

平成 21 年 6 月 12 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007 年度～2008 年度

課題番号：19360265

研究課題名（和文）

「鉛直方向の風の道」による臨海過密都市のヒートアイランド・大気汚染対策の提案

研究課題名（英文）

Proposal of “vertical ventilation path” as a countermeasure to heat island phenomenon and air pollution in coastal dense cities

研究代表者

義江龍一郎（YOSHIE RYUICHIRO）

東京工芸大学・工学部・建築学科 教授

研究者番号：60386901

研究成果の概要：

建蔽率、容積率、建物高さのばらつき等の建物群の形態を系統的に変化させた市街地風洞実験により、街区内の風通しを向上させ気温を低下させるためには、鉛直方向の移流・乱流拡散を促進させ、上空の新鮮で冷涼な気流を街区内に導くとともに、街区内で発生した熱を効率的に上空に排出することが極めて有効であることを見出した。また「高さ方向平均グロス建蔽率」という新たな指標を提案し、これを用いれば建物群の形態にかかわらず、街区内歩行者レベルでの平均的な風通しを普遍的に評価できることを示した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	10,000,000	3,000,000	13,000,000
2008 年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
年度			
年度			
年度			
総計	15,900,000	4,770,000	20,670,000

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：ヒートアイランド、風の道、風通し、CFD、乱流拡散フラックス、移流フラックス、臨海過密都市

1. 研究開始当初の背景

「汐留の高層ビル群が、海からの涼しい風を遮り、その背後の都市のヒートアイランド化を助長している」とする説は、マスコミで大きく取り上げられたこともあり、今日世間の一般認識となっている。しかし果たしてそれは真実であろうかという疑問が、本研究の着想の原点である。

ヒートアイランド現象の緩和策として、海からの風の通り道（いわゆる風の道）を確保して、涼しい風の流れを誘導することが重要

であることは論を俟たない。しかし、これまでの風の道の議論は、建物で風を遮蔽しないようにすること、すなわち地表付近の「水平方向の風の道」を確保することに焦点が当てられている。しかし「水平方向の風の道」を確保したとしても、臨海部に流入した地表付近の気流は、内陸に進むにつれ暖まり、その効果は遠くまでは及ばない。これに対して、高層ビルで風の道を遮蔽したとしても、その周囲の市街地に上空の涼しい風を引き下ろし、ヒートアイランド現象を緩和する効果を

もたらず可能性もある。事実、筆者らの予備的な風洞実験によれば、高層建物周辺の大部分の領域で気温が下降するという結果や、たとえ建物群による風の遮蔽率は高くとも、高層ビルを混在させた方がはるかに地表付近の風通しが良くなるという結果が得られている。このように「鉛直方向の風の道」を考慮することは、今後のヒートアイランド現象や自動車排ガス等による大気汚染の緩和策を考える上で極めて重要である。

一方、近年、都市空間の通風・換気性状を検討するために、数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics:CFD) が用いられることが多くなってきた。CFD では 3 次元な流れの構造を詳細に観察することができるため、もしそれが実現象をきちんと再現しているのであれば、上記のような「鉛直方向の風の道」を考える上で極めて有効な手段となる。また、CFD は既にビル風の環境アセスメントに盛んに適用されているが、今後はヒートアイランド問題や大気汚染物質拡散問題に対する環境アセスメントのツールとしても期待される。現在、こうした CFD の多くは、RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations)モデルによる定常解析に基づいている。RANS モデルによる定常解析は、ビル風で問題となる強風域では比較的予測精度が高く問題は少ないが、建物の後流域やストリートキャニオンのような弱風域における予測精度は悪い。これは、RANS による定常解析では、建物後流に生じる周期的な渦を再現できないことや、ストリートキャニオンとその上空との間で息をするような間欠的な流れを捉えることができないことによる。したがってこうした弱風域で深刻となるヒートアイランド現象や大気汚染物質拡散問題に対して定常 RANS を用いることは問題が多いと考えられる。

2. 研究の目的

- (1) 「鉛直方向の風の道」の効果を定量的に評価し、熱・汚染質輸送構造を明らかにする。
- (2) 都市再開発の基本プラン策定に資する普遍則を提案する。
- (3) ヒートアイランドや大気汚染物質拡散問題に対する環境アセスメントツールとしての適切な CFD を検討する。

3. 研究の方法

- (1) 鉛直方向の風の道の定量的評価と熱・汚染質輸送構造の解明
 - ① 香港と東京の臨海部の市街地をモデルとして、建蔽率、容積率、建物高さのばらつき等を系統的に変化させた風洞実験により、「鉛直方向の風の道」がヒートアイランド現象や自動車排ガス汚染に及ぼす影響を、街区

内平均風速、街区内平均温度、街区上面の移流フラックス面積積分値、乱流フラックス面積積分値、visitation frequency、purging flow rate 等の定量的評価指標を用いて明らかにする。

- ③ 上記の風洞実験のうち、特徴的傾向を示したケースをいくつか選択して、それらを対象として、建物後流での周期的な渦や都市空間における間欠的な息を再現できる Large Eddy Simulation (LES)による解析を行い、実験では捕らえきれない鉛直方向を含む 3 次元な風の道の詳細な構造、熱・汚染質輸送構造を明らかにする

- (2) 都市再開発の基本プラン策定に資する普遍則の提案

上記の系統的な風洞実験結果に基づき、「鉛直方向の風の道」の効果と、建蔽率、容積率、建物規模や建物高さのばらつき等の各種パラメータとの関係を普遍則として整理し、今後の臨海都市再開発の基本プラン策定に資することを目指す。

- (3) ヒートアイランドや汚染質拡散問題に対する適切な CFD の検討

研究の背景で述べたとおり、定常 RANS では、弱風域にヒートアイランド現象や大気汚染物質拡散問題を精度良く予測することは困難であると予想される。しかしながら、RANS モデルであっても、非定常解析により周期的な渦変動や都市空間における間欠的な息を捉えることができるならば、かなり精度の高い予測ができる可能性がある。そこで様々な RANS モデルによる非定常解析を行い、流れの非定常性と間欠性を再現できるか否かを調査する。さらに LES による解析も行い、それらの予測精度を実験との比較により明らかにする。

4. 研究成果

- (1) 風洞実験と数値解析による建物群の形態が街区内の風通しや気温に及ぼす影響の調査
- (2) 都市再開発の基本プラン策定に資する普遍則の提案

建蔽率、容積率、建物高さのばらつき等を様々に変化させた市街地風洞実験モデルを作成し、歩行者レベルにおける風速、温度を多数の点で測定した。その結果をまとめると以下ようになる。

- ① 建物高さが一様である場合には、グロス建蔽率が小さいほど、街区内歩行者レベルにおける空間平均風速は大きくなり、空間平均気温は低下する。
- ② 建物高さが一様である場合には、グロス容積率が変わっても、街区内歩行者レベルにおける空間平均風速も空間平均気温もほとんど変わらない。
- ③ 建物高さにばらつきがある場合には、特に

建物背後や街区下流域での風通しが大きく改善され、気温も低下する。

④建物高さにばらつきがある場合やポディウムがある場合のように、街区内の上下方向で大きく建物群の形態が変わる場合であっても、筆者らが新たに提案した「高さ方向平均グロス建蔽率」を用いれば、街区内の平均的な風通し(空間平均風速)を普遍的に評価することができることが明らかとなった。以下に提案した「高さ方向平均グロス建蔽率」の定義を示し、図1にこの指標を用いて、様々な街区モデルの歩行者レベルにおける空間平均風速を整理した結果を示す。同図よりすべての街区モデル(Case1-Case7)および他の研究者(久保田ら)の街区モデルの実験結果が一本の直線上にほぼ乗っている。このように市街地の建物群の密度や形態によらず、平均的な風通しが一つの直線で整理できることは、都市再開発や大規模な開発行為の初期基本計画を考える上で極めて有用な成果であると思われる。

$$\lambda_{ac} = \int_0^{h_{max}} \lambda(z) dz$$

ここで、

λ_{ac} : 高さ方向平均グロス建蔽率

h_{max} : 街区内の最高建物高さ

$\lambda(z)$: 高さ z における建物群水平断面積が街区全体の面積に占める割合

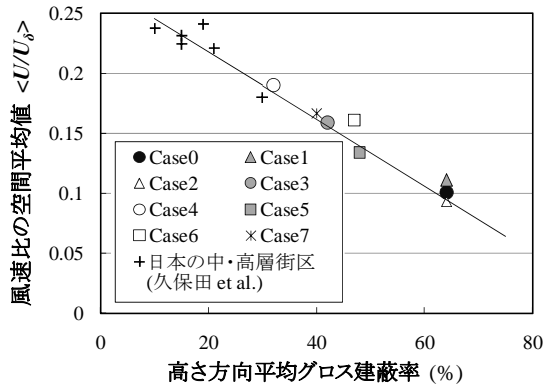


図1 高さ方向グロス建蔽率と街区内部空間平均風速との関係

⑤さらに、この高さ方向平均グロス建蔽率と空間平均温度との関係を調べると図2のようになる。建物高さにばらつきのあるCase5とCase6の空間平均温度は他の実験ケースの結果を通る直線よりもかなり下方に位置しており、街区内の気温が低いことがわかる。これは建物高さのばらつきにより、上空の冷たい気流が地上付近にまで輸送されるとともに、地上付近の熱が効果的に上空へ排出されているためであり、ヒートアイランド現象に対して「鉛直方向の風の道」を考慮することの重要性がここからも確認できる。

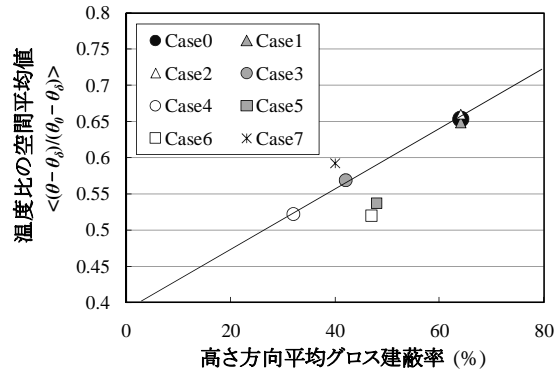


図2 高さ方向グロス建蔽率と街区内部空間平均温度との関係

⑥上記の③～⑤で述べたように建物高さにばらつきがある場合に、街区内部歩行者レベルでの風通しが向上し、気温が低下する理由をより明確にするために、トレーサガスをを用いて街路空間コントロールボリューム界面での風速と濃度の同時測定を行い、建物群の形態が移流フラックスや乱流拡散フラックス等に及ぼす影響について分析した。実験は建物高さが一樣な街区と建物高さにばらつきのある街区について行ったが、両ケースともに、主に街区コントロールボリュームの風下面から移流フラックスによってガスが排出されていることがわかった。しかし、両ケースの鉛直方向のフラックスが占める割合を比較すると建物高さ一樣のケースでは鉛直方向の移流濃度フラックスも乱流拡散濃度フラックスも非常に小さく、ガスのほぼ全てを下流の街区へ排出しているのに対して、建物高さにばらつきがあるケースでは移流濃度フラックス、乱流拡散濃度フラックスともに10数%、合わせて約30%という割合を占めた。このように上空にも3割程度ガスが排出されており、建物高さのばらつきにより、鉛直方向の移流や乱流拡散が促進されていることが明らかとなった。

⑦さらに実験では捕らえきれない鉛直方向を含む3次元的な風の道の詳細な輸送構造を明らかにするために、LESによる解析を行った。その結果、建物高さにばらつきがある街区では、高層建物の風上壁面近傍で強い下降流が生じ、その前方のストリートキャニオン内において鉛直方向の運動量輸送が活発に行われていて、これは主として移流によるものであることが確認された。また、鉛直方向の運動量輸送が活発に行われる高層建物の風上側ストリートキャニオン内では、平均運動エネルギー、乱流エネルギーともに大きな値を示し、市街地上空では、全運動エネルギーに対して平均運動エネルギーが支配的なのに対し、市街地内部では、乱流エネルギーが支配的であることがわかった。

(2) ヒートアイランドや大気汚染質問題に対する適切な CFD の検討

① 単体建物後方の流れ場、拡散場、温度場

建物後方の弱風域における CFD 解析の精度を検討するために、図 3 に示すように乱流境界層流に置かれた建物モデル後方の流れ場、温度場、濃度場に関する風洞実験と CFD 解析を実施し、両者の比較検討を行った。実験では建物後方の床面に孔を設け、ここからトレーサーガスを排出させている。風速の測定には逆流の検出が可能な Split film を用い、トレーサーガスの濃度の測定には水素炎式高速炭化水素計を用いた。実験と CFD 解析は等温の場合と非等温の場合について行ったが、ここでは等温の結果を報告する。

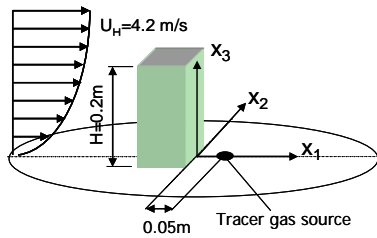
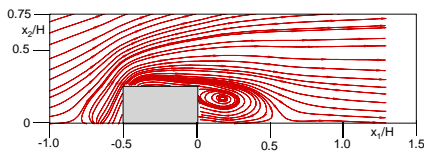
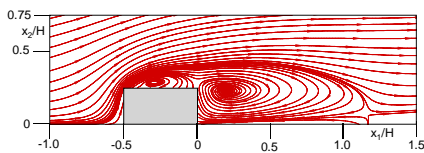


図 3 対象モデル

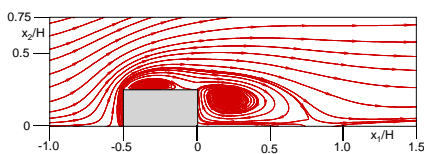
標準 $k-\epsilon$ モデル、RNG $k-\epsilon$ モデル、LK モデル、Realizable $k-\epsilon$ モデル、Durbin モデル、 $V2-f$ モデル、応力方程式モデル (RSM) 等、様々な RANS モデルを用いて非定常解析を行ったが、いずれのモデルも周期的な渦を再現することはできなかった。その結果、建物後方循環流域の大きさが実験よりもかなり大きくなる結果となった。一方、LES による解析結果は、周期的な渦を再現され、後方循環流域の大きさも実験に近いものとなった。流線の水平分布の例を図 4 に示す。



(a) 風洞実験



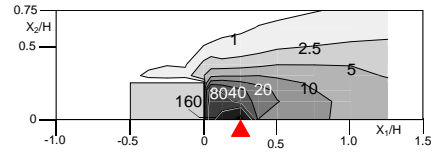
(b) RSM



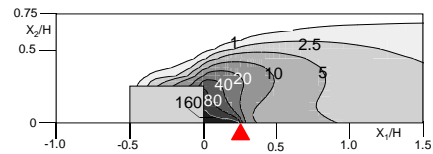
(c) LES

図 4 地表面近傍の流線の水平分布

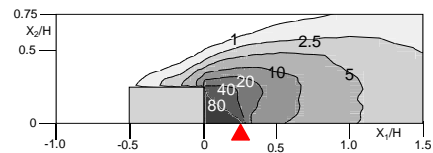
図 5 には地表面近傍におけるガス濃度の水平分布の例を示す。予想に反し、拡散場に関しては、RANS モデルでも LES と大差なく実験と概ねよい対応を示すことがわかった。



(a) 風洞実験



(b) RSM



(c) LES

図 5 地表面近傍のガス濃度の水平分布

② 街区内の流れ場、拡散場、温度場

前記 (1) (2) で述べた市街地モデルを対象として、様々な RANS モデルを用いて CFD 解析を行い、実験結果との比較を行った。その中で唯一 RNG $k-\epsilon$ モデルによる計算では、ゆっくりとした風速変動が生じた。図 6 に RNG $k-\epsilon$ モデル、標準 $k-\epsilon$ モデルを用いた非定常解析結果と実験結果を示す。多数の測定点の風速の確率密度分布を示したものである。風速変動が生じなかった標準 $k-\epsilon$ モデル ($U-STD$) は、実験 (Exp) と比べて、低い風速の点が多く分布は低風速側に偏っている。これに対し風速変動が生じた RNG $k-\epsilon$ モデル ($U-RNG$) は高風速の点が多くなり、実験に近い確率分布になっている。このように RANS モデルでも非定常性を再現できれば、かなりの予測精度向上が期待できることが明らかとなった。

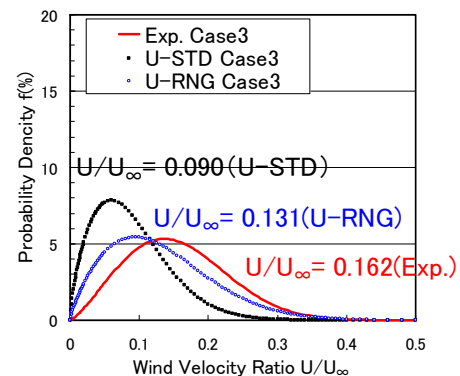


図 6 街区内の風速の確率密度分布

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① 田中英之、義江龍一郎、白澤多一、栗田剛、小林剛、逆流を伴う非等温流れ場における風速・温度・濃度の同時測定方法、日本建築学会環境系論文集、628 号、799-806、2008、査読有り
- ② 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、627 号、661-667、2008、査読有り
- ③ 白澤多一、遠藤芳信、義江龍一郎、持田灯、田中英之、高層建物後流弱風域におけるガス拡散性状に関する LES と Durbin 型 $k-\epsilon$ モデルの比較、日本建築学会環境系論文集、627 号、615-622、2008、査読有り
- ④ 義江龍一郎、都市形態と風通しに関するレビュー (特集 都市の風通し)、日本風工学会誌、33 巻 4 号、313-320、2008、査読無し
- ⑤ 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運度量の移流・拡散と全体の抗力を決定する要因の分析、第 20 回風工学シンポジウム論文集、103-108、2008、査読有り
- ⑥ R. Yoshie、A. Mochida、Y. Tominaga、H. Kataoka、K. Harimotoe、T. Nozu、T. Shirasawa、Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the Architectural Institute of Japan, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 95, 1551-1578, 2007、査読有り

日本建築学会環境系論文集へのアクセス
<http://www.aij.or.jp/jpn/search.htm>

風工学シンポジウム論文集へのアクセス
<http://www.jstage.jst.go.jp/browse/kazekosymp/-char/ja/>

[学会発表] (計 26 件)

- ① 田中英之、義江龍一郎、白澤多一、小林剛：香港の高層密集市街地における風通しに関する研究 (その 2) 建物高さにばらつきがある街区内の歩行者レベル平均風速の評価指標、日本建築学会大会学術講演梗概集、929-930、2008. 9
- ② 森遊希、義江龍一郎、小林剛、田中英之、白澤多一：香港の高層密集市街地における風通しに関する研究 (その 3) 密集市街

地における局所領域界面での移流および乱流拡散濃度フラックス、日本建築学会大会学術講演梗概集、931-932、2008. 9

- ③ 梅澤大輔、義江龍一郎、田中英之、小林剛：香港の高層密集市街地における風通しに関する研究 (その 4) 街路空間内を拡散するガスの歩行者レベルにおけるピーク濃度の性状、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 933-934、2008. 9
- ④ 小林剛、白澤多一、田中英之、義江龍一郎、持田灯：弱風領域を対象とした流れ場・温度場・拡散場に関する風洞実験と数値解析 (その 6) 各種改良型 $k-\epsilon$ モデル、応力方程式モデル、LES による拡散場の比較、日本建築学会大会学術講演梗概集、955-956、2008. 9
- ⑤ R. Yoshie、H. Tanaka and T. Shirasawa、Experimental Study on Air Ventilation in a Built-up Area with Closely-Packed High-Rise Buildings, The 4th International Conference on Advances in Wind and Structures, CD-ROM, 2008. 5、Jeju, Korea
- ⑥ T. Shirasawa、R. Yoshie、T. Tanaka、T. Kobayashi、A. Mochida、Y. Endo、Cross comparison of CFD results of gas diffusion in weak wind region behind a high-rise building, Proceedings of The 4th International Conference on Advances in Wind and Structures, CD-ROM, 2008. 5、Jeju, Korea
- ⑦ R. Yoshie、H. Tanaka and T. Shirasawa、Simultaneous Measurement of Fluctuating Concentration, Velocity and Temperature in Non-isothermal Flow, Proceedings of the 12th International Conference on Wind Engineering, 1399-1406, 2007. 7, Cairns, Australia

6. 研究組織

(1) 研究代表者

義江 龍一郎

東京工芸大学・工学部・建築学科・教授

(2) 研究分担者

白澤 多一

東京工芸大学・大学院・工学研究科 特別研究員 (SPD)

(3) 連携研究者

田中英之

2007 年度は研究分担者：東京工芸大学・大学院・工学研究科 特別研究員 (SPD)。

2008 年度は下記機関に就職のため、連携研究者に変更。

竹中工務店・技術研究所・研究員