論文

風の乱れの影響を考慮した風環境評価指標に関する研究

Study on wind environment assessment criterion considering the influence of turbulence

赤星明紀 ^{*1}	猿川 明 ^{*1}	佐々木亮治 ^{*1}
Akinori AKAHOSHI	Akira SARUKAWA	Ryoji SASAKI
宮下康一 ^{*1}	中村 修 ^{*1}	植松 康 ^{*2}
Koichi MIYASHITA	Osamu NAKAMURA	Yasushi UEMATSU

SUMMARY

Turbulence affects the human sensation of wind, the wind-induced damage to buildings. The statistical values of winds measured by 3-cup anemometers are also affected by the turbulence. For this reason, it is important to study the influence of turbulence on the wind environment assessment criterion proposed by Wind Engineering Institute Co., Ltd. several decades ago, which was based on the mean wind speeds measured by 3-cup anemometers. The present paper discusses the influences of turbulence on the criterion using the results of field observation, a wind tunnel experiment, and a questionnaire survey about the human sensation of wind that was given to the residents and pedestrians in Tokyo. Based on the results, we have proposed a new criterion for evaluating the pedestrian-level wind environment, in which the influence of turbulence is considered.

key words: wind environment assessment criterion, 3cup anemometer, ultrasonic anemometer, turbulence intensity, wind observation, wind tunnel experiment, questionnaire survey

1. はじめに

我が国の環境アセスメント等の風環境調査における風環境評価指標として、(株)風工学研究所による風環境評価指標¹⁾(以下、風工評価指標)と、村上らによる風環境評価指標²⁾(以下、村上評価指標)の二つが一般に用いられている。これらの指標は、表1に示すように評価手

法は異なるが、どちらを用いてもほぼ同等の結果が得られることが既往の研究で示されている^{3,4)}。しかし、これらの指標が検討された数十年前から現在にかけて、超高層建物が林立するなど都市の状況は大きく変化し、ビル風問題は以前にも増して社会問題化してきている。また、風観測調査に用いられる風速計も技術向上などに合わせ

*1 株式会社風工学研究所

Wind Engineering Institute, Co., Ltd.

*2 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 教授

Professor, Department of Architecture and Building Science, Graduate School of Engineering, Tohoku University

(原稿受理年月日: 2017年12月26日, 採用決定年月日: 2018年7月9日)

～MGR は建物 P (図 2, 図 3 参照) の屋上観測点である。観測点 MG1～3 には三杯型・矢羽型と超音波型を併設し、観測点 MG6 には三杯型・矢羽型と WXT520 を併設している。統計処理方法について、瞬間風速は平均化時間 3 秒の移動平均値とし、平均風速、最大瞬間風速、乱れの強さ、ガストファクター、気温は 10 分間における値で整理した。また、風速の平均化はスカラー平均で行った。

屋上観測点 MGO～MGR を用いて、以下に示す方法により、建物 P 自身の影響が小さい観測データを新たに作成した。まず、観測点 MGO～MGR について建物 P 自身の影響が小さい風向を、数値流体解析 (以下、CFD) を用いて調査した。CFD の解析条件を表 3 に示す。また、CFD により求めた、観測点 MGO～MGR に対応する位置における流入風に対する風向別風速比を図 4 に、平均風向角 (風向 E を 0° として $180^{\circ} \sim -180^{\circ}$) を図 5 に示す。図 4 および図 5 から、流入風向と選択する観測点の対応を表 4 のように設定した。なお、表 4 の対応を決める際に、判断が難しい風向もあった。そのため、観測点 MG6 付近で 2017 年 11 月から約 3 カ月間、ドップラーライダー (三菱電機 (株) 製 DIABREZZA) による上空風の観測

表 3 CFD の概要
Table 3 Outline of CFD

計算コード	非構造格子系の解析ソルバー
乱流モデル	標準 $k-\varepsilon$ モデル
離散化手法	有限体積法
要素数	1000 万
壁面接線方向の最小解像度	0.5m
気流	地表面粗度区分 IV 相当
建物壁面境界	滑面型対数則
収束判定	各物理量の残差 $1E-6$ 以下
周辺建物の再現	なし

図 4 CFD によって求めた観測点 MGO～MGR に対応する位置における流入風に対する風向別風速比
Fig. 4 Ratio of wind speed to the inflow wind speed obtained from CFD at Points MGO – MGR

図 5 CFD によって求めた観測点 MGO～MGR に対応する位置における平均風向角

Fig. 5 Mean wind direction obtained from CFD at Points MGO – MGR

を行い、その結果から表 4 の対応関係が適切であることを確認した。観測データからある 10 分間の流入風向を求める際は、建物 P の影響を受けている後流域では風速が低く風向が変化していると考えられるので、平均風速が高い観測点の風向を選択する。ただし、建物 P の影響により増速している可能性も考えられるため、最も平均風速の高い観測点と二番目に高い観測点の平均風向を用いて、それらの平均を流入風向とした。求めた平均風向と表 4 の関係から、建物 P の影響が小さいと思われる観測点の観測データを選択する。この選択を全ての 10 分データに対して行い、新たに作成したデータを観測点 MGZ の観測データとして再定義した。

表 4 流入風向と選択する観測点の対応

Table 4 Correspondence of selected point to the inflow wind direction

N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE
MGO	MGO	MGP	MGP	MGP	MGP	MGP	MGP
S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
MGQ	MGQ	MGQ	MGQ	MGQ	MGR	MGR	MGR

2. 2 観測結果

観測点 MG1～MG6 における平均風速の累積頻度を図 6 に示す。なお、すべて三杯型による観測値である。風が

図 6 観測点 MG1～MG6 での平均風速の累積頻度
Fig. 6 Cumulative frequency of mean wind speed at Points MG1 – MG6

図7 観測点 MGZ の風向出現頻度 (平均風速 5m/s 以上)
Fig.7 Frequency of wind direction at Point MGZ
(Mean wind speed is higher than or equal to 5 m/s)

最も強かったのは観測点 MG1 であり、風が穏やかであったのは観測点 MG4～MG6 である。図 7 は、屋上の観測点 MGZ の風向出現頻度 (平均風速 5m/s 以上) を示しており、北寄りの風は風向 NNW, N の頻度が、南寄りの風は風向 S, SSW の頻度が高いことが確認できる。

3. 風洞実験概要および風洞実験結果

3. 1 風洞実験概要

観測データの得られない場所の風は、風洞実験結果から推定した。実験の概要を表 5 に、実験模型を図 8 に示す。実験模型は 3D プリントを用いて作製した。風速の測定は、水平方向の変動成分を測定する目的で平行流型プローブ熱線風速計を用い、風の流れに対してなるべくセンサーおよびサポートの影響がないような向きに設置した (図 9)。その影響を確認するため、サーミスタ風速計 (以下、サーミスタ) を用いた実験も行っており (図 10)、熱線風速計プローブの腕の長さ分だけ測定位置に差はあるが、熱線風速計による平均風速との比較を行った。測定点は全 74 地点で、観測点と同じ位置も含んでいる。実験気流については、風速および乱れの強さの鉛直分布が、

表 5 風洞実験の概要

Table 5 Outline of wind tunnel experiment

風洞タイプ	ゲッチングン型境界層風洞 (風工学研究所)
測定洞断面	幅 3.1m×高さ 2.0m
実験気流	地表面粗度区分Ⅳ相当
実験風速	基準高さ (風洞床上 850mm) で 10m/s
模型化範囲	半径約 300m
模型縮尺	1/400
センサー	平行流型プローブ熱線風速計
サンプリング	2000Hz で 60 秒間
風向	16 風向
測定点数	74 地点

図8 風洞実験模型

Fig. 8 Model of wind tunnel experiment

図9 熱線風速計の設置状況

Fig. 9 Installation situation of hot-wire anemometer

図10 サーミスタ風速計の設置状況

Fig. 10 Installation situation of thermistor anemometer

日本建築学会の建築物荷重指針・同解説⁶⁾ (以降、荷重指針) に示される地表面粗度区分Ⅳの分布に概ね対応していることを確認した。なお、落葉期、繁茂期の両方に対して実験を行ったが、測定点付近には落葉樹が少なく両者の結果にほとんど差がなかったため、以下の検討においては繁茂期の結果を用いる。

3. 2 風洞実験結果

全風向について、基準点 (風洞床上 850mm) に対する測定点の風速比を、熱線風速計とサーミスタによる実験値から求めて比較した結果を図 11 に示す。上述した測定位置の差を考慮すれば、両者は概ね対応していると言える。直線から比較的離れたプロットは、主に測定点が建物や樹木の近くで測定位置の差の影響が顕著に表れているケースの結果である。図 12 は、風向別風速比とガスト

図 11 熱線風速計とサーミスタの風向別風速比の比較

Fig. 11 Comparison for wind speed ratio between hot-wire anemometers and thermister anemometers

(a) 風向別風速比

(b) ガストファクター

(c) 乱れの強さ

図 12 実験値と観測値の比較

Fig. 12 Comparison for wind speed ratio, gust factor and turbulence intensity between experiment and field observation

ファクター、乱れの強さについて、熱線風速計による実験値と観測点 MG1～MG6 における観測値（基準点：観測点 MGZ、平均風速 5m/s 以上）を比較した結果である。ガストファクターおよび乱れの強さについては、屋上観測点 MGZ における値を□プロットで示している。また、図中の破線は●プロットの近似直線である。観測値は超音波型の値とし、三杯型のみが設置されている観測点については、既報⁵⁾に示す方法に従って超音波型の値に補正した（以下、三杯補正）。観測データの期間は 2016 年 10 月～2017 年 9 月である。なお、データ個数の少ない風向（1000 個未満）は対象外とした。また、観測点 MG2 は直近の樹木の影響が強いと考えられたため対象から除外した。図 12 の●プロットを見ると、風向別風速比については両者がよく対応しているが、ガストファクターおよび乱れの強さについては、実験結果がそれぞれ 20%程度過小評価になっている。この理由としては、図 12(c)より屋上観測点 MGZ における値においても●プロットと同様の傾向が見られることから、実験気流の乱れが実際よりも小さかったことが考えられる。その他の理由として、熱線風速計の感部が実スケールで約 800mm に相当するため、乱れが空間平均されていることなどが考えられるが、今後、詳細な検討が必要である。

4. 風に関するアンケート調査

4. 1 アンケート調査の目的

現在の風工評価指標は、風速と街並みの関係から定められており、100 か所という数多くの観測点における風観測データに基づいている点や、風環境と街並みの関係に着目している点、さらに簡便に適用可能であることから、合理的な指標であると考えられている。一方で、風環境評価において、風速と人々の風に対する体感との関係や、風速と風によって生じる物理的な障害との関係を検討することも重要であり、多くの研究者がそれらを基準とした指標を提案している。村上ら²⁾は高層建物周辺を対象とした風観測と周辺住民を対象としたアンケート調査を行い、両者の関係を調査している。また、Davenport⁷⁾や、Jackson⁸⁾、Gandemer⁹⁾は独自に修正を加えたビューフォートスケールを基準としており、Hunt¹⁰⁾は風洞実験により風速と人に対する影響の関係を調査している。これらの知見は極めて重要なものではあるが、これらが検討されたのは今から 30～40 年前である。また、前述の通り我が国では近年 100m を超える超高層建物が林立するなど、都市の状況が大きく変化している。そして、我が国の都市部では中低層建物と超高層建物が高密度に混在してい

ることが多く、風速と人々の風に対する体感、生じる障害について、実在都市を対象に調査することが必要であると考えられる。なお、近年このような調査が行われた例は、筆者が知る限りでは白澤ら¹¹⁾によるもののみであるが、白澤らの調査の目的は現在の指標との関係を議論するものではない。以上の背景から、本研究では上大崎を対象として風に関するアンケート調査を行った。

4. 2 アンケート調査の概要

アンケートの協力者（以下、回答者）は、「夕陽ヶ丘街づくり協議会」および上大崎の町会である「夕陽会」の関係者の協力を得て、町会に向けて募集を行った。その後、口コミで徐々に回答者が増加し、2017年10月時点における回答者は38名である。回答者の男女比は6対4、年齢は10～40歳が65%、41歳以上が35%である。アンケートの回答方法は、回答者専用のwebページにアクセスし回答してもらう方法（web回答）と、LINE（株）のSNSアプリであるLINEで“ともだち登録”し回答してもらう方法（LINE回答）の2通りである。回答者には、まず図2に示す回答エリア（A1～D2）を一つ選んでもらい、1日1回、決まった質問（表6）に可能な限り毎日回答してもらう。質問の内容は村上らのアンケート調査²⁾を参考にして設定した。また、風の印象の評価時間について、村上らは人間の生活が1日をサイクルとしており、風の強弱の知覚も1日を単位としていることを挙げている¹²⁾。本研究においては、適切な評価時間が不明であつ

たことと、印象を感じた時刻を細かく尋ねることは回答者の負担になることを考慮し、まずは村上らと同様に1日の印象を尋ねることとした。質問1では選択エリアにおけるその日の風の強さの印象を、質問2ではその日の風の寒暖の印象を、そして質問3では強風によって体験・目撃した事象とその時刻等を回答してもらう。なお、質問1、2は必須回答、質問3は任意回答である。以上のような方法により、2016年5月～2017年8月において3664回答を得た。

4. 3 アンケート調査の結果

図13に、アンケートの質問1～3の回答数を示す。質問1において最も回答数が多いのは回答②で2208、次いで回答③、回答①が多くそれぞれ670、536、回答④、⑤がそれぞれ181および63、⑥は6である。質問2においては、回答Dが最も回答数が多く1523、回答Cと回答Eは同程度の回答数でそれぞれ697、642、回答Bが580、回答AとFはそれぞれ144、78である。質問3の総回答数は質問1、2に比べると少なく、最も多い回答数である体験・目撃①は166、体験・目撃②と③がそれぞれ41、37、体験・目撃④、⑤は16、体験・目撃⑥は7である。

表6 アンケートの質問内容

Table 6 Questionnaire items

質問1：あなたの回答エリアにおける今日1日の風に対する印象をお尋ねします。
回答①：ほぼ無風状態であった。
回答②：特に風を意識しなかった、または風の吹き方が適度であった。
回答③：不快とは感じなかったが、風はやや強いと感じた。
回答④：風が強く不快であった。
回答⑤：風のために危険を感じるほどではなかったが、強い風を感じた。
回答⑥：風のために危険を感じた。
質問2：あなたの回答エリアにおける今日1日の風の印象と気温の関係についてお尋ねします。
回答A：無風状態で非常に暑かった。
回答B：涼むために、もう少し風が吹けばよいと思った。
回答C：風が心地よいと感じた。
回答D：寒暖を感じなかった。
回答E：風によって寒さが増した。
回答F：肌が痛いほど風を冷たく感じた。
質問3：以下のようなことを体験・目撃された方にお尋ねします。 体験・目撃した時間と場所をお尋ねします。
体験・目撃①：髪や衣服が乱れた。
体験・目撃②：歩きにくかった、吹き飛ばされそうになった、転倒した。
体験・目撃③：傘がさしにくかった、傘が壊れた。
体験・目撃④：駐輪した自転車、バイクが転倒した。
体験・目撃⑤：ゴミの舞い上がり、吹き溜まりがあった。
体験・目撃⑥：風が強く外に出られる状態ではなかった。

図13 質問に対する回答数

Fig. 13 Number of answers to the questionnaire item

5. 観測結果・実験結果とアンケート調査結果の関係

5. 1 検討に用いる風速について

本章では、観測結果、実験結果とアンケート調査結果の関係について検討する。検討に用いる風速は、新たに提案する指標の基準として適切と思われるものを選択する。世界各国で提案された風環境評価指標に用いられている風速には、平均風速、瞬間風速のほか、式(1)の有効風速がある。平均風速は風工評価指標のほか Penwarden¹³⁾、Cohen ら¹⁴⁾ が、瞬間風速は村上らのほか Melbourne¹⁵⁾ が、有効風速は Hunt ら¹⁰⁾、Davenport ら⁷⁾、Jackson⁸⁾、Gandemer⁹⁾ が用いている。このうち、風の乱れの影響が考慮されている風速は瞬間風速と有効風速であるが、本研究では、新たな指標に用いる風速として有効風速を採用する。その一つ目の理由として、現在の風工評価指標が平均風速で定められていることから、現在の指標との連続性を保つためには瞬間風速より有効風速を用いる方が適切であることが挙げられる。二つ目の理由として、重み係数 k を変化させることにより、対象とする風環境の問題（弱風問題、弱～強風問題、強風問題）に応じた評価が可能であることが挙げられる。ここで弱風問題とは、弱風時における暑熱の不快感を対象とした問題を、強風問題とは、歩行障害や転倒など強風による物理的な障害を対象とした問題、そして弱～強風問題はそれらの中間であり、風の強さに関する快適性を対象とする問題であると本研究では定義する。筆者らの考える、対象とする風環境と重み係数 k の関係、現指標との関係を示した概念図を図 14 に示す。村上評価指標では日最大瞬間風速ま

$$U_e = U + k\sigma = U(1 + kI_u) \quad (1)$$

ここに、

U_e : 有効風速 (m/s)

U : 平均風速 (m/s)

k : 乱れ成分の重み係数

σ : 変動風速の標準偏差 (m/s)

I_u : 乱れの強さ

弱風問題	弱～強風問題	強風問題
風工評価指標		
村上評価指標		
村上評価指標 (弱風)		
$k=0$	$k=\text{一定値} (\geq 0)$	$k=PF$

図 14 対象とする風環境と現指標、重み係数 k の関係の概念図

Fig. 14 Conceptual diagram about the relation between wind environments, present criterion and k

たは日最大風速の超過頻度を用いており、強風を対象とした指標であるのに対し、風工評価指標は累積頻度 55%、95%の平均風速に基づいて定められており、村上評価指標に比べると比較的弱い風も対象にしていると考えられる。また、村上らは強風問題に対しては瞬間風速を用いることが適切であるとしているが、弱風問題については平均風速を用いる方が適切であるとしており、日平均風速に基づいた評価指標も合わせて提案している¹²⁾。結果として、村上評価指標においては、日最大瞬間風速、日最大風速、日平均風速の 3 つの風速が混在しているが、有効風速を用いれば、 k を 0、0 以上のある値、ピークファクター（以下、PF）と変化させることにより、一つの統計量で複数の風環境問題に対応することが可能である。

5. 2 風速・乱れの強さと風の強さの印象の関係

観測結果と実験結果、およびアンケート調査における質問 1 の結果を用いて、平均風速・乱れの強さと風の強さの印象の関係について、以下のように検討した。

まず、観測点、測定点、アンケート回答エリアを表 7 のように対応させる。各エリアの風速・乱れの強さに関して、観測点が近傍にあるエリアについては観測結果を、近傍に観測点がないエリアについては実験結果を用いる（図 2 参照）。実験結果については各エリアの風況を代表すると思われる測定点を選択しているが、エリア C1 については、実験結果からエリア東側、中心、西側において、風速比に当初想定したより大きな差があることが分かった。強風時におけるエリア C1 での回答に対しエリア西側と中心では風速が低すぎたため、最も風速の高いエリア東側を選択した。なお、エリア A3、A4 は十分なアンケート回答数が得られなかったため対象外とした。

次に、ある風速、ある乱れの強さのときに、どの印象の割合が多かったかを示す指標として、式(2)で定義される各回答の相対頻度を求めた。観測結果から得られる風速と乱れの強さについては超音波型の値を用い、三杯型のみが設置されている観測点については三杯補正を行った。実験結果による風速と乱れの強さは、観測点 MGZ を基準とした風速比、乱れの強さから求めた。その際、乱れの強さは図 12(c)の結果から、1.3 ($\approx 1/0.77$) 倍の値に補正した。評価時間については、アンケートにおいて 1 日の風の印象を尋ねていることから、1 日とする。

図 15 は、縦軸に 1m/s 間隔で整理した日平均風速、横軸に 0.1 間隔で整理した日平均乱れの強さをとった各回答の相対頻度のコンター図であり、青色ほど回答の頻度が低く、黄色いほど頻度が高い。白色部は回答が 1 つもなかった範囲を示す。また、回答が 1 個しかない場合は

信頼できないデータとし、除外している。図15を見ると、日平均風速が高いほど、また、乱れの強さが大きいほど、風を強く感じたという回答が増加する傾向にあることがわかる。例えば日平均風速3m/sの場合、日平均乱れの強さ0.2では回答③と回答②の相対頻度は同程度であるが、日平均乱れの強さ0.5では回答③の相対頻度の方が高い。また、日平均乱れの強さ0.3の場合、日平均風速1m/sでは回答③よりも回答②の相対頻度が高く、日平均風速4m/sでは回答③の方が高い。以上より、風の強さの印象は平均風速のみではなく、乱れの強さにも影響されることが分かる。しかし、回答③のコンター図のばらつきは大きい。また、回答の相対頻度が高い範囲（赤～黄色）について、回答②～⑤は互いに重なる部分が広く存在する。この原因については、以下のように考えられる。すなわち、本研究が対象としている回答者は居住者の他、通勤者、通学者も含む歩行者であり、これらの回答者が丸1日の風の印象を把握することは現実的には不可能であると考えられる。そのため、アンケートでは1日の風の印象を尋ねているものの、回答者は1日のある限定された時間帯において感じた風の印象を回答していると考えられる。この場合、印象を感じた時刻を把握する必要がある。本研究では、印象を感じた時刻はアンケートの回答時刻と同一であると仮定する。しかしこの場合、両者の時間ずれが懸念される。そこで、2017年8月から印象を感じた時刻に関するアンケート調査を別途行った。2017年8月中旬～9月中旬の1カ月間の調査結果から、両者の時間ずれは概ね1時間以内であると判断した。また、両者の時間ずれが1時間以上であったとしても、ある程度決まった時間帯の印象を回答している回答者も存在した。これらについても1時間の幅を考慮すればよいと判断した。以上より、回答時刻を1時間単位で整理し、評価時間を「1時間」としたケースについて検討する。なお、時間ずれが一定でないなど不明確な回答者の回答は除外した。図16は1時間平均風速、1時間平均乱れの強さと各回答の相対頻度の関係を示したものである。日平均の場合よりもコンターのばらつきが小さく、回答の相対頻度との関係がより明確に表れていることが確認できる。また、図16内の曲線は式(1)を変形した式(3)で表されるもので、 $k=1, 1.5, 3$ 、 $U_e=6, 8.5, 11$ m/sと変化させたものを示している。 k の値は研究者によって様々であり、Jackson⁸⁾、Huntら¹⁰⁾は $k=3$ を、Davenportら⁷⁾は $k=1.5$ を、Gandemer⁹⁾は対象に応じて $k=1, 1.5, 3$ を採用している。村上らはこの k の違いについて、人体に影響を及ぼすと思われる風の乱れの周波数の上限の違いによると説明し

ている¹⁰⁾。図16より、コンター図と最も相関が高いと思われるのは $k=3$ の曲線である。なお、 $k=3$ は地表面付近のPFの平均値に概ね相当し¹⁷⁾、この場合の有効風速は2～3秒よりもいくらか長い平均化時間に対する最大瞬間風速と考えられる。以上より、風の強さの印象と相関が高いのは $k=3$ とした1時間有効風速であることが確認できた。

図17は横軸に $k=3$ とした1時間有効風速を1.5m/s間隔でとり、縦軸に回答①+②、回答③、回答④+⑤および回答⑥の相対頻度をとったグラフである。図17より、各回答の中で回答①+②の相対頻度が最も高くなるのは1時間有効風速が約6.5m/s以下のとき、回答③の相対頻度が最も高くなるのは約6.5m/s～約9m/sのとき、回答④+⑤の相対頻度が最も高くなるのが約9m/s以上のときであることが分かる。以上の結果から、1時間有効風速と風の強さの印象Ⅰ～Ⅳの関係をまとめた結果を表8に示す。同表において、回答①+②を印象Ⅰ、回答③を印象Ⅱ、回答④+⑤を印象Ⅲに対応させている。なお、印象ⅢとⅣの境界値は図17から定めることができないため、以下のようにして定めた。すなわち、印象ⅠとⅡの有効風速の上限値は、Huntら¹⁰⁾が”For comfort and little effect on performance”となる有効風速を6m/s未満とし、”Most performance unaffected”となる有効風速を9m/s未満としたことと概ね対応している。また、Huntらは”Control of working”の上限値を15m/sとしている。そこで、本研究ではこれを印象ⅢとⅣの境界値として採用した。ただし、表8に示す関係は、今後より多くのアンケート調査結果と観測結果に基づいて見直す必要がある。

表7 回答エリアと観測点と測定点の対応

Table 7 Correspondence of the questionnaire area to the observation points or measurement points

エリア	A1	A2	B1	B2a	B2b	B3	C1	D1	D2
観測点	MG1	MG3	-	-	-	MG5	-	MG4	MG6
測定点	-	-	A	B	C	-	D	-	-

$$f_i(U, I_u) = \frac{N_i(U, I_u)}{\sum_{i=1}^6 N_i(U, I_u)} \quad (2)$$

ここに、

$f_i(U, I_u)$: 平均風速 U 、乱れの強さ I_u のときの
回答 i の相対頻度
 $N_i(U, I_u)$: 平均風速 U 、乱れの強さ I_u のときの
回答 i の回答数

$$U = \frac{U_e}{(1 + kI_u)} \quad (3)$$

図 15 質問 1 の各回答の相対頻度と日平均風速と日平均乱れの強さの関係

Fig. 15 Dependence of relative frequency of each answer in Question 1 on daily mean wind speed and turbulence intensity

図 16 質問 1 の各回答の相対頻度と 1 時間平均風速と 1 時間平均乱れの強さの関係

(曲線は式(3)で定義 実線: $k=3$, 点線: $k=1.5$, 破線: $k=1$, 藍色: $U_e=6\text{m/s}$, 水色: $U_e=8.5\text{m/s}$, 赤色: $U_e=11\text{m/s}$)

Fig. 16 Dependence of relative frequency of each answer in Question 1 on 1-hour mean wind speed and turbulence intensity

図 17 1 時間有効風速 ($k=3$) と質問 1 の各回答の相対頻度の関係

Fig. 17 Relation between 1-hour effective wind speed with $k=3$ and relative frequency of each answer to Question 1

表 8 1 時間有効風速と風の強さの印象の関係

Table 8 Relation between 1-hour effective wind speed and the

sensation of wind strength

$U_{e,1h} \leq 6.5\text{m/s}$	(強さの印象Ⅰ) 風を特に意識しない
$6.5\text{m/s} < U_{e,1h} \leq 9\text{m/s}$	(強さの印象Ⅱ) 風はやや強いと感じる
$9\text{m/s} < U_{e,1h} \leq 15\text{m/s}$	(強さの印象Ⅲ) 風が強く不快である
$U_{e,1h} > 15\text{m/s}$	(強さの印象Ⅳ) 風を危険に感じる

5. 3 風速・気温と風の寒暖の印象の関係

アンケート調査の質問 2 で尋ねた、風の寒暖の印象と風速および気温の関係について検討した結果を示す。ここでは図 14 で示した「弱風問題」についての議論をするため、風速の統計量には $k=0$ とした有効風速、すなわち平均風速を用いる。図 18 は、縦軸に 1m/s 間隔の 1 時間平均風速、横軸に 3.5°C 間隔の 1 時間平均気温をとった各回答の相対頻度のコンター図である。ここで、回答の相対頻度は式(2)の乱れの強さを気温に置き換えたもので定義し、気温には観測点 MG6 での観測データを用いた。図 18(a)を見ると、1 時間平均気温が 30°C 以上、1 時間平均風速が 1m/s 以下である範囲において“無風状態で非常に暑かった”と回答する頻度が高い。図 18(b)においては、1 時間平均気温が 20°C 以上である範囲に着目すると、1 時間平均風速が 3m/s 以下であるとき“もう少し風が吹けばよかった”と回答する頻度が高いことが確認でき、特に 1m/s 以下のときに頻度が高い。次に図 18(c)を見ると、1 時間平均気温が 20°C 以上、1 時間平均風速が $1\sim 5\text{m/s}$ である場合に“風が心地よかった”と回答する頻度が高い。また、図 18(d)を見ると、高い相対頻度は広範囲にみられるが、1 時間平均気温が $10^\circ\text{C}\sim 20^\circ\text{C}$ である場合に、1 時間平均風速によらず“寒暖を感じない”の回答頻度が

図 18 質問 2 の各回答の相対頻度と 1 時間平均風速と 1 時間平均気温の関係

Fig. 18 Dependence of relative frequency of each answer in Question 2 on 1-hour mean wind speed and temperature

高いことが確認できる。そして図 18(e)より、1 時間平均気温が 10℃を下回ると“風によって寒さが増した”と回答する頻度が高く、特に、1 時間平均風速が 3m/s を超えるとその頻度がさらに高くなる傾向にあることが分かる。

図 19 に気温 25℃以上の場合における平均風速 (1m/s 間隔) と回答 A+B, 回答 C, 回答 D の相対頻度の関係を示す。また、図 20 に気温 10℃未満の場合における平均風速 (1m/s 間隔) と回答 D, 回答 E+F の相対頻度の関係を示す。なお、気温の境界値 (10℃, 25℃) は図 18 から得られた関係と、村上ら¹²⁾が用いた値を参考にして定めた。図 19 より、回答 A+B の相対頻度が回答 C, D よりも高いのは気温 25℃以上の場合における平均風速が約 1m/s 以下のときである。また、図 20 より、回答 E+F の相対頻度が回答 D よりも高いのは気温 10℃未満の場合において平均風速が約 0.5m/s を超えるときである。以上より、回答 A+B を風の寒暖の印象 a, 回答 E+F を風の寒暖の印象 b に対応させて、1 時間平均風速および 1 時間平均気温の関係についてまとめた結果を表 9 に示す。なお、表 9 の関係は温熱環境問題にも関連し、他に湿度や日射量等の

影響も考慮することが考えられるが、本論文では風環境問題を対象としているため、考慮しない。

表 9 1 時間平均風速・気温と風の寒暖の印象の関係
Table 9 Dependence of the sensation of temperature of wind on 1-hour mean wind speed and temperature

$U_{1h} \leq 1\text{m/s}$ (気温 25℃以上)	(寒暖の印象 a) 風が弱く、暑いと感じる
$U_{1h} > 0.5\text{m/s}$ (気温 10℃未満)	(寒暖の印象 b) 風で寒さが増す

5. 4 風速と体験・目撃事象との関係

アンケート調査の質問 3 では、回答者が体験・目撃した、風によって引き起こされた物理的な事象について尋ねている。こうした物理的な障害等については、最大瞬間風速との関係を検討するのが適切であると考えられるため、図 14 に示した通り、 k を PF とした 1 時間有効風速との関係を検討する。PF の与え方に関しては、筆者らが提案した PF と乱れの強さの関係式¹⁷⁾を用いる。ただしここでは、平均風速の平均化時間 3600 秒、観測高さ 3m の場合の PF と乱れの強さの関係式を、乱れの強さが 0, 0.5 のときの PF の値を用いて線形近似し、より簡便な形にした式(4)を用いる。体験・目撃事象の相対頻度については、分子に有効風速別の体験・目撃の回答数を、分母に体験・目撃の回答が無かったものも含んだ有効風速別のアンケート回答数をとった式(5)で定義する。なお、村上ら²⁾も説明しているが、この相対頻度は事象の発生確率だけでなく、その事象を回答者が体験・目撃し報告する確率にも影響される。村上らは観測期間中で最大となった 1 時間最大瞬間風速における事象の相対頻度を 100%にかさ上げするという補正を行っているが、本研究ではそのような補正は行わず、この相対頻度を“事象が報告さ

図 19 気温 25℃以上の場合における平均風速と回答 A~D の相対頻度の関係

Fig. 19 Relation between mean wind speed (temperature is higher than or equal to 25℃) and relative frequency for Answers A - D

図 20 気温 10℃未満の場合における平均風速と回答 D~F の相対頻度の関係

Fig. 20 Relation between mean wind speed (temperature is lower than 10℃) and relative frequency for Answers D - F

$$g = 2.76\bar{I}_u + 2.77 \quad (4)$$

$$f_{e,i}(U_{e,PF}) = \frac{N_i(U_{e,PF})}{N(U_{e,PF})} \quad (5)$$

ここに、

g : PF (平均化時間 3600 秒, 観測高さ 3m)

$\bar{I}_u$: 1 時間平均乱れの強さ

$U_{e,PF}$: $k=PF$ とした 1 時間有効風速

$f_{e,i}(U_{e,PF})$: $U_{e,PF}$ のときの体験・目撃 i の相対頻度

$N_i(U_{e,PF})$: $U_{e,PF}$ のときの体験・目撃 i の回答数

$N(U_{e,PF})$: $U_{e,PF}$ のときのアンケートの回答数

(a) 体験・目撃①

(b) 体験・目撃②

(c) 体験・目撃③

(d) 体験・目撃④

(e) 体験・目撃⑤

図 21 有効風速 (k=PF) と報告された体験・目撃事象の相対頻度の関係

Fig. 21 Relation between effective wind speed with k=PF and relative frequency of report on experience and witnessing

される頻度”として扱うこととする。データ個数の少ない体験・目撃⑥を除いた 5 事象について、 $k=PF$ とした 1 時間有効風速と事象が報告される相対頻度の関係をまとめた結果を図 21 に示す。どの体験・目撃事象についても、1 時間有効風速が高くなると、報告される相対頻度も増加する傾向が見られる。また、同図には 1 時間有効風速と相対頻度の関係を 2 次関数で近似した曲線も示しており、この曲線とプロットはよく対応していることが確認できる。この関係は、中村ら¹⁸⁾が歩行者の転倒の報告や転倒対策の有無を、最大瞬間風速の 2 乗の年間平均値で評価していることにも対応している。

6. 風の乱れの影響を考慮した風環境評価指標の提案

本節では、5 節で得られた結果を用いて風工評価指標と風の強さの印象の関係、累積頻度 55%、95%の風速と風の寒暖の印象の関係について検討し、それらの結果から風の乱れの影響を考慮した風環境評価指標の提案を行う。

6. 1 風工評価指標と風の強さの印象の関係

表 8 に示した関係を用いて、風工評価指標と風の強さの印象 I ～IV の関係について検討する。対象とする観測点は表 10 に示す東京都心およびその近郊に位置する 33 地点で、風工評価指標による総合評価 (領域 A ～D) がバランスよく含まれるよう、観測点を選択した。なお、同

表 10 対象観測点の風環境評価結果

Table 10 Results of wind environment assessment based on the Wind Engineering Institute Co., Ltd's criterion

観測点 No.	観測期間	累積頻度55%、95%の 10分間平均風速(m/s)と 風工評価指標の評価結果				総合評価
		55%		95%		
		風速	評価	風速	評価	
1	2010/4～2011/3	2.9	D	5.7	D	D
2	2015/6～2016/5	1.3	B	3.0	B	B
3		1.8	B	4.8	C	C
4		2.4	D	5.1	C	D
5	2016/2～2017/1	1.6	B	3.1	B	B
6		1.2	A	2.5	A	A
7		2.2	C	4.3	B	C
8	2014/5～2015/4	1.2	A	2.4	A	A
9		1.3	B	4.5	C	C
10		1.4	B	2.7	A	B
11		1.4	B	2.7	A	B
12		1.4	B	4.9	C	C
13		1.6	B	4.2	B	B
14		1.2	A	2.5	A	A
15		1.4	B	3.9	B	B
16		1.3	B	2.9	A	B
17		1.4	B	3.7	B	B
18	2016/9～2017/8	2.0	C	5.1	C	C
19		2.2	C	5.5	C	C
20		2.5	D	6.0	D	D
21	2016/1～2016/12	2.3	C	4.9	C	C
22	2014/3～2015/2	1.3	B	2.4	A	B
23	2014/1～2014/12	1.1	A	2.6	A	A
24		1.6	B	5.0	C	C
25	2016/8～2017/7	2.7	D	6.8	D	D
26		1.6	B	4.6	C	C
27		1.1	A	2.8	A	A
28		1.5	B	3.1	B	B
29		1.6	B	3.8	B	B
30	2015/4～2016/3	0.9	A	2.6	A	A
31		0.8	A	2.1	A	A
32		0.7	A	2.1	A	A
33		0.6	A	1.9	A	A

図 22 累積頻度 55%の平均風速と風の強さの印象に対応する有効風速の累積頻度の関係

Fig. 22 Relation between mean wind speed at a cumulative frequency of 55 % and cumulative frequency of effective wind speed corresponding to each sensation of wind strength

図 23 累積頻度 95%の平均風速と風の強さの印象に対応する有効風速の累積頻度の関係

Fig. 23 Relation between mean wind speed at a cumulative frequency of 95 % and cumulative frequency of effective wind speed corresponding to each sensation of wind strength

表に示す総合評価は実務的に行われる風環境調査と同様に、累積頻度 55%, 95%に基づく評価結果のうち厳しい方を採用したものである。また、観測高さについては 3 ~ 5m が混在しているが、本研究では荷重指針の考え方に則り、地表面粗度区分 I を除けば 5m 以下では平均風速、乱れの強さに差はないものとして、高さの補正は行わない。累積頻度 55%, 95%の 10 分間平均風速については三杯型の値、または超音波型の値を三杯型に変換したものを用いて求め、1 時間有効風速については超音波型の値、または三杯型の値を三杯補正したものを用いて求めた。

図 22 は、横軸に累積頻度 55%の 10 分間平均風速を、縦軸に表 8 に示す風の強さの印象に対応する有効風速の累積頻度をとったものである。同様に、図 23 は横軸が累積頻度 95%のものである。両図において、(a)は印象 I に対応する累積頻度を、(b)は印象 I と印象 II の和に対応する累積頻度を、(c)は印象 I ~ III の和に対応する累積頻度を表している。また、図中の破線は風工評価指標の領域 A ~ D の境界値を表し、曲線はプロットをワイブル分布で

近似した結果を示している。いずれの図においても、累積頻度 55%, 95%の平均風速が高くなると、風を強く感じる頻度が増加する傾向が見られる。また、累積頻度 55%に比べて、累積頻度 95%の結果の方がばらつきは小さい。この理由としてはまず、高風速になるほど乱れの強さのばらつきが小さくなることが考えられる。その他の理由として、本研究のアンケート調査の回答者が比較的短い滞在時間（本研究では 10 分以内と仮定）における風の印象を回答していることが考えられる。滞在時間が短いと風を比較的弱く感じる事が考えられるため、累積頻度 55%の平均風速との相関を検討するためには、比較的長い滞在時間（本研究では 10 分以上と仮定）における風の印象を対象とする必要があると考えられる。求めた近似曲線のうち、プロットとの対応がよい累積頻度 95%の平均風速を用いた式(6)~(8)を、風工評価指標と風の強さの印象の累積頻度の関係を示す式として提案する。

以上より、現在の風工評価指標は、平均的には風の強さの印象と比較的高い相関があることが示された。

$$F_1 = \exp\left(-\left(\frac{U_{95}}{10.2}\right)^{2.94}\right) \quad (6)$$

$$F_{1+2} = \exp\left(-\left(\frac{U_{95}}{12.8}\right)^{3.52}\right) \quad (7)$$

$$F_{1+2+3} = \exp\left(-\left(\frac{U_{95}}{38.7}\right)^{3.26}\right) \quad (8)$$

ここに,

F_1, F_{1+2}, F_{1+2+3} : 印象Ⅰ, 印象ⅠとⅡの和, 印象Ⅰ～Ⅲの和に対応する有効風速の累積頻度

U_{95} : 累積頻度 95%の 10 分間平均風速 (m/s) (三杯型の値)

6. 2 累積頻度 55・95%の風速と風の寒暖の印象の関係

表 9 の結果を用いて, 表 10 に示した観測点を対象に, 累積頻度 55%, 95%の平均風速と風の寒暖の印象の関係について検討する。気温は観測点近傍の気象台やアメダス (AMeDAS) の観測データを用い, 平均風速は超音波型の値, または三杯型の値を三杯補正して用いた。横軸

に 10 分間気温が 25℃以上または 10℃未満の場合における累積頻度 55%, 95%の 10 分間平均風速をとり, 縦軸に寒暖の印象 a, b に対応する平均風速の相対頻度をとったグラフを図 24 に示す。印象 a, b ともに, 累積頻度 55%の平均風速の方が累積頻度 95%の場合に比べてプロットのばらつきが小さく, 相関が高い。また, 印象 a の方が印象 b よりもばらつきが小さい。図 24(a)の印象 a について, ワイブル分布に係数 α を乗じた式(9)で近似を行った結果を同図に曲線として示すとともに, 求めた近似式を式(10)に示す。なお, 式(10)の係数 $\alpha=0.174$ は, 累積頻度 55%の平均風速が 0m/s のときの印象 a の相対頻度と, 1 時間平均気温 25℃以上となる割合の 33 観測点の平均値 (=0.174) が一致すると仮定して求めた。式(10)を, 印象 a “風が弱く, 暑いと感じる” の相対頻度と気温 25℃以上における累積頻度 55%の平均風速の関係として提案する。

$$F = \alpha \exp\left[-\left(\frac{x}{C}\right)^K\right] \quad (9)$$

$$F_a = 0.174 \exp\left[-\left(\frac{U_{55,T25}}{1.28}\right)^{1.59}\right] \quad (10)$$

ここに,

C, K : ワイブルパラメータ

α : 係数

F_a : 寒暖の印象 a に対応する平均風速の相対頻度

$U_{55,T25}$: 10 分間気温 25℃以上における累積頻度 55%の 10 分間平均風速 (m/s) (超音波型の値)

(a) 印象 a (55%)

(b) 印象 b (55%)

(c) 印象 a (95%)

(d) 印象 b (95%)

図 24 累積頻度 55%, 95%の平均風速 (気温 25℃以上または 10℃未満の場合) と風の寒暖の印象に対応する平均風速の相対頻度の関係

Fig. 24 Relation between mean wind speed at a cumulative frequency of 55% or 95% and relative frequency of mean wind speed corresponding to each bodily sensation to wind and temperature (temperature $\geq 25^\circ\text{C}$ or $< 10^\circ\text{C}$)

6. 3 評価時間 1 時間から 10 分間への変換

ここまでは, 評価時間を 1 時間とした有効風速を用いて検討を進めてきたが, 風工評価指標では 10 分間平均風速を基準としていることを考慮し, 1 時間有効風速を 10 分間有効風速に変換する。まず, $k=3$ としたケースについて述べる。安井ら¹⁹⁾は, 台風時の建物屋上での観測データを用いて, 3 時間平均風速と 10 分間平均風速の差が正規分布でモデル化できることを示している。また, 山口ら²⁰⁾は M 分間平均風速と 10 分間平均風速の差が平均値 0 の対数正規分布に従うことを示し, その標準偏差を風速の一次関数で表現した補正式を提案している。これらを参考にして, 1m/s 刻みの 1 時間有効風速階級別に, 1 時間有効風速と 10 分間有効風速の差の累積頻度分布を表 8 に示す 33 観測点について計算した。その結果, 全ての観測点において 1 時間と 10 分間の有効風速の差が平均値 0

の正規分布に従うことを確認した。その一例を図 25 に示す。なお、標準偏差は概ね 0.5～1.5m/s の範囲であった。以上より、 $k=3$ とした 1 時間有効風速と 10 分間有効風速の累積頻度分布をほぼ等価に扱うことが可能である。また、気温についても気象台やアメダスのデータを用いて同様に検討し、1 時間平均と 10 分間平均の差が平均値 0、標準偏差 0.5℃程度の正規分布に従うことを確認した。

次に、 $k=PF$ としたケースについて述べる。式(4)と同様の求め方で、平均化時間 600 秒、観測高さ 3m の場合の PF と乱れの強さの関係式を求めると式(11)のようになる。この式(11)を用いて、 $k=PF$ とした 10 分間有効風速を求めることができる。 $k=3$ のケースにおける検討結果から、平均風速、乱れの強さについては 10 分間と 1 時間で平均的には差がないと考えられるので、 $k=PF$ とした 10 分間有効風速と 1 時間有効風速の差は、ガストファクター（以下、GF）の差で表される。乱れの強さを 0～1 の範囲、0.1 の間隔で式(4)および(11)より求めた $GF=1+k \cdot I_u$ を比較すると、図 26 のようになる。この近似直線より、1 時間有効風速を 10 分間有効風速に変換する式(12)が得られる。

図 25 1 時間有効風速と 10 分間有効風速の差の累積頻度分布の一例（1 時間有効風速が 6～7m/s の場合）

Fig. 25 Example of cumulative frequency for difference between 1-hour and 10-minute effective wind speeds (1-hour effective wind speed is 6-7m/s)

図 26 評価時間 1 時間と 10 分間の $1+k \cdot I_u$ の比較

Fig. 26 Comparison for $1+k \cdot I_u$ between 1-hour and 10-minute values

$$g_{10} = 2.28 \overline{I_{u,10}} + 2.54 \quad (11)$$

$$U_{e,PF,10} = 0.91 U_{e,PF} \quad (12)$$

ここに、

g_{10} : ピークファクター (PF)
(平均化時間 600 秒、観測高さ 3m)

$\overline{I_{u,10}}$: 10 分間平均乱れの強さ

$U_{e,PF,10}$: 10 分間有効風速 ($k=PF$)

6. 4 新しい風環境評価指標の提案

図 23, 24 から得られた関係を用いて、風の乱れの影響を考慮した風環境評価指標を提案する。まず、図 23 の関係から $k=3$ とした有効風速を用いた風の強さの不快感に関する評価指標、すなわち弱～強風問題を対象とした評価指標について検討する。現在の風工評価指標との連続性を考慮するため、提案する評価指標についても累積頻度 55%, 95% の 10 分間有効風速を基準とするものとする。しかし前述した通り、本研究のアンケート調査は比較的短い滞在時間における風の印象を対象としており、印象との相関が高いのは累積頻度 95% の場合である。そのため本研究では、提案する新指標の適用範囲を比較的短い滞在時間である場合に限定した上で、累積頻度 95% の有効風速のみに基づいて定める。現在の風工評価指標の領域 A～D の累積頻度 95% の平均風速の境界値を式(6)～(8)に代入し、印象 I、印象 I と II の和、印象 I～III の和に対応する有効風速の累積頻度を求めると、表 11 のようになる。この値を Hunt ら¹⁰⁾の結果と比較する。Hunt らは、人々が買い物など散策するような場所 (Situation A) においては $U_{e,1h} < 9m/s$ となる確率が 90% 以上、継続する強風を気にとめない場所 (Situation B) においては $U_{e,1h} < 13m/s$ となる確率が 99% 以上である場合を、それぞれの場所における許容範囲として提案している。Situation A を領域 A～B、Situation B を領域 C と捉えると、風工評価指標は Hunt らの基準に比べていくらか厳しい評価となっている。次に、各領域の境界値に対応する累積頻度 95% の 10 分間有効風速を求める。表 10 に示す 33 観測点について、10 分間有効風速がワイブル分布に概ね従うことを確認した（一例を図 27 に示す）。表 11 に示す各印象に対応する有効風速の累積頻度にワイブル分布を仮定し、最小二乗近似を用いて各領域の境界に対応するワイブル係数を求めた。その結果を表 11 に示す。このワイブル係数で定まるワイブル分布から、各領域の境界値に対応する累積頻度 95% の 10 分間有効風速を求めると、表 12 のようになる。

この表 12 に示す関係を、弱～強風問題を対象とした評価指標として提案する。

次に図 24 の関係から、 $k=0$ とした有効風速（＝平均風速）を用いた弱風時における暑熱の不快感に関する評価指標、すなわち弱風問題を対象とした評価指標を提案する。ISO²¹⁾が、温熱環境評価指標 PMV に関して予想不快者率 PPD を 10%以下にするよう推奨していることに倣い、寒暖の印象 a “風が弱く、暑いと感じる”の相対頻度を 10%以下にすることを考える。式(9)の α が気温 25℃以上となる割合と一致し、ワイブル係数 C 、 K が α によらず

表 11 風工評価指標の領域の境界値（累積頻度 95%）と各印象に対応する有効風速の累積頻度・ワイブル係数

領域	領域の境界値 (m/s)	各印象に対応する有効風速の累積頻度			ワイブル係数	
		I	I+II	I+II+III	C	K
A	2.9	0.976	0.995	1.000	1.71	0.98
B	4.3	0.924	0.979	0.999	2.99	1.22
C	5.6	0.842	0.947	0.998	4.28	1.47

図 27 10 分間有効風速の累積頻度分布の一例

Fig. 27 Example of cumulative frequency of 10-minute effective wind speed

表 12 風工評価指標の各領域に対応する累積頻度 95%の有効風速

Table 12 Effective wind speed at a cumulative frequency of 95% corresponding to boundary value of Wind Engineering Institute Co., Ltd's criterion

領域	累積頻度 95%の 10 分間有効風速 ($k=3$) (m/s)
A	≤ 5.2
B	≤ 7.4
C	≤ 9.1
D	> 9.1

一定であると仮定すると、式(10)より、印象 a の相対頻度が 10%となる累積頻度 55%の平均風速（気温 25℃以上の場合）は式(13)で与えることができる。この風速以下となる場合を「非適風」と定義し、弱風問題を対象とした評価指標として提案する。

以上のように検討した弱風問題および弱～強風問題を対象とした 2 つの評価指標を組み合わせ、風の乱れの影響を考慮した風環境評価指標として、表 13 を提案する。本論文では強風問題を対象とした指標については対象としないが、前述の通り、体験・目撃の相対頻度は $k=PF$ とした有効風速の 2 乗で表現でき、中村らの示した関係と対応する。よって、強風問題を対象とした評価指標については、中村らの指標に $k=PF$ （式(11)）とした有効風速を適用して用いるのが適当であると考えられる。

$$V = 1.28 \left\{ -\ln \left(\frac{0.1}{P_{T25}} \right) \right\}^{0.63} \quad (13)$$

ここに、

V : 印象 a の頻度が 10%となる累積頻度 55%の平均風速（気温 25℃以上の場合）(m/s)

P_{T25} : 気温 25℃以上となる割合（ ≥ 0.1 ）

表 13 風の乱れの影響を考慮した風環境評価指標

Table 13 Wind environment assessment criterion considering the influence of turbulence

弱風問題		弱～強風問題	
累積頻度 55%の風速(m/s) (気温 25℃以上の場合)		累積頻度 95%の風速(m/s)	
$k=0$		$k=3$	
非適風	$\leq V$ (式(13))	領域 A	≤ 5.2
		領域 B	≤ 7.4
		領域 C	≤ 9.1
		領域 D	> 9.1

風速：有効風速，評価時間：10 分間

6. 5 提案した指標と現指標の比較

提案した新指標を表 10 の観測点に適用した結果を、風工評価指標および村上評価指標に基づく結果とともに表 14 に示す。風工評価指標と新指標（弱～強風）を比較すると、評価結果に変化があった観測点は 9 地点で、 $B \Rightarrow A$ 、 $C \Rightarrow B$ 、 $D \Rightarrow C$ のように 1 ランク下がったのが 6 地点、逆に 1 ランク上がったのが 3 地点である。このように、風の乱れの影響、すなわち人の風の強さの印象を考慮することにより、より良好な評価結果になるケースもあれば、より厳しい評価結果になるケースもあることが確認でき

る。また、新指標（弱風）において非適風と評価された観測点はNo.17とNo.33の2地点である。No.33は風工評価指標と新指標（弱～強風）で領域A、村上評価指標でランク1であることから、1年を通して風の弱い地点であると考えられるが、No.17は風工評価指標と新指標（弱～強風）で領域B、村上評価指標でランク2であることから、夏季の暑い時期に風が弱い地点であると考えられる。

以上より、提案した指標を用いることで現在よりも適切に風環境を評価することができると考えられる。

次に、図28は各指標の境界値をさらに3分割して再定義したランク（表15）を用いて、表10の観測点を対象とした評価結果（総合評価）を比較したものである。図28より、新指標（弱～強風）は風工評価指標と村上評価指標の中間または中間よりも厳しめに評価する傾向にあることが確認できる。このことから、新指標（弱～強風）は風工評価指標と村上評価指標の両方の性質を持つ指標であると考えられる。

なお、提案した指標の妥当性や合理性については今後、データや対象事例の拡充を行い、検証する必要がある。また、本指標は東京都心およびその近郊を対象に検討したものであり、適用する地域には留意が必要である。

表14 風の乱れの影響を考慮した風環境評価結果

Table 14 Results of wind environment assessments considering the influence of turbulence

観測点 No.	風環境評価結果			
	風工評価指標		新指標	
	風工評価指標 (総合評価)	村上評価指標 (総合評価)	弱風	弱～強風
1	D	4	-	D
2	B	1	-	B
3	C	2	-	C
4	D	3	-	C
5	B	1	-	B
6	A	1	-	B
7	C	2	-	B
8	A	1	-	A
9	C	2	-	B
10	B	1	-	A
11	B	2	-	B
12	C	4	-	C
13	B	2	-	B
14	A	2	-	A
15	B	2	-	B
16	B	1	-	B
17	B	2	非適	B
18	C	3	-	C
19	C	4	-	D
20	D	4	-	D
21	C	2	-	C
22	B	1	-	A
23	A	1	-	A
24	C	3	-	C
25	D	4	-	D
26	C	2	-	B
27	A	1	-	A
28	B	1	-	A
29	B	2	-	B
30	A	1	-	B
31	A	1	-	A
32	A	1	-	A
33	A	1	非適	A

「-」は非適風と評価されなかったことを表す。

表15 細分化した風環境評価指標

Table 15 Detailed criteria for wind environment assessment

ランク	風工 評価指標(m/s)		村上評価指標(%)			新指標 (弱～強風) (m/s)
	55%	95%	10m/s	15m/s	20m/s	
1	≤0.40	≤0.97	≤3.33	≤0.30	≤0.03	≤1.73
2	≤0.80	≤1.93	≤6.66	≤0.60	≤0.06	≤3.46
3	≤1.20	≤2.90	≤10.0	≤0.90	≤0.08	≤5.20
4	≤1.40	≤3.37	≤14.0	≤1.80	≤0.25	≤5.93
5	≤1.60	≤3.84	≤18.0	≤2.70	≤0.42	≤6.66
6	≤1.80	≤4.30	≤22.0	≤3.60	≤0.60	≤7.40
7	≤1.97	≤4.73	≤26.3	≤4.73	≤0.90	≤7.97
8	≤2.13	≤5.16	≤30.6	≤5.86	≤1.20	≤8.54
9	≤2.30	≤5.60	≤35.0	≤7.00	≤1.50	≤9.10
10	>2.30	>5.60	>35.0	>7.00	>1.50	>9.10

図28 細分化したランクによる評価結果

Fig. 28 Results of wind environment assessment based on the detailed criteria

7. 結論

上大崎を対象とした風観測、風洞実験、風に関するアンケート調査を行い、現在の風工評価指標と風の印象の関係を求めるとともに、風の乱れの影響を考慮した新しい評価指標を提案した。提案した指標は、現在の指標に比べてより詳細に風環境を評価できる可能性をもつと考えているが、今後、データの拡充や事例の追加を行い、その妥当性や合理性についての検証や、比較的長い滞在時間に対する評価の追加、必要に応じた修正を行うことを考えている。

謝辞

本観測およびアンケート調査に際し、夕陽ヶ丘街づくり協議会ならびに（町会）夕陽会の関係者、パークタワー目黒管理組合および観測点設置場所の提供者、そしてアンケート回答者より多大なる協力を得た。ここに記し謝意を表す。

参考文献

- 1) 中村 修, 吉田 正昭, 横谷 恵二, 片桐 純治, 「市街地の風の性状—主に風速の累積頻度からの検討—」, 第9回風工学シンポジウム論文集, pp.73-78, (1986)
- 2) 村上 周三, 岩佐 義輝, 森川 泰成, 「居住者の日誌による風環境調査と評価尺度に関する研究—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-III—」 日本建築学会論文報告集, 第 325 号, pp.74-84 (1983)
- 3) 宮下 康一, 猿川 明, 中村 修, 佐々木 正憲, 「風環境評価指標と最大瞬間風速の発生頻度の関係 その1 風工学研究所による方法との関係」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.149-150, (2005)
- 4) 猿川 明, 宮下 康一, 中村 修, 佐々木 正憲, 「風環境評価指標と最大瞬間風速の発生頻度の関係 その2 村上らによる方法との関係」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.151-152, (2005)
- 5) 赤星 明紀, 猿川 明, 佐々木 亮治, 宮下 康一, 中村 修, 植松 康, 「風環境評価のための三杯型風速計と超音波型風速計による統計量の差の検討」, 日本風工学会論文集, 第 156 号, pp.91-99, (2018)
- 6) 日本建築学会, 「建築物荷重指針・同解説」, (2015)
- 7) N. Isyumov and A. G. Davenport, “The ground level wind environment in built-up areas”, Proc. 4th Int. Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures, London, pp.403-422, (1975)
- 8) P. S. Jackson, “The evaluation of windy environments”, Building and Environment, 13, pp.251-260, (1978)
- 9) J. Gandemer, “Aerodynamic studies of built-up areas made by C.S.T.B. at Nantes, France”, J. Industrial Aerodynamics, 3, pp.227-240, (1978)
- 10) J. C. R. Hunt, E. C. Poulton and J. C. Mumford, “The effects of wind on people; New criteria based on wind tunnel experiments”, Building and Environment, 11, pp.15-28, (1976)
- 11) 白澤 多一, 吉田 真紗子, 藤井 邦夫, 義江 龍一郎, 「武蔵小杉地区を対象とした住民参加型風環境調査 (その1) 風環境マップの作成」, 日本風工学会年次研究発表会梗概集, pp.97-98, (2017)
- 12) 村上 周三, 森川 泰成, 「気温の影響を考慮した風環境評価尺度に関する研究—日平均風速と日平均気温に基づく適風, 非適風風環境の設定—」, 日本建築学会計画系論文報告集, 第 358 号, pp.9-17, (1985)
- 13) A. D. Penwarden, “Acceptable wind speeds in town”, Building Science, 8, 3, pp.259-267, (1973)
- 14) H. Cohen, T. I. McLaren, S. M. Moss, R. Petyk, E. H. Zube, “Pedestrians and winds in the urban environment”, UMSS/IME/R-77/13, University of Massachusetts, (1977)
- 15) M. H. Melbourne, “Criteria for environmental wind conditions”, J. Industrial Aerodynamics, 3(2/3), 241-249, (1978)
- 16) 村上 周三, 片山 忠久, 小林 信行, 池田 耕一, 大場 正昭, 小峯 裕巳, 出口 清孝, 森川 泰成, 「世界各国の風環境評価基準の比較・検討 (その1)」, 日本風工学会誌, 第 43 号, pp.53-97, (1990)
- 17) 赤星 明紀, 猿川 明, 佐々木 亮治, 宮下 康一, 中村 修, 植松 康, 「様々な地点の風観測データを用いたピークファクターと乱れの強さの関係の検討」, 日本風工学会論文集, 第 153 号, pp.134-143, (2017)
- 18) 中村 修, 田村 幸雄, 日比 一喜, 徐 曉達, 楊 慶山, 宮下 康一, 「都市域 320 地点の歩行者レベルの風観測データに基づく風安全指標の提案」, 日本風工学会論文集, 第 148 号, pp.103-111, (2016)
- 19) 安井 八紀, 大熊 武司, 吉江 慶祐, 片桐 純治, 廣川 雅一, 「モンテカルロ法を用いた台風シミュレーションに関する研究」, 第 16 回風工学シンポジウム論文集, pp.65-70, (2000)
- 20) 山口 敦, メルヴィン ブランコ ソロモン, 石原 孟, 「極値風速予測のための風速の平均化時間に関する研究」, 風力エネルギー利用シンポジウム, Vol.33, pp.171-174, (2011)
- 21) International Standard Organization, “Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria”, ISO7730, (2005)