

風環境評価用ガストファクターの提案

Gust Factor for Assessment Criteria of Wind Environment

本郷 剛 中山 かほる

要 約

高層建物が一般市街地に建設されると、いわゆるビル風が問題とされることが多い。高層建物建設による風環境の変化については、風洞実験や数値解析にて調査されることが一般的になっており、評価手法として気象データを考慮した確率的評価が良く用いられる。評価手法としては、10分間平均風速の発生頻度に基づく「風工学研究所の方法」あるいは日最大瞬間風速の発生頻度に基づく「村上らの方法」のいずれかが用いられることが多い。

このうち、村上らの評価基準は日最大瞬間風速 10m/sec, 15m/sec, 20m/sec を対象風速として取り上げ、その年間の発生頻度で風環境を評価するものであるが、風洞実験などでは平均風速を対象とすることが多いため、この平均風速を基に評価できるようにとの考えから、日最大平均風速の発生頻度からも評価できるようにしてある。この場合、日最大瞬間風速と日最大平均風速とをガストファクター GF で結び付けているが、ガストファクターのとり方によっては評価結果が大きく変わる。

本論文は高層建物周辺での風速の実測結果を基に提案したガストファクターと、その適用性について検討した結果について述べている。

目 次

- I. はじめに
- II. ガストファクターに関する既往の研究
- III. 実測結果に基づくガストファクター
- IV. 評価用ガストファクターの提案
- V. おわりに

I. はじめに

高層建物が一般市街地に建設されると、いわゆるビル風が問題とされることが多い。高層建物建設による風環境の変化については、風洞実験や数値解析にて調査されることが一般的になっており、評価手法として気象データを考慮した確率的評価が良く用いられる。東京都の場合、評価手法として、10分間平均風速の発生頻度に基づく「風工学研究所の方法」あるいは日最大瞬間風速の発生頻度に基づく「村上らの方法」のいずれかをを用いるように指導している。

風工学研究所の方法は、その地点での10分間平均風速の累積頻度を求め、Table 1 に示すように、ほぼ年平均風速に対応する累積頻度 55%風速と週一回程度発生する累積頻度 95%風速がどのレベルにあるかにより風環境を評価するものである。

一方、村上らの評価基準はTable 2 に示すように、日最大瞬間風速 10m/sec, 15m/sec, 20m/sec を対象風速として取り上げ、その年間の発生頻度で風環境を評価するものである。このためにはその地点での瞬間風速を求める必要があり、一般に行われている風洞実験では熱線風速計などを用いない限り困難となっている。そのため、通常求められる平均風速を基に評価できるようにとの考えから、日最大平均風速の発生頻度からも評価できるようにガストファクター

GF なるものを導入し、 $10/GF$ m/sec, $15/GF$ m/sec, $20/GF$ m/sec でも評価できるようにした。この場合、ガストファクターは評価地点周辺の状況を判断して定める必要があるが、どのような値が良いのかを定めることは容易でない。

本論文では、東京都区内の高層建物周辺で観測した風速を基に、

Table 1 Assessment criteria by the Wind Engineering Institute

風環境および地域の状況		累積頻度	
		55%風速	95%風速
レベルA	住宅地としての風環境。または比較的穏やかな風環境が必要な場所。	1.2m/s 以下	2.9m/s 以下
レベルB	住宅地・市街地としての風環境、一般的風環境。	1.8m/s 以下	4.3m/s 以下
レベルC	事務所街としての風環境、または比較的強い風が吹いても我慢できる場所。	2.3m/s 以下	5.6m/s 以下
レベルD	超高層建物の足元で見られる風環境、一般には好ましくない風環境。	2.3m/s 超過	5.6m/s 超過

Table 2 Assessment criteria by Murakami et al.

強風による影響の程度	対応する空間	評価する強風のレベルと許容される超過頻度		
		日最大瞬間風速 (m/sec)		
		10	15	20
		日最大平均風速 (m/sec)		
		10/G.F	15/G.F	20/G.F
ランク1 最も影響を受けやすい用途の場所	(住宅地の商店) (野外レストラン)	10% (37 日)	0.9% (3 日)	0.08% (0.3 日)
ランク2 影響を受けやすい用途の場所	(住宅街) (公園)	22% (80 日)	3.6% (13 日)	0.6% (2 日)
ランク3 比較的影響を受けにくい用途の場所	(事務所街)	35% (128 日)	7% (26 日)	1.5% (5 日)

キーワード: ビル風, 風環境評価基準, 実測, ガストファクター

ガストファクターと風速との関係を求め、風洞実験により求まる風速比から容易にガストファクターを計算できる式を提案し、その提案式から求められるガストファクターを用いた風環境評価の妥当性について報告する。

II. ガストファクターに関する既往の研究

一般に風速の発生頻度(超過確率)はワイブル分布で近似できるとされている。いま、ある基準高さでの風向 a における風速を V_1 、風速の超過確率を求めたい地点の風速を V_2 とすると、その地点での風速 V の超過確率 $P(V \geq v, a)$ は(1)式で表される。

$$P(V \geq v, a) = A(a) \times e^{-\left[\frac{v}{R(a) \cdot C(a)}\right]^{K(a)}} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに $A(a)$: 風向 a の発生頻度

$C(a), K(a)$: ワイブル係数

$R(a) = V_2 / V_1$: 風速比

村上らの評価は日最大瞬間風速の超過確率から判断するものであるが、その超過確率がガストファクター $G.F$ を用いることにより、(2)式の日最大平均風速の超過確率で表せるとしている。

$$P(V \geq v, a) = A(a) \times e^{-\left[\frac{v/G.F}{R(a) \cdot C(a)}\right]^{K(a)}} \quad \dots \dots \dots (2)$$

この場合、用いるガストファクターの値は確定していない。つまり、評価したい地点のガストファクターを決定することが必ずしも容易でない。例えば超高層建物の近傍であっても、すべての風向で増速域に入るとは限らず、また、通常の市街地であっても風速の速い場所が存在する。そのため、客観的にガストファクターを求めようとする試みがなされてきた。

1. 村上らによる提案¹⁾

村上らは高さ 58m の高層住宅周辺での強風観測を基に、風洞実験より予測される平均風速についての風速比を用いて、地上高のガストファクターを知る方法について検討を試みている。

観測結果よりガストファクターと風速比の関係を(3)式により近似した。

$$G_t = A_t R^{-\alpha_t} \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで、

G_t : 平均化時間 600 秒、評価時間 t 秒のガストファクター

R : 地上測定点の基準点に対する風速比

A_t, α_t : 平均化時間 600 秒、評価時間 t 秒に対応する係数

平均化時間 600 秒に対応する α_t を(4)式で近似する。

$$\alpha_t = -0.065 \ln(t/600) \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここで、

t : 評価時間(秒)

600 : 平均化時間 T 秒

係数 A_t は(3)式において $R=1$ とした時のガストファクターであり、(5)式で近似する。

$$A_t = (t/600)^{-0.08} \quad \dots \dots \dots (5)$$

また、風速比 R はこの場合、地上高さ 58.1m での風速に対する地上付近の風速の比として求められているため、他の高さ Z_R での風

速を基準としたい場合は、(6)式にて風速比を換算する必要がある。

$$R = \phi(Z_R/58.1)^{1/n} \quad \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 ϕ : 地上高さ Z_R (m) の平均風速を基準としたときの地上付近の風速比

$1/n$: 平均風速の鉛直分布を指数近似した時の指数

(6)式を(3)式に代入すると、(7)式となる。

$$G_t = A_t R^{-\alpha_t} = A_t \phi^{-\alpha_t} (Z_R/58.1)^{-\alpha_t/n} \quad \dots \dots \dots (7)$$

ところで、村上らの評価ではガストファクターの評価時間を 2 ~ 3 秒としているので、評価時間を $t=2$ 秒とすると、(4)、(5)式より $A_t=1.58$ 、 $\alpha_t=0.37$ が得られる。

2. 佐武らによる提案²⁾

佐武らは塔状、板状の矩形建物模型を用いて、建物周辺の平均風速および瞬間最大風速の分布を風洞実験により測定し、建物の大きさが変化した場合の任意点の風速比とガストファクターの関係を回帰式により求めている。

実験は 11 対の模型を用い、べき指数 0.25 の境界層を持つ気流中で行った。風向は正対風向 1 種類で、測定高さは地上 10m 相当、風速は I 型熱線風測定で測定している。その結果、東京管区気象台での観測高さを基準高さとした評価時間 3 秒相当のガストファクターの近似式として、(8)式を提案している。

$$G.F = 1.6 R(a)^{-0.625} \quad \dots \dots \dots (8)$$

3. 西村らによる提案³⁾

西村らは実際に計画された 8 種類の建物模型を用いた風洞実験結果を基に風速比とガストファクターの関係を求めている。風洞実験は周辺建物や地形も再現されており、また、粗度区分も異なる。したがって実験結果には建物の形状や規模による影響だけでなく、周辺建物の状態や接近流の影響も含まれることや、同じ風速比でも風向によってガストファクターの大きさがばらつくことから、安全側の設定になるようにばらつきの上限値を対象に近似式を求めている。

実験結果は評価を一般的にするために地上 10m 高さを基準高さとし、高さ 1.5m 相当での風速との比 R_{10} として示している。ガストファクターは実時間 2 秒相当の瞬間風速と 10 分間相当との平均風速との比として求め、風速比とガストファクターの関係から上限値の近似曲線を求めている。

近似曲線の形状を表すものとしてガストファクター・パラメータ A および α を導入し、これらのパラメータを接近流(粗度区分)の基準高さ(10m 相当高さ)での乱れ強さ Iu で関係付け、ガストファクター $G.F$ の上限値を(9)式にて与えている。

$$\begin{aligned} G.F &= A \cdot R_{10}^{-\alpha} \\ A &= 3.29 Iu + 1.17 \\ \alpha &= -0.46 Iu + 0.79 \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (9)$$

III. 実測結果に基づくガストファクター

1. 市街地における風観測

これまで数多く行ってきた風観測のうち、最近の 4 地点 10 ヲ所での観測結果を基にガストファクターについて検討する。風観測は高層建物の建設前と建設後のそれぞれ 1 年間について行っている。風観測を行った対象建物の場所を Fig. 1 に示す。建物の周辺は

で与えられている。

したがって、本来なら村上ら、佐武らあるいは西村らの提案式が、村上らの評価基準を用いる場合のガストファクターを与えるものとして用いられるか否かは、(14)式と(15)式で与えられるものが一致するかどうかにかかっていることになる。

以後、ガストファクターを検討するに当たり、誤解が生じないように従来の定義による(15)式で与えられるものを「ガストファクター」、(14)式で与えられるものを「日最大ガストファクター」と呼ぶことにする。

4. 日最大ガストファクターと風速比

各観測点における日最大ガストファクター $GF2$ を次式により算定する。

$$GF2 = \frac{\hat{V}_{\max}}{\bar{V}_{\max}} \quad \dots \dots \dots (16)$$

次に、観測点の日最大風速 $\bar{V}_{\max}$ と同日の東京管区気象台における日最大風速 $\bar{V}_{\max, TMO}$ の比 $R2$ を(17)式で求め、日最大ガストファクター $GF2$ との関係を示したものが、Fig. 3 である。

$$R2 = \frac{\bar{V}_{\max}}{\bar{V}_{\max, TMO}} \quad \dots \dots \dots (17)$$

Fig. 2 によれば、日最大風速比 $R2$ による日最大ガストファクター $GF2$ の変化は、平均風速比 $R1$ によるガストファクター $GF1$ の変化ほどばらつきが大きくなく、 $R2 \leq 0.2$ の日最大風速比はあまり現れないことが分かる。また、ガストファクターの値そのものも大きさが異なり、(14)式と(15)式で与えられるガストファクターは一致しない。

次に、日最大ガストファクターと村上ら、佐武らおよび西村らによる提案式との関係について検討する。この場合、それぞれの提案式における風速比とガストファクターの関係が、日最大風速比と日最大ガストファクターとの関係上も成り立つと仮定している。Fig. 3 に3人による提案式を併せて示してある。提案式はそれぞれ(8)式、(12)式および(13)式である。これより西村らによる提案式と佐武らによる提案式は観測値のほぼ上限を示し、村上らによる提案式は観測値の近似曲線(累乗)に近い値を示すことが分かる。

IV. 評価用ガストファクターの提案

1. 評価用ガストファクターの提案式

Fig. 3 に示した日最大風速比と日最大ガストファクターとの関係から、Table 2 の村上らによる評価基準に示されているガストファクターを求める式を提案する。提案式は以下の条件に基づいて行った。

- a. 日最大風速比 $R2$ と日最大ガストファクター $GF2$ との関係から、日最大風速比が 0.2 以下は現れにくいことがわかる。これより、日最大風速比が 0.2 以下については、日最大ガストファクターの値を一定とする。
- b. 日最大風速比が 1.0 ということは、東京管区気象台高さでの風速と同じ値であることから、その時の日最大ガストファクターは東京管区気象台における値と同じであると仮定する。東京管区気象台での日最大ガストファクター $GF3$ を(16)式を応用した(18)式で定め、過去 10 年間のデータを示すと、Fig. 4 の

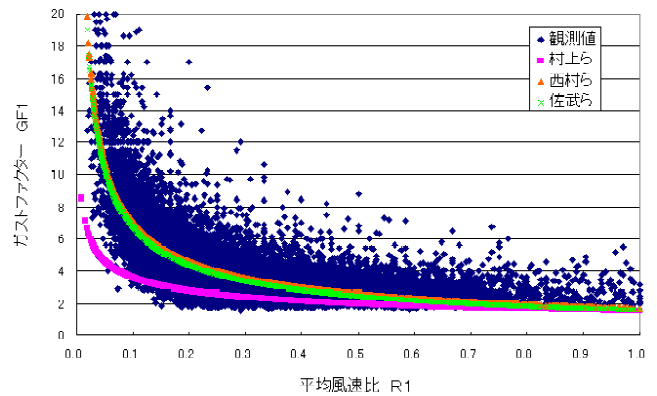


Fig.2 Relationship between gust factor GF1 and mean velocity ratio R1

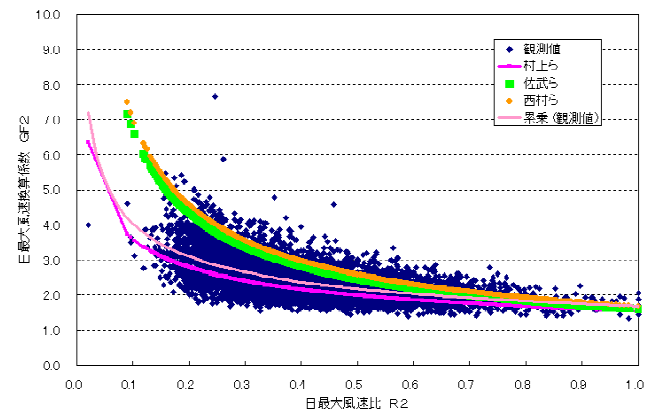


Fig.3 Relationship between daily maximum gust factor GF2 and daily maximum velocity ratio R2

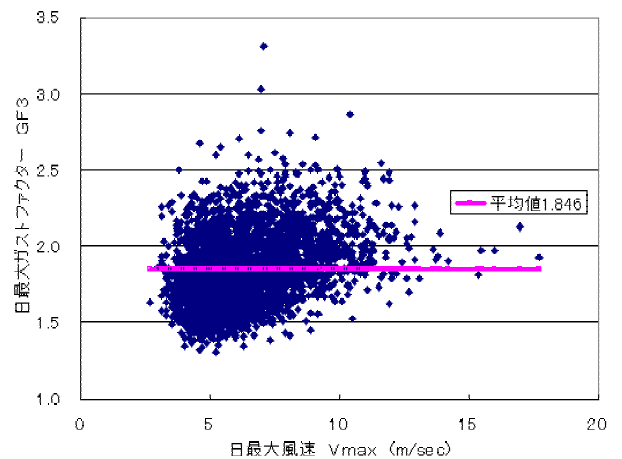


Fig.4 Relationship between daily maximum gust factor GF2 and daily maximum velocity ratio R2 at TMO

ようになる。日最大ガストファクターは日最大風速の増加とともに、わずかに増大する傾向が見られるが、平均で 1.846 であることから、日最大風速比が 1.0 の場合、 $GF2 = 1.85$ とする。

$$GF3 = \frac{\hat{V}_{\max, TMO}}{\bar{V}_{\max, TMO}} \quad \dots \dots \dots (18)$$

- c. 日最大風速比 $R2 = 0.2$ での日最大ガストファクターから

$R2=1.0$ での $GF2=1.85$ までは指数関数的に変化するものとする。

以上の条件のもとに、日最大風速に対する日最大ガストファクターの変化、すなわち村上らの評価基準用のガストファクターを(19)式で与えることを提案する。Fig. 5 に提案式と日最大ガストファクターとの関係を示す。

$$GF2=1.85 \times R^{-0.4} \quad \begin{cases} R=0.2 & \text{for } R2 \leq 0.2 \\ R=R2 & \text{for } R2 > 0.2 \end{cases} \quad \cdot \cdot (19)$$

2. 提案式によるガストファクターの妥当性検討

実測結果をもとに村上らによる評価に用いるガストファクター(日最大ガストファクター)を提案したが、実際に行った風洞実験結果をもとに評価を行い、妥当性について検討する。検討対象とした建物は東京都区内、粗度区分Ⅳの地域に建設された高層建物である。

なお、ここでは評価者の恣意が入らない風工学研究所による評価を、基準の評価法とする。比較検討は以下の方法を用いて行った。

- 村上らによる評価で、ガストファクターとして通常良く用いられる $GF=2.5$ を用いたケース。測定高さ 2 m 相当のデータを用いる。
- ガストファクターとして村上らによる提案式(12)を用いたケース。基となった測定高さが 1.5~3.6 m であるので、測定高さ 2 m 相当の実験結果を用いる。
- ガストファクターとして佐武らによる提案式(8)を用いたケース。基となった測定高さが 10 m であるため、測定高さ 5 m 相当の実験結果を用いる。
- ガストファクターとして西村らによる提案式(13)を用いたケース。基となった測定高さが 1.5 m であるため、測定高さ 2 m 相当の実験結果を用いる。
- ガストファクターとして本提案式を用いたケース。基となった測定高さが 3~5 m であるが、測定高さ 2 m の場合にもそのまま適用できると仮定した。

代表的な評価結果を日最大瞬間風速 10m/sec の超過確率とともに比較して Table 4 に示す。なお、評価基準は Table 1 の累積頻度 55% 風速および Table 2 の日最大瞬間風速 10m/sec に従っている。

Table 5 より風工学研究所による評価と比較すると、ガストファクター $GF=2.5$ を用いた評価が最も厳しい評価を示し、村上式を用いた評価はかなり緩やかであることが分かる。佐武式および西村式と本提案式による評価はほぼ似た評価となっているが、超過確率を見ると、本提案式は風速比 $R(a) \leq 0.2$ でガストファクターを一定としているため、もともと風速比が小さい地点には低い超過確率を与え、風速比の大きな地点にはより大きな超過確率を与える重み付けとなっていることが分かる。これを全測定点での超過確率の相関により検討する。本提案式と佐武式の相関を Fig. 6 に、本提案式と西村式の相関を Fig. 7 に、佐武式と西村式の相関を Fig. 8 に示す。

Fig. 6 によれば、結果として評価は同じになるものの、本提案式は佐竹らの提案式と比較して、超過確率がおおよそ 0.15 まではやや小さな超過確率を与え、0.15 からは大小が逆転している。Fig. 7 の西村式との比較では、やはり超過確率 0.15 程度までは、西村式による超過確率の方が大きな値を示し、1.2~2 倍の値となっている。その後徐々に値が近づき、超過確率がおおよそ 0.27 程度で大小が

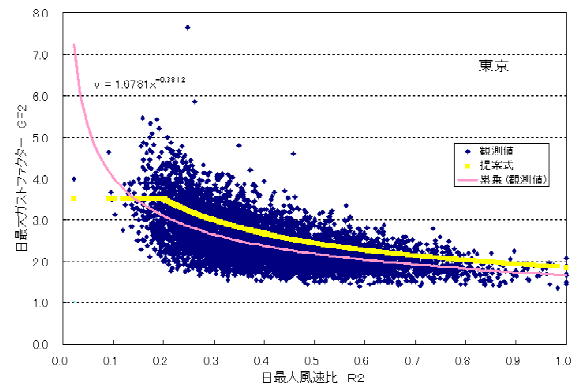


Fig.5 Proposed expression and daily maximum gust

Table 4 Results of wind environmental assessment

測定点	風工学による評価	村上らによる評価(超過確率は風速10m/secでの値)									
		GF=2.5		村上式		佐武式		西村式		本提案式	
		ランク	超過確率	ランク	超過確率	ランク	超過確率	ランク	超過確率	ランク	超過確率
1	B	1	7.31%	1	0.44	1	8.91	2	11.57	1	6.09
18	C	4	48.12	2	12.28	3	25.7	3	30.64	3	31.93
20	B	1	2.7	1	0.05	1	5.54	1	7.52	1	3.39
23	A	1	0.01	1	0	1	1.46	1	2.83	1	0.19
26	C	4	46.99	2	12.67	3	27.17	3	31.14	3	34.62
34	C	4	44.04	1	9.48	3	24.17	3	29.33	3	29.65
35	B	1	6.94	1	1.15	2	12.13	2	13.85	2	10.35
46	A	1	0.09	1	0.01	1	2.29	1	2.48	1	0.96
47	A	1	1.19	1	0.13	1	5.75	1	8.01	1	2.35
53	B	1	0.45	1	0.04	1	5.99	1	5.71	1	2.75
60	A	1	0.71	1	0	1	1.14	1	2.77	1	0.04
87	C	4	31.01	2	10.51	2	21.86	3	24.62	3	24.77
91	C	4	11.08	2	10.48	3	26.05	3	27.33	3	33.92
93	A	1	1.35	1	0.32	1	3.69	1	6.19	1	1.64
96	C	4	38.37	1	7.4	2	20.81	3	26.73	3	24.38
99	B	3	25.91	1	6.36	2	17.84	3	22.34	2	20
108	B	2	12.33	1	3.31	2	11.93	2	15.17	2	10.75

逆転する。Fig. 8 は西村式による超過確率が全ランクにわたり、佐武らによる確率より大きいことを示している。これらの違いが、Table 4 での評価結果の違いとなって現れていることが分かる。

Fig. 9 は本提案式による評価と風工学研究所による評価を比較したものである。ランクはほぼ同じとなっているが、本提案式による評価がランク 1 の場合に、風工学研究所による評価ではレベル B になっている場合があり、本提案式による評価がこのレベルの風環境に対し緩やかな評価を与えている。しかしながら、ランク 3 以降の評価では本提案式による評価のほうがやや厳しい評価を与える傾向が見られる。

以上のことより、村上らによる評価基準により風環境を評価する場合、本提案式によるガストファクターを用いても風工学研究所による評価結果と大きな差異は認められず、実測結果に基づいている点および評価者の思惑が入らない点において、十分に実用に耐えるものと思われる。

3. 提案式を他の基準高さと用いる場合

提案式は東京管区気象台高さでの風速を基準としているため、基準とする風速の高さが異なる場合は、そのまま用いることはできない。基準高さが異なる場合について検討する。

今ここで(19)式を以下のように置き換える。

$$GF2=1.85 \times R^{-0.4} \quad \begin{cases} R=0.2 & \text{for } R_{74.5} \leq 0.2 \\ R=R_{74.5} & \text{for } R_{74.5} > 0.2 \end{cases} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot (20)$$

ここで $R_{74.5} = v_z / V_{74.5}$: 東京管区気象台高さ 74.5m 位置での風速に対する風速比

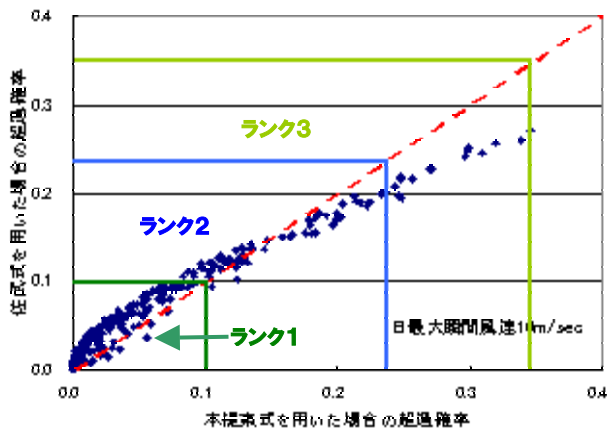


Fig. 6 Correlation of the probability of exceedance calculated by the proposed expression and the Satake's expression

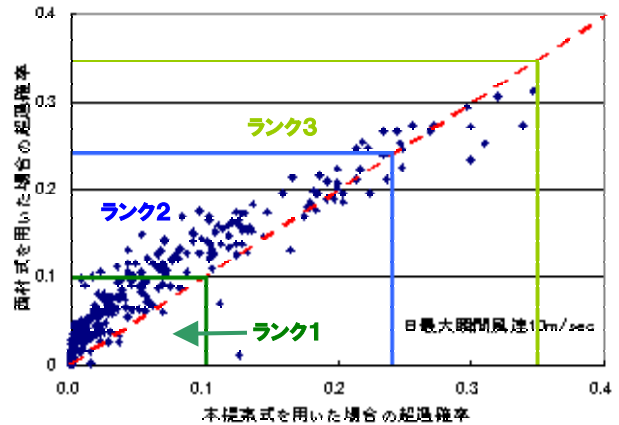


Fig. 7 Correlation of the probability of exceedance calculated by the proposed expression and the Nishimura's expression

v_z : 地上高さ z (m) における測定点での風速
 $V_{74.5}$: 東京管区気象台高さ 74.5m 位置での風速
 ここで、同じ粗度区分内で高さ H での風速 V_H を、基準風速として用いることにした場合、二つの風速間に指数分布則が成り立つと仮定し、(21)式で与える。ここで指数を 0.27 としたのはガストファクターが粗度区分IVに対応しているためである。

$$R_{74.5} = R_H \left(\frac{H}{74.5} \right)^{0.27} \dots \dots \dots (21)$$

ここで $R_H = v_z / V_H$: 基準高さ H m 位置での風速に対する風速比したがって、(20)式は次のように置き換えられる。

$$GF2 = 1.85 \times R^{-0.4} \begin{cases} R = 0.2 \left(\frac{H}{74.5} \right)^{0.27} & \text{for } R_H \leq 0.2 \\ R = R_H \left(\frac{H}{74.5} \right)^{0.27} & \text{for } R_H > 0.2 \end{cases} \dots \dots \dots (22)$$

V. おわりに

東京都内 4 地区 10 カ所における実測結果を基に、村上らの評価に用いるガストファクターとして、風速比(東京管区気象台での風速に対する評価地点での風速比) $R_{74.5}$ による次式を提案した。

$$G.F = 1.85 \times R^{-0.4} \begin{cases} R = 0.2 & \text{for } R_{74.5} \leq 0.2 \\ R = R_{74.5} & \text{for } R_{74.5} > 0.2 \end{cases}$$

東京の粗度区分IVに建設された高層建物を対象に、村上ら、佐武らおよび西村らの提案式による評価結果と比較検討した。風工学研究所による評価を基準として比較すると、ガストファクター $G.F = 2.5$ を用いた評価が最も厳しい評価を示し、村上式を用いた評価はかなり緩やかであった。佐武式および西村式と本提案式による評価は風工学研究所による評価ほぼ似た評価となっているが、超過確率を見ると、本提案式は風速比 $R \leq 0.2$ でガストファクターを一定としているため、もともと風速比が小さい地点には低い超過確率を与え、風速比の大きな地点にはより大きな超過確率を与える重み付けとなっていることが分かった。これらの比較検討より、本提案式は実測結果に基づいている点および風速比より一義的に求まる点において、十分に実用に耐えるものと思われる。

今後、他の粗度区分あるいは東京以外の地域での適用性について

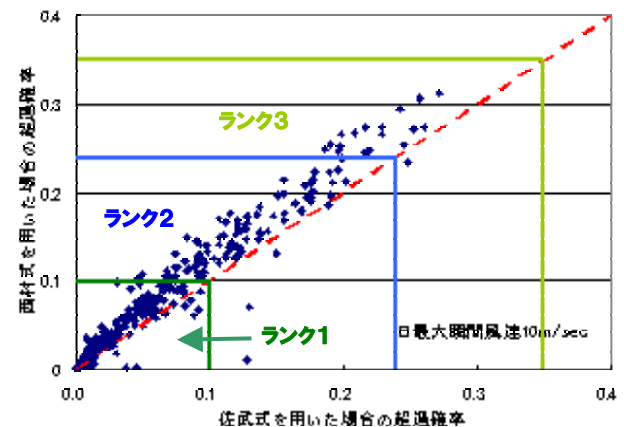


Fig. 8 Correlation of the probability of exceedance calculated by the Satake's expression and the Nishimura's expression

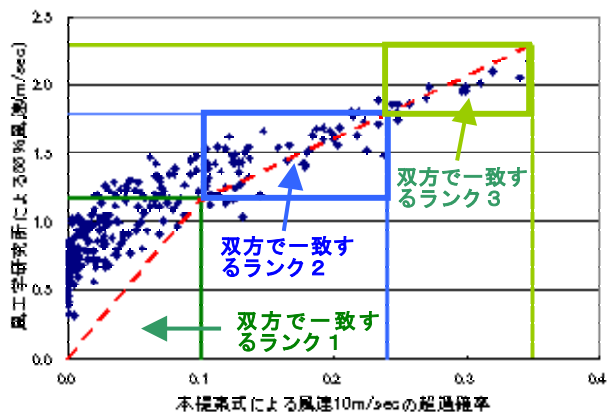


Fig. 9 Correlation of the assessment results by the proposed expression and the Wind Engineering Institute

検討を加える予定である。

参考文献

- 1) 村上ほか; 日本建築学会論文集, 第314号, (1982), pp. 112-119.
- 2) 佐武ほか; 日建学大会学術講演梗概集, 41314, (1998), pp. 627-628.
- 3) 西村ほか; G B R C, No. 105, (2002), pp. 27-32.