

5341

G0

昭和60年度科学研究費補助金（総合研究（A））成果報告書

課題番号 58350036

研究課題 建築物の風環境に関する風洞模型実験法の規準化とその適用限界について

研究組織

研究代表者	後藤 滋	（横浜国立大学工学部教授）
研究分担者	片山忠久	（九州大学工学部教授）
	吉沢 晋	（国立公衆衛生院建築衛生学部長）
	池田耕一	（国立公衆衛生院建築衛生学部主任研究官）
	小峯裕己	（国立公衆衛生院建築衛生学部研究員）
	村上周三	（東京大学生産技術研究所教授）
	小林信行	（東京工芸大学工学部助教授）
	大場正昭	（東京工芸大学工学部助教授）

研究経費

昭和58年度	5.500 千円
昭和59年度	2.000 千円
昭和60年度	2.000 千円
計	9.500 千円

2304186

横浜国立大学

研究発表

日本建築学会大会学術講演梗概集， 1985、10

1．係留気球による市街地の2地点同時観測

（1）風速垂直分布および粗度係数

○田島啓治（九産大）・片山忠久・西田 勝・石井昭夫・堤純一郎

2．建物周辺気流の乱流構造の風洞実験法に関する研究

(その11) 接近流の乱れのスケールの影響および最大瞬間風速の再現性について

○森山修治(日建設計)・村上周三・高橋岳生・高倉秀一

3. 低層建築物内部における気流性状および風圧係数に関する風洞実験

(その1) 気流性状について

○後藤 滋(横国大)・遠藤昌夫・大柿 聡

4. 低層建築物内部における気流性状および風圧係数に関する風洞実験

(その2) 風圧係数について

○大柿 聡(横国大)・後藤 滋・遠藤昌夫

5. 2つの建物周辺の濃度分布に関する実験的研究

(その4) 野外模型実験の気流性状と風洞模型実験による濃度分布の再現性について

○大場正昭(東工芸大)・小林信行

研究成果

はじめに

研究の目的:

建築物に作用する風圧、市街地低層部における気流と拡散、高層建築物周辺に発生する強風問題など、建築物の風環境に関する問題には、その予測あるいは設計資料を得るための風洞模型実験は不可欠であるが、その規準的な実験方法および表現方法などが統一されておらず、各研究者によってまちまちであり国際的にも検討されている。一方、環境アセスメント条例等が整備されつつあり、風洞実験の技術指針が要請されている。

本研究は、上のような状況に対して、例えば風圧係数の資料を得るための、又ケーススタディのための風洞模型実験について、境界層風洞内に再現すべき境界層乱流構造と模型、乱流計測の技術と結果の表現などについて、自然風との相似則に則ってその技法と適用限界を明らかにし、風洞模型実験方法の規準化をはかろうとするものである。

本年度の研究実施計画:

1) 海陸風を主とし、乱流の立体構造の相違を熱的要素との関係において実測解析する。

2) 粗度要素、格子、噴流による乱流発生装置などによる風洞内境界層形成とその乱流構造を調べ、自然風との相似に関して検討する。

3) 建築群における実測と風洞模型による比較実験を行い、壁面風圧と周辺気流の相似性を調べる。

4) 平均風速による風環境評価に加え、突風率を考慮した風環境評価の方法を確立する。

5) 渦スケールの相違による近傍汚染拡散の影響を検討する。

以上を中心として、3年間の研究成果を以下にまとめる。

1. はじめに 建築物の換気・通風等に関わる風のエネルギーの利用、あるいは建築物周辺風の環境に関しては、建物方位の決定に関連して地域の風の長期観測に基づく統計的な資料が必要である。また建物の形態や配置など計画上の資料を得るためには風洞模型実験が不可欠であるが、その実験条件として市街地における風速垂直分布および乱れの構造を知る必要がある。本稿はこれ等に関する実測調査の結果を述べるものである。

2. 長期観測データに基づく海岸都市の風の特徴

2.1 観測・解析の概要

福岡市内7ヶ所の風観測点の位置および測定状況を図1、表1に示す。解析対象として扱うのは1982年7月21日～1983年8月6日の約1年間における毎時の風向、風速データである。データは全て毎正時の前10分間の平均である。なお観測点Gの1982年度のデータはAMeDASによるものである。

海陸風の出現、発達条件として考えられる気象要素に、気圧、日射量、気温日較差、海水と地表面の温度等がある。ここでは観測点Gで測定された日射量(日積算水平面全天日射量)と気温日較差を扱う。季節別の両者の相関を図2に示す。図中rは相関係数である。気圧配置が安定している晴天日は海陸風が発達しやすく、またその時は日射量と気温日較差の相関が高くなると仮定する。このような条件がある程度見られる部分を図2より定め、その境界となる日射量を便宜的に基準日射量とする。それを図2の破線とその傍の数字で示す。

表1 各観測点の測定状況

観測点名	地上高さ	測定器	周囲の状況
A	4.3 (m)	二次元超音波	高層ビル
B	4.3	-	海岸、中低層建物
C	1.8	-	低層住宅
D	4.3	-	中、低層建物
E	1.8	-	低層住宅
F	2.3	-	中、低層住宅
G	2.5	プロベラ型	公園、中低層住宅

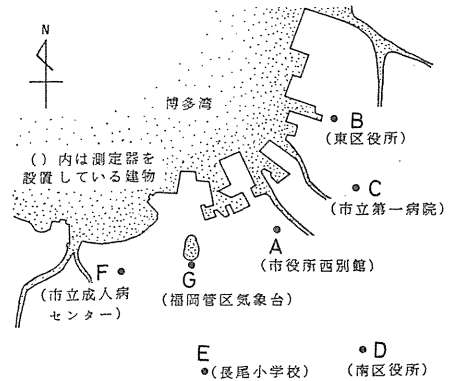


図1 風観測点

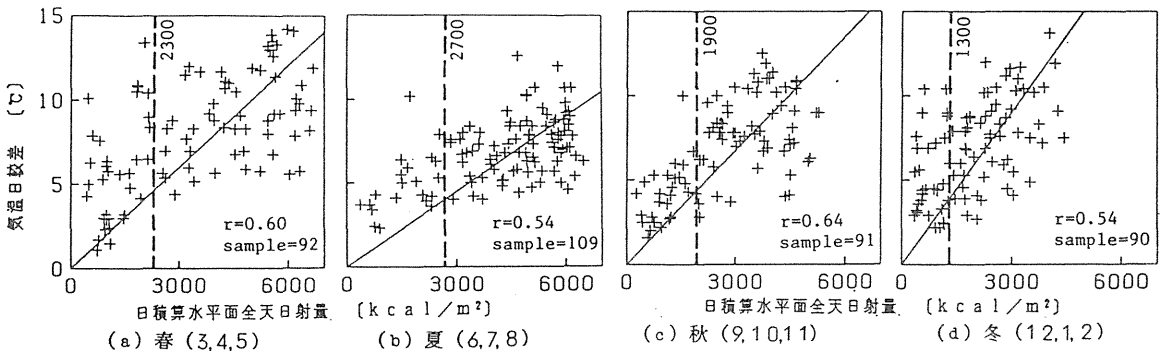


図2 日積算水平面全天日射量と気温日較差の相関

2. 2 風向特性

日射量の風配への影響を調べるため、観測点Aにおける年間の日射量別風配を昼間と夜間に分けて図3に示す。昼間は8~17時、夜間は20~5時、静穏(CALM)は0.3m/s未満である。全データによる風配図から昼間に海風の風向である北寄りの風、夜間には逆の南寄りの風が卓越することがわかる。基準日射量以上の場合にはその傾向が、特に昼間において強調されるが、基準日射量未満の場合には昼間、夜間ともほぼ同様の風配となり、海陸風の特徴を示さない。なお、他の観測点においてもほぼ同様の傾向が見られる。

基準日射量以上の場合に卓越する風向と海陸風との関係をさらに明確に示すため、各観測点における基準日射量以上の場合の年間データによる風配を図4に示す。各観測点から最も近い海岸線は殆

ど埋立地であるため明確な海岸線の方向を示すことは困難であるが、各観測点における卓越風向はほぼ海岸線に対する法線方向に近い。

各観測点について詳細に見ると、観測

点EとGにおいて南寄りの風向が東へ振れているのは、福岡市南西部に広がる広陵地の影響と考えられる。観測点Cの卓越風向は最も近い海岸線の法線とは若干ずれているが、これはより大きいスケールでの海岸線、または福岡市東部の丘陵地の影響と考えられる。観測点BとFにおいて東寄りの風が見られないのは、近くの障害物の影響と考えられる。

各観測点特有の状況が卓越風向に影響を与えていることもあるが、全体的には昼間において海寄り、夜間において陸寄りの風向となり、海陸風の出現頻度はかなり高いものと考えられる。

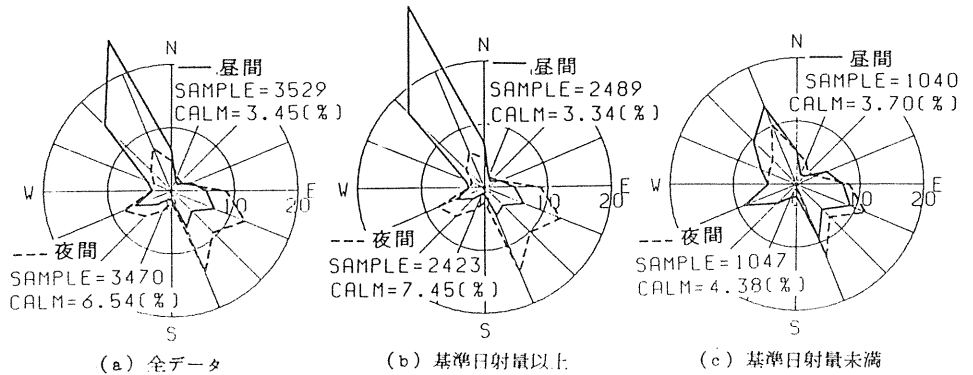


図3 観測点Aにおける年間の日射量別風配図

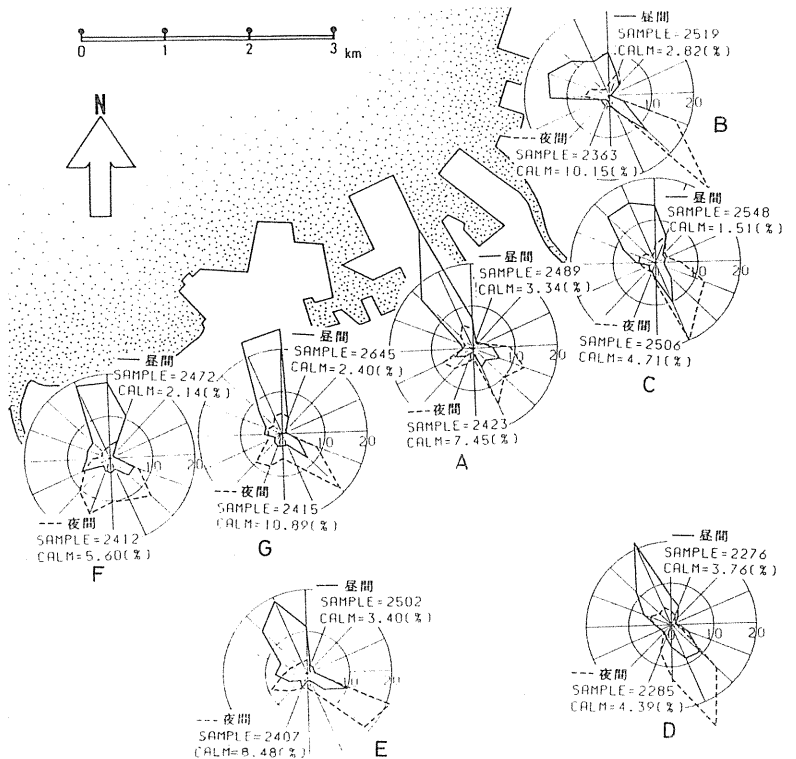


図4 基準日射量以上における年間風配図

2.3 風速特性

風向特性からみて海陸風の特徴をよく表わしていると考えられる基準日射量以上の年間データについて、各観測点の風速頻度分布をヒストグラムとして図5に示す。

風速階級は0から0.5m/sきざみで10m/sまで20段階とっており、最後の階級は10m/s以上のすべてのデータを含む。観測点Gのデータは約半数がAMeDASによるものであり、この風速データは1の位までなのでひとつおきに高い頻度の階級が現れる。

各観測点の昼間の頻度は夜のそれに比べて風速の大きい側に移行している。海風は陸風に比べ風速が大きくなる傾向がある。観測点A、BおよびDは同じ地上高さで測定しているが、観測点BおよびDが比較的大きい風速4m/sの段級の頻度が高いのに対し、

A点のそれは1~2m/sの階級の頻度が極端に高い。これは表1から明らかのように、観測点周辺の状況(粗さ)の違いによるものと考えられる。

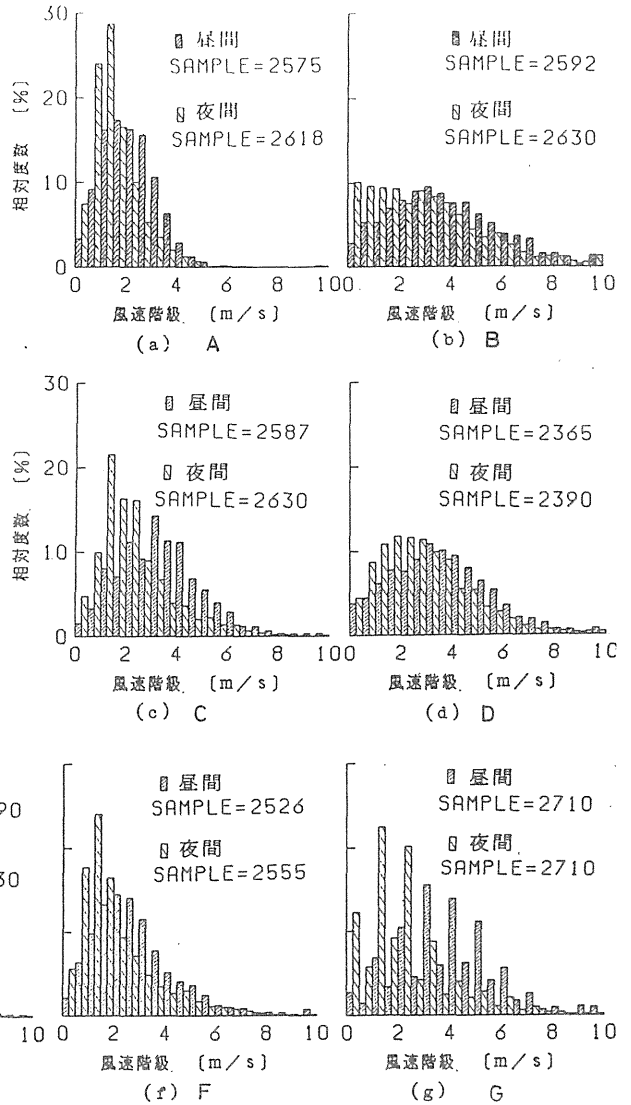


図5 基準日射量以上における年間データによる風速頻度分布

3. 係留気球による観測データに基づく市街地の風速垂直分布と乱れの特性

3.1 観測・解析の概要

観測対象として選んだ福岡市内の3地点を夫々SITE I、SITE IIおよびSITE IIIとして図6に示す。SITE Iは市内北東部に位置するK大学構内であり、その西側約1.5kmに博多湾、北側約5kmに玄海灘があり、北西から北方向にかけて低層の住宅が散在する。北から北東にかけては高さ約70mの丘陵地となっている。SITE IIは市内南西部に位置し、海岸線から南へ約6km内陸にあるS団地であり、晴天日の昼間に発達した海風が市街から低層住宅さらに田畑が散在する比較的大かつな地域を吹走する。SITE IIIは市内中央部に

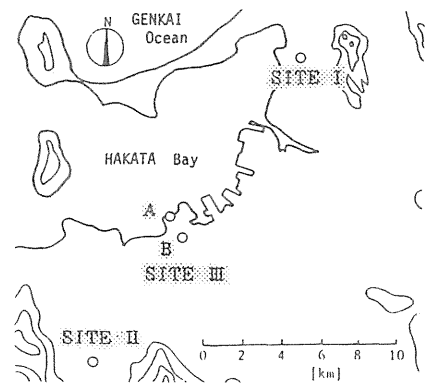


図6 観測地点

位置する海岸（観測点A）および海風時の卓越風向に沿って中、低層住宅など比較的粗度の大きい地表面を約1.2km内陸に入った風下側の点Bの2点である。

各観測点からみた風上側の状況を図7(a)～(d)に示す。

係留気球に搭載する3杯型風速計は小型気象ゾンデシステムの一部であり、気球をウィンチにより動かし、風速計を所定の高さに係留する。

地上各高度の風速を同時測定出来ないで、風速の長周期変動の影響を除去するために、地上に風速の基準点を設けて、上空の風速と同時観測を行う。

各観測点の基準点は、周辺建物等の影響を直接受けないように、建物屋上に高さ6.7mのポールを立て風速計を設置する。その地上からの高さは、SITE I が26.5m、SITE II が21.2m、SITE III の観測点Bが11mである。SITE III のA点は風上が海面であり、地上高さ3mのポール上を基準点としている。

SITE I および II では係留気球を1台使用し、SITE II では2台使用して観測点AおよびBにおける同一高さの風速を同時観測する。係留気球による上空風速と地上基準点の風速を同時に30分間データレコーダに収録し、これを2秒間隔でAD変換する。

観測は、福岡市を含む広域が高気圧に覆われた穏やかな日を選び、かつ海風が安定する正午から日没前の間に行っている。この間、各地点の主風向はSITE I : N、SITE II : N、SITE III : NWであり、気温の垂直分布は概ね中立である。

3.2 観測結果 I - 平均風速および乱れの強さの

垂直分布

基準点の平均風速 \bar{U}_r と上空各高さの係留点の平均風速 \bar{U} の相関を、SITE I について図8に示す。全体的に両者は高い相関を示しておりその比はほぼ一定とみなせる。他の観測点においても同様の結果が得られる。そこで、原点を通る両者の一次回帰を最小2乗法により求め、その勾配をその高さにおける無次元風速 \bar{U}/\bar{U}_r とする。

各観測点における \bar{U}/\bar{U}_r の垂直分布に対数法則を適用して図9(a)に、また指数法則を適用して図9(b)に示す。

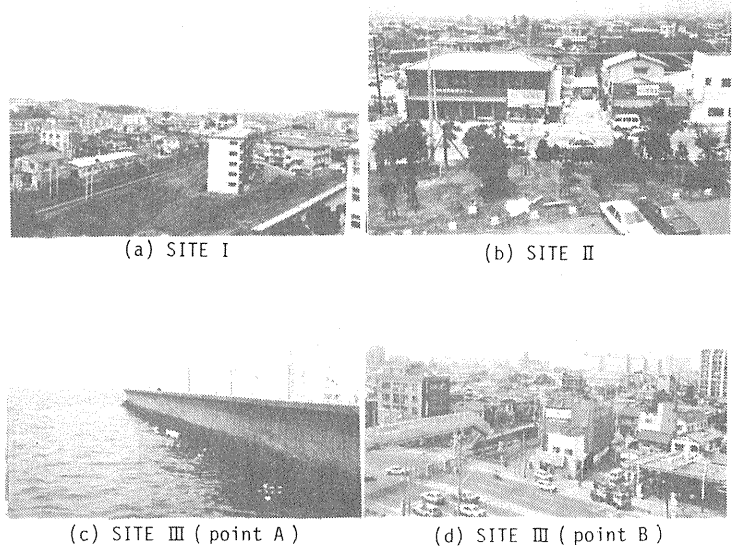


図7 観測点周辺の状況（風上側を望む）

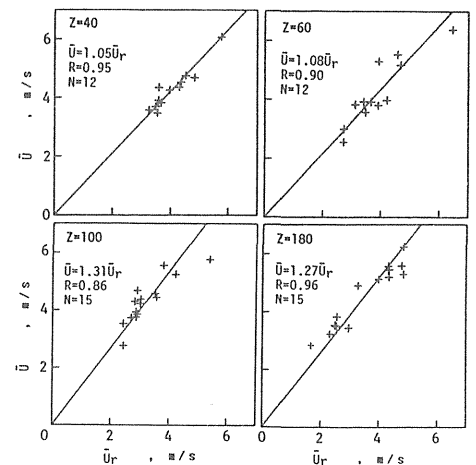


図8 平均風速の相関 (SITE I)

SITE I では地上からの高さ $z = 27 \sim 180\text{m}$ の測定値に対し $z < 100\text{m}$ の範囲で対数法則および指数法則が良く適用される。SITE II においても同様である。SITE III の観測点 A は海岸であり、 $z = 10 \sim 80\text{m}$ の測定範囲で風速の勾配は小さい。観測点 B で対数法則および指数法則が適用出来るのは $z < 50\text{m}$ であり、SITE I および II に比べて低い。海岸からの距離が短いのがその原因と考えられる。それぞれの図中に粗度係数 $z_0(\text{m})$ およびべき指数 α を示す。

次に、各高さの係留点における平均風速 \bar{U} と乱れの標準偏差 $\sqrt{u^2}$ との相関を、一例として SITE I について図 10 に示す。乱れの標準偏差は必ずしも平均風速に比例しない。特に低層部の平均風速の小さいところでは、 $\sqrt{u^2}$ は \bar{U} に関係せず一定の値を示している。

平均風速の場合と同様、 \bar{U} と $\sqrt{u^2}$ の原点を通る一次回帰を最小 2 乗法により求め、その傾きを各高さの乱れの強さ $\sqrt{u^2}/\bar{U}$ とする。

乱れの強さ $\sqrt{u^2}/\bar{U}$ の垂直分布を図 11 に示す。上方に行くに従い乱れの強さは小さくなる。海岸における $z = 10 \sim 20\text{m}$ の低層では $\sqrt{u^2}/\bar{U} = 0.13 \sim 0.14$ であり市街地における値の約 1/2 程度になっている。

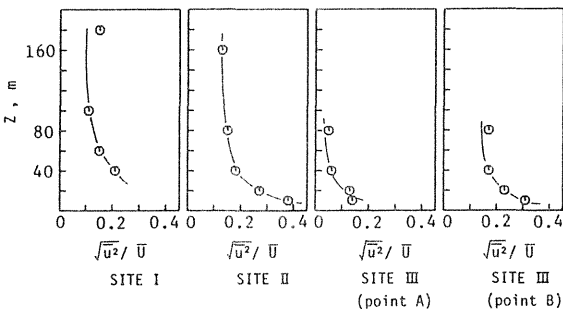


図 11 乱れの強さの垂直分布

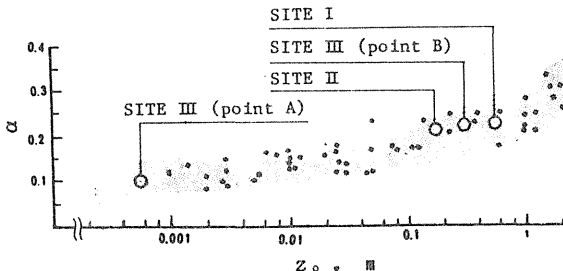
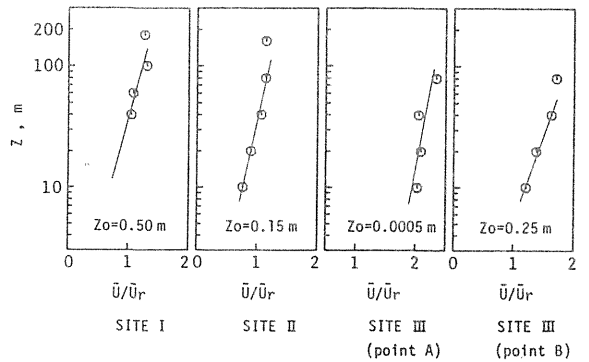
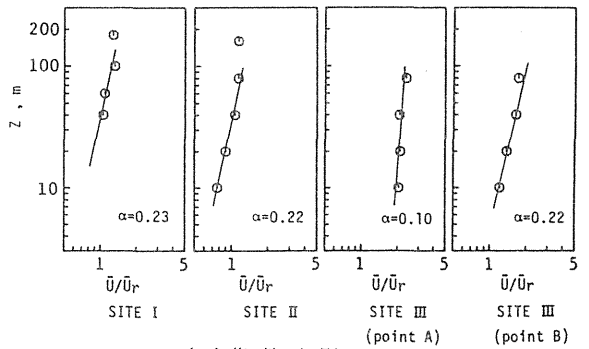


図 12 粗度係数 z_0 とべき指数 α の関係



(a) 対数法則



(b) 指数法則

図 9 平均風速の垂直分布

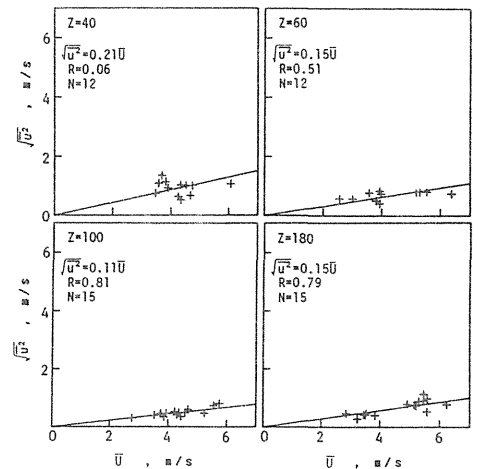


図 10 平均風速と乱れの標準偏差の相関 (SITE I)

各観測地点における粗度係数 z_0 とべき指数 α との関係を既往の観測結果と比較して図 12 に示す。今回の観測は、多くの地点における既往の結果とほぼ同様の値を示している。海岸における観測点 A では、 z_0 と α を低い方に延長した範囲の中に入っている。

同様に、各観測地点における粗度係数 Z_0 と乱れの強さ $\sqrt{u^2}/U$ との関係を、既往の他地点での結果と比較し図13に示す。

3.3 観測結果II - パワースペクトル

SITE I および SITE II における係留気球による上空のパワースペクトルと同時の地上基準点におけるそれを比較して図14(a)および(b)に、SITE III における海岸の観測点Aと市街の点Bの上空のパワースペクトルを比較して図15に示す。スペクトルの解析はMEMによっている。

図14によれば、上空のスペクトルは地上に比べ低周波側に移行しており、 $z < 100m$ では地上からの高さと共にスペクトルのピークは低周波側に移っていく。

図15によれば、海風時、海岸(A点)のスペクトルは同一高さの市街地(B点)に比べ低周波側にある。また両地点とも地上からの高さと共に、スペクトルのピークは低周波側に移行する傾向にある。

4. まとめ

- (1) 海陸風に対する日射量の影響は大きい。
- (2) 海風は、海岸線に対しほぼ直角に吹く。
- (3) 陸風時に比べ、海風時の風速は大きい。
- (4) 周辺建物の影響を直接には受けない建物屋上の平均風速と上空のそれとの相関は高い。
- (5) 市街地における粗度係数 $z = 0.15 \sim 0.50m$ 、ベギ指数 $\alpha = 0.22 \sim 0.23$ に比べ、海岸のそれ等の値は小さく、 $z_0 = 5 \times 10^{-4}m$ 、 $\alpha = 0.10$ 程度である。
- (6) 地上からの高さ30mにおける乱れの強さは、市街地において $0.2 \sim 0.25$ であり、一方、海岸では 0.1 以下である。
- (7) 上空に行くほど乱れのスペクトルは低周波側に移行する。
- (8) 市街地に比べ海岸のスペクトルは低周波側にある。

結語 海岸都市における風向・風速の特性および風速垂直分布と乱れのパワースペクトルを観測結果に基き示した。

本稿は、西田勝(九州産業大学)、石井昭夫(九州芸術工科大学)、堤純一郎(九州大学)各氏の労に負う所が大である。

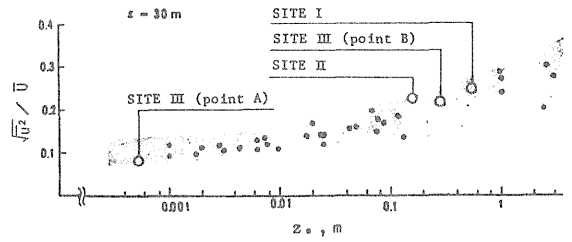


図13 粗度係数 Z_0 と乱れの強さの関係

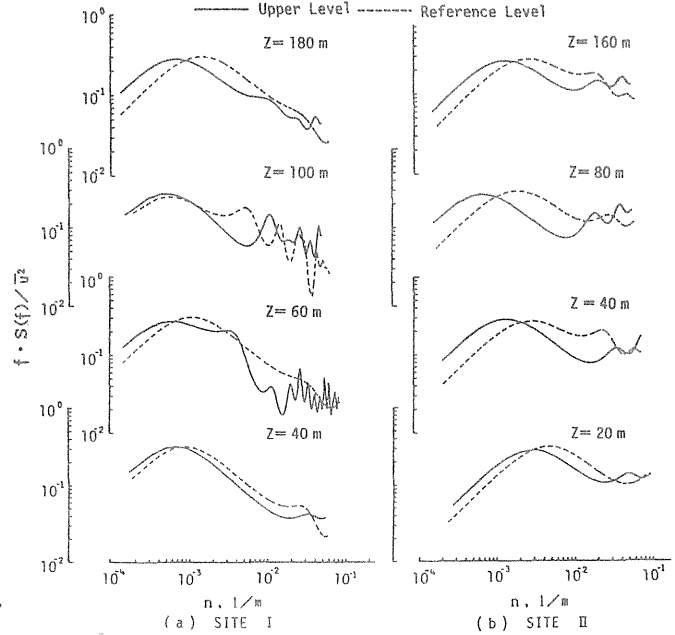


図14 パワースペクトル(地上と上空)

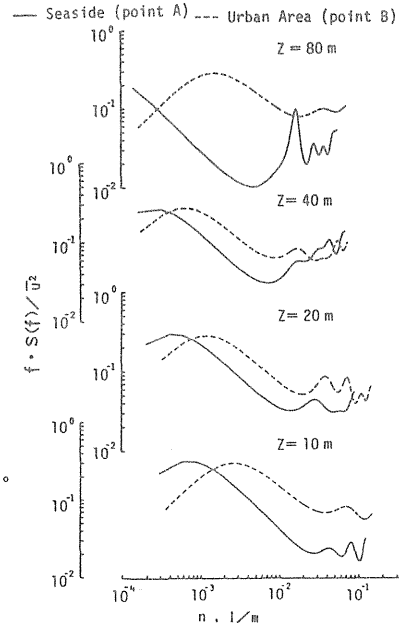


図15 パワースペクトル(観測点AとB)

短距離助走区間風洞における大スケール乱流の再現に関する実験的研究

国立公衆衛生院

吉沢 晋

池田 耕一

小峯 裕己

1. 序

いわゆる風害問題が、都市における新しい環境問題の一つとして社会的に認められるようになって以来、数多くのこの問題に関する研究がなされ、風害の風洞実験の実験技術も飛躍的に進歩し、最近では、単に建物周辺気流の平均流のパターンを相似に再現するだけでなく、乱れの性状まで相似にすることが、必須とされる情勢となってきた。

地表面付近の自然風の乱れは、広範囲にわたる地形の影響に支配された結果であるため、乱れのスケールは極めて大きく、これを風洞内で再現するには、それに見合った広範囲の地形を模型化して、実験することが最も正統的な方法となる。広範囲の模型化には長距離の助走区間が必要であり、これからの風害研究には大規模な風洞が、なくてはならないようにさえ思われる。

しかしながら、風害研究に携わっているすべての機関が、このような風洞に恵まれているとは限らず、長距離助走以外の大スケール乱流の再現方法の開発が待たれている。

本研究においては、乱れの付加方法として、在来、あまり用いられた例の少ない風洞気流にJETを吹出す方法による大スケール乱流の再現を試みた。

2. 実験方法

2-1 実験装置

実験は、図1に示す吹出口を、 $0.2\text{ m} \times 0.7\text{ m}$ としたゲッチェン型風洞を用いて行なった。

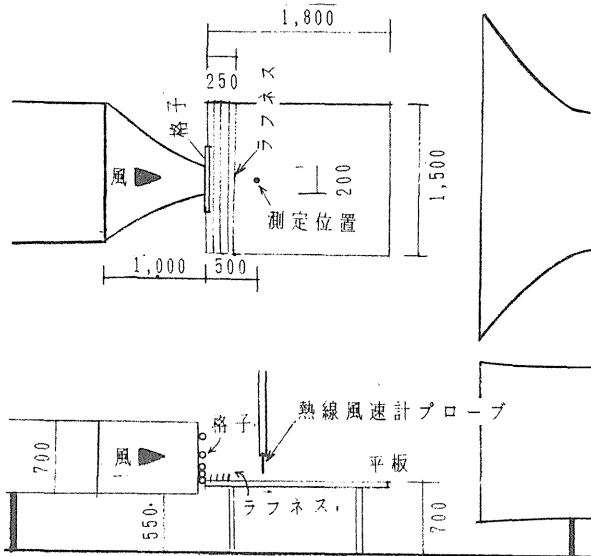


図1 風洞

2-2 JET付加装置

風洞の吹出口には、その風下50cmの断面に1/4乗則の風速の鉛直分布が再現されるように、乱流格子として、外径30mm（内径26mm）のパイプを6本水平方向に、試行錯誤的に設置した。このパイプには、一定間隔で並んだ1~4mm

の穴が開いており、パイプに圧搾空気を送り込むことによって、穴からJETが風洞気流に吹出されるようになっている（図2）。また、1/4乗則分布を作成するための補助手段として、平板上に、高さ1cmのラフネスを、気流に直角に5cm間隔で25cmにわたって配置した。

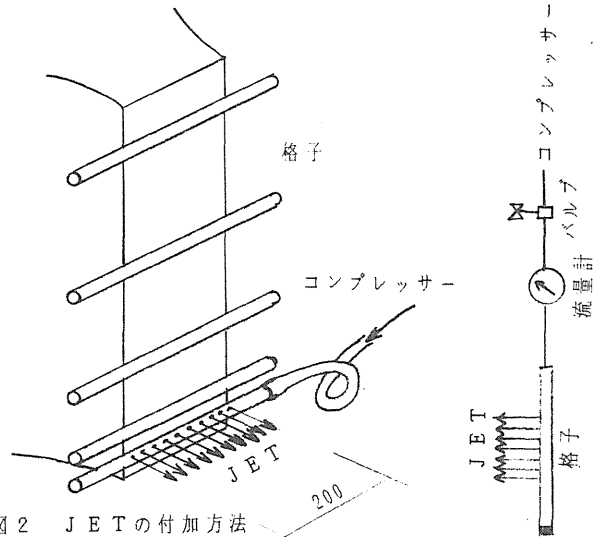


図2 JETの付加方法

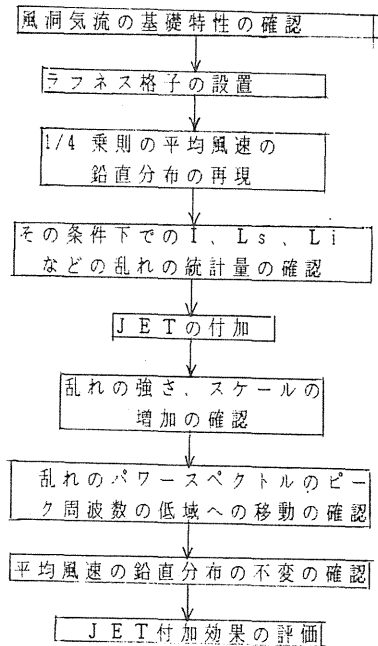


図3 実験の手順

2-3 気流測定方法

風洞気流の測定は定温度型熱線速計（日本カノマックス製）によって行った。

2-4 データの処理方法

気流の平均値および乱れの強さは、AD変換機（YHP製）を介して、パーソナルコンピュータ（YHP製）にデータを取込んで解析した。乱れの自己相関関数は実時間相関器（日本カノマックス製）により演算し、その結果を前述のパーソナルコンピュータで、B-T法によるフーリエ変換を行ない、乱れのパワースペクトルを得た。なお、スペクトルの平滑化のために、Akaikeのwindowを用いた。

2-5 実験の手順

実験の進め方のフローを図3に示す。

2-6 実験条件

実験は、表1に示す条件について行った。Exp #1から#3までは、乱流格子から吹出すJETの直径の変化が、風洞気流に与える影響を調べるための実験である。なお、JETの間隔は、直径に見合せて、変化させた。Exp #2, #4, #5は、JETとして吹出す空気量の

表1 実験の種類

Exp. #	JETの直径 (JETの間隔) mm (mm)	吹出風量 l/min	吹出方向	吹出位置
#1	1 (@5)	5.7	0° (風下方向水平)	下から2段目の格子
#2	2 (@10)	35.5	"	"
#3	4 (@20)	35.5	"	"
#4	2 (@10)	17.8	"	"
#5	"	35.5	"	"
#6	"	"	45° (風下方向斜上)	"
#7	"	"	90° (上方)	"
#8	"	"	135° (風上方向斜上)	"
#9	"	"	180° (風上方向水平)	"
#10	"	"	225° (風上方向斜下)	"
#11	"	"	270° (下方)	"
#12	"	"	315° (風上方向斜上)	"
#13	"	"	0° (風下方向水平)	下から3段目の格子
#14	"	"	"	4
#15	"	"	"	5
#16	"	"	"	6

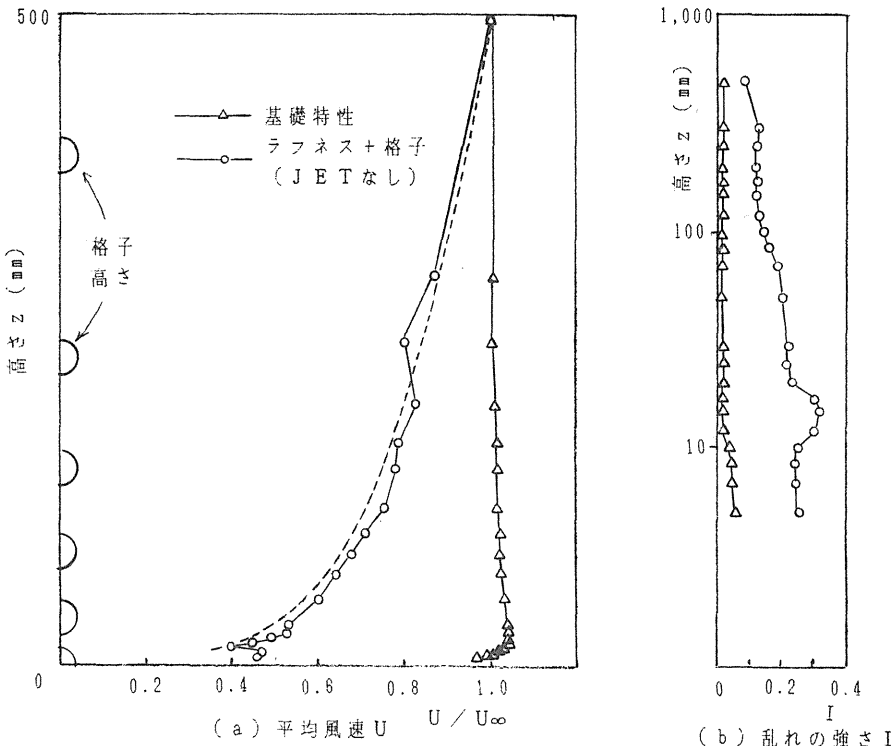


図4 JETを付加しない時の平均風速Uおよび乱れの強さIの鉛直分布

変化が、風洞気流に与える影響を調べる実験である。

また、Exp # 2 および Exp # 6 から # 12 は、JET 吹出方向の変化が、そして、Exp # 2 および Exp # 13 から # 16 は、JET の吹出高さの変化が、風洞気流に与える影響を調べるための実験である。

3. 実験結果

3-1 風洞の基礎特性

図4に、格子を設置しない場合の吹出口風下50cmの断面における平均風速と乱れの強さの鉛直分布を示す。また、図5には、乱れのパワースペクトルなどの統計量を示す。

境界層の厚さ d は、12.5mm であり、乱れの強さ I は、最も低い測定高さ $z = 5\text{mm}$ において、最大値、約6%を示す。また、 $z = 5\text{mm}$ において、測定した乱れのパワースペクトルのピーク周波数 F_p は 200Hz、スケール L_s は、4.15cm、積分スケール L_i は、0.8cm であった。

3-2 格子を設置した時の特性

同じく、図4に、風洞吹出口に、平均風速 U の鉛直分布

が $1/4$ 乗分布になるように、乱流格子を設置した時の、吹出口風下50cmの断面における平均風速 U と乱れの強さ I の鉛直分布を示す。また、図5には、その時の乱れのパワースペクトルなどの統計量を示す。

U は、概ね $1/4$ 乗則に則った分布を示している。この条件下での I は、 $z = 15\text{mm}$ において、最大値約30%を示している。この点を風洞平板近くの基準点とし、そこで測定した乱れのパワースペクトルのピーク周波数 F_p は、17.5 Hz、 L_s は、18.3cm、 L_i は、3.3cm であった。

3-3 吹出風量 Q_j の変化が風洞気流に与える影響

図6に、吹出風量 Q_j が変化した場合の、 U および I の鉛直分布を示す。また、図7には、 $z = 15\text{mm}$ における F_p 、 L_s および L_i などの乱れの諸統計量を示す。

吹出風量 Q_j が増加するに従い、 F_p は、低くなり、 I 、 L_s 、 L_i などの乱れの統計量は大きくなるが、 U の鉛直分布は $1/4$ 乗則の曲線からずれるようになった。すなわち、 Q_j を大きくすれば、乱れのスケールを大きくするこ

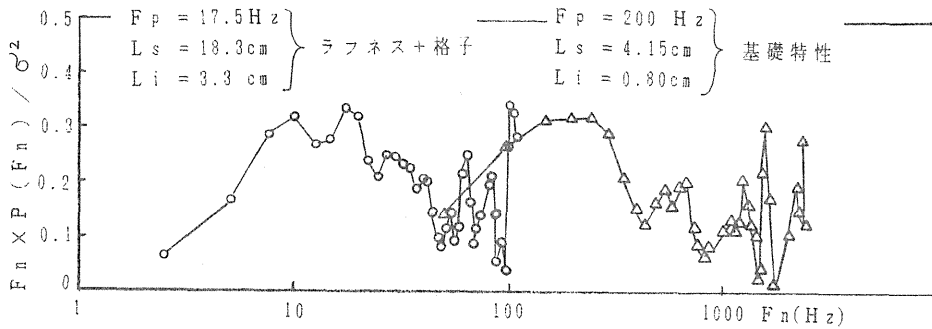
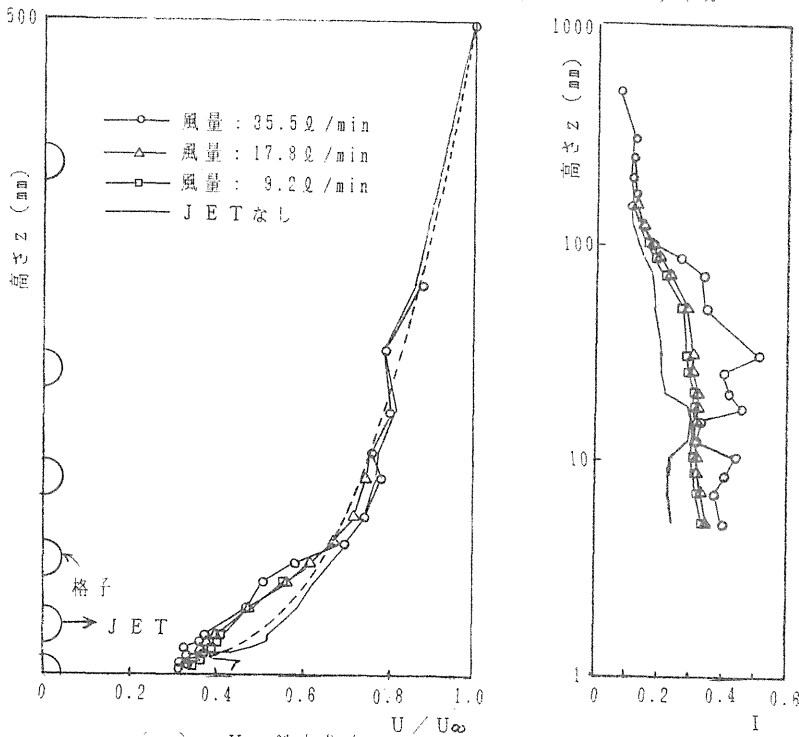


図5 JETを付加しない時の乱れのパワースペクトル



(a) U の鉛直分布 (b) I の鉛直分布

図6 JET吹出風量の変化が U および I の鉛直分布に及ぼす影響

- 風量：35.5ℓ/min $F_p = 10.0\text{Hz}$, $L_s = 32.0\text{cm}$, $L_i = 9.5\text{cm}$
- △ 風量：17.8ℓ/min $F_p = 15.0\text{Hz}$, $L_s = 18.0\text{cm}$, $L_i = 2.5\text{cm}$
- 風量：9.2ℓ/min $F_p = 15.0\text{Hz}$, $L_s = 18.7\text{cm}$, $L_i = 2.8\text{cm}$
- JETなし $F_p = 17.5\text{Hz}$, $L_s = 18.3\text{cm}$, $L_i = 2.3\text{cm}$

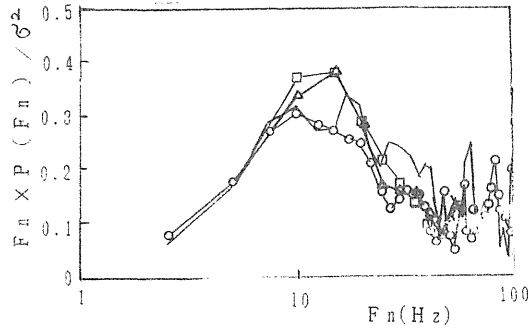


図7 JET吹出風量の変化が乱れの
パワースペクトルに及ぼす影響

とができるが、同時にUの鉛直分布も崩れてくるので、Uの分布を大きく損はない範囲内で最大の Q_j とすることが重要と考えられる。その範囲をどの程度とするかについては、議論の余地のあるところではあるが、今回の実験では、準備した実験装置のコンプレッサの能力の眼界でもある $Q_j = 35.5\text{ℓ/min}$ （風洞風量 Q_w の0.66%）を、「Uの分布を大きく崩さず、乱れのスケールを最大とできる吹出風量」とした。

3-4 JETの直径の変化が風洞気流に与える影響

図8に、3つのJET径、1mm、2mm、4mmの場合とJETがない場合のIの鉛直分布を示す（JET径1mmの場合は、径が、小さすぎたため、ノズルの抵抗が大きくなり、他の2つの径の場合と同じ吹出風量とすることができな

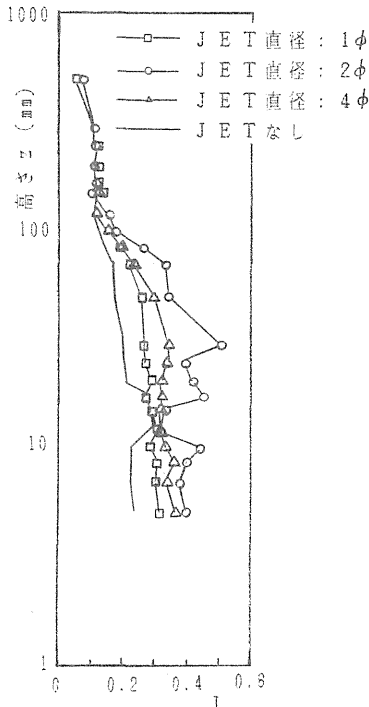


図8 JET吹出径の変化がUおよび
Iの鉛直分布に及ぼす影響

った）。また、図9には、それぞれの場合の $z = 15\text{mm}$ における乱れの統計量を示す。

直径2mmの時が、他の2つに比べ I 、 L_s 、 L_i が最も大であり、また、 F_p も最低の10Hzであるので、今回の実験では、この径を基準の直径とした。

3-5 JETの吹出方向の変化の影響

図10に、JETの吹出高さを変化させた時のIの鉛直分布を示す。また、図11には、 $z = 15\text{mm}$ の基準点における乱れの統計量を、図12には、各々のJET吹出高さ、ほぼ同じ高さにおける乱れの統計量を、それぞれ示す。

乱れの強さ I は、吹出高さ30mmの時（下から2番目の格子から吹出した時）、最も大となる。

L_s 、 L_i および F_p については、 $z = 15\text{mm}$ の基準高さは、吹出高さ30mmの時（下から2番目の格子から吹出した時）が、 L_s 、 L_i 最大、 F_p 最低、となっており、乱れのスケールが、最も大きくなっている。また、吹出高さと同じ高さで、測った場合も、下から2番目の格子から吹出した時（ $z = 30\text{mm}$ ）の F_p は、最低であり、 L_s 、 L_i は、最大となっており、下から2番目の格子から吹出した時が、最も大きな乱れのスケールが得られると考えられる。

- JET直径：1φ $F_p = 15.0\text{Hz}$, $L_s = 18.7\text{cm}$, $L_i = 2.6\text{cm}$
- JET直径：2φ $F_p = 10.0\text{Hz}$, $L_s = 32.0\text{cm}$, $L_i = 9.5\text{cm}$
- △ JET直径：4φ $F_p = 12.5\text{Hz}$, $L_s = 18.4\text{cm}$, $L_i = 3.0\text{cm}$
- JETなし $F_p = 17.5\text{Hz}$, $L_s = 18.3\text{cm}$, $L_i = 2.3\text{cm}$

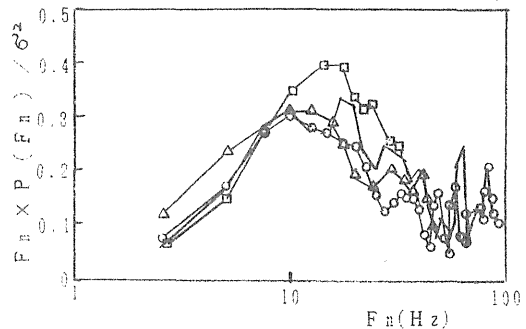
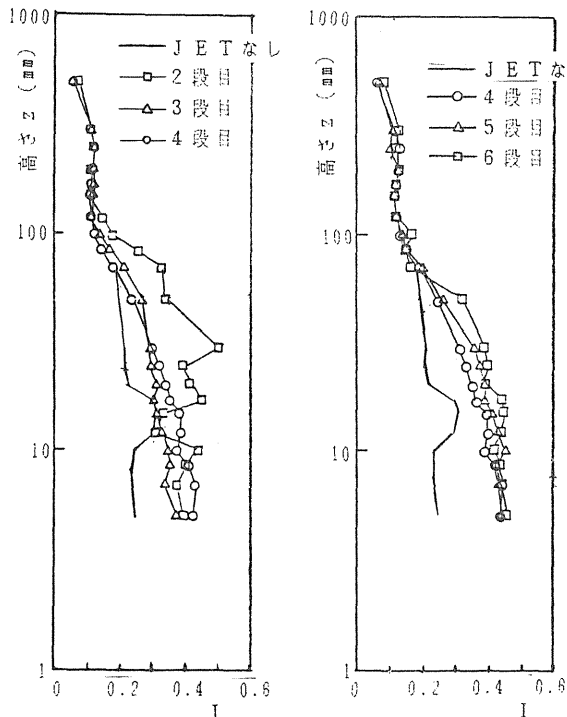


図9 JET吹出径の変化が乱れの
パワースペクトルに及ぼす影響

3-6 吹出方向の変化の影響

図13に、吹出方向を変化させた時と、JETがない時のIの鉛直分布を示す。また、図14には、吹出方向と乱れの統計量の関係を示す。

Iは、いずれの方向に、JETを吹出した場合も、吹出さない場合に比べ、同程度か、大となっている。Iが、最大となる方向は、JETを風下側水平方向に吹出した時であった。また、Lsが大となるのは、JETを上方向に吹出した時であり、Liが最大となるのは、JETを風下側水平方向に吹出した場合であった。ただし、Fpが、最低となる方向は、この方向ではなく、風下側斜め下であった。



(a) 吹出位置2~4段目 (b) 吹出位置4~6段目

図10 JET吹出位置の変化がIの鉛直分布に及ぼす影響

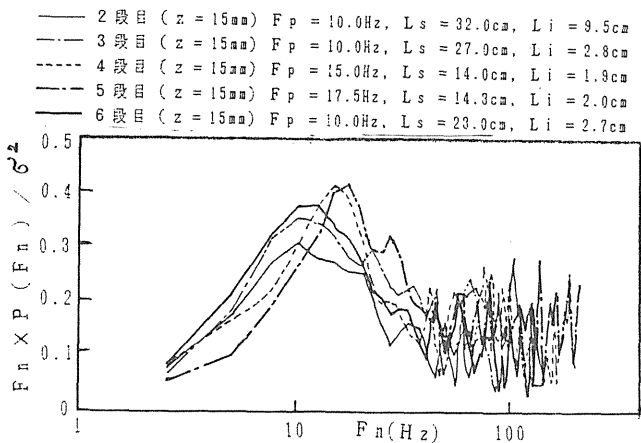


図11 JET吹出位置の変化が乱れのパワースペクトルに及ぼす影響

以上を総合すると、乱れのスケールを大きくする(I, Ls, Liを大きく、Fpを低くする)ためには、JETを風下側、それも水平方向に、吹出すのが適当と考えられる。

3-7 自然風との比較

乱れのパワースペクトルに関する本実験の結果(Exp # 2)と片山らが行った自然風についての実測結果との比較を図15に示す。

今回の実験結果のピークの波数nは、3 1/sec であるのに対し、実測結果のそれは、0.03 1/sec 程度であり、

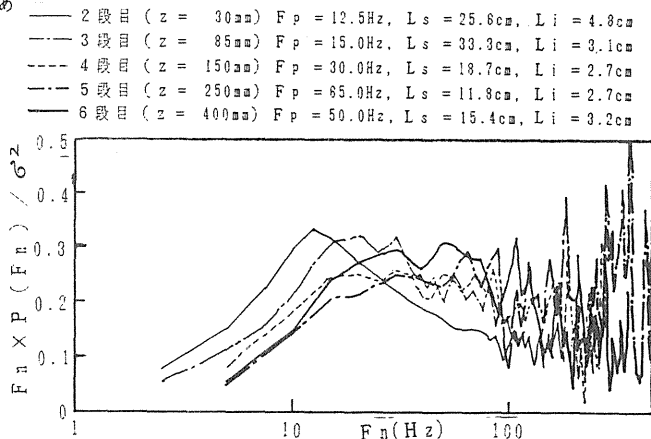


図12 JET吹出位置および測定位置の変化が乱れのパワースペクトルに及ぼす影響

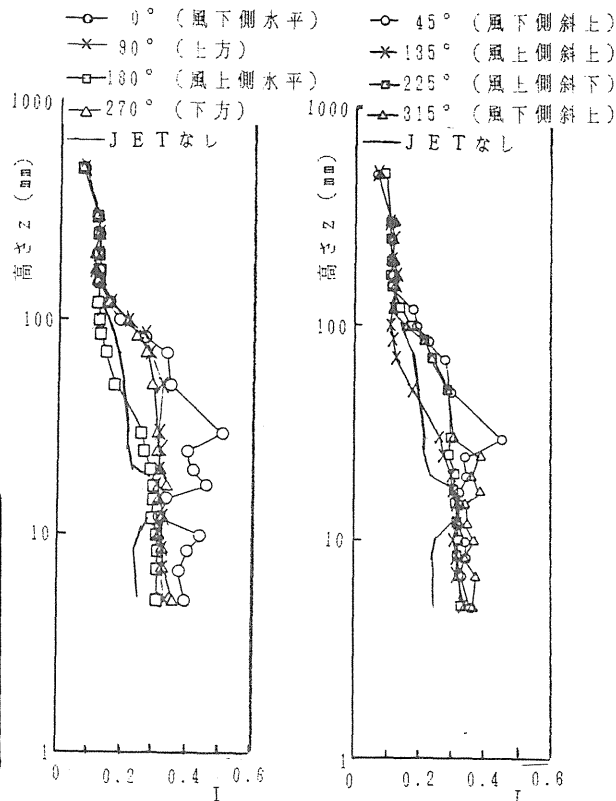


図13 JET吹出方向の変化がIの鉛直分布に及ぼす影響

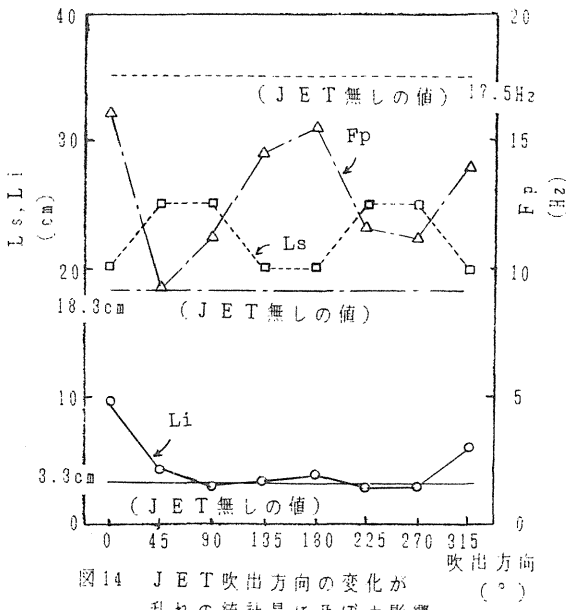


図14 JET吹出方向の変化が乱れの統計量に及ぼす影響

両者の比は、1000倍程度であった。すなはち、今回の実験は、1/1000程度の現象を再現していたと考えられる。

4. 結論

風洞吹出口に設置した乱流格子より、図2に示すようにして、JETを付加することによって、風洞気流の乱れの

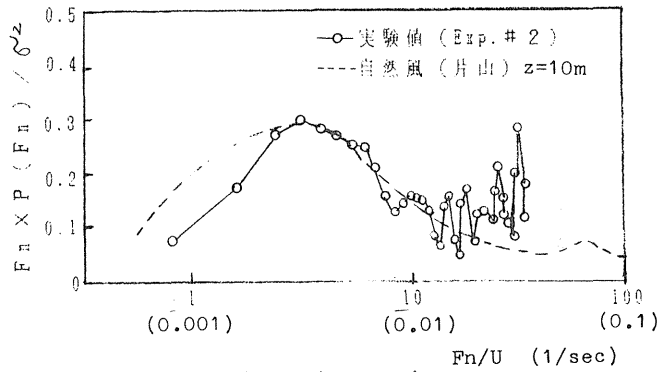


図15 乱れのパワースペクトルに関する自然風との比較

スケールを増大させることを試みた実験を行い、以下の結論を得た。

- ① JETを付加することにより、付加しない場合に比べ、乱れの強さ、スペクトルスケール、積分スケールは、いずれも大となり、また、スペクトルのピーク周波数も低くなった。すなはち、乱れのスケールは、大となった。
- ② 最もスケールが、大となるのは、JETを主流に対し、風下方向に水平に吹出した時であった。
- ③ 今回の実験において、再現された風洞気流の縮尺は、パワースペクトルに関する自然風との比較の結果、1/1000程度であろうと考えられる。

1. 序 単独高層建築物の風圧係数は構造耐力等に関連して取扱われているが、低層建物群では、居住環境評価のための換気量算定に風圧係数が重要である。

風圧係数算出には基準となる速度圧が必要である。低層建物群の場合周辺に同規模の建物があるため、建物軒高や、各風圧力測定孔高さ等の風速より基準速度圧を求めても、良好な結果は得られない。

本研究では、風洞模型実験により建物群上空の気流性状を調査し、境界層の構造を解明するためのデータを集積すること、更に風圧係数算出の際の基準速度圧測定点とした場合に、良好な結果が得られる可能性のある位置の検討を行うことを目的とする。

2. 実験概要 実験は横浜国立大学建築学科の密閉回流式境界層風洞（測定部断面 1,800mm×1,200mm）を用いる。風洞風速は 9 m/s である。気流の測定には熱線風速計を使用する。平均値はペンレコーダに出力して読み、乱れの強さは実時間相関器にて計算させる。同じ出力を A-D 変換し、コンピューターにて風速頻度分布、ガストファクター、ピークファクター、パワースペクトル等を計算させる。風圧力は歪ゲージ式圧力変換器を使用し、動歪測定器を通してペンレコーダに出力し、平均値を読む。得た風圧力は乱れを考慮した基準速度圧で除し風圧係数とする。

本実験では、建物群の気流に影響を与えると考えられる 4 因子を取り上げ、影響を調査する。各因子の変化内容を表 1 に示す。予備実験による

表 1 各因子の変化内容

建物群の長さ (模型化の範囲)	建物群としての形態		
	配列密度	配列形態	建物形態
建物群長さ 1 建物群長さ 2 建物群長さ 3 建物群長さ 4 建物群長さ 8	D/a=0.5 D/a=1.0 D/a=2.0 D/a=3.0	整列風向 0 度 整列風向 45 度 千鳥風向 0 度	集合度 1 集合度 4 集合度 9

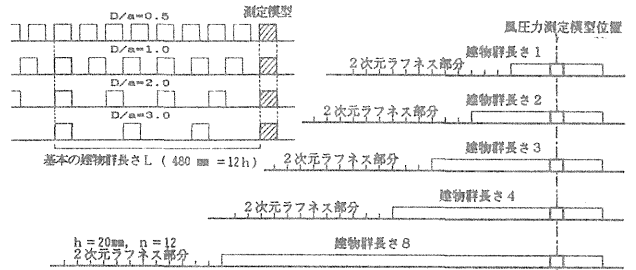


図 1 建物群設置状況と基本の群長さ

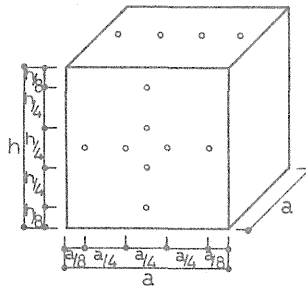


表 2 風圧力測定模型の寸法

	a	h
集合度 1	40 mm	40 mm
集合度 4	80 mm	40 mm
集合度 9	120 mm	40 mm

* 図示されているものは集合度 1

図 2 風圧力測定模型

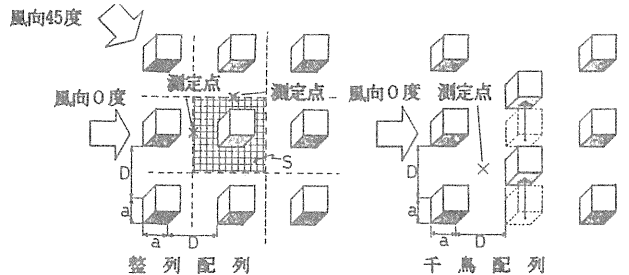


図 3 建物群密度の指標 D/a と配列

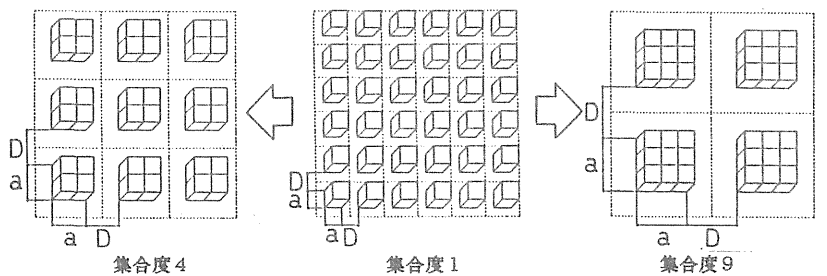


図 4 指標として用いた集合度の概念

と建物数個の変化では気流のプロフィールにほとんど影響は見られないため、建物群長さ（模型化範囲）は基本の建物群長さ（建物軒高の12倍の長さ）を建物群長さ1とし、この2、3、4、8倍の長さの建物群を用いて比較を行う。アプローチフロー形成は2次元ラフネス（ $h = 20$ mm、 $n = 12$ 、 $L/h = 8$ ）を用い、対数法則に従うプロフィールを使用する。模型縮尺を1/150程度と想定するとほぼ市街地に適合する粗度をもっている。各建物群長さともアプローチフロ形状はほぼ一致している。建物群設置状況と基本の建物群長さに関して図1に示す。風圧力測定模型とその寸法を図2、表2に示す。

建物群の形態に関しては、配列密度の指標として建物間隔 D （街路幅）と建物底辺長さ a との比 D/a を用いる。 $D/a = 0.5 \sim 3.0$ は地区建蔽率の約44~6%に相当する。配列形態は整列配列と千鳥配列を用いる。更に風向も考慮し、風向0度の場合の風向に直角な街路と、風向に平行な街路、及び風向45度の場合の比較を行う。建物群密度の指標と配列の関係を図3に示す。

個々の建物形態は数限りないが、今回は他の指標である建物群密度 D/a 、配列形態、建物軒高等を変化させずに建物形態を変化させ得る指標として集合度を用いる。図4に集合度の概念を示す。

3. 結果 建物群長さを変化させる実験の一例として、 $D/a = 2.0$ のプロフィールを図5に示す。建物群長さは1:2:3:4:8の比に従う。 $Z = 50 \sim 80$ mm ではプロフィールはほぼ一致するが、これより上空では境界層厚さ

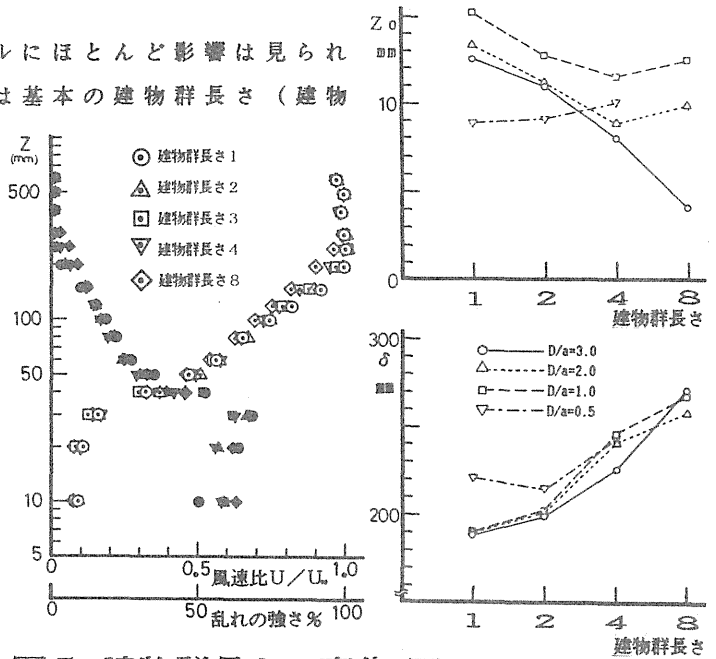


図5 建物群長さの変化 図6 粗度係数 Z_0 及び境界層厚さ δ ($D/a = 2.0$, 集合度1, 整列配列)

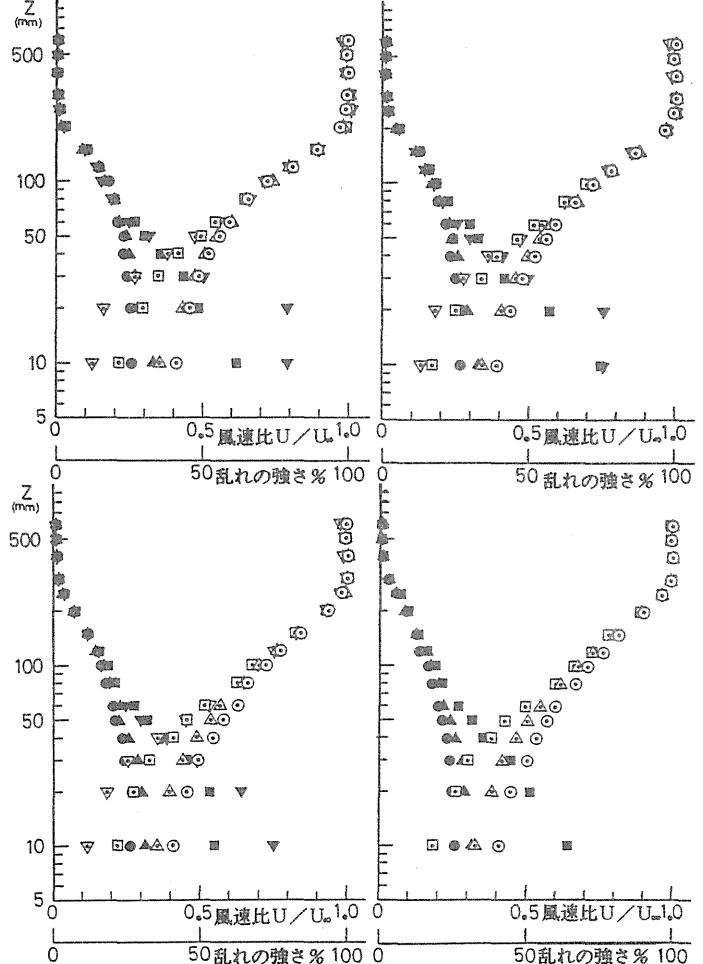


図7 建物群密度の変化 (建物群長さ1~8, 集合度1)

が変化する。他の D/a の場合にも同様である。対数法則の指標としての粗度係数 Z_0 と境界層厚さ δ を図 6 に示す。 Z_0 と建物群長さの関係は不明瞭であるが、 δ は建物群が長くなるほど厚くなる。また Z_0 に関しては D/a の影響がかなりあるが、 δ に関しては余りみられない。

建物群密度を変化させる実験の一例として、風向に平行な街路でのプロファイルを建物群長さごとに図 7 に示す。建物群長さ 1 では $Z = 80$ mm 付近、建物群長さ 2 では $Z = 120$ mm 付近、建物群長さ 4 では $Z = 150$ mm 付近、建物群長さ 8 では $Z = 200$ mm 付近で建物群密度の影響がみられなくなる。このことは影響を受ける高さが、建物群長さが長くなるほど高くなることを示している。

配列形態を変化させた実験の一例として $D/a=2.0$ の、プロファイルを図 8 に示す。建物軒高以下では配列形態の影響が大きい。建物群上空のプロファイルは、配列形態に係わらず一致する。これは他の D/a にもあてはまる。

建物形態を変化させた実験の一例として、 $D/a=2.0$ のプロファイルを図 9 に

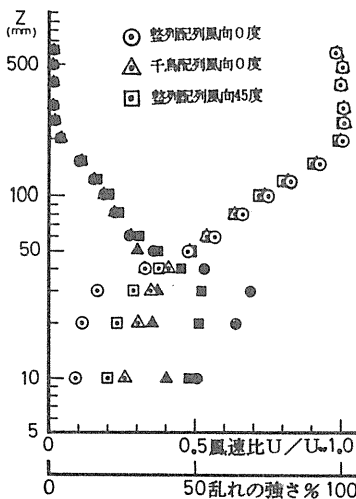


図 8 配列形態の変化 (建物群長さ 1, $D/a=2.0$, 集合度 1)

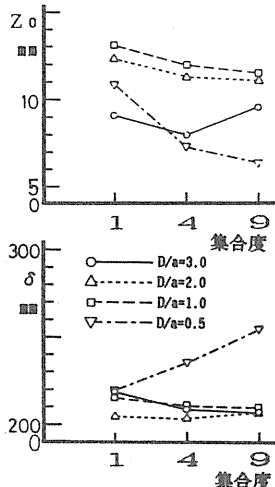


図 10 粗度係数 Z_0 及び境界層厚さ δ

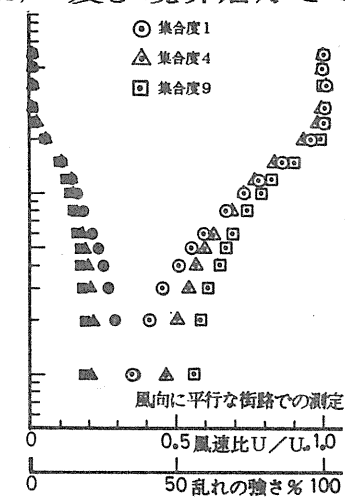
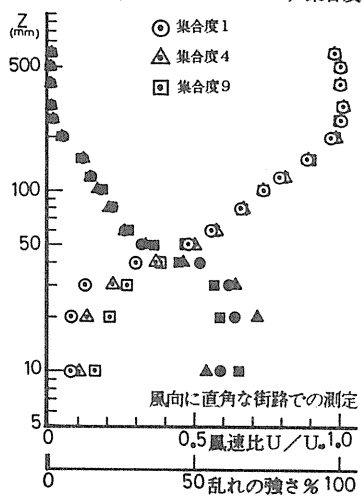


図 9 集合度の変化 (建物群長さ 3, $D/a=2.0$, 整列配列)

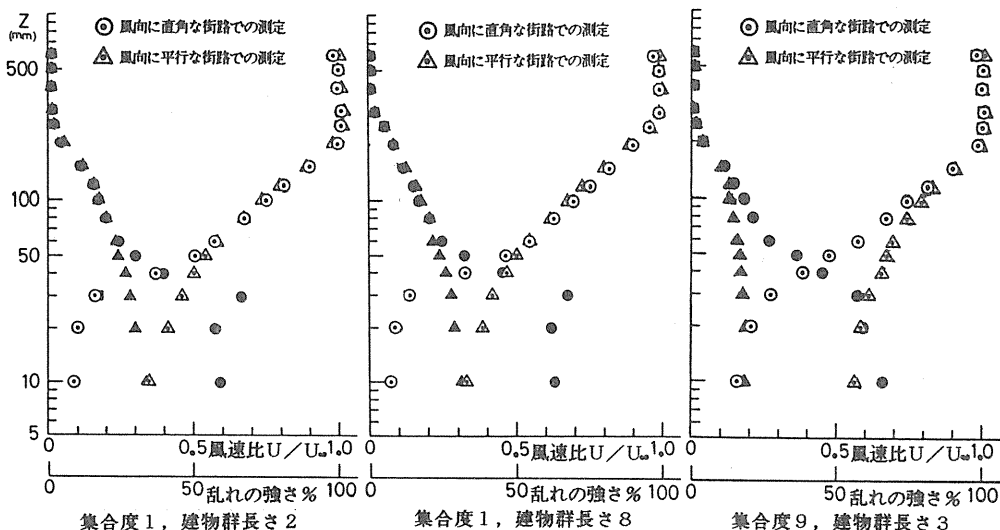


図 11 街路の方向性の変化 ($D/a=2.0$)

表 3 建物軒高に対する街路幅の比

	集	集	集
	合	合	合
	度	度	度
	1	4	9
$D/a=0.5$	0.5	1.0	1.5
$D/a=1.0$	1.0	2.0	3.0
$D/a=2.0$	2.0	4.0	6.0
$D/a=3.0$	3.0	6.0	9.0

示す。風向に直角な街路で測定したプロファイルは、建物群上空でほぼ対数法則に従い集合度に係わりなく一致する。これは他の D/a にもあてはまる。風向に平行な街路でのプロファイルは、集合度が増すに従い風速比も増大する。これは街路風の発達のためと考えられる。風向に直角な街路でのプロファイルより求めた粗度係数 Z_0 と境界層厚さ δ を図10に示す。 Z_0 は $D/a=0.5$ を除いて、集合度に係わらず D/a ごとにほぼ一定の値を示す。 δ も $D/a=0.5$ を除いて、集合度に係わらず 200 mm 強の一定値を示す。

街路の方向性の違いによる影響を示す結果として、風向に直角な街路と平行な街路でのプロファイルの比較を3例図11に示す。全て $D/a=2.0$ である。建物群長さ2、集合度1のプロファイル及び、建物群長さ8、集合度1のプロファイルは共に $Z=60$ mm 付近で街路の方向性の影響がみられなくなる。建物群長さ1、3、4でも同様である。他の D/a の場合では、影響がみられなくなる高さは多少異なるが、建物群長さの影響は受けていないと考えられる。集合度9での街路の方向性の影響を受ける高さは、 $Z=120$ mm 程度となる。これは風向に平行な街路での街路風の発達の影響

と考えられる。表3に建物軒高に対する街路幅の比を示す。斜線部の組み合わせでは街路風の発達が顕著である。このことより、街路風の発達には建物形態よりも、建物軒高に対する街路幅の影響が大きいと考えられる。

ガストファクター及び、ピークファクターに関して

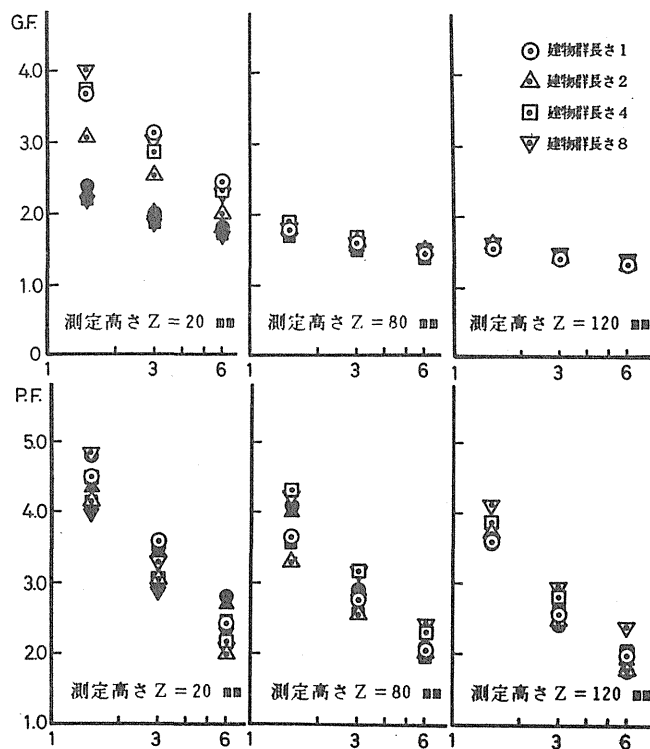


図12 ガストファクター及びピークファクター ($D/a=2.0$)

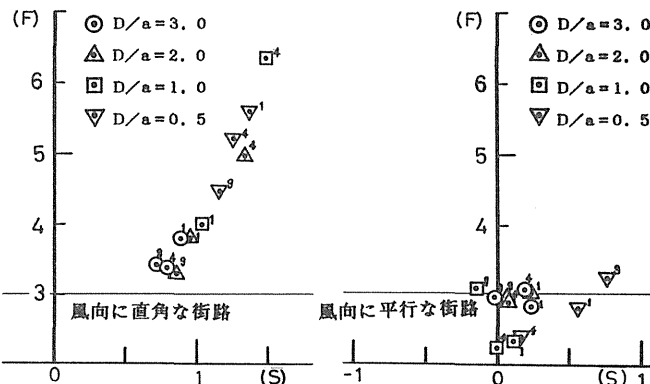


図13 街路風の発達に伴う風速頻度分布の歪度 (SKEWNESS) と偏平度 (FLATNESS)

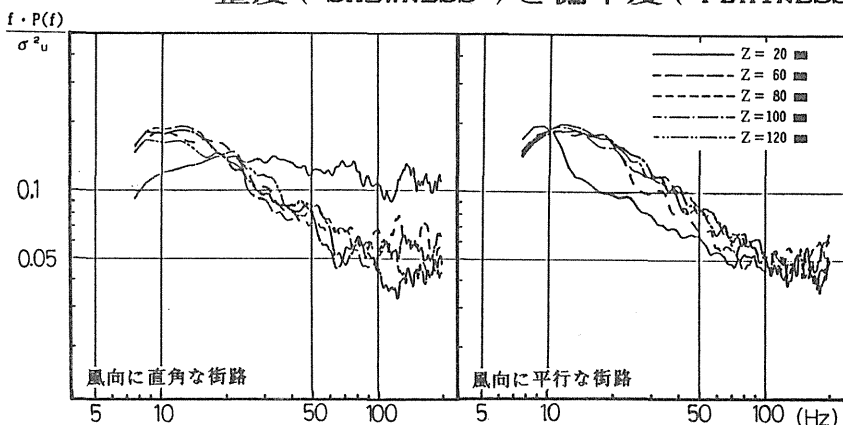


図14 パワースペクトル (建物群長さ2, $D/a=2.0$)

図12に測定高さ $Z = 20, 80, 120$ mmの値を示す。白抜きの記号は風向に直角な街路での測定。黒塗りの記号は風向に平行な街路での測定である。ガストファクターは、 $Z = 20$ mmにおいて街路の方向性の影響を受けており、建物群長さの影響も若干みられる。 $Z = 80, 120$ mmでは区別が付かない。ピークファクターに関しては傾向がみられない。

街路風の発達に伴う風速頻度分布の変化を調査するために、分布形状の指標歪度(SKEWNESS)と偏平度(FLATNESS)の関係を図13に示す。 $S = 0, F = 3$ が正規分布値である。風向に直角な街路での値は、街路幅が広いほど正規分布に近づく。風向に平行な街路での値は、街路風が発達する条件に近いほど正規分布に近づくが、風向に直角な街路ほど顕著ではない。

パワースペクトルの各測定高さでの比較を図14に示す。街路の方向性に係わりなく、測定高さによる区別が可能であるものは $Z = 20$ mmの値のみである。

4. 気流性状のまとめ

- ・ 建物群長さの影響は主に境界層厚さに現れる。軒高の2倍付近のプロフィールには余りこの影響がない。
- ・ 建物群密度の影響は、建物軒高以下で支配的である。建物群上空への影響高さは、建物群長さによって変化する。
- ・ 配列形態の影響は建物軒高以下に大きい。

集合度の影響は風向に平行な街路で街路風が発達する。風向に直角な街路での建物上空のプロフィールは影響を受けない。

街路の方向性の影響は軒高以下でかなり大きい。また影響を受ける高さは、集合度1では建物軒高の2倍程度であり、建物群長さによって変化しない。集合度が増加すると街路風が発達し、この影響高さは不明瞭となる。

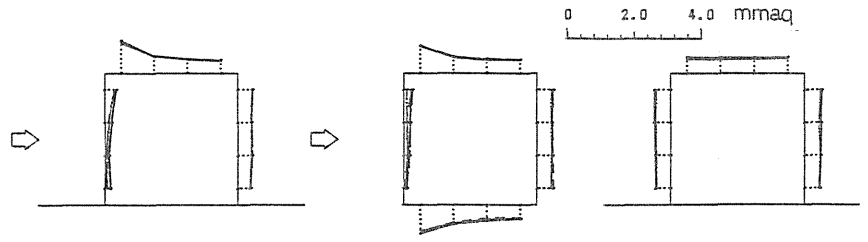
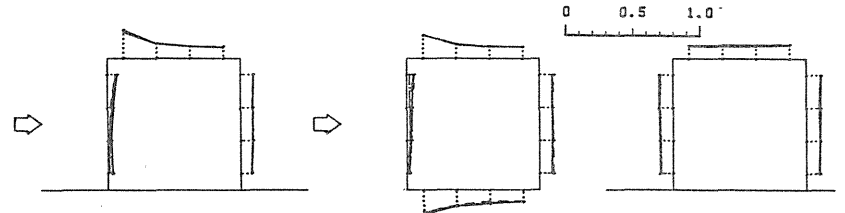
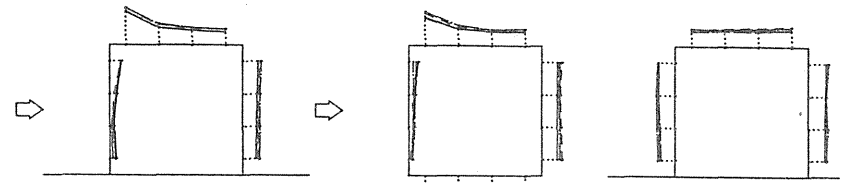


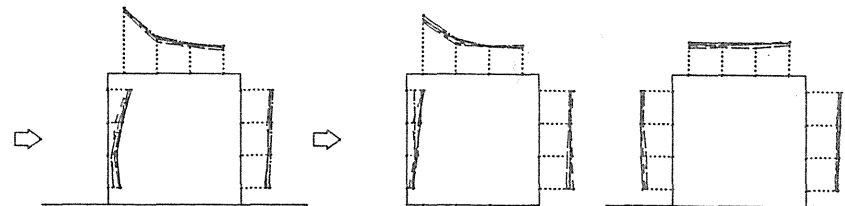
図15 風圧力分布 ($D/a=2.0$, 整列配列, 集合度1)



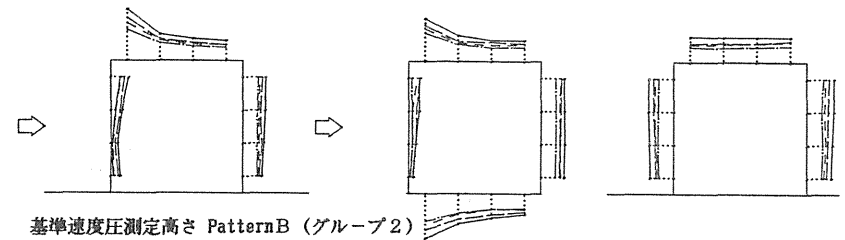
基準速度圧測定高さ $Z = 500$ mm (グループ1)



基準速度圧測定高さ $Z = 150$ mm (グループ1)



基準速度圧測定高さ $Z = 80$ mm (グループ1)



基準速度圧測定高さ PatternB (グループ2)

図16 風圧係数分布 ($D/a=2.0$, 整列配列, 集合度1)

5. 風圧係数 風洞実験での模型化範囲が異なる場合に、基準速度圧を求める可能性として、風速プロファイルにおける街路の方向性の影響が無くなる高さ(グループ1)と、建物群密度の影響が無くなる高さ(グループ2)での基準速度圧を用いて風圧係数の検討を行う。今回用いた基準速度圧高さを表4に示す。風圧力分布の一例(D/a=2.0)を図15に示す。風圧力は模型化範囲に係わらずほぼ一致している。今回はこれを前提条件として、模型化範囲が変化してもどの程度一致しているかを風圧係数分布の評価の尺度とする。図16に風圧係数分布をグループ1より3例、グループ2より1例示す。全てD/a=2.0である。

Pattern Bはグループ2の中で一番良好であるが、明らかにばらつきが大きい。グループ1の3つは絶対値が異なるため、このままでは評価できない。そこで式1、2を用いて各測定点での風圧係数のばらつきを変動係数として各面ごとの平均を求めた。更に同様の手法にて求めた風圧力の変動係数との比として図17に示す。これによるとグループ1は2に比べて良好であり、境界層の外である500mmを除けば、Z=80~100mmにて基準速度圧を算出した場合が、比較的良好な結果が得られている。また他のD/aの場合も同様である。

6. 風圧係数のまとめ

- 本研究では風圧係数分布を視覚的に判断するだけでなく、数量化する可能性を一例として示した。
- 基準速度圧は、模型化範囲に係わらず一定の高さで求めた場合の方が良好な結果が得られた。
- 低層建物群での基準速度圧を、軒高の2倍~2.5倍程度の位置で求める可能性が考えられる。

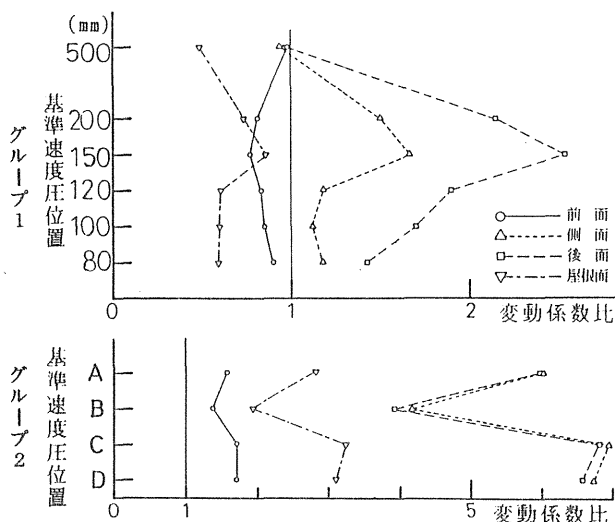


図17 風圧力分布の変動係数に対する風圧係数分布の変動係数(変動係数比)

表4 各建物群長さで風圧係数算出に用いた基準速度圧高さ

建物群の長さ	建物群長さ1	建物群長さ2	建物群長さ4	建物群長さ8
グループ1	500mm	500 mm	500 mm	500 mm
	200mm	200 mm	200 mm	200 mm
	150mm	150 mm	150 mm	150 mm
	120mm	120 mm	120 mm	120 mm
	100mm	100 mm	100 mm	100 mm
グループ2	80mm	80 mm	80 mm	80 mm
	Pattern A	80 mm	100 mm	120 mm
	Pattern B	100 mm	120 mm	150 mm
	Pattern C	80 mm	120 mm	150 mm
Pattern D	80 mm	100 mm	150 mm	200 mm

C_{LP} : 各点の風圧係数

式1 平均値 $A_p = \sum_{L=1}^n C_{LP} / n$ m : 各面の測定点数
 n : 建物群の数

式2 変動係数 $MT = \frac{m}{\sum_{P=1}^m} \left(\sqrt{\sum_{L=1}^n (C_{LP} - A_p)^2 / n} / |A_p| \right) / m$

参考文献

- 「建築物荷重指針・同解説」日本建築学会
1981年 第6章 風荷重
- 勝田 高司、後藤 滋；「建物周囲条件の換気通風に及ぼす影響」日本建築学会論文報告集 No.53 1956
- 石崎 滋雄、光田 寧；「暴風時における風圧力の変動について」日本建築学会論文報告集 No.150 1986 - 8

序

本研究では、まず最初の課題として風害の人体影響に関して最も直接的な力学的影響を人間が風から受ける抗力測定により解析する。この際、人体への力学的影響は風の乱れ性状の要素が、大きく係わっていることが明らかにされる。従って風洞模型実験により風害の人体影響を検討する場合には、風洞模型においても、風の乱れ性状を精密に再現し、最大瞬間風速値等の風の乱れ性状を正確に模型化することを必要とする。本研究では2番目の課題として、こうした風害の人体影響を風洞模型実験で考察する際に必要となる最大瞬間風速の風洞実験における再現性について考察する。

1. 大型風洞による歩行時の抗力に関する実験

1.1 実験概要

- (1) 風洞 (財)日本自動車研究所所属の実車風洞。
- (2) 抗力・揚力測定装置の応答性

風洞床面の一部(平面寸法3m×4m)に設置された大型天秤(島津制作所製)。抗力(水平力)と揚力の測定が可能であり、諸仕様を表1-1に示す。図1-1は、事前に装置の応答性をチェックするため、無風時において人の跳躍・歩行によって起こした測定波形である。揚力波形は数Hzの振動が加わっており、歩行等の動的な現象の測定が不可能と思われるので、抗力の測定のみを行う。

- (3) 実験方法 a) 風洞風速 $U = 9, 13, 17$ m/sの下で、表1-2に示すような実験項目について、被験者の歩行時の抗力を測定記録

1 節 記号表

- F : 抗力(水平力) [kgf]
- C_d : 抗力係数
- U : 被験者の受ける風速 [m/s]
(高さ1.0~1.5mにおける平均風速=実験風速)
- A : 被験者の受風面積 [m²]
- Suffix F : 向風の場合
 S : 横風の場合
 W : 歩行の場合
- \wedge (ダッシュ)付 : 非一様流の場合
(例, F_{sw}^{\wedge} : 非一様流・横風歩行時の抗力)
- \wedge 付 : 最大値
付 : 平均値
- F_{dif}^{\wedge} : 非一様流、任意風速での歩行時における最大抗力値と最小抗力値の差 [kgf]
(図3-2-11(i)参照)
- F_{dif} : 一様流 $U = 9$ m/sの歩行(持物無)における平均抗力差(図3-2-11(ii)参照) [kgf]
- ρ : 空気密度 [kgf·s²/m³]
- ϕ : フェンスの遮蔽率 [%]
- OUT : 非一様流中(フェンス設置時)の歩行で、フェンス内弱風域からフェンス外強風域へ歩行するもの その逆がIN。

表1-1 抗力・揚力測定装置の仕様

揚力	
光電変換素子利用 電磁力自動平衡方式	
測定範囲・精度	50 kgf ± 2% 100 ± 1.5 200 ± 1.5
抗力(水平力)	
ストレインゲージ利用 ロードセル方式	
測定範囲・精度	50 kgf ± 2% 100 ± 1.5 300 ± 1.5

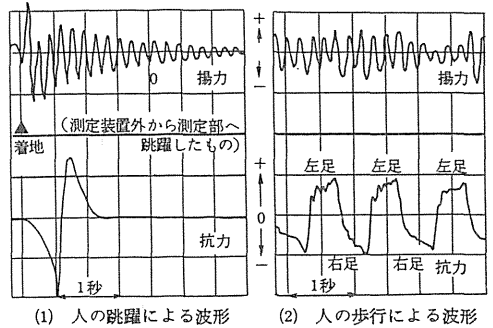


図1-1 抗力測定波形(応答性チェックのため)

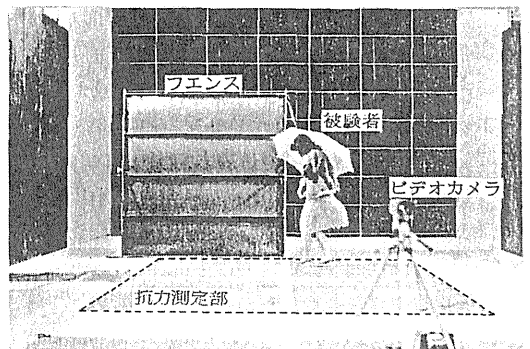


写真1-1 実験状況(非一様流の歩行)

する。表中、非一様流とは、フェンス(遮蔽率 $\phi = 50\%$ または $\phi = 100\%$) を設置することにより、図1-2に示すような風速分布に変化をつけたもので、フェンス後方1mの位置に設けた歩行ライン上を被験者が歩く(写真1-1)。

b) 被験者の歩行状況をビデオカメラで撮影記録、また、被験者に対し歩行難易に関するアンケートを行う。

(4) 年齢19~27才の男女4名で、表1-3に身長・体重を示す。服装は男性がズボン+シャツ、女性がスカート+ブラウスである。

1.2 一様流中の歩行における抗力測定結果

一様流中の歩行において測定された抗力波形の例を図1-3に示す。一様流中の歩行における抗力の大きさについて、あらかじめ測定した立位時の抗力に対する比を用いて結果を表示する。すなわち、例えば向風の場合、歩行における抗力の平均値 \overline{F}_{FW} と最大値 \hat{F}_{FW} を求め(図1-3参照)それらをおのこの被験者の同じ風速の向風立位時の抗力 F_F で除した値 \overline{F}_{FW}/F_F 、 \hat{F}_{FW}/F_F により結果を表わす。これらを図1-4、図1-5に示す。

(1) 図1-4は向風歩行における抗力の変化である。持物の場合、男女とも $\overline{F}_{FW}/F_F = 1$ 、 $\hat{F}_{FW}/F_F = 1.4$ ($U = 9\text{m/s}$) ~ 1.2 ($U = 13, 17\text{m/s}$) になり、向風立位時に比べ歩行時の抗力が2~4割大きいことを示す。持物傘においては、 $\overline{F}_{FW}/F_F = 1.1 \sim 1.4$ 、 $\hat{F}_{FW}/F_F = 1.8 \sim 1.5$ で、持物無のときの約1.2倍の値になっている。

(2) 横風歩行における結果を図1-5に示す。持物無の場合、 $\overline{F}_{SW}/F_S = 1.2$ 、 $\hat{F}_{SW}/F_S = 1.4$ となり、平均値で約4割、最大値で約4割程度立位時より歩行時の方が抗力が増大している。持物傘の場合、 $U = 9\text{m/s}$ におい

表1-2 実験種類

実験風速		$U = 9\text{m/s}$		$U = 13\text{m/s}$		17m/s	
フェンス	実験項目	持物無	持物傘	持物無	持物傘	持物無	
一様流	無	向風-立位	★	★	★	★	★
		横風-立位	★	★	★	★	★
	無	向風-歩行	★	★	★	★	★
		追風-歩行	★	★	★	★	★
		横風-歩行	★	★	★	★	★
非一様流	$\phi = 50\%$	横風-歩行	★	★	★	★	★
	$\phi = 100\%$	横風-歩行	★	★	★	★	★

★: 実験を行ったもの

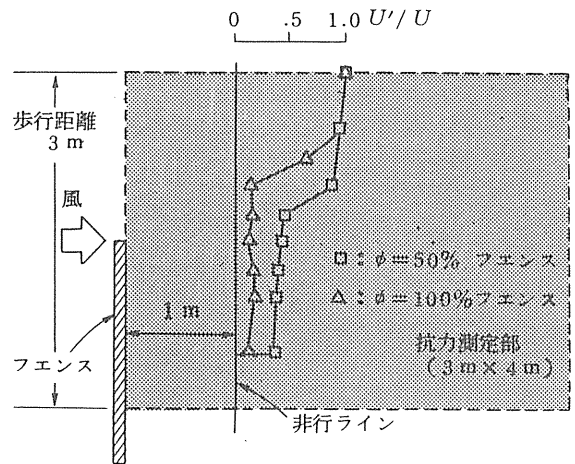


図1-2 非一様流の水平風速分布(測定高さ1m)

表1-3 被験者

被験者	性・歳	身長・体重
A	女(19)	149 cm, 38.5 kg
B	(19)	158, 47.5
C	(21)	164, 52.0
D	(21)	167, 60.0
E	男(22)	171, 61.0
F	(24)	171, 62.0
G	(23)	173, 58.0
H	(27)	180, 63.0

服装-女: スカート, 男: ズボン

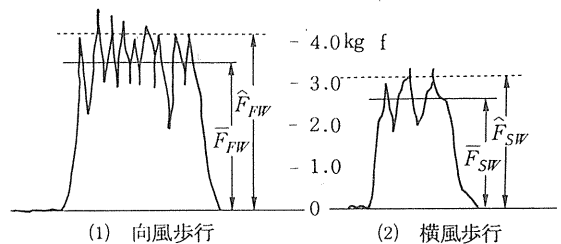


図1-3 一様流中の歩行における抗力測定波形の例

て $\overline{F}_{sw}/F_s=1.8$ 、 $\widehat{F}_{sw}/F_s=2.1$ であるが、 $U=13$ m/sになると、傘で顔を隠したり、風圧で傘の受風面積が減少すること等により、 $U=9$ m/sの場合に比べ値が低下する。

1.3 非一様流中の歩行における抗力の変化

フェンスを設置することにより風速分布に変化をつけた非一様流中の歩行における抗力測定波形の例を図1-6に示す。ビデオによる観測記録から被験者の歩行動作と抗力波形とを対応づけ、波形を平面図上に書き改めたものが図1-7~図1-10である(女性被験者Bについて)。図中のスクリーンで示したものは、「計算による抗力分布」である。これは、風速分布(図1-2)と各被験者の C_{Ds} 、 A_s を用いて求めた抗力値 F_s に、図1-5における \overline{F}_{sw}/F_s を乗じて計算した歩行時に生ずると予想される平均抗力分布である。

(1) 図1-7は $\phi=50\%$ フェンス設置時、 $U=9$ m/sの歩行における抗力 F'_{sw} の変化である。抗力 F'_{sw} は計算による抗力分布に近い変化をしている。被験者の歩行難易は「歩きにくい」である。なお、歩行難易は被験者の感想、およびビデオ記録から実験者が観察したデータに基づく。

(2) 図1-8は $\phi=50\%$ フェンス設置時で風速が $U=13$ m/sと高くなった場合の結果である。この場合、フェンス内外の風速差は約7.1 m/sである。風速が強→弱になる場合とその逆の場合とでは歩行への影響が異なる。“OUT”の場合(フェンス内弱風域からフェンス外強風域へ歩行するもの)、▲7で右足を風下側に踏み出しているため△6(右足)~▲7(左足)での抗力変化が大きい。これに対し“IN”の場合における抗力 F'_{sw} は計算による抗力分布と大差ない変化をしている。歩行難易は「意志どおり歩けない」

である。

(3) $\phi=100\%$ フェンス設置の場合、 $U=13$ m/sの歩行における抗力 F'_{sw} の変化を図1-9に示す。フェンス内外の風速差は約9.0 m/sと

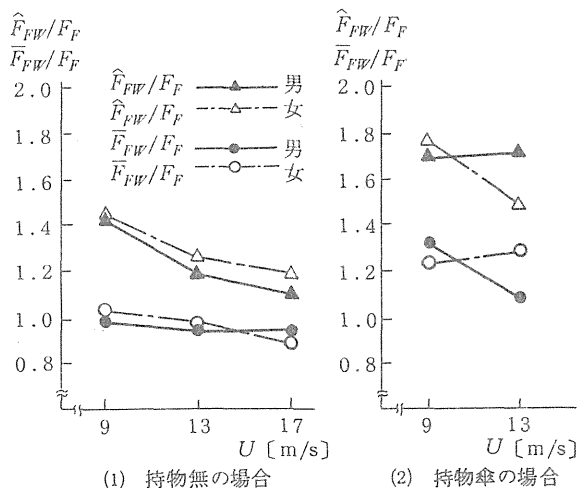


図1-4 一様流、向風歩行における抗力の変化

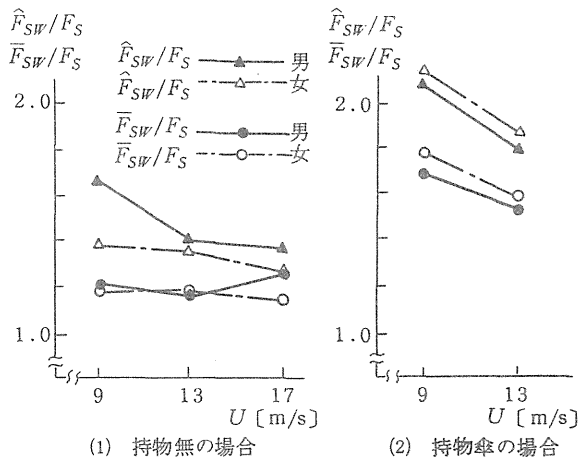


図1-5 一様流、横風歩行における抗力の変化

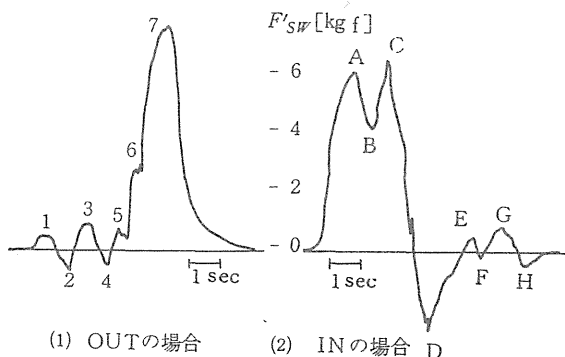


図1-6 非一様流中の歩行における抗力測定波形の例 (図中の番号は図1-9におけるものと対応)

$\phi=50\%$ フェンス設置時より大きくなっている。OUTの場合、 $\triangle 6$ (右足)~ $\blacktriangle 7$ (左足)で強風域に入り、 $\blacktriangle 7$ (左足)で強風に耐えているため $\blacktriangle 7$ での抗力が大きく出ている。歩行難易は「歩行困難」である。INの場合、 $\square C$ (右足)~ $\blacksquare D$ (左足)にかけての抗力が $F'_{sw}=6.2\text{kgf}(\square C)\sim-2.4\text{kgf}(\blacksquare D)$ と極端に大きく変化しており、歩行への影響はOUTよりもINにおけるほうが大きいものと思われる。筆者らの体験から言えば、INの場合、フェンス外から内に入ると急に風圧がなくなり体がよるめいてしまう感じである。 $\phi=50\%$ フェンス設置時では、このようなことはさほど顕著ではない。

以上女性被験者Bについての実験結果を述べたが、他の被験者に関してもほぼ同様な傾向が認められた。

(4) 持物傘の歩行による抗力の変化を図1-10に示している。ただし、 $U=9\text{m/s}$ の持物無の場合と比較して結果を表す。OUTの場合(同図(1))、持物傘の歩行による抗力 F'_{sw} ($-\triangle-\blacktriangle-$)は、持物無の場合($-\circ-\bullet-$)より、 $\triangle 6$ (右足)~ $\blacktriangle 7$ (左足)での変化が大きい。INの場合(同図(2))、持物傘の歩行における抗力は持物無のそれより大きくずれ、 $\blacktriangledown 6$ (右足)~ $\blacktriangledown 7$ (左足)では歩行が一時中断している。歩行難易は、「歩行困難」であり、傘をさした場合は、 $U=9\text{m/s}$ においても風の影響が大きいことが考察される。

1.4 抗力変化と歩行難易の関係

フェンス設置の非一様流中での歩行における抗力測定結果より、被験者の歩行難易の程度は、抗力変化の大小(最大と最少の抗力差)に現れることが多い(前出図1-8、図1-9)。そこで、歩行難易を抗力変化の割合によって定量化することを、以下のように

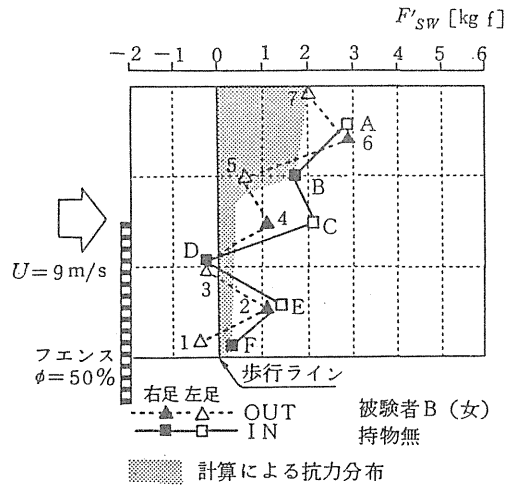


図1-7 非一様流中の歩行における抗力
< $\phi=50\%$ フェンス設置時、 $U=9\text{m/s}$ >

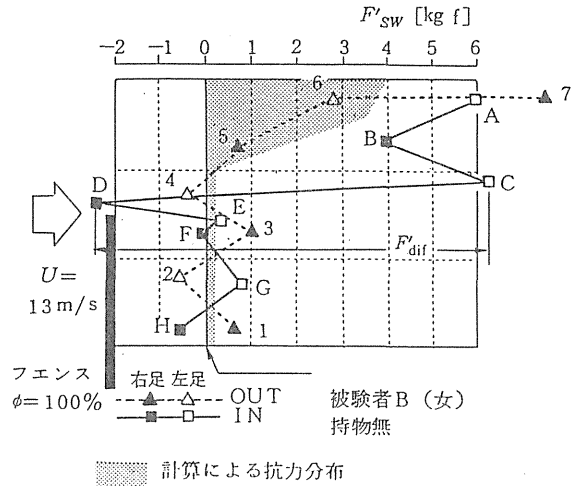


図1-8 非一様流中の歩行における抗力
< $\phi=50\%$ フェンス設置時、 $U=13\text{m/s}$ >

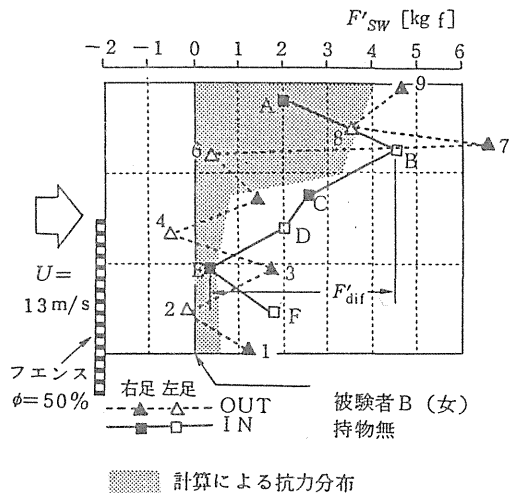


図1-9 非一様流中の歩行における抗力
< $\phi=100\%$ フェンス設置時、 $U=13\text{m/s}$ >

試みている。

図1-11(あるいは図1-8~9)に示すように、フェンス設置時の歩行による最大抗力値と最小抗力値の差を F'_{air} とし、一様流中、 $U=9\text{ m/s}$ の横風歩行における最大と最少の平均抗力差を \overline{F}_{air} とすると、 $F'_{air}/\overline{F}_{air}$ の値が図1-12、図1-13に示すように歩行難易の程度を表す指標としてふさわしいことがわかった。

(1) 図1-12に $\phi=50\%$ のフェンス設置時における $F'_{air}/\overline{F}_{air}$ の値を示す。 $U=9\text{ m/s}$ の場合(図1-12(1))、OUT、INとも $F'_{air}/\overline{F}_{air}=2$ (男性) \rightarrow 「ほぼ正常」、 $F'_{air}/\overline{F}_{air}=4$ (女性) \rightarrow 「歩きにくい」、となっており、 $U=13\text{ m/s}$ になると(同(2))、男性は $F'_{air}/\overline{F}_{air}=3\rightarrow$ 「歩きにくい」、女性は $F'_{air}/\overline{F}_{air}=6\sim 8$ の値を示し「意志どおり歩けない」 \sim 「歩行困難」になる。さらに $U=17\text{ m/s}$ では(同図(3))、 $F'_{air}/\overline{F}_{air}=4\rightarrow$ 「意志どおり歩けない」になる(男性のデータのみ)

(2) $\phi=100\%$ のフェンス設置時の場合(図1-13)、 $U=9\text{ m/s}$ における女性は、 $F'_{air}/\overline{F}_{air}=3\sim 6\rightarrow$ 「歩きにくい」 \sim 「意志どおり歩けない」となり、その値は $\phi=50\%$ のフェンス設置時、 $U=13\text{ m/s}$ の場合の値に近い

(図1-12(2)と図1-13(1)とを比較)。 $U=13\text{ m/s}$ になると(図1-13(2))、 $F'_{air}/\overline{F}_{air}=8\sim 12$ (女性の場合)の高い値を示し、「歩行困難」になってくる。また男性でも $U=17\text{ m/s}$ では $F'_{air}/\overline{F}_{air}=5\sim 9$ の値を示し、「意志どおり歩けない」 \sim 「歩行困難」になる。

(3) OUTとINとを比較すると、 $\phi=50\%$ フェンス設置時にはあまり変わらないが、 $\phi=100\%$ フェンス設置時には全体的にINのほうが高い $F'_{air}/\overline{F}_{air}$ を示し、1-4(3)項において述べたようにINにおけるほうが歩きにくい。

(4) 図1-12、13より歩行難易の程度と $F'_{air}/\overline{F}_{air}$ とは概略次のように対応するものと考えられる。

- ・「ほぼ正常」 $\dots\dots\dots F'_{air}/\overline{F}_{air}>2$.
- ・「歩きにくい」 $\dots\dots\dots F'_{air}/\overline{F}_{air}=3\sim 4$.
- ・「意志どおり歩けない」 $\dots\dots\dots F'_{air}/\overline{F}_{air}=5\sim 8$.
- ・「歩行困難」 $\dots\dots\dots F'_{air}/\overline{F}_{air}<8$.

1.5 まとめ

ここで報告した歩行時の抗力測定の実験結果からおもな結果を次にまとめる。

(1) 歩行時における抗力は、静止(立位)時の抗力と比較して約1.2~1.4倍の値(最大値)になる(向風および横風の場合)。

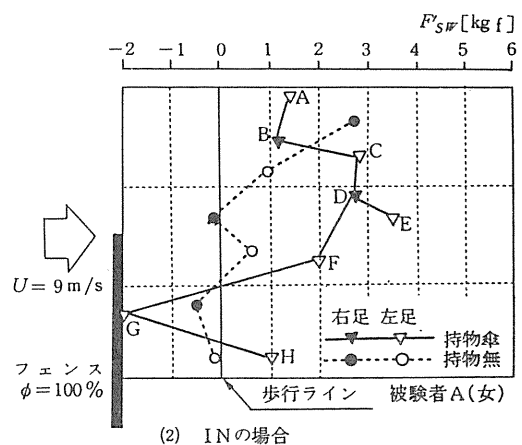
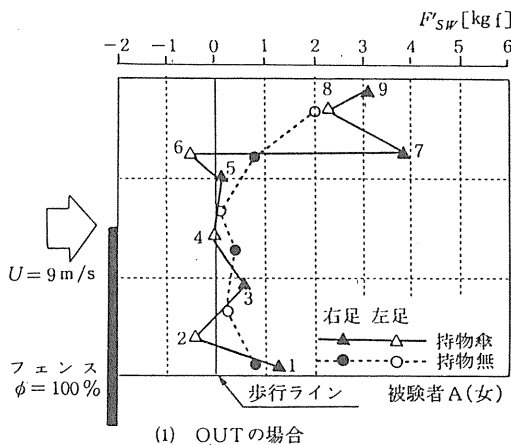


図1-10 非一様流中の歩行、持物傘と無の場合との比較

(2) 風速変化域での人間の歩行難易の程度は、抗力変化の大小に現れており、抗力変化の度合を用いて歩行難易を定量化でき得ることを示した。

2. 接近流の乱れのスケールの影響および

最大瞬間風速の再現性について

2.1 相似則について

風洞内の Approaching Wind を自然風と相似にするための条件として一般的に以下の3つがあげられる。

i) 平均風速 U の鉛直分布の相似、ii) 乱れの強さ $\sqrt{u'^2}/U$ の鉛直分布の相似、iii) 乱れのスケール(の分布)の相似。

本研究においては特に iii) の乱れのスケールすなわちスペクトルスケールの相似の影響に注目し、スペクトルスケールの相似を満たした風洞実験と満たしていない実験の両方を行ないそれを比較検討した。

2.2 野外実験

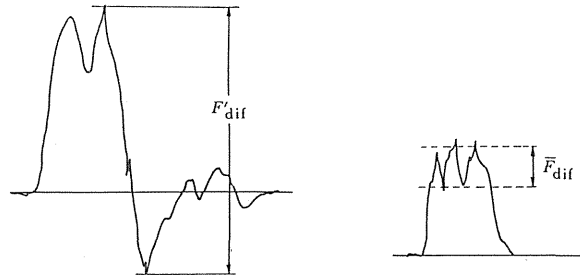
(1) 測定期間および測定場所

1984年2月、東京工芸大学グラウンド。

(2) 野外模型

一辺1.8m(以下Hとする)

(3) Approaching Wind および模型後流の測定



(1) 非一様流 (9, 13, 17 m/s) の場合 (2) 一様流 $U=9$ m/s の場合

図1-11 抗力波形の変化

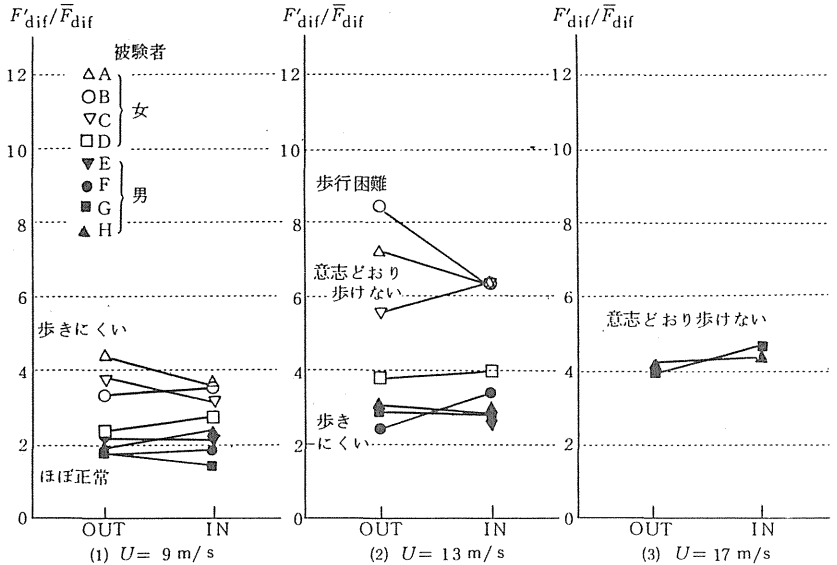


図1-12 抗力変化と歩行難易との関係
< $\phi=50\%$ フェンス設置の場合>

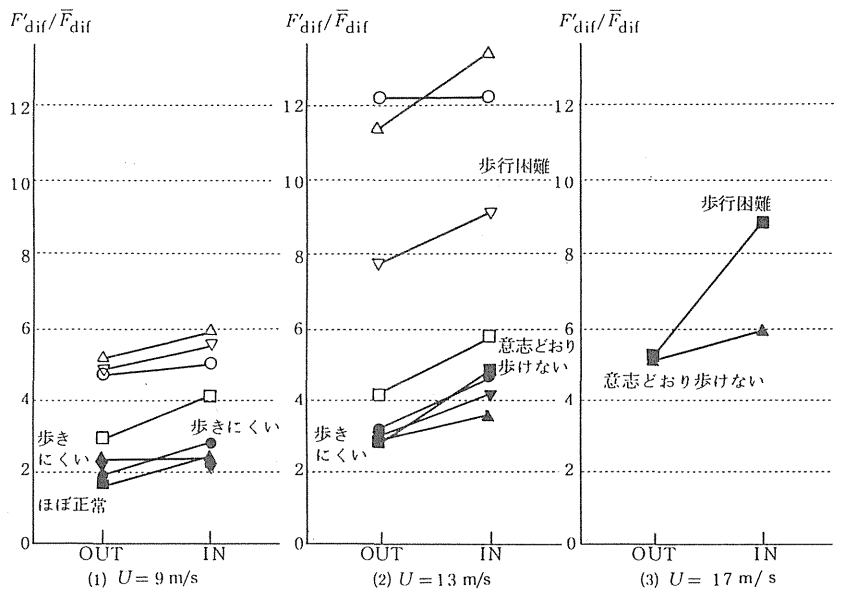


図1-13 抗力変化と歩行難易との関係
< $\phi=100\%$ フェンス設置の場合>

図2-1のマスト位置において高さ2~10mまで2mおきに三杯型風速計、高さ10mに風向計を設置。更にF点にも超音波風速計を設置し、模型後流の測定高さ(H/2およびH)と同じ高さのApproaching Windを測定。模型後流の測定点はA~E点の高さH/2およびH。また、野外実験時のマスト位置10mの平均風速は約5m/sであった。

(4) データ収録および解析方法

データはデジタルデータレコーダーに収録(サンプリング間隔100msで約30分間収録)。スペクトル解析にはFFT法を用いた(最小周波数 $\Delta f=0.0025\text{Hz}$ でウィンドウ処理のBand幅は $60 \times \Delta f=0.15\text{Hz}$)。また最大瞬間風速の検討には、約30分間のデータを16分割(1分割のデータ数が1024個)し、それぞれの時間毎(約2分)の中で算出した16個のピーク・ファクター(P.F)およびガスト・ファクター(G.F)の分布を用いた。

2.3 風洞実験

- (1) 風洞 東大生研所属の境界層型風洞。
- (2) 風速計 タンデム型熱線風速計を使用。
- (3) 境界層 人工芝と長方形フェンスにより作成する。図2-2、2-3に示すCASE 1とCASE 2の2種類の分布を作成。これらの分布の野外実験との対応については2.4.1で述べる。

(4) 模型 野外模型の1/40(一辺4.5cm), 1/20(一辺9cm)の2種類の立方体模型。

(5) 測定点 野外実験と同様(図2-1)。

(6) 解析方法

スペクトル解析等に用いるデータはサンプリング間隔3msで4096個採取される。このサンプリング間隔は野外実験に対する時間スケールを考慮して決定されるものである。また瞬間風速の極値解析は3ms.1024個のサンプリング(観測時間約3秒, 実物

では約2分に相当)を50回繰り返し、それぞれ算出した50個のP.F及びG.Fの分布を検討することで行う。データのサンプリング時には野外で用いた超音波風速計の応答性(10Hz)に対応する333Hzのローパスフィルターを設定している。また、基準となる

2節 記号表

U	: 瞬間風速	[m/s]
\bar{U}	: 平均風速	[m/s]
U ₀	: 最大瞬間風速	[m/s]
u	: 偏差 (=U- \bar{U})	[m/s]
g	: 最大偏差 (=U ₀ - \bar{U})	[m/s]
$\sqrt{u^2}$: 乱流速度	[m/s]
H	: 立方体模型の一辺	[m] (=1.8m)
\bar{U}_{10}	: マスト位置における 平均風速(Z=10m)	[m/s]
\bar{U}_F	: 測定点Fにおける 平均風速(高さH)	[m/s]
S(k)	: スペクトル	[m ³ /s ²]
K	: 波数	[1/m]
f	: 周波数	[Hz]
f _p	: ピーク周波数	[Hz]
l _x	: スペクトルスケール (=0/f _p)	[m]
G.F	: ガスト・ファクター (=U ₀ / \bar{U})	
P.F	: ピーク・ファクター (=g/ $\sqrt{u^2}$)	
m	: 風洞実験値	
f	: 野外実験値	

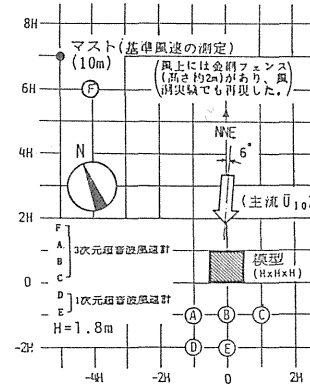


図2-1 模型、風速計の設置状況と測定点

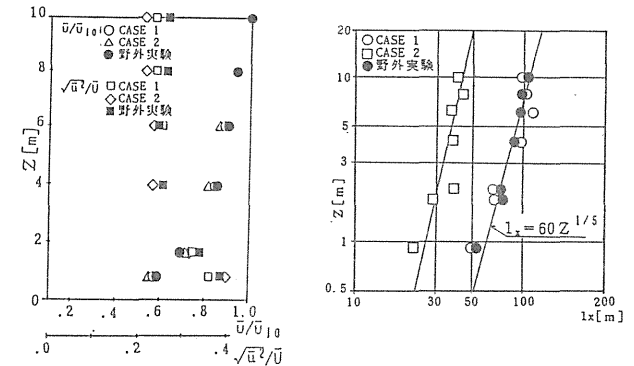


図2-2 Approaching WindのProfileの比較
図2-3 Approaching Windのスペクトルスケールの比較 (実物換算値)

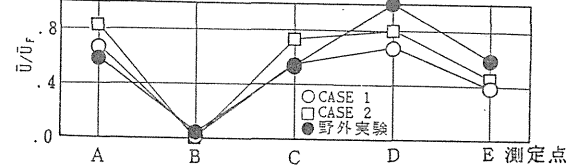


図2-4 模型後流各測定点の平均風速の比較 (高さH/2, 主流成分)

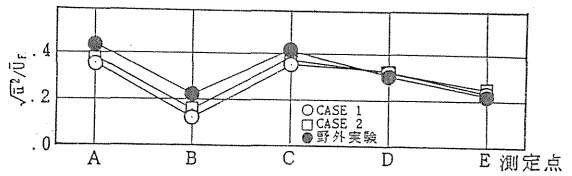


図2-5 模型後流各測定点の乱れの強さの比較 (高さH/2, 主流成分)

マスト位置10mでの平均風速は約4.5m/sである。以下風洞実験結果は全て実物換算した値を用いる。

2.4 風洞実験と野外実験の比較

2.4.1 Approaching Windのシミュレーション

Approaching Windのスペクトルスケールの影響を検討するため、風洞内にCASE 1(縮尺1/40), CASE 2(縮尺1/20)の2つの境界層を作成した。

(1) 平均風速, 乱れの強さの鉛直分布(図2-2)

CASE 1, CASE 2ともそれぞれ野外実験に非常によく一致する垂直分布が風洞内で再現することができた。平均風速のべき指数は約1/5である。

(2) スペクトルスケール(1x)の鉛直分布

(図2-3)

野外実験では、1xと高さZの関係は $1x=60Z$ (Bermanは $Z \geq 30m$ で $1x=200Z$ を提案している)となっている。風洞実験ではCASE 1が野外実験でのスペクトルスケールをよく再現している。一方CASE 2では野外実験のスペクトルスケールは再現されておらず野外実験値の約半分である。

2.4.2 Approaching Windのスペクトルスケールの模型後流への影響について

(1) 平均風速(図2-4), 乱れの強さ(図2-5)

CASE 1, CASE 2ともほぼ野外実験結果と一致。CASE 2におけるスペクトルスケールの不一致の程度は変わらない。

(2) 風速ベクトル(図2-6)

Approaching Windのスペクトルスケールを再現したCASE 1ではスペクトルのピーク位置および形状とも野外実験結果に非常によく一致している。それに対してCASE 2ではピークが高波数側に移動しており、Approaching Windのスペクトルスケールを再現しなかった影響が見られる。

(3) 頻度分布(図2-7)

CASE 1, CASE 2とも野外実験結果によく一致している。特に測定高さHで良く一致している。CASE 1とCASE 2を比較しても明確な差は認められない。

2.4.3 最大瞬間風速の風洞における再現性について

模型後流において平均風速, 乱れの強さの分布ばかりでなく、変動風速のスペクトル, 頻度分布まで再現できたCASE 1を用い

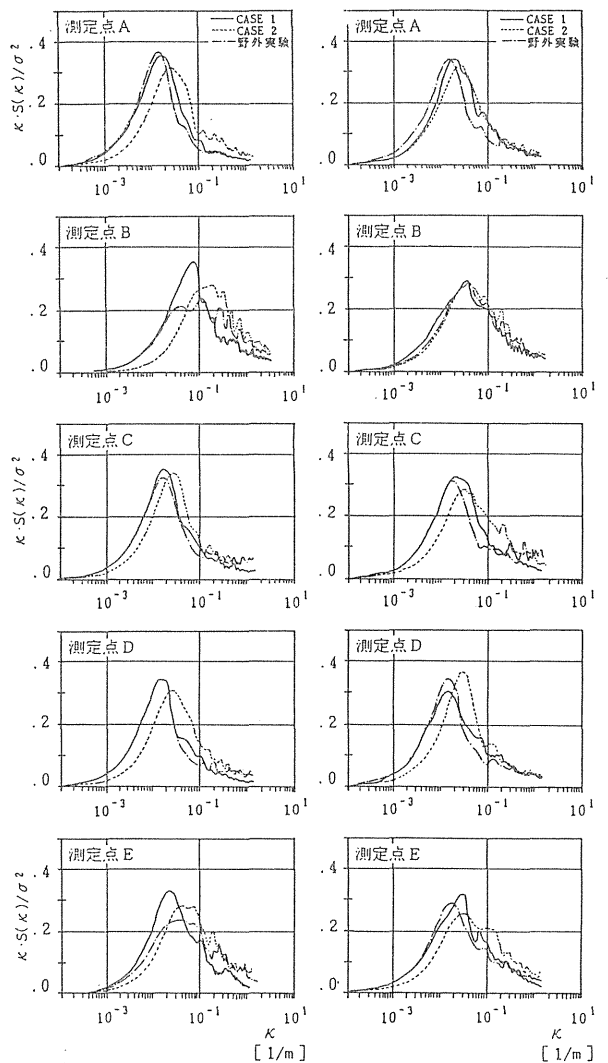


図2-6 模型後流各測定点の風速スペクトルの比較 (主流成分)

て最大瞬間風速の風洞における再現性についての検討を行う。検討は風洞実験と野外実験とでそれぞれ算出したP.F及びG.Fを二重指数確率紙上にプロットし、Fisher-TippettのI型に近似させ、それらを比較することで行われる。ここで風洞と野外とで比較する測定点は、剥離流の領域からWAKEの領域に位置するC点で高さH/2である。

図2-8に風洞実験での評価時間を移動平均により3,24,96msの3段階に変化させた場合のP.Fの分布の変化を示す。野外実験と風洞実験とで評価時間を一致させた場合(野外の100msと風洞の3ms)に両者のP.Fの分布が一致することが明らかである。また評価時間が大きくなるにつれて、P.Fの値の分布が小さい方に移動し、野外実験結果との隔たりが大きくなるのがわかる。ところが、P.Fの一致が最もよい評価時間3msのデータを用いてG.Fの分布を比較しても図2-9に示されるように野外実験と風洞実験は一致しない。この原因としては、この測定点(C点高さH/2)の乱れの強さが野外実験に比べて小さいこと(図2-6参照)や野外実験における平均風速の変化の影響等が考えられる。乱れの強さがあまり一致していないのにP.Fの分布が一致した一つの理由としては、以下のものが考えられる。

スペクトルの形状は図2-6(1)に示す様に極めて良く一致しているのに、風洞における乱れの値が野外より小さいということは、ほとんどの周波数において振幅が同じ比率で減衰されていることを示唆している。

これより以下の(1),(2)式が仮定できるものとする。

$$u_m = \alpha u_f \quad (1)$$

$$\hat{u}_m = \alpha \hat{u}_f \quad (2) \quad \alpha: \text{減衰定数}(1より小さい)$$

ゆえに

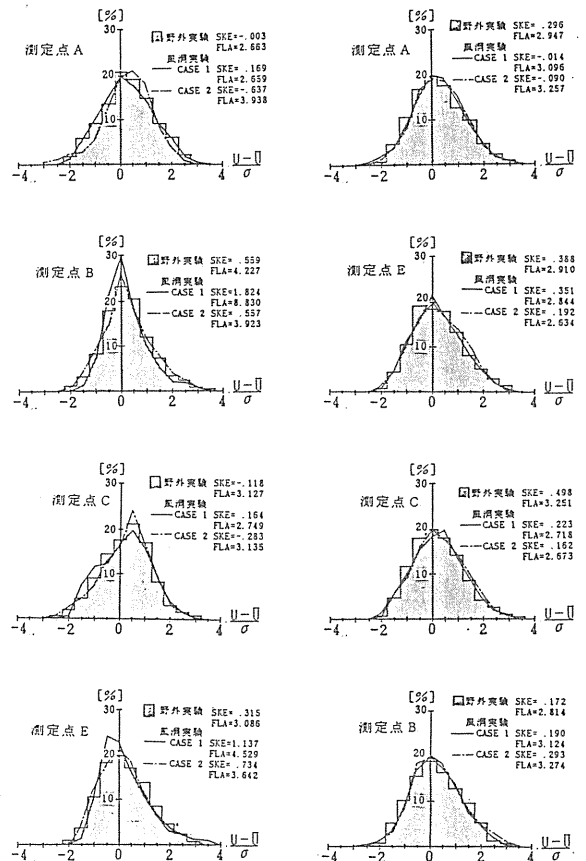
$$P.F_m = \frac{\hat{u}_m}{\sqrt{u_m^2}} = \frac{\alpha \hat{u}_f}{\sqrt{(\alpha u_f)^2}} = \frac{\alpha \hat{u}_f}{\alpha \sqrt{u_f^2}} = P.F_f \quad (3)$$

$$G.F_m = \frac{U + \hat{u}_m}{U} = \frac{U + \alpha \hat{u}_f}{U} \neq G.F_f (= \frac{U + \hat{u}_f}{U}) \quad (4)$$

このようにP.Fは一致するがG.Fが一致しない理由が説明される。またP.Fは平均値を除去しているため、野外実験中の平均風速の変化の影響を受けにくい。

次に、図2-10にサンプリング間隔を変化させた場合のP.Fの分布の変化を示す。サンプリング間隔を野外実験の時間スケールに一致させた場合のP.Fの分布は野外実験の結果にかなり良く一致している。

それに対して、サンプリング間隔が時間ス



(1) 測定高さ H/2

(2) 測定高さ H

(SKE:SKEWNESS FLA:FLATNESS σ :標準偏差)

図2-7 模型後流各測定点の頻度分布の比較 (主流成分)

ケールに一致しない場合は、近似直線の傾き等の一致の程度が悪くなる傾向にある。なおこの場合、サンプリング間隔は変わっても瞬時値の測定については、同一のローパスフィルターを用いているのでその評価時間は両者の間で同じである。

2.5 まとめ

(1) Approaching Windの平均風速，乱れの強さ，スペクトルスケールの三つを同時に再現した境界層と、スペクトルスケールのみを再現しなかった境界層を用いて Approaching Windのスペクトルスケールの模型後流の気流性状への影響について検討を行ったところ、模型後流の平均風速，乱れの強さの分布に差異は見られなかった。

(2) Approaching Windのスペクトルスケールを再現しい場合の模型後流の風速スペクトルは、再現した場合に比べて野外実験との一致の程度が悪くなる傾向にある。

(3) 風洞実験における最大瞬間風速の再現性についてG.F及びP.Fの極値分布で検討した結果、P.Fの極値分布が野外実験と非常に良く一致することがわかった。また、その際に野外実験と風洞実験で評価時間およびサンプリング間隔の時間スケールを一致させることが重要である。

謝辞

大型風洞による歩行時の抗力に関する実験は、鹿児島大学工学部建築学科講師(研究当時、東京大学院生)出口清孝氏、及び国立公衆衛生院技官(研究当時、東京大学生産技術研究所助手)小峯裕己氏との共同研究である。

接近流の乱れのスケールの影響及び最大瞬間風速の再現性に関する研究は、日建設計(株)(研究当時、東京大学大学院生)、森山修治氏、及び、(株)間組(研究当時、東京大学民間等共同研究員)高倉秀一氏との共同研究である。

以上、記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 村上周三・出口清考，小峯裕己，“抗力から見た風の人間に及ぼす影響に関する風洞実験”，第6回風工学シンポジウム論文集(1980.11) 115-122
- 2) 村上，加藤，森川，高倉「低層建物壁面風圧に関する風洞実験-Aylesbury国際共同研究」日本風工学会誌No.19号 April, 1984

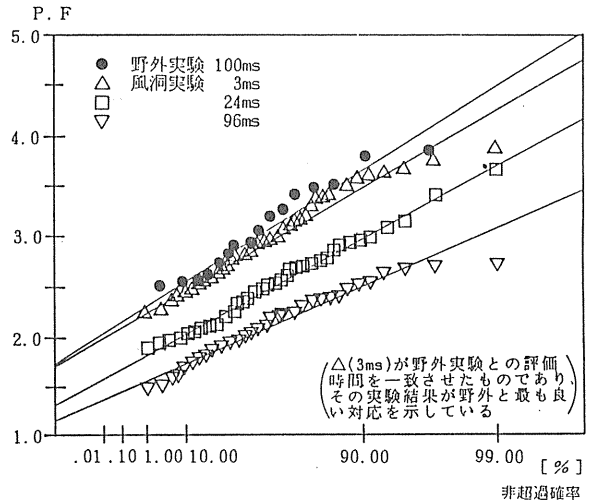


図2-8 P.Fの極値分布の比較
- 評価時間を変化させた場合(測定点C, 高さH/2)

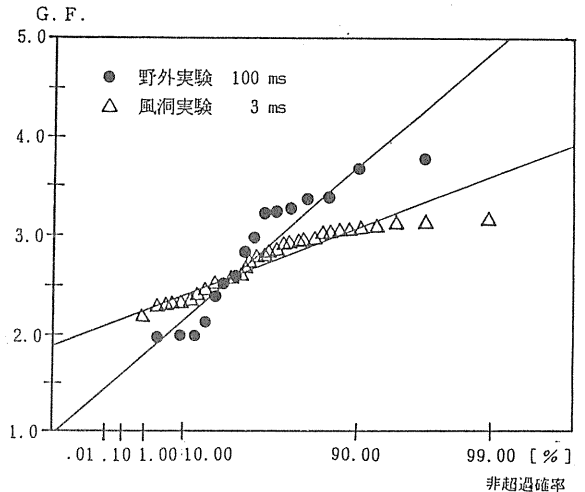


図2-9 G.Fの極値分布の比較(測定点C, 高さH/2)

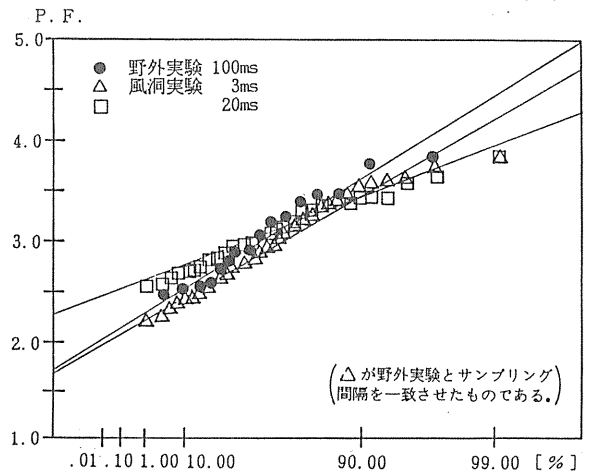


図2-10 サンプリング間隔を変化させた場合のP.F.の変化(測定点C, 高さH/2)

1. 目的

風上にある大規模建物が当該建物周辺の地上レベルの風速に及ぼす影響に関して、単純な模型を用いた風洞実験により基本的な検討を行った。特に、当該建物と風上建物との距離、また、当該建物周辺の低層建物の密度による風上建物の影響の程度に関して検討し、風洞実験を行う際の模型化範囲外にある大規模建物の取り扱い方に関する資料を得る事を目的としている。

2. 実験概要

2-1 実験方法 当該建物模型をターンテーブル中心に設置し風上建物位置を風上側に移動することにより建物間距離を変化させた。なお、模型がない状態でも風上建物位置での接近流は、境界層流作成用のラフネスブロックの長さを調整する事によって、常に一定の状態となるようにした。図1に建物模型、フラネスブロックの配置例を示す。風上建物の影響の程度は、風上建物のない場合の風速とある場合の風速とを比較して判断する。

2-2 模型およびその配置

当該建物および風上建物の模型寸法は 60×60×100mm高。模型の縮尺は 1/400程度を想定した。当該建物周辺の低層建物模型として 30×30×20mm（高さ）のブロックを、当該建物高さの約3倍の範囲内に配置した。このブロックの平面密度（以下周辺密度という）を幾通りかに変化させて実験を行った。なお、ここで行った実験はすべて、当該建物と風上建物は流れ方向の同一線上にある場合についてである。

2-3 測定点・使用風速計

図2に当該建物周辺の地上レベルの測定点を示す。測定点は当該建物高さの3倍の範囲内には55点を配置した。測定高さは風洞床上5mmである。風速測定には無指向性型のサーミスター風速計を使用した。

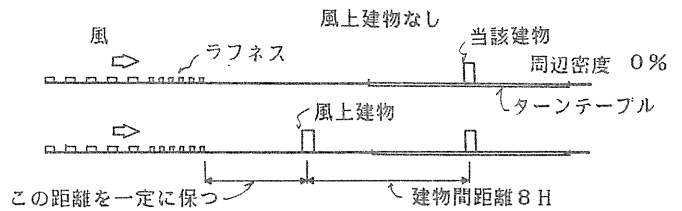
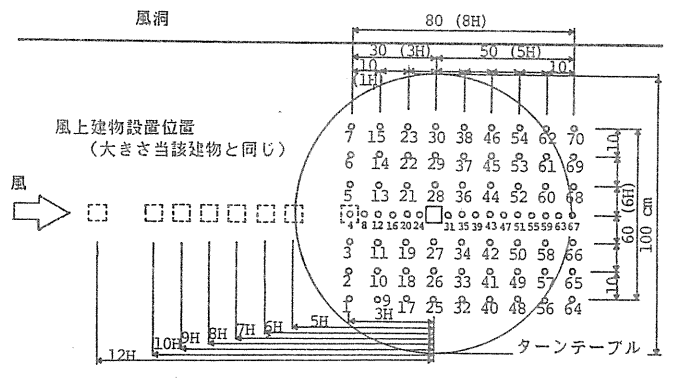


図1. 建物模型およびラフネスブロックの配置



測定高さ：風洞床上 5mm
 当該建物 6×6×10 cm
 图中的数值は測定点No.

図2. 地上レベルの風速測定点

2-4 実験条件 実験条件として建物間距離を8種類、また、周辺密度を4種類に変化させた。再現性を調べる3実験も含め、合計51条件の実験を行った。

3. 接近流の風速鉛直分布

図3に各実験における風上建物位置での接近流の風速鉛直分布を示す。建物間距離が変化しても、図1に示したようにラフネスブロックの長さを調整することにより、風上建物に当たる接近流の鉛直分布をほぼ同一にすることができた。この鉛直分布のべき指数は約 $1/4.2$ である。

4. 風上建物の有無による風速比の変化

図4(1)-(4)に、建物間距離別に風上建物の有無による風速比の変化を比較する。建物間距離9H以上の場合に比べ、3H、5Hなどでは、風上建物の有無による風速比の差が全体として大きい。建物間距離が小さい程風上建物の影響が明瞭に現れている。建物間距離が9H以上では大きな違いはない。

5. 建物間距離による影響

風上建物の地上風速比に対する影響をもう少し定量化するため、次ぎに示す指標を用いて影響の程度を検討した。

指標 I
$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_{pi}^* - U_{ni}^*)^2}$$

指標 II
$$|U_p^* - U_n^*|_{\text{最大値}}$$

U_p^* : 風上建物がある場合の風速比

U_n^* : 風上建物がない場合の風速比

N : 測定対象範囲内の測定点数

最大値 : N個の測定点のうちの最大値

図5に周辺密度0%の場合の建物間距離による風上建物の影響を指標I, IIにより示す。図中の数字は最大値(指標II)が生じた測定点No.を表している。指標I, IIの値は、測定対象範囲が1H、2H、3Hまでのいずれの場合でも、建物間距離が大きくなると減少していることが判る。この傾向

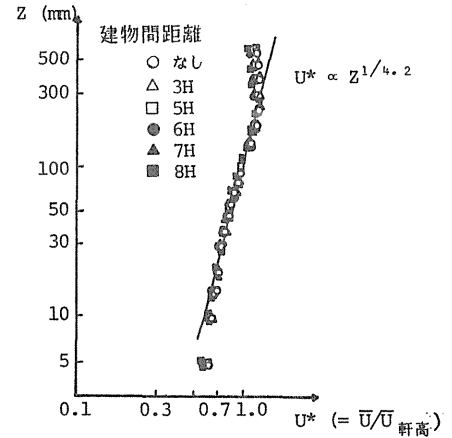


図3. 接近流の風速鉛直分布 (周辺密度36%)

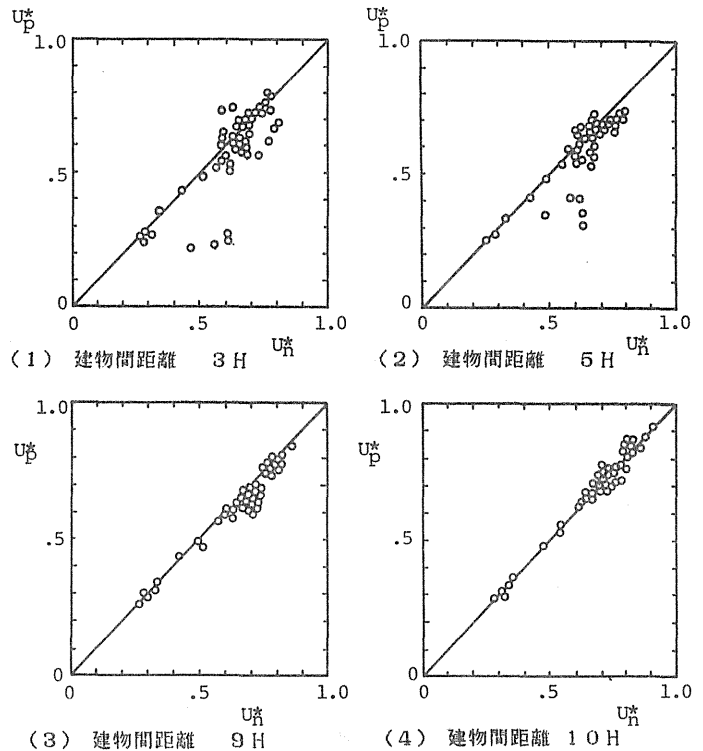


図4. 建物間距離別の風速比の比較 (周辺密度 0%)

は周辺密度が0%でない場合についても同様である。また、周辺密度0%では、指標Ⅱの値はほとんど風上建物のために風速比が減少する領域で生じている。風速比が増加する場合に最大値が発生しているのは、図5中ではわずかに建物間距離が10Hの場合だけであるが、その時の値は0.06と小さい。周辺密度が0%でない場合には風速比が増加する時に最大値を発生することが多くなるが、その場合でも指標Ⅱの値は約0.07以下である。指標Ⅰ、Ⅱの値とも建物間距離が8Hから9Hになると、0.1となり、風上建物の影響は小さくなると考えられる。

6. 周辺密度の影響

図6に周辺密度による指標Ⅰ、Ⅱの変化を示す。建物間距離3Hの場合には周辺密度が大きくなると指標Ⅰ、Ⅱの値が小さくなって行く傾向が見られるが、建物間距離8Hでは周辺密度が大きくなっても指標の値の変化は小さい。他の建物間距離の場合でも指標の値の変化は小さく、建物間距離3Hの場合にみられる様な傾向は明瞭ではなかった。これは、建物間距離が大きくなると図5に示したように指標Ⅰ、Ⅱは小さくなり、風上建物の影響が元々少なくなってしまうため、明らかでなくなるものと考えられる。

7. 結論

以上の実験結果をまとめると次のようになる。

(1) 風上建物による地上レベル風速への影響は、風上建物と当該建物との距離が風上建物高さの8倍程度になるとかなり小さくなり、指標Ⅱの値は0.1程度である。

(2) 当該建物周辺の低層建物密度が変化した場合の風上建物の影響の程度は、周辺密度が大きくなると小さくなる傾向がみられる。

(3) したがって、市街地の地上レベルの風速を検討する風洞模型実験に際して、模型化範囲外にある大規模建物を、特に設置すべきか否かは、測定対象地域の建物密度や風上に位置する大規模建物と測定対象地域までの距離を十分考慮に入れる必要がある。

参考文献 > 1)岡崎、片山：周辺街区の模型化範囲が強風領域

に及ぼす影響について、日本建築学会関東支部研究報告、昭和53年 2)大場、小林：建物周辺気流の風洞実験における市街地の模型化範囲に関する実験的研究、日本建築学会関東支部研究報告、昭和57年

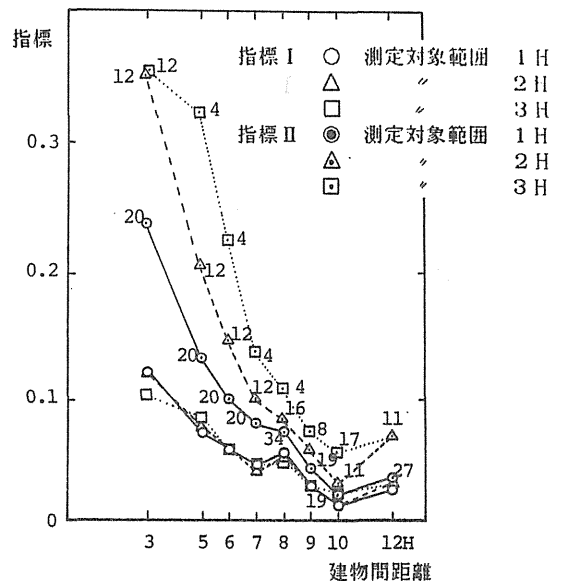


図5. 建物間距離による指標の変化 (周辺密度 0%)

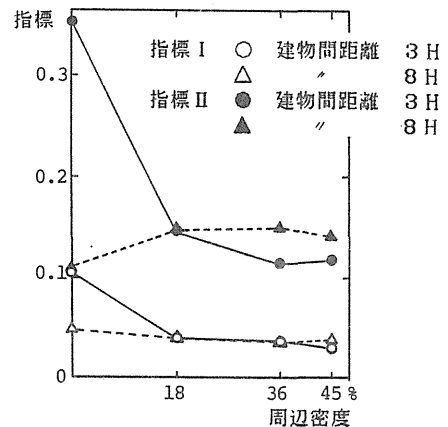


図6. 周辺密度による指標の変化

2つの建物周辺の汚染ガス拡散に関する検討

東京工芸大学 工学部 大場 正昭・小林 信行

1. 目的

空調設備の外気取り入れ口は建物の上部に設けられることが多いので、排ガスの排出口が屋上にある場合に、排ガスによる近傍汚染が問題となる。

本研究では単純な形状をした2棟模型を用いて、以下の項目について検討した。

- ① 野外模型実験による模型周辺の汚染ガス拡散に関する検討
- ② 風洞模型実験の濃度予測精度に関する検討
- ③ 乱れの強さと渦スケールの相違による汚染ガス拡散への影響に関する検討

2. 野外模型実験による建物周辺の汚染ガス拡散に関する検討

2.1 実験概要

(1) 野外模型と測定場所 建物周辺の特徴的な流れを作るために、低層模型と高層模型の二棟を用いた。低層模型は2.7m W×0.9m H×0.9m Lで、高層模型は2.7m W×2.7m H×0.9m Lである。写真. 1に模型の設置状況を示す。

(2) 測定点 ガスのサンプリング点は、低層模型壁面22点、模型間の地表面20点の計42点。接近流の垂直風速分布の測定点は高さ2m, 4m, 6m, 8m, 10mの5点で、乱れの測定点は低層模型に近い位置で高さ1.6m(基準高さ)である。

(3) 測定方法 C₂H₄を低層屋根面の煙突(模型高さのH/4)からサンプリング開始5分前から54.5l/minの割合で排出し、全測定点から同時に42台の吸引ポンプでガスを5分間テトラバックに吸引した。サンプリング回数は16回。分析は炭化水素分析計で行なった。風速については接近流の垂直風速分布を小型三杯風速計で、乱れを3次元超音波風向風速計で測定した。

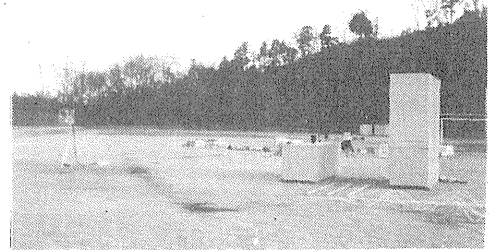


写真. 1 模型の設置状況

2.2 接近流の気流性状

図.1に基準高さにおける接近流の乱れの強さ $\sqrt{u'^2}/\bar{U}_0$ と平均風速 \bar{U}_0 との関係を示す。接近流の風速が2m/s以上になると、乱れの強さは一定な範囲に安定する傾向を示し、 $\bar{U}_0=2\text{m/s}$ で31%となった。図.2に風向変動の標準偏差 $\sqrt{\sigma^2}$ と平均風速 \bar{U}_0 の関係を示す。

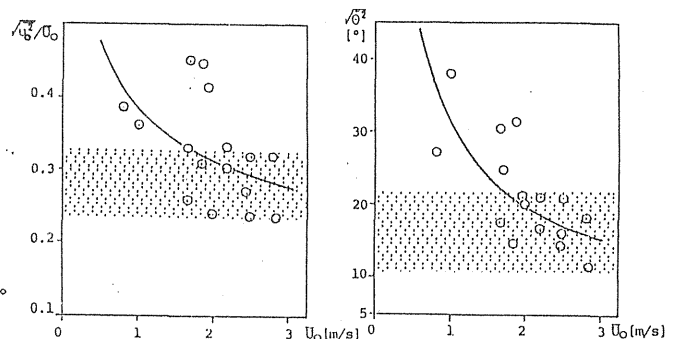
$\sqrt{\sigma^2}$ は同様に風速が2.0m/s以上になると安定する傾向を示す。

2.3 模型周辺の濃度分布

図.3に模型周辺の無次元濃度分布を示す。無次元濃度 C_p は次式で定義され、

$$C_p = C^* / (q/H^2 \cdot \bar{U}_0)$$

ここで C^* : 測定濃度、



(1) 図. 1 乱れの強さと平均風速との関係

図. 2 風向変動の標準偏差と平均風速との関係

- q : トレーサーガス流量
- H : 低層模型高さ (H = 90 cm)
- \bar{U}_0 : 超音波風速計で測定した高さ 1.6m の平均風速

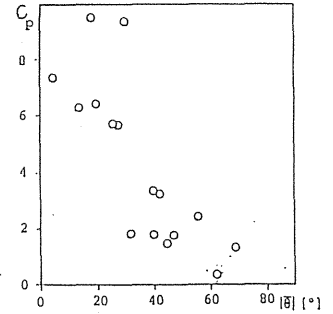
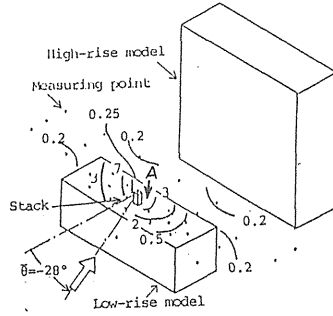


図. 3 模型周辺の無次元濃度分布 図. 4 煙源近傍濃度 (A点) と平均風向角との関係

最大濃度は煙突近傍の屋根面で発生し $C_p=7.10$ である。地表面では大幅に減衰し、最大濃度は $C_p=0.30$ となる。図. 4 に煙突直下の測定点 (図. 3 の A 点) の濃度と接近流の平均風向角との関係を示す。

平均風向角が 30° よりも大きくなると C_p は 9.5 から 3.5 に低下する。従って、平均風向角が 30° 以上では平均風向角の影響は減少する。図中で同じ平均風向角でも濃度に大きな違いを生ずるのは、風向変動の影響と考えられる。

3. 風洞模型実験の濃度予測精度に関する検討

3.1 重ね合わせによる濃度予測方法

無次元濃度 C_p は式 (1) から直接には接近流の風速に依存しないで、風向の出現頻度 $f_p(\theta)$ のみに影響される。従って、風洞模型実験により数風向に対する濃度データが得られるならば、野外濃度 C_p は風洞模型実験の濃度 C_m を風向出現頻度 $f_p(\theta)$ に応じて重ね合わせるにより予測される。予測式は

$$C_p(\bar{\theta}) = \int_{-\infty}^{\infty} C_m(\bar{\theta} - \phi) \cdot f_p(\phi) d\phi \quad (2)$$

となる。離散表示すれば

$$C_p(\bar{\theta}) = \{ C_m(\bar{\theta} - \phi_1) \cdot f_p(\phi_1) + C_m(\bar{\theta} - \phi_2) \cdot f_p(\phi_2) + \dots + C_m(\bar{\theta} - \phi_i) \cdot f_p(\phi_i) \} \cdot \Delta\phi \quad (3)$$

となる。

風向角の頻度分布 $f_p(\theta)$ を正規分布とみなし、予測式を次のようにする。

$$\begin{aligned} \text{区間数 3 では } C_p(\bar{\theta}) &= \left(\int_{-\infty}^1 f_p(\phi) d\phi \right) \cdot C_m(\bar{\theta} \pm 1.5\sqrt{\theta^2}) \\ &\quad + \left(\int_1^1 f_p(\phi) d\phi \right) \cdot C_m(\bar{\theta}) \\ &= 0.1587 C_m(\bar{\theta} \pm 1.5\sqrt{\theta^2}) + 0.6826 C_m(\bar{\theta}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{区間数 9 では } C_p(\bar{\theta}) &= 0.0401 C_m(\bar{\theta} \pm 2\sqrt{\theta^2}) + 0.0655 C_m(\bar{\theta} \pm 1.5\sqrt{\theta^2}) \\ &\quad + 0.1210 C_m(\bar{\theta} \pm \sqrt{\theta^2}) + 0.1747 C_m(\bar{\theta} \pm 0.5\sqrt{\theta^2}) \\ &\quad + 0.1974 C_m(\bar{\theta}) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、基準正規分布は

$$f(\phi) = 1/\sqrt{2\pi} \cdot \exp(-\phi^2/2)$$

となる。図. 5 に正規分布を 9 分割する方法を示す。

3.2 実験概要

(1) 相似条件 風洞模型実験では次の相似条件を考慮した。① 模型の幾何学的相似 ② 接近流の相似：・垂直風速分布・乱れの強さ ($\sqrt{u'}/\bar{U}_0$) ・スペク

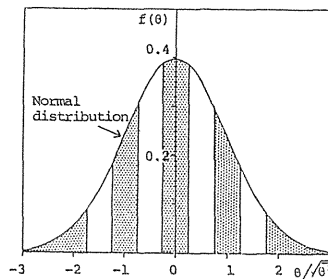


図. 5 風向角頻度分布の分割方法 (分割数 9)

表 - 1 実験条件

	Field	Wind tunnel
H	0.90 m	0.06 m
\bar{U}_0	2.02 m/s	2.44 m/s
$\sqrt{u'}/\bar{U}_0$	0.32	0.20
L	25.40 m	1.40 m
$\bar{\theta}$	-20°	$-65^\circ, -56^\circ, -47^\circ$ $-30^\circ, -20^\circ, -19^\circ$ $-10^\circ, -1^\circ, 8^\circ$
$\sqrt{\theta^2}$	18.3°	—
v_g/\bar{U}_0	0.04	0.04

トルスケール (L) ③排ガス速度比 (\bar{V}_g/\bar{U}_0) (2) 風洞と模型 境界層型風洞で測定部1.2m W×1.0m H×10m L。模型の縮尺は1/15。

(3) 実験条件 表-1に実験条件を示す。実験の風向角は平均風向角 $\bar{\theta}$ の他に、図.5から $\bar{\theta} \pm \sqrt{\sigma^2}/2$ 、 $\bar{\theta} \pm \sqrt{\sigma^2}$ 、 $\bar{\theta} \pm 3\sqrt{\sigma^2}/2$ 、 $\bar{\theta} \pm 2\sqrt{\sigma^2}$ の8風向角を設定した。

(4) 接近流の性状 地表面粗度として2次元フェンスとボルテックスジェネレーターを組合せて風洞床面に設置し、図.6に示すべき指数1/6の風速分布を作成した。図.7に乱れのスペクトル分布を示す。解析はFFT法で行なった。分布は全体に高周波数側で風洞の $f \cdot S(f)/\bar{u}^2$ が野外の分布よりも大きい。しかし、スペクトルスケール比は1/18で、スペクトルスケールの相似条件はほぼ満足されている。

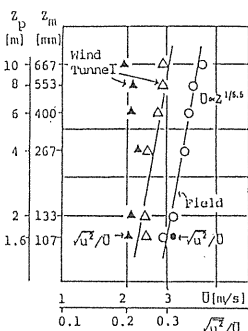


図. 6 接近流の垂直風速分布

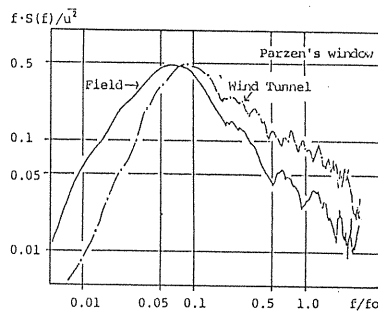


図. 7 風速変動のスペクトル分布

3.3 正規分布とみなした風向角の頻度分布から予測した濃度予測精度

図.8に野外実験濃度と重ね合わせにより予測した濃度結果とを示す。図中の○印は低層壁面、●印は地表面の結果を示す。濃度は全般に野外濃度よりも低めに予測されている。特に風向角の頻度分布を考慮しない従来の方法(図.8-(1))では顕著である。表-2に平均誤差率を示す。平均誤差率は、

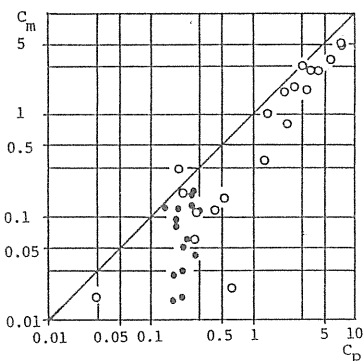
$$E = 1/N \sum |C_m - C_p| / C_p \quad (6)$$

ここで N: サンプル数

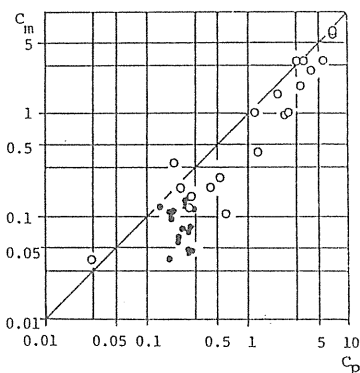
で定義され、 $C_p > 0.05$ となる測定点についてゾーンごとに計算した。風向角の頻度分布を分割して濃度を重ね合わせる区間数が増えるに従い、予測精度は向上する。また、濃度を予測するために必要な風向角頻度分布の分割数は5分割で充分であることが判る。

表-2 濃度の予測精度

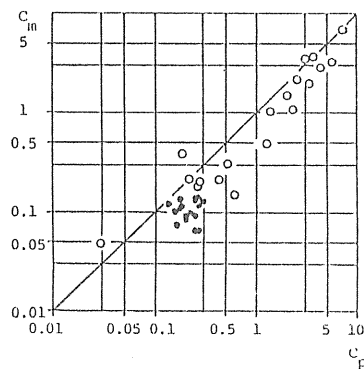
風向角の頻度分布	分割数	平均誤差率(E)		
		低層壁面	地表面	平均
考慮せず (従来の方法)	なし	0.459	0.657	0.548
	3	0.385	0.580	0.473
正規分布	5	0.338	0.478	0.401
	9	0.360	0.493	0.420



(1) 分割なし (平均風向角-28°)



(2) 3分割 (風向角-56°, -28°, -1°)



(3) 9分割 (風向角-65°, -56°, -47°, -38°, -28°, -19°, -10°, -1°, 8°)

図. 8 野外実験と風洞実験の濃度比較

4. 建物周辺の汚染ガス拡散に及ぼす乱れの強さの影響に関する検討

風洞内に乱流格子を設置することにより気流条件のなかで乱れの強さを变化させて、模型周りで濃度分布を測定し、汚染ガス拡散に及ぼす乱れの強さの効果を検討した。

4. 1 実験概要

- (1) 模型 二棟模型 (2) 乱流格子 図.9に示す形で充実率は33%
 (3) 実験条件 ①気流条件 接近流の垂直風速分布は一様で、設定風速 \bar{U}_0 は最小レイノルズ数を満足するように平板上高さ200mmの所で3m/sとした。乱れの強さは乱流格子の取り付け位置(L)を変えることで調節した。図.10に垂直風速分布を示す。②排ガス条件 低層模型の屋根面中心にある排出口(煙突高さ'0')からC2H4(濃度100%)を排ガス速度比 $\bar{v}_g/\bar{U}_0 = 0.05$ で排出した。

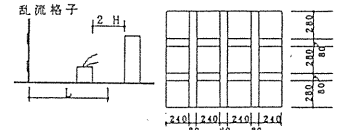


図. 9 乱流格子

- (4) 実験種類 表-3の4タイプについて実験した。乱れの強さは6.8%から15.3%までの範囲である。

4. 2 実験結果

(1) 濃度分布 図.11に $\sqrt{u'}/\bar{U}_0 = 7.1\%$ と 15.3% の結果を示す。風向角は 0° 。最大濃度は排出口近傍で発生する。低層屋根面では $\sqrt{u'}/\bar{U}_0$ が大きくなると平均濃度は20%低下する。逆に模型間の地表面や高層模型の風上壁面では $\sqrt{u'}/\bar{U}_0$ が大きくなると全体的に濃度が增大する。とくに高層模型の風上壁面で顕著になり、上部から下部の方へと順次濃度が高くなる。

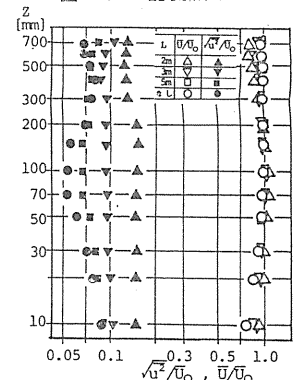


図. 10 接近流の垂直風速分布

- (2) 濃度分布の平均偏差率 E_c 格子なしの濃度分布を基準とした濃度分布の平均偏差率を計算した。定義式は

$$E_c = 1/N \sum |C_i - C_i(\text{格子なし})| / C_i(\text{格子なし}) \quad (7)$$

ここで C_i : 格子設置での無次元濃度

$C_i(\text{格子なし})$: 格子なしでの無次元濃度

図.12に結果を示す。格子なしと比較し、 $\sqrt{u'}/\bar{U}_0$ が2倍になると E_c は低層屋根面で20%減少し、逆に高層模型の風上面と模型間の地表面では434%、96%と増大することが判る。

表-3 実験種類

No.	L	\bar{U}_0	$\sqrt{u'}/\bar{U}_0$
1	2m	2.94m/s	15.3%
2	3m	2.98m/s	9.4%
3	5m	2.97m/s	7.1%
4	without grid	2.96m/s	6.8%

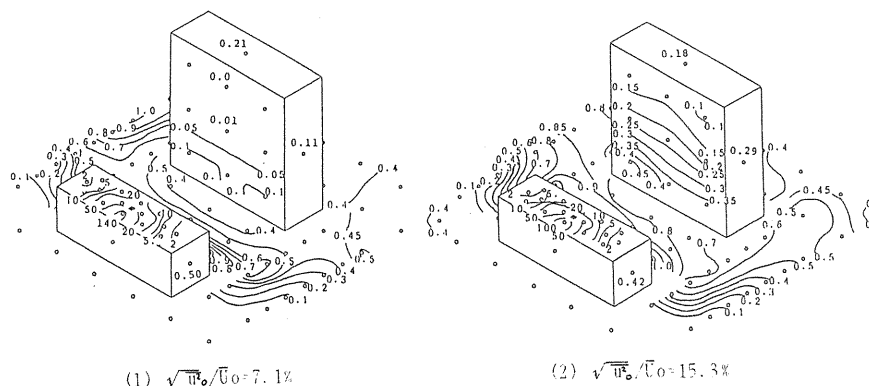


図. 11 模型周辺の無次元濃度分布

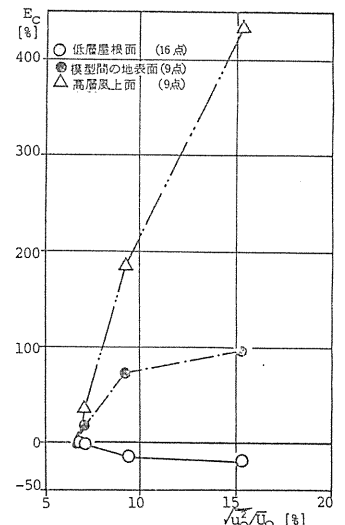


図. 12 濃度分布の平均偏差率と接近流の乱れの強さとの関係

5. 建物周辺の汚染ガス拡散に及ぼす渦スケールの影響に関する検討

ここでは接近流の渦スケールの相違による汚染ガス拡散への影響について、風洞模型実験により検討した。

5.1 実験概要

(1) 模型 二棟模型 (2) 実験条件 乱流格子とボルテックスジェネレーター (V.G) を用いて垂直風速分布と乱れの強さを同じに保ちながら、渦スケールが異なる風速分布を作成した。渦スケール (平均渦の大きさ) は次式から求めた。

$$\Lambda = \bar{U} \cdot \int_0^{t_*} R(\tau) d\tau \quad (8)$$

ここで $R(\tau)$: 自己相関係数

t_* : $R(\tau) = 0$ となるまでの時間

風向角は $0^\circ, -24^\circ, -45^\circ$ の3風向を設定した。

5.2 実験結果

5.2.1 接近流の気流性状

(1) 垂直風速分布 図.13 に両ラフネスタイプの接近流の垂直風速分布を示す。両タイプのベキ指数は $1/8.6$ で、高層模型の高さをこえる $Z=200\text{mm}$ まではほぼ同じ分布である。

(2) 風速変動のスペクトル分布 図.14 に $Z=300\text{mm}$ での風速変動のスペクトル分布を示す。ピーク周波数はボルテックスジェネレーター : 1.9Hz 、乱流格子 : 3.8Hz である。図の f_0 は基準周波数で $f_0 = \bar{U}/Z$ 。表-4 に接近流の気流性状の一覧表を示す。大きな差がみられるのは平均渦の大きさで、例えば $Z=100\text{mm}$ の高さで乱流格子 : 0.137m 、ボルテックスジェネレーター : 0.378m となり、ボルテックスジェネレーターの渦の方が乱流格子の渦よりも 2.8 倍大きい。

5.2.2 模型周辺の濃度分布

(1) 濃度分布 図.15 に $\theta = -24^\circ$ の結果を示す。乱流格子では風向角の方向にそって汚染ガスは拡散し、最大濃度は煙突近傍で発生する (最大濃度 4.5)。地表面の平均濃度は 0.08 、高層風上壁面は 0.01 で、低層屋根面の平均濃

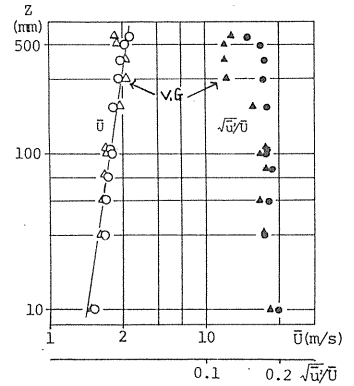


図. 13 接近流の垂直風速分布

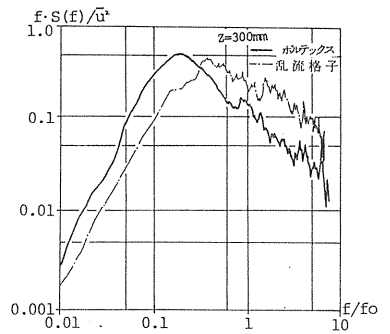


図. 14 風速変動のスペクトル分布

表-4 接近流の気流性状

ラフネスのタイプ	測定高さ Z (mm)	平均渦の大きさ Λ (m)	スペクトルスケール L (m)	ピーク周波数 f_p (Hz)
乱流格子	50	0.25	0.79	2.9
	100	0.14	0.86	2.9
	200	0.19	0.51	5.7
	300	0.11	0.83	3.8
	50	0.29	1.14	2.0
ボルテックスジェネレーター	100	0.37	1.19	2.1
	200	0.29	1.27	2.1
	300	0.45	1.58	1.9

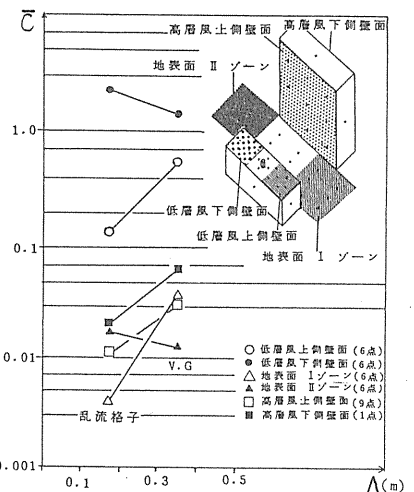


図. 16 平均濃度と渦スケールとの関係

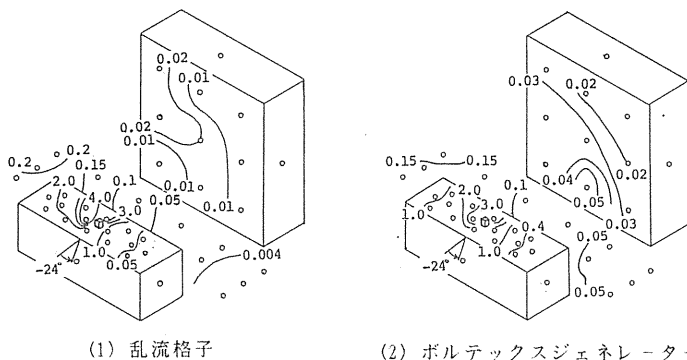


図. 15 模型周辺の無次元濃度分布

度1.53に比べてそれぞれ約1/20, 1/150に減少する。ボルテックスジェネレーターでは、乱流格子と同様に風向角の方向にそって汚染ガスは拡散し、最大濃度は煙突近傍で発生する（最大濃度3.5）。しかし、乱流格子に比べ低層屋根面の風上側測点で濃度が增大している（平均濃度0.53）。また、地表面の平均濃度は0.09、高層風上壁面は0.03と乱流格子に比べ高く、特に低層屋根面の風上側近くの地表面の平均濃度は0.04と乱流格子の0.004よりも高い。

(2) 平均渦の影響 図.16 に $\bar{\theta} = -24^\circ$ の結果を示す。横軸の平均渦の大きさは $Z=50\text{mm} \sim Z=300\text{mm}$ の平均値を、縦軸の濃度は流れパターンの観察結果から測定点をゾーンに分割したゾーンの平均濃度を用いた。平均渦の大きさが大きくなると低層屋根面上で汚染ガスの逆流現象が発生し、低層風上屋根面、高層風下壁面で平均濃度が增大する。また、低層風上屋根面近くの地表面（Iゾーン）で濃度が增大し、そのため高層風上壁面でも平均濃度が高くなる。表-5に濃度増減率を示す。率はボルテックスジェネレーターの平均濃度を乱流格子の平均濃度で割って求めた。 $\bar{\theta} = 0^\circ$ と -45° でも -24° と同様の傾向がみられる。

(3) 風向角の影響 乱流格子の $\bar{\theta} = 0^\circ$ での平均濃度を基準にして風向角間の濃度比を求め、風向角による影響を調べた。図.17 に結果を示す。低層屋根面において、3つの風向角の中でラフネスタイプによる平均濃度比の差が最も大きいのは $\bar{\theta} = -24^\circ$ である。従って実験を行なった3つの風向角の中で、低層模型屋根面における汚染ガスの逆流現象が最も顕著な風向角は $\bar{\theta} = -24^\circ$ である。

表-5 測定ゾーンの濃度増減率

ゾーン	層	風上側	0°	-24°	-45°
低層	屋根面	風下側	0.91	0.62	0.89
地表面	I		0.52	5.43	4.00
	II			0.72	0.77
高層	風上側		0.71	2.82	7.50
壁面	風下側		2.36	3.10	5.67

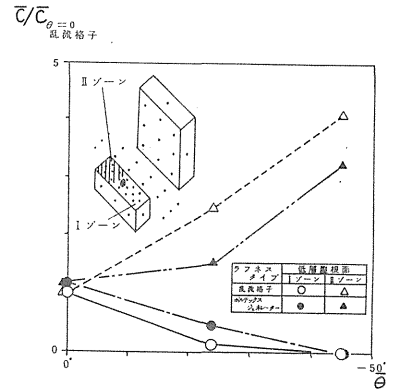


図.17 平均濃度比と平均風向角との関係

6. まとめ

以上の実験結果をまとめると次のようになる。

- (1) 周辺が広かつな所では、接近流の乱れの強さと風向変動の標準偏差は風速が 2 m/s 以上になると、それぞれ 30%、20° 前後に安定する傾向を示す。
- (2) 接近流の風向角の頻度分布を正規分布の形で近似し、風洞模型実験により数風向の濃度を重ね合わせるにより、野外実験の濃度を平均誤差率 40% で予測した。その結果、従来の風向角の頻度分布を考慮しない予測方法と比較して、予測精度を 15% 向上させた。
- (3) 風向角の頻度分布を 5 区間に分割して、風洞模型実験の結果を重ね合わせれば、9 区間に分割するのと同じ精度で濃度を予測できる。
- (4) 接近流の乱れの強さが大きくなると煙源のある低層模型屋根面で濃度が減少し、高層風上壁面と模型間の地表面で濃度が增大する。
- (5) 接近流の平均渦の大きさが大きくなると低層模型屋根面における汚染ガスの逆流現象が激しくなる。その結果、実験をした 0° 、 -24° 、 -45° の 3 風向角において、低層模型屋根面の風上側部分と高層風下壁面で濃度が增大する。