

変動風圧による荷重効果を考慮した
陸屋根構造梁の風荷重に関する研究

1993年12月

上 田 宏



a) 粗度長

風速分布を式(2.1)の対数則で近似して粗度長 Z_0 を求めた。近似結果の一例を図2.3に示す。表2.1は作成した風洞気流の粗度長を示す。平坦地域相当と市街地域相当の強風時の自然風の粗度長は、O. G. Sutton (1953)³⁸⁾ やJ. Counihan (1975)³⁹⁾ の推奨値を参考にして表2.1のように定めた。作成した風洞気流の縮尺率は、Wind-1とWind-2が1/400程度、Wind-3とWind-4が1/250程度になっている。

表2.1 風洞気流の粗度長

	Wind-1	Wind-2	Wind-3	Wind-4	Wind-5
風洞粗度長 (mm)	0.08	2.0	0.125	3.0	-
目標粗度長 (m)	0.004~0.2	1.0~2.0	0.004~0.2	1.0~2.0	-
目標縮尺率	1/400	1/400	1/250	1/250	-

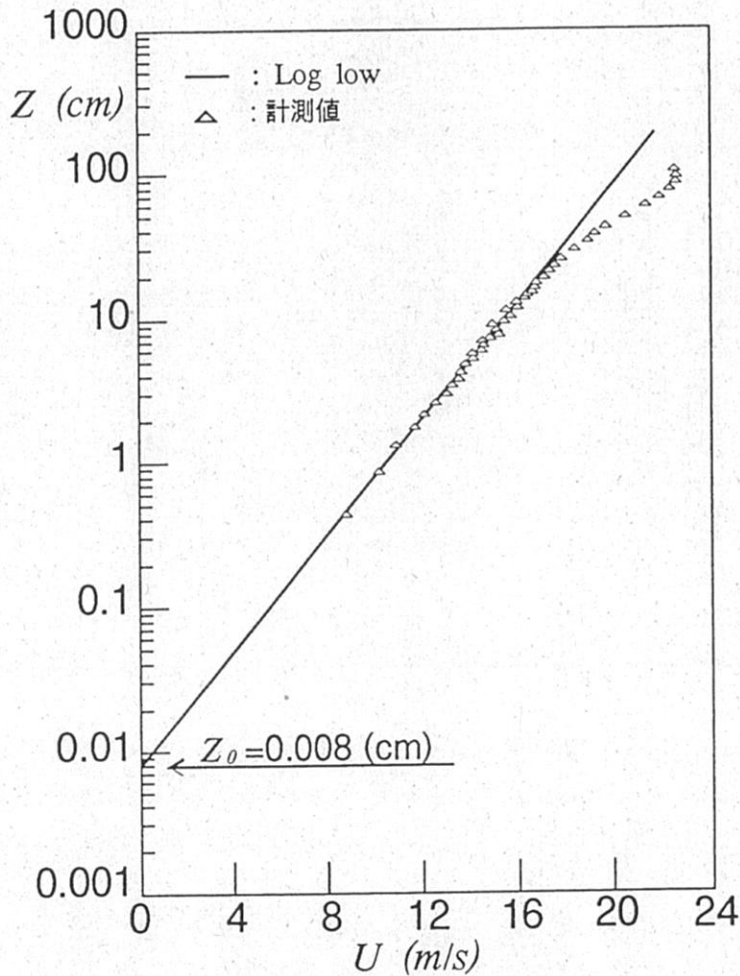


図2.3 風速分布と対数則の比較

b) 指数分布

風速分布を式(2.9)のベキ指数式で近似した場合のベキ指数 α を求めた。近似した結果の一例を図2.4に示す。また、近似したベキ指数は表2.2に示す。平坦地域ならびに市街地域のベキ指数は、J. Counihan等の推奨値³⁷⁾を参考にして表2.2の様に定めた。この表から分かるように風速分布は、ほぼ目標としたベキ指数に一致しており、平坦地域相当では $\alpha = 1/6$ 程度、市街地域相当では $\alpha = 1/4$ 程度になっている。

表 2.2 風速分布のベキ指数

	Wind-1	Wind-2	Wind-3	Wind-4	Wind-5
風速分布のベキ指数	1/6.2	1/4	1/6.2	1/4	-
目標ベキ指数	1/7~1/6	1/4~1/3	1/7~1/6	1/4~1/3	-

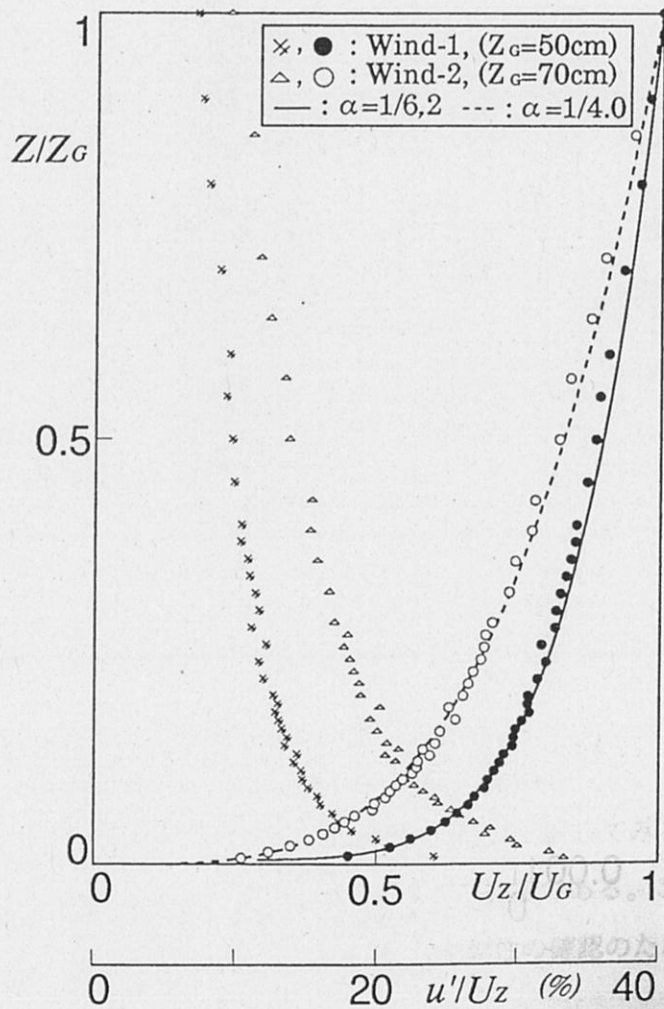


図 2.4 風速分布と指数式の比較および乱れの強さの分布

c) 乱れの強さ

変動風速は、主流方向成分 U 、主流直角水平方向成分 V 、主流直角鉛直方向成分 W の3成分で表現される。変動風速の各成分の標準偏差は、各成分の乱れの強さを表している。そして、一般に、各成分の乱れの強さは、各成分の乱れの標準偏差をその高さの主流方向成分の時間平均風速で除した値として次式で定義される。

$$\frac{\sqrt{u^2}}{U_z}, \quad \frac{\sqrt{v^2}}{U_z}, \quad \frac{\sqrt{w^2}}{U_z} \quad (2.11)$$

特に、主流方向 (U 成分) の乱れの強さは、強風時の自然風を風洞で模擬する場合の目安になることが多い。このため本論文では、以後、風速変動の主流方向の乱れ強さを主に考えることにする。

風洞で模擬した気流の主流方向成分の乱れ強さの鉛直分布の一例を図2.4に示す。乱れの強さは高さ方向に指数関数的に小さくなる傾向を示している。表2.3は作成した風洞気流の地上30m相当の乱れの強さである。表中には、J. Counihanによる地上30m相当の乱れの強さの推奨値

$$\frac{\sqrt{u^2}}{U_{30}} = 0.016 (\log_{10} z_0)^2 + 0.096 \log_{10} z_0 + 0.24 \quad (2.12)$$

を目標乱れの強さとして示す。ただし、式(2.12)の粗度長には、表2.1に示した値を用いた。風洞気流の乱れの強さは、概ね推奨値と一致している。

表2.3 風洞気流の乱れ強さ (地上30m相当)

	Wind-1	Wind-2	Wind-3	Wind-4	Wind-5
乱れの強さ (%)	13.6	21.9	20.5	25.8	-
目標乱れ強さ (%)	10.2 ~ 18.1	24.0 ~ 27.0	10.2 ~ 18.1	24.0 ~ 27.0	-

d) 乱れのスケール

乱流中の代表的なスケールが乱れのスケールである。乱れのスケールは、主流方向スケール L_{ux} 、主流方向直角水平方向スケール L_{uy} 、主流方向直角鉛直方向スケール L_{uz} 、など9つのスケール ($L_{ux}, L_{uy}, L_{uz}, L_{vx}, L_{vy}, L_{vz}, L_{wx}, L_{wy}, L_{wz}$) で表現される。この中で主流方向 L_{ux} は、実測データの蓄積が多く、強風時の自然風を風洞で模擬する場合の目安に用いられることが多い。

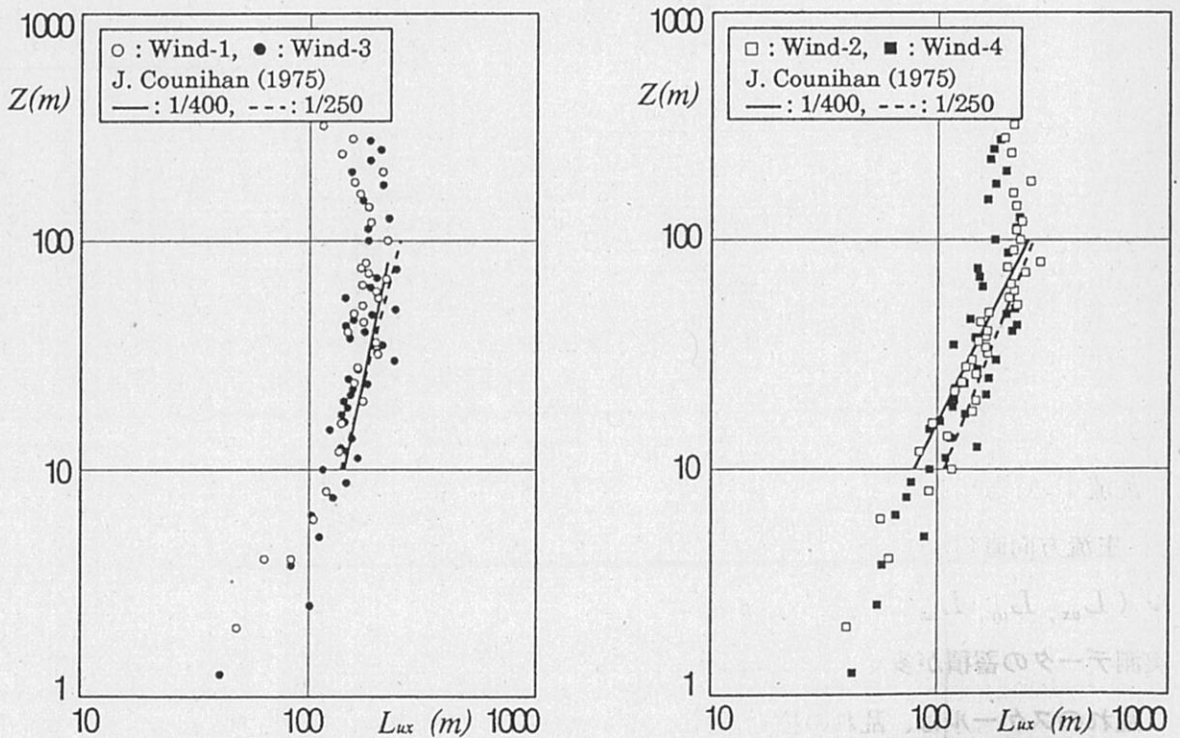
乱れのスケールは、乱れの積分スケールと呼ばれているように、空間相関を積分して求められる。しかし、乱流場の空間相関を実測するには、空間的な広がりをもった多くの観測点が必要である。このためほとんどの実測データは、主流方向の乱れのスケール L_{ux} の測定に留まっている。この L_{ux} の場合は、乱流場における乱れのスケールが計測時間内において変化しないものと仮定した、いわゆる Taylor の凍結乱流の仮定を適用し、空間に固定した1点の観測点から得られる自己相関

係数 R_{ux} を積分し、相関が1になる時間を求め、それに時間平均風速を乗じることによって乱れのスケールを求めることが多い。

$$L_{ux} = U \int_0^{\infty} R_{ux}(\tau) d\tau \quad (2.13)$$

ここに、 U は主流方向の時間平均風速である。

作成した風洞気流の乱れのスケールも上述の凍結乱流の仮定に基づいて求めた。ただし、自己相関係数の積分範囲は、 $d\tau=0$ 秒から最初に相関が零となる時間までとした。図 2.5 は、風洞気流の乱れのスケールの鉛直分布である。この図から分かるように風洞気流の乱れのスケールは、平坦地域相当と市街地域相当の強風時の自然風の乱れのスケールの $1/400$ (Wind-1, Wind-2) と $1/250$ (Wind-3, Wind-4) 程度になっている。また、J. Counihan が推奨する乱れのスケールとも概ね一致している。



(a) 平坦地域相当の乱れのスケール分布 (b) 市街地域相当の乱れのスケール分布

図 2.5 風洞気流の乱れのスケール分布

e) パワースペクトル密度

変動風速には、ミクロスケールの変動とマクロスケールの変動との2種類の変動がある。前者は、地表の障害物によって気流が乱されることによって生じる風速変動であり、後者は、高気圧や低気圧の移動によって生じる周期の非常に長い風速変動である。このように長い時間に対する自然風のパワースペクトル密度については、I. Van der Hoven (1957)³⁹⁾によって報告されている。一方、構造物の耐風設計には、ミクロスケールの風速変動が対象になり、風洞で模擬すべき風速変動は、このミクロスケールの風速変動である。特に、主流方向成分の風速変動のパワースペクトル密度は、実測データの蓄積も多く、強風時の自然風を風洞で模擬する場合の目安となることが多い。

作成した風洞気流の地上30m相当の主流方向の変動風速のパワースペクトル密度分布の一例を図2.6に示す。この図から分かるように主流方向の風速変動のパワースペクトル密度分布は、次式で示されるカルマン型のパワースペクトル密度分布に近似している。

$$\frac{n \cdot S_u(n)}{\sigma_u^2} = \frac{4x_u}{(1 + 70.8x_u^2)^{\frac{5}{2}}} \quad (2.14)$$

ここに、 $x_u = L_{ux} n / U_{30}$ 、 U_{30} は地上30m相当の時間平均風速である。この乱れのスケール L_{ux} は、図2.5に示した乱れのスケールと概ね一致している。ここで示した気流以外の変動風速のパワースペクトル密度分布もほぼカルマン型のパワースペクトル密度分布に近似した。

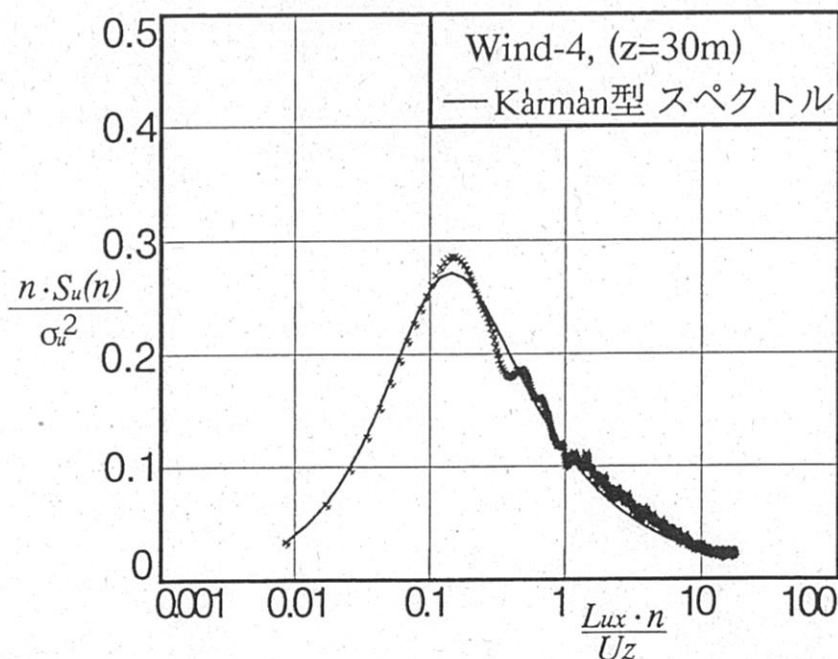


図2.6 風速変動のパワースペクトル密度分布

(4) 風洞気流の諸特性

前述 a) ~ e) で示したように、作成した4種類の風洞気流は、強風時の接地気層に相似していることが確認された。

本研究では、陸屋根に作用する平均風圧力の性状を把握するために屋根高さの異なる3種類の陸屋根模型を用いている。各屋根高さ相当の風洞気流の諸特性をまとめて表2.4に示す。以後、本論文では、模型の屋根高さ相当の風洞気流の特性に関する考察などにおいては、この表に示した気流特性を用いることにする。ただし、表中の H は屋根の高さ、 $T.I.$ は屋根高さ相当の主流方向の乱れの強さ、 L_{ux} は主流方向の乱れのスケール、 G_v^2 は屋根高さ相当の風速変動のガストファクターを二乗した値、 α は風速分布のベキ指数、 z_0 は粗度長、 S は気流の縮尺率である。また、一様流であるWind-5については、主流方向の乱れの強さを示す。

表2.4 風洞気流の諸特性

	平坦地域			市街地域			平坦地域			市街地域			一様流		
	Wind-1			Wind-2			Wind-3			Wind-4			Wind-5		
H (cm)	$T.I.$ (%)	L_{ux} (cm)	G_v^2	$T.I.$ (%)	L_{ux} (cm)	G_v^2	$T.I.$ (%)	L_{ux} (cm)	G_v^2	$T.I.$ (%)	L_{ux} (cm)	G_v^2	$T.I.$ (%)	L_{ux} (cm)	G_v^2
2.5	17.3	32	2.32	27.8	22	3.13	24.8	45	3.03	32.4	30	4.41	1.7	-	-
5.0	14.8	37	2.05	24.9	34	2.96	21.3	61	2.79	30.3	50	3.61	0.5	-	-
10.0	12.7	46	2.01	20.7	41	2.66	20.1	65	2.71	26.0	60	3.53	0.5	-	-
z_0 (mm)	0.08			2.0			0.125			3.0			-		
α	1/6.2			1/4			1/6.2			1/4			-		
S	1/400			1/400			1/250			1/250			-		

2-2-3 風圧測定

(1) 模型の寸法

風圧模型は、表2.5に示すような7種類の陸屋根型の模型(図2.7)である。この模型のスパン比 L/H は1~10を想定した。Model-A~Model-Eは、高さとの比(辺長比 W/H)を一定とし、屋根の奥行きを変化させた模型である。一方、Model-FとModel-GはModel-Eと相似な模型である。

表2.5 風圧模型の寸法

Model	H (cm)	W (cm)	L (cm)	スパン比	辺長比
A	5	50	5	1	10
B	5	50	15	3	3.3
C	5	50	25	5	2
D	5	50	35	7	1.4
E	5	50	50	10	1
F	2.5	25	25	10	1
G	10	100	100	10	1