ビル風と風洞実験

Wind tunnel modeling for flow around buildings

室 田 達 郎^{*}
Tatsuo MUROTA

SUMMARY

A cooperative research project on wind tunnel modeling for flow around buildings was carried out by Building Research Institute and Building Center of Japan from 1981 to 1984. 24 research organizations in Japan joined the project.

A large amount of wind tunnel tests were conducted for three types of flow around 1) high-rise buildings, 2) a 14-storied building and 3) a 7-storied building. The test data were compared with field observation data obtained around the three buildings stated above. Based on this, effects of several parameters, i.e., wind profile of approaching flow, height of boundary layer, modeling area of surrounding city, surface roughness of model buildings, etc., on the similarity of wind tunnel tests were studied.

This paper described the major results of this project.

1. 序

いわゆる「ビル風」の存在が世に知られるようになったのは昭和43年頃で、この年に竣工したわが国初の超高層ビルである霞ヶ関三井ビルのまわりで、異常な強風現象が発見されたのがきっかけであった。当時ビル風にともなう障害は、新聞紙上などでは「風害」と呼ばれており、「超高層ビル近傍の地表における強風による歩行障害」という意味で使われた。

その後、昭和40年代後半に至って、ビル風の問題が大都市中心部の超高層ビルのまわりに限ら

ず低層市街地などに建つ中高層ビルのまわりでも注目されるようになった。この頃以降、ビル風の問題は建築物などの建設前後における建築主と周辺居住者との紛争という形をとって全国に波及するに至り、この種の問題を称して「ビル風害」と呼ぶのが一般的になった。

ビル風問題が低層市街地の中にまで入り込んできた結果、ビル風害は単に歩行障害にとどまらず生活全般に係る障害を含むようになった。たとえば、窓が開放できない、玄関の出入りが難しい、洗濯物が干せない、暖房が効かない、庭が荒れる、

* 建設省建築研究所第三研究部耐風研究室長

Head, Building Aerodynamics Div., Structure Dept., Building Research Institute,
Ministry of Construction

(昭和59年5月28日受理)

陳列した商品が飛ばされる、TVアンテナが倒れる、瓦がずれる、通風が悪くなる等々の障害である。

前述のビル風害に係る建築主と周辺住民との紛争の場合においては、ビルの建設によってこのような障害が発生するかどうか、発生するとすればどの程度のものかという点についての的確な技術情報が求められる。

このような情報は、問題となっている建築物等の建設前後におけるその周辺部の風速分布のデータに基づいて作成される。ただし、建築物周辺の風速分布は大気成層状態に応じて千差万別であって、そのすべてを推測することは事実上不可能であるから、前述の風速分布のデータは、一般には大気の安定度が中立である場合のものである。

この風速分布のデータは、通常風洞模型実験によって求められるが、この種の実験は一般に縮尺数百分の一という小さな模型を使って行われるから、当然その相似性が問題となる。この点については、従来、風洞内に幾何的に相似な模型を置き、

これに実際と相似な

イ、鉛直方向風速分布

ロ、鉛直方向の風の乱れの分布

をもつ気流をあてることによって、風洞実験と実際との相似が成立つとされてきた。しかしながら、相似にすべき建設地点付近の風の状況を正確に知ることが事実上不可能であること、風洞実験の細部の決定に関してこの相似則は自由度を持ち過ぎていることなどの点を考えると、これによって実際の現象がどの程度正しく風洞内に再現されるのかはなほだ不明瞭であると言わざるをえない。

ビル風紛争の現場に必要なのは、特定の建築物の周辺における極めて詳細かつ正確な風速の分布状況であり、それを知るために行われる風洞実験がこのような不明瞭さをもつことはなほだ不都合なことである。このような実情にかんがみ、建設省建築研究所と（財）日本建築センターは、ビル風に関する風洞実験の適切な方法を明らかにするために、昭和55年度から共同研究を始めた。この研究は同センター内に国内24の研究機関が

表1. 風洞実験法研究会参加者及び参加機関

研究機関名	氏名	記号	研究機関名	氏名	記号
大阪市立大学	木本英爾	N	竹中工務店技術研究所	岩佐義輝 又木義浩	F
大林組技術研究所	川口彰久	A	東急建設技術研究所	加藤信男	G
鹿島建設技術研究所	眞田早敏	B	東京工芸大学工学部	小林信行 村幸雄	H
風工学研究所	丸川比佐夫 吉田正昭	O	東京大学生産技術研究所	村上周三	I
神奈川大学工学部	大熊武司	C	東京電機大学理工学部	河井宏允	J
金沢工業大学工学部	松本武雄	P	戸田建設建築技術部	檜垣恭一	V
京都大学防災研究所	桂池順治 谷義人	Q	日本板硝子営業技術部	川端三郎	K
熊谷組技術研究所	柏木橋一 小橋基民	S	日本大学生産工学部	丸田栄蔵	L
建設省建築研究所	岡田恒郎 室田達郎	D	間組技術研究所	高倉秀一	W
清水建設技術研究所	藤井邦雄	E	フジタ工業技術研究所	内海康行 島田洋一	M
セントラル硝子松阪研究所	石川友久	T	三井建設建築技術部	塚本和夫	X
大成建設技術研究所	浅見豊	U			

参加する風洞実験法研究会（議長；大熊武司神奈川大学教授，代表幹事；筆者，表1参照）を組織して行われ，昭和58年度に終了した。

その研究においては，比較的長期にわたってビル風の実測が行われたことのある三つの地域を選び，そこで実測された風速分布を風洞内に再現するためにどのような方法で実験を行うべきであるかという問題に関して大量の風洞実験が行われた。その結果，従来行われていた比較的狭い地域を幾何学的に相似にした模型を仮想の乱流境界層中に入れて実験する方法は相似性が悪く，良好な相似性を得るためには，十分広い範囲にわたって周辺地域の建築物や樹木等の地形地物を幾何学的に相似にした模型に風（一様流であってもよい）をあてればよいようであることが示唆された。

この研究はビル風に関する風洞実験の方法に初めて組織的に取組んだものであり，以下ではその報告書¹⁾によってこの研究の概要を紹介し，そこで得られた結果に基づいてビル風に関する風洞実験の方法を論じてみたい。

2. 研究方法

この研究においては，先ずビル風に関する風洞実験の相似性に関与するパラメータを抽出した。これらのパラメータは，風洞内において実際の場合と完全に一致させることは事実上不可能である。したがって，これらのパラメータの不一致が，実用上どの程度まで許されるのかを調べることが本研究の主眼である。そのため，この研究では，相似性を測る尺度として，風洞実験結果と実測データとの一致性をとりあげた。

実測データとの一致性を相似性の目安とする場合，現象に関係する各種パラメータの影響のうちのいくつか，その実測データには反映されていないか，あるいは影響が微弱であるという可能性が考えられる。そのような場合，実物と風洞実験との相似性がそのパラメータに関しては検討不能

になる。逆に，あるパラメータの影響が顕著であった場合でも，それを一般性のある結論として受入れても良いか，それともその実測データのもつ個有の特性なのかという判断は容易には下し難い。したがって，実測データを相似性の尺度とする場合，上のような問題の発生を減少させるためには，条件の異なる多数のデータを収集することが望ましい。本研究においては，行うべき風洞実験量を勘案して，建築物周辺流の典型的な三つのパターンを選び，それぞれについて一つの実測データを選択した。すなわち，超高層建築物の周辺流，中低層市街地に建つ高層建築物の周辺流および中低層市街地に建つ中層建築物の周辺流の三つについて，各1ケースの実測データを選び出し，それを相似性の尺度とすることにした。

これら三つの実測データが得られた地域の模型を製作し，これを前述の研究会参加機関の間で持ち回って風洞実験が実施された。各機関で実施された実験の結果は，相互に比較検討されて最終結論が導かれた。

2.1 では，抽出された風洞実験条件に関するパラメータ，2.2 には三つの実測データの概要，2.3 では実施された風洞実験の概要が述べられている。

2.1 実験条件に関するパラメータ

ビル風に関する風洞実験で測定される物理量は一般に，高さ H の比較的高い建築物の周辺の一点 j における風速 u_j である。これを調べるために，この建築物およびその周辺の半径 R の円内の地域の縮尺模型を作り，それを乱流境界層中に置く。このような実験の相似性に関する問題は，模型の幾何学的相似がどの程度まで達成されなければならないかという問題と乱流境界層をどの程度相似にする必要があるかという二つの問題に大別される。この研究においてはこれに関して以下のようなパラメータあるいは要因をとり上げた。

2.1.1 模型の幾何学的相似に関するパラメータ

(1) 建物表面細部の模型化

建物の表面は様々な凹凸を持っており、それは表面を流れる気流の性状に影響を及ぼす。周辺気流の測定対象となる高い建築物の表面凹凸はその周辺気流に及ぼす影響が大であることが予測されるので、模型製作にあたってそれをどの程度まで正確に再現するかを検討する必要がある。

(2) 地形地物の模型化

地形の凹凸、地表の軽微な工作物、樹木等をどの程度まで模型化すべきかという問題である。本研究ではこのうちから樹木の影響をとり上げた。

(3) 周辺市街地の模型化範囲

ビル風の風洞実験では、ほとんどの場合周辺気流を測定する建物の周囲の市街地を大なり小なり模型化する。これは、風速の測定高度が地上数mという低いものであり、そのような位置の風速はそのまわりの建物等の影響を強く受けるであろうということが容易に推察されるからである。しかしながら、どの程度の範囲まで模型化するかについては定説がなく、実験者の恣意にまかされているのが実情である。

2.1.2 気流に関するパラメータ

通常のビル風の風洞実験における風洞気流軸方向に沿う鉛直断面の風の状況は図1のようであり、求める風速 u_j は次のような無次元パラメータの関数となる。

$$\frac{u_j}{U_h} = \phi \left(\frac{R}{H}, \alpha, \frac{\delta}{H}, \frac{\sigma_u}{U}, \frac{\lambda_p}{H}, \frac{U_h H}{K}, \frac{R(\partial p / \partial x)}{q_h} \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

α ; 鉛直方向平均風速分布をべき関数で近似

したときのべき指数

δ ; 境界層の厚さ

σ_u/U ; 乱れの強さの鉛直方向分布

λ_p ; スペクトルピークを与える波長

U_h ; 接近流の高さHにおける風速

K ; 渦動粘性係数

$\partial p / \partial x$; 気流方向の静圧勾配

q_h ; 高さHにおける速度圧

これらの無次元量のうち、 σ_u/U は α と密接な関係があり、風洞床面上にブロック等を並べて境界層を作る場合には、 α を相似にすれば σ_u/U もおおむね相似になる傾向がある。 λ_p/H は、風洞内では実際より小さくなる傾向があるが、これを任意に制御することは極めて困難である。また、 $U_h H/K$ は、Kがどのような値になるか定説がなく、現状ではこのパラメータの影響を追求することは困難である。 $R(\partial p / \partial x)/q_h$ は、風洞内では $\partial p / \partial x$ を必ずしも零にすることができないためにとり上げたものであるが、この研究で使用した風洞装置ではその影響を調べることが困難であ

図1 乱流境界層中の風洞実験

った。したがって、本研究においては、(1)式右辺の最初の三つのパラメータのみについて相似性に及ぼす影響を検討することにした。なお、 R/H は前項で述べた周辺市街地の模型化範囲と同じものである。

2.2 実測データ

相似性の尺度にするために選出した実測データは、東京都新宿区にある新宿新都心地域、東京都中央区月島地域および千葉縣市川市行徳地域の三つの地域で測定された平均風速のデータである。表2は各地域における実測の概況を一覧したものである。なお、風洞実験結果との比較に用いた実測データは、大気安定度がおおむね中立に近いとみなされる時、すなわち、基準点の平均風速が新宿については10m/s以上、月島については6m/s以上、市川については5m/s以上の時のデータに限った。

2.3 風洞実験

(1) 模 型

風洞実験に用いた模型は、前述の実測が行われた時期の新宿、月島、市川の三地域の縮尺模型で、新宿については1/500及び1/1000の縮尺のもの各1基、月島については1/200及び1/500の縮尺のもの各1基、市川については1/300の縮尺のもの1基、合計5基である。これらの模型は、新宿の縮尺1/1000のものを除き、周辺市街地の模型化範囲 R/H を適宜変えることができる。

月島の模型は、共同住宅の表面の凹凸の状態ならびに道路上の樹木の形態を数種類にわたって変更することができる。

(2) 実験項目及び実験分担

前述の5基の模型を研究参加機関の保有する風洞(合計13基)に持ち込んで実験が行われた。これらの実験のテーマは、2.1に述べた各種パラメータの影響に関係するものの他に、ビル風の風洞実験の精度及び信頼性に係るテーマをも含むようにした。表3は、そこで行われた実験項目ならびに実験担当機関の一覧表である。

表2. 三つの地域での実測の概況

地 域 項 目		新 宿	月 島	市 川
所 在 地		東京都新宿区西新宿	東京都中央区月島一丁目	千葉縣市川市行徳
測定点位置		高さ100~200mの超高層ビルが林立する街区の内外	14階建共同住宅周辺の街路樹のある道路上	7階建の共同住宅の脇にある小公園の中。公園は裸地
周 辺 地 域		中低層市街地	中低層市街地	中低層市街地
基準風速測定点		二つの超高層ビル屋上、地上237m, 187m	共同住宅屋上、地上58.1m	測定点から約2km離れた行徳小学校屋上、地上16.7m
地 表 測定点	点 数	10点	17点	12点
	地上高	2~9m	1.5~8m	5m
使 用 測 器	基準点	エアロベーン型風向風速計	超音波風向風速計	エアロベーン型風向風速計
	地表 測定点	3杯風速計	超音波風向風速計 3杯風速計	3杯風速計
測 定 期 間		1977年 7月~1978年 1月 1979年12月~1980年11月	1978年9月~1979年8月	1976年10月~1977年9月

表3. 実験項目と実験分担

実験項目	担当機関 (記号は表1参照)
◆模型の製作方法に関する実験	
(1) 建物表面の細部の模型化の影響	I, M, W
(2) 樹木の模型化の影響	E, F, G, I, K, W, M
◆市街地の再現方法に関する実験	
(3) 模型化範囲の影響	O, C, E, F, G, I, K, W, M
(4) 周辺市街地の簡略化の可能性の検討	O, C
(5) 上流側の大規模建物の影響	H
◆気流の再現方法に関する実験	
(6) 平均風速の鉛直分布の影響	A, O, C, S, D, E, U, F, G, I, J, K, L, W, M
(7) 境界層高さの影響	C, E, F, J, L
◆風洞実験の誤差検討に関する実験	
(8) 風洞風速の影響	E
(9) 平均化時間の影響	E
(10) 地表面付近の変動風速の測定におけるサンプリング個数の影響	I
(11) 風向設定の影響	B
(12) 測定点の位置設定誤差の影響	A, E, F, G, I, K, W, M
◆各種要因が複合された場合の検討に関する実験	
(13) 実験を繰返した場合の誤差	A, E, F, G, I
(14) 研究機関相互のデータのバラツキ	A, S, D, E, F, G, I, J, K, L, W, M
(15) 模型縮尺を変えた場合の誤差	D, E, F, G, I, K, W, M

(3) 実験に関する取決め

複数の機関が複数の模型を使って行う実験の結果を相互に比較検討するための共通基盤を設けるために、各種パラメータの標準値を定め、ある特定のパラメータの影響について実験をする場合には、他のパラメータをそれぞれこの標準値に合せた実験を含むようにした。ただし、気流の性質に関するパラメータは、個々に独立に制御することが容易でなく、この条件を満足した実験は多くなかった。

ビル風実験の精度あるいは信頼性を調べる場合には、すべてのパラメータを標準値に設定した実験(標準実験)も行った。

3. 実験結果

3.1 建物表面の細部の模型化

月島の共同住宅は各階床面から1.5 m水平に突出したベランダを有している。このベランダを表4に示す4種類の形状に模型化し、周辺気流の変化を検討した。

表4. 模型壁面の凹凸の種類

壁面タイプ	形状	壁面状態
Sタイプ (標準)		ベランダを1/500の縮尺率で再現したもの
Aタイプ		ベランダの出を2倍したもの
Bタイプ		ベランダを撤去表面を平滑にしたもの
Cタイプ		ベランダの外部線で表面を平滑にしたもの

(但し、ベランダの戸境の縦間仕切は再現していない)

その結果、この壁面凹凸の変化は、気流の剥離が生じていると推測される共同住宅の平面隅角部に極めて近い地点の風速にわずかな変化を生じることがあったが、それ以外の地点に及ぼす影響は極めて小さかった。

亀井等²⁾及び三上等³⁾が行った類似の実験の結果によれば、ベランダの戸境に鉛直方向に仕切りを設けた場合には周辺の気流に相当の変化が表われるようである。今回の実験結果は鉛直方向に仕切りを持たないベランダ状突出に関するものである。

上述の結果の中で気流の剥離が生じていると推測される平面隅角部近傍には壁面凹凸の影響がわずかながらも生じるということは注目に値する。なぜなら、これ以外の実験においても、高い建物の平面隅角部近傍にある測定点の風速の実測データとの相似性は、他の測定点のそれが良好である場合でも際立って悪いという状況がしばしば見受けられたからである。このような状況の発生は、それらの測定点が平面隅角部の側方のやや風下にあつて、建物から剥離した気流の高速部がその近傍を通過していると推測される場合に多い(例えば、図2に示す市川の測定点の配置状況と図14

図2 観測点配置図(市川)

Sに示した実測値と実験値の差異を見較らべられたい)。

このことは建物の剥離流の形状が建物隅角部近傍では相似になっていないということを示唆している。これについては少なくとも次の二つの原因が考えられる。その第一は、後述する実測における風向がかなりの誤差を含むものであるということであり、第二は、ここで問題にしている建物壁凹凸の模型化が適正でないということである。剥離流の相似性とこれら二つの原因との関係は今後の重要な研究課題であろう。

3.2 樹木の模型化

月島地域の実測データは、かなり密に植えられた街路樹の影響を強く受けている。今回の研究では10種類の樹木模型を作って風洞実験を行い、実測データとの相似性を調べた。樹木の模型は大別すると次の6タイプであった。

- 針金をラセン状に加工したもの
- 市販のおもちゃのモミの木
- 海綿をのりで固めたもの
- スポンジを樹木状に削ったもの
- ナイロンたわしをほどいて樹木状にしたもの
- 数mの長さのテフロン線を折り丸めて樹

木状にしたもの

実験の結果は次のとおりであった。

(1) 実測データとの相似性は、樹木の模型を設置することによって大幅に向上する。これに比べれば樹木模型の種類や充実率等の変化に伴う相似性の変化の程度は少ない。

(2) 樹木模型の設置に伴ってその周辺の風速は減少する。風速の低減は樹木の風下の地点において著しい。

(3) $a \sim f$ のすべての種類の樹木模型は、風速 2 m/s 以上の範囲でおおむね一定の風速低減効果を有する。

(4) 充実率や見付面積の比は、風速低減効果の相似性に関係を有する。

3.3 周辺市街地の模型化範囲

前出の図1における模型の中心付近の風速の分布が R/H を変化させた場合に受ける影響を新宿、月島、市川の場合について調べた。ただし、新宿の場合については、 R/H が 3.5 以上では模型化範囲の直径が風洞断面の幅を超えるので、そのような場合は模型化範囲を 形にしている。

その結果は次のようであった。

(1) 接近流の鉛直方向風速分布は、模型市街地の風上端をやや過ぎたあたりで下層から崩れ始め、代りに、そこに新たな境界層（以下、内部境界層という）が発達し始める。

(2) 内部境界層の厚さは、市街地内の建物の平均高さを $\bar{h}$ とするとき、市街地上の吹走距離 $20\bar{h}$ 当り、 $\bar{h}$ の割合で増大する。この増加の割合は、吹走距離 $40\bar{h}$ 程度までの範囲で確認された。

(3) 市街地風上端から $10\bar{h}$ （新宿の場合）ないし $25\bar{h}$ （市川の場合）程度以上風下の地表付近の風速分布は、接近流の鉛直方向風速分布の如何にかかわらずほぼ一定となり、実測データとの相似性も良い。

(4) 模型化した市街地内に広い更地あるいは内部境界層の厚さより高い建物がある場合は、その

中あるいは近傍の地点の風速の相似性は、その地点より風上の市街地を上記述べた $10\bar{h}$ ないしは $25\bar{h}$ よりさらに広い範囲にわたって模型化しなければ十分には期待できない。その広さは、接近流の鉛直方向風速分布が実際のそれに近いほど小さくてよい。

(5) 高さや面積の大きな建物は、相当広い範囲にわたって風下の地点の風速に影響を及ぼす。市川の場合、7階建の建物がその高さの1.6倍（その建物の風向方向見付面積の平方根の8倍）程度風下の地点の風速に影響を及ぼすことがあった。

3.4 周辺市街地模型の簡略化

市街地をあまりに広範囲にわたって模型化するのは、模型製作のコスト面でも、また風洞実験の容易さの点でも好ましいものではない。そこで、これを簡略化することを試みた。すなわち、模型化すべき市街地内に高さ h_i 、建築面積 a_i の建物が N 棟あったとき、これらを総容積の等しい同一サイズの N 個の正四角柱（高さ $= \sum h_i / N$ 、底面の一边の長さ $= \sqrt{\sum (h_i a_i) / \sum h_i}$ 、以下等価ブロックという）に置換（等間隔の千鳥配置）して実験し、実況どおりに縮尺した市街地模型の実験と比較した。この比較実験は市川と新宿の場合について行われ、次の結果が得られた。

(1) 市川の場合、風上に規模の大きい建物がなければ等価ブロックによる簡略化は有効であるが、そうでない場合は、規模の大きい建物が風下に及ぼす影響を再現できない。

(2) 新宿の場合は等価ブロックが密集しすぎて地表面粗度が平板なみに低下することがあったが、ブロック相互の離間距離を最大にするように配置した場合は、実況どおり縮尺した市街地の場合に近い内部境界層が得られた。

3.5 平均風速の鉛直分布

周辺気流分布に及ぼす接近流の風速の鉛直分布の影響は、3.3で明らかになったように周辺市街地の模型化範囲に応じて変化する。すなわち、鉛

直方向風速分布の影響は、模型化範囲 R/H が十分大きいときは小さく、 R/H が小さいときは大きい。今回実施した大量の風洞実験のデータのうち $R/H=3$ の場合のデータには、接近流の鉛直方向風速分布の影響が明瞭にあらわれている。

まず、地表の測定点 i における風速を U とし、これとは別のやや高い所にある基準点の同時刻の風速を U_h とし、その比 U/U_h を風速比と呼ぶ。

接近流の鉛直方向風速分布のべき指数が $1/n$ であったときのこの風速比を $R_{1/n}$ と表記する。

図3は、 R/H が3、基準点高さ600mm(地上300m相当)の場合の月島の風速比 $R_{1/3}$ 及び $R_{1/6}$ と $R_{1/4}$ の相関に関する散布図である。この図に見られるように、 $R_{1/n}$ と $R_{1/4}$ の関係を

$$R_{1/n} = A_{1/n} \cdot R_{1/4} \quad (2)$$

図3

図4 基準点の設定高さによる $A_{1/n}$ の変化

と表わした場合、べき指数の分母 n が4より大きいときは係数 A_1/n は1より大きく、 n が4より小さい場合は A_1/n は1より小さい。すなわち、モデル化範囲が比較的小さい場合、周辺気流の風速比は鉛直方向風速分布のべき指数が大きくなるにつれて小さくなる傾向を有する。

一方、係数 A_1/n は、基準風速の設定高さによって値が変化する。図4はその様子を示している。

同図におけるa図とb図を重ねて見ると、基準風速の設定高さが30m~70mの場合、 $1/n$ の変化によっても A_1/n の変化の幅は小さい。これは、この高さの範囲に基準風速を設定すれば、接近流の鉛直方向風速分布の如何にかかわらず周辺流の風速比の分布が一定になる傾向があることを示唆している。図5は月島の共同住宅の屋上D点(地

図5

図6 測定点における風速の鉛直分布

上58.1m)の風速を基準とする地表測定風速比 $R_{1/3}$, $R_{1/6}$ と $R_{1/4}$ の相関を示す。この図における係数 $A_{1/n}$ は、図3の場合と著しく違っていずれも1に近く、上述の傾向が明瞭に表われている。

図6は、月島及び市川のある地表測定点における鉛直方向の風速分布図である。これによると、

いずれの場合も地上30から70m付近での風速分布は、接近流の鉛直方向風速分布の如何にかかわらずほぼ相似形である。この高さの範囲は、前述した接近流の鉛直方向風速分布が変化しても風速比が一定になるような基準風速設定高さの範囲と一致している。

ところで、以上は主として月島及び市川に関する

r : SMB基準の風速比

r_s : $\alpha \div 1/4$ の時のSMB基準の風速比

図7 風速比に及ぼす鉛直分布べき指数の影響(超高層ビル風上側測定点)

r : KDD基準の風速比

r_s : $\alpha \div 1/4$ の時のKDD基準の風速比

図8 風速比に及ぼす鉛直分布べき指数の影響(超高層ビル風下側の測定点)

る実験結果から導びかれたことであるが、新宿の場合にはこれとはやや異った影響が見られる。

図7及び8は、接近流の鉛直方向風速分布のべき指数 α が $1/4$ である時の風速比（超高層ビル屋上に設けられた基準点の風速に対する比） r_s に対する他のべき指数をもつ風速分布の場合の風速比 r の比を示したものである。図中の◎は、実測値（実測に対応する α の値は、新宿の周辺市街地を3.4に述べた等価ブロックで約5km相当の長さにあたって近似したとき、その上空にできた境界層のべき指数 $\alpha = 1/2.7$ とした）である。また、図中の測定点10は超高層ビルから比較的離れた位置にあり、測定点7及び17は超高層ビルの近傍にある。さらに、図7はこれらの測定点が超高層ビルの風上に位置する場合、図8は同じく風下に位置する場合に対応している。

これによると、超高層ビルの風上側においては、 α が $1/4$ から $1/3$ の範囲では風速比はあまり変化せず、かつ実測値にほぼ近い値であるが、 α が

$1/6.5$ 以下では風速比が大きくなっていく。一方、超高層ビルの風下側では、 α が変化しても風速比の変化はわずかであり、かつ実測値とほぼ同程度の値となっている。図9は、超高層ビルの風下側にある測定点における鉛直方向風速分布を示したものであるが、この図をみても超高層ビルの風下の風速が接近流の鉛直方向風速分布の影響をほとんど受けないことが明瞭にわかる。

以上のことから、超高層ビルの風上側の地点は、周辺市街地模型が作る内部境界層の中に入り、それに対応した風速分布になるものの、基準風速の設定点が内部境界層の外側に位置するため、それを基準にした風速比は接近流の風速の鉛直分布の影響を受けることになる。これは、前に述べた月島や市川の場合に見られた傾向と一致している。一方、超高層ビルの風下側では、内部境界層の影響は少なく、主として超高層ビル群の後流の影響を強く受ける。この後流は接近流の風速の鉛直分布の影響を受けることが少なく、したがって超高

図9 超高層風下側測定点での風速分布（新宿）

層ビルの風下側の風速分布は接近流の風速の鉛直分布の影響も受けないことになる。

結局、以上の結果から接近流の風速の鉛直方向分布の影響について次のような結論が得られる。

(1) 周辺流の測定対象地域の建物群が、周辺市街地模型によって作られる内部境界層に包まれ、かつ基準点がその内部に設定されている場合の風速比は、接近流の風速分布の影響をほとんど受けない。

(2) 一方、新宿地域の場合のように、基準点が内部境界層の外側に設定されることになる場合は、地表部の地点の風速比は接近流の風速分布の影響を受け易い。したがって、周辺市街地の模型化範囲が小さい場合は、接近流の風速分布をできるだけ実情に近づける必要がある。

(3) 新宿の場合のような超高層ビル群の風下側の地点の風速比は、内部境界層や接近流の影響よりも、超高層ビル群の後流の影響を強く受ける。

3.6 境界層高さ

境界層高さの影響も、周辺市街地の模型化範囲が大きく、内部境界層が十分厚く発達している場合には少ない。したがって、模型化範囲が小さい場合 ($R/H = 3 \sim 8$ の場合) について、接近流の境界層高さの影響を調べた。

図 10 は、接近流の風速の鉛直方向分布を一定にして境界層高さ δ/H を 1.75, 2.5, 4.5 と変えた場合の風速比の散布図である。これは月島の場合のものであるが、これから、 δ/H が 1.75 以上あれば境界層高さの影響は生じないことがわかる。市川の場合は、接近流の境界高さが 80 m 相当 ($\delta/H = 4$) 以上であれば風速比は境界層高さの影響を受けなかった。

図 11 は、新宿における超高層ビルの風下側の地点の鉛直方向風速分布が、 δ/H が 0.8 ないし 2.5 の範囲で著しく変化する様子を示している。前節では、超高層ビル風下側の測定点における風速の鉛直分布は接近流の鉛直方向風速分布の影響を

図 10 風速比に及ぼす境界層高さの影響 (月島)

図 11 風速の鉛直分布に及ぼす境界層高さの影響 (新宿)

ほとんど受けないことを示したが、それは δ/H が 1.5 以上の場合のデータについて言うことであって、この図に見られるように境界層高さが超高層ビルより低いような場合はそれとはかなり異なった状況が生じるようである。

3.7 実験風速

角ばった建物に関する風洞実験では、レイノルズ数の影響は無視できるとされている。しかし、あまりに実験風速を低く設定すると地表面近くの風速が極端に低くなって計測上の問題が生じる恐

表 5. 風洞実験結果に含まれる各種誤差

	誤 差 要 因	風 速 比 の 誤 差	誤差の絶対値
各種要因による誤差	風 洞 風 速	(月) $\sigma = 0.02$	約 0.15m/s
	平 均 化 時 間	(月) $\sigma = 0.02$	約 0.15m/s
	サンプリング個数	(月) $\sigma = 0.03$	約 0.2 m/s
	風向設定誤差 ^{注1)}	(新) $\sigma = 0.02$	約 0.15m/s
	測定点位置設定誤差 ^{注2)}	(月) $\sigma = 0.03$	約 0.2 m/s
風速計精度	温度補償の不完全さ	Full Scale に対し 3%	約 0.3 m/s
	風速計の直線性	Full Scale に対し 2%	約 0.2 m/s
	風速計の指向性	Full Scale に対し 5%	約 0.5 m/s
複合された場合	実験の繰返し	(月) $\sigma = 0.04$	約 0.25m/s
		(新) $\sigma = 0.02$	約 0.15m/s
	模型縮尺の相違	(月) $\sigma = 0.08$	約 0.55m/s
		(新) $\sigma = 0.07$	約 0.55m/s
	研究機関相互	(月) $\sigma = 0.05$	約 0.35m/s
		(新) $\sigma = 0.07$	約 0.35m/s

(月)月島 (新)新宿 σ 標準誤差注1) 縮尺 1/1000 の模型 (直径 1.6 m) 外周で ± 1 mm の風向設定誤差を想定注2) 縮尺 1/200 で ± 2 mm の位置設定誤差を想定

れがある。本研究では通常の実験において設定されることの多い風速 3～12 m/s の範囲で、そのような影響の有無を調べた結果、この範囲においては実験風速が周辺気流の風速比に及ばず影響は極めて微少であった。

3.8 風洞実験の誤差

前節まではビル風に関する風洞実験の相似性に係る問題について研究成果の概要を述べた。ところで、ある相似則に忠実に従って実験を行う場合でも実験結果に不可避の誤差が含まれることは言うまでもない。しかしながら、この誤差の量がどの程度であるかという問題については、これまで

見るべき成果がなかった。本研究においては、多数の実験者が、多数の風洞を使って大量の実験を実施しており、誤差の量についてデータを得ておくことは後々の参考のために有意義なことであると考えた。誤差評価の詳細な説明は研究報告書にゆずり、ここでは得られた結果だけを表 5 に一覧しておく。

4. ビル風に関する風洞実験の方法

これまで行われてきたビル風に関する風洞実験においては、周辺気流の測定対象となる建物とその周辺にある程度の範囲までの市街地の縮尺模型

を作り、これをその地域の境界層を模擬した境界層流中に置いて周辺流が測定されるのが通例であった。この時、風洞内に作られる境界層は、既往の市街地上空における風観測データを参考にしてきめられる仮想の境界層である。このような方法によって得られた周辺気流の相似性を前章に述べた研究成果に照らして推測してみよう。

先ず第一に、風洞内に作られる境界層すなわち接近流の実際との相似性が問題である。これが相似になっていれば、周辺市街地の模型化範囲があまりに小さくない限り、得られた結果は実際とおおむね相似になっていると推定される。しかしながら、上述のように接近流はほとんどの場合仮想の境界層であって、これが実際のものに相似になる可能性は小さい。

接近流の相似が成立していない場合は、周辺市街地の模型化範囲の大きさが相似性を左右する。すなわち、模型化範囲が前章で述べた程度に十分大きく、模型市街地上にできる内部境界層が風速を測定している地域の建物ならびに基準点を十分に包み込むほど厚く発達していれば、実際とはほぼ相似な結果が得られていると考えられる。

以上のような条件が満たされていない場合は、程度の差こそあれ実際とは違った結果を得ることになったと思われる。

今回の研究の結果から考えられる、現状において最も相似性の良い風洞実験の方法は、周辺気流を測定する建物の周辺市街地を相当広範囲にわたって正確に模型化し、これに風（これは一様流であつてもよさそうである）をあてて実験することである。その場合の市街地の模型化範囲は、最も風上の測定点の風上に、市街地の建物の平均高さの10倍あるいは25倍以上必要であろうという目安が今回得られているが、周辺気流を測定する建物が周辺市街地の高さより著るしく高い場合、あるいは測定点の風上に大規模な建物がある場合など特殊な条件下ではこれよりさらに広い範囲を

模型化することが必要である。要は、模型市街地上にできる境界層が、周辺気流を測定する建物及びその周辺の建物群を包含するのに十分な高さまで発達するのに必要なだけの模型化範囲があればよい。

ところで、模型化範囲を広くすることは種々の面で不都合を生じやすい。このため、この研究においては、市街地模型の簡略化についても検討し、未完成ながらも一つの方法の可能性を見出した。しかしながら、この方法もお膨大な調査を必要とし、必ずしも簡便とはいえない。この方面の研究が早急に望まれる所である。

なお、参考のため、以下に今回の研究の中で実施した風洞実験のうち、周辺市街地の模型化範囲が大きく、実際との相似性が最も良いと推定される実験を、新宿、月島、市川について一つずつ選び出し、その結果と実測データとの対応がどのようなものであるかを示しておく。

表6は、選び出した三つの実験における主要な実験条件等を一覧したものであり、図12～14は

表6. 実験条件

パラメータ	実験対象地域		
	新 宿	月 島	市 川
樹木の模型化	無	タイプA	無
模型化範囲			
R	1200m	200m	320m
R/H	6	5	16
接近流			
δ	220m	140m	270m
δ/H	1.1	3.5	14.3
α	1/3	1/4	1/4
基準点			
位 置	ビル屋上	ビル屋上	ターンテーブル中央
高 さ	187m	58.1m	16.7m
模 型 縮 尺	1/500	1/200	1/300

図 1.2 実験値と実測値の比較（新宿）

風洞実験で得られた風速比と実測で得られた風速比を測定点ごとに対比したものである。図中の黒丸は風洞実験値、白丸は実測値の平均値をあらわす。また、白丸の上下に伸びた線は、平均値 $\pm 1\sigma$ （ σ は標準偏差）の範囲を表わしている。

これらの図における実験値と実測値の対応は、おおよそ次のようである。

(1) 新宿の場合（図 1.2）

風速の平面的分布のパターンは実験値と実測値で良く一致しているが、風速比の絶対値は、実験値の方がやや大きい。超高層ビルに近接した地点で両者の不一致が著しい。

図 1.3 実験値と実測値の比較（月島）

図14 実験値と実測値の比較（市川）

(2) 月島の場合（図13）

風向NにおけるA点，風向SW及びSSWにおけるE点において実験値と実測値の差が大きいが，その他の点では両者はおおむね良く一致している。A点は互に接近して植えられた街路樹にはさまれた特殊な点であり，E点は共同住宅の角に極めて近い点である。

(3) 市川の場合（図14）

ほとんどの点で実験値は実測値とよく一致している。風向S及びSSWのときに実験値と実測値の差がやや大きい，これは共同住宅の角からの剥離流線の形の不相似が原因と考えられる。

参考文献

- 1) 風洞実験法研究会：建築物周辺気流の風洞実験法に関する研究報告書，（財）日本建築センター，1984.3
- 2) 亀井，丸田他：建物壁面粗滑が周辺の強風区域に及ぼす影響，日本建築学会大会梗概集，1974。
- 3) 三上，新堀他：建物壁面粗滑が周辺の強風区域に及ぼす影響，東急建設技術研究所報，1974。