度を求め、蒸発面表面の飽和絶対湿度と風洞内基準空気の絶対湿度との差で除することにより求める事ができる。

$$E = \frac{\Delta w}{A \cdot h} \quad (5.1)$$

E:蒸発量速度 [g/m²・s] Δw 水分蒸発量 [g] h:計測時間 [s] A:濾紙表面積 [m²]

$$WT = \frac{E}{(\rho_s - \rho_a)} \quad (5.2)$$

WT:物質輸送速度 [m/s] ρ_s:飽和絶対湿度 [g/m³] ρ_a:絶対湿度 [g/m³]

(c)測定方法

1. 測定用試料に給水し、試料を湿らす
2. 余分な水分を拭き取る
3. 試料を馴染ませるため風洞内に3分間養生
4. 蒸発前の秤量
5. サーミスタセンサを挿入し、測定点に設置
6. 空容器の秤量
 ～30分間測定～
7. 空空容器の秤量。
8. サーミスタセンサを抜き、蒸発後天秤量

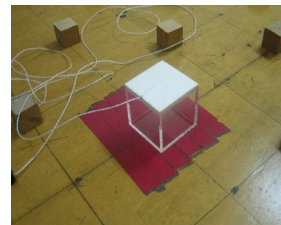


写真 5.9 測定の様子

- ・一通りの測定が完了したら、角度、測定点などを変更し再度1から測定を行う。
- ・測定の際、試料の持ち運びをするが測定以外の蒸発を防ぐため移動中は空容器に入れて持ち運ぶ。移動中の余分な蒸発は、誤差の原因となるのでしっかり閉め持ち運ぶようにする。また、測定中に濾紙に触れたりすると誤差の原因になるので注意をする。

(b)測定試料

● 測定点試料

測定に使用した試料は厚さ1mmの亚克力板(50mm×50mm×1mm)に、同じく1mmの濾紙を貼り付け、濾紙の側面を防水処理して測定面としたものを基準とし、各実験に合わせ濾紙面の形や大きさを決め、場合によっては模型に貼り付けて測定を行った。ここでは、全面試料図(5.4)と分割試料(図5.5)について簡単な説明と図を載せ、各測定に用いた試料形状については各章にて記述する。

● 風上基準点

本風洞では温湿度制御ができないので、測定日の天候による温湿度条件の変化を除するために、50mm角の立方体試料の屋根面による物質輸送速度を同時に測定した(図5.6)。風上基準点の物質輸送速度(WT_0)によって測定点の物質輸送速度(WT)を除した物質輸送速度比(WT/WT_0)を用い異なる温湿度環境下で得た測定データの比較を可能とする。

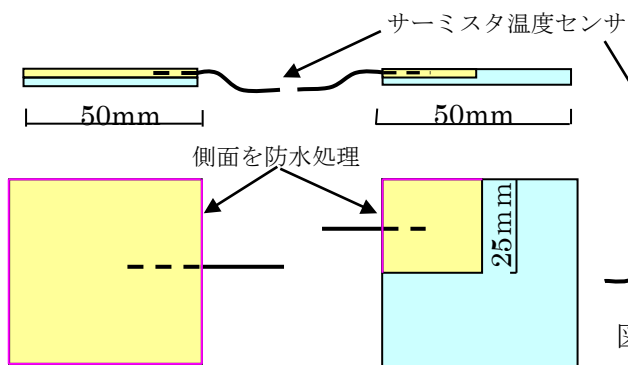


図 5.4 全面試料

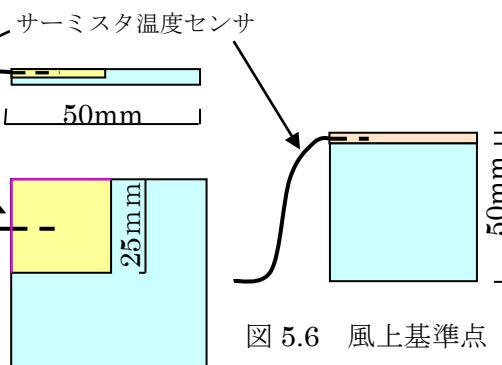


図 5.5 分割試料

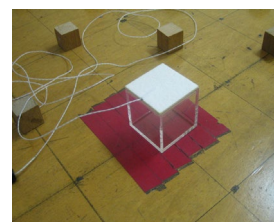


図 5.6 風上基準点 写真 5.10 風上基準

(c) 風洞内断面図(測定部)および測定器配置図

風上基準点は、ターンテーブルから1700mmのところに設置した。風上基準点より風上側に400mm、高さ1400mmにピトー管があり、さらに風上側に900mm、高さ40mmのところにデジタル温湿度計を配置した。

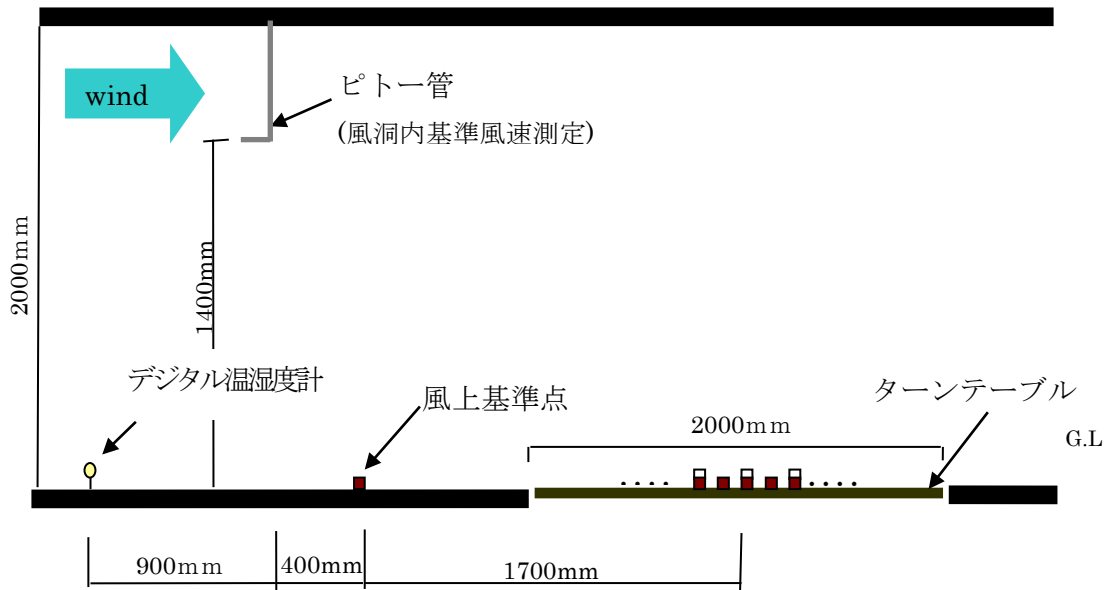


図 5.7 風上基準位置および各測定位置の配置

風速の鉛直プロファイルを図 5.8 に示す。ここでの風速測定には、定温度型熱線風速計(写真 5.11 DANTEC DYNAMICS 社製 $5\mu\text{m}$ のタングステンワイヤー製)を使用した。サンプリング周波数は 100Hz で収録した。なお、熱線風速計に必要なキャリブレーション用の基準風速は風洞内に固定設置されているピトー管の値とした。

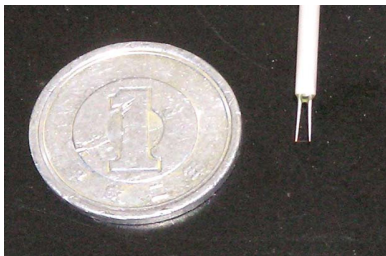


写真 5.11 熱線風速計センサ

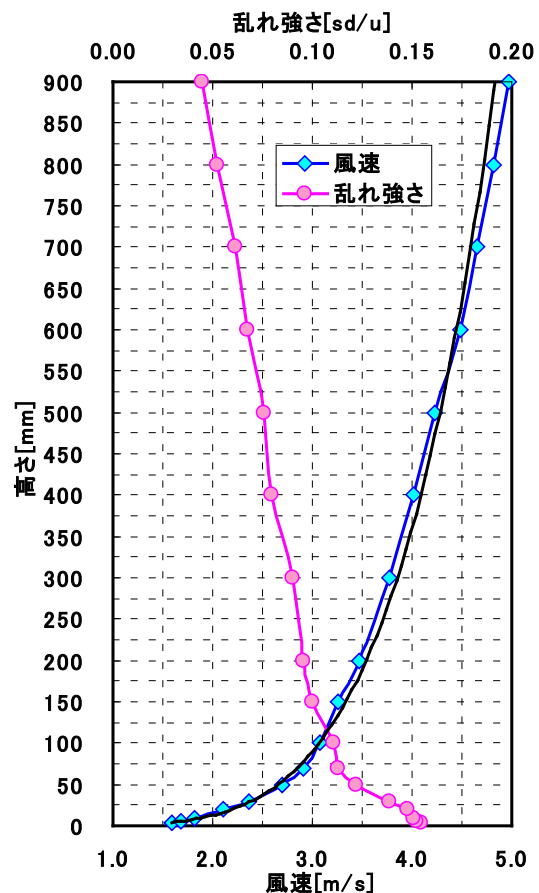


図 5.8 鉛直プロファイルと乱れ強さ

本章の目的は、濾紙面蒸発法を用いた風洞実験を用いて **TEB⁴⁾**に代表される都市キャノピーモデルにおける乱流輸送 **flux** の抵抗ネットワークのモデル化を行うことである。ここではメソスケールモデルへの適用を念頭に、キャノピー上空の **reference** 点と各構成面を直接つなぐネットワークを想定している（図5.9）。本章では、これまで報告例が少ない建物高さが不均一な街区を対象に、全表面の輸送係数について考察した。今回測定対象とした配列は、建蔽率25%の立方体均等配列（高さ **H**）をベースにし、それを **0.5H** と **1.5H** の模型で交互に置換えたものである（図5.10）。

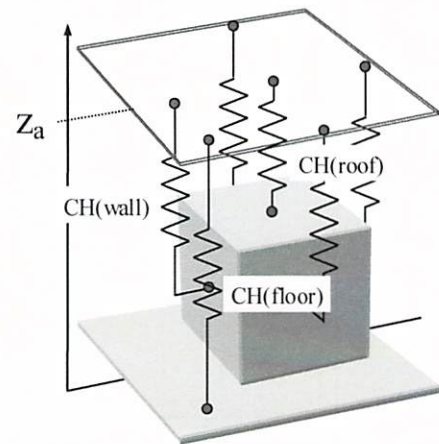


図5.9 抵抗ネットワークモデル

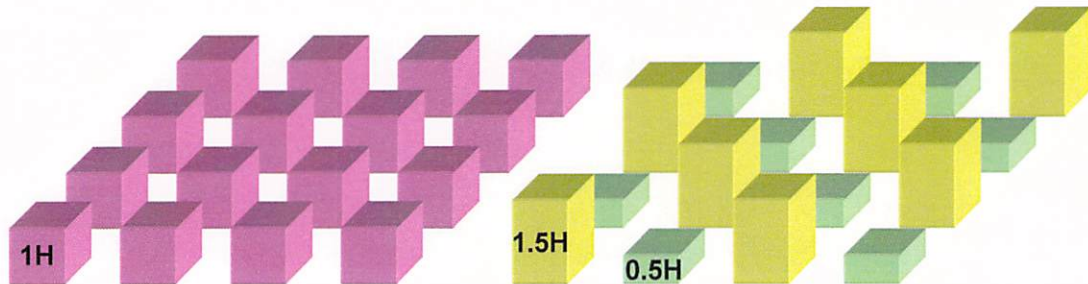


図5.10 均一高さ配列（左）と不均一高さ配列（右）

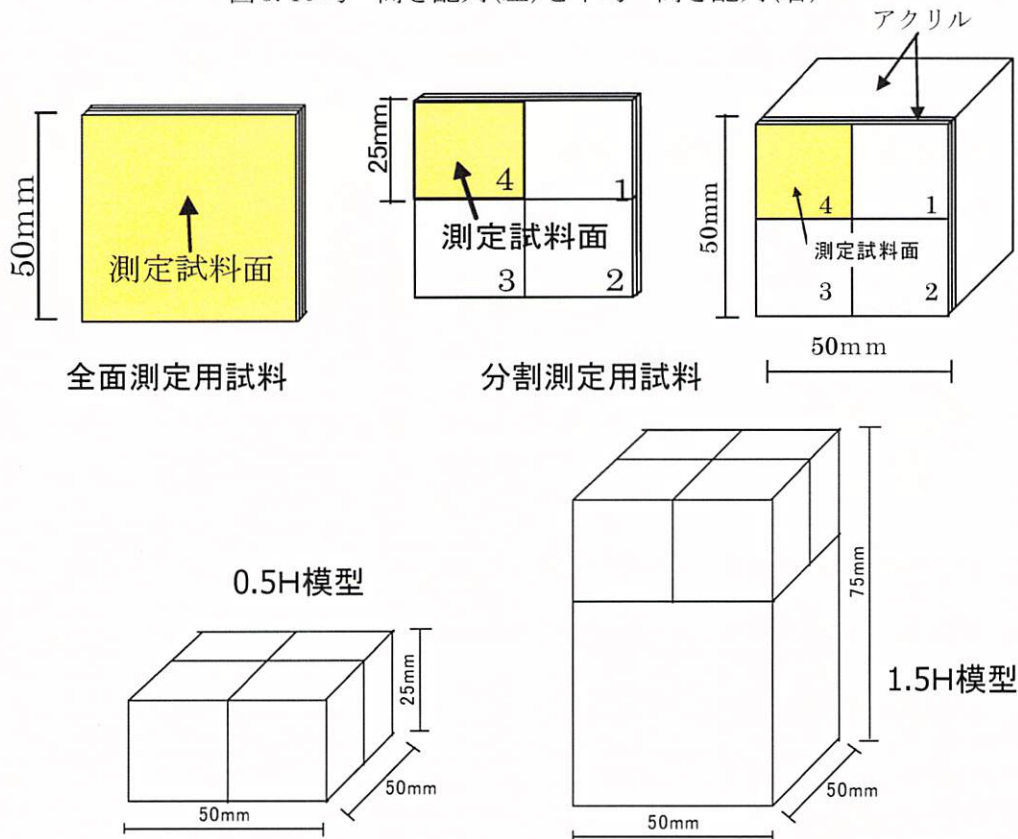


図5.11 測定対象模型

模型の配列範囲は 1820mm 四方（17×17 列）で、中心付近を測定対象とし、風向 15 度毎に測定した。



図 5.12 模型配列状況

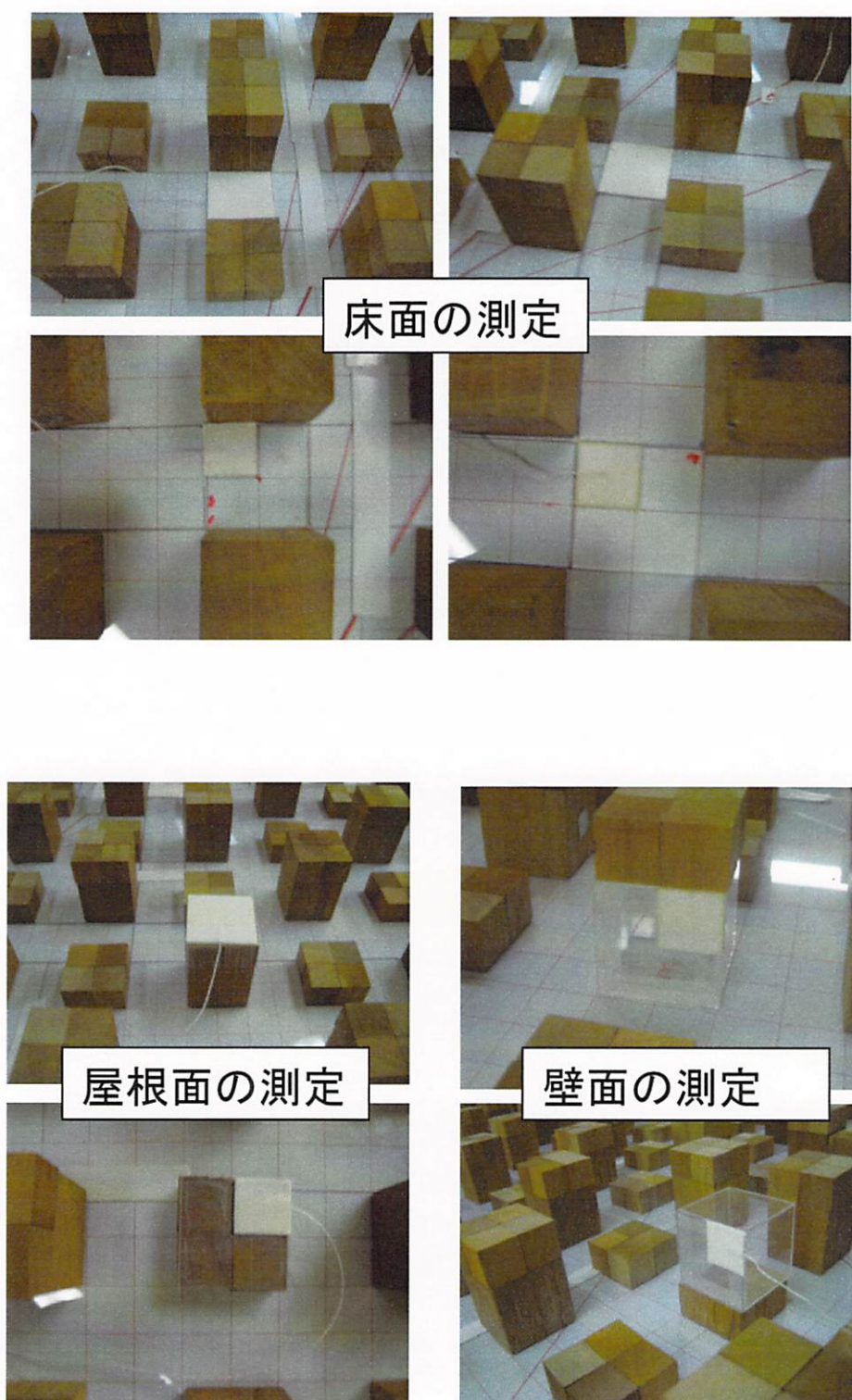


図 5.13 実験状況

図 5.14 (a) ~ (d) に、均一高さ配列における全表面の部位別の交換係数分布を示す。数値はすべて、風上基準 (1H 立方体の屋根面) の交換係数に対する比で表わしている。

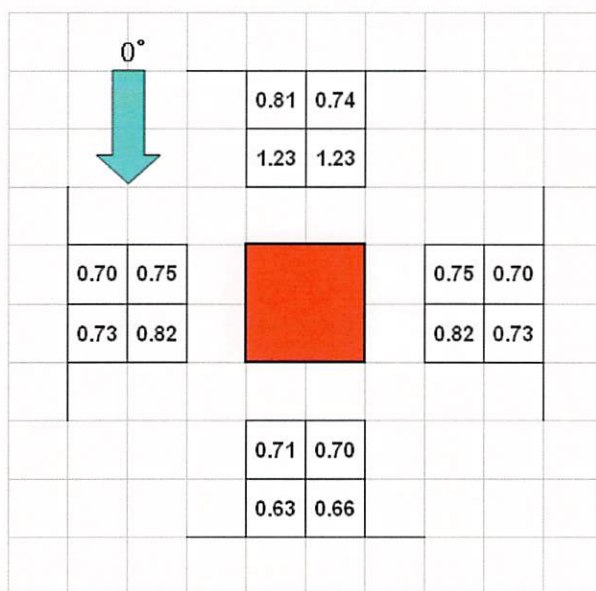
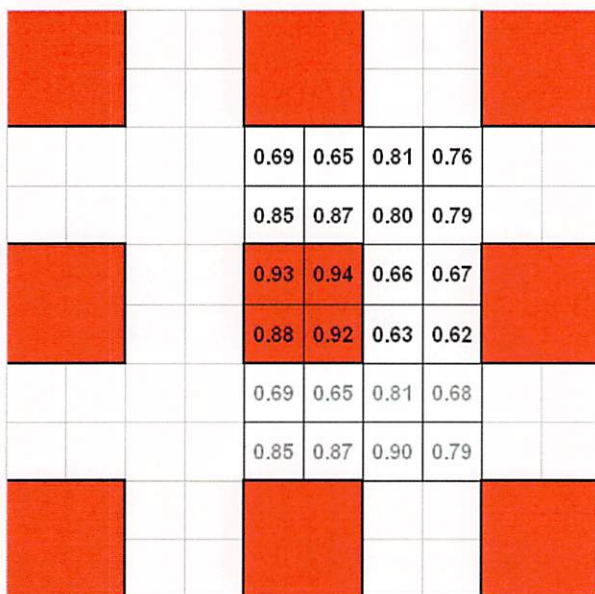


図 5.14(a) 均一高さ配列の交換係数分布 (風上基準に対する比) 風向 0 度

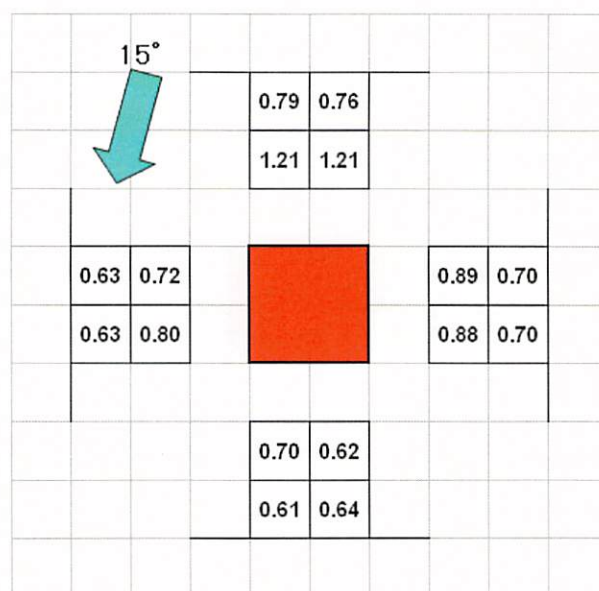
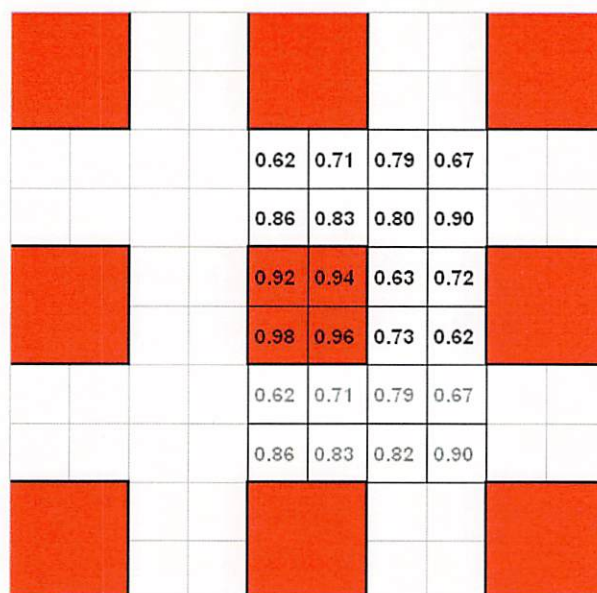


図 5. 14(b) 均一高さ配列の交換係数分布（風上基準に対する比）風向 15 度

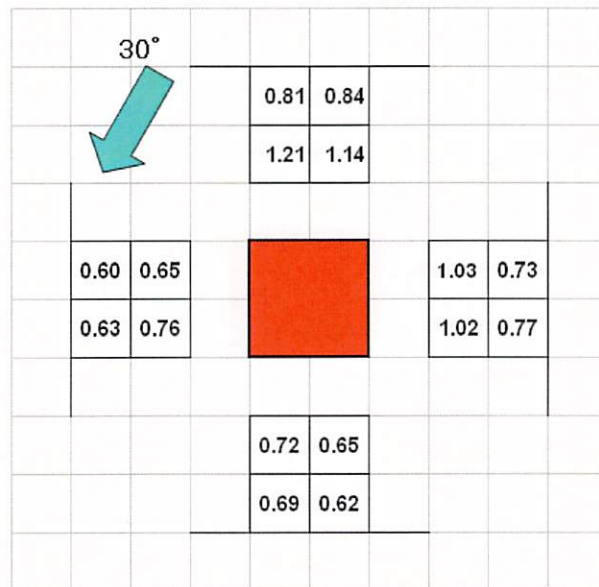
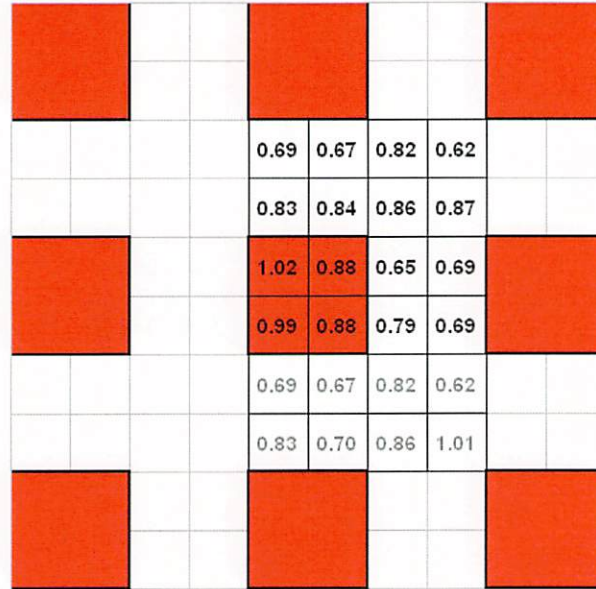


図 5. 14(c) 均一高さ配列の交換係数分布（風上基準に対する比）風向 30 度

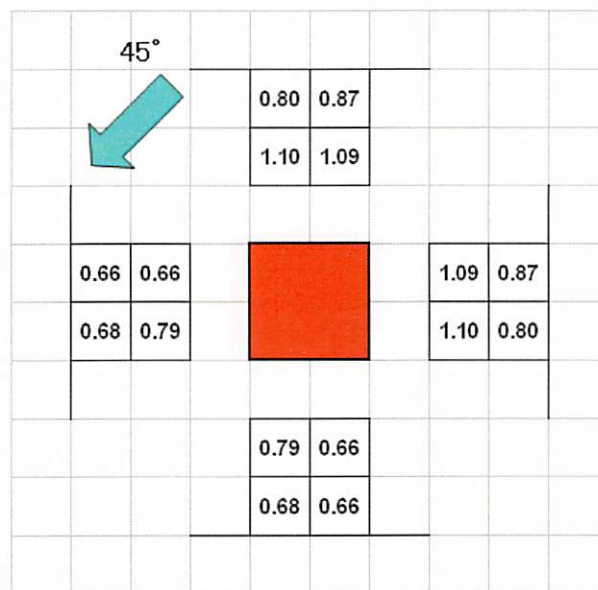
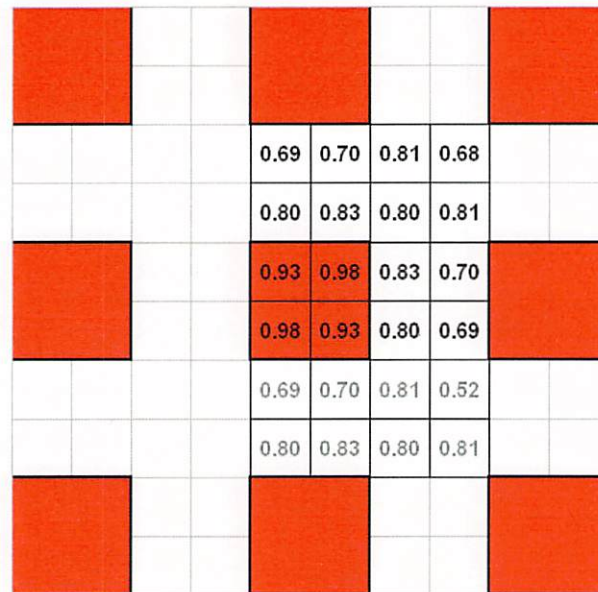


図 5. 14(d) 均一高さ配列の交換係数分布（風上基準に対する比）風向 45 度

図 5.15 (a) ～ (d) に不均一高さ配列における全表面の部位別の交換係数分布を示す。
数値はすべて、風上基準（1H 立方体の屋根面）の交換係数に対する比で表わしている。

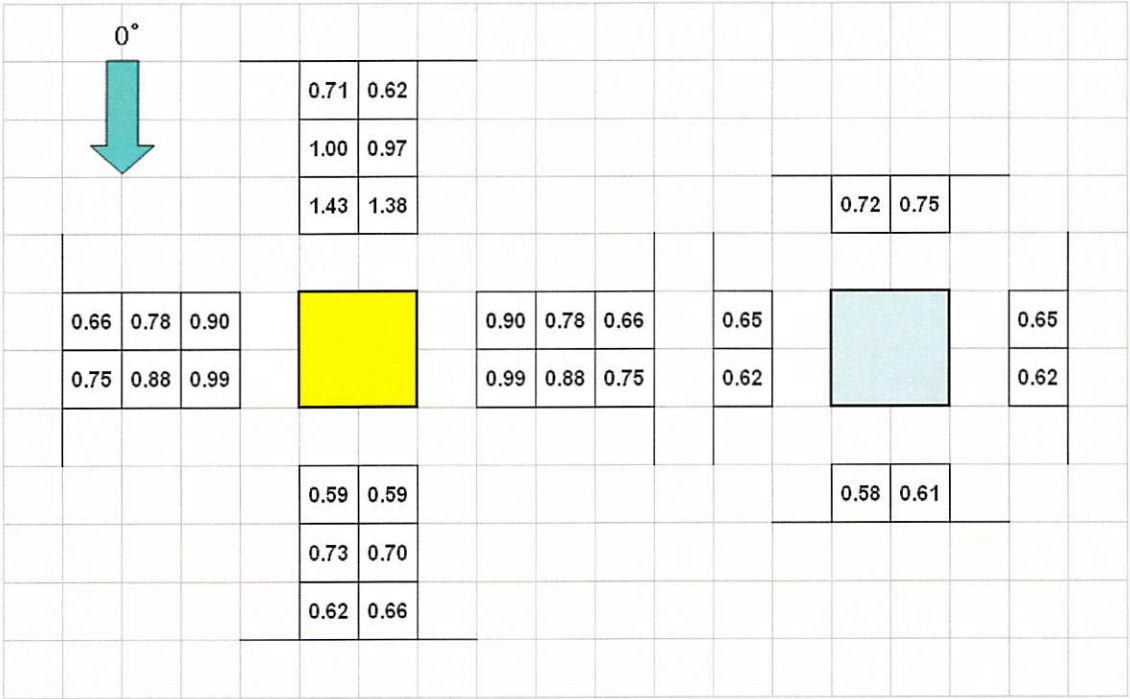
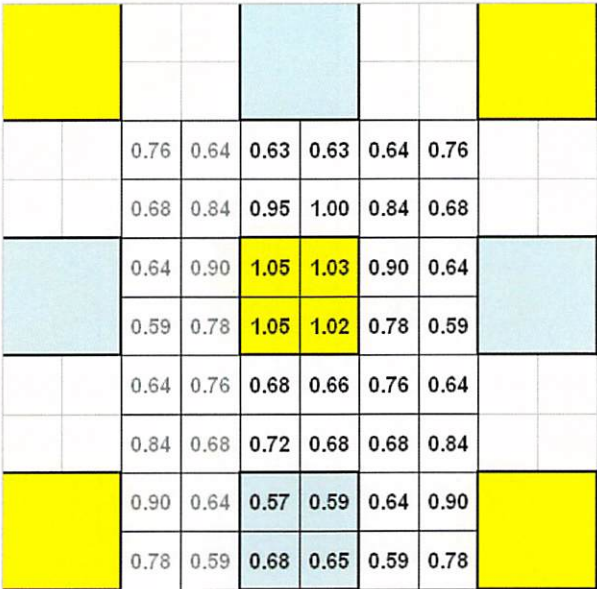


図 5.15(a) 不均一高さ配列の交換係数分布（風上基準に対する比）風向 0 度

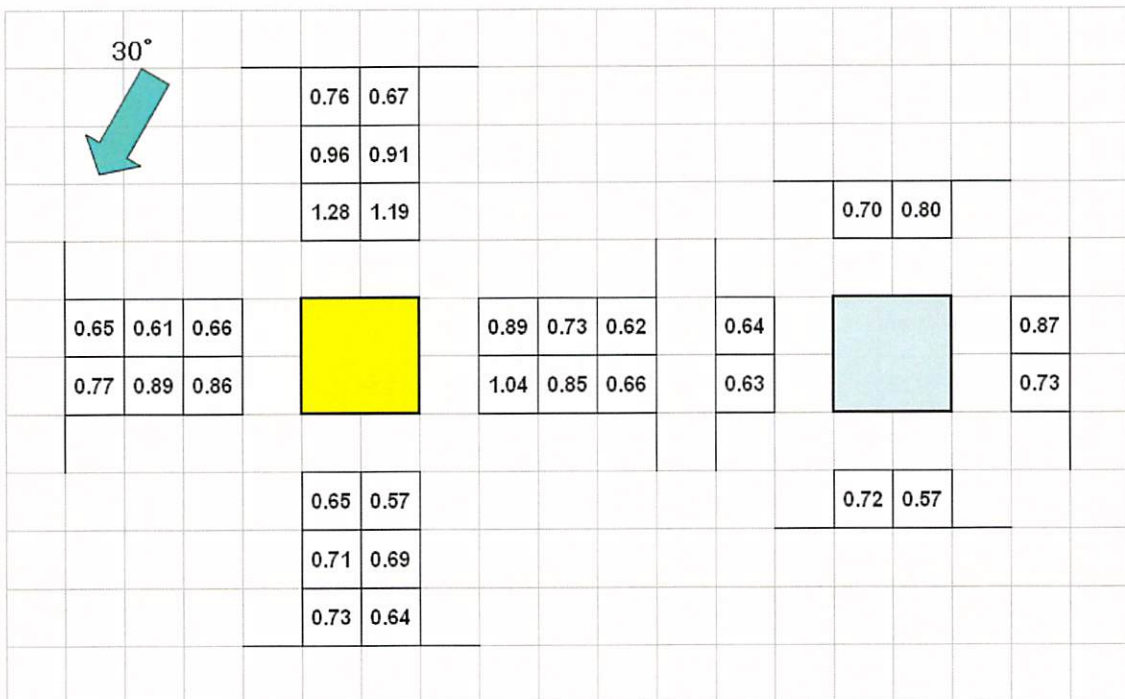
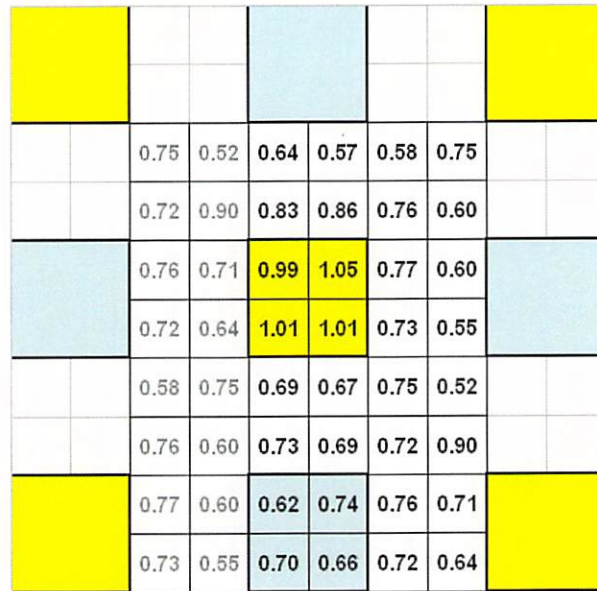


図 5.15(c) 不均一高さ配列の交換係数分布（風上基準に対する比）風向 30 度

		0.76	0.60	0.61	0.61	0.62	0.75		
		0.71	0.76	0.76	0.73	0.73	0.62		
		0.76	0.69	1.02	1.07	0.73	0.61		
		0.75	0.66	1.01	1.02	0.76	0.61		
		0.62	0.75	0.66	0.69	0.76	0.60		
		0.73	0.62	0.75	0.76	0.71	0.76		
		0.73	0.61	0.72	0.73	0.76	0.69		
		0.76	0.61	0.77	0.72	0.75	0.66		

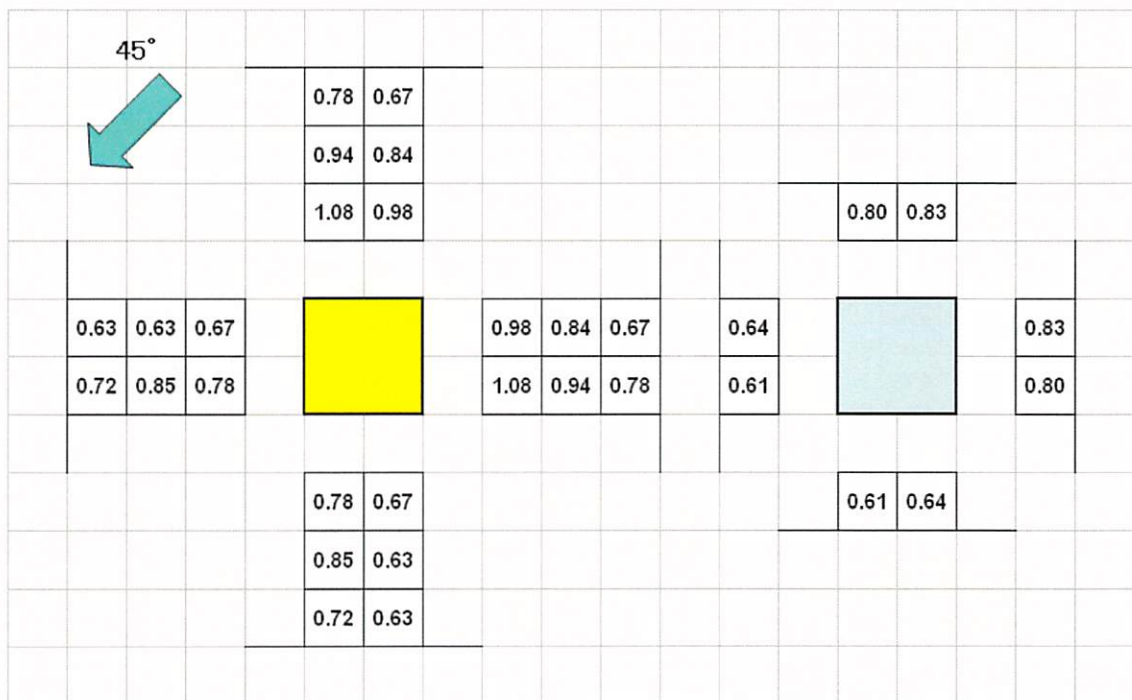


図 5.15(d) 不均一高さ配列の交換係数分布（風上基準に対する比）風向 45 度

図 5.16 に、各構成面における全面濾紙測定と分割測定の面平均値との比較を示す。分割測定では、資料サイズが 1/4 となるため、スケール効果で輸送速度の絶対値が全面測定よりも大きくなる。風上基準は常に全面測定としているので、両者の絶対値の比較はできない。

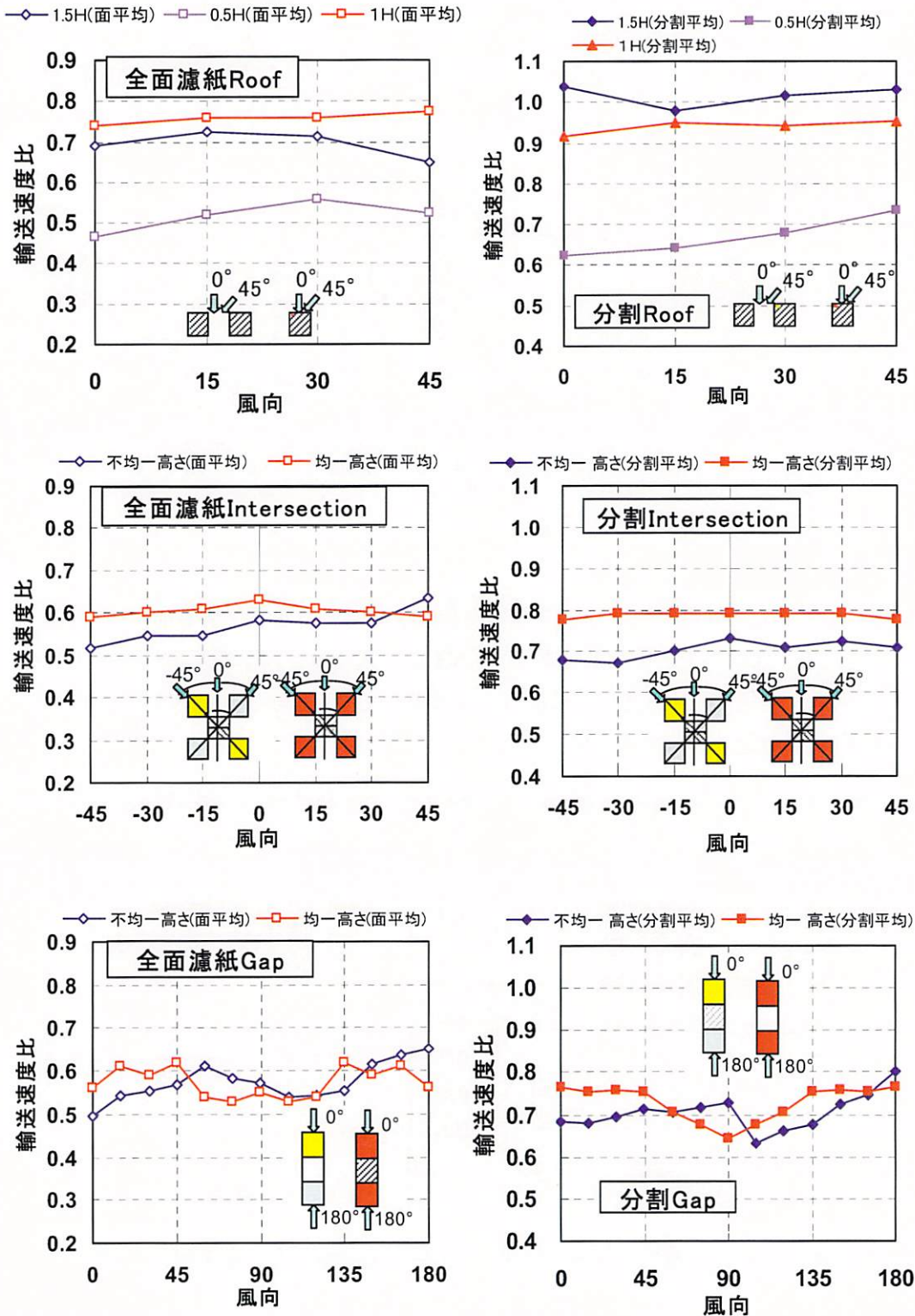


図 5.16 各構成面の輸送速度と風向の関係 - 左：全面測定、右：分割測定の面平均

屋上面(Roof)に関しては、**1.5H** と **1H** の差が予想以上に小さい。建物間面(Gap)では、不均一高さの場合には高層建物の風上側となる場合(風向 180 度)に吹き降ろしの影響で大きくなるのが特徴であるが、全体として均一高さ配列との差は大きくない。均一高さでは、風向方向の街路を形成する風向 90 度付近で値が小さくなっている。25%というグロス建蔽率では、風向に平行な街路は風通しがあまり良くないといえ、むしろ模型間となり、アスペクト比 1:1 のキャビティーに循環渦が形成される状況の方が、交換が盛んになっていると考えられる。交差点面(Intersection)では、全ての風向で均一高さ配列の値が 10~15%程度大きくなっている。

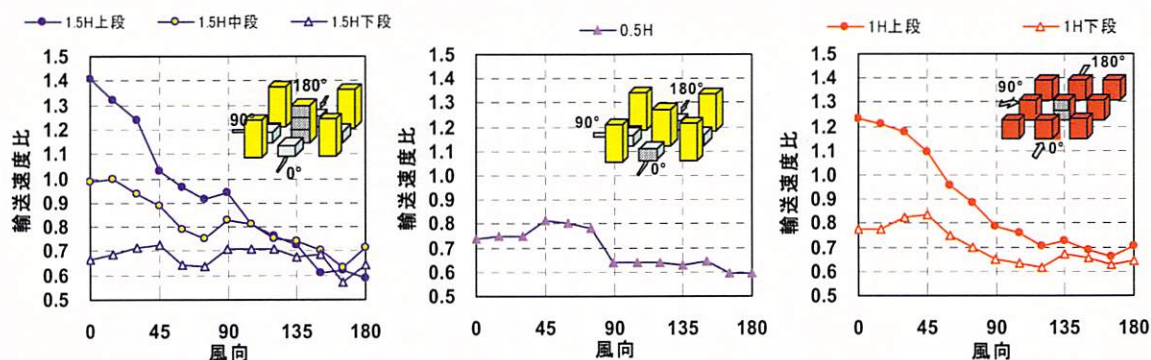


図 5.17 鉛直壁面の輸送速度と風向の関係 - 左・中：不均一配列、右：均一配列)

図 5.17 に鉛直壁面の輸送係数と風向の関係を高さ別に示す(左右2測定面の平均値)。風向による変化は、建物の上部で顕著である。**1.5H** の上段では、同じ高層模型の風下となる風向 45 度付近で明確に減少する。下層部の変化は概して小さいが、**0.5H** では低層建物が見通せる風向 45 度付近で明確な極大値を示す。

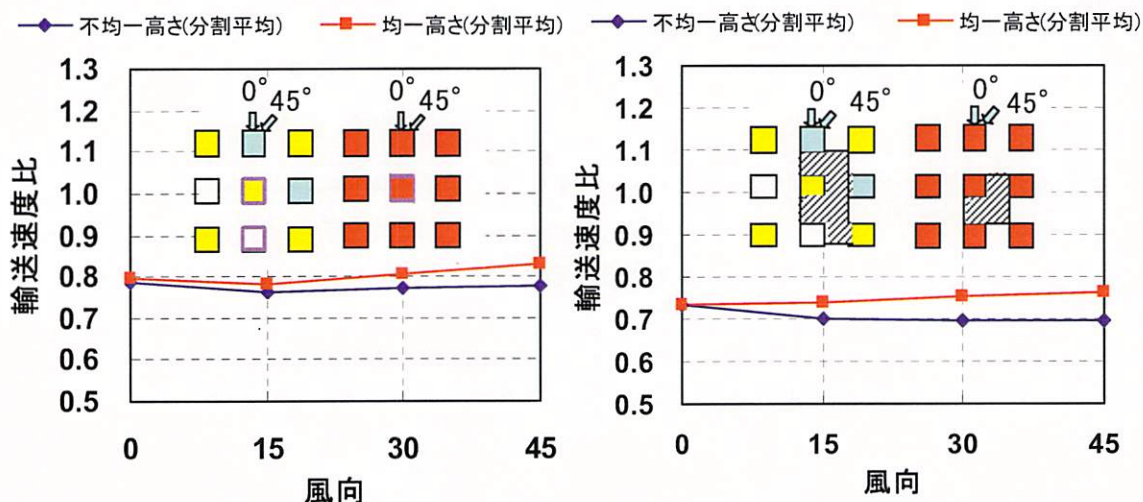


図 5.18 輸送速度と風向の関係 - 左：全壁面、右：全床面

図 5.18 は、以上の結果を集計し、風向 0~45 度における全壁面(測定面数：均一=16・不均一=32)と全床面(測定面数：均一=12・不均一=24)の平均を比較したものである。

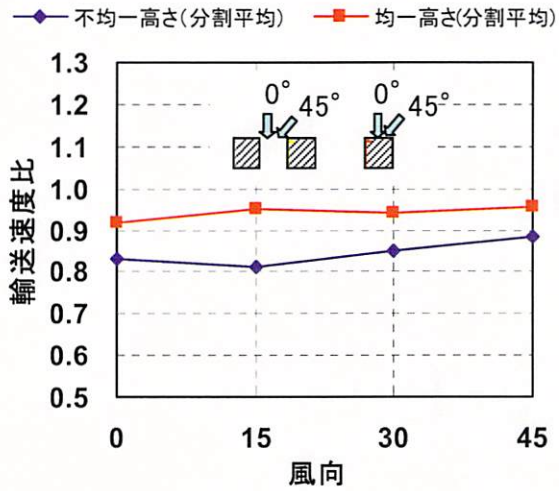


図 5.19 輸送速度と風向の関係－全屋上面

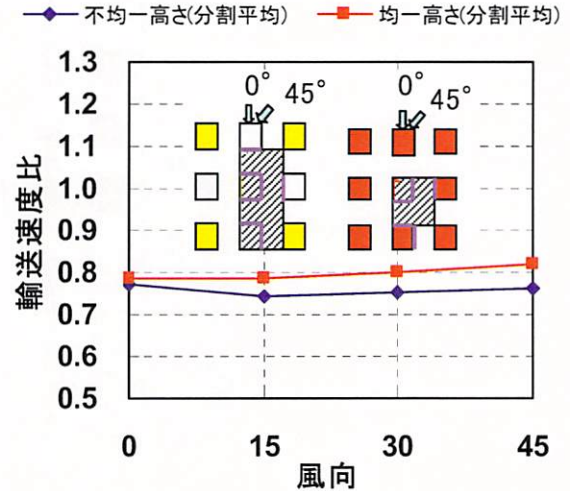


図 5.20 輸送速度と風向の関係－全構成面

全壁面、全床面ともに、風向 0 度では、ほとんど一致しているが、その他の風向では僅かながら均一高さ配列の方が大きくなっている。図 5.19 は、屋上面（測定面数：均一＝4、不均一＝8）についての集計結果である。全風向で、均一高さ配列の方が大きくなっている。最終的に、図 5.20 には、図 5.18 と図 5.19 をすべて集計した全構成面（測定面数：均一＝32、不均一＝64）についての結果を示した。全表面でも、不均一高さの方が平均で 5% 程度輸送速度は小さいという結果となった。

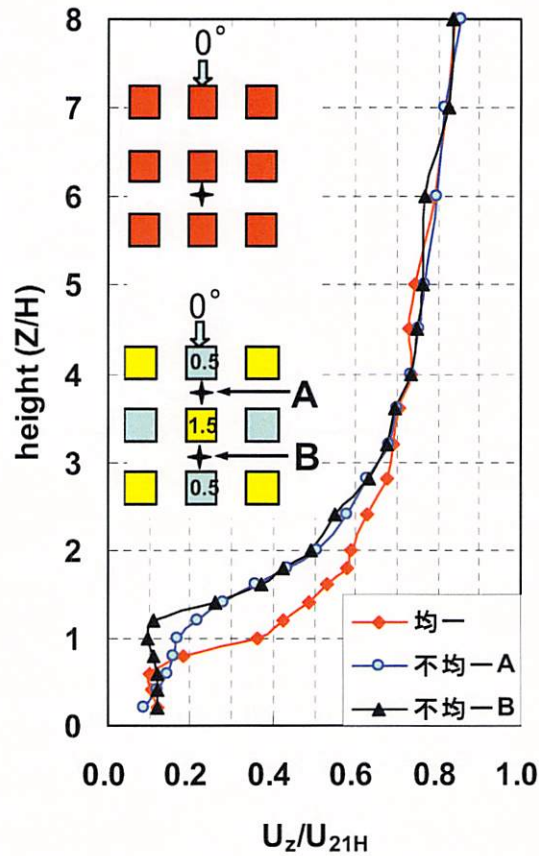


図 5.21 風速の鉛直プロファイルの比較—風向0度

図 5.21 は、風向 0 度における、平均風速プロファイルを両配列で比較したものである。不均一高さ配列では速度境界層が厚くなるため、例えば $2H$ 高さの風速で比較すると不均一高さ配列では、風速が 83%程度に弱まっている。図 5.22 に、 $2H$ 高さの風速の風向変化をまとめた。これは、グリッド状測定点（均一高さ配列：25 点、不均一高さ配列：50 点）の空間平均値を比較したものである。

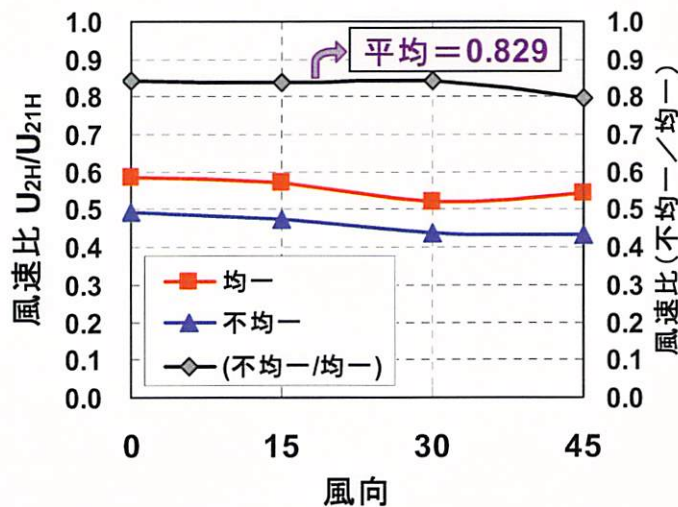


図 5.22 $2H$ 高さにおけるエリア平均風速の比較

図 5.23 はキャノピー層内・高さ $0.2H$ の平均風速分布で、不均一高さ配列ではエリア平均でやはり 83% ($0.139/0.168=0.827$) に風速が減少している。

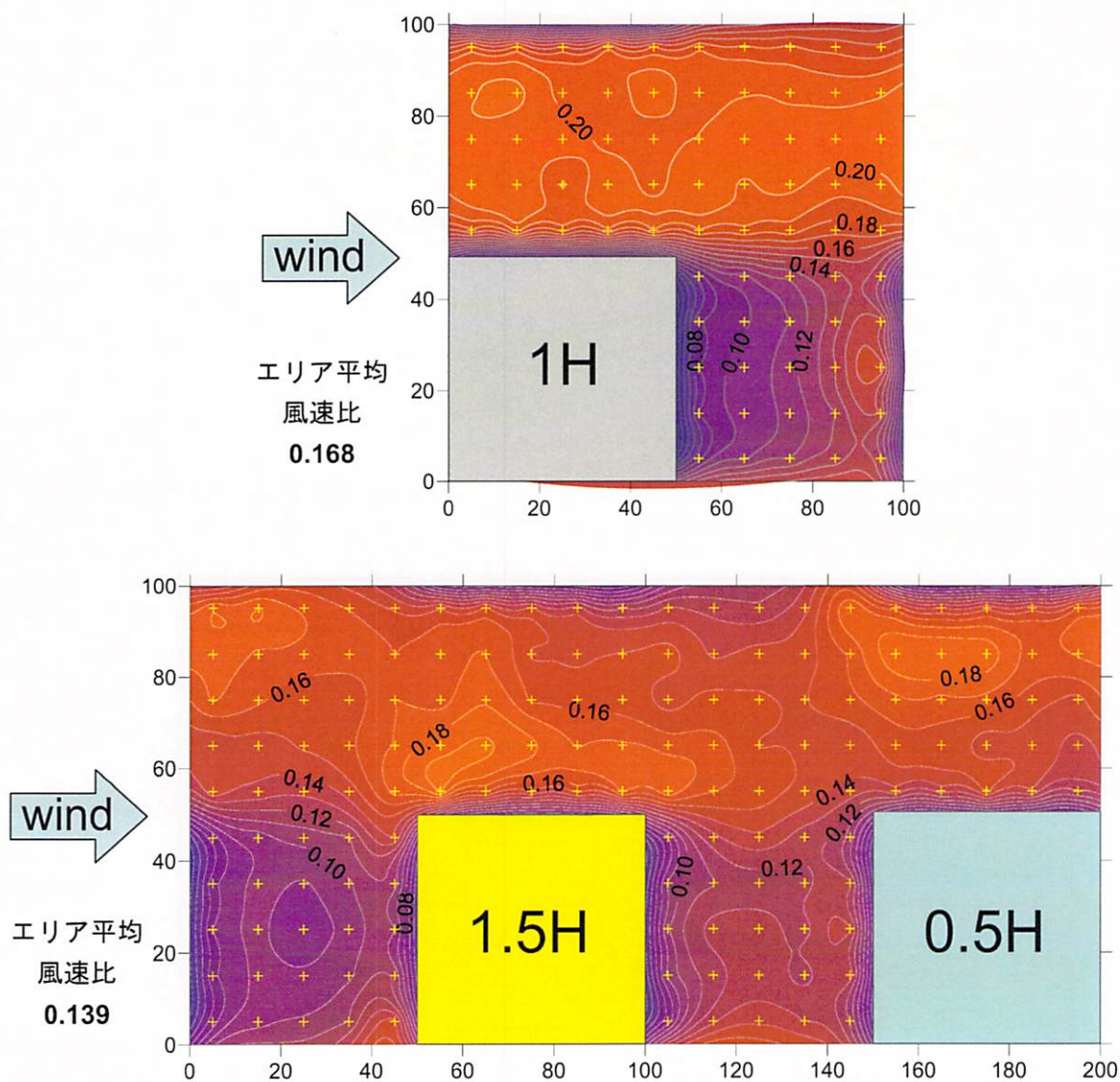


図 5.23 キャノピー層内（高さ $0.2H$ ）の風速比 U_z/U_{20H} の分布

立方体3次元整形配列に関しては、すでに既報において交換係数の面別の風向変化と密度変化、さらに壁面の高さ分布について検討した。しかしながら、この種の模型実験では交換係数の値に試料サイズによるスケール効果が現れるため、密度変化の考察では同一サイズの試料による相対比較が可能な屋上面と壁面のみを対象に考察してきた。一方、筆者らのグループでは、現在スケールモデルによる自然風下における検証実験を進めている。そこでの戦略は、各構成面からのフラックスを積み上げるのではなく、キャノピー上空で乱流フラックスのトータル量を押え、それを各構成面に配分するというものである。このためには、床面を含めた全構成面の交換係数の把握が不可欠となる。そこで本報では、街路幅が模型サイズよりも狭くなる配列では、街路幅に合わせて模型面の試料サイズを分割することにより、試料サイズの統一を図りながら、床面を含めた全構成面の相対比率を検討する実験を行った。なお、これまでの整形配列に加え、千鳥配列についても新たに実験を行い比較考察した。

模型の配列範囲は1820mm四方で、中心付近を測定対象とした。実験した模型配列と測定対象面を図5.24に示す。街路アスペクト比(L/H)=2, 1, 1/2の3種の密度で実験を行った。

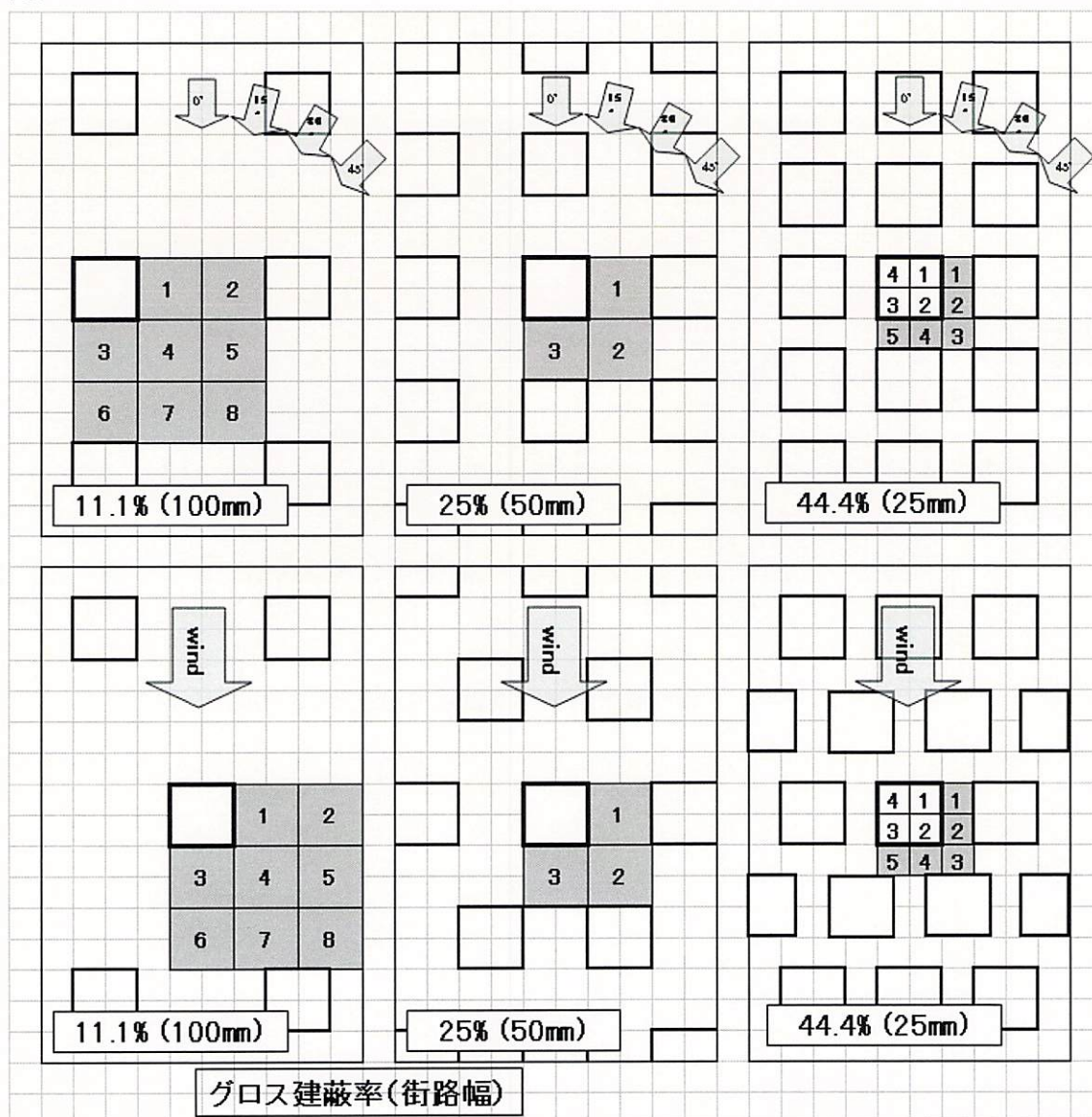


図5.24 測定点の平面図 (上：整形配列，下：千鳥配列)

図 5.25 に屋上面の輸送速度の風向変化を示す．グロス建蔽率（ λ_p ）にかかわらず，屋上面については風向による変化は僅かである． $\lambda_p=0.44$ に関しては全面・4 分割測定 of 両者を示したが，4 分割では 3 割程度大きな値となっている．

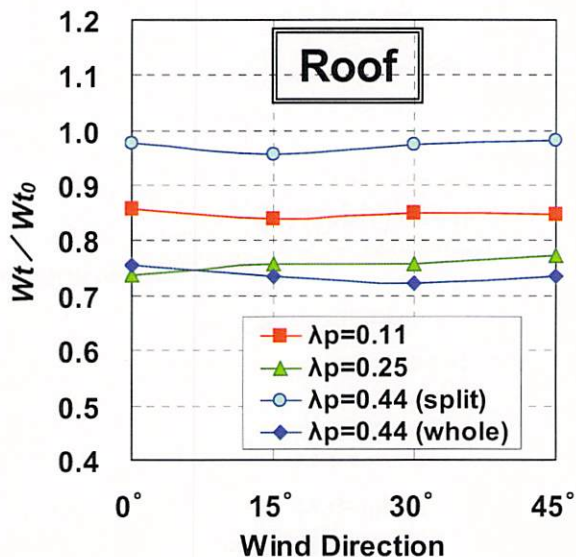


図 5.25 屋上面の輸送速度の風向変化

図 5.26 と図 5.27 は，屋上面の値で基準化した壁面と床面の交換係数の風向変化である．壁面に関しては， $\lambda_p=0.11$ と 0.25 の結果はほぼ近似しているが， $\lambda_p=0.44$ では値も小さく風向による変化も小さくなっている．床面は全体として風向依存性が小さい．低密度 $\lambda_p=0.11$ では建物間(Gap)と交差点面(Intersection)の差異が小さいが，高密度となるに従い建物間の値が減少し両者の差が拡大する．

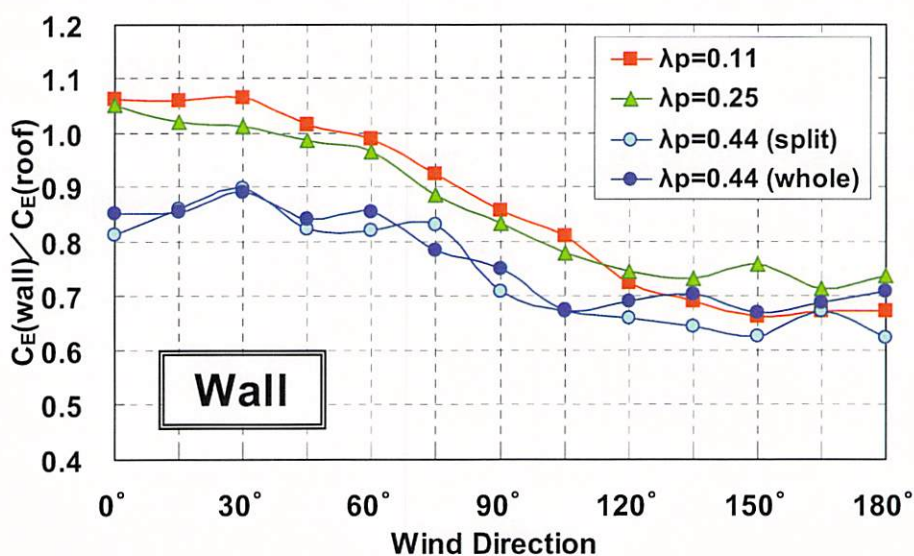


図 5.26 壁面の輸送速度の風向変化（屋上面に対する比率）

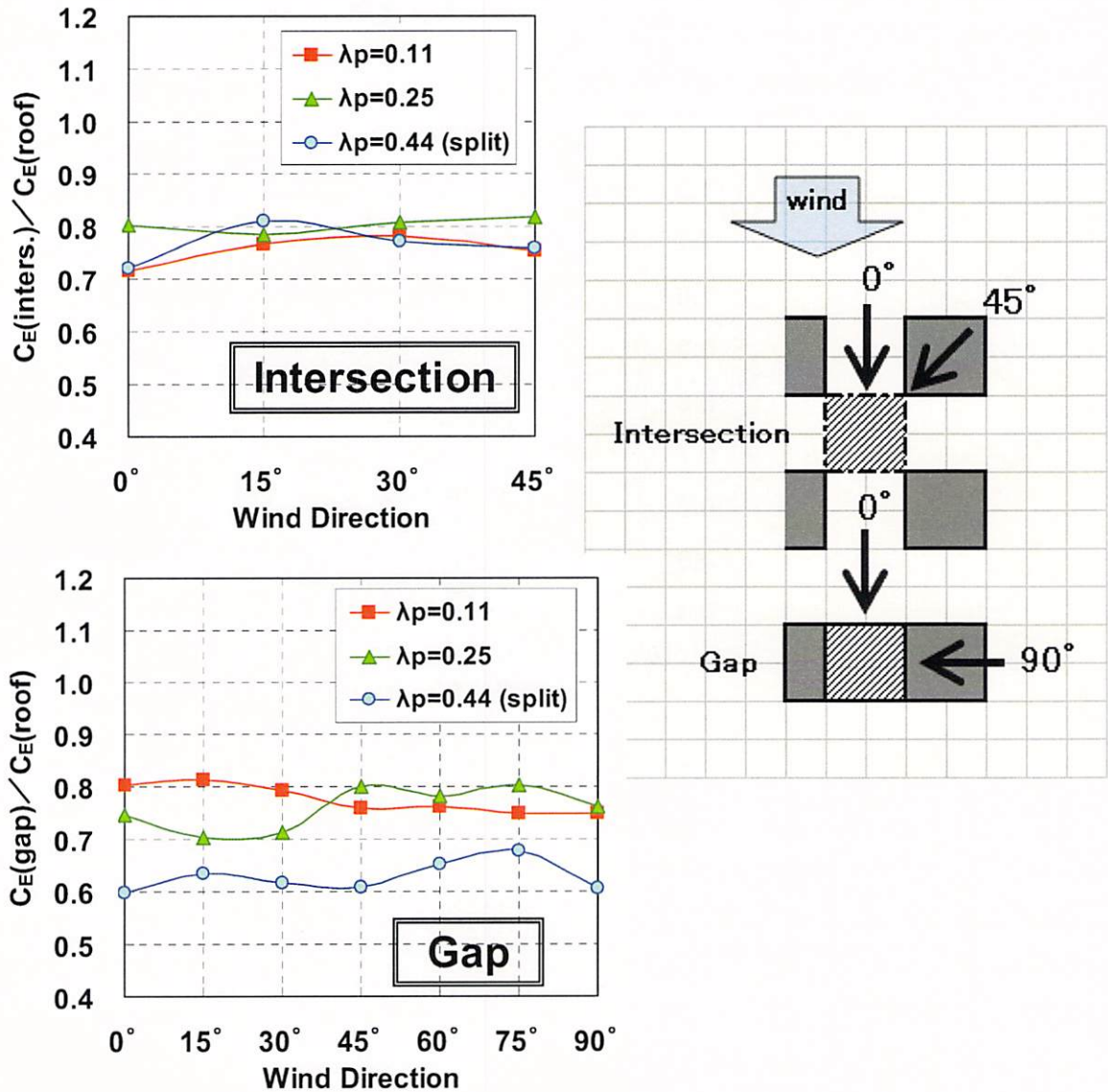


図 5.27 床面の輸送速度の風向変化（屋上面に対する比率）

図 5.28 は、壁面の交換係数を整形配列と千鳥配列で比較した結果である。密度による変化は類似しているが、風上面では千鳥配列の値が大きく、逆に風下面では整形配列の方が僅かに大きい。図 5.29 は、同じく床面の交換係数を比較した結果である。整形配列では全体に風向による変化は小さいが、 $\lambda_p=0.25$ では整形配列の風向 45 度の結果が特異的に大きく千鳥配列に近い値となっている。

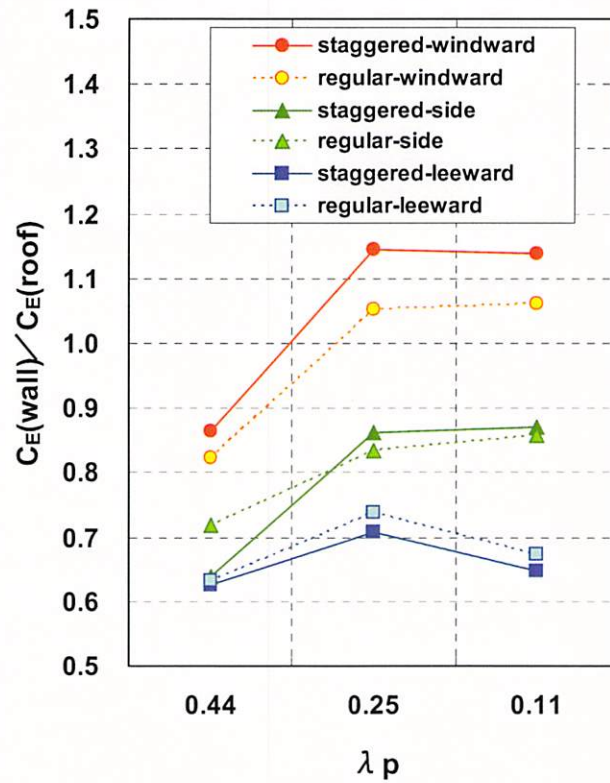


図 5.28 整形と千鳥配列の壁面交換係数の比較（屋上面に対する比率）

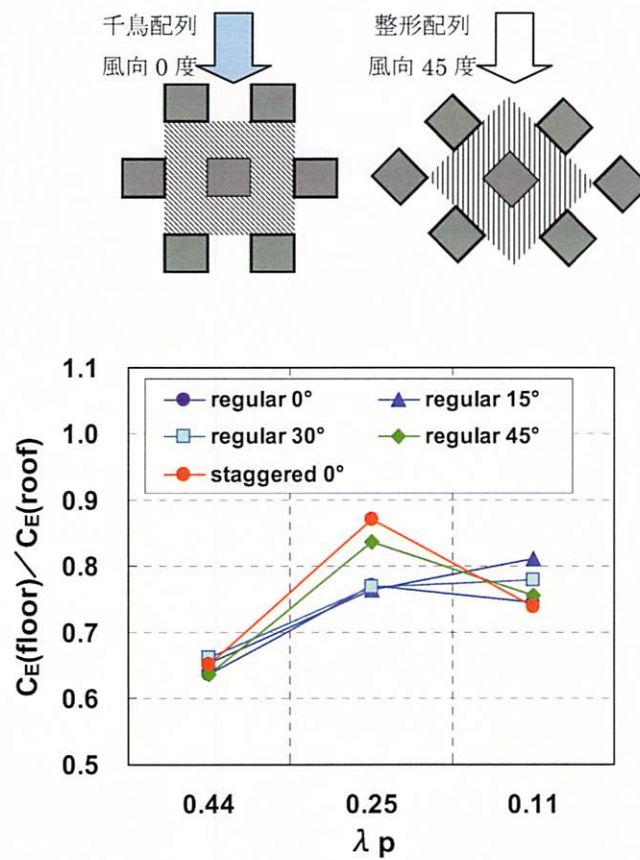


図 5.29 整形と千鳥配列の床面交換係数の比較（屋上面に対する比率）