

平成 28 年 6 月 23 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420117

研究課題名(和文)大規模乱流中に形成されたストリートキャニオン内の物質拡散に関する風洞実験

研究課題名(英文)Wind Tunnel Experiments on Mass Diffusion in a Street Canyon in Large-Scale Turbulent Flows

研究代表者

関下 信正 (Sekishita, Nobumasa)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70283489

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：都市の風環境問題であるストリートキャニオン現象は、ビル間に挟まれた大通り上空に大気汚染物質や熱が滞留する現象であり、本研究の目的は、大気乱流風洞を用い、ストリートキャニオンの流れ場、および、大通り表面の冷却効果、大通り上空の汚染物質の拡散機構を解明することである。

(1)乱流レイノルズ数が大きい場合、乱流運動によって大通り表面はより冷却され、汚染物質はより拡散される。(2)道路幅よりも建物高さが低い場合、乱流運動を伴った横風がキャニオン内の物質拡散に与える影響が大きい。(3)道路幅と建物高さが同程度の場合、キャニオン内の循環流によって汚染物質が高濃度で滞留する。

研究成果の概要(英文)：The present research aims to investigating flow structures, the cooling effects of street surface and mass diffusion in a street canyon which is phenomena of air pollution, heat and mass transfer over a street located between buildings. An atmospheric wind tunnel with an active turbulence generator was used for it. (1) For higher turbulence Reynolds number, street surface temperature more drops and atmospheric pollutants more diffuse by turbulent motions. (2) In the case of the building height which is shorter than the street width, cross flows with turbulent motions strongly effect on mass diffusion in the street canyon. (3) In the case of the building height which is almost same as the street width, air pollutants with high density stagnate by circulation flow in the street canyon.

研究分野：流体力学

キーワード：乱流 せん断流 境界層 渦 流れの制御 風環境 風洞実験 流れの計測

### 1. 研究開始当初の背景

近年、都市部におけるストリートキャニオンやヒートアイランド現象は深刻な風環境問題であり、都市の大気汚染の評価および対策は重要な課題の一つになっている。

ビルを含めた都市の風洞実験や数値計算は数多く行われているが、大気中での熱流体現象を研究対象とした従来の風洞実験における最大の問題点として、(1)実在する大気乱流のように、乱流レイノルズ数 $R$ が大きく、エネルギースペクトル中の慣性小領域が広く、大小様々な乱流渦を有する大規模乱流を通常規模の風洞で実現することは不可能であり、また、(2)物質拡散の詳細な計測が困難であることなどが挙げられる。そのために、従来の風洞実験で、都市の風環境に関する熱・物質拡散の評価および予測を行うには十分ではなく、理論検証や乱流モデルの開発においても十分に役立つものとは言い難い。

本研究代表者はこれまでに当該研究計画に関する一連の風洞実験を進展させ、また、計測および可視化手法の開発を行ってきた。上記(1)については、大気乱流風洞を開発・使用し、大気境界層中の熱混合・拡散現象を正確に再現することに成功した。この実験をさらに発展させて風環境の標準データを社会に提供するため、この流れ場を大規模かつ緻密に計測することが必要であり、上記(2)で述べたように、都市の風環境に関する物質拡散データを提供するためには、汚染物質の濃度計測が必要であり、本研究を計画した。当該研究では、(1)従来の風洞実験では不可能であった大規模乱流中の建物周りの流れ場を可視化するとともに、濃度場を把握し、環境・防災に役立つ標準データとなり得る信頼性の高い実験データを提供することを目指す研究である。

### 2. 研究の目的

ストリートキャニオン現象は、ビルの中に挟まれた大通り上空に大気汚染物質や熱が滞留する現象であり、当該研究では、従来の風洞では不可能な大規模乱流場を風洞中に形成することによって、ストリートキャニオンの流れ場、および、大通り表面の冷却効果、大通り上空の汚染物質の拡散機構を解明することを目的としている。

### 3. 研究の方法

本研究では吹出し型風洞を使用し、縮流胴と測定胴の間に動的乱流発生装置または乱流格子(格子間隔 $M=10\text{mm}$ )を設置した。動的乱流発生装置には、水平および垂直方向回転軸( $M=50\text{mm}$ )に多数の拡散翼が取り付けられており、各回転軸が平均迎え角( $=0^\circ$ )を中心に最大触れ角( $=\pm 90^\circ$ )内をランダムに反転(回転速度 $1\text{ rps}$ )させた。

都市において平均速度の鉛直方向分布は $1/4$ べき乗則に従うことから、測定胴入口か

ら流れ方向 $1420\text{mm}$ までの全域にわたって壁面に粗度を敷き詰めた。

測定胴入口から $1440\text{mm}$ 下流の測定胴床面をストリート(幅 $W_s=20, 30, 60, 80\text{mm}$ )とし、建物模型はストリートの幅方向両側の風上側( $U$ )・風下側( $D$ )に設置した(図1)。2次元建物モデル Type1, 2, 3, 4 は水平断面 $20 \times 200\text{mm}^2$ 、建物高さ $H_U=20, 40\text{mm}$ 、 $H_D=20, 40\text{mm}$ であり、3次元建物モデル Type5, 6, 7, 8 は水平断面 $20 \times 20\text{mm}^2$ 、スパン方向建物間隔 $20\text{mm}$ 、 $H_U=20, 40\text{mm}$ 、 $H_D=20, 40\text{mm}$ である。

ストリートの材質はステンレス箔(厚さ $80\ \mu\text{m}$ )であり、通電加熱することによって、無風時のストリート表面の温度を $40 \pm 3$ に設定し、熱画像カメラ(温度分解能 $0.1$ )を用いて、通風時のストリート表面の温度分布を計測した。

上述したストリートの表面には、排気ガス(汚染物質)を模擬した煙の注入用スリット(幅 $1\text{mm}$ )を1本( $W_s=20, 30\text{mm}$ )または2本( $W_s=60, 80\text{mm}$ )設けた。煙の注入流量は、2次元建物である Type1~4 では $8\text{ liter/min}$ 、3次元建物である Type5~8 では $10\text{ liter/min}$ とし、高速度カメラ( $100\text{ frame/s}$ )およびレーザーシート光( $\text{Nd:YAG/YVO}_4$ )を用いて、煙の拡散現象を観察した。撮影された煙の画像は $256$ 階調で記録されており、ピクセル毎の煙の濃度が濃度 $c$ と比例すると仮定して、各ピクセルについて平均を求めた後、 $3$ ピクセル $\times 3$ ピクセルの平滑化処理をして、相対濃度 $0 \sim 100\%$ を算出した。

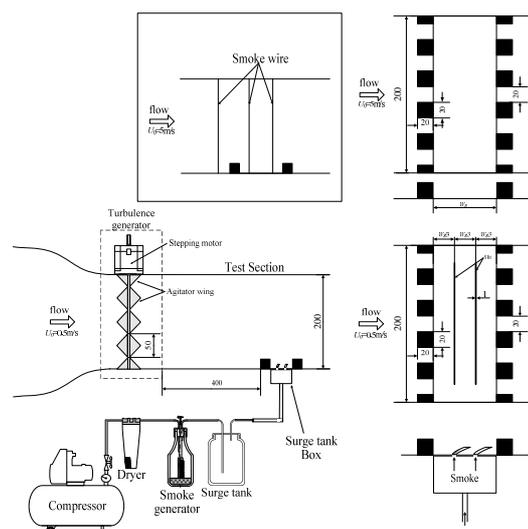


図1 実験装置

### 4. 研究成果

流れ場が加熱路面の冷却に及ぼす影響に関して、大規模乱流場と格子乱流場の違いが顕著である Type 5 ( $W_s/H_D=3$ )の可視化写真、および、それに基づく流れ場の模式図を図2に示す。大規模乱流中では乱流運動を伴い上下に運動する循環流や、風上側建物屋上角部からの非定常はく離流が加熱ストリートを均一的に冷却する。一方、格子乱流中では、風上側建物屋上角部からののはく離流

(再付着点がほぼ固定) および、風下側建物前面に循環流が定在し、これらの流れによって加熱路面は局所的に冷却される(図3)。建物の高さ・配置が冷却におよぼす影響について、風下側建物が風上側建物より高い場合、風上側建物屋上部を通過した流れが、風下側建物前面に沿って、風下側建物上部へ上昇する流れと、建物下部へ下降する平均流に分かれ、下降した流れが冷たい空気を伴う循環流となり、ストリート風下側を冷却する。ストリート幅  $W_s$  がストリートの冷却に及ぼす影響について、大規模乱流中のストリート幅が広い3次元モデルの場合( $W_s/H_b=3$ )、主な流れ場は、風上側建物背面に存在して乱流運動を伴う循環流、風上側建物屋上角部で剥離して、ストリート表面へ再付着する流れと建物間を通過する平均的な流れであり、特に、 $H_u/H_b$  が冷却に大きく影響し、格子乱流中では変動しないはく離流、建物間を通過する流れが路面の冷却に影響した。一方、ストリート幅が狭い場合( $W_s/H_b=1$ )、3次元モデルでは風上・風下建物間にストリート幅程度の定在する循環流と建物間を通過する流れによる流れ場が存在し、これらの流れによってストリート全域にわたって均一的な冷却となった。この傾向はストリート幅が広い場合と比較して、乱流場に依存しない。

図4に、ストリートキャニオン内の煙(排気ガス)の相対濃度  $c$  [%] を示す。ストリート幅よりも建物高さが低い場合、建物の配置に大きく依存せず、大規模乱流中では格子乱流中よりもキャニオン内の濃度は低下する。特に、風上側建物の背後において、この傾向は顕著である。これは、大規模乱流場の場合、風上側建物屋上角部からの非定常はく離流、および、乱流運動を伴い上下に運動する循環流によって、キャニオン内の排気ガスがより拡散されるためである。一方、格子乱流中では、定在している循環流のために、煙の濃度は比較的高くなるためである。

ストリート幅が広く、風上および風下側建物高さがともに低い3次元建物模型(Type5)では、乱流運動を伴う平均流や循環流、建物間を通過する流れ、風上側建物背後に回り込む流れにより、最も物質拡散が活発に行われた(図5(b))。また、ストリート幅が広く、風上側建物高さが風下側建物高さよりも高い場合(Type7)、風上側建物屋上角部からの非定常はく離流に加え、風上側建物間を通過する際に増速する平均的な流れ(ビル風)の影響が顕著になり、Type5と同様に物質拡散が活発に行われた(図5(c))。格子乱流中では、キャニオン内の流れの大部分は定常的な循環流や平均流であり、建物模型Type4の場合、大規模乱流中では、非定常な風上側建物屋上角部のはく離流の影響を受けた風下側建物前面の循環流が現れ、そこに物質が循環、滞留した。

一方、建物高さがストリート幅と等しい場合、乱流場にあまり依存せず、主流(横風)が

建物の上部を流れ過ぎてしまい、換気がされにくくなるとともに、風上側および風下側建物に挟まれた定在する循環流によって汚染物質がキャニオン外部へあまり排出されなくなり、キャニオン内での汚染濃度が高くなる。特に、ストリート幅が狭く、風上側および風下側建物高さが高い2次元建物模型(Type4)の場合、キャニオン内部の物質拡散

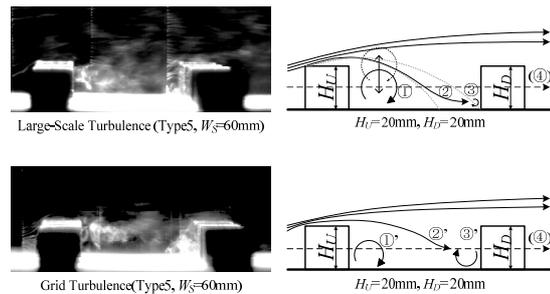


図2 ストリートキャニオン中の流れ場

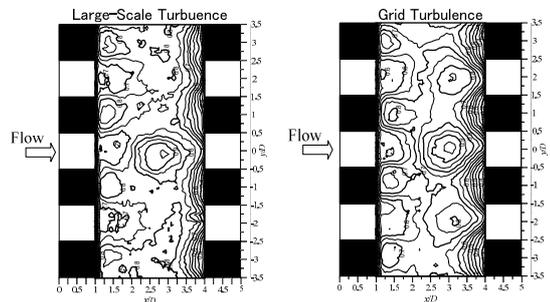


図3 ストリート表面の温度分布  
( - min)/( max - min)  
 $U_0=5m/s$ , Type 5

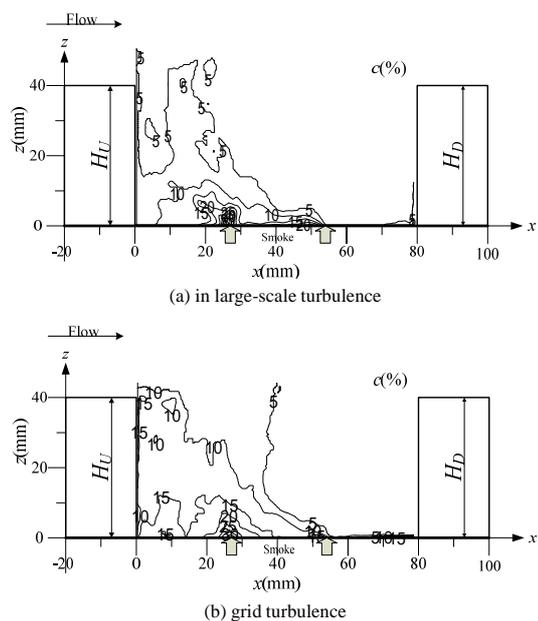


図4 濃度分布

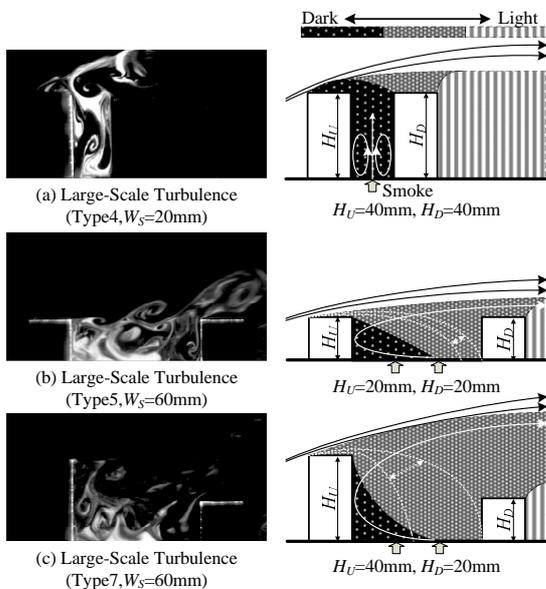


図5 汚染物質の拡散機構  
 $U_D=0.5\text{m/s}$ ,  $U_S=0.75\text{m/s}$

は、乱流運動を伴う主流の影響を受けにくく、キャニオン内に発生する循環流によって汚染物質がキャニオン内に停滞し続け、その結果、汚染物質の滞留が最も顕著である(図5(a))。

本研究を実施した結果、次の結論を得た。  
 (1)ストリートキャニオン内の流れ場の構造について、風上側建物上面から剥離した流れ、風上側建物間を通過してキャニオン内に流れ込む流れ、キャニオン内に発生する循環流、乱流運動によって風上側建物背後に大きく回りこむ流れで主に構成されている。(2)乱流レイノルズ数が大きい場合、乱流運動によって大通り表面はより冷却され、汚染物質はより拡散される。(3)道路幅よりも建物高さが低い場合、乱流運動を伴った横風がキャニオン内の物質拡散に与える影響が大きい。(4)道路幅と建物高さが同程度の場合、キャニオン内の循環流によって汚染物質が高濃度で滞留する。(5)風下側建物よりも風上側建物が高い場合、その反対の建物配置よりも、キャニオン内の濃度は一様な分布になる。

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計5件)

(1)関下信正、榊田泰弘、ストリートキャニオン内に拡散する排気ガスの風洞実験(大規模乱流中と格子乱流中の比較)、日本機械学会東海支部第63期総会講演会、2014年3月19日、大同大学

(2)関下信正、動的乱流発生装置を用いたストリートキャニオンの風洞実験、日本機械学会せん断流研究分科会、2014年5月11日～2014年5月12日、東洋大学熱海研究センタ

(3)N. Sekishita, Wind Tunnel Experiments of Exhaust Gas Dispersed in a Street Canyon (Effects of Large-Scale Turbulent Motion), Annual Conference of Indonesia Society of Mechanical Engineering, 2014年10月15日, Indonesia University

(4)関下信正、内方一平、ストリートキャニオンに関する風洞実験(加熱ストリート表面の温度分布および流れの観察)、日本機械学会東海支部第64期総会講演会、2015年3月14日、中部大学

(5)関下信正、内方一平、武藤慎太郎、都市のストリートキャニオンに関する風洞実験(排気ガスの拡散機構)、日本機械学会2016年度年次大会、2016年9月11日～2016年9月14日、九州大学

〔その他〕  
 ホームページ等  
<http://wind.me.tut.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

関下 信正 (SEKISHITA Nobumasa)  
 豊橋技術科学大学・工学部・准教授  
 研究者番号：70283489