

I 架設時の風の影響

1. 架設設計に考慮すべき強風速

通常の構造物の架設においては、設計風荷重は完成構造物の設計風荷重の半分程度をとれば十分と考えられる。しかし、架設途中の構造物が大規模もしくは特殊な形式のものとなる場合、風荷重をどう算出するかは架設設計に少なからず影響を及ぼすことになり、合理的な設計風速の推定が問題となる。

構造物の架設設計に考慮すべき強風速の決定に際しては、対象とする構造物の重要性、所要の安全性等に関する評価も必要となるが、それは主任技術者の判断にゆだねることとし、ここでは、主として強風の予測に必要な風の一般的特性とその評価方法について概要を述べることにする。

通常、設計風速は次の手順にそって求められる。

- ① 風速の再現期間の推算
- ② 再現期待値としての基本風速の推算
- ③ 地形、高度、季節等による基本風速の補正
- ④ 瞬間最大風速としての設計風速の推算
- ⑤ その他、構造物の規模、振動特性等による補正

以下、この順に従ってその概略を示す。

1.1 風速の再現期間の推算方法

風速 V_T 以上の強風が平均して T 年に 1 度の割合で起こると期待されるとき、 T 年を風速 V_T の再現期間という。

一般に、風速 V_T を考えて設計した構造物が、架設期間 n 年間に V_T 以上の強風をうけない確率(非超過確率)を a とすれば、 a は次式で表わされる。

$$a = \left\{ 1 - \left(\frac{1}{T} \right) \right\}^n \dots\dots\dots (1)$$

この関係を図示すると 図 I.1 のようになる。

採用すべき非超過確率は、構造物の崩壊による直接的な損害のほか、間接的損害、人命等を、総合的に評価して決める必要があるが、この点に関しては未解決の困難な問題が多く残されている。なお、橋梁構造物では完成系に対して非超過確率は 60% を採用している場合が多いようである。

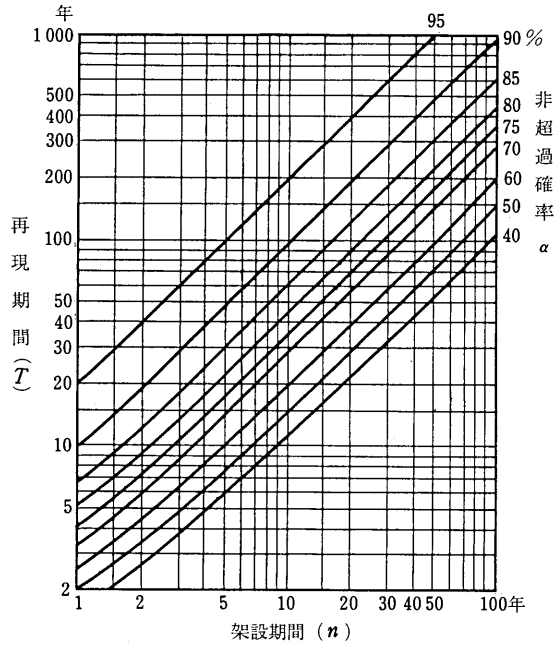


図 I. 1 再現期間，架設期間と非超過確率の関係

1.2 再現期待値としての基本風速の推算

再現期間 T と風速 V_T の関係は次式で表わされる。

$$T = 1 / \{ 1 - F(V_T) \} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $F(V_T)$ は年最大風速の分布関数であるが、これには次の 2 重指数分布がよく適合することが一般に知られている。

$$F(V_T) = \exp(-e^{-y}), \quad y = a(V - b) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 a, b は風の観測地点ごとに定まる定数である。

この関係を表現するには、2 重指数確率紙が便利であり、通常よく用いられる。全国の代表的気象官署で得られた記録をもとに、2 重指数確率紙上に再現期間 T と最大風速 V_T (10 分間平均値) の関係を表わした例を図 I. 2 に示す。また、各地の再現期間 20 年の最大風速 V (10 分間平均値) を図 I. 3 に示す。

橋梁の架設工事で風荷重を完成構造物の半分にとっている例が見られるが、これは次のような考え方によっている。

図 I. 2 によると架設期間 1 年、非超過確率 0.6 として再現期間 2.5 年としたときの最大風速の期待値を 28 m/s 程度とすると、これを越える風速が発生する地域はごく限られたものとなる。現行の道路橋示方書は基本風速を 40 m/s 程度と見込んでおり、風荷重は風速の 2 乗に比例することを考えると、風速 28 m/s を用いた場合の風荷重は完成時の風荷重の約半分となる。

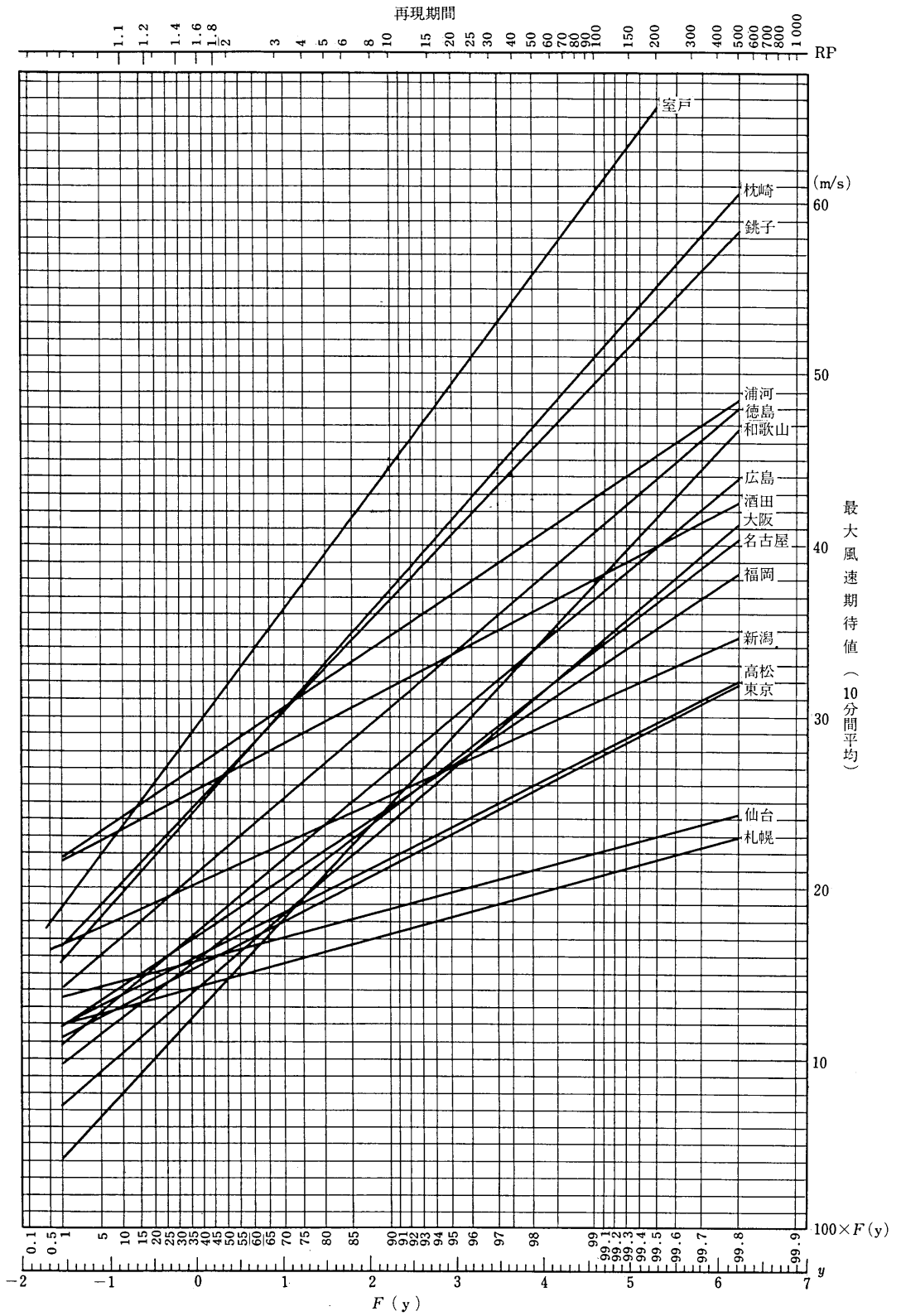


図 I.2 風速再現期待値と再現期間

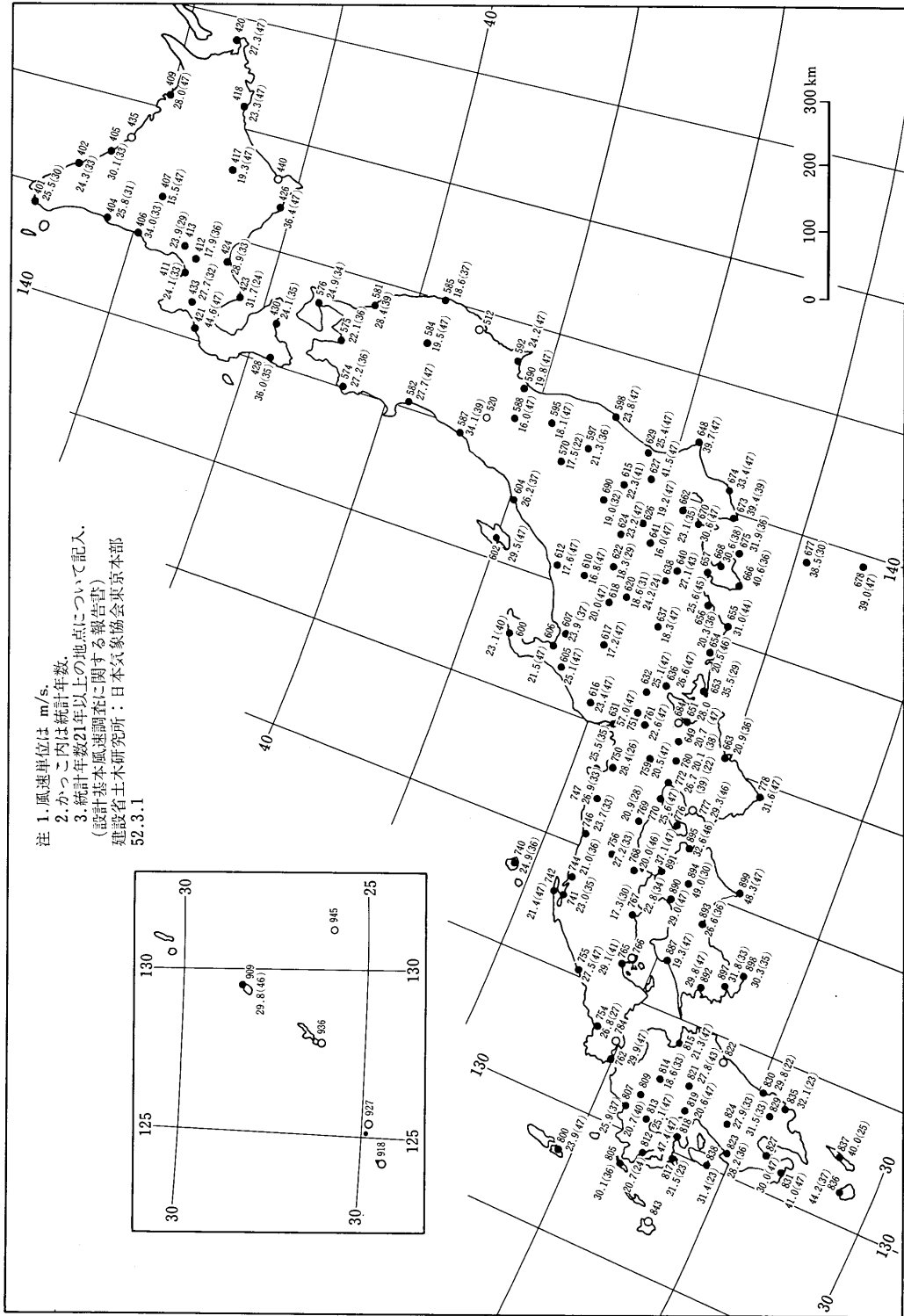


図 I-3 再現期間 20 年の風速期待と統計年数

1.3 高度、地形、季節等による基本風速の補正

(1) 高度による補正（風速の鉛直分布）

通常、建造物の架設で問題となるのは地上から 200～300 m までであるが、この範囲では風速は一般に地表面の摩擦の影響を受けて高さ方向に変化し、高くなるほど風速は強くなる。この風速の高さ方向の変化率を表わすものとしては、次式で表わされるべき法則が多く用いられる。

$$V_z = V_{10} (Z/10)^r \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 V_z 、 V_{10} は高度 Z m および 10 m における 10 分間平均風速、 r は地物の状況に関する定数で、一般には表 I.1 のような値が用いられている。

表 I.1 ベキ指数 r の値

地物の状況	r
平坦な地形の草原, 海岸地方	$1/10 \sim 1/7$
田園	$1/6 \sim 1/4$
森林, 市街地	$1/4 \sim 1/2$

(2) 地形の影響

風は局地的な地形によっても著しく影響を受ける。地形により風が鉛直あるいは水平方向に収束した場合、一般に風速は増大するが、このような風速の強化現象の例としては次のようなものがある。

1) 稜線や山頂を越える風

稜線や山頂を越える風は、図 I.4 のように鉛直方向に収束し、風速を増す。そのため、山頂での風速の鉛直分布は地表に近い部分の方が高い所より高風速となる場合がある。このような現象は、築堤や崖の角などでも実際に見られているので注意する必要がある。

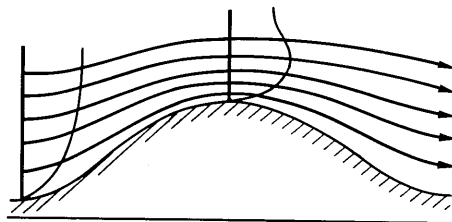


図 I.4 山越えの風の流れ

2) 峡谷や海峡を通る風

峡谷や海峡がある場合、風の流れは図 I.5 のように谷線にそって集中し、言い換えれば水平方向に収束して、風速が増大することになる。

このほかに、リアス式の海岸のように奥まった湾に風が吹き込む場合に収束して、湾奥で風速が増大することもある。

3) 山脈の風下側に吹きおろす風

山脈に直角に風が吹くとき、普通は風下側の斜面では風速が落ちるが、場合によりおろし風と呼ばれる山越しの気流が山麓に強く吹きおろすことがある。

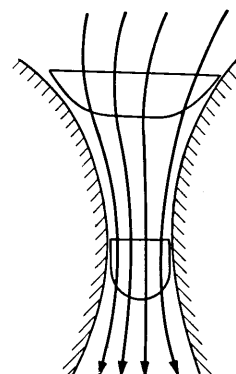


図 I.5 峡谷や海峡を通る風

4) 高層ビル周辺の風

最近、高層ビルの周辺でかなりな強風が吹き、問題が生じている例が少なくない。

この強風の機構は周辺地物の影響をうけて複雑なものとなっており、現在各所で観測・研究がなされているが、単独の高層ビル周りの風は図 I.7 のように流れるといわれている。

なお、日本各地における風速の期待値と地形因子などの関係については斉藤らの研究が有名であり付録 1 に示したので参照されたい。



図 I.6 おろし風

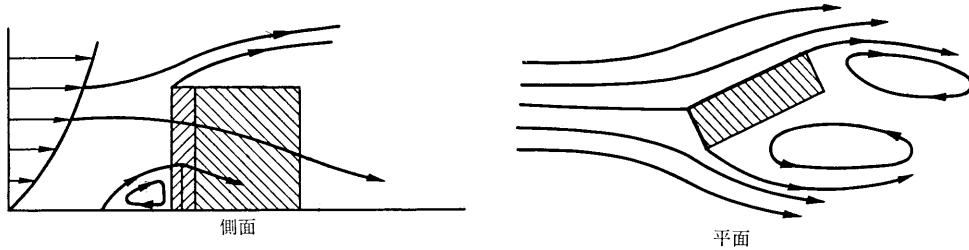


図 I.7 単独高層ビル周辺における風の流れ (Baines)

(3) 季節による補正

強風の原因としては、夏から秋にかけての台風によるものと、冬から春にかけての季節風によるものがほとんどである。どちらが卓越するかは地域により異なり、たとえば北海道、東北地方の日本海側の諸地点では季節風が、また、南西諸島、九州、四国地方では台風が強風速を生む主要因となっている。架設する期間が短期であり、かつ強風期を避けることが可能な場合には、適宜、基本風速を低減してよいと思われるが、その際には、近隣の気象管署の記録などを参考にして十分検討する必要がある。

1.4 瞬間最大風速としての設計風速の推算

前項までの議論はすべて平均風速についてであるが、実際の構造物の設計には、これに突風率の補正を施した最大風速を考慮しなければならない。突風率 G は、平均風速 \bar{V} と最大瞬間風速 V_{max} との比で

$$G = V_{max} / \bar{V} \dots\dots\dots (5)$$

で定義されるが、 \bar{V} の評価時間 (日本では 10 分が用いられる)、周辺地形、高度、 V_{max} の評価時間、風速などにより影響をうける。

(1) 平地における突風率

瞬間最大風速の評価時間を 2~5 秒とした場合、平地における G の値は一般には 1.2~1.6 程度と考えられている。表 I.2 に暴風の観測記録の一例を示すが、これによると 1.6 を越えている場合もある。

(2) 突風率の高度変化

一般に、突風率は高度が高まるにつれて小さくなる。小野田は垂水観測塔 (明石海峡) による強風時の 14 回の観測例から、突風率の平均的な傾向として

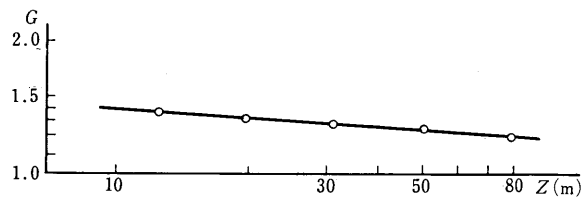


図 I.8 突風率 (平均値) の高度分布 (気象庁: 本四連絡橋架橋調査, 気象調査, 1966)

表 I.2 台風 5915 号での各地の風速と突風率

観測所	風向	最大瞬間風速 V_{max}	最大10分間 平均風速 V_{10max}	V_{max}/V_{10max}	観測所の高さ	観測塔の高さ
室戸岬	NNE	41.1 m/s	27.7 m/s	1.48	184.8 m	13.7 m
徳島	N	36.3	26.4	1.38	24.0	16.8
洲本	NNW	49.2	42.3	1.16	112.4	11.0
神戸	NNE	34.8	29.3	1.19	59.5	26.8
彦根	ENE	36.0	21.9	1.65	88.5	18.3
春照	ESE	39.1	25.5	1.53	30.4	13.7
尾鷲	SE	51.5	28.1	1.83	15.8	16.1
津	ESE	51.3	36.8	1.39	4.3	16.0
亀山	SE	41.6	28.4	1.47	70.7	12.4

(館知之:台風に関する二,三の統計的調査, 天気, Vol 8, No 10, 1961)

$$G_z = G_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^{-0.052} \dots\dots\dots (6)$$

の関係をjている。この関係を図示すると図 I.8 のようになる。

1.5 その他、構造物の規模、振動特性等による補正

自然風は時間的にも空間的にも変動している。風速の時間的変動は構造物に不規則強制振動を生ぜしめるため、たとえば吊橋のように可とう性に富むものを架設する場合には、その静的応答に何がしかの増幅を考慮しなければならない。一方、風速の空間的変動は、構造物の全長にわたって同じ大きさの風速が同時に作用することはないという理由から、たとえば長大な構造物を架設するような場合、等分布風速に置き換えて設計する際にはやはり補正した方が合理的であろう。この種の問題に関しては最近多くの研究がなされており、長大構造物を対象として一部では設計基準にとり入れられている。なお、詳細については関連の文献〔たとえば本州四国連絡橋耐風設計基準(1976)〕を参照されたい。

付録 1. Russler—Spreen の共軛図法による齊藤の研究

(気象庁研究時報 Vol. 11, No. 9, 1959, P 41~)

齊藤は、地形を起伏度、陸度、海岸度、開放度、走向の5因子で代表させ、日本全国を33地域に区分し、共軛図法を用いて任意の地点における風速の50年再現期待値を推定する方法を見出した。齊藤らの用いた各因子は次のごとく定義されている。

起伏度：20万分の1の地形図に風速推定地点を中心として半径8kmの円を描き、この円内の最高地点の標高から風速推定地点の標高を減じた値。

陸度：150万ないし200万分の1の地形図に風速推定地点を中心として半径50kmの円を描き、この円内で陸地の占める割合を10倍した値。円内全部が陸地の場合を陸度10、全部が海の場合を陸度0とする。

海岸度：20万分の1の地形図に風速推定地点を中心として半径5kmの円を描き、この円内の海の占める割合を10倍した値。

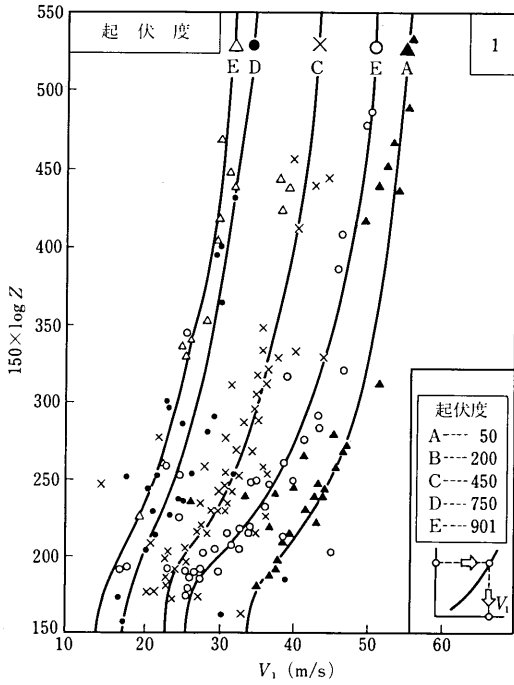


図 I.9 相関解析図, 高度一起伏度

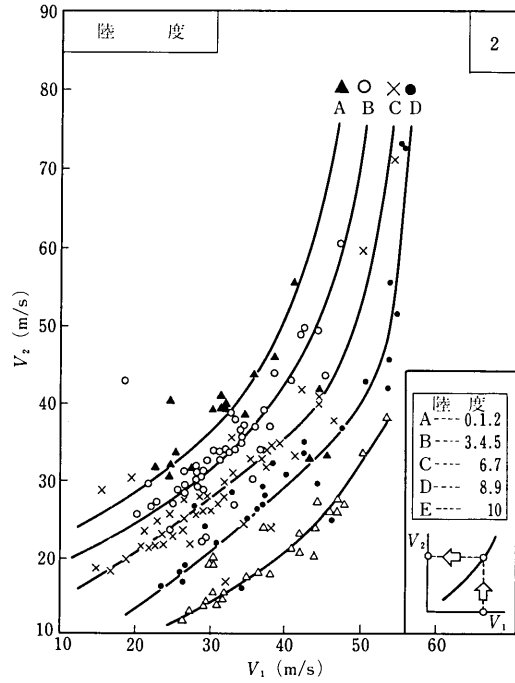


図 I.10 相関解析図, 陸度

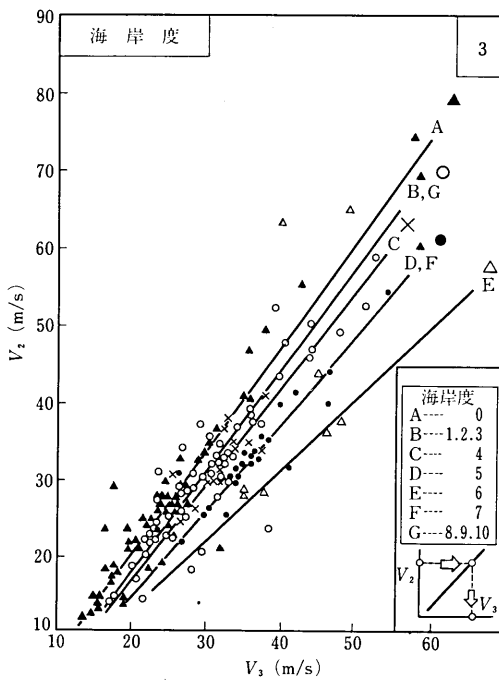


図 I.11 相関解析図, 海岸度

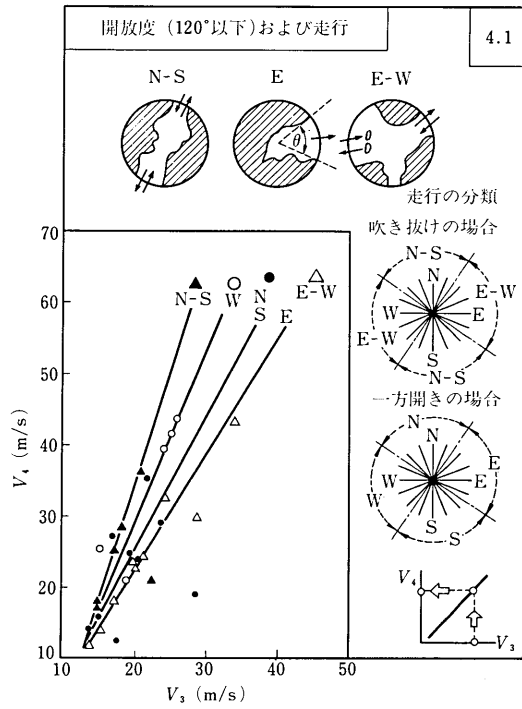


図 I.12 相関解析図, 開放度 (120°以下) および走向

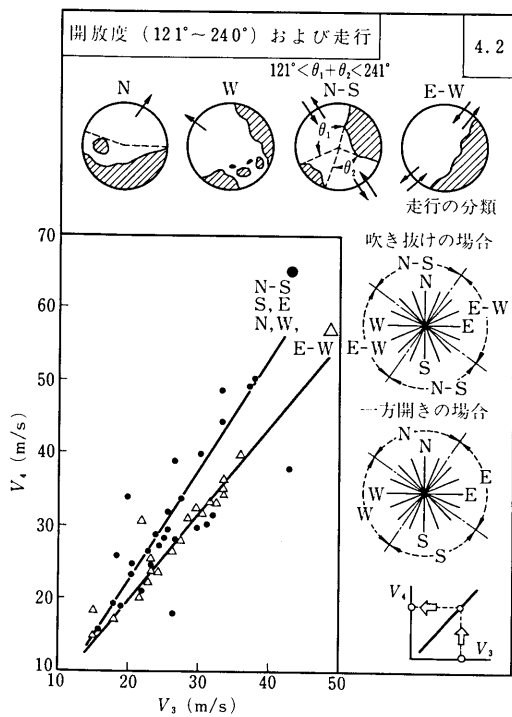


図 I.13 相関解析図, 開放度 (121°~240°) および走向

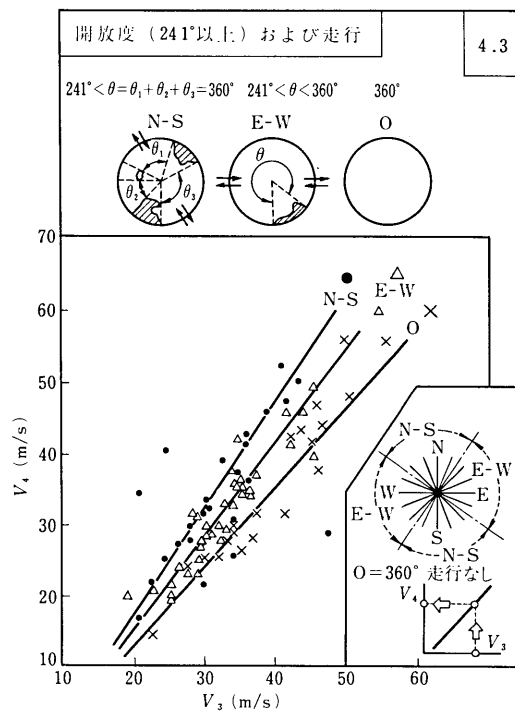


図 I.14 相関解析図, 開放度 (241°以上) および走向

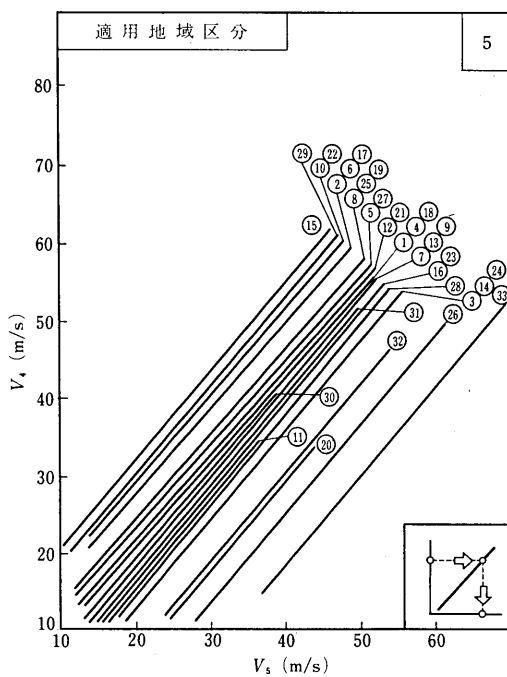


図 I.15 相関解析図, 適用地域区分

開放度：20万分の1の地形図に風速推定地点を中心として半径15kmの円を描き、円内にあって風速推定地点より200m以上高い部分をふち取り、中心から放射線状にこの障害部分に接する直線を引き、開いている部分の角度の総和の値。

走向：開放度の図面において、風速推定地点の周囲で最も障害物の少ない開いた方向。

これらの因子および適用地域区分を用いて50年再現期待値を求める方法を図I.9～図I.16に示す。これらの図の使用法は、それぞれの図中に示されているので、ここでは説明しない。

付録 2. 構造物の架設設計に考慮すべき振動

最近、可とう性が大きく、しかも減衰性の小さい構造物が多く出現するに至っているが、このような構造物を架設する場合、風による振動の防止対策を十分に講じておく必要がある。

風による構造物の振動現象はかなり複雑で、振動の分類についても判然としない部分があるが、その発生機構に着目して区分するならば次のようになる。

- ① 渦による振動
- ② 空気力による自励振動
- ③ 風の乱れによる強制振動

以下、この順に従ってその内容の概要を示す。

(1) 渦による振動

風の流れの中におかれた物体の背後には図I.17に示すような渦ができる。流れの状態はこの渦の発生のたびごとに変化し、流れと直角な方向に周期的な力(交番力)を物体に及ぼす。この交番力によって物体には振動が強制され、交番力の周期が物体の固有振動数と一致すると共振して振幅は極めて大きくなることがある。鋼製煙突のような円筒状の構造物、あるいは吊り橋の塔、広告塔のような角柱構造物などがある特定の風速近辺で風向に直角に振動した例は多いが、これらはおおむね上述のような機構に基づくものと考えられる。煙突および吊り橋の塔に関する風洞実験の一例を

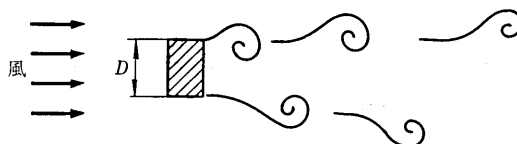


図 I. 17 物体後背の渦

図 I. 18, 図 I. 19 に示す。

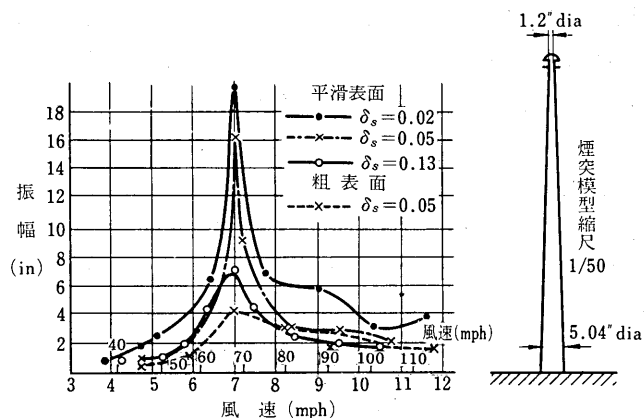


図 I. 18 煙突の風による振動に関する風洞実験結果 (Scruton, 1963)

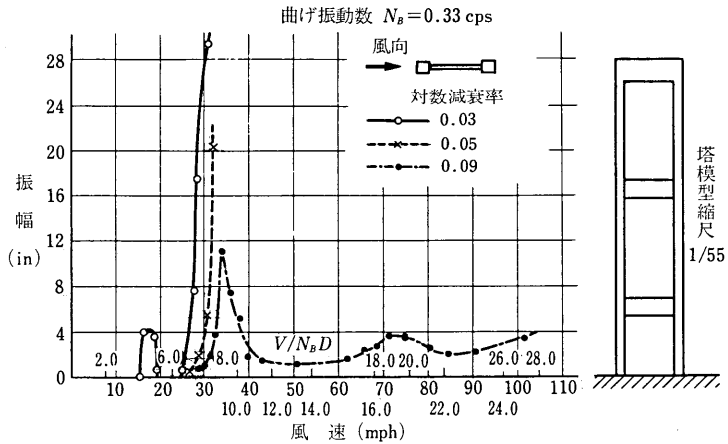


図 I. 19 吊橋の塔の風による振動に関する風洞実験結果 (Scruton, 1963)

このような渦による振動は、渦の発生数と密接な関連をもつ。渦の発生数 N は構造物が静止している場合、次式によって表わされる。

$$N = S \cdot \frac{V}{D} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 S : ストローハル数と呼ばれ、表 I. 3 のごとく構造物の形状、レイノルズ数によって決まる定数。

D : 構造物の代表長

構造物が振動している場合には、その振動が渦の発生周期に大きく影響を及ぼす。たとえば円筒の場合、石崎らは渦の発生数と振幅 A の関係を次式のように表わしている。

$$N_a = S \cdot \frac{V}{D + mA} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 m : 振幅が渦の発生数に及ぼす影響の度合を示す係数

(2) 空気力による自励振動

風の中にある構造物に攪乱を与えた場合、風速が小さい間は振動は時間とともに減衰するが、風速が大きくなると構造物の空力弾性的特性と関連して動的空気力の作用が負減衰の効果を及ぼすようになることがある。この種の振動は吊橋の補剛桁、飛行機の翼、着氷した電線などで観測されているが、その発生機構は極めて複雑で、理論的な解析が困難なため、できれば風洞実験により検証するのが望ましい。

(3) 風の乱れによる強制振動

自然風は時間的にも空間的にもたえず変動しており、構造物に作用する空気力も変動するため、構造物には振動が強制される。構造物の固有周期に自然風の変動周期が近づくとき、構造物は変動風のエネルギーを吸収して共振現象を生じ、減衰の小さい構造物では振幅がかなり増大することがある。この振幅増大効果は、構造物が変動風のスケールに比べて小さい場合著しいが、構造物大きい場合には各点にあたる瞬間風速の位相が異なってくるため同じ状態の風をうけても増大効果は減殺されてくる。すなわち、構造物の動的応答には、自然風の乱れの性状や構造物の振動特性のみならず構造規模の大きさなども関連してくる。

この問題に関しては、最近、統計的手法が応用され大きな成果があげられている。たとえば、本州四国連絡橋

表 I.3 各種部材断面のストローハル数 (S)

(Nøkkentved)

風向	断面 (寸法 mm)	S	風向	断面 (寸法 mm)	S
→ ↓		0.120 0.137	↓		0.147
→		0.120	↓		0.150
↓		0.144	←		0.145
			↑		0.142
			↙		0.147
↓		0.145	←		0.131
			↑		0.134
			↙		0.137
↓ ↑		0.140 0.153	→		0.121
			↓		0.143
↓ ↑		0.145 0.168	→		0.135
→ ↓		0.156 0.145	→		0.160
			↓		
円筒 11 800 < R _e < 19 100		0.200	→		0.114
			↑		0.145

耐風設計基準 (1976) では、自然風の乱れに関する統計的諸量と構造物の振動特性に基づいて構造物の応答量を導き、設計風速の補正を行っている。詳細については同基準を参照されたい。

なお、これらの振動を防止する対策としては、

- ① 構造物の剛性を高める。(耐風索、補強材、等)
(構造物の振動数を変える)
- ② 構造物の形状を変える。(整流板、風抜穴、等)
(風の流れを変える)
- ③ 構造物の減衰性を高める。(減衰器、等)

などが考えられるが①が最も簡便で広く用いられているようである。

付録 3. 完成構造物の耐風設計基準例

本指針と関連のある完成構造物の耐風設計基準例としては次のようなものがある。

- 1) 道路橋示方書・同解説, 日本道路協会, 昭和 48 年 2 月
- 2) クレーン構造規格, 労働省, 昭和 51 年 9 月
- 3) 建築基準法, (同施行令第 87 条) 昭和 53 年 2 月
- 4) 本州四国連絡橋耐風設計基準・同解説, 本州四国連絡橋公団, 昭和 51 年 3 月
- 5) 高層建築技術指針, 日本建築学会, 昭和 49 年 2 月
- 6) 鉄塔構造計算規準・同解説, 日本建築学会, 昭和 37 年 7 月
- 7) 容器構造設計規準, 日本建築学会, 昭和 44 年 2 月
- 8) 建築物荷重規準(案), 日本建築学会, 昭和 50 年 3 月
- 9) 鉄骨工事中の風による災害防止規準, 建築業協会, 昭和 44 年 8 月

上記のうち一, 二の抜粋を次に示す。

道路橋示方書

1) プレートガーター・トラス

表-1.8.8 プレートガーター・2主構トラスの風荷重

(橋軸方向の長さ 1 m につき)

形 式		風 荷 重 (kg)	
上路プレートガーター		$240 + 450 h \geq 600$	
下路プレートガーター		$450 h \geq 600$	
ト ラ ス	載 荷 時	載 荷 時	$330 + 450 h \geq 600$
		無 載 荷 時	$360 + 900 h \geq 600$
	無 載 荷 弦	載 荷 時	$450 h \geq 300$
		無 載 荷 時	$900 h \geq 300$

ここに, h : プレートガーターまたは弦材の高さ (m)

2) 鋼管構造

鋼管部材に作用する風荷重はつぎのとおりとする。ただし, 橋軸方向の長さ 1 m につき 150kg 以上とする。

活荷重を負載しないとき;

風上側および風下側それぞれの上部構造の有効鉛直投影面積に対して

$$150 \text{ kg/m}^2$$

活荷重を負載するとき;

風上側および風下側それぞれの上部構造の有効鉛直投影面積に対して

$$75 \text{ kg/m}^2$$

活荷重に対して, 橋面上 1.5 m の位置に

$$150 \text{ kg/m}$$

なお, 鋼管部材が比較的低風速の風によっても振動が発生するおそれのある場合, この項に規

定する風荷重によるほか鋼橋編 13.6 に規定する構造細目を満足しなければならない。

3) その他の形状

その他の形式に作用する風荷重はつぎのとおりとする。ただし、橋軸方向の長さ 1 m につき 300 kg 以上とする。

活荷重を負載しないとき；

風上側上部構造の有効鉛直投影面積に対して 300 kg/m²

風下側各上部構造の有効鉛直投影面積に対して 150 kg/m²

活荷重を負荷するとき；

風上側上部構造の有効鉛直投影面積に対して 150 kg/m²

風下側各上部構造の有効鉛直投影面積に対して 75 kg/m²

活荷重に対して橋面上 1.5 m の位置に 150 kg/m

クレーン構造規格（労働省告示第 53 号）

第 11 条 前条第 1 項第 4 号の風荷重は、次の式により計算を行うものとする。この場合において、風速は、暴風時においては 50 m/s，暴風時以外においては 16 m/s とする。

$$W = qCA$$

この式において、 W 、 q 、 C および A は、それぞれ次の値を表わすものとする。

W ：風荷重（単位 kg）

q ：速度圧（単位 kg/m²）

C ：風力係数

A ：受圧面積（単位 m²）

2 前項の速度圧の値は、次の式により計算を行うものとする。

$$q = \frac{v^2}{30} \sqrt[4]{h} \text{ とする}$$

この式において、 q 、 v および h は、それぞれ次の値を表わすものとする。

q ：速度圧（単位 kg/m²）

v ：風速（単位 m/s）

h ：風を受ける面の地上からの高さ（単位 m）

（高さが 15 m 未満の場合には、15）

3 第 1 項の風力係数の値は、風洞試験による場合を除き、次の表の上欄に掲げる風を受ける面の種類および同表の中欄に掲げる充実率に応じて、それぞれ同表の下欄に掲げる値とする。

風を受ける面の種類		充実率	風力係数
平面ラチスまたは平面トラスにより構成される面		0.1未満	2.0
		0.1以上 0.3未満	1.8
		0.3以上 0.9未満	1.6
		0.9以上	2.0
平板により構成される構造物の面		—	1.2
円筒の面および鋼管製の平面ラチスまたは平面トラスにより構成される面	$a\sqrt{q} < 1$ のとき	—	1.2
	$d\sqrt{q} \geq 1$ のとき	—	0.7
<p>備考</p> <p>1 充実率の値は、風を受ける面の見付面積を当該風を受ける面の面積で除した値とする。</p> <p>2 d および q は、それぞれ次の値を表わすものとする。</p> <p>d : 円筒または鋼管の直径 (単位 m)</p> <p>q : 速度圧 (単位 kg/m)</p>			