

建築物周辺の気流に関する調査研究（その1）

—風洞実験による気流分布の測定—

藤井邦雄
日比一喜
金子俊幸

§ 1. まえがき

最近、高層建物や中高層マンション等の建築が急速に増加するにつれ、日照、交通、大気汚染、電波障害、風害、プライバシー侵害等の様々な環境問題が論議されるようになってきた。

ビル建設によって、その周辺の気流に変化がおこることは事実であるが、それが周囲の低層建築や人々の生活にどの程度影響を与えるかを定量的に推定することは、現在のところ資料が不足なこともあり、困難である。

しかしながら、現実ビル建設が急速に進む中で、ビル風害について様々な懸念がなされており、社会問題としても放置できない状態となっており、最近各方面で風洞実験や自然風中の実測等による調査研究が活発に始められた。

ビル周辺の気流は複雑で、現在のところ理論的に容易に求められないため、自然風を模擬した風洞実験によって周辺気流を推定することがよく行なわれる。また、風洞実験の結果と実際の自然場の現象との相似則も明確でないため、実測資料との対応も必要である。

このたび、高層ビル建築に関連し、ビル周辺の気流変化を知るため、都市環境を考慮した風洞実験を行なった。また、自然風中における実測も準備中である。

本報告は、風洞実験の結果、および都内のあるビルの隅角部近傍で得た実測資料に基づき、ビル周辺の気流の性状を検討したものである。

§ 2. 風洞実験概要

2.1 実験方法

東京地方では平均風速が10 m/s以上の風は、図一に示すようにほとんど北風が南風である。

実験方位は、主方向を中心にN, NNW, NW, S, SSW, SWの6方位について行なった。

東京赤坂溜池付近に建設中の第25森ビルを中心とした風洞実験である。

周囲環境は主建物A（第25森ビル）を中心に直径400 mの範囲を1/100の縮尺で直径4 mの円板上に構成した。

風向は円板を回して変化させた。図一に周囲環境を示す。

本実験では、建物Aの東側の住宅地区と西側の路上の気流の変化に重点をおいて測定した。

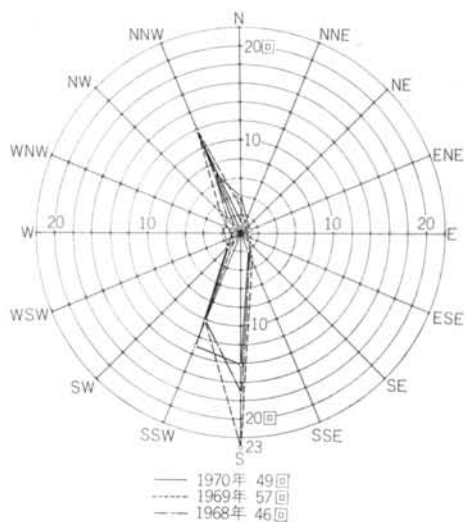
環境模型の地形は、厚さ20mmの発泡スチロールの板を積層して構成した。この地形上に周囲の建物群を配置した。

写真一に模型の概要を示す。建物模型の表面はすべて平らな状態で製作した。表一に主要建物の寸法を示す。

地表面付近の風速の鉛直分布は指数分布を示すといわれ、実用上、

$$U_z = U_{z_0} (z/z_0)^n$$

の実験式で表現される。



図一 東京における日最大風速 10 m/s 以上の風向別回数

U_Z : 高さ Z (m) における風速

U_{Z_0} : 基準高さ Z_0 (m) における風速

n : 地表面周囲の状況で決定される値で市街地では $1/4 \sim 1/2$ である。

都市における境界層の厚さは高度300~500mに達するといわれる。本実験では、実際の高度300mに相当する境界層の厚さを想定し、それ以上の高度では風速は一定値に近づくようにした。



図-2 周辺環境

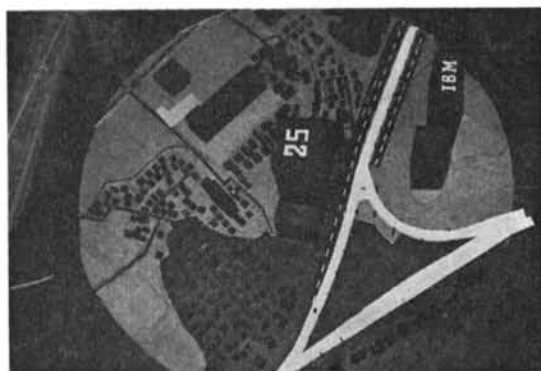


写真-1

建物	高さ	長辺方向	短辺方向	階数
A	88.4m	38.8m	38.8m	25F
B	36.0	34.0	20.0	11F
C	33.7	28.0	10.0	11F
D	23.0	82.0	10.0	7F
E	27.0	70.0	13.0	9F

表-1 周辺ビル概略寸法

鉛直分布を構成するために、写真-2に示すように風上の吹出口に金網、ブロック等を配置した。

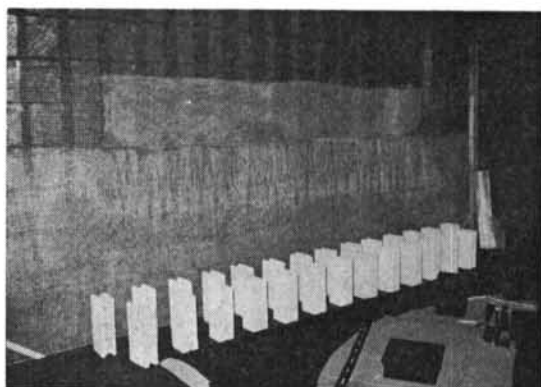


写真-2

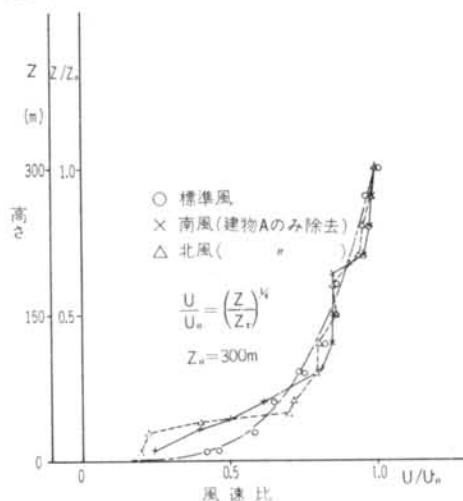


図-3 鉛直プロフィール

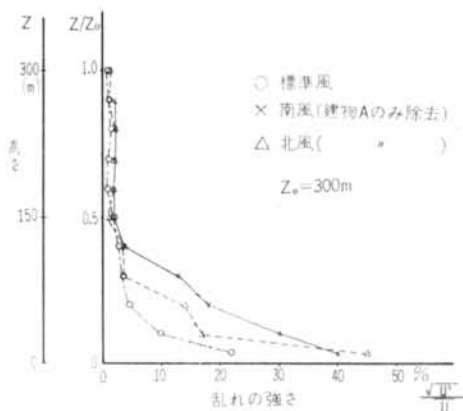


図-4 鉛直方向の乱れの強さ

本実験では、建物Aの中心位置において、建物Aおよび、周囲の10階以上の建物を取除き、鉛直分布を測定した。図-3、4に風速、および乱れの鉛直分布を示す。標準風の乱れの強さは、基準位置300mで1%、地上10m付近で20%となった。

実験風速は、本実験では、基準風速 V_0 を10m/sとした。ただし、煙等による気流の観察は風速3m/sで行なった。

実験における Re 数は建物Aの見付幅を代表寸法とすると 2.8×10^5 である。実物は 10^7 のオーダーとなるが、乱流中にある直方体形状の建物群においては、気流分布は Re 数の相似律には実用上無関係と考えてよいと思われる。

建物周囲の気流分布の測定方法は、地上10mの高さにおける風速を測定し、建物Aの上空、高度300mの基準位置における風速 U_{300} と比較した。

路上では、主として人に対する影響を調査するため、地上2mの高さで測定した。

風速の測定には熱線風速計を2台使用した。熱線風速計のプロープには指向性があるため、まず気流糸で平均風向を探り、その流れに沿って測定した。

風速および乱れの強さは、熱線風速計の U メータ（平準風速指示計）および Δu メータ（自乗平均値指示計）より約10秒間の平均指示を読み取った。

測定値には再現性があり、実用上の測定精度を得るに充分であった。

2.2 使用装置

実験は東京大学工学部航空学科に設置されている自由飛行風洞で行なった。風洞は外気導入式のエッフェル型風洞であり、その仕様は次のとおりである。

吹口寸法 6 m × 4 m

奥行 約8 m

風速 0~15 m/s

熱線風速計は定温度型熱線風速計（日本科学工業KK製）を用いた。

使用したプロープは直径5ミクロンタングステンホットワイヤーである。

煙発生装置はクロシンをヒータで気化して、1本ノズルから煙を出す装置であり（写真-3）、東京大学工学部航空学科中口研究室で製作されたものを使用した。

§ 3. 実験結果の考察

3.1 基準風速

建物Aだけを取除いた場合、鉛直方向のプロフィールを標準風と比較すると、図-3、4に示すようにほぼ高度120m以下では、周囲の建物の影響を受けて風速分布および乱れの強さは大きく変化している。しかし、それより上空ではほとんど変化していない。

これらより、実スケールで地上300mの高度に相当する基準風速の測定位置は周囲の環境が変化しても、安定した基準風を測定するのに適当であった。

以下に示す風速分布はすべて基準風速 U_{300} と比較したものである。

3.2 高層建物周辺の気流について

高層建物A周辺の風速分布 (U/U_{300}) を建物が有る場合と無い場合について比較し、図-5~10に等風速比分布の変化を示す。図中のシャドーの部分が測定対象とした領域である。

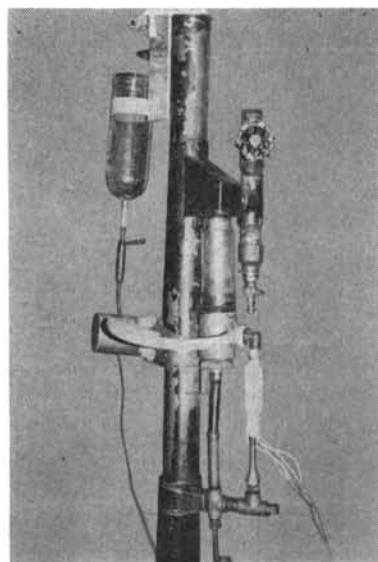


写真-3

3.2.1 南風の時（図-5）

南風の時、高層建物Aの剝離流の影響は、建物Aの東側には強くあらわれていない。むしろ建物Aが無い場合の方が強い風速比0.5~0.6を示している。この増速領域は建物Dの剝離流の影響と思われる。建物Aが有る場合は、その存在によって気流の乱れが激しくなり、風速のエネルギーが消費され風速が低減しているようだ。一方、建物Aの西側通路では、道路の壁面と建物Aとの間に風が吹きぬけて若干風速比があがっている。

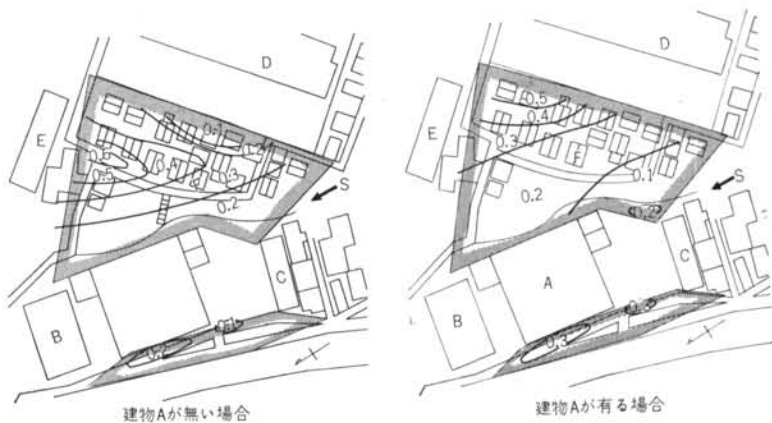


図-5 南風の時、風速比 U/U_{300} の変化

3.2.2 南々西風の時

（図-6）

風は建物Aの南面にほぼ真正面から吹き当たる。この方位の風では、建物Aによる剝離流の影響が顕著にあらわれ、建物Aが存在しない場合の風速分布と全く異なった様相を呈している。建物Aの東側の剝離流線上には風速比0.6の領域がみられる。

建物Aの風上にある建物C（11階）の屋上を越えた風は、建物Aの南側壁面に沿って流れる下降流と重なり、建物A、C間の広場に激しい渦を生じている。さらに、建物Aの側面近傍には、建物の側面に沿う下降流（downwash）がみられる。（写真-4）

高層建物Aの壁面に当る風は建物の高さ70~80%の位置で上下に流れが分れている。写真-5、6に煙による流線を示す。

建物Aの東側領域の風は、地形の影響を受け、ほとん

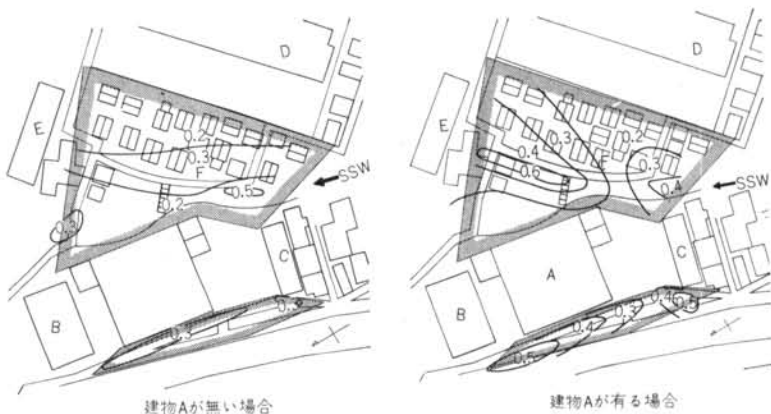


図-6 南々西風の時、風速比 U/U_{300} の変化

ど吹き下し流となっている。また、建物Aの西側の路上では、建物Aが無い場合に風速比が0.3程度であったのが、建物Aの存在によって増速され風速比が0.4~0.5となる。

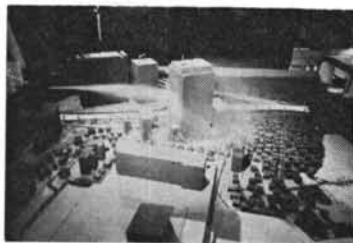


写真-4

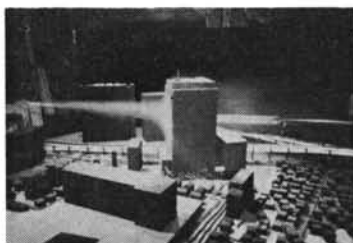


写真-5

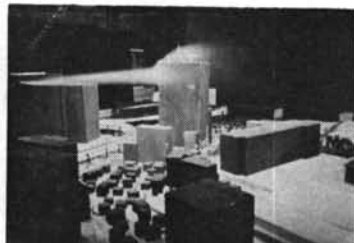


写真-6

3.2.3 南々東風の時

(図-7)

建物Aが有る場合、建物Aと約50m離れた建物Eとの間に谷間風が生じているようで、風速比が0.5~0.6を示している。

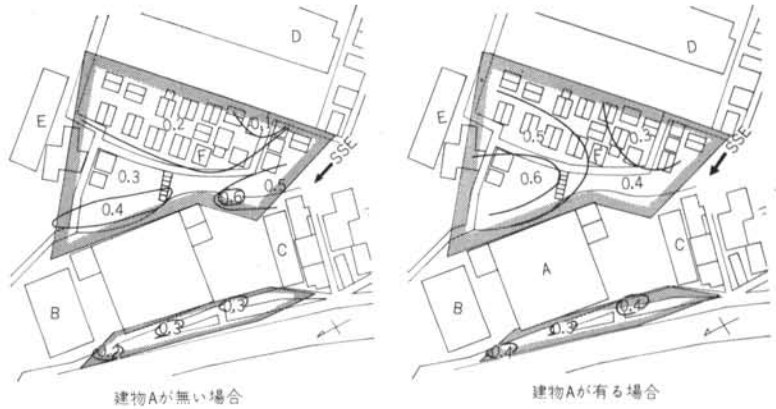


図-7 南々東風の時、風速比 U/U_{300} の変化

3.2.4 北風の時 (図-8)

北風の時、建物Aは建物B(10階)の背後に位置する。地表面近くの気流分布には、建物Aによる剝離流の影響は強くみられず、むしろ建物B、およびCの剝離流の影響があらわれているようである。

また、建物A、B間(約16m)の広場では、建物Bの屋上を越えた風が、建物Aの北側壁面を沿う下降流と重なり、より激しい下降流となっている。

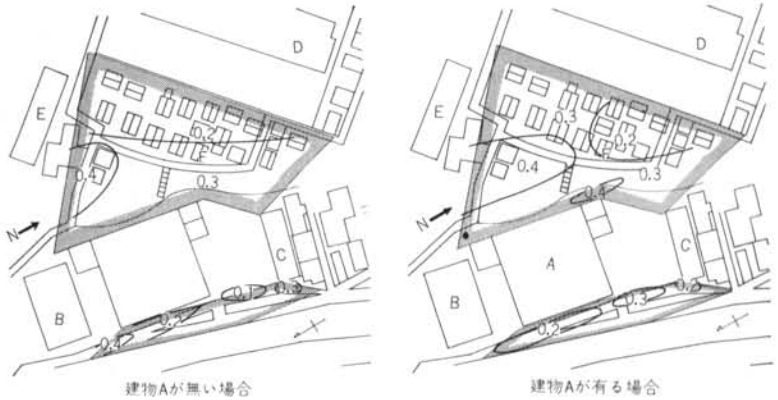


図-8 北風の時、風速比 U/U_{300} の変化

3.2.5 北々西風の時

(図-9)

北風と異なり、建物A、Cの間(約30m)を風が激しく吹きぬけ、東側住宅地区に吹き上げている。

建物Aの東側には、建物Aによる剝離流がみられ、風速比が0.4~0.5を示している。

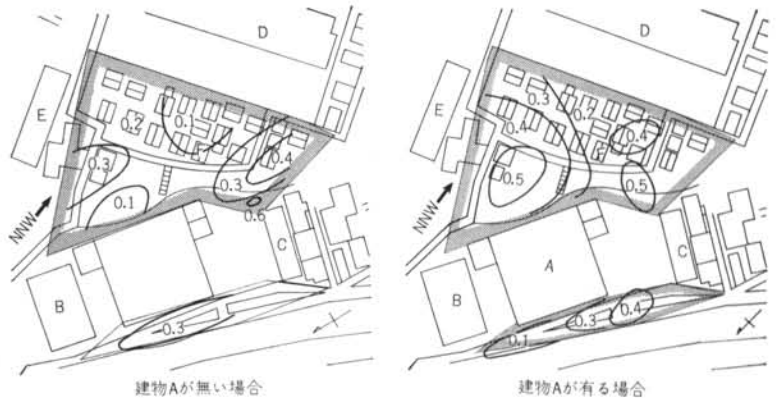


図-9 北々西風の時、風速比 U/U_{300} の変化

3.2.6 北西風の時

(図-10)

北々西風に比べ、建物A、B間を吹きぬける風はさらに激しくなり、風速比が0.6の領域が生じている。また、建物E付近に生じた風速増速領域は建物A、および建物Eによる剝離流の影響と思われる。写真-7に建物Aの剝離流を示す。また、建物Aの西側の路上では、建物A、C間で、風速比が0.5のレベルがみられる。

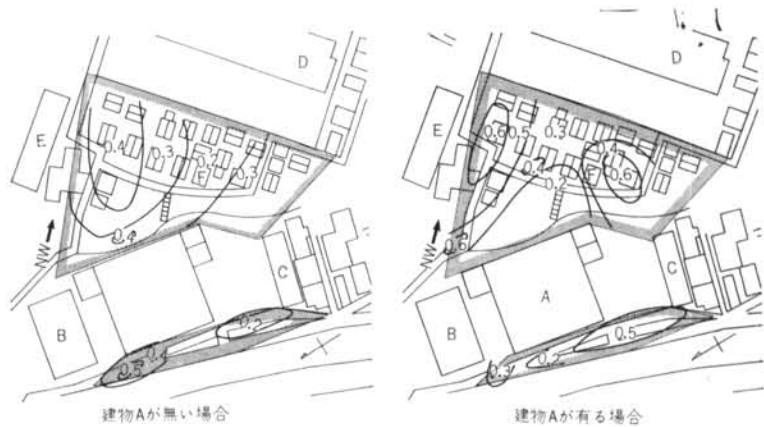


図-10 北西風の時、風速比 U/U_{300} の変化

3.3 建物周囲の乱れの強さ

風速分布と並行して乱れの強さ $\Delta u/U$ を測定した。風速比のレベルが高い場合 (0.5~0.6) では乱れが少なく $\Delta u/U$ が 20~30% であり、風速比のレベルが低い場合 (0.1~0.2) は $\Delta u/U$ は 50~60% を示した。

3.4 風速比の評価

資料が不足していることもあり、明確な規準を示すことはできないが、およそ次のように風速比の評価をこころみた。鉛直プロフィールを示す実験式より、地上10m付近、および地上2m付近の標準の風速比を求めると、それぞれ約0.4、0.3となる。実験結果では、高層建物Aが無い場合、東側の住宅地区では風速比が0.3~0.4、西側の路上では0.2~0.3を示している。しかし、建物Aの存在によって、住宅地区では風速比0.6の領域がみられ、風力としては2倍以上の変化が予想されるため、建物完成後も実測等によって住宅地区に対する影響を調査する必要がある。また、西側の路上では建物Aの存在によって風速比0.5の領域が広がる。1968年~1970年の気象庁の風速データを高度による補正をして、地上300m付近の風速を推定すると、日最大風速が15m/s以上の頻度は年数十回あり、そのうち風向がNW、SSWの頻度は30%程度と予想される。地上2m付近の公共通路で風速比0.5、ガストファクター1.8~3.0とすると、瞬間風速13.5~22.5m/sの頻度が建物Aが無い場合に比べて増し、歩行者等に影響を与えることが予想される。表-2にビューホート風力階数を示す。相当風速は開けた平らな地面上10mでの値である。

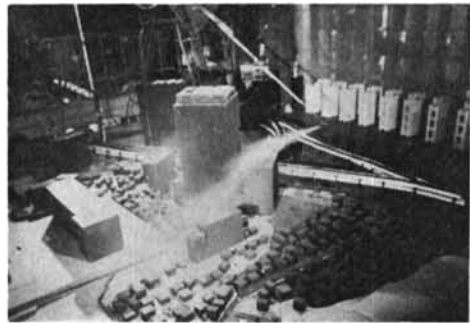


写真-7

ビューホート風力階級	風速m/s	人への影響(文献-8)
1	0.3~1.5	ようやくはだに感じる。
2	1.6~3.3	顔面に風を感じる。
3	3.4~5.4	髪が乱され、着物がひらひら動く。
4	5.5~7.9	砂ほこりがたち、髪が激しく乱れる。
5	8.0~10.7	身体に風の力を感じる。 風を快く感じる限界
6	10.8~13.8	傘の使用がむずかしくなる。 しっかり歩くのが困難
7	13.9~17.1	歩くのに不自由を感じる。
8	17.2~20.7	風に向かって歩けない。
9	20.8~24.4	瞬間風速によって吹き飛ばされることがある。

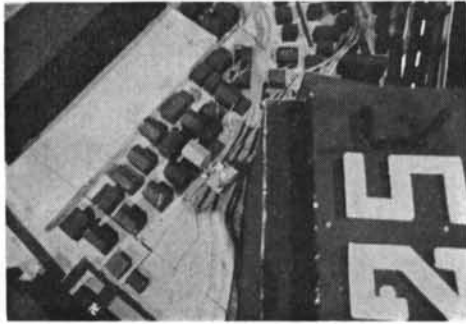
表-2

§ 4. 自然風中の実測例

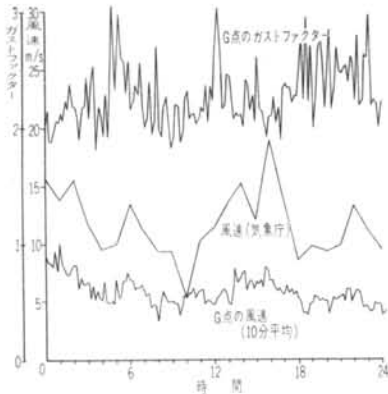
4.1 建物A付近の風の実測例

風洞実験の結果が実際の自然風中における風の性状をどの程度まで相似しているかは、まだ十分な裏付け資料がない。そのため、実測の準備も進めている。

ここでは、建物Aの建設予定地付近に高さ20mのポールを建て、風を観測した結果を一部分析した。



写真一八



図一十一 建物A付近G点の風の実測例
(1971年3月31日南風の時)

観測地点は図一に示すG点である。同地点は建物AのG.L.より約10mの高さにあり、東側住宅地域とほぼ同レベルの高さである。(写真一八)

風速計は高さ20mのポールに5mおきに、20m、15m、10m、5mの位置に4台設置した。風向計はポールの頂上に設置した。風速測定器は牧野応用測定器KKの光電風向風速計を使用した。1例として図一に、1972年3月31日の南風の記録(地上20m)、および同時刻における気象庁の10分平均風速を示した。

ガストファクターは(約2秒瞬間風速)/(10分平均風速)で示した。

この地点のガストファクターは、南風で1.8~3.1、平均2.2、北風で1.7~3.1の間にあり、平均値は2.3であった。風向は気象庁のデータとほぼ同じであり、平均風速は気象庁のデータのほぼ半分のレベルを示した。

この地点は周囲に10階以上のビルが多いため、風の乱

れが激しく風速のレベルも低いようだ。(ただし、気象庁の風速の測定位置は地上52.5mである。)

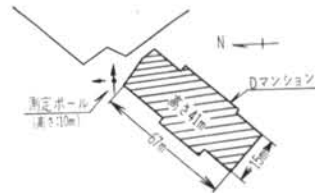
4.2 中高層マンションの隅角部近傍における風の実測例

都内のある中高層マンションの隅角部近傍において、図一に示す地点に高さ10mのポールを建て、その頂部で風速を測定した。観測に使用した風速計は直交する3方向成分(X, Y, Z)の風速を測定できるギル型風速計を用いた。

20分間の風速記録から204.8秒間のデータを0.1秒ピッチで抽出し解析した。表一に平均風速、乱れの強さ、ガストファクターを示す。

風速の水平成分 U_{XY} は風速 U_x , U_y をベクトル合成したものである。 U_z は鉛直方向の風速成分である。

ビル隅角部近傍では水平および鉛直成分とも乱れの強さはかなり大きい値(30~120%)を示している。



図一十二 ギル風速計の設置場所(建物隅角部より約2m)

RUN	U_{vmax}	U_{v} (m/s)	$\sqrt{U_x^2 + U_y^2}$ U_{xy}	U_{vmax} U_{v}	U_{zmax} U_z (m/s)	U_z (m/s)	$\sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}$ U_{vmax} U_z (m/s)	U_{vmax} U_z (m/s)	U_{vmax} U_{vmax} (m/s)	
1	9.59	3.40	0.60	2.82	7.84	2.56	0.76	3.08	9.04	6.80
2	10.46	3.42	0.54	3.06	6.16	2.80	0.48	2.20	10.16	5.04
3	10.30	3.41	0.77	3.02	8.96	3.49	0.39	2.56	10.16	6.56
4	10.21	3.24	0.91	3.16	6.64	3.03	0.40	2.19	10.16	4.32
5	7.81	2.25	0.93	3.46	6.96	2.85	0.54	2.44	7.76	4.40
6	8.49	2.59	0.58	3.27	7.84	3.22	0.35	2.44	8.48	5.04
7	8.30	2.57	0.91	3.24	7.20	3.28	0.33	2.20	8.16	4.56
8	10.33	3.01	0.60	3.43	5.84	1.47	0.69	3.97	10.16	5.20
9	8.87	3.42	0.34	2.59	5.52	1.99	0.66	2.77	8.64	5.20
10	8.15	2.75	0.54	2.97	6.88	1.92	1.22	3.58	7.84	6.32
11	9.87	3.23	0.34	3.06	5.76	1.87	0.82	3.08	9.84	5.28

表一三

4.2.2 風速の評価時間

測定に使用した風速計は距離定数が0.74mであり、風速2m/sでは時定数が0.37秒となる。

204.8秒間の記録について、評価時間を0.1、1.6、3.2、6.4、12.8、25.6、51.2、102.4、204.8秒と変えて、各評価時間に対する最大値を求め、204.8秒間の平均風速と対比して、ガストファクターと風速評価時間の関係

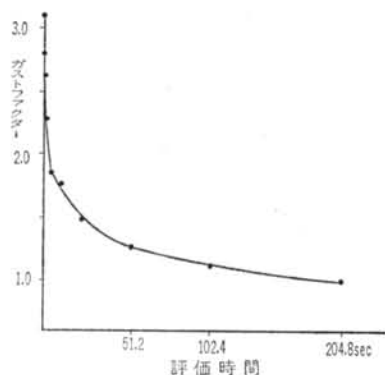


図-13 評価時間とガストファクター (RUN-1) を求めた。図-13に結果を示す。

100秒以上の平均風速に対しては最大のガストファクターは約3.0を示した。

4.2.3 変動風のパワースペクトル

変動風の平均パワーを a^2 とし、変動風のパワースペクトルを次式によって定義した。

$$a^2 = 2 \int_0^{\infty} F(n) dn$$

縦軸を $F(n)/a^2$ 、横軸を $\log n$ にとり、パワースペク

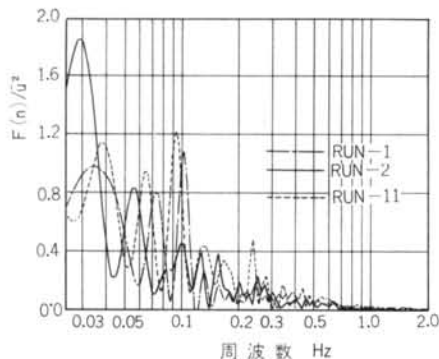


図-14 水平方向のパワースペクトル

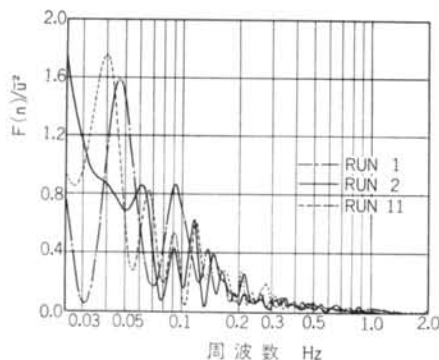


図-15 鉛直方向のパワースペクトル

トルを示す。図-14に水平成分 U_{XY} 、図-15に鉛直成分 U_Z のパワースペクトルを示す。

建物隅角部近傍では鉛直成分に水平成分と同レベルの平均パワーがみられた。

変動風速には0.09~0.1Hz付近、および0.03~0.04Hz付近に卓越周波数がみられる。1Hz以上の周波数成分はほとんどみられなかった。

4.2.4 風の鉛直方向の成分

高さ270m×幅50m×奥行15mの直方体形状の高層建物の $1/100$ 模型を使用して、建物側面に生じる側面吹き降し流(downwash)を調査した。

風速計はギル風速計を用いた。風速計のプロペラの直径は10cmであり、実スケールでは10mに相当するため、測定結果は大局的な傾向を示すものである。

図-16に地上35mに相当する高さで測定した風速分布を示す。

建物の見付幅 D を基準とすると、建物の側面から $0.2D$ の領域では風の鉛直成分は水平成分とほぼ同一レベルを示した。 $0.4D$ 程度離れると、鉛直成分は急速に減少し、 $0.6D$ も離れると全くみられなくなる。鉛直成分は建物の隅角部で剥離した自由流線上で優勢である。

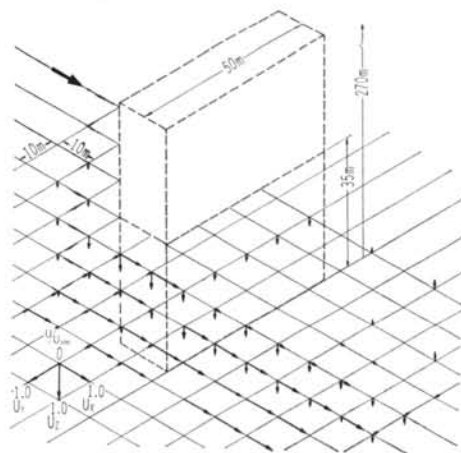


図-16 ビル周辺気流の3方向成分(地上高さ35m)

§ 5. 風害について

日本では毎年のように台風、つつまき等によって、建築物が風害をうけているが、最近高層ビルの出現によってビル周辺に風害が急増するのではないかと懸念されるようになった。

高層ビルの出現によって、その地域の環境が変り従来

経験しなかった気流がビル周囲に生じ、周辺の家屋や人々の生活に被害を及ぼすといわれる。ビル風害の問題がとりあげられてから2、3年たつが、その被害の実情はいまのところ明らかでない。

ビル風害として次のような事例がよくあげられる。

1. ビルの建設により、ビル周辺の気流が強まり、近くの木造家屋の軒先、ひさし等がこわれたり、屋根、瓦が飛ぶことがある、
 2. ビル周辺の気流が強まり、付近を往来する人々の活動に支障をきたす、
 3. ビル周辺の家屋が乱気流により、異常な振動をおこす、
 4. ビル周辺の風の音がうるさく、人々に不安を与える、
 5. 洗濯物が乱気流で干せなくなる、
 6. ほこりがひどい、
- 等である。

これらの問題に対し解決を与える規準はいまのところない。

そこで、これらの問題の対策をはかるうえからも、少なくとも次の内容を知る必要がある。

1. その地域で予想される最大風速（再現期待値）
2. 人々の生活に影響をおよぼす強風の年間頻度
3. 歩行者等に対する強風許容限界

(W.H.Melbourne) 等⁵⁾は高層ビルによって引き起こされる瞬間風速が公共通路において、年1回23m/s、あるいは全時間の1%の間に15m/sを越えるような場合は、許容されない領域であり、第1の規準は人身の危険に関するもので、第2は気持のよさに関するものであると述べている。

等である。

中高層マンション等が都市に建設される場合は、周囲の地形、建物と複雑な干渉が周辺気流におこるため、高層ビル単体の一般現象からすべての局所的な事例までは推定できない。

今後、多くの風洞実験例、自然場での実測資料等の蓄積を進め、統計的に分析することによりビル周辺の気流の性状は明らかとなろう。

防風対策については、すでに若干の実測例から、ビル周辺の樹木等に防風効果が期待されている。

また、文献²⁾では防風さくによって10~20%の風速低減ができたと報告している。

§ 6. むすび

ビル周辺気流の1資料の分析にすぎないが、次のようなことがいえよう。

1. 指数1/4の指数法則で示される鉛直プロフィールを用いた風洞実験において、高層建物の存在によって風速比 U/U_{300} で地上10m付近で0.6、地上2m付近で0.5となり、それらの領域が広がる場合は周囲に対する影響が顕著にあらわれることが予想されるので、実測等による調査が必要と思われる。
 2. 風速比のレベルが高い領域は乱れの強さが小さく、風速比のレベルが低い領域では乱れの強さが大きい。風のエネルギーは乱気流の渦によって消費され、乱れが激しい領域では風速が低減している。
 3. 地表近くの風は、平均風速の低い場合、平均のガストファクターは約2.3を示した。またビル隅角部近傍では、平均のガストファクターは水平方向成分で約3.0、鉛直方向成分で約2.8を示した。
 4. 建物隅角部近傍の変動風速には0.09~0.1 Hz 付近、および0.03~0.04 Hz 付近に卓越周波数がみられた。
 5. 高層ビル側面にみられる吹き降し流の鉛直成分は、水平成分とほぼ同レベルを示している、しかし、鉛直成分の優勢な範囲は建物側面近傍に限られている。
- 今後、風洞実験の結果と自然場における実測結果との対応によって、ビル周辺気流の性状は一層明らかになるう。

§ 7. 謝 辞

風洞実験の実施にあたり、終始貴重な助言と御指導をくださった東京大学工学部航空学科の鷺津久一郎教授、ならびに中口博教授に深い感謝の意を表します。

また、実験に際し、種々の御協力をいただいた中口研究室の広瀬武一郎氏、鷺津研究室の大屋昭男氏、西岡伸一氏、ならびに当研究所の富沢治利研究員に深い感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 財団法人建築業協会 高層建築物周辺の気流の乱れについての調査・分析及び対策研究委員会：“高層建築物周辺の気流の乱れについての調査・研究・分析及び対策に関する研究” 1972年3月
- 2) 鉄道技術研究所 建築研究室 防災研究室：“浜松町駅における風の調査について” (文献1 pp.143 資料—5—1)
- 3) 土木学会・本州四国連絡橋技術調査委員会：“本州四国連絡橋技術調査 第一次報告書 付属資料 耐風設計指針(1964)及び解説” 昭和40年5月
- 4) 小林正二：“高層建物の周辺気流について” 日本建築学会論文報告集 第195号 昭和47年5月
- 5) W. H. Melbourne and P. N. Joubert：“Problems of Wind Flow at the Base of Tall Buildings; Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo, 1971”
- 6) 石崎澄雄, 成仁煥：“建物の間の風について” 京都大学防災研究所年報 第14号A 昭和46年4月 pp.459~480
- 7) 荒川秀俊, 相馬清二, 堤敬一郎, 常岡好枝 江口博：“世界貿易センタービル周辺の風” 天気(日本気象学会機関紙) 第18巻 第12号 1971年12月
- 8) “Wind Environment around Tall Buildings” Building Research Station Digest No. 141, May 1972