通風換気性能に関する超過確率に基づく風環境評価法の提案と
その空堀モデルへの適用

市街地の風環境に関する研究（その1）

PROPOSAL OF AN EVALUATION METHOD BASED ON EXCEEDANCE PROBABILITIES
WITH RESPECT TO VENTILATION INDICES AND APPLICATION
BY USING DRY-AREA MODEL

Study on wind environment in urban block by CFD (Part 1)

ト 震*, 加藤 信介**, 石田 義洋***, 黄 弘****

*Zhen BU, Shinsuke KATO, Yoshihiro ISHIDA
and Hong HUANG*

Exceedance probability analysis was often applied as an effective method for assessing local wind environment in a street canyon, in which the effects of wind from each direction are comprehensively taken into account. In this present study, a new method by means of exceedance probabilities was proposed, with the aim to evaluate the overall ventilation performance in specific spaces within the street canyon (evaluation space), based on two ventilation indices, local air change rate and average kinetic energy, instead of using the commonly adopted wind velocity. In this method, the ventilation indices are derived from CFD simulation for each azimuth before the calculation of exceedance probability. A three-dimensional dry-area model was used as an illustration of this method. Several key factors, including orientation of dry-area, geometrical configurations, as well as statistical wind data were further investigated with the calculated distributions of exceedance probabilities.

Keywords: Wind environment, Exceedance probability, Dry-area, Evaluation space, Local air change rate

風環境, 超過確率, 空堀, 検査空間, 局所排出換気回数

1. はじめに

市街地の風環境は、市街地の建物や工作物などの影響を大きく受ける。特に人間の活動域や沿道領域といった特定の領域では、換気効率が低下すると共に、空気環境が悪化して行く。これに対して、市街地の上空風は市街地のラフネスの影響をあまり受けていない自由風であり、通風換気の源（ポテンシャル）として市街地環境維持のために大きな役割を担っている。しかし、上空風の風向や風速が変化すると、市街地内の気流状況や換気性状が変化し、気流・換気性状が想定とは大きく異なってしまう場合がある。したがって、市街地風環境の予測や都市計画などを行う際には、特定の（例えば、最も通風が悪いと考えられる）風向と風速だけを適用した予測結果をもって風環境を評価するのではなく、統計データに基づく年間の風向・風速の発生確率を使用して、総合的に市街地の風環境を予測・評価することが必要である。本研究は市街地において良好な風環境を確保するために、通風・換気性能の評価に関する総合的な検討を行うことを目的としている。

既報では市街地の検討領域を設定するVoid空間の概念を定義し、単純な直方体形状の建物による密集市街地モデルを使用して、2次元的な形態（建物高さ、道路幅）と風速性状の相関を検討した¹⁾。また幾何学的周期性を有する3次元密集市街地モデルの検討においては、その市街地の形状に沿った周期的な風速変化の発生を確認した²⁾。続いて、密集市街地の市街地形状と通風・換気性状の関連性を検討するためのモデル設定を行い³⁾、隣棟間隔と密集度合いが道路の換気性状に及ぼす影

響を検討した⁴⁾。

一方、市街地風環境の評価手法として気象データを考慮した確率的評価がよく用いられている。国内では、日最大瞬間風速の発生頻度に基づく「村上らの方法」^{5, 6)}、あるいは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」^{7, 8)}が用いられることが多い。しかしながら、いずれの手法も市街地の評価対象となる特定の一点における風速の評価に基づいている。またこれらの手法に基づく研究では、主として強風による風害対策の検討が実施されて来たと考えられる。

市街地の有限な体積をもった居住・通行領域における通風・換気性能の評価に適用する指標として、プロファイルを仮定した上空風の駆動によるその領域の局所排出換気回数⁹⁻¹³⁾と平均運動エネルギーという二つの機能の設定が可能である。本研究では、これらの機能に対応する超過確率を上空風の年間の変動を統計的に考慮した形で算出し、それぞれの機能設定に基づく超過確率による検討領域の評価法を提案する¹⁴⁻¹⁶⁾。

本研究は市街地のVoid内の特定した3次元領域の換気性状を把握することを目的としている。したがって、弱風対策の検討が主たる目的となる。しかしながら、風の統計データとしてのワイブル係数は、日最大風速に基づく係数⁹⁾と10分間平均風速に基づく係数⁷⁾が検討・報告されてきた。今後、本格的に都市の換気性状の検討を進めるためには、弱風に関する統計量としてのワイブル係数等が必要となるが、現状では整備されていないため、ここでは平均的な風速によるワイブル係数⁷⁾を使用して検討を行なう。第一段階として、密集市街地をモデ

* 東京大学大学院 大学院生

** 東京大学生産技術研究所 教授・工博

*** 東京大学生産技術研究所 産学官連携研究員・博士(工学)

**** 東京大学生産技術研究所 助教・博士(工学)

Graduate Student, Univ. of Tokyo

Prof., I. I. S., Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

Postdoctoral Research Fellow, I. I. S., Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

Research Assoc., I. I. S., Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

ル化した単純な形状の空堀モデルを検討対象に設定した。空堀の形状、方位および気象データの違いが検討領域の通風換気性能に及ぼす影響を本評価法により検討した結果を以下に報告する。

2. 空堀モデルにおける超過確率の定義と計算法

2.1 検査空間と空堀モデル

建物周辺の風環境は、建物周辺の道路、公園などの公共空地、あるいは敷地内の建物のない空地などの水平面と建物や地形などの垂直面で構成され、かつ上部が天空に開放されている空間の持つ様々な環境性状の一つと考えられる。本研究では、一般的な意味で、この空間を「Void 空間」と定義する。市街地における全般的な風環境は、この個別の Void 空間内の空気の流動性状の総合的な評価と考えられる¹⁷⁾。さらに本研究では、この Void 空間内の特定の領域を 3 次元的空間として選定し、換気性状の評価を行なう。3 次元的な広がりを持つ建物等のない領域という意味合いで、この検討領域を「Void 内の検査空間」、あるいは簡便に「検査空間」と呼称する。

計算例として、図 1 に示すように、x 方向に空堀を 3 本並べて、換気性能を検討する。この空堀は、敷地規模 60~100m² 程度の狭小戸

図 1 空堀モデルの形状と配置(単位[m])

図 2 空堀モデルの形状と配置

建て住宅が、隣棟間隔 1m で、細い道路 (1~6m、1、2m は隣棟間隔を想定) の両側に立ち並び、かつ 3 階化等の高容積化を伴った建て替えが進行した典型的な密集市街地^{3,4)}を想定している。簡便のため、第 1 段階として隣棟間の間隙を無視し、空堀間の 100m の幅の平面は、建物等の存在を無視して水平面としてモデル化した。空堀の中央部に、長さ 10m×高さ 3m×幅 D の領域を設定する。本計算例では、この領域が Void 内の検査空間である。また、このモデルを「空堀モデル」と呼ぶ。

上空風向・風速とプロファイルを仮定して、検査空間の換気性状をよく代表すると考えられる二つの性能値、局所排出換気回数 (PFR/Vp) と平均運動エネルギー^{注 1)}を CFD で算出する。局所排出換気回数は汚染質排出能力、すなわち清浄化機能を表し、平均運動エネルギーは、暑熱時体感温度低下能力、すなわち清涼化機能を表すと考えられる。性能値は、基本的には、16 風向分を用意する。

2.2 空堀モデルの方位、流入風向番号、流入風向角

空堀の換気性能は上空風に依存し、空堀の方位 (向き) によって変化する。図 2 に空堀の方位と流入風向番号、流入風向角の定義を示す。まず、方位に番号を付ける。NNE に対し、方位番号 n を 0 とし、順次、時計回りに NE($n=1$)、ENE($n=2$)~N($n=15$)と番号を付ける。次に、図 2 に示すように、空堀の短辺方向に法線 β を立て、これを空堀の方位 (向き) と定義する。 β には方位番号を与える。図 2 では $\beta=2$ である。空堀の周囲を方位角と同様に 16 等分して流入風向番号を定義する。空堀の法線方向を $i=0$ 番として、時計回りに 0~15 番まで番号を付ける (図 2 参照)。また空堀の流入風向角 θ を、空堀の法線 (方位 β) 方向を $\theta=0^\circ$ とし、時計回りを角度の正の方向として定義する。空堀の流入風向番号 i と空堀上の流入風向角 θ は、空堀の回転と共に回転する。

2.3 三種の基準に基づく超過確率の定義

2.3.1 風速基準の超過確率

任意の評価対象となる位置 (通常は地表面近傍の一点) の風速が指定した速度値を超える確率、すなわち指定速度値に対する超過確率が風環境評価指標としてよく用いられている。本報では、後述の二つの基準に基づく超過確率と区別するために、これを風速基準の超過確率と呼ぶ。以下では、風速基準の超過確率についての計算法を確認する。

ここで、地上風速 v_{Town} が、一定なスカラー値 (地上の風向は任意) となるための 16 種類の上空風速 v_T^n を考える (添え字 T は基準都市上空を表す)。一般に v_T^n は、地上の構造物等の影響で、16 風向に対応する 16 の値をとることになる。ここで、風速比 $Ratio^n$ を上空風速 v_T^n に対する地上風速値 v_{Town} の比として定義する。風速比は、式(1)のように 16 の風向別の値をとる。

$$Ratio^n = \frac{v_{Town}}{v_T^n} \quad (1)$$

風速比は、空堀の方位 (図 2) と形態、および周辺の都市形態によって定まる特性値である。本研究では高さ方向の風速プロファイルを仮定し、上空の風速に係わず一定とする。上空風速 v_T^n に対するある風向 a_n ($n=0 \sim 15$) の超過確率 (上空風速が v_T^n 以上になる確率) は、ワイブル分布を仮定して、式(2)と表せる。

$$P\left(T_v > v_T^{a_n}\right) = A_T^{a_n} \times \exp\left\{-\left(\frac{v_T^{a_n}}{C_T^{a_n}}\right)^{K_T^{a_n}}\right\} \quad (2)$$

ここで、 $(T_v > v_T^{a_n})$ ：風速データ測定位置で風速 T_v が $v_T^{a_n}$ を超える確率条件； a_n ($n=0\sim 15$)：風向； $A_T^{a_n}$ 、 $C_T^{a_n}$ 、 $K_T^{a_n}$ ：基準都市上空の風向 a_n 毎の発生頻度（風配）とワイブルパラメータ。

式(2)に、式(1)を変形した $v_T^{a_n} = v_{Town} / \text{Ratio}^{a_n}$ を代入し、さらに 16 風向に亘り加算して、全方向の超過確率を得る。

$$P\left(T_{Town} > v_{Town}\right) = \sum_{n=0}^{15} P\left(T_v > \frac{v_{Town}}{\text{Ratio}^{a_n}}\right) = \sum_{n=0}^{15} A_T^{a_n} \times \exp\left\{-\left(\frac{v_{Town}}{\text{Ratio}^{a_n} \times C_T^{a_n}}\right)^{K_T^{a_n}}\right\} \quad (3)$$

式(3)は、定まった 16 風向の風速比 Ratio^{a_n} を使用して、地上風速 T_{Town} が v_{Town} 以上となる条件を指定したときの超過確率を与えるものである。風洞実験、CFD 計算等により風速比 Ratio^{a_n} が与えられる場合に、高層建物等による周辺風速の増減の検討によく用いられる。

風速基準の超過確率は、単点の風速に基づく評価指標であり、道路上の歩行空間のような市街地内のある広がりを持った領域の評価指標ではない。したがって、検査空間の風環境を領域として評価するために、これに適する基準を使用する必要がある。以下では、風速基準の超過確率の定義を拡張して、市街地の通風換気性能を代表する二つの性能値と考えられる局所排出換気回数と運動エネルギーに基づく超過確率を定義し、新しい風環境指標として提案する。

2.3.2 局所排出換気回数 (PFR/V_p) 基準の超過確率

局所排出換気量 PFR (Purging Flow Rate) は、検査空間で一様に汚染質を発生させた場合の検査空間の平均濃度を定める実質的な換気量（汚染質を稀釈、排出する換気量）である⁹⁻¹³⁾。局所排出換気回数 (PFR/V_p) はこの実質的な換気量を検査空間の体積 V_p によって除した実質的な換気回数である。

市街地内の検査空間における局所排出換気回数 (PFR/V_p) は検査空間の汚染質排出能力、すなわち清浄化機能を表す物理量であり¹⁷⁾、以下換気回数と略称し、変数 N で表す。本項では、空堀が 16 風向とも、ある一定の局所排出換気回数 ($N=PFR/V_p$) 以上の換気性能となる確率（換気回数 N に対する超過確率）を求める。

高さ方向の風速プロファイルを設定し、上空風速が v_T で、かつ風向が空堀の流入風向番号 i と一致するときの CFD で計算した換気回数を $N_i^{v_T}$ ($i=0\sim 15$) とする。上空風速と検査空間の換気回数は比例するので、 $N_i^{v_T} / v_T$ ($i=0\sim 15$) は定数となり、空堀の「流入風向番号 i 方向」から吹く風に対する換気性能を表す特性値と考えることができる。

一般の場合、すなわち、上空風が風速 v_T 、風向番号 n であり、空堀が任意の方位 β を向いているとき、その検査空間の換気回数は $N_{i=n-\beta}^{v_T}$ ($n=0\sim 15, \beta=0\sim 15$) となる^{注2)} (図 2 参照)。このとき、指定した換気回数 N_S を達成するために必要な上空風速は式(4)となる。

$$v_T^{a_n} = \frac{N_S}{N_{i=n-\beta}^{v_T} / v_T} = \frac{N_S}{N_{i=n-\beta}^{v_T}} v_T \quad (4)$$

この式を式(2)に代入して、式(5)を得る。

$$P\left(T_v > \frac{N_S}{N_{i=n-\beta}^{v_T}} v_T\right) = A_T^{a_n} \times \exp\left\{-\left(\frac{N_S \times v_T}{N_{i=n-\beta}^{v_T} \times C_T^{a_n}}\right)^{K_T^{a_n}}\right\} \quad (5)$$

さらに、 $T_N = N_{i=n-\beta}^{v_T} \times T_v / v_T$ を定義して、式(5)を書き換えて^{注3)}、16

風向の和をとれば、

$$P\left(T_N > N_S\right) = \sum_{n=0}^{15} A_T^{a_n} \times \exp\left\{-\left(\frac{N_S \times v_T}{N_{i=n-\beta}^{v_T} \times C_T^{a_n}}\right)^{K_T^{a_n}}\right\} \quad (6)$$

となる。ただし、 $T_N = N_{i=n-\beta}^{v_T} \times T_v / v_T$ は、上空の風速が T_v であるときの検査空間の換気回数である。式(6)は、検査空間の換気回数 T_N が指定した換気回数 N_S を超える確率を表している。

2.3.3 平均運動エネルギー基準の超過確率

検査空間における平均運動エネルギー^{注1)}は検査空間の暑熱体感温度低下能力、すなわち清涼化機能を表す物理量と考えられる¹⁷⁾。

そこで、検査空間の運動エネルギーの平均値を変数 KE で表し、 KE に基づく超過確率を求める。以降、平均運動エネルギー KE を運動エネルギーと略記する。

上空風が風速 v_T 、風向番号 n であり、空堀が任意の方位 β を向いているとき、その空堀中の検査空間の運動エネルギーは $KE_{i=n-\beta}^{v_T}$ ($n=0\sim 15, \beta=0\sim 15$) となる^{注2)} (図 2 参照)。このとき、指定した運動エネルギー KE_S を達成するために必要な上空風速は、運動エネルギーの平方根と上空風速が比例するとして、式(7)となる。

$$v_T^{a_n} = \frac{\sqrt{KE_S}}{\sqrt{KE_{i=n-\beta}^{v_T}} / v_T} = \sqrt{\frac{KE_S}{KE_{i=n-\beta}^{v_T}}} v_T \quad (7)$$

式(4)と同様に、式(7)を式(2)に代入して、式(8)を得る。

$$P\left(T_v > \sqrt{\frac{KE_S}{KE_{i=n-\beta}^{v_T}}} v_T\right) = A_T^{a_n} \times \exp\left\{-\left(\frac{\sqrt{KE_S} \times v_T}{\sqrt{KE_{i=n-\beta}^{v_T}} \times C_T^{a_n}}\right)^{K_T^{a_n}}\right\} \quad (8)$$

さらに、 $\sqrt{KE^T} = \sqrt{KE_{i=n-\beta}^{v_T}} \times T_v / v_T$ を定義し、式(8)を書き換え、16 風向の和を取って、式(9)を得る^{注4)}。

$$P\left(T_{KE} > KE_S\right) = P\left(\sqrt{T_{KE}} > \sqrt{KE_S}\right) = \sum_{n=0}^{15} A_T^{a_n} \times \exp\left\{-\left(\frac{\sqrt{KE_S} \times v_T}{\sqrt{KE_{i=n-\beta}^{v_T}} \times C_T^{a_n}}\right)^{K_T^{a_n}}\right\} \quad (9)$$

2.4 任意の都市の超過確率の計算法

一般に超過確率を計算する場合、気象台の風速計高さにおける風配値およびワイブルパラメータが使用される。以下に、任意の都市において、式(6)、(9)により超過確率を計算する方法を示す。まず、ある都市を基準地とし、その都市の風速計設置高さを h_T 、その高さの風速を v_T とする。基準都市において、式(6)の換気回数 $N_i^{v_T}$ 、および式(9)の運動エネルギー $KE_i^{v_T}$ を CFD により、基本的には $i=0\sim 15$ の 16 風向に亘り計算しておく。基準地の高さ h_T における上空風速 v_T を、対象都市の気象台の風速計設置高さ h_C における上空風速 v_C に換算する。以降、添え字 C は対象都市を表す。べき指数 α の風速プロファイルを設定して、式(4)と式(7)より、以下の換算式が得られる。

$$v_C^{a_n} = v_T^{a_n} \left(\frac{h_C}{h_T}\right)^{\alpha} = \frac{N_S \times v_T}{N_{i=n-\beta}^{v_T}} \left(\frac{h_C}{h_T}\right)^{\alpha} \quad (10)$$

$$v_C^{a_n} = v_T^{a_n} \left(\frac{h_C}{h_T}\right)^{\alpha} = \sqrt{\frac{KE_S \times v_T}{KE_{i=n-\beta}^{v_T}}} \left(\frac{h_C}{h_T}\right)^{\alpha} \quad (11)$$

これらの $v_C^{a_n}$ を使用すれば、基準地で計算しておいた換気回数 $N_i^{v_T}$ 、運動エネルギー $KE_i^{v_T}$ に $i=n-\beta$ を代入するだけで、これらを使用できることになる。

式(6)を参照し、式(10)を用いて、対象都市の超過確率は、

$$P(CN > N_S) = \sum_{n=0}^{15} A_C^{a_n} \times \exp \left\{ - \left(\frac{N_S \times v_T}{N_{T=n-\beta} \times C_C^{a_n}} \left(\frac{h_C}{h_T} \right)^a \right)^{K_C^{a_n}} \right\} \quad (12)$$

となり、運動エネルギー基準の対象都市の超過確率は、式(9)、(11)より、

$$P(CKE > KE_S) = \sum_{n=0}^{15} A_C^{a_n} \times \exp \left\{ - \left(\frac{\sqrt{KE_S} \times v_T}{\sqrt{KE_{T=n-\beta}} \times C_C^{a_n}} \left(\frac{h_C}{h_T} \right)^a \right)^{K_C^{a_n}} \right\} \quad (13)$$

と表せる。ただし、 $A_C^{a_n}$ 、 $C_C^{a_n}$ 、 $K_C^{a_n}$ ：対象都市上空の風向 a_n 毎の発生頻度（風配）とワイブルパラメータ。以上から、基準地の換気回数 $N_{T=n-\beta}^{v_T}$ 、平均運動エネルギー $KE_{T=n-\beta}^{v_T}$ を計算しておけば、式(12)、(13)を使用して、任意の都市の超過確率が計算可能となる。本報の計算では、基準地を東京、風速観測点の高さ h_T を74.6m、上空風速 v_T を1.0m/s、風速分布のべき指数 α を0.25とした⁵⁾。

3. 空堀モデルにおける超過確率の計算例

以下に空堀モデルに対し、複数ケースの数値計算を行い、前述の換気回数基準と運動エネルギー基準の超過確率に基づく市街地環境の評価手法の適用を試みる。

3.1 CFDによる換気回数と運動エネルギーの計算

換気回数基準と運動エネルギー基準の超過確率を計算する前に、CFDにより基本データとなる検査空間における流入風向別の換気回数と運動エネルギーを算出する。

3.1.1 解析対象

図1に示す簡単な形状の空堀モデルを解析対象とする。図1-(1)、(2)は計算領域である。図1-(3)に空堀の3種類の形状を示す。モデルの計算領域には、長さ100m、深さ9mの市街地の道路を模した空堀を100mおきに3本並べてあり、空堀の幅は $D=1\text{m} \sim 6\text{m}$ まで、1mピッチで変化させる。各空堀の中央底部に長さ10m、深さ3m、幅 D の検査空間を設定し、その換気回数と運動エネルギーを、 $\theta=0^\circ$ 、 22.5° 、 45° 、 67.5° 、 90° （図2の $i=0 \sim 5$ ）の5方向の流入風向について計算する。空堀の形状の対称性から、5風向の計算結果を対応する風向に割り当てられるので、残りの風向の換気能力の計算は不要である。また、空堀幅を $D=4\text{m}$ 一定として、3階建て（ $H=9\text{m}$ ）に対して、3階のみ1mのセットバックを取ったモデル、および2階と3階の両方に1mのセットバックを取ったモデルを検討する（図1-(3)参照）。

3.1.2 CFDの解析条件

CFDの解析条件を表1に示す。図1-(1)に示すように、風上側領域として、空堀①の左側（ x 軸の小なる側）には、空堀中心より50mの距離をとり、空堀の下端（ y 軸の小なる側）から46mの距離をとってある。風下側領域として、空堀③の右側には空堀中心から270m、空堀の上端から424mの距離を取ってある。これにより、風向 $\theta=0^\circ \sim 90^\circ$ の解析に対応可能となる。上空境界は地表から81.1mにとり、上空境界第1セル中心は74.6mの高さにしてある^{注6)}。数値解析はSTAR-CDを使用した¹⁸⁾。

3.1.3 計算結果の検討

CFD解析による計算結果から、ここには示さないが、空堀番号1、2、3（位置）による換気性能の違いはほとんどないことを確認した。以降は、空堀1についてのみ換気回数と平均運動エネルギーの検討

(1) 換気回数の計算結果

(2) 運動エネルギーの計算結果

図3 空堀の流入風向による換気回数と運動エネルギーの変化
(s04: セットバックなし; s14: 3階セットバック; s24: (2階+3階)セットバック)

図4 空堀鉛直断面の風速ベクトルと濃度分布

(s04: セットバックなし; s14: 3階セットバック; s24: (2階+3階)セットバック)

を行う。空堀1の流入風向による換気回数の計算結果を図3-(1)に、平均運動エネルギーの計算結果を図3-(2)に示す。なお、検査空間は、空堀底部から高さ3mまでであり、図4中に破線の枠で示す。

図3-(1)のセットバックのない6ケース（S01～S06）では、換気回数（ PFR/V_p ）の計算結果は、流入風向角 $0 \sim 45^\circ$ では、ほぼ直線的に増加し、 67.5° で急激に増加する。幅 $D=1, 2\text{m}$ では、最大値は 90° にあるが、 $D=3 \sim 6\text{m}$ では最大値は 67.5° で生じている。図3-(2)のセットバックのないS01～S06の6ケースでは、平均運動エネルギーの

計算結果も流入風向角 $\theta=67.5^\circ$ で急激に増加し、 $D=3\sim 6\text{m}$ では最大値は 67.5° で生じている。幅 $D=1, 2\text{m}$ では最大値は $\theta=90^\circ$ にある。 $\theta=0\sim 45^\circ$ では、運動エネルギーの計算結果は小さく、反って角度の増加に伴い減少するケースもあり ($D=5, 6\text{m}$)、換気回数 θ による変化と比べると、運動エネルギーの変化は小さい。図 3-(1)、(2)で、 $\theta=0\sim 45^\circ$ の間は、各幅とも、運動エネルギーはあまり変化しないが、換気回数は、流入風向角の増加とともに直線的に増加している。まず風向 0° の場合、Void 空間で循環流が発生して汚染質を閉じ込めており、モデルの長辺 (y) 方向の風速成分がないため汚染質は希釈・排出されず、局所排出換気回数は低くなる。運動エネルギーも低い。風向角 θ が増加すると ($\theta\leq 45^\circ$)、運動エネルギーとしてはあまり変化しないが、モデルの長辺 (y) 方向の風速成分は増加し、Void の z - y 境界面からの濃度 0 の空気の流入により、検査空間内の濃度が低下し、換気能力 (局所排出換気回数) が少し改善される。これに対し、流入風向角 $\theta=45\sim 90^\circ$ では、 y 方向の風速成分が大きく増加し、換気回数、運動エネルギーともに、急激に増大する性状を示す。

次に、空堀幅 $D=4\text{m}$ を例として、セットバックのあるケース S14 (3 階のみ、図 3 の)、ケース S24 (2 階+3 階、図 3 の) とセットバックのないケース S04 を比べて、セットバックが与える検査空間の換気回数と運動エネルギーへの影響を調べる。

まず図 4 に示している流入風向 $\theta=0^\circ$ の 3 ケース (S04、S14、S24) の空堀鉛直断面における風速ベクトルと濃度分布を調べる。ケース S04 では、時計回りの一つの循環流が構成されており、開口面の気流が底部まで届く流れ場の構造になっている (図 4-(1)参照)。ケース S14 (図 4-(2)) と S24 (図 4-(3)) では、上部のセットバック領域では時計回りの循環流が生じ、セットバック高さ以下の下部領域では、反時計回りの循環流が生じている。下部領域は上空面がセットバック高さで半ば仕切られた半閉鎖的な空間になっている。したがって、これらのケースでは、開口面の気流は直接には底部まで到達しない。この結果、図 4-(5)、(6)に示すように、ケース S14、S24 のセットバック高さ以下の下部領域の濃度は、ケース S04 (図 4-(4)) の濃度の 2 倍程度になり、換気能力は 1/2 程度に低下する。

図 3 から分るように、ケース S14 の換気回数は、 $\theta=0\sim 45^\circ$ にかけて、ケース S04 に比べかなり低い。 $\theta=67.5^\circ$ 、 90° では、換気回数は急激に増加し、 $\theta=90^\circ$ で最大の換気回数を示して、ケース S04 とほぼ同じ値になる。このケースでは、下部の循環流域が 2/3 を占めて大きいので、風向角が 45° 以下では下部の循環流域内の y 方向速度成分があまり成長しないためである。

ケース S24 は、 $\theta=0^\circ$ 、 22.5° では、ケース S04 より低い換気回数を示すが、 $45^\circ\sim 67.5^\circ$ にかけて換気回数が急激かつ直線的に増加し、ケース S04 よりも少し高い値を出している。

これは、セットバック内の 1 次渦が Void の上面に接しているため、 $\theta=45^\circ$ 付近から下部循環流域内の y 方向速度成分が増加するためである。すなわち、2~3 階分の深いセットバックは、流入風向角が大になると換気性能を向上させるように働く。これは空堀の断面積が増大していることから考えても妥当な結果である。

3.2 超過確率の計算と検討

3.1 節の結果は風向別の空堀の性状を表したもので、上空風の確率的分布の影響は含まれていない。本節では、年間に亘って変動する

表 1 CFD 解析条件

乱流モデル	標準 k - ε モデル
差分スキーム	移流項：MARS スキーム*1 濃度：1 次風上スキーム
流入境界*2,3	$U=U_0\times(Z/Z_0)^{1/4}$ $k=1.5\times(I\times U)^2$ 、 $I=0.1$ $\varepsilon=C_\mu\times k^{3/2}/l$ $l=4(C_\mu\times k)^{1/2}Z_0^{1/4}Z^{3/4}/U_0$
流出境界	法線方向勾配 0
側面・上空境界	Free slip
壁面境界	滑面：一般化対数則
その他	流れ場を解析した後、検査空間内で汚染質 (passive contaminant) を 0.001kg/m^3 で、一様発生させ、定常濃度分布を計算する。

*1：MARS: Monotone Advection and Reconstruction Scheme

*2：代表高度 Z_0 ：地上 74.6m、代表風速 U_0 ：1.0 m/s

*3： U ：主流速度 (θ 方向)、 Z ：鉛直方向座標[m]、 k ：乱流エネルギー [m^2/s^2]、 ε ：エネルギー散逸率 [m^2/s^3]、 I ：乱流強度、 l ：乱れの長さスケール[m]

図 5 東京と大阪の 16 風向の風配図 (発生頻度)

風向・風速の影響を統計的に集約して取り込み、空堀の都市における通風換気性能を検討する。

3.2.1 超過確率の計算条件

超過確率の計算には、CFD 解析で得られた流入風向別の換気回数と運動エネルギーに加えて、16 風向の風配とワイブルパラメータが必要である。本報で使用した東京と大阪の風配⁷⁾を図 5 に示す。

空堀は対称性があるので、任意の風向からの換気効果は反対風向からの換気効果と同じである。したがって、空堀の計算では、ある風向とその反対風向の合計の風配値で卓越風向を判定する。そこで、空堀の卓越風向はある風向と反対側の風向の風向組で表すことにする。東京の風配図から、北側の NNW と N 風向と南側の S、SSW、SW 風向の風配が大きい。風配の和の大きい風向組は SSE-NNW(22.9%)、S-N(18.6%)、SW-NE(17.7%)であり、これらの風向組の出現頻度の差はさほど大きくない。風配の和の小さい風向組は ESE-WNW(5.6%)、E-W(6.1%)、SE-NW(7.7%)である。大阪の風配図から、頻度合計 13% 以上の風向の組が、S-N(13.0%)、SSW-NNE(14.4%)、SW-NE(19.5%)、WSW-ENE(14.3%)、W-E(13.5%)であり、空堀に関しては風向の偏りは小さい。したがって、大阪では風配の組の方向による差は小さいので、大阪の空堀の方位による超過確率の違いは東京地区に比べて小さくなると推測される。

3.2.2 超過確率の計算結果

東京、大阪地区において、3.1 節で述べた各ケースに対し、換気回数 $N_T=0\sim 400$ 回/h、及び運動エネルギー $KE_T=0\sim 0.1\text{m}^2/\text{s}^2$ に対する空堀方位毎の超過確率分布を計算した。解析対象の対称性から、超過

確率分布は NNE～S までの 8 方向の空堀方位に対して計算すればよい。各ケース毎の 8 方向の計算結果に基づいて、空堀の所在地、空堀の方位および空堀の形状（幅とセットバックの有無）の三つの要因と空堀の通風換気性能との関係について、超過確率の観点から検討を行う。

3.2.3 東京地区の検査空間の超過確率分布

(1) 空堀の方位による超過確率分布の変化

図 6 に東京地区の超過確率分布を示す。図 6-(1)は $D=4\text{m}$ 、セットバックなしのケース S04 の方位による換気回数基準の超過確率分布の変化である。図 6-(2)は同様の運動エネルギー基準の超過確率分布の変化である。

図 6-(1)から分るように、幅 4m のケースに対し、空堀の方位によって、換気回数基準の超過確率分布は相当に変化している。全体として、超過確率の大きい空堀の方位は E(W)である。空堀方位が E の場合は、風配が大きい二つの風向組 SSE-NNW、S-N が、最大換気性能を示す流入風向角である $\theta=67.5^\circ$ 、次の性能を示す $\theta=90.0^\circ$ となっているためである（図 3-(1)参照）。

超過確率の小さい空堀方位は NNE(SSW)である。空堀方位 NNE が低い超過確率を示すのは、風配が小さい風向組 E-W、ESE-WNW、SE-NW が、流入風向角 $\theta=67.5^\circ$ と $\theta=90.0^\circ$ になるためである。即ち、最大換気量を示す空堀の流入風向角と大きい風配値の風向組が一致した場合に、最大の超過確率分布が出現する。これに対し、最大換気量を示す空堀の流入風向角と小さい風配値の風向組が一致した場合に、最小の超過確率分布となる。

図 6-(2)の運動エネルギー基準の超過確率分布も、換気回数基準の超過確率と同様の分布を示しており、上記とほぼ同様のことが言える。他の幅のケース（S01～S03、S05、S06）においても、方位に関する超過確率分布の大小関係は、ほぼ同じ変化傾向を示す。

(2) 空堀の幅による超過確率分布の変化

図 6-(1)、6-(2)で、ほぼ最大の分布を示した空堀方位 E とほぼ最小の分布を見せた空堀方位 NNE を選定して、空堀幅を 1～6m にとったセットバックなしの 6 ケースの超過確率分布の空堀幅による変化を図 6-(3)、6-(4)に示す。

図 6-(3)は換気回数基準の超過確率分布である。空堀の方位 E では、空堀幅の増加に伴い超過確率分布は上昇する。幅 1m と 2m の間の超過確率分布の上昇割合が特に大きい。幅 4m、5m、6m では、超過確率分布曲線の上昇度合いはわずかであり、超過確率分布はほぼ飽和した様相を示す。方位 NNE では、幅 $D=1\sim 4\text{m}$ にかけて超過確率分布は上昇するが、幅 $D=4\text{m}$ 以上では、超過確率分布曲線はほとんど増加していない。他の方位の超過確率分布は、ここで示さないが、方位 E と NNE の間に分布しており、同様の飽和状況を示す。この結果から、これらのケース（S01～S06）の換気効率の向上に関しては幅を 4m^{注7)}以上に広げる必要はないと言える。

図 6-(4)は運動エネルギー基準の超過確率分布である。空堀方位 E に関しては、幅 4m、5m、6m で、運動エネルギー基準の超過確率分布がほぼ飽和に近い状況になっている。しかし、最小の換気性能を示す空堀方向 NNE に関しては、幅 4m、5m、6m になっても、超過確率分布は飽和していない。ここでは、空堀の幅が増加すると検査空間内の循環流が強くなり、平均風速は増加する（清涼化機能の向上）が、汚染質は Void 内で循環するだけで外部には排出されない（清浄化機能の飽和）という状況が生じている。風環境評価には、換気回

数基準と運動エネルギー基準の両面からの検討が必要であることが分る。

(3) 空堀のセットバックによる超過確率分布の変化

セットバックの影響を調べるため、幅の検討と同様に、空堀方位 E と方位 NNE を選定して、空堀幅 $D=4\text{m}$ のケースにおいて、セットバックの有無・形式による超過確率分布の変化を検討する。

図 6-(5)は換気回数基準の超過確率分布である。空堀方位 E、NNE とともに、ケース S14（3 階セットバック）とケース S24（2 階と 3 階セットバック）は、ケース S04 に比べて、かなり低い横軸の換気回数から超過確率が減衰を開始している。そして空堀方位 E では、横軸の換気回数 $N=40$ 回/h で、ケース S24 は減衰を緩め、 $N=60$ 回/h で減衰を続けるケース S14 とほぼ等しくなり、これ以降は S14 より高い超過確率を示す。さらに、 $N=160$ 回/h で、減衰の遅いケース S24 は、ほぼ一様に減衰を続けるケース S04（セットバックなし）と交差し、ケース S04 よりも高い超過確率分布となる^{注8)}。空堀方位 NNE の超過確率分布も同様の傾向を示す。

図 6-(6)は運動エネルギー基準の超過確率分布である。空堀方位 E（S04、S14、S24）を考える。ケース S24（○）の超過確率は一番大きい分布を示す。ケース S04（□）の分布は、S24 より少し小さい値で同様の減衰を示す。一方、ケース S14（△）は横軸の $KE=0\text{ m}^2/\text{s}^2$ のはじめから強い減衰を示すが、 $KE=0.02\text{ m}^2/\text{s}^2$ 付近から減衰を弱め、ケース S04 に近づく。

図 6-(5)、(6)の結果から、セットバックを設定しても、二重の渦の発生により、換気能力は必ずしも向上しないことが分かる。

3.2.4 大阪地区の検査空間の超過確率分布

式(12)と式(13)により、大阪地区において、東京と全く同じケースで、換気回数と運動エネルギー基準の超過確率分布を計算した。これらの分布から、空堀の方位、形状が検査空間の通風換気性能に与える影響を見るとともに、東京地区、大阪地区における検査空間の換気機能・特性の差異を比較する。

(1) 空堀の方位による超過確率分布の変化

図 7-(1)に、幅 4m の空堀の方位毎の換気回数基準の超過確率分布を示す。図 7-(1)から分るように、大阪では、換気回数基準の超過確率分布がほぼ最大となる空堀方位は ESE であり、最小となる空堀方位は NE である。図 7-(2)に運動エネルギー基準の超過確率を示す。超過確率分布が最大となる空堀方位は ESE であるが、最小分布の空堀方位は、換気回数基準の場合とは違って、NNE となる。

また、大阪の方位による超過確率分布の違いは、東京より明らかに小さい。これは、大阪の風向の卓越性が弱いためである。

(2) 空堀の幅による超過確率分布の変化

図 7-(3)、図 7-(4)は、最大と最小分布を示す空堀方位における幅 $D=1\sim 6\text{m}$ の超過確率分布を比較するものである。最大超過確率を示す方位等は異なるものの、全体の性状は大阪と東京でよく似ている。すなわち東京と同様に、最大方位では、幅 $D=4、5、6\text{m}$ において、換気回数、運動エネルギー基準ともに、超過確率分布は飽和性状を示す。最小方位では、換気回数基準の超過確率分布は $D=4\text{m}$ 以上で飽和するが、運動エネルギー基準ではほとんど飽和していない。

(3) 空堀のセットバックによる超過確率分布の変化

図 7-(5)、7-(6)は、大阪地区のセットバックによる超過確率分布の変化である。図 7-(5)の換気回数基準の超過確率の変化は、最大、最小方位は異なるものの、東京のセットバックの影響（図 6-(5)）とほぼ

(1) 方位による換気回数基準の超過確率分布の変化

(3) 幅による換気回数基準の超過確率分布の変化

(5) セットバックによる換気回数基準の超過確率分布の変化

(2) 方位による運動エネルギー基準の超過確率分布の変化

(4) 幅による運動エネルギー基準の超過確率分布の変化

(6) セットバックによる運動エネルギー基準の超過確率分布の変化

図 6 東京地区の超過確率分布

(1) 方位による換気回数基準の超過確率分布の変化

(3) 幅による換気回数基準の超過確率分布の変化

(5) セットバックによる換気回数基準の超過確率分布の変化

(2) 方位による運動エネルギー基準の超過確率分布の変化

(4) 幅による運動エネルギー基準の超過確率分布の変化

(6) セットバックによる運動エネルギー基準の超過確率分布の変化

図 7 大阪地区の超過確率分布

同様の結果を示す。最大方位、最小方位ともに、ケース S14（3階セットバック）が、80回/h以降で一番低い超過確率を示し、ケース S24（2、3階セットバック）が240回/h付近でケース S04（セットバックなし）を超えて最大になる。運動エネルギー基準（図7-(6)）の結果も、最大、最小方位は異なるが、セットバックの影響は東京の結果（図6-(6)）とほぼ同様である。

4. まとめ

本研究では、単純な空堀モデルを使用し、換気能力に対する超過確率の概念を導入して、市街地検査空間における通風換気性状を検討・評価した。今回は平均的風向・風速の測定データに基づく統計データ⁷⁾を用い、ワイブル分布を仮定して超過確率を求めた。弱風に対する統計手法に関しては更なる検討が必要である。次の課題としては、より実際に即した密集市街地モデルの検討を実施したい。

今回得られた成果は以下の通りである。

- 1) 都市の年間の風向・風速の統計データに基づくワイブルパラメータを使用し、有限な体積を有する空間（検査空間）の換気性能値（局所排出換気回数、平均運動エネルギー）に対する超過確率を定義し、計算法を示した。これにより、市街地に設定した検査空間の年間に亘る換気性能を確率的に評価可能とした。この換気能力基準に基づく超過確率は、都市の風の実際に即した市街地空間の評価指標といえることができる。
- 2) 第一段階として、簡単な形状の空堀モデル内に設定した検査空間の換気性能に対する超過確率分布を算出して、空堀の方位・形状が換気能力に及ぼす影響を評価し、また東京、および大阪を選定して都市による風速性状の差異を検討した。
- 3) 空堀内の検査空間の換気性能は、空堀方位に相当に依存する。空堀の長辺方向が卓越風向と一致すると、換気性能が向上し、超過確率が大きくなる。その方向から90°回転した長辺方向がおおむね最小能力を示す方向となる。
- 4) 空堀の超過確率は、空堀幅の増加に伴い上昇するが、ある幅を超えると超過確率分布は飽和する傾向を示す。また、空堀の上部の幅を広く設定（セットバックの想定）しても、二重の渦の発生により、換気効率は必ずしも向上しない。
- 5) 東京、および大阪の超過確率分布の比較では、空堀の方位による超過確率の差異は、風向の卓越性の小さい大阪の方が小さくなる。最大超過確率、最小超過確率を示す方位は、都市により異なるが、超過確率分布の大まかな形状は両都市で同様な分布を示す。

謝辞

本研究の遂行に当たってご協力を頂いた国土交通省国土技術政策総合研究所・都市研究部長後藤隆之氏、同・都市計画研究室長明石達生博士、福岡県建築都市部住宅課・企画監豊原寛明氏、国土交通省国土技術政策総合研究所・建築新技術研究官澤地孝男博士、同主任研究官勝又済博士、同主任研究官石井儀光博士に謝意を表します。

注

注1) U 、 V 、 W を平均流の速度、 k を乱流エネルギーとして、Void内の検査空間（体積 V_p ）の平均運動エネルギーを次式で計算する。

$$KE = \frac{1}{V_p} \iiint_{void} \left[\frac{1}{2} \times (U^2 + V^2 + W^2) + k \right] dV \quad (A1)$$

乱流エネルギーの KE に対する割合は、空堀幅と流入風向角によって異なるが、例えば、 $D=4m$ の場合、 $\theta=0\sim 22.5^\circ$ で30%程度、 45° で15%、 $67.5\sim 90^\circ$ で5%程度である。

注2) 流入風向番号 $i=n-\beta$ は、 $i<0$ のときは $(i+16)$ として処理する。

注3) 確率条件 $\left(\tau_v > \frac{N_s}{N_{i=n-\beta}^{v_T}} v_T \right)$ と $\left({}^T N = N_{i=n-\beta}^{v_T} \frac{\tau_v}{v_T} > N_s \right)$ は、風速の高さ方向のプロファイルが設定されているので、同値である。

注4) 確率条件 $(KE > KE_T)$ と $(\sqrt{{}^T KE} > \sqrt{KE_T})$ は同じ超過確率をもっているもので、式(8)は以下のように変形できる。

$$P \left(\tau_v > \sqrt{\frac{KE_s}{KE_{i=n-\beta}^{v_T}}} v_T \right) = P \left(\sqrt{{}^T KE} = \sqrt{KE_{i=n-\beta}^{v_T}} \frac{\tau_v}{v_T} > \sqrt{KE_s} \right) = P({}^T KE > KE_s) \quad (A2)$$

注5) 東京の超過確率は、基準値の設定高さを $h_T=74.6m$ ⁸⁾とし、文献⁷⁾の風配とワイブル係数を使用し、 $h_c=74.5m$ として式(12)、(13)で計算した。先にCFD計算を済ませてから、文献⁷⁾を読んだためである。

注6) 風速プロファイルを設定してあれば、風速計設置高さに一致させる必要はない。

注7) 幅4mという値は、本計算例（検査空間長さ10m、検査空間高さ3m、空堀高さ9m、空堀長辺方向が非常に長い（100m））における飽和幅（これ以上広げても換気性能は向上しない幅）である。

注8) ケースS24（図6-(5)の○）がこのような変化を示すのは、図3-(1)の流入風向角 $\theta=0$ 、 22.5° で、ケースS24の換気回数（図3-(1)の縦軸、 $N_i^{v_c}$ ）が大変低く、かつ $\theta=45^\circ$ 以上で換気回数が急に大きくなっているからである。 $\theta=0$ 、 22.5° の換気能力（ $N_i^{v_c}$ 、 $i=0$ 、1）は、はじめの急な減衰に対応し、 $\theta=45^\circ$ 以上の大なる換気能力（ $N_i^{v_c}$ 、 $i=2\sim 4$ ）は、 $N=40$ 回/hの以降の緩い減衰に対応する（式(12)参照）。

参考文献

- 1) 加藤信介, 石田義洋, 黄弘, 他: 市街地の風環境の研究（その1）, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D2, pp.823-824, 2005
- 2) 石田義洋, 加藤信介, 黄弘, 他: 市街地の風環境の研究（その2）, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D2, pp.825-826, 2005
- 3) 澤地孝男, 他: 市街地の風環境の研究（その3）, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D2, pp.786-787, 2006
- 4) 石田, 加藤信介, 黄弘, 他: 市街地の風環境の研究（その4）, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D2, pp.787-788, 2006
- 5) 村上周三: 風論 新建築学大系(8), 自然環境, (第3章), 新建築学大系編集委員会, 彰国社, 1982
- 6) 都市の風環境評価と計画, 日本建築学会, 1993.3
- 7) 風工学研究所, ビル風の基礎知識, 鹿島出版会, pp.110-117, 2005
- 8) 風工学研究所, 新ビル風の知識, 鹿島出版会, pp.189
- 9) Sandberg, M. et al.: the Use of Moments for Assessing Air Quality, Building Environment, Vol.18, pp.181-197, 1983
- 10) 加藤信介, 伊藤一秀, 村上周三: 換気システムを変化させた場合の規準化居住域濃度、Visitation Frequency, Purging Flow Rateの系統的解析, オフィス空間を対象とした居住域換気効率の評価に関する研究, 第1報: 空気調和・衛生工学会論文集, No.78, pp.45-56, 2000.7
- 11) 伊藤一秀, 加藤信介, 村上周三: 平均拡散場解析による Visitation Frequency, Purging Flow Rateの解析, 不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, No. 529, pp.31-37, 2000.3
- 12) 加藤信介, 黄弘, 大岡龍三, 他: CFD解析による市街地における Visitation Frequency, Purging Flow Rateの解析 高架道路周辺喚起効率の評価に関する研究, 第18回風工学シンポジウム, pp.1-576-581, 2004
- 13) 張先権, 加藤信介, 石田義洋, 他: 地上建物の影響を無視した乱流シミュレーションによる換気効率指標VFとPFRの解析, 地下室に付属する空堀の換気性能に関する基礎的研究, 日本建築学会計画系論文集, No. 618, pp.53-59, 2007.8
- 14) 石田義洋, 加藤信介, 卜震, 黄弘, 他: 市街地の風環境の研究（その5）, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D2, pp.675-676, 2007
- 15) 卜震, 加藤信介, 石田義洋, 黄弘, 他: 市街地の風環境の研究（その6）, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D2, pp.677-678, 2007
- 16) 澤地孝男, 他: 市街地の風環境の研究（その7）, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D2, pp.679-680, 2007
- 17) 加藤信介: 都市境界層の鉛直乱流輸送能力に関係づけられた市街地ボイド空間の風環境評価, 日本建築学会, 第15回空気環境シンポジウム, 2006.9.6
- 18) Star-CD Version 3.2, METHODOLOGY, 第6章, pp.6-4, CD adapco Group, 2004.7

（2007年10月10日原稿受理、2008年4月14日採用決定）