鉛直方向の風の道が導入領域およびその風下領域の
温熱環境・風環境に及ぼす影響評価

鉛直方向の風の道を活用する街区形態のシミュレーション検討（その1）

ASSESSMENT OF THE EFFECTS OF INTRODUCING VERTICAL VENTILATION PATHS
ON THERMAL AND WIND ENVIRONMENTS IN THE WINDWARD
AND LEEWARD REGIONS OF CITY BLOCKS

A numerical investigation for city block design by utilizing vertical ventilation paths (Part 1)

加藤 隆 矢*, 飯 塚 悟**

Takaya KATO and Satoru IIZUKA

Recently, vertical ventilation paths are receiving considerable attention as promising countermeasures to hot environment in summer. Vertical ventilation paths channel cooler upper winds into city blocks by using vertical turbulent diffusion enhanced by the vertical heterogeneity of building shapes. However, their effectiveness is limited because the temperature of the flow gradually becomes higher and the momentum of the flow for vertical ventilation paths gradually decreases. In this study, we investigated the effects of introducing vertical ventilation paths in city blocks by using CFD simulations. We examined the effects of the vertical heterogeneity of building shapes in the windward region on the thermal and wind environments in both the windward and leeward regions based on a heat balance analysis, space-averaged temperatures, and a proposed evaluation method using the turbulent kinetic energy profile.

Keywords : Vertical Ventilation Path, City Blocks, Leeward Region, Heat Balance Analysis

鉛直方向の風の道, 街区, 風下領域, 熱収支解析

1. はじめに

近年、街区や都市における夏季の暑熱環境緩和策の一つとして「風の道」が多くの注目を集めている。風の道、すなわち、街区や都市の風通しを良くすることは、その内部の熱拡散を促進し、暑熱環境緩和に大きく寄与する。また、排気ガス等の汚染物質の速やかな拡散にも役立つ。これまでの風の道の研究に関しては、文献 1)や 2)に簡潔にまとめられている。元々は平面上でオープンスペースを連続的に配置させる「水平方向」の風の道を意味するものであったが、最近では「鉛直方向」の乱流拡散や移流に着目した風の道の検討も多い（図1参照）。

「鉛直方向」の風の道という明確な概念は示されていないものの、古くは成田ら³⁾が塩分濃度変化による蒸発量を測定する風洞実験（塩分法）により、その検討を行っている。容積率・建蔽率ともに一定の条件下で、建物高さの標準偏差が大きいくほど、蒸発速度（物質移動係数）が大きくなることを示している。上原ら⁴⁾も風洞実験を用いて、建物高さにばらつきを持たせた場合、建物高さが均一の場合と比べてストリートキャニオン内の鉛直方向風速成分が大幅に増加し、物質濃度が低下することを確認している。

「鉛直方向」の風の道の概念の構築は加藤ら^{5),6)}の研究に遡る。

図1 「鉛直方向」の風の道のコンセプト

加藤ら^{5),6)}は、市街地（都市境界層）上空には市街地ラフネスの影響をあまり受けていない清浄・清涼と考えられる風があり、その風は境界層中の鉛直方向の乱流輸送で底部に輸送され、底部で発生する汚染物質や熱はその乱流輸送で上空に拡散されて底部から排出されると論じている。義江ら⁷⁾は「鉛直方向」の風の道を明確に意図し、香港の高層密集市街地を対象とした風洞実験を行い、建物高さにばらつきを持たせた場合、グロス建蔽率を下げて同程度の風通しを確保した場合よりも街区内の気温が下がることを確認している。

「鉛直方向」の風の道という概念を明確に意図するかしないかは別として、同様の検討はCFD（Computational Fluid Dynamics）シミュレーション研究としてもこれまでに多く行われてきている^{8)~23)}。

* (株)大林組 修士(工学)
(研究当時 名古屋大学大学院 大学院生)

** 名古屋大学大学院環境学研究科 准教授・博士(工学)

Obayashi Corporation, M. Eng.

Assoc. Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Dr. Eng.

これらは大別して、①街区スケールの現象解明を目的としたもの、②領域気象シミュレーションモデルのパラメタリゼーションの改良（建物高さのばらつき（建物（群）形態の変化）が地表面-大気間の乱流・熱・水蒸気輸送過程に及ぼす影響のモデル化など）を目的としたものの2つに分けられる。後述するように、本研究の目的は①である。②に関しては文献 8)～12)など、精力的な研究が進められてきているが、汎用的なパラメタリゼーションの確立には未だ至っていない。

①の街区スケールの現象解明に関して、遠藤・白澤・石田・持田ら^{13)～21)}は LES (Large-Eddy Simulation) を用いた解析を行っている。彼らは、運動エネルギー収支とエネルギー散逸率を評価指標として建物高さの凸凹度合（ばらつき度合）が及ぼす影響を検討している。竹林ら²²⁾は標準 k-εモデルを用いた解析により、風上領域の街区による影響も含めて、建物高さの凸凹度合が街路空間の風通しに及ぼす影響を検討している。その結果、対象領域だけでなく風上領域の高さ方向グロス建蔽率を小さくすることが街路空間の風通しに有効であると述べている。しかし、①に関するこれまでの研究の多くは「鉛直方向」の風の道の導入領域の検討に主眼が置かれている。また、熱の影響を含めない中立大気条件での検討に留まっている。熱の影響を含めた大気条件の下で建物高さの凸凹度合の影響を検討したものは陳ら²³⁾の研究があるが、これもその導入領域のみにおける検討である。風の道の導入を考える場合、導入領域でその効果を評価することは当然必要であるが、導入領域で風の持つ冷熱や運動量が消費されるため、後方領域において環境が悪化する懸念も生じる（図 1 参照）。したがって、風の道の効果を検討する場合、導入領域のみならず、その後方領域を含めた検討も必要になると考えられる。

そこで本研究では、日中の不安定な大気状態を想定し、風上領域で「鉛直方向」の風の道の導入を意図した街区形態を適用した場合、導入領域とその風下領域の温熱環境や風環境にどのような影響が及ぶかを標準 k-εモデルを用いた CFD シミュレーションにより検討する。ここでは、街区スケールの仮想閉空間（Control Volume, CV）の熱収支解析と空間平均温度、本研究で構築する乱れの影響評価方法に基づいてその検討を行う。

2. シミュレーションの概要

2.1 街区ブロックモデル

多数の街区群を含む広域スケールを解析対象とする場合、その解析領域内に存在する全ての建物を解像することは、計算負荷上困難である。そこで本研究では、個々の建物を解像するのではなく、幾つかの建物をまとめて 1 つの塊として表現する街区ブロックモデル（60 m (x_1) × 60 m (x_2) × 各高さ、図 2 参照）を導入した（ x_1 : 主流方向、 x_2 : 主流横断方向、 x_3 : 鉛直方向）。

2.2 解析対象と解析条件

図 3、図 4、表 1 に示す。水平 600 m (x_1) × 600 m (x_2) の大きさの街区ブロックモデル群領域を前後に並べて「風上領域」と「風下領域」の 2 つを設定し、その周辺に均一高さ（10 m）の街区ブロックモデル群を設置した。本研究で導入する風上領域と風下領域の 2 つの領域は、名古屋のようなオフィスビル街と住宅街がコンパクトに混在している都市街区形態をイメージしている。後述する表 2 に示すよ

図 2 街区ブロックモデル

図 3 解析対象

図 4 街区ブロックモデルの配置

表 1 解析条件

1. 解析領域	4400 m (x_1) × 1200 m (x_2) × 1000 m (x_3)
2. 解析格子数	634 (x_1) × 298 (x_2) × 56 (x_3) = 10,580,192
3. 移流項の差分スキーム	一次精度風上差分
4. 乱流モデル	標準 k-ε モデル
5. 流入境界	速度 : 1/7 べき乗則 (高さ 10 m で 6.0 m/s) k : $k(x_3) = (l(x_3) \cdot \langle u_1(x_3) \rangle)^2$ l は乱れの強さ (= $0.1 \times (x_3/300)^{(-1/7-0.05)}$) $\langle u_1 \rangle$ は流入面主流方向平均速度 (1/7 べき乗則) ε : 生産・散逸の局所平衡を基に算出 温度 : 29°C (一定値)
6. 流出境界	速度および温度 (熱) : 勾配 0 条件
7. 側面境界	速度および温度 (熱) : 対称条件
8. 上空境界	速度 : スリップ壁条件 ($\partial / \partial x_1 = \partial / \partial x_2 = 0$, $\langle u_3 \rangle = 0$) 温度 (熱) : 断熱条件
9. 地表面境界	速度 : 対数則 (滑面)、温度 (熱) : 250 W/m² (一定値)
10. 建物壁面境界	速度 : 対数則 (滑面)、温度 (熱) : 断熱条件

うに、風上領域の建物（街区ブロックモデル）平均高さは 30 m であり、これは名古屋の中心市街地（名古屋駅周辺地区や栄地区）の実際の値に準じている。また、周辺を含めた全ての領域において、グロス建蔽率は 36%としているが、これも名古屋の中心市街地の実際の値に準じている。しかし、本研究では 2.1 節で述べた街区ブロックモデルを導入しているため、frontal area index の値が実際とは異なっていることに注意されたい。今後、超並列処理技術を用

導入して計算高速化を図り、個々の建物を解像して実際の街区パラメータを正しく反映した解析を行うことを検討する予定である。

対象日時は夏季の日中を想定し、地表面からの顕熱を 250 W/m^2 の一定値で与えた。建物からの人工排熱については、文献 23)等を参考として、建物各階あたりの排熱単位を風上領域（オフィスビル街を想定）では 60 W/m^2 、風下および周辺領域（住宅街を想定）では 10 W/m^2 とした。人工排熱は全て街区ブロックモデルの屋上面からの排出とした。排出口は屋上面を4分割してそれぞれの中央部に設置し（図3参照）、上述の建物各階あたりの排熱単位 $\times$ 床面積 $\times$ 階数の排出量をその4つの排出口で均等となるように与えた。

解析格子は、主流（ x_1 ）方向に関しては、街区ブロックモデルが存在する領域（ $1020 \text{ m} \leq x_1 \leq 3380 \text{ m}$ の範囲、流入境界位置を $x_1 = 0 \text{ m}$ とする）では幅 4 m の等間隔格子とし、流入境界および流出境界付近の街区ブロックモデルが存在しない領域（ $0 \text{ m} \leq x_1 < 1020 \text{ m}$ およ

び $3380 \text{ m} < x_1 \leq 4400 \text{ m}$ の範囲）では伸縮率を 1.20 として流入境界および流出境界へ向かうにつれて格子幅を広げている。主流横断（ x_2 ）方向に関しては、街区ブロックモデルが存在する領域（ $20 \text{ m} \leq x_2 \leq 1180 \text{ m}$ の範囲）では幅 4 m の等間隔格子とし、両側面境界の近傍の領域（ $0 \text{ m} \leq x_2 < 20 \text{ m}$ および $1180 \text{ m} < x_2 \leq 1200 \text{ m}$ の範囲）では伸縮率を 1.15 として側面境界へ向かうにつれて格子幅を広げている。鉛直（ x_3 ）方向に関しては、 $0 \text{ m} \leq x_3 \leq 80 \text{ m}$ の範囲（地表面を $x_3 = 0 \text{ m}$ とする）では幅 2.5 m の等間隔格子とし、 $80 \text{ m} < x_3 \leq 1000 \text{ m}$ の範囲では伸縮率を 1.20 として上空へいくにつれて格子幅を広げている。以上のような格子を用い、解析格子数は $634 (x_1) \times 298 (x_2) \times 56 (x_3) = 10,580,192$ である。

代表高さ（ 10 m ）とその高さにおける流入平均風速（ 6 m/s ）に基づく Reynolds 数は 4.0×10^6 、地表面平均温度と流入気流温度（ 29°C ）の温度差、上記の代表高さ（ 10 m ）および代表風速（ 6 m/s ）に基づ

表2 検討ケース

	Case 0	Case 1	Case 2
風上・風下領域の建物群の俯瞰図
風上領域の条件			
1) 建物高さ	30 m	25 m, 30 m, 35 m	20 m, 30 m, 40 m
2) 建物階数	7 階	6 階, 7 階, 8 階	5 階, 7 階, 9 階
3) 建物高さの標準偏差	0.00 m	4.08 m	8.17 m
	Case 3	Case 4	Case 5
風上・風下領域の建物群の俯瞰図
風上領域の条件			
1) 建物高さ	15 m, 30 m, 45 m	10 m, 30 m, 50 m	25 m, 35 m
2) 建物階数	4 階, 7 階, 10 階	3 階, 7 階, 11 階	6 階, 8 階
3) 建物高さの標準偏差	12.47 m	16.33 m	5.00 m
	Case 6	Case 7	Case 8
風上・風下領域の建物群の俯瞰図
風上領域の条件			
1) 建物高さ	20 m, 40 m	15 m, 45 m	10 m, 50 m
2) 建物階数	5 階, 9 階	4 階, 10 階	3 階, 11 階
3) 建物高さの標準偏差	10.00 m	15.00 m	20.00 m

く bulk Richardson 数は -0.21 （表 2 に示す全てのケースにおいて、小数点第 3 位を四捨五入すると同じ値）である。ここで、 -0.21 という bulk Richardson 数の値は弱い不安定状態を示している。なお、bulk Richardson 数を求める際の地表面平均温度は、地表面境界条件として与えた 250 W/m^2 の顕熱量と地表面第 1 格子の水平面平均温度に基づき、対流熱伝達率を $12 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ と仮定して算出している。

2.3 検討ケース

表 2 に示す。風上領域の街区形態（「鉛直方向」の風の道の導入を意図した街区形態）がその領域と風下領域の温熱環境や風環境に及ぼす影響を検討するため、風上領域の建物高さのみを変化させた計 9 ケースを設定した。さらに、建物高さの種類の組み合わせが温熱環境や風環境に及ぼす影響も併せて検討するため、Case 0 では均一高さの建物、Case 1～4 では 3 種類の高さの建物、Case 5～8 では 2 種類の高さの建物を導入した。

3. 熱収支解析の概要

本研究では、表 2 に示す検討ケースの間で生じる温熱環境の変化を仮想閉空間 CV における熱収支解析および空間平均温度により評価する。図 5 に示すように、その仮想閉空間 CV として、 $600 \text{ m} (x_1) \times 600 \text{ m} (x_2) \times 60 \text{ m} (x_3)$ の CV-1、 $600 \text{ m} (x_1) \times 600 \text{ m} (x_2) \times 2.5 \text{ m} (x_3)$ の CV-2 の 2 つを設定した。このうち、CV-2 は居住域空間を想定している^{注 1}。熱収支解析は定常状態を考え、CV 内の大気部の顕熱のみを考慮した。その場合の熱収支式は(1)式で与えられる。ここで、 $\langle \rangle$ は時間平均、 $'$ は時間平均からのずれを示す。なお、地表面からの顕熱は乱流拡散項に含めて考え、人工排熱とは区別した。

$$0 = \underbrace{-\iint C_p \rho \langle u_i \rangle \langle \theta \rangle n_i dS}_{\text{移流項}} - \underbrace{\iint C_p \rho \langle u_i' \theta' \rangle n_i dS}_{\text{乱流拡散項}} + \underbrace{Q}_{\text{人工排熱項}} \quad (1)$$

C_p : 定圧比熱 [$\text{J/Kg}\cdot\text{K}$]、 ρ : 空気密度 [kg/m^3]、 θ : 温度 [K]

u_i : 風速各成分 ($i = 1, 2, 3$) [m/s]、 Q : 人工排熱 [W]

4. 建物高さの凸凹度が熱収支構造に及ぼす影響

図 6 と図 7、図 9 と図 10 はそれぞれ、CV-1（高さ 60 m）と CV-2（高さ 2.5 m、居住域）の風上領域と風下領域における熱収支構造、移流項各成分^{注 2}と乱流拡散項各成分の寄与を示したものである。ここで、図 6 と図 7 の(3)の乱流拡散項の寄与を示す図の縦軸の値が(1)と(2)の縦軸の値とは異なっている点に注意されたい。図 9 と図 10 の(1)～(3)の縦軸は全て同じである。図中の移流項、乱流拡散項末尾の 1, 2, 3 の数字はそれぞれ、主流 (x_1) 方向、主流横断 (x_2) 方向、鉛直 (x_3) 方向を意味している。また、それぞれの図において正值は CV への熱の流入、負値は CV からの熱の流出を示している。なお、本熱収支解析の残差は全てほぼ 0 となっている。

4.1 CV-1（高さ 60 m）の熱収支構造

風上領域の熱収支構造（図 6 (1)）は、どのケースにおいても全体として人工排熱項による熱の流入と移流項による熱の流出がバランスする形となっている。この熱収支構造に関して、建物高さの種類数が同じケース群（Case 1～4（3 種類の建物高さ）と Case 5～8（2 種類の建物高さ））それぞれの変化の傾向はほぼ同じである。Case 1～4（3 種類の建物高さ）においても、Case 5～8（2 種類の建物

図 5 仮想閉空間（CV）の設定

物高さ）においても、概して、建物高さの凸凹度合（建物高さの標準偏差）が大きくなるにつれて移流項による熱の流出は小さくなり、乱流拡散項は熱の流入から流出へと変化している。図 6 (2)に示すように、移流項については、移流項 3 により熱の流入が生じているが（(1)式に示すように、移流項に－（マイナス）が付いていることに注意）、移流項 1 による大きな熱の流出により、トータルとして熱の流出になっている。移流項 1 の大きな熱の流出は、対象とする領域（風上領域）で発生した熱が後方領域に多く排出されていることを示す。以上のような移流項の寄与に対し、熱収支全体（図 6 (1)）における乱流拡散項の寄与は小さい。ただし、細かく見ると各ケース間で差が見られている。上述したように、建物高さの凸凹度合が大きくなるにつれて、熱の流入への寄与が小さくなり、熱の流出へと変化している（Case 6 は除く）。乱流拡散項の各成分の寄与（図 6 (3)）を見ると、乱流拡散項 1 と乱流拡散項 2 がほぼバランスし、乱流拡散項 3 がトータルの乱流拡散項の寄与とほぼ同値になっている。つまり、建物高さの凸凹度合が大きいほど、上空での乱流拡散が促進されて熱の流出が大きくなっている（特に、Case 4 と Case 8）。このような変化が「鉛直方向」の風の道の効果を示している。

一方、風下領域の熱収支構造（図 7 (1)）は風上領域の結果（図 6 (1)）と大きく異なっている。Case 0 を除き、風下領域の結果では移流項と人工排熱項により熱が流入し、乱流拡散項により熱が流出するバランスとなっている。また、風上領域の結果（図 6 (1)）と同様、建物高さの種類数が同じケース群（Case 1～4（3 種類の建物高さ）と Case 5～8（2 種類の建物高さ））それぞれの変化の傾向に大きな差は見られない。移流項の各成分の寄与（図 7 (2)）を見ると、風上領域の結果（図 6 (2)）とは逆の結果となっており、移流項 1 が熱の流入、移流項 2 と移流項 3 が熱の流出への寄与となっている。移流項 1 による熱の流入は、風上領域で発生した熱が水平移流で流入し、その流入熱が風下領域の流出面から出ていく熱よりも大きいことを示している。乱流拡散項の各成分の寄与（図 7 (3)）を見ると、乱流拡散項 1 と乱流拡散項 2 の寄与は風上領域の結果（図 6 (3)）と正負が逆になっている。しかし、これらの項の寄与は乱流拡散項 3 の寄与に比べて小さい。風下領域では、全てのケースにおいて乱流拡散項 3 は熱の流出に寄与しており、Case 6 を除き、風上領域の建物高さの凸凹度合が大きくなるほどその流出量が大きくなっている。また、その熱の流出は風上領域の対応するケースの結果よりも大きい。ただし、今回のような街区群領域の設定（図 3、図 4、表 2 参照）で風下領域における乱流拡散の寄与を検討する場合、風上領域の建物高さの凸凹度合によって生じる直接的な乱れと、風上領域の高層建

図6 CV-1（高さ 60 m）における風上領域の熱収支構造、移流項各成分と乱流拡散項各成分の寄与

図7 CV-1（高さ 60 m）における風下領域の熱収支構造、移流項各成分と乱流拡散項各成分の寄与

物群に起因する内部境界層の発達に伴う間接的な乱れの 2 つの影響を考慮する必要がある。図 8 は Case 4（風上領域の建物高さは 3 種類、その高さの標準偏差は 16.33 m）の結果で、乱流エネルギーの風上・風下領域を含む鉛直断面分布（風上・風下領域の主流横断（ x_2 ）方向の範囲で空間平均）を示したものである。風上領域の高層建物群の存在により生じた内部境界層が風下領域で大きく発達している様子が見られる。図は省略するが、全ての検討ケースで同様の様子が見られている。このような内部境界層の発達が風下領域の乱流拡散に及ぼす間接的な影響や風上領域の建物高さの凸凹度合によって生じる乱れの直接的な影響に関しては、6 章で再度検討する。

4.2 CV-2（高さ 2.5 m、居住域）の熱収支構造

風上領域（図 9 (1)）と風下領域（図 10 (1)）のどちらの結果も、全てのケースで移流項は熱の流出、乱流拡散項は熱の流入となっている。また、建物高さの種類の数が同じケース群（Case 1～4（3 種類の建物高さ）と Case 5～8（2 種類の建物高さ））それぞれの変化の傾向に大きな差は見られない。なお、2.2 節で述べたように、本研究の解析条件では、人工排熱は全て建物屋上面から排出しているため、高さ 2.5 m の CV における熱収支に人工排熱項は含まれない。移流項、乱流拡散項の各成分の寄与を見ると、風上領域、風下領域のどちらの結果においても鉛直成分（移流項 3、乱流拡散項 3）の寄与が大きい。乱流拡散項 3 が正値になっているのは、解析条件として与えた地表面からの熱（ 250 W/m^2 の一定値、2.2 節参照）の流入が上空面の乱流拡散による熱の流出より大きいためである。したがって、その正値が小さくなるほど上空での乱流拡散が促進され、熱の流出が大きくなっていることを示すが、その度合は風上領域の建

図8 乱流エネルギーの鉛直断面分布（Case 4）

物高さの凸凹度合が大きくなるほど大きくなっている（上空での熱の流出が大きくなっている）。このような変化も「鉛直方向」の風の道の効果を示すものである。CV-2 の熱収支構造は以上のような乱流拡散項 3 の寄与が移流項 3 とバランスする構造となっている。

5. 建物高さの凸凹度合が CV 空間平均温度に及ぼす影響

図 11 と図 12 は、CV-1（高さ 60 m）と CV-2（高さ 2.5 m、居住域）それぞれの領域全体で空間平均した温度について、各ケースの結果を比較したものである。

5.1 CV-1（高さ 60 m）の空間平均温度

風上領域（図 11 (1)）、風下領域（図 11 (2)）の結果ともに、CV-1 における各ケースの結果に差はほとんど見られていない。図 6、図 7 に示すように熱収支構造としては差が見られているものの、その差が空間平均温度の大きな差を生み出すまでには至っていない。

5.2 CV-2（高さ 2.5 m）の空間平均温度

風上領域（図 12 (1)）の場合、建物高さの種類の数と同じケース

図 9 CV-2 (高さ 2.5 m) における風上領域の熱収支構造、移流項各成分と乱流拡散項各成分の寄与

図 10 CV-2 (高さ 2.5 m) における風下領域の熱収支構造、移流項各成分と乱流拡散項各成分の寄与

図 11 CV-1 (高さ 60 m) の空間平均温度

図 12 CV-2 (高さ 2.5 m) の空間平均温度

群 (Case 1~4 (3種類の建物高さ) と Case 5~8 (2種類の建物高さ)) それぞれともに、建物高さの凸凹度合が大きくなるほど空間平均温度が低下している。建物高さが3種類の場合、その高さの標準偏差の差が最も大きくなる Case 1 と Case 4 の温度差が約 0.3°C 、建物高さが2種類の場合、その高さの標準偏差が最も大きくなる Case 5 と Case 8 の温度差が約 0.2°C となっている。建物高さが3種類の場合と2種類の場合では空間平均温度の低下の度合が若干異なっているが、これらの変化はともに「鉛直方向」の風の道の効果を示すものであり、居住域の熱が上空に効率良く排出できていることを示している。対象建物が異なるので単純な比較はできないが、このような建物高さの凸凹度合に伴う温度低下は義江ら⁷⁾の高層密集市街地を対象とした風洞実験でも確認されている。

一方、風下領域 (図 12 (2)) では、建物高さの種類や建物高さの凸凹度合に関わらず、各ケースの結果に大きな差は見られない。本検討のような空間スケール ($600\text{ m} \times 600\text{ m}$ の水平スケール) の領域で考える場合、「鉛直方向」の風の道の導入は風下領域の居住域の温熱環境を改善するには至らないものの、悪影響も及ぼさないことが示唆される。

6. 建物高さの凸凹度合が直接生み出す乱れの影響評価

4.1 節で述べたように、風下領域における乱流拡散の寄与に関しては、風上領域の建物高さの凸凹度合によって生じる直接的な乱れの影響だけでなく、風上領域の高層建物群に起因する内部境界層の

発達に伴う間接的な乱れの影響の2つがある。その2つの影響を分けて考えるため、図 13 に示す評価方法を構築した。具体的には、風上領域の建物高さにばらつきを持たせたケース (Case 1~8) の乱流エネルギーの鉛直分布 (風上・風下領域の主流横断 (x_2) 方向の範囲で空間平均) から、風上領域の建物高さが均一のケース (Case 0) の同じ乱流エネルギーの鉛直分布を差し引き、さらに、その対象ケースの乱流エネルギーの鉛直分布で除すことによって、全体の乱れ

図 13 乱れの影響評価方法

図 14 風上領域の建物高さの凸凹により生じる乱れが風下領域へ直接的に移流・拡散する割合

に対して風上領域の建物高さの凸凹度合によって生じる乱れが風下領域に直接的に移流・拡散する割合を評価した。各ケースの結果を図 14 に示す。建物高さの種類の数と同じケース群 (Case 1~4 (3 種類の建物高さ) と Case 5~8 (2 種類の建物高さ)) それぞれともに、風上領域の建物高さの凸凹度合が大きくなるほど、風下領域に直接的に移流・拡散する乱れの割合も大きくなっている。建物高さが 3 種類の場合と 2 種類の場合でその割合の変化が若干異なるが、今回の検討では、全体の乱れに対する風上領域の建物高さの凸凹度合によって生じる直接的な乱れの割合はともに最大 2 割強となっている。

7. まとめ

本研究では、日中の不安定な大気状態を想定し、風上領域で「鉛直方向」の風の道の導入を意図した街区形態を適用した場合、導入領域とその風下領域の温熱環境や風環境に及ぼす影響を、街区スケールの仮想閉空間 CV の熱収支解析と空間平均温度、本研究で構築した乱れの影響評価方法に基づいて検討した。

- (1) 高さ 60 m の CV (CV-1)、高さ 2.5 m の CV (CV-2) の熱収支解析結果ともに、風上領域の建物高さの種類に関わらず、建物高さの凸凹度合が大きくなるほど、風上領域、風下領域の双方において上空での乱流拡散による熱の流出の寄与が大きくなった。このような寄与が「鉛直方向」の風の道の効果である。
- (2) 高さ 60 m の CV-1 の場合、風上領域の建物高さにばらつきを持たせることにより、熱収支構造に関しては「鉛直方向」の風の道の影響が見られたものの、CV 空間平均温度に対しては変化が生じなかった。一方、高さ 2.5 m (居住域) の CV-2 の場合、風上領域では建物高さの凸凹度合が大きくなるほど CV 空間平均温度の低下が見られた。ただし、風上領域の建物高さが 3 種類の場合と 2 種類の場合ではその温度低下の度合いが若干異なった (3 種類の建物高さ：最大約 0.3℃、2 種類の建物高さ：最大約 0.2℃)。これに対し、CV-2 の風下領域では風上領域の建物高さの種類や建物高さの凸凹度合に関わらず、ほぼ同じ CV 空間平均温度となった。本検討のような空間スケールの領域で考える場合、「鉛直方向」の風の道の導入はその導入領域の風下領域の温熱環境を改善するには至らないものの、悪影響も及ぼさないことが示唆される。
- (3) 風上領域の建物高さの凸凹度合により生じる直接的な乱れの影響と、風上領域の高層建物群に起因する内部境界層の発達に伴う間接的な乱れの影響を分けて評価する方法を構築し、全体の乱れに対する上述の直接的な乱れの割合を試算した。風上領域の建物高さが 3 種類の場合と 2 種類の場合ではその割合の変化が若干異なったが、ともにその割合が最大で 2 割強となった。
- (4) 本検討では、(2)の居住域の空間平均温度や(3)の乱れの割合に関して風上領域の建物高さの種類の違いの影響が若干見られたが、全体的にその影響よりも建物高さの凸凹度合の影響の方が大きい結果となった。建物高さの凸凹度合という指標は街区スケールの温熱環境や風環境評価において有用な指標となることが本研究においても確認された。

謝辞

本研究は、文部科学省「気候変動適応研究推進プログラム (RECCA)」の 1 研究課題 (研究代表者：飯塚悟) の一環として実施したものである。ここに記して謝意を表す。

注

注 1) 2.2 節で述べた解析格子を用いているため、地表面第 1 格子がそのまま CV-2 の CV となっている。地表面第 1 格子の値は、用いる境界条件や乱流モデルに伴うモデル誤差を多く含むと考えられるため、本来、CV-2 の鉛直方向に対して複数の格子を設けることが望ましい。しかし、本解析格子でもトータル格子数は 10,580,192 と膨大であり (2.2 節および表 1 参照)、これ以上格子解像度を上げて多くのケーススタディを行うことは計算負荷上、現実的ではないと判断した。地表面第 1 格子におけるモデル誤差に関して、境界条件については、建物周辺気流のような複雑乱流場 (剥離、衝突などの様々な性状を含む乱流場) に対して対数則 (本研究で使用) のような壁関数を使う是非は古くから議論されていることであるが、筆者らの知る限り、複雑乱流場に対して十分に適切な地表面・壁面境界モデル (壁関数) は未だ存在しない。そのような地表面・壁面境界モデル (壁関数) の開発は今後の課題である。また、乱流モデルの選択については、今回の解析条件で乱流モデルのみ、標準 k-ε モデルから RNG k-ε モデルに変更した解析も実施した。図 15 はその結果の一例で、図 12 (1) と同じ CV-2 における風上領域の空間平均温度を示したものである。限定された乱流モデルの比較ではあるが、図 12 (1) と図 15 を見る限り、乱流モデルの違いによる差は小さい (例えば、Case 0 と Case 8 の温度差は標準 k-ε モデルでは 0.25℃、RNG k-ε モデルでは 0.24℃)。この結果を踏まえ、今回の解析条件の場合、乱流モデルの感度はそれほど大きくないと判断した。しかし今後、風洞実験や実測を新たに実施し、その結果との比較を通じてさらなる精度検証が必要である。

図 15 CV-2 (高さ 2.5 m) における風上領域の空間平均温度 (RNG k-εモデル)

注 2) 図 6~図 10 の(2)に示す移流項各成分 Q_{ci} は次式より算出している。

$$Q_{ci} = - \iint C_p \rho \langle u_i \rangle (\langle \theta \rangle - \langle \theta_{ref} \rangle) dS_{i \text{ 方向直交面}} \quad (2)$$

(2)式は温度 $\langle \theta \rangle$ と対象とする CV の空間平均温度 $\langle \theta_{ref} \rangle$ の差温で考えているが、移流項全成分を足し合わせれば $\langle \theta_{ref} \rangle$ に関する項は連続条件から 0 となり、(1)式の移流項と一致する。

参考文献

- 1) 成田健一：風の道と都市気候形成，日本風工学会誌，第 31 巻，第 2 号，pp.109-114，2006.4.
- 2) 遠藤芳信，持田灯：市街地形態と都市空間の風の道―風通しのよい市街地の功罪を巡って―，環境浄化技術，vol.8，No.2，pp.14-19，2009.2.
- 3) 成田健一，関根毅，徳岡利一：市街地の蒸発量に及ぼす建物周辺気流の影響に関する実験的研究 (続報)，日本建築学会計画系論文報告集，第 366 号，pp.1-10，1986.8.
- 4) 上原清，山尾幸夫，老川進，持田灯：通風の良いストリートキャニオンに関する風洞実験，大気環境学会誌，第 42 巻，第 5 号，pp.301-309，2007.
- 5) 加藤信介，石田義洋，黄弘，豊原寛明，澤地孝男，勝又済，石井儀光：市

- 街地の風環境の研究（その 1）Void の概念と 2 棟間モデルによる道路上の風速の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集（D2），pp.823-824, 2005.9.
- 6) 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 回空気シンポジウム，pp.63-66, 2006.9.
- 7) 義江龍一郎，田中英之，白澤多一，小林剛：高層密集市街地における建物群の形態が歩行者レベルの風速・気温分布に与える影響，日本建築学会環境系論文集，第 627 号，pp.661-667, 2008.5.
- 8) Kanda, M., Moriawaki, R., Kasamatsu, F.: Large-eddy simulation of turbulent organized structures within and above explicitly resolved cube arrays, *Boundary-Layer Meteorology*, 112, pp.343-368, 2004.
- 9) Kanda, M.: Large-eddy simulation on the effects of surface geometry of building arrays on turbulent organized structures, *Boundary-Layer Meteorology*, 118, pp.151-168, 2006.
- 10) 宮本崇史，稲垣厚至，神田学：3 次元建物 GIS を用いた LES による東京街区の流体力学的パラメタリゼーション，土木学会論文集 B1 (水工学)，第 56 巻，pp.1801-1806, 2012.
- 11) 池谷直樹，萩島理，谷本潤：立方体粗度群床面一大気間のスカラー輸送現象に関する LARGE-EDDY SIMULATION，日本建築学会環境系論文集，第 76 巻，第 668 号，pp.943-951, 2011.10.
- 12) 義江龍一郎，Pillai, S. S., Jaeyong, C.: 都市表面から大気への対流熱伝達に関する風洞実験と低 Re 数モデルによる CFD 解析，日本建築学会大会学術講演梗概集（D2），pp.789-792, 2010.9.
- 13) 遠藤芳信，持田灯，白澤多一，義江龍一郎，田中英之：LES による高密度市街地内の移流・拡散メカニズムと換気・通風性能の解析（その 1）建物高さの分布が市街地内の移流・拡散による運動量輸送と抗力に及ぼす影響の分析，日本建築学会大会学術講演梗概集（D1），pp.943-944, 2008.9.
- 14) 遠藤芳信，持田灯，白澤多一，義江龍一郎，田中英之，石田泰之：LES による高密度市街地内の移流・拡散メカニズムと換気・通風性能の解析（その 2）建物高さの非一様性がエネルギー収支の主流方向分布と粘性散逸に及ぼす影響，日本建築学会大会学術講演梗概集（D1），pp.953-954, 2009.8.
- 15) 白澤多一，遠藤芳信，持田灯，義江龍一郎，田中英之，石田泰之：LES による高密度市街地内の移流・拡散メカニズムと換気・通風性能の解析（その 3）建物高さの非一様性が運動エネルギー収支の鉛直構造に及ぼす影響，日本建築学会大会学術講演梗概集（D1），pp.955-956, 2009.8.
- 16) Ishida, Y., Endo, Y., Mochida, A., Shirasawa, T., Yoshie, R., Tanaka, H.: Large eddy simulation of flow and pressure fields around buildings in high dense cities - Effects of nonuniformity of building heights on drag force and momentum transport -, *Proceedings of the 7th International Conference on Urban Climate*, 4pp, 2009.7.
- 17) Shirasawa, T., Endo, Y., Ishida, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Tanaka, H.: Large-eddy simulation of flowfields in high dense cities - Effects of building heights on drag force and mean kinetic energy transport -, *Proceedings of the 5th International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010)*, 8pp, 2010.5.
- 18) 石田泰之，白澤多一，持田灯：LES による都市空間内の運動エネルギー収支構造の分析，第 24 回数値流体力学シンポジウム (D3-2)，8pp, 2010.12.
- 19) Ishida, Y., Shirasawa, T., Mochida, A.: LES analysis of kinetic energy balance in an urban area, *Proceedings of the 13th International Conference on Wind Engineering (ICWE13)*, 8pp, 2011.7.
- 20) 持田灯，石田泰之，白澤多一，大風翼：LES による市街地形態の変更が都市空間の運動エネルギー収支とその散逸の総量に及ぼす影響の分析（その 2）市街地形態の変更が都市空間の運動エネルギー収支構造に及ぼす影響の分析，日本建築学会大会学術講演梗概集（D1），pp.697-698, 2011.8.
- 21) 石田泰之，白澤多一，持田灯，大風翼：LES による市街地形態の変更が都市空間の運動エネルギー収支とその散逸の総量に及ぼす影響の分析（その 3）着目する市街地の風下側領域への環境負荷の定量評価法の提案，日本建築学会大会学術講演梗概集（D1），pp.699-700, 2011.8.
- 22) 竹林秀樹，山田俊明，森山正和：気候資源としての風の利用を目的とした街路形態と街路空間の風通しの関係の分析（その 2）街区の空間特性が街路空間の風通し環境に及ぼす影響，日本建築学会環境系論文集，第 76 巻，第 670 号，pp.1087-1092, 2011.12.
- 23) 陳宏，大岡龍三，黄弘，中島まどか：建物壁面からの顕熱放散や建物の人工排熱の屋外温熱環境に関する影響度の研究，生産研究，58 巻 1 号，pp.48-54, 2006.1.

(2012年12月10日原稿受理，2013年 4 月 4 日採用決定)