都市の風害とその対策

—都市内の風の性質と将来への展望—

大阪市立大学工学部　助教授　川　村　純　夫

まえがき

地上数100m くらいの高さまでは空気の流れは地表面の影響をうけており，風速は下方は小さく上方にゆくにつれて大きくなる．この範囲を大気境界層と呼んでいる．

この境界層内における風速の分布は理論的には対数法則が得られているが経験的には高さのべき法則に従うことが知られている．この平均風速のほかに，地表の風は大きな乱れを含んでいることは煙突からの煙の流れなどからも容易にわかる．暴風時の構造物の振動などを求める場合には，この乱れによる影響も無視できない．

都市では建物の形状，大きさがいろいろあり，また道路，水路，公園などもあって地表のおうとつの状態は複雑であり，草地や農耕地のように単一の抵抗（粗度長）をもって地表面の状態を表わすことは困難である．また中心街などは，そこだけが高層な建物が密集しているので，他の場所に比較して粗度長が大きくその上に生ずる境界層も異なるものと思われる．ここまでは都市上空の風のことを述べた．すなわち建物，樹木，道路など地表の構成要素の全体が平均されて上空の風の性質を決めているわけである．しかし都市内の風となると個々の建物の形や周りの建物との関係位置などが問題となる．この問題についての研究は未だ着手されたばかりのようである．高い建物の密集した部分の地表付近では，その風を記述するための適当な量さえ明らかにされていない現状である．一方都市自体，再開発等常に変化している．このような市街地における風の性質を研究するためには多くの実測による資料の蓄積をまたなければならない．しかし実測には多くの費用と期間とが必要である．建築群と周りの地形・地物を含む模型による風洞実験などの手段も並行して行なわれる必要があろう．しかし模型実験の場合には，現象を記述するに十分な相似性がよく検討されることが前提である．自然風の場における構造物のうける影響を風洞内で模擬する場合の相似則についての研究も未だ十分とはいえ難いように思われる．

また風力を受ける構造物の応答についてもこれを明らかにしなければならない．構造物の受ける風力は流体と構造物の相互によって決定されるので，構造物の形状規模はむろんのこと，重量，剛性分布によってもかかる風力は異なってくる．この機構に関しても現状では十分といえ難い理解に止まっているようである．

本論は以上のような立場で若干の考察を行なったものである．

1.　地表面上の風の構造

地上数100m くらいの高さまでは空気の流れは地表面の影響を受けており，風速は下方は小さく上方になるに従って大きくなる．この範囲を大気境界層と呼んでいる．この境界層内では鉛直方向に運動量の輸送が行なわれている．運動量フラックスすなわち摩擦応力を τ とすると $\tau=\rho K dv/dz$ で表わされる．ここで dv/dz は速度勾配 K は渦動粘性係数，ρ は空気密度である．強風時には空気塊の上下の混合が著しいから気層はほぼ中立となり，平均風速の鉛直分布は

$$\overline{U}=\frac{u^*}{k}\ln\frac{z}{z_0} \qquad (1)$$

で表わされる．ここで $u^*(=\sqrt{\tau/\rho})$ は摩擦速

度，k は Karman 常数，z_0は粗度長と呼ばれ，地表の粗度により変化する長さであって例えば非常に滑らかな氷面で，0.001cm 丈の高い農作物で 14cm，市街地で 60cm 程度の値となる．このような場合地面を高さの原点と考えるのは不適当で草などの高さに相当する h だけ原点を上げるべきである．

すなわち

$$\bar{u}=\frac{u^*}{k}\ln\frac{z-h}{z_0} \tag{2}$$

となる．また地面上 50m ぐらいまでは τ は一定と考えられているが，最近建築物の高さがだんだん増して τ が一定の層の上にまで及んでいる．また大気境界層全体の速度分布を求める試みとしては，まず渦動粘性係数Kを一定とし，境界層の外側 z_G で一定風速（地衡風）$\overline{U}_G$ になるという条件で大気の運動方程式を解くと有名なエックマン・スパイラルとなり，風向・風速の高さによる変化が求まる．

しかしこの仮定にも問題が残っている．経験的にはむしろ高さのべき法則を用いる場合が多い．すなわち

$$\overline{U}/\overline{U}_r=(z/z_r)^\alpha \tag{3}$$

$\overline{U}_r$ は基準高度 z_r の風速である．指数 α は粗度に関係し粗度が増すと大きな値となる．例えば海面上で，$\alpha=1/10$, 野原で 1/6，森林・市街地 1/4，都心で 1/3などが得られている．

また基準高度 z_r としていま10m を，べき法則による風速の高さ による変化を示すと表−1のようになる．

以上は平均風についてであるが，地表の風は大きな乱れを含んでいることは瞬間風速計の記録より容易に認められることである．風の乱れの程度を表わすためには，ある観測時間T内の瞬間風速の最大値 u_{max} とこれとT時間内の平均風速 u_{mean} との比 u_{max}/U_{mean} すなわちガスト・ファクターをよく用いる．風の乱れはいろいろの大きさの渦が風の中を流れていくことが原因とみなせるが，乱れをパワースペクトル $S(z, n)$ と2点間の相互相関係数 $R(z, z';n)$ とによって表わすこともある．すなわち

$$\overline{U}^2=\int S(z, n)dn \tag{4}$$

$$R(z, z';n)=\frac{C(z, z';n)+iQ(z, z';n)}{\sqrt{S(z, n)S(z', n)}} \tag{5}$$

(4)(5)式によって定義される．$C(z, z';n)$ は2点間の同位相成分，$Q(z, z';n)y$ は位相が $\pi/2$ だけづれたスペクトル成分である．

相似の考えより

$$\left.\begin{aligned}S(z, n)&=\overline{U}^2G(nz/\overline{U})\\R(z, z';n)&=R(n\Delta z/\overline{U}_r)\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

表1　べき法則 $(\overline{U}=\overline{U}_r(z/z_r)^\alpha)$ による風速の高さによる変化

高さ z ＼ 指数 α	0.100=1/10 海面上	0.125=1/8	0.167=1/6 平らな草地	0.250=1/4 市街地	0.333=1/3 都心
5	0.93	0.91	0.89	0.84	0.79
10	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
15	1.04	1.05	1.07	1.11	1.15
20	1.07	1.09	1.12	1.19	1.26
25	1.10	1.12	1.17	1.26	1.36
30	1.12	1.15	1.20	1.32	1.44
40	1.15	1.19	1.26	1.41	1.59
50	1.17	1.22	1.31	1.50	1.71
75	1.22	1.29	1.40	1.65	1.96
100	1.26	1.33	1.47	1.78	2.22
125	1.29	1.37	1.52	1.88	2.32
150	1.31	1.40	1.57	1.97	2.47
200	1.35	1.45	1.65	2.11	2.71

という形になる．ただし λ_z は2点間の距離 $|z-z'|$ であり，$\overline{U}_r$ は基準高度の風速である，強風による構造物の振動を求める場合には有力な手段の一つと思われる．

2. 都市上空の風

いままで述べたことは地表面が同じ状態で一様に拡がっていて流れが定常的な状態にあると考えられる場合についてのものであるが，現実にはそのような条件の場所は少なく，平らであっても野原あり森林ありで地表面の粗度は不連続的に変わっていることが多い．都市では建物の形状大きさがいろいろあり，また道路・水路・公園などもあって，地表のおうとつの状態は複雑である．また都心ではそこだけ高層な建物が密集しているので他の場所に比較して粗度長が大きく，その上に生ずる境界層も異なるものと思われる．このような場合境界付近の転移層がどのようになっているかを知ることは実用上重要な問題である．この問題についての実測はまだあまり多くないように思われる．Panofsky および Townsed は異なる粗度長をもつ粗面が直線の境界で接している場合を考え，新しい境界層が境界の風下へ1/10の勾配をもって発達して行く結果を得ている．これによると地上高 H までの風の性質は風上側10Hまでの範囲の地表面の状態によって支配されることになり，都市上空の風は一様な粗面上の境界層とみなすことはむりなような気がする．

3. 都市内の風

これまでは都市上空の風を考えた，すなわち建物・樹木・道路など地表の構成要素全体が平均された形で上空の風の性質に関係するとした．都市内の風となると，個々の建物の形や周りの建物との関係位置等が問題となる．

このような場合その風の性質を記述するための適当な量さえ明らかになっていないように思われる．一般にそのような所では風が弱いということだけは経験的に知られている．しかしだからといって都心に低い建物を作る場合の設計風速をうんと小さく採れるかというと疑問が残る．周囲の人工的な遮蔽物が永く維持される保証もないし，平均風速がたとえ低くても乱れの程度はかえって大きいのがこのような場での特長であり，構造物の応答は一概に低いと断定もできない．構造物の応答をも含めた応答風力の定量化が望まれる．このような市街地における風の性質を研究するためには，多くの実測による知識が必要なことは当然であるがそのような測定には多くの困難が伴うし，といって数値的に模擬する方策も確立されていないので，いまのところ風洞模型か自然風中の中間模型による実験で補っていく必要があろう．

4. 建築物の風害例

台風のような強風時ある種の構造物は被害を生じ，あるいは出水により基礎地盤が洗いさられ，構造物が傾斜し倒壊するなどの被害が起こるのは周知のことである．しかしながら建築物のように一般に複雑な平面および立面構成を持つ場合に，個々の建築物のどの部分がいかなる被害をうけるかはそれぞれ異なる．ここでは建築物の風害の実例を示し，被害形態およびその分布を示す．

4.1. 被害形態による分類

a 局部的な被害

i) 屋根（瓦，スレート，鉄板葺など）および屋根下地，母屋などの被害，写真-1，2，3，4参照

ii) 屋根および小屋組の被害写真-5，6参照

iii) 出入口，窓まわりの被害写真-7，8，9，10参照

iv) 壁，天井，軸組（筋違などを含む）の被害写真-11，12参照

v) 基礎，土台まわりの被害，写真-13参照

b 建物が傾斜する場合

倒壊しなくとも建物が 1/100～5/100 程度傾斜すると，建具の開閉機能が障害をうけ，あるいは倒壊の危険が感じられ使用困難になる．写真-14参照

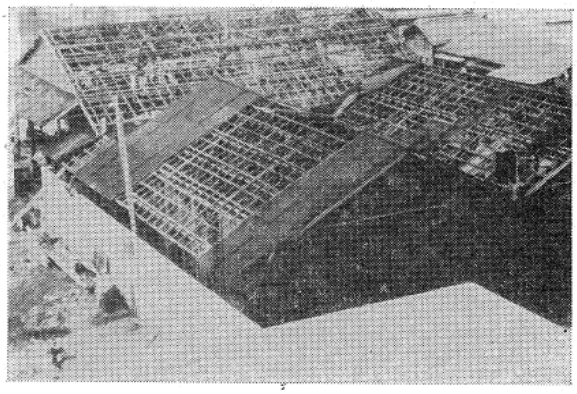


写真　1

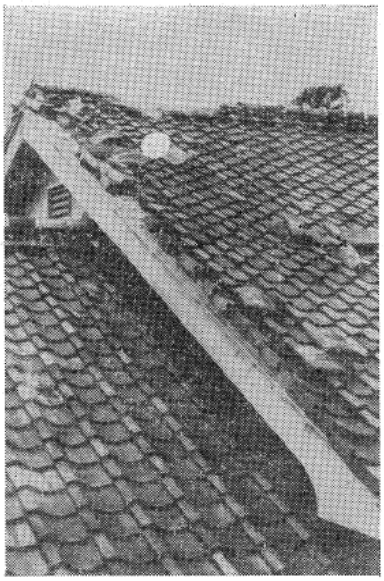


写真　2

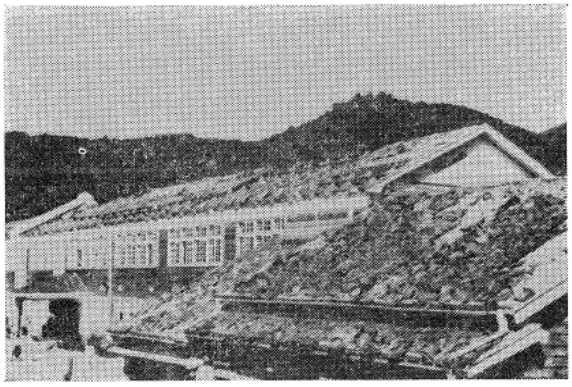


写真　3

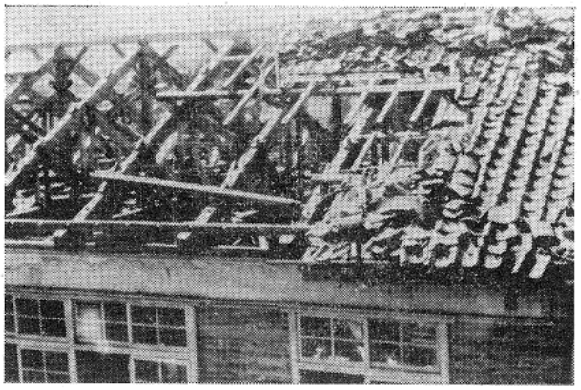


写真　4

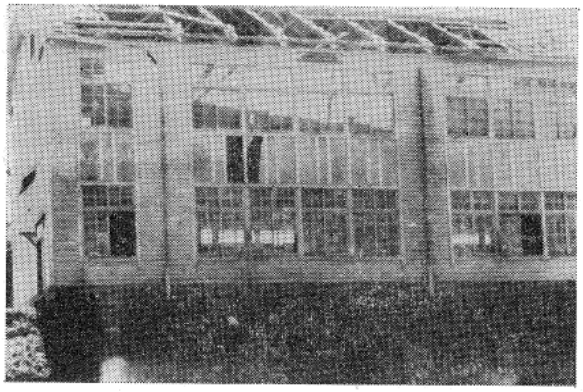


写真　5

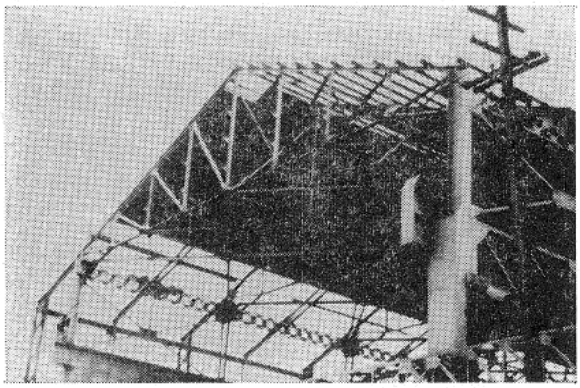


写真　6

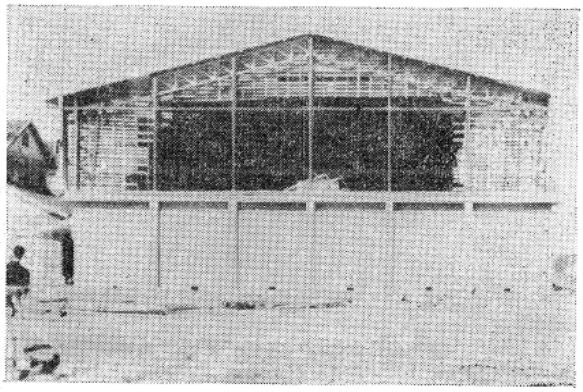


写真　7

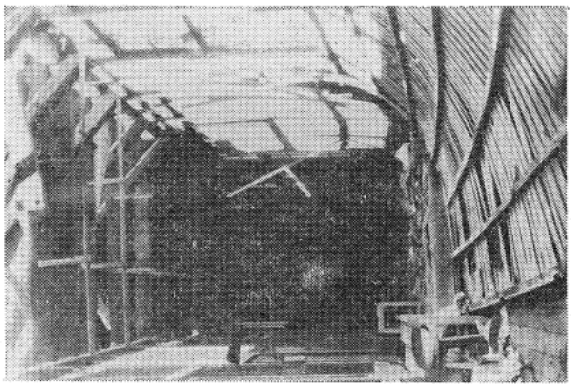


写真　8

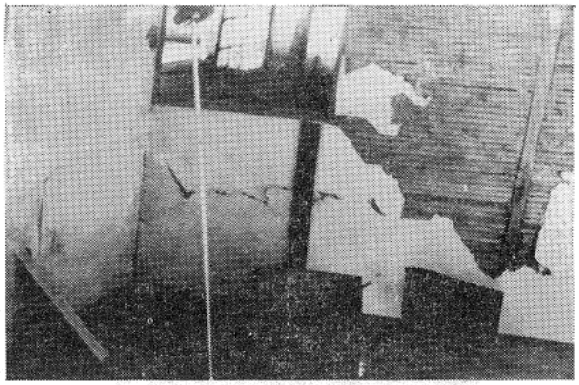


写真　11

写真　9

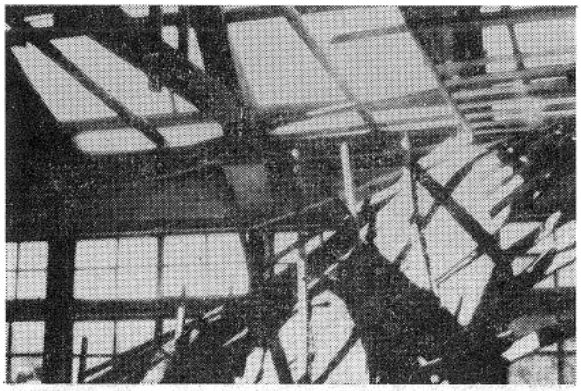


写真　12

写真　10

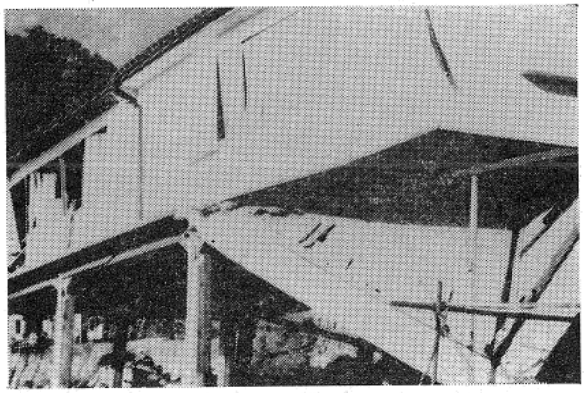


写真　13

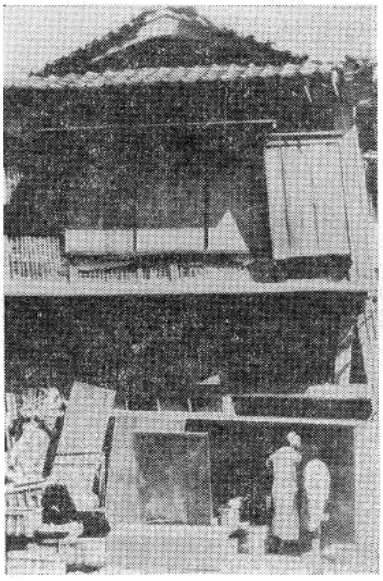


写真　14

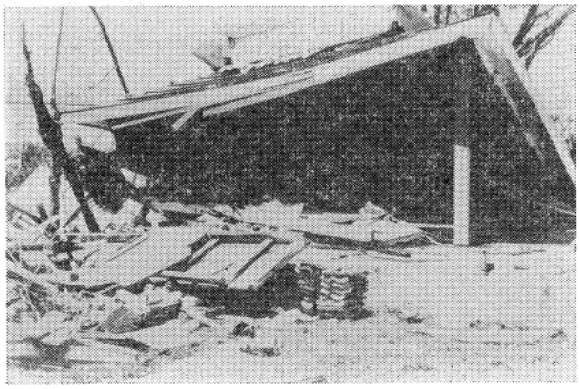


写真　16

写真　15

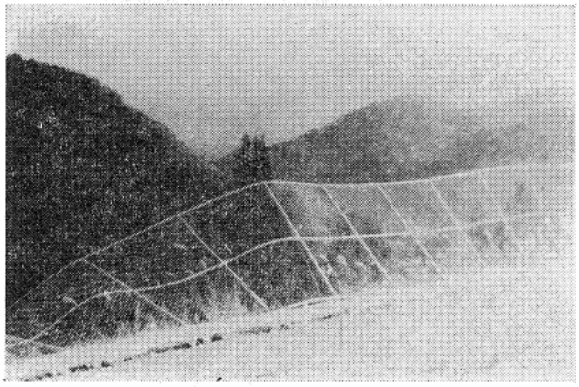


写真　17

c　建物が全壊する場合

建物が全壊する場合局部的な被害が漸次進行して全壊に至ったと思われるものもあり，また1966年18号台風の際宮古島の赤瓦と称する比較的重い屋根の木造家屋のように風によって押し倒されたと思われるものとがある．

写真-15，16参照

d　その他の被害例および特殊構造物の被害

写真-17，18，19，20，21，22，23，24，25参照

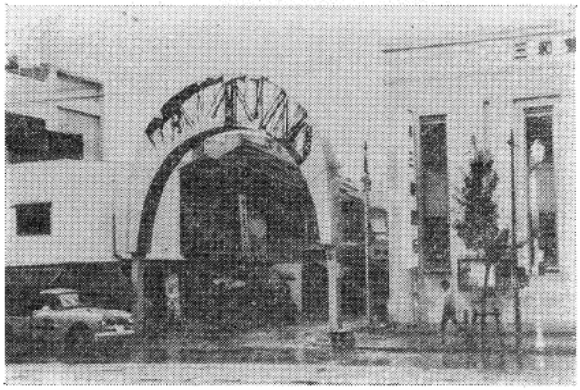


写真　18

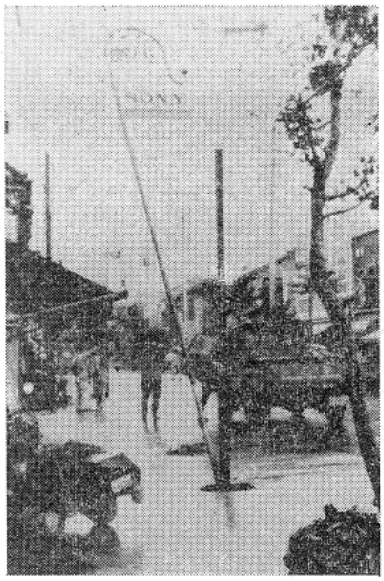


写真　19

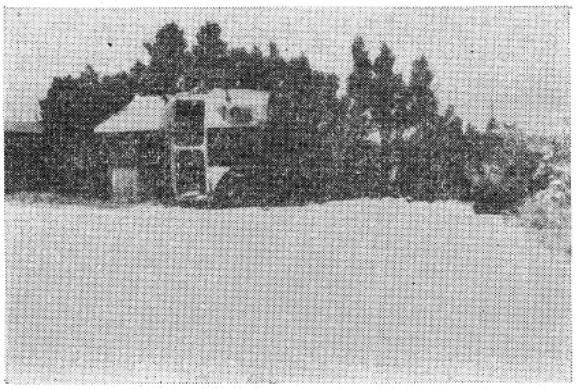


写真　22

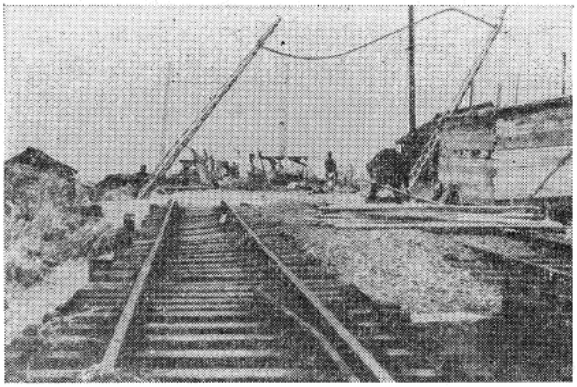


写真　23

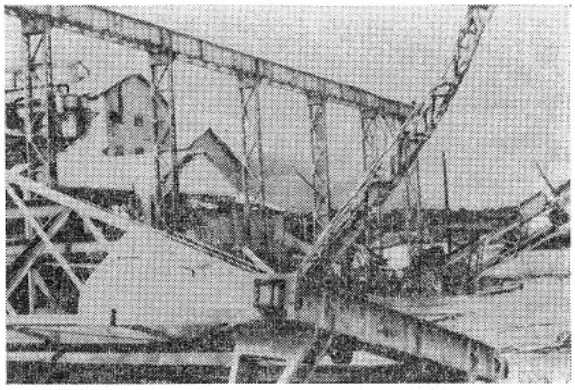


写真　20

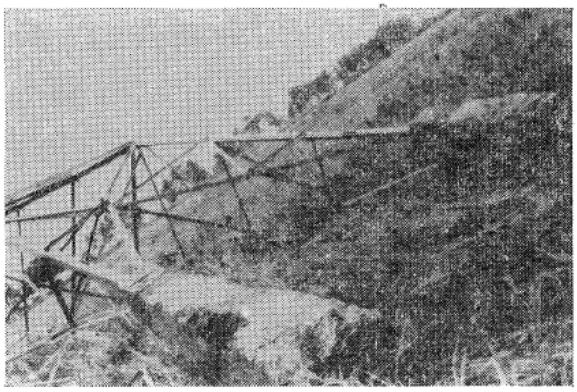


写真　24

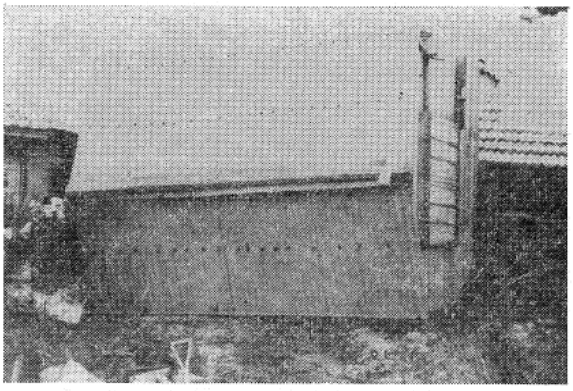


写真　21

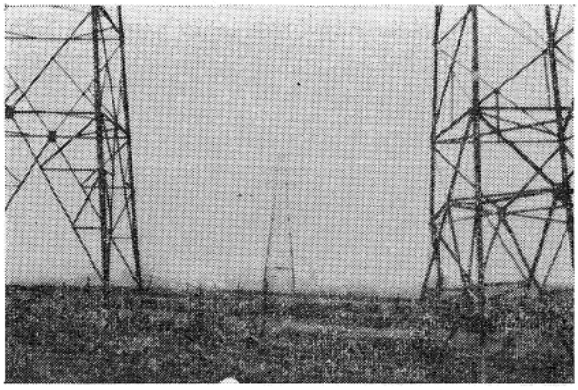


写真　25

以上建築物および構造物の被害を形態別に紹介したが，むろん以上の区分で二つ以上の場合に該当する場合も存在する．

e　被害形態よりみた耐風構造上の要素

建築物の風に対する安全性を高めるためには，軸組，筋違などの骨組を正しく作ることはもちろん重要であるが，仕上げ材の取り付け方，下地材の構成，出入口まわりの大きさとサッシ等構成材料の寸法など細部の工夫がともなわないと強風をうけたとき，その仕上げ材はむろん，2次的に主体構造も大きな被害をうける危険性があることに注意する必要があろう．

また看板，広告類などの一部分が強風で飛散して他の建物の窓ガラスを割ることがあるのも注意しなければなるまい．

4.2. 台風による家屋の風害分布

a　家屋の風害分布と風速分布

台風時建築物の風害はどのように分布するであろうか，写真-26および写真-27は伊勢湾台風，第2室戸台風による木造家屋の全壊率（全壊した戸数の総戸数に対する割合）の分布と風速の分布を示したものである．これから次のようなことがわかる．全壊率の曲線はほぼ最大風速の分布に沿っている．しかしこれらの被害および

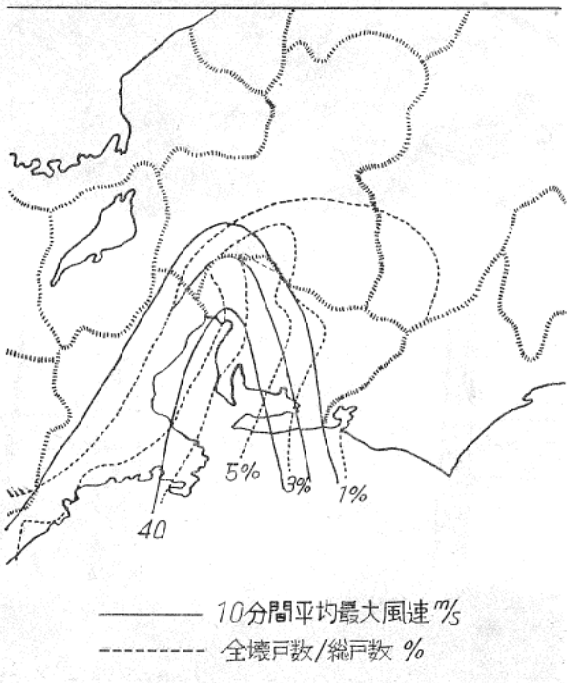
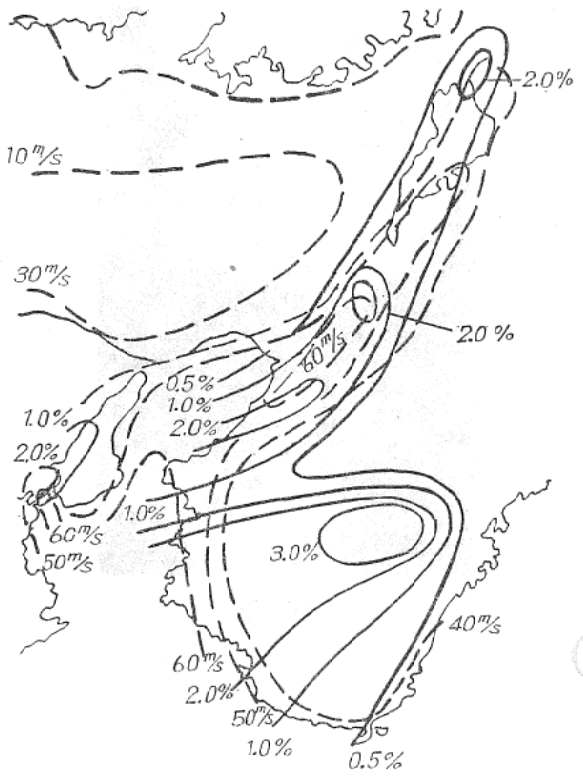


写真　26



全壊率の分布と最大瞬間風速

写真　27

風速の範囲は台風の進路より東側に 20～40km ほどずれている．このずれは北へ行くにしたがって短かくなっている．また図からわかるように全壊率の2％の地域は海岸より40km の地点にまで及んでおり，大阪平野，琵琶湖などで風をさまたげるものがないという特殊な条件ではあるが 130km の地点にまで台風がその猛威を奮っていることがわかる．

b　全壊率と風速

伊勢湾台風時の家屋の全壊率と風速との関係を写真-28，29，に示した．これからみると全壊については最大平均風速で 20m/sec，最大瞬間風速で 30m/sec 程度から被害が現われ始めている．最大平均風速で 30m/sec，最大瞬間風速で 40m/sec 程度以上では全壊率が風速とともに増加はしているが，簡単な比例関係にあるというものではない．このことは地域による局地的な風の影響，構造物の強度の差なども原因していると思えるが，被害率と風速との一応の目安とはなろう．第2室戸台風の場合についてもほぼこれと同じような結果が得られている．

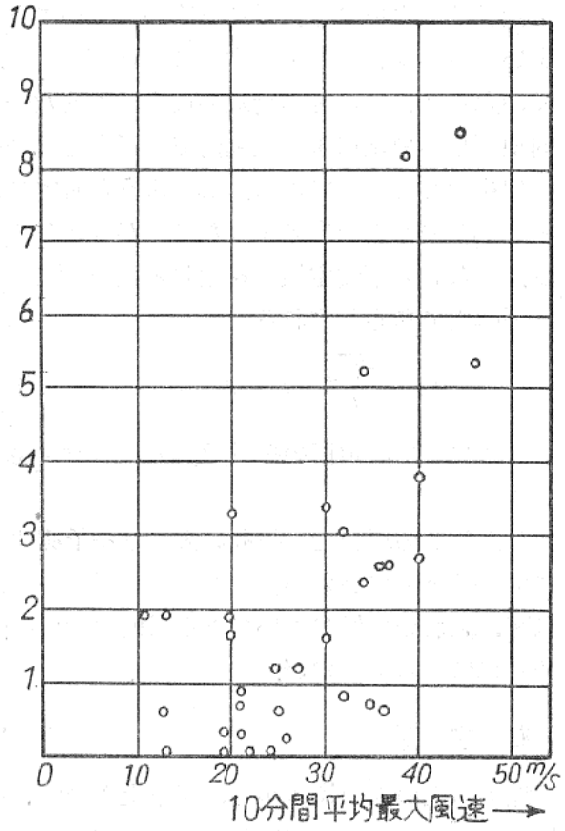


写真　28

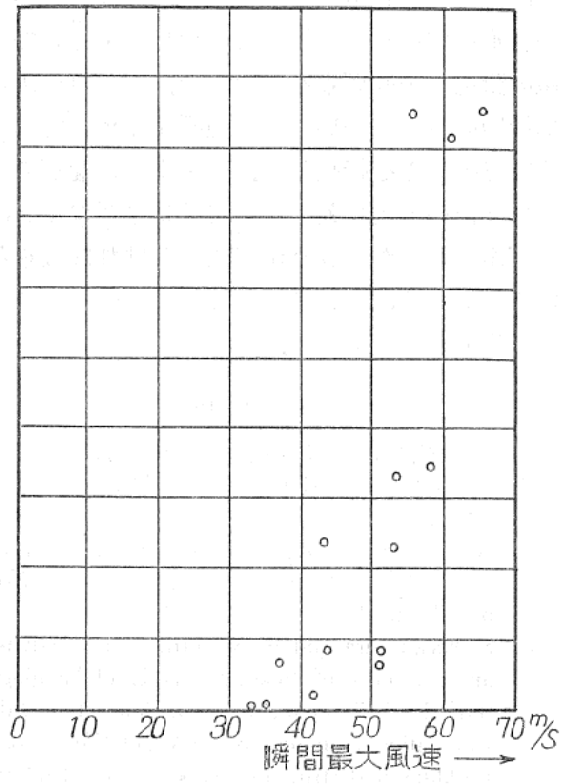


写真　29

c　家屋の市別，郡別被害

伊勢湾台風，第２室戸台風時の各地の被害分布を求めるために，市別・郡別の被害分布を求めてみると，両者の間には分布に若干の傾向の相異はあるが，おおよそ市別に求めた全壊率３％の曲線と郡別に求めた全壊率５％の曲線とがほぼ一致する．これは市の場合は郡部に比較して家屋が密集しており，家屋の群自体が遮風効果をなし，あるいは大気との摩擦も異なり被害が低減されるものと考えられる．しかしまえにも触れたように，都市自体変化しつつあり，また乱れの要素などもあわせ考えると都市における風害の形態には別の新たなものが登場しつつあるようにも思える．

5.　風による構造物の振動

いままでは主として強風時の問題について論じてきた．しかし構造物が風によってうける被害のなかで風速にして 10～20 m/sec 程度の中間程度の風速域でも著しい被害をうける場合があることに注意しなくてはならない．1940年11月７日，当時世界第３位の長径間吊橋として威容を誇っていた Tocoma Narrows 橋が風速わずか 19 m/sec の風によって激しい振動を生じ落橋するという大事故が発生した．早速事故原因の追求が始められ，風の動的影響が要因として大きくとり上げられたのである．

建築においても近年構造物の高層化長大化とともに，材料の開発，解析の進歩，構法の発展に伴い，ますます軽量化の方向に向かっている．超高層ビル，吊屋根構造，気膜構造等はその例である．これらの構造物は従来の構造物に比較して構造減衰が小さいのが通常である．このような構造物は風をうけて振動しやすい傾向にある．

5.1．強制振動（自然風の乱れによる振動）

まえにも述べたように地表付近の風は大きな乱れを持っている．このような乱れを持つ外，乱れを受ける構造物の応答もまた当然乱れたものになることが予想される．このような場合の取り扱いに関しては，現在確率統計的手法がよく用いられている．しかし注意を要するのは，単に大気境界層の場の乱れの構造が知れたから

といって，構造物に加わる風力としては，その乱れの構造がそのまま保存されるのでなく，構造物の規模，形状，質量および剛性分布はむろんのこと，周囲の環境によって自然風の乱れの構造が変化するということである．残念ながらこの点に関する明確な認識が往々欠けているように思える．

5.2. 自励振動

たとえ外力そのものに変動成分がなくとも，構造物の形状その他で後流に渦が発生したりして変動力が加わることになり振動を生じることがしばしばある．鋼製煙突でとくにライニングのない場合，主として風直角方向に大きな振動の生じた例はよく知られている．また矩形断面を持つ場合一様流の風洞実験で顕著な不安定振動を生じることも知られている．高層ビルでは未だこのような例は実測されていないが，これは質量および剛性分布のほかに減衰がかなり高いためと考えられ，場合によっては不安定振動の生じる可能性も十分考えられる．先に出した吊橋の例はこのような自励振動である．

しかし一般の建築物が風をうけてどのような振動を生じ，またどの程度の振幅にまで達するかを予測することは現状では未だ困難であり，この種の研究はようやく始ったところであり，わずかに円形断面の鋼製煙突，鉄塔等に関して実測を伴う研究が行なわれ，ある程度解明されているに過ぎない．

5.3. 吊屋根構造の風による振動

吊屋根構造はその造形美と大スパンの可能性のために近年発展途上にある建築構造の一つと考えられる．反面屋根面の軽いこと，曲げ剛性の比較的小さいこと，構造減衰の小さいこととあいまって風に対して非常に敏感な構造である，写真-30はこの種の構造の最も基本的な一方向型天幕の模型による風洞内での不安定振動の一例を示したものである．このような研究によって現在おおよそ次のようなことが判明している．すなわち不安定振動を生じる風速 U_{cr} は以下の式であらわされる．

$$0.1<\frac{f\overline{U}_{cr}}{L}=\eta<1.0 \qquad (7)$$

ここに f は屋根面の振動数，L はスパンを表わす．

しかしこの場合でも振幅の大きさを予測するまでには至っていない．これ以外に風の速度，勾配，乱れの影響についても定量的な関係を求めるには至っていない．

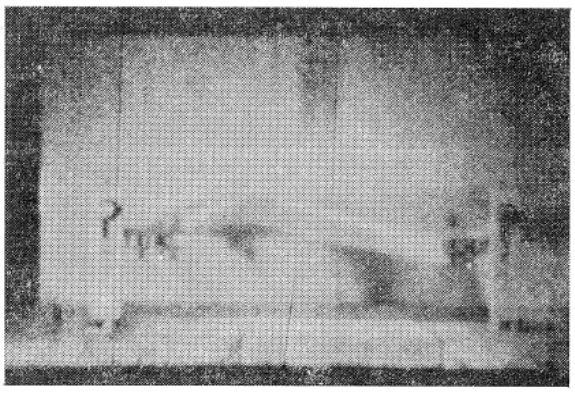


写真 30

むすび

地表面上の風の構造から，都市上空の風の性質について現在知れていることを最初に述べ，さらに建物の密集する都市内部の風については，いまだその性質を記述するのに十分な量さえ定まっていない現状の問題点を指摘した．

次に過去の台風の際の構造物の風害について被害形態別にその機構を論じ現状の主として家屋の耐風上の問題点を考察した．次に風による構造物の振動について若干説明を加え，将来の問題点の一端を指摘した．このように論じてくると都市の風害に対策を立てるに必要なことはほとんどこれから我々が解明しなければならないことが多く，問題はすべて将来へ持ちこされいてるような気がする．

参考文献

1) 日本鋼構造協会：耐風設計に関する文献抄録集
2) 日本建築学会，日本気象学会：都市建築と気象シンポジウム資料集
3) 川村純夫・岡内功：風による被害，日本鋼構造協会，鋼構造物の耐風設計講習会テキストNo. 5，昭和42. 2.
4) S. Kawamura and E. Kimoto: An aerodynamic stability of "one-way" types of hanging roofs in the smooth uniform flow, the 3rd International Conference on Wind Effects on Buildings and Structuses, papers IV-41, 1971, 9