

パスキル安定度による中立な大気安定度の平均風速鉛直分布の抽出

Extraction of the Mean Wind Speed Profile of Neutral Atmospheric Stability based on the Pasquill Stability Classification

中 島 慶 悟 山 中 徹 大 岡 龍 三¹⁾
菊 本 英 紀¹⁾ 菅 原 広 史²⁾

要 約

超高層建築物の設計風速評価では、上空における風速鉛直分布のモデル化が重要である。強風時の大気安定度は中立であると考えられるため、比較的短期間の上空風観測から強風時と相似な風速鉛直分布を得るには、大気安定度が中立なデータを抽出する必要がある。本研究では、ドップラーライダーを用いた市街地における上空風観測結果から、簡易な大気安定度評価指標であるパスキル安定度が中立なデータを抽出し、平均風速鉛直分布を求めた。パスキル安定度が中立時の平均風速鉛直分布から得られたべき指数は、既往の強風観測記録から提案された値と整合することを確認した。パスキル安定度が中立なデータを用いることにより、市街地においても強風時と相似な平均風速鉛直分布が得られることを示した。

目 次

- I. はじめに
- II. 観測概要
- III. パスキル安定度による大気安定度の評価方法
- IV. 市街地におけるパスキル安定度の適用性
- V. おわりに

I. はじめに

超高層建築物の耐風設計においては、設計風速を評価するために、上空における風速鉛直分布を適切にモデル化することが重要である。大気境界層における平均風速鉛直分布はべき乗則（式(1)）を用いてモデル化することが多い^{1), 2)}。

$$\frac{u}{u_R} = \left(\frac{z}{z_R} \right)^\alpha \quad (1)$$

ここで、 z は高度[m]、 z_R は参照高度[m]、 u は z における平均風速[m/s]、 u_R は z_R における平均風速[m/s]、 α はべき指数[-]を表す。

風速鉛直分布の形状を規定するパラメータであるべき指数は、地表面粗度^{1), 2), 3)}、大気安定度^{4), 5), 6)}により変化することが知られている。既往研究^{1), 2)}や国内外の風荷重

に関するガイドライン^{7), 8), 9), 10)}では、地表面粗度に応じたべき指数の値が定められている。また、一般的に、耐風設計においては強風時を対象とするため、これらの研究やガイドラインでは、大気安定度は中立であると仮定していると考えられる。

地表面粗度に応じたべき指数の値が定められている一方、近年、超高層建築物の建設事例が増加していることから、建築物荷重指針・同解説(2015)¹⁰⁾では、高度 250m 以上の高高度における風速鉛直分布については観測を行うなど慎重に検討することを求めている。しかし、建設地点において、長期間の上空風観測を行うことは困難な場合が多く、十分な量の強風データを得られない可能性がある。強風時の大気安定度は中立であると考えられるため、比較的短期間の上空風観測から強風時と相似な風速鉛直分布を得るには、大気安定度を評価し、大気安定度が中立なデータを抽出する必要がある。

大気安定度の評価指標には、リチャードソン数¹¹⁾、モニン・オブコフ長さ¹¹⁾、パスキル安定度¹²⁾など様々なものが存在する。リチャードソン数、モニン・オブコフ長さを求めるためには乱流統計量の観測が必要となるが、パスキル安定度は高度 10m における平均風速、日射量、放射収支量のみか

1) 東京大学 The University of Tokyo

2) 防衛大学校 National Defense Academy of Japan

キーワード：ドップラーライダー、大気安定度、パスキル安定度、平均風速鉛直分布、べき指数

Keywords: Doppler lidar, atmospheric stability, Pasquill stability class, mean wind speed profile, power law exponent

ら大気安定度を評価することができるため、実務において広く用いられている。パスキル安定度の適用性については Golder¹³⁾, Touma⁴⁾が検討している。Golder は、粗度長ごとのモニン・オブコフ長さとパスキル安定度の対応関係を示した。Touma は、パスキル安定度ごとに風速鉛直分布を分類し、パスキル安定度が不安定から安定になるにしたがって、ベキ指数が大きくなることを示した。しかし、これらの研究は粗度長が小さく、熱的条件も市街地とは異なる郊外において検討したものであり、市街地におけるパスキル安定度の適用性については未だに十分な検討が行われていない。

本研究では、市街地におけるパスキル安定度の適用性について検討することを目的とする。市街地においてドップラーライダーを用いた上空風観測を行い、その結果からパスキル安定度が中立なデータを抽出した。中立なデータの風速鉛直分布を既往の強風観測記録から提案されている指針と比較し、パスキル安定度の適用性について検討した。

II. 観測概要

東京都江東区木場（北緯 35°40′，東経 139°48′）に建つ建築物の中庭にドップラーライダーを設置し、上空風観測を行った。また、同じ建築物の屋上に日射計を設置し、日射量観測も同時に行った。Fig.1 に観測地点とその周辺の粗度長 z_0 の分布¹⁴⁾を示す。観測地点の東側は中層、低層建築物が存在する地域となっている。また、南東側には東京湾が位置している。一方、観測地点の西側は高層建築物が多数存在する東京都心であり、東側と比較して粗度長が大きいという特徴がある。本研究では、市街地におけるパスキル安定度の適用性

について検討することを目的とするため、粗度長が大きい市街地から観測地点に風が流入する風向南西のデータを検討対象とした。

観測期間は2018年4月から10月までである。ドップラーライダーの設置高度は地上5mであり、観測は高度45mから20m毎に505mまでの全24高度において行った。主な観測項目は10分平均風向 θ 、10分平均風速 u である。ここでは、データ数を確保するため、高度145mから345mまでの全11高度においてデータが取得できている時刻を検討対象とした。得られたデータ数は、9252個となった。検討対象とした全11高度の θ の平均を参照風向 θ_R と定義し、Fig.2に θ_R の頻度分布を示す。観測期間中の卓越風向は南南西であり、その発生頻度は33.3%となった。また、検討対象とする風向南西の発生頻度は8.5%（データ数は785個）となった。Fig.3に全風向の高度145mにおける10分平均風速 $u_{(145m)}$ の頻度分布を示す。全データの約95%は12m/s以下の風速となるが、まれに高風速なデータが観測される分布形状を示している。観測期間中の $u_{(145m)}$ の期間平均値は6.0m/sとなった。

III. パスキル安定度による大気安定度の評価方法

パスキル安定度では日中は高度10mの10分平均風速 $u_{(10m)}$ と日射量、夜間は $u_{(10m)}$ と放射収支量の組み合わせにより大気安定度を評価する。Table 1にパスキル安定度分類表¹⁵⁾を示す。Table 1のA, B, Cは不安定（Aが最も不安定）、Dは中立、E, F, Gは安定（Gが最も安定）な大気安定度を示す。日中は風が弱く、日射量が多いほど不安定と判定されやすく、夜間は風が弱く、負の放射収支量が多いほど安定と判定され

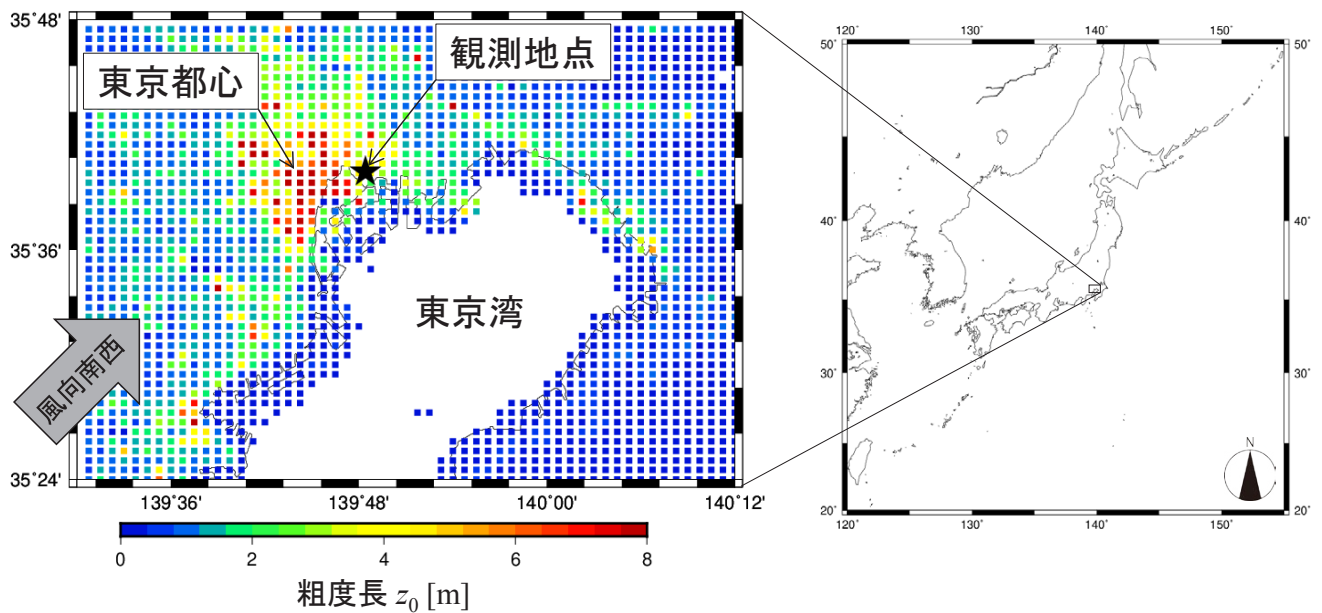


Fig. 1 観測地点とその周辺の粗度長の分布¹⁴⁾
(Observation Site and Spatial Distribution of Roughness Length)

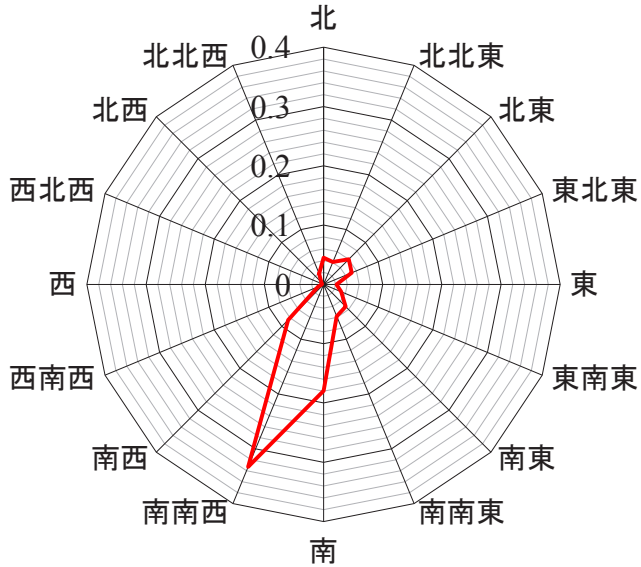


Fig. 2 参照風向 θ_R の頻度分布
(Frequency Distribution of Reference Wind Direction θ_R)

やすい。本検討では、日中のデータについては、 $u_{(10m)}$ と日射量の組み合わせからパスキル安定度が A, B, C となったデータを「不安定」、パスキル安定度が D となったデータを「中立」と定義した。また、放射収支量の観測は行っていないため、夜間のデータについては、 $u_{(10m)}$ が 4m/s 以上のパスキル安定度 D に対応するデータを「中立」と定義した。なお、夜間で $u_{(10m)}$ が 4m/s 未満となったデータはパスキル安定度の判定ができないため、考察対象から除外した。

本研究では、 $u_{(10m)}$ は直接観測していない。また、一般的に、市街地における地表付近の風速観測では、周辺建築物の影響を受けやすいため、パスキル安定度を判定するための $u_{(10m)}$ を適切に観測することは困難な場合が多い。そこで、ドップ

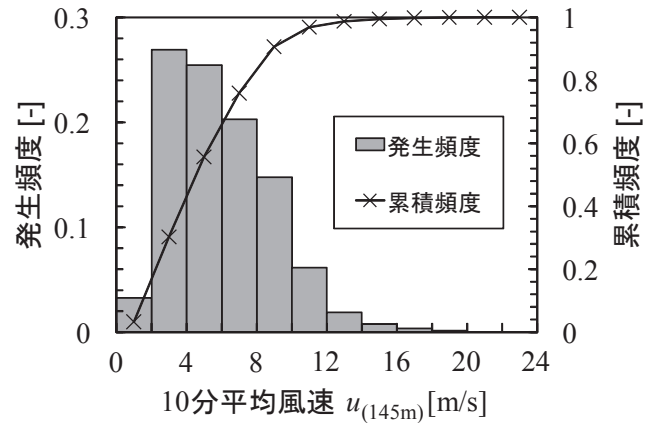


Fig. 3 全風向の高度 145m における
10 分平均風速の頻度分布
(Frequency Distribution of 10-min Mean Wind Speed
at an Altitude of 145 m)

ラーライダーで観測した高度 145m の 10 分平均風速 $u_{(145m)}$ とべき乗則 (式(2)) を用いて各時刻の $u_{(10m)}$ を推定する方法を用いた。

$$u_{(10m)} = u_{(145m)} \left(\frac{10}{145} \right)^\alpha \quad (2)$$

しかし、式(2)のべき指数 α は地表面粗度、大気安定度によって変化するため、事前に与えることはできない。したがって、以下に示す a) から e) の計算フロー (Fig.4) で、まず、パスキル安定度 D (中立) のべき指数を求め、各時刻の $u_{(10m)}$ を推定するとともに、パスキル安定度 D の 10 分平均風速鉛直分布を抽出した。

Table 1 パスキル安定度分類表¹⁵⁾
(Pasquill Stability Classification Table)

高度 10m の 風速 $u_{(10m)}$ [m/s]	日射量 T [W/m ²] (日中)				放射収支量 Q [W/m ²] (夜間)		
	$T \geq 600$	$600 > T \geq 300$	$300 > T \geq 150$	$150 > T$	$Q \geq -20$	$-20 > Q \geq -40$	$-40 > Q$
$u < 2$	A	A, B	B	D	D	G	G
$2 \leq u < 3$	A, B	B	C	D	D	E	F
$3 \leq u < 4$	B	B, C	C	D	D	D	E
$4 \leq u < 6$	C	C, D	D	D	D	D	D
$6 \leq u$	C	D	D	D	D	D	D

※A: 強不安定, B: 不安定, C: 弱不安定, D: 中立, E: 弱安定, F: 安定, G: 強安定な大気安定度を示す。

- パスキル安定度 D に対する仮のべき指数 $\alpha^{(D)}_i$ を設定する。
 - $u_{(145m)}$, $\alpha = \alpha^{(D)}_i$ を用いて, 式(2)から $u'_{(10m)}$ を求める。
 - b) で求めた $u'_{(10m)}$ を用いて, パスキル安定度 D に該当する n 個の 10 分平均風速鉛直分布を抽出する。
 - 最小二乗法を用いて, c) で抽出した n 個の 10 分平均風速鉛直分布のべき指数 $j\alpha^{(D)}_i$ ($j=1, 2, \dots, n$) を求め, それらをアンサンブル平均したべき指数 $\alpha^{(D)}_{i+1}$ を得る。
 - $\alpha^{(D)}_{i+1} = \alpha^{(D)}_i$ の場合は, $u_{(145m)}$, $\alpha = \alpha^{(D)}_{i+1}$ を用いて, 式(2)から $u_{(10m)}$ を推定する。また, $u_{(10m)}$ を用いて, パスキル安定度 D に該当する 10 分平均風速鉛直分布を抽出する。
 $\alpha^{(D)}_{i+1} \neq \alpha^{(D)}_i$ の場合は, $\alpha^{(D)}_i$ に $\alpha^{(D)}_{i+1}$ を代入し, a) に戻る。
- さらに, 上記の計算フローはパスキル安定度 D 以外の大気安定度の 10 分平均風速鉛直分布を抽出する際にも適用可能であるため, 同様の手順でパスキル安定度 A, B, C (不安定) の 10 分平均風速鉛直分布も抽出した。

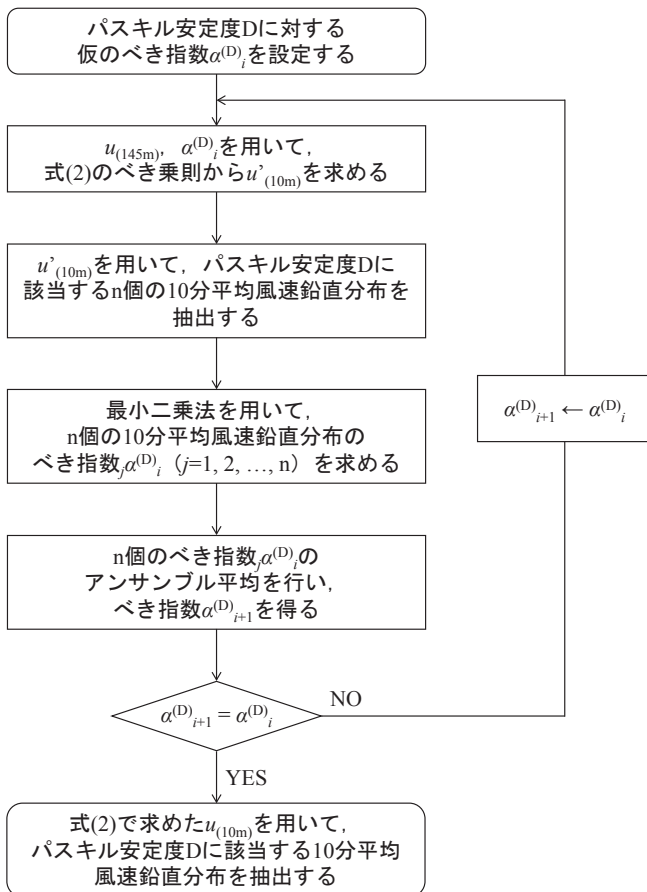


Fig. 4 パスキル安定度 D の 10 分平均風速鉛直分布を抽出するための計算フロー
(Calculation Flow to Extract the 10-min Mean Wind Speed Profile of Pasquill Stability Class D)

IV. 市街地におけるパスキル安定度の適用性

Fig.5 に観測期間中に得られた風向南西の高度 145m における 10 分平均風速 $u_{(145m)}$ の頻度分布を示す。風向南西の全データ数は 785 個であり, そのうちパスキル安定度が不安定, 中立なデータ数はそれぞれ 149 個, 83 個となった。また, 風向南西時の全データの $u_{(145m)}$ の期間平均値は 6.4m/s, パスキル安定度が不安定, 中立時の $u_{(145m)}$ の期間平均値はそれぞれ 6.9m/s, 6.5m/s となった。

Fig.6 に観測地点から南西方向の粗度長 z_0 の分布を示す。これは南西方向 $\pm 22.5^\circ$ の扇形領域の粗度長を, 観測地点からの距離 8km まで 1km ごとの範囲で平均したものである。南西方向の粗度長は, 観測地点からの距離によってやや変化するが, 3m から 6m 程度の値となっている。近藤¹¹⁾によれば, 大都市の粗度長は 1m から 5m 程度であり, 南西方向の粗度長 3m から 6m は市街地に相当する地表面粗度であると考えられる。

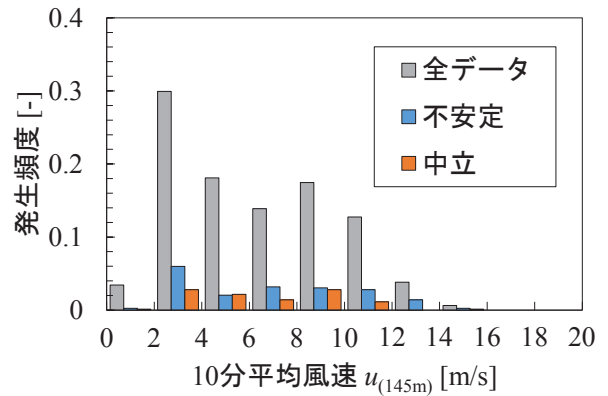


Fig. 5 風向南西時の高度 145m における 10 分平均風速の頻度分布
(Frequency Distribution of 10-min Mean Wind Speed at an Altitude of 145 m for Wind Direction Southwest)

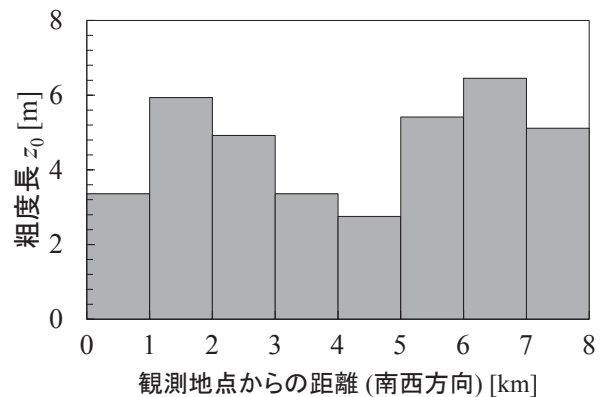


Fig. 6 観測地点から南西方向の粗度長の分布
(Distribution of Roughness Length in Southwest Direction from the Observation Site)

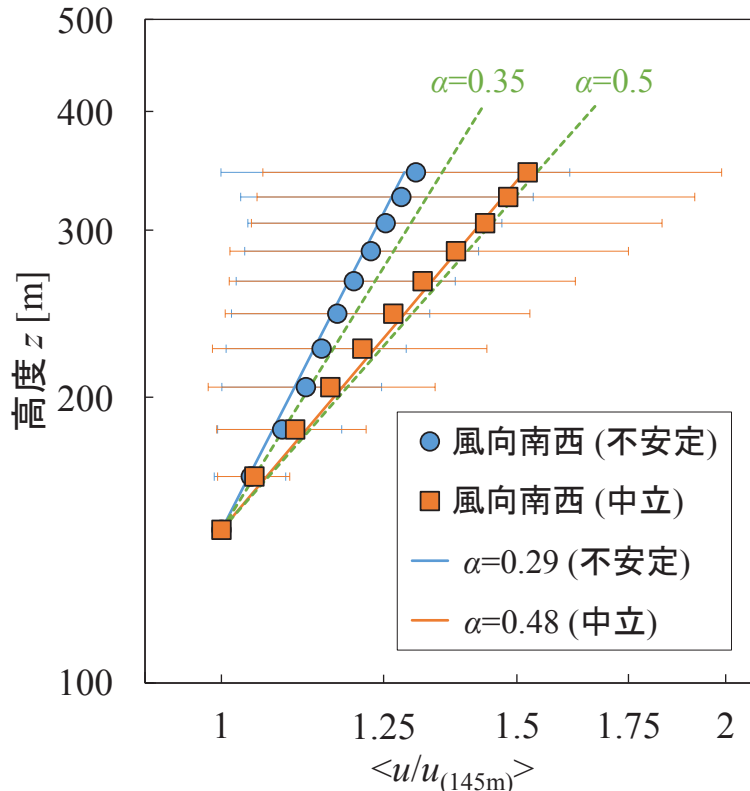


Fig. 7 風向南西時の期間平均した 10 分平均風速鉛直分布
(Period Averaged 10-min Mean Wind Speed Profile for Wind Direction Southwest)

Table 2 崔・神田¹⁶⁾による地表面粗度の分類
(Categorization of Ground Surface Roughness Proposed by Choi and Kanda (1990))

地表面粗度の カテゴリー	粗度長 z_0 [m]	べき指数 α [-]
I	0.0005~0.04	0.10~0.15
II	0.003~0.2	0.16~0.20
III	0.1~1.0	0.21~0.25
IV	0.4~2.0	0.25~0.35
V	1.5~4.0	0.35~0.50

パスキル安定度が不安定、中立時の平均風速鉛直分布の特性について検討する。Fig.7 にパスキル安定度が不安定、中立時の期間平均した 10 分平均風速鉛直分布、誤差範囲（標準偏差）を示す。不安定、中立時の平均風速の鉛直勾配はともに、高度 145m から 345m まではほぼ一定である。最小二乗法により各 10 分平均風速鉛直分布から求めたべき指数の期間平均値は、不安定では 0.29、中立では 0.48 となった。パスキル安定度が中立の時は、不安定の時と比較して、平均風速の鉛直勾配が大きくなっている。これは大気安定度が不安定になるほど、上空と地表付近の間の運動量交換が活発になり、平均風速の鉛直勾配が小さくなる現象と一致する傾向で

ある。

パスキル安定度が中立時のべき指数の妥当性について検討するため、既往の強風観測記録から提案された値と比較した。Table 2 に崔・神田¹⁶⁾が既往の強風観測記録から提案した各地表面粗度のカテゴリーにおける粗度長、べき指数の対応関係を示す。観測地点から南西方向の粗度長は 3m から 6m 程度であり、地表面粗度のカテゴリー V に相当する。カテゴリー V のべき指数は 0.35 から 0.5 であり、中立時のべき指数 0.48 はこの範囲内の値となっているが、不安定時のべき指数 0.29 は 0.35 より小さい値となった (Fig.7)。

V. おわりに

本研究では、市街地におけるパスキル安定度の適用性について検討することを目的として、パスキル安定度が中立時の平均風速鉛直分布、ベキ指数を既往の強風観測記録から提案された指針と比較した。

パスキル安定度が中立時のベキ指数は、既往の強風観測記録から提案された指針の値と整合していることを確認した。パスキル安定度が中立なデータを用いることにより、市街地においても強風時と相似な平均風速鉛直分布が得られることを示した。

参考文献

- 1) A.G. Davenport ; Rationale for determining design wind velocities, J. Struct. Div., ASCE, Vol. 86, 1960, pp. 39–68.
- 2) J. Counihan ; Adiabatic atmospheric boundary layers: A review and analysis of data from the period 1880–1972, Atmos. Environ., Vol. 9, 1975, pp. 871–905.
- 3) Y. Tamura et al. ; Profiles of mean wind speeds and vertical turbulence intensities measured at seashore and two inland sites using Doppler sodars, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 95, 2007, pp. 411–427.
- 4) J.S. Touma ; Dependence of the wind profile power law on stability for various locations, J. Air Pollut. Control Assoc., Vol. 27, 1977, pp. 863–866.
- 5) J.S. Irwin ; A theoretical variation of the wind profile power-law exponent as a function of surface roughness and stability, Atmos. Environ., Vol. 13, 1979, pp. 191–194.
- 6) H. Kikumoto et al. ; Observational study of power-law approximation of wind profiles within an urban boundary layer for various wind conditions, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 164, 2017, pp. 13–21.
- 7) N.J. Cook ; The Designer's Guide to Wind Loading of Building Structures, Part 1, Butterworths, London, 1985.
- 8) ASCE ; Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, 2006.
- 9) China National Standard ; Load Code for the Design of Building Structures, 2012.
- 10) 日本建築学会 ; 建築物荷重指針・同解説(2015), 2015.
- 11) 近藤純正 ; 水環境の気象学, 朝倉書店, 1994.
- 12) F. Pasquill and F.B. Smith ; Atmospheric Diffusion, Ellis Horwood Ltd., 1983.
- 13) D. Golder ; Relations among stability parameters in the surface layer, Boundary-Layer Meteorol., Vol. 3, 1972, pp. 47–58.
- 14) DIAS (Data Integration & Analysis System), MEXT, Japan, 2014.
- 15) 中野政尚ほか ; 大気拡散計算に関連する気象観測データの解析(1995年度～2004年度), JAEA-Technology, 2006.
- 16) 崔恒・神田順 ; 風荷重評価のための平均風速と乱れの強さの鉛直分布特性, 日本風工学会誌, Vol. 45, 1990, pp. 23–43.

Extraction of the Mean Wind Speed Profile of Neutral Atmospheric Stability based on the Pasquill Stability Classification

*Keigo Nakajima, Toru Yamanaka,
Ryozo Ooka¹⁾, Hideki Kikumoto¹⁾ and Hirofumi Sugawara²⁾*

In the wind-resistant design of high-rise buildings, it is important to model the wind speed profile accurately. AIJ (2015) recommends conducting observations to determine the wind speed profile at high altitudes. It has been demonstrated that the wind speed profile varies according to the atmospheric stability. In wind-resistant design, because the wind speed profile is modeled for strong wind, the atmospheric stability is assumed to be neutral. Therefore, to obtain the wind speed profile which is similar to that of strong wind from short-term observation at the construction site, it is necessary to evaluate the atmospheric stability and extract the neutral data. In the present study, the applicability of the Pasquill stability class, a widely used index to evaluate the atmospheric stability, was assessed in an urban area. The mean wind speed profile of the neutral Pasquill stability class was consistent with that of the guideline proposed by Choi and Kanda (1990) based on previous observations of strong wind. It was confirmed that, in urban areas, it is possible to obtain the mean wind speed profile which is similar to that of strong wind by using data of the neutral Pasquill stability class.