

建物周辺の風に関する研究

——長期観測による市街地風の統計的性状——

川口 彰久 岡田 宏

Investigation on Ground Level Wind Around High-rise Building

——Characteristics of Urban Area Wind Based on Long-term Observation——

Akihisa Kawaguchi Hiroshi Okada

Abstract

This paper describes the statistical characteristics of urban area wind around a high-rise building. The items of analyses are mainly the characteristics of gust factor, peak factor and turbulence intensity, the changes of hourly mean wind velocity in a day, the relationship between the number of occurrences of storms annually and the probability of exceeding the wind velocity, etc. The suitability of the equation for predicting gust factor from the velocity ratio presented by Murakami, Kawaguchi et al. is also discussed and it is shown that the equation corresponds well with the results of full-scale observation.

概 要

本研究は、超高層建物周辺での長期観測から得た市街地風の統計的性質について、報告するものである。主な解析項目は、変動特性（ガストファクター、ピークファクター、乱れの強さ）、長周期パワースペクトル、風速の日変化、風速の発生回数と超過確率の関係などについてである。また、村上・川口らが提案した風速比からガストファクターを予測する式の適合性も検討し、実測結果と良い対応関係にあることを示している。

1. はじめに

中高層や超高層建物の周辺に吹く市街地風は、これら建物の影響を受けない風に比べて、特異な性質を有しているといわれており、この風の性質を明らかにするために、多くの研究が行なわれている。研究は、風洞実験や実測あるいは数値解析など、あらゆる角度から進められているが、現状においては、まだ十分に解明されているとはいえず、今後とも継続的な研究を行ない、データを蓄積する必要がある。

本研究は、実測による調査事例であり、超高層建物周辺の市街地風を長期にわたって観測したデータを統計的に解析し、多くの知見を得たので、その結果について記述するものである。

2. 観測概要

2.1. 観測場所

観測場所は、東京都・区部に建つ超高層建物（高さ85 m）の周辺で、測定点は図一に示す5ヶ所である。測定高さは、測定点1～4が地上7 m 高さ、測定点5が10 mである。

2.2. 観測システム

風の測定に使用した装置は、記憶式風観測システム（風工学研究所製）である。本装置は、矢羽根型風向検出器と三杯型風速検出器および、検出したデータを演算処理する部分から成っている。写真一は、風向計と風速計を示す。

時々刻々変化する風向や風速は、連続した波として記録することも可能ではあったが、観測が長期にわたることから、検出した風向・風速のデータは逐次演算処理し、10分間における代表値を一つのデータ単位として、記憶部に収録した。10分間を一つのデータ単位とした内容は、

次に示す4成分である。

①平均風速: 0.5秒ごとにサンプリングした瞬間風速の10分間平均値, \bar{V} (m/s)

②最大瞬間風速: 評価時間2秒の瞬間風速の最大値, \hat{V} (m/s)

③標準偏差: 評価時間2秒の瞬間風速の標準偏差, $\sqrt{\bar{v}^2}$ (m/s)

④最多風向: 16風向に分割した風向のなかで, 10分間に最多頻度を示した風向

2.3. 観測期間

観測期間は, 昭和55年8月から58年4月までの33ヶ月間であり, 55年8月から1年間を前期(建物建設前), 57年3月から1年間を後期(建設後)としている。

3. 観測結果

3.1. 基準点

基準点は, 測定点5とした。測定点5は北側に隣接する緑地内に位置し, 超高層建物から約120m離れている。測定高さは地上10mで, 周囲の樹木群の高さより高い。測定点5の風向出現頻度や風速の超過頻度および東京管区气象台(東京都千代田区大手町, 地上74.6m)の風速に対する比率などは, 観測期間を通じて安定していた。例えば, 図-2に日最大風速時の風向出現頻度を示すと測定点5の卓越風向は气象台のNNWに比べてやや西寄りではあるが, 前期NW, 後期WNWと十分に安定している。

3.2. 風向分布

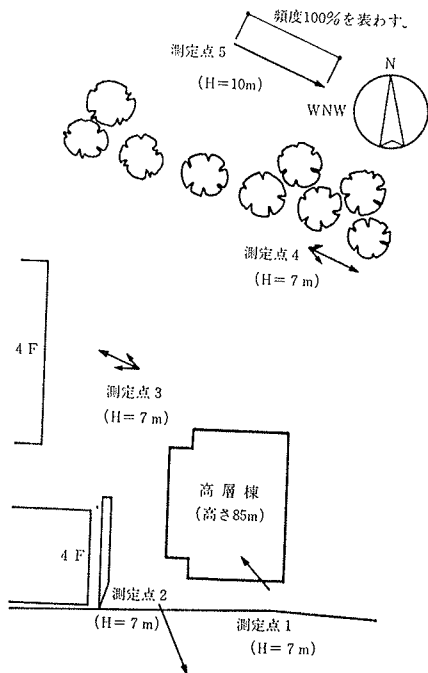


図-1 風向分布(基準風向WNW, 後期)

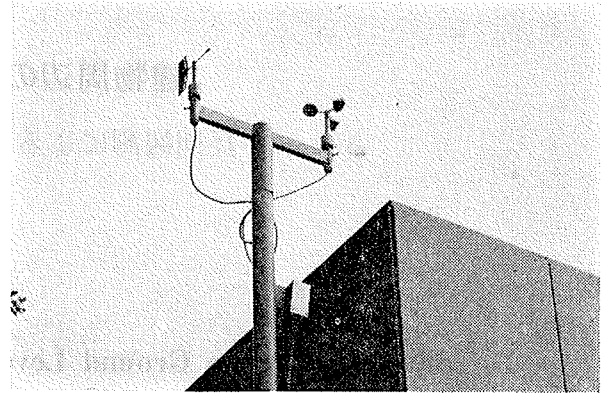


写真-1 矢羽根型風向計と三杯型風速計

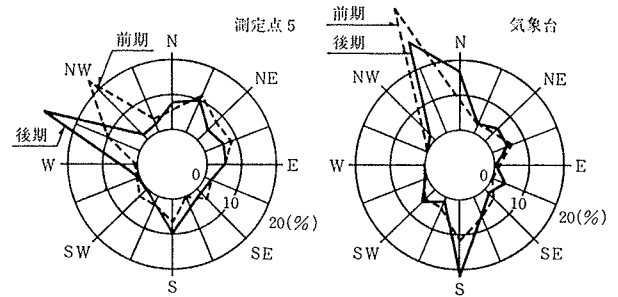


図-2 日最大風速の風向出現頻度

基準点の風向がWNWの時の各測定点の風向出現頻度を地図上に示すと, 図-1となる。図中ベクトルの方位は風向を, ベクトルの長さは頻度を示す。測定点1と3が基準点と逆向きの風向を示している。これは, 測定点1は高層棟の後流域に位置し, 測定点3は西方の4階建建物の後流域に位置するためである。

3.3. 風速超過頻度のワイブル分布による近似

風速の超過頻度は, (1)式に示すワイブル分布によって近似できるとの報告があり, 本観測データについても近似を試みた。

$$P(>V) = \exp \left\{ - \left(\frac{V}{c} \right)^k \right\} \dots\dots\dots(1)$$

ここで, $P(>V)$ は風速 V の超過確率, c はワイブル係数(尺度係数), k はワイブル係数(形状係数)である。その結果, 平均風速や最大瞬間風速の超過頻度は, いずれの測定点に対しても十分に近似でき, Gumbelの積率法¹⁾によってワイブル係数を求めると, 表-1となる。また, 日最大風速や日最大瞬間風速では, 多くの測定点に対しては(1)式に下限値 ε を導入する必要があったが, 測定点5では良い対応を示している。図-3に測定点5の結果を示す。

3.4. 変動特性

基準点(測定点5)の風向がWNWの時の, 測定点2と5の変動特性を, 図-4に示す。横軸は, 各測定点の

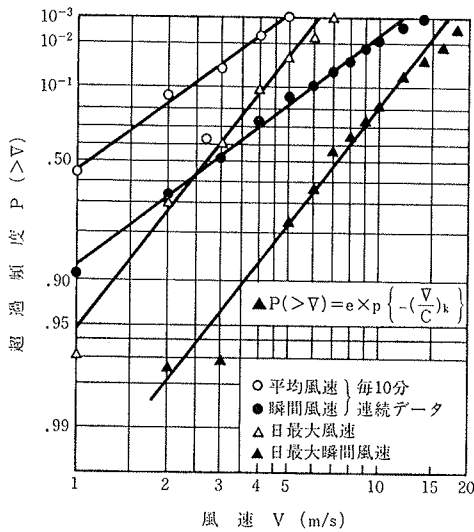


図-3 風速の超過頻度 (測定点5, 後期)

平均風速であり、「○」は1年間の平均値、「|」印は標準偏差 1σ である。変動特性は、(2)式によって定義されるものであり、 $G=1+PI$ の関係がある。

- ①ガストファクター $G = \hat{V}/\bar{V}$
- ②ピークファクター $P = (\hat{V} - \bar{V})/\sqrt{\bar{V}^2} \dots\dots(2)$
- ③乱れの強さ $I = \sqrt{\bar{V}^2}/\bar{V}$

ガストファクターと乱れの強さは、平均風速が増すと徐々に減少して一定値に漸近する傾向にあるが、ピークファクターは逆に風速の増大とともに大きくなって一定値に漸近する傾向にある。次に、平均風速が3 m/s 以上の場合の変動特性の頻度分布をみると、図-5 となる。いずれの分布形も左右非対称となり、歪度は正となって平均値よりも大きな値の側に長く尾を引く。しかし、この傾向は、変動特性のそれぞれが下限値を有するためであり、平均値が大きくなればなるほど歪度は小さくなって、左右対称の分布形に近づく。

表-2 は、基準点の風向が S と WNW の時で、各測定点の風速が 3 m/s 以上の場合の変動特性の平均値である。ガストファクターが大きい測定点は、基準風向 S の時には測定点 5、基準風向 WNW の時には測定点 4 であり、小さい測定点は基準風向 S、WNW とともに測定点 2 である。風向にもよるが、建物に近接したところではガストファクターは小さく、離れたところでは大きくなる傾向にある。

3.5. 風速の長周期パワースペクトル

1 時間平均風速を用いて、測定点 1 と 5 の夏季を対象に長周期パワースペクトルを求めると、図-6 となる。計算方法は MEM 法²⁾による。卓越傾向は、測定点 1 では 1 日周期が著しく、また半日、2 日、3 日、4 日、5~6 日と 10 日付近にも卓越はみられる。これに対して、測定点 5 では 1 日周期は測定点 1 と同様に著しく卓越し

測定点 No	高さ (m)	ワイブルパラメーター(全風向)				基準点の風向 S			基準点の風向 WNW		
		形状係数 K	尺度係数 C (m/s)	形状係数 K	尺度係数 C (m/s)	ガストファクター	ピークファクター	乱れの強さ(%)	ガストファクター	ピークファクター	乱れの強さ(%)
1	7	1.73	2.56	1.83	5.13	2.07	3.37	32	2.15	3.21	36
2	7	1.76	3.11	1.93	6.04	1.91	3.24	28	1.89	3.22	28
3	7	1.54	1.31	1.50	3.04	2.38	3.50	39	2.34	3.67	36
4	7	1.28	0.88	1.25	2.24	2.79	3.81	47	2.62	3.67	44
5	10	1.54	1.36	1.58	3.52	2.99	4.13	48	2.36	3.25	42
		2.75 ¹⁾	3.04 ¹⁾	2.67 ²⁾	8.17 ²⁾						

1) 日最大風速, 2) 日最大瞬間風速

表-1 ワイブル係数 (後期)

表-2 変動特性 (後期)

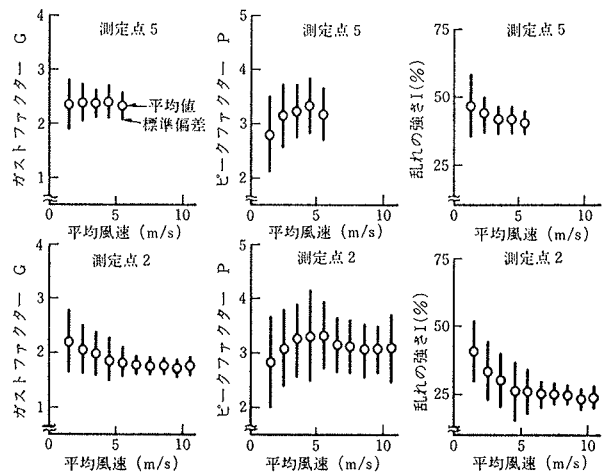


図-4 変動特性と平均風速の関係 (基準風向 WNW, 後期)

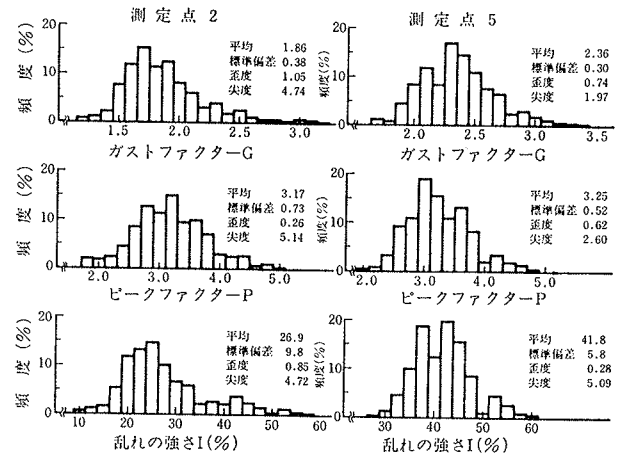


図-5 変動特性の頻度分布 (基準風向 WNW, 後期)

ているが、他の周期での卓越は明確でない。測定点の位置による卓越傾向の違いは、長周期の風速変動である気圧の移動に伴う風向変化の影響が、測定点 5 のような場所では風速変化としてあらわれにくく、測定点 1 のような建物に近接したところではあらわれやすいためと考える。図中には、Van der Hoven が Brookhaven の地上 100 m 高さで測定したスペクトルも示してある³⁾。

3.6. 風速の日変化

長周期パワースペクトルで著しい卓越を示した 1 日周

期の変化をとりだすと、図一7となる。これは、夏期(6~8月)における1時間平均風速の時刻による変化を示しており、朝6時頃に風速は最小で、時間とともに増して14~16時頃最大となり、また減少していく過程があきらかである。風速の大きさや変化の程度は、測定点や季節によって差はあるものの、時刻に伴う変化の様子はほとんど類似であった。

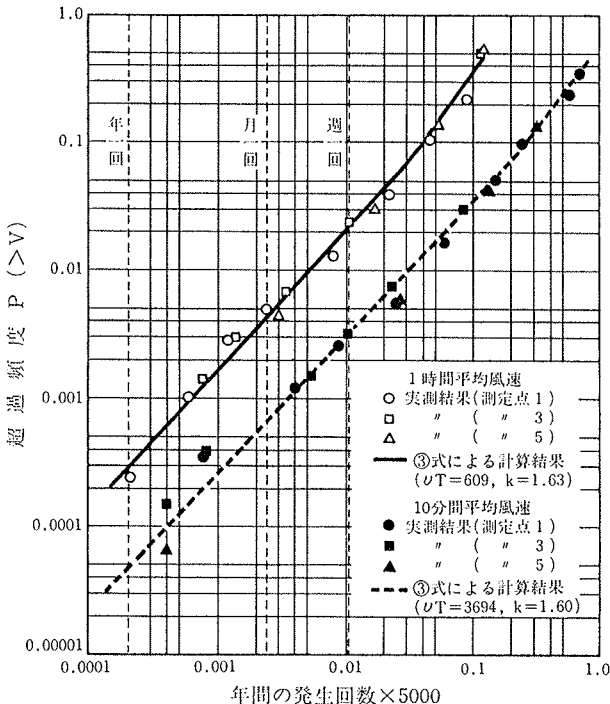
3.7. 風速の発生回数と超過頻度

年間におけるある風速の超過頻度とその風速の発生回数を関係づけると、図一8となる。風速の超過頻度は、3.4.節で検討したものであり、発生回数はその風速のupcrossingの回数をかぞえたものである。図は測定点1, 3, 5の連続した10分間平均風速と1時間平均風速について示したが、発生回数と超過頻度の関係は、もちろん10分間平均風速と1時間平均風速では当然異なるが、測定点がいずれであるかなどはまったく影響を受けていない。また、最大瞬間風速について求めた超過頻度と発生回数の関係も、平均風速のそれと差はなかった。

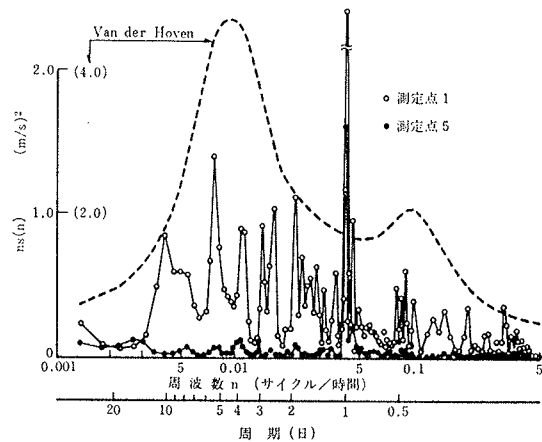
ところで、Isyumovら⁴⁾は、ある風速Vを超える事象の発生回数とその風速の超過確率の関係を、(3)式で示している。

$$N_v = \sqrt{2\pi} \nu T \left\{ \Gamma \left(1 + \frac{2}{k} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{k} \right) \right\}^{1/2} \cdot k \cdot \{-\ln P(>V)\}^{(k-1)/k} P(>V) \dots\dots\dots(3)$$

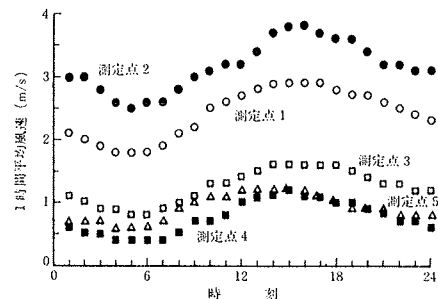
ここで、 N_v は発生回数、 $P(>V)$ は超過確率、 Γ はガンマ関数、 k はワイブル係数(形状係数)、 νT は年間に生ずる独立した事象の数、である。そして、1時間平均



図一8 風速の発生回数と超過頻度の関係(後期)



図一6 風速の長周期パワースペクトル (夏季:昭和57年6月~8月)



図一7 1時間平均風速の日変化 (夏季:昭和57年6月~8月)

風速に基づいた場合 $\nu T=960$, $k=1.5$ として、年間に1回, 12回(月1回), 52回(週1回)発生する事象の超過確率は、それぞれ0.01, 0.3, 1.5%に相当するとしている。そこで、測定点1, 3, 5の3点について、村上ら⁵⁾と同じ方法で求めた νT と3.3.節で求めた k の平均値を(3)式に代入し、発生回数と超過確率の関係を求めてみた。結果は図中実線と破線によって示しており、1時間平均風速と10分間平均風速のいずれも実際にカウントしたものと良い対応関係にある。発生回数と超過確率の対応は、1時間平均風速に基づく、0.028%(年1回), 0.43%(月1回), 2.2%(週1回)となり、また、10分間平均風速に基づく、0.0046%, 0.066%, 0.32%となる。発生回数に対応する超過確率値は、先の Isyumov らや村上らの結果よりも高目ではあるが、風速レベルでの差はわずかであると考えられる。

次に、以上の様な確率で発生する事象の平均的な継続時間を(4)式によって計算する。

$$\bar{T}_v = \frac{P(>V)T}{N_v} \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 T_v は風速Vを超過している継続時間の平均値、 $P(>V)$ は風速Vの超過確率、 N_v は風速Vを超過する事象の発生回数、 T は年間の時間、である。

1時間平均風速に基づく場合の平均継続時間は、2.5

時間（年1回）、3.1時間（月1回）、3.7時間（週1回）であり、10分間平均風速に基づくと、24分、29分、32分となる。

3.8. 風速比とガストファクターの関係

村上・川口ら⁶⁾は、風速の変動特性の一つであるガストファクターを基準点に対する平均風速の風速比と関連づけて(5)式を示し、数ヶ所の地域の実測結果を用いてその適合性を検討している。そこで、本観測結果に対して(5)式を対応させ、適合性を検討することとした。

$$G_t = A_t R^{-\alpha_t} \left(\frac{Z}{Z_D} \right)^{-\alpha_t/n} \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 G_t は平均化時間10分評価時間 t 秒のガストファクター、 $A_t = (t/600)^{-0.08}$ 、 $\alpha_t = -0.065 \ln(t/600)$ 、 R は基準点に対する平均風速の風速比、 Z は基準点の地上高さ(m)、 $Z_D = 58.1$ m、 $1/n$ は平均風速の鉛直分布をべき法則で近似した時のべき指数（基準点はこの領域にあると仮定）、である。

基準点（測定点5）の風速 3 m/s 以上のデータを用いて、基準風向別に各測定点毎の風速比とガストファクターの平均値を求めると、図-9となる。図中、気象台を基準にした風速比の軸は、測定点5の日最大風速の気象台のそれに対する比で換算したものである。また、実線は(5)式において、基準点を気象台（ $Z=74.6$ m）としてべき指数は $1/n=1/4$ を仮定し、評価時間は $t=2$ 秒を代入して求めた、風速比とガストファクターの関係 $G=1.54R^{-0.37}$ であり、実測値と良い対応を示している。

4. まとめ

長期間にわたった超高層建物周辺での市街地風の観測から得た知見をまとめると、次の様になる。

- (1) 基準点と位置つけた測定点5の日最大風速の卓越風向は、東京管区気象台のNNWに対して西寄りではあるが前期NW、後期WNWと観測期間を通して安定していた。
- (2) 10分間を単位とした平均風速や最大瞬間風速の超過確率は、ワイブル分布によって十分に対応できた。
- (3) ガストファクターと乱れの強さは平均風速の増加とともに減少して一定値に漸近し、ピークファクターは平均風速とともに増大して一定値に漸近する傾向にある。変動特性の分布形は、左右非対称で、歪度が正となる。
- (4) 風速の長周期パワースペクトルは、いずれの測定点においても1日周期は著しい卓越を示したが、他の周期での卓越は建物に接近した測定点ほど明確であった。
- (5) 風速の日変化によると、早朝6時頃に風速は最小となり、午後2～4時頃最大となっていた。

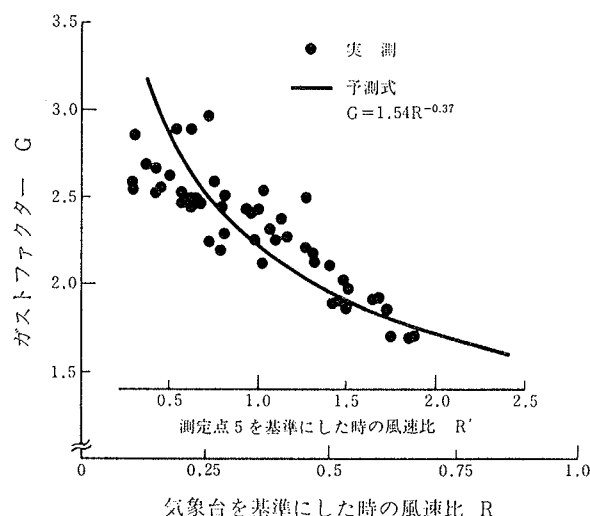


図-9 風速比とガストファクターの関係（後期）

(6) 風速の発生回数と超過頻度の関係では、測定点による差はみられず、1時間平均風速では0.028%（年1回）、0.43%（月1回）、2.2%（週1回）、10分平均風速では0.0046%、0.066%、0.32%であった。

(7) ガストファクターと風速比の関係は、(5)式の有効性を確認することができた。

謝辞

本調査は、東京大学生産技術研究所村上周三助教授の御指導により実施いたしました。また、本研究にあたっては、建物のオーナー、設計事務所および新築工事共同企業体の各位に御理解と御協力を頂きました。ここに記して、お世話になった方々に、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) E. J. Gumbel: Statistics of Extremes, Columbia University Press.
- 2) 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店
- 3) 塩谷正雄: 強風の性質, 開発社 (引用文献)
- 4) N. Isyumov, A. G. Davenport: The ground level wind environment in built-up areas, Proc. of 4th Int. Conf. on W.E.B.S., London, (1965)
- 5) 村上周三, 藤井邦雄: 市街地低層部における風の性状と風環境評価に関する研究-I, 日本建築学会論文報告集, 第310号, (昭和56. 12)
- 6) 村上周三, 丸田栄蔵, 岩谷祥美, 藤井邦雄, 川口彰久: 同上-II, 同報告集, 第314号, (昭和57. 10)
- 7) 村上周三, 川口彰久: 超高層建物周辺における市街地風の統計的性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和59. 10)