建物壁面の加熱がストリートキャニオン内の 流れに及ぼす影響に関する実験的検討 EXPERIMENTAL STUDY OF WALL HEATING EFFECTS ON FLOW IN STREET CANYONS

佐藤 歩1・瀧本浩史2・道岡武信3 Ayumu SATO, Hiroshi TAKIMOTO and Takenobu MICHIOKA

¹正会員 工修 (財)電力中央研究所 大気・海洋環境領域(〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)
²学生会員 東京工業大学 理工学研究科国際開発専攻(〒152-8552 目黒区大岡山二丁目12-1)
³正会員 工博 (財)電力中央研究所 大気・海洋環境領域(〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

A series of wind tunnel experiments were conducted to determine the impact of wall heating on the air flow by measuring wind velocities and temperature fields within street canyons with aspect ratios of 1.0. The approach flow was perpendicular to the axis of the canyon, and wind velocities were measured by particle image velocimetry. To examine the effects of wall heating on the canyon flow, three free stream wind velocities and three different heating conditions (neutral, leeward-wall-heated, and windward-wallheated) were considered. In the leeward-wall-heated case, a large-scale updraft occurred within the canyon due to the effects of along-canyon flow. In the windward-wall-heated case, a clockwise vortex and a secondary counterclockwise vortex similar to those predicted using numerical models were observed at a high Richardson number.

Key Words : Street canyon, wall heating, canyon vortex, wind tunnel experiment, PIV

1. はじめに

自動車からの排気ガスの大気拡散を対象に数多くの実 験や数値解析が行われてきた^{1), 2)}.一般に、両側に建物 が立ち並んだ道路上空の空間はストリートキャニオンと 呼ばれ3,その内側の流れ場や大気拡散は建物による直 接的な影響を強く受ける.これまで、建物高さや道路幅、 屋根面勾配などのキャニオン形状の影響について、室内 実験や数値シミュレーションにより幅広い検討が行われ ている^{4,5}.キャニオン内の流れおよび拡散に影響を及 ぼす要因としては、キャニオン形状の他にも日射による 道路面や建物壁面加熱の効果が考えられる⁶. 上原ら^{7),8)} は、風洞内に様々な温度成層を再現した実験を行い、地 面が加熱された不安定成層中ではキャニオン内の循環流 れが強められ、汚染物濃度が低下することを明らかにし た. Kovar-Panskus et al.⁹は、2次元のストリートキャニ オン模型を用いた風洞実験より,壁面と気流の温度差が 拡大するにしたがい、キャニオン内の流れ場が変化する ことを示した. 一方, Sini et al.¹⁰は, CFDモデルを用い て日射による建物壁面の加熱を模擬した数値シミュレー

ションを行った. その結果, 日射の影響が無い場合には キャニオン内に時計回りの循環渦が一つだけ形成される (上空の気流がキャニオン左から右に向かって直交に吹 いた時)のに対し、キャニオン風下側建物の壁面(気流 に対しては風上に向いた面)が加熱された場合には、加 熱壁面近傍において熱浮力に起因する上昇流が生じるこ とにより、複数の反時計回りの渦が合わせて形成される ことを示した. その後, Kim and Baik^{11), 12)}やXie et al.^{13), 14)} によって同様の数値シミュレーションが実施され、いず れの計算においても加熱条件によってはキャニオン内に 複数の渦が形成されることが確認されている. これに対 し、Kovar-Panskus et al.⁹の実験では、流れ場が変化する ことは確認されたものの、壁面近傍での熱浮力にともな う上昇流や反時計回りの渦など、数値シミュレーション で再現されたような特徴は確認されなかった.数値シ ミュレーションと風洞実験で異なった流れ場が再現され た原因として、計算における格子解像度の不足¹⁵⁾や実験 における計測点と壁面間距離の影響⁹が指摘されている. すなわち、壁面加熱がキャニオン内の流れ場に及ぼす効 果を適切に評価するためには、計算,実験ともに壁面近 傍に形成される薄い温度境界層内で生じる上昇流を捉え

ることが重要となる.そこで、本研究では、内部にシリ コンラバーヒータを貼り付けた建物模型を用いた風洞実 験を行い、キャニオン内の流れ場および温度場をPIVと 熱電対により壁面近傍まで詳細に計測し、風速および加 熱面の向きがキャニオン内流れに及ぼす影響について検 討した.

2. 実験概要

(1) 実験装置と実験方法

実験は(財)電力中央研究所に設置されている水平二 風路回流式温度成層風洞(Twinned Wind Tunnel: TWINNEL)の第2試験セクション(測定部高さ1.0m×幅 1.0m×長さ10m)¹⁶⁾をエッフェル型風洞として使用して 行った.風路内に都市上空の大気境界層を模擬するため, 粗度(ラフネス)として測定洞入口より6.12mの風下位 置まで一辺が75mmのスタイロフォーム製の立方体ブ ロックを75mm間隔で一様に敷き詰めた(建坪率25%, 図-1).使用したブロックの数はスパン方向に5列,風 下方向に41列の計205個である.ストリートキャニオン

下方向に41列の計205個である.ストリートキャニオン 模型は、高さHおよび奥行きDがいずれも120mm、見付 け幅Lが720mmで、最も風下側のラフネスブロックの背 面から160mm後方(風下位置6.28m)に模型前面が気流 に対して直角となるように設置した.風上側と風下側の 建物間距離Wは、建物高さと同じ120mmである(アスペ クト比H/W=1.0).なお、流れ場の急激な変化を避ける ため、計測対象としたストリートキャニオンの後方にも ラフネスブロックを5列分設置した.風路内には、2次流 の影響を防ぐため、高さ700mmの透明の端板(二重壁) を風洞入口より風下8m付近まで設置した.風洞側壁と 二重壁の間隔は65mmである.したがって、本実験にお ける風路の幅は870mmであり、ストリートキャニオンの 両側には二重壁との間に左右それぞれ75mmの間隙があ る(図-2).

ストリートキャニオン内の流れの計測には、粒子画像 流速測定法(PIV)¹⁷⁾を用いた.レーザシートの照射に は、NEW WAVE RESEARCH社製のNd:YAGレーザ(出 力120mJ,波長532nm)を用い、煙発生器(SAFEX-CHEMIE社製FOG2010)より風路内に添付したシーディ ング粒子(平均粒径1.0µm)に天井面よりレーザを照射 し,試験セクションの外側からCCDカメラ (1344×1024pixel)による撮影を行った.PIVの計測範囲 は主流方向に310mm,鉛直方向に236mm(検査領域 7.4mm×7.4mm)である.レーザのシート厚は約3mm, カメラレンズは焦点距離60mm(絞りF2.8)のものを用 い、画像撮影はキャニオンのスパン方向中央断面で行っ た(図-3).サンプリングは撮影間隔2.5msecの2枚の画 像を1秒間に4組撮影する計測を180秒間行い、合計720枚 の画像より各ピクセルの平均風速を算出した.気流温度





図-3 PIV計測の様子

は櫛形のプローブに取り付けた20本の銅-コンスタンタ ン型熱電対(フッ素樹脂絶縁,導体の直径は0.32mm) をデータロガー(江藤電気株式会社製,キャダック2) に接続して0.5Hzで180秒間の計測を行った.なお,気流 温度の測定は流れ場と同様にキャニオンのスパン方向中 央で行った.温度計測を行った鉛直断面の位置は,壁面 から5,15,30,60,90,105,115mm離れた計7断面である. 測定座標系はキャニオン風上側建物の背面のスパン方向 中央と風洞床面の交点を原点として,流れ方向にx,鉛 直方向にzとした.

(2) 加熱建物模型

ストリートキャニオンを模擬する建物模型は、床面を 除く5面から構成される中空の直方体ブロックである. 壁面に相当する模型表面のうち一面を加熱できる構造と するため、加熱面にはアルミ板、非加熱面には耐熱性に 優れた熱硬化性樹脂を使用した(図-4).加熱面の内側 にシリコンラバーヒータを貼り付け、熱輻射の影響を抑 えるため、表面は鏡面加工仕上げとした.表面温度の一



図-4 加熱建物模型



図-5 ストリートキャニオン壁面の定義

様性を確保するためシリコンラバーヒータの周辺部(幅 20mmの範囲)は中央部に比べて配線パターンが1.2倍密 となるよう配線した.温度の制御は,通信機能付き温度 調整器を使用して行い,専用の温度制御用ソフトウェア を用いてパソコンによりヒータ温度の監視および温度制 御が可能である.ただし,模型表面に風洞気流が当たる ことにより建物表面の温度が内部のヒータ温度より低下 する恐れがあるため,実験時には建物模型の加熱面に直 接熱電対を貼り付けて表面温度を監視し,一定の温度を 保った状態で実験を行った.表面温度の監視には気流温 度の計測に用いたものと同じ銅ーコンスタンタン型熱電 対を使用し,耐熱アルミテープにより建物表面に貼り付 けた.

(3) 実験条件

実験は風洞の基準風速(以下,風洞風速),壁面加熱 の有無,加熱面の向き(風下面もしくは風上面)を変化 させて行った.風洞風速U_∞は,境界層上空z=480mmに おいてU_∞=0.65m/sを基本ケースと設定し,U_∞=1.3,2.6m/s の計3ケースを設定した.ストリートキャニオン模型は 図-1に示すとおり,風洞入口から6.28m下流位置に風上 側の建物長辺が気流に対して直角になるように設置した (以下,風上側建物の風下面をleeward面,風下側建物の 風上面をwindward面と称す(図-5)).壁面加熱の設定 は,(1)leeward面,windward面とも非加熱,(2)leeward面 のみ加熱,(3)windward面のみ加熱の3ケースとした. ケース(2),(3)の壁面加熱温度はいずれも170℃に設定し た.次式により求められる壁面と気流の温度差を基準と した相似パラメータであるバルクリチャードソン数R^{i¹⁸} は,風洞風速に応じてそれぞれ1.42,0.36,0.089となる.

$$Ri = \frac{gH(T_w - T_w)}{U_w^2 \cdot T_w}$$
(1)



図-6 PIV計測によるキャニオンの平均流れ場 (Ri=1.42)

ここで、Ri: バルクリチャードソン数, g: 重力加速度(m/s²), $H: 建物高さ(m), T_w: 壁面温度(K), T_{\infty}: 上空の$ 気流温度(K), $U_{\alpha}: 風洞風速(m/s)$ である.なお、本実験 で使用した風洞実験設備は室内回流式であり、外部の温 度変化を受けにくい構造となっているが、気流温度の微 少な変動により上記の相似パラメータが変化することを 考慮し、全ての実験において風洞気流および床面の温度 を温度成層装置により20℃一定に制御して実験を行った.

3. 実験結果と考察

(1) キャニオン内の平均流れ場

図-6に風洞風速U_∞=0.65m/sにおける非加熱時および加 熱時(*Ri*=1.42)の平均風速ベクトル,流線および鉛直 方向の平均速度分布を重ねて示す.非加熱時には,キャ ニオン内には大きな一つの循環渦が形成されており,典 型的なskimming flow¹⁹となっている. leeward面加熱時に は,windward面に近いx/H=0.9の高さz/H=0.75付近を中心 とした時計回りの循環渦が形成されるが,残りのキャニ オン全体では地表から上空に向かう上昇流が支配的と なっている.これまで数値シミュレーションにより同様 のleeward面加熱による影響を検討した例では,いずれも キャニオン内には非加熱時に見られる単一の循環渦と良 く似た流れ場が再現されており,leeward面加熱による影 響は循環渦の強さが増すのみであると報告されている^{10,} ^{11,13}.これらの数値シミュレーション結果に比べて,本 研究で得られたleeward面加熱時のキャニオン内流れ

(図-6(b))は非加熱時の流れ場(図-6(a))と大きく異なっており、キャニオン全体で上昇流が卓越する特徴的な流れ場となっている.この原因の一つとして、キャニ



オン両側からキャニオン内に進入する横断方向の流れの 影響が考えられる.2.(1)で述べたとおり、本研究で実 施した風洞実験ではキャニオン建物と風路内に設置した 二重壁との間に間隙があり(図-2),キャニオン内には 上方だけでなく側方を通過した流れが進入する.一方, 従来の数値シミュレーションはいずれもスパン方向に十 分な長さを有する2次元のストリートキャニオンを対象 としており、キャニオンを横断する方向の流れについて は考慮されていない. leeward 面加熱時には、熱浮力によ り加熱壁面に沿って循環流れと同方向の上昇流が生じる ため、非加熱時とほぼ同様の単一の循環流れが形成され、 かつその速度が増したものと考えられる. これに対し, 本実験ではキャニオンの左右側方より進入する横断方向 流れが、キャニオンのスパン方向中央のleeward面近くで 収束することにより大規模な鉛直上向きの流れが生じ, キャニオン内には3次元性の強い流れ場が形成される. Johnson and Hunter²⁰⁾は、建物高さに比べて見付け幅が十 分に広いキャニオン(L/H=8)では、スパン方向中央付 近において横断方向の流れは生じないことを示した.本 実験で対象としたキャニオンはL/H=6であり、キャニオ ン両端で形成される水平方向の渦にともなう流れがスパ ン方向中央付近で収束し、鉛直上向きの流れが生じる. leeward面加熱時には、熱浮力によりこの上向きの流れが さらに強められることにより,図-6(b)に示すような キャニオン全体で上昇流が卓越した流れ場となる. leeward面加熱時にキャニオン内の上昇流が強められるこ とは立方体ブロックが等間隔で並んだ建物群において壁 面加熱の影響を検討した屋外実験²¹⁾でも確認されている. 一方, windward面加熱時には,加熱面から約10mmの

範囲で高さz/H=0.8付近まで壁面に沿った上昇流が生じ ており, x/H=0.85, z/H=0.5付近を中心に縦長の反時計回 りの渦が形成されている(図-6(c)). この加熱面近く で生じる上昇流が、上空よりwindward面に沿ってキャニ オン内に下降してくる流れを阻害するため、時計回りの 循環渦の中心はキャニオン上端へ移動し、またその大き さは非加熱時に比べて小さい. このように, windward面 加熱時のキャニオン内には時計回りの循環渦と反時計回 りの渦が混在している. windward面加熱時にキャニオン 内に逆回転の渦が合わせて形成されることは、これまで 数値シミュレーション10-14)では報告されていたが、風洞 や水槽を用いた室内実験では確認された例が無い.本研 究で行ったPIVによる壁面近傍を含めた流れ場の詳細計 測より、その存在が初めて実験的に確かめられた.本実 験で得られたwindward 面加熱時(*Ri*=1.42) における縦 長の半時計回りの渦およびキャニオン上方の時計回りの 循環渦は、その形状、位置ともにXie et al¹⁴⁾のRNG k-Eモ デルを用いた計算結果(Ri=1.34)と良く一致している. Xie et al.¹⁴⁾の数値シミュレーションは、2次元キャニオン を対象にしており、風洞実験で同様の流れ場が確認され たことから、windward面加熱時にキャニオン内の横断方 向流れが鉛直方向の流れ場に及ぼす影響はleeward面加熱 時に比べて小さいことがわかる. これは, windward面近 くのキャニオン中央では側方から流入する横断方向流れ の平均速度が小さく、2次元のストリートキャニオンと 同様な流れとなっているためである.

風洞風速U_a=1.3m/sの場合(Ri=0.36), leeward面加熱 時の流れ場は非加熱時と同様に大きな単一の循環流れと なり, Ri=1.42のケースで見られたような大規模な上昇 流は確認されなかった(図-7(a)). 一方, windward面 加熱時にはRi=1.42のケースで見られた反時計回りの渦 は確認されなかったが、加熱面近くの上昇流はRi=0.36 のケースにおいても見られた(図-7(b)).また,時計 回りの循環渦の中心はwindward面の屋根面高さ近くへと 移動していることがわかる.風洞風速がさらに増加した 場合 (Ri=0.089), leeward 面および wind ward 面のいずれ を加熱した場合においても、キャニオン内の流れは単一 の循環流れとなる(図-8(a), (b)). ただし, leeward面 加熱時には循環渦の形状、中心位置ともに非加熱時と類 似しているのに対し, windward 面加熱時には循環流れの 速度は低下しており、渦の中心もキャニオンのやや上方 へと移動している. これはwindward面加熱時には、加熱 による熱浮力の影響がキャニオン内に形成される循環流 れと逆向きに作用するためである.

(2) キャニオン内の瞬時流れ場

非加熱時および壁面加熱時の瞬時流れ場の一例を図-9 に示す.非加熱時のキャニオン内には平均流れ場と良く 似た単一の循環渦が定常的に存在している(図-9(NH-1 ~3)).しかし,渦の中心に着目すると,時間とともに



図-9 キャニオン内の瞬時流れ場 (NH: 非加熱, LH: leeward面加熱, WH: windward面加熱)

その位置が変化していることが分かる.循環渦の位置が 時間とともにキャニオン内を移動することは野外観測²²⁾ やLESを用いた数値解析²³⁾でも報告されており、本実験 結果もそれらと一致した傾向である.一方,壁面加熱時 には非加熱時のような単一の循環流れがキャニオン内に 形成されることは少ない. leeward面加熱の場合, キャニ オン全体で上昇流となる場合(図-9(LH-1))やキャニオ ン内に複数の小さな渦が形成される場合(図-9(LH-2~ 3))が多い.キャニオン内から上空に向かう上昇流は キャニオン屋根面の1.5倍以上の高さまで到達すること もある. この強い上昇流が上空の流れと干渉してキャニ オン内への流入を妨げることにより、平均流れ場におい て形成される循環渦が非加熱時に比べて大幅に小さくな る(図-6(b)). windward面加熱時には、加熱面近傍で 熱浮力による上昇流が定常的に発生し、この上昇流に誘 起された反時計回りの渦が確認できる(図-9(WH-1~ 3)). 上空から壁面に沿ってキャニオン内に進入しよう とする流れはwindward面近くの上昇流に遮られるため、 キャニオン中央の上端付近で時計回りの循環渦が形成さ れる様子が伺える(図-9(WH-1~2)). windward面に 沿った熱浮力による上昇流は屋根面より低い高さで見ら れることが多いが、キャニオン上空の風速が弱まった場 合には、風下側建物の上空までその影響が及ぶこともあ る (図-9(WH-3)) .

(3) キャニオン内の平均温度分布

Ri=1.42のleeward面およびwindward面加熱時における気 流温度Tの分布を図-10に示す. leeward面加熱時には, leeward面近くの建物高さ付近で顕著な温度上昇が見られ, 壁面から5mm離れた位置におけるピーク温度は88.4℃で



ある.壁面の加熱により暖められた空気は、キャニオン 内の循環流れによって壁面に沿って上空へ運ばれるため 気流温度は建物高さでピークを示す.加熱壁面から離れ るにしたがい温度は急激に低下し、キャニオンの中央上 端では35℃前後である.leeward面加熱による気流温度へ の影響は、キャニオン上空の建物高さの1.5倍付近まで 及んでおり、接近流より5~10℃の温度上昇が見られる. 接近流に比べて温度が上昇している上空高さは、瞬時流 れ場において上昇流の到達が確認された高さ(図-9(LH-1))と同程度である.キャニオン内においては、leeward 面の下端からwindward面の上端に向かう対角線上より上 空側で10~15℃の温度上昇域が形成されている.また、 windward面の屋根面高さよりやや低い位置でも温度が上 昇しており、これは平均流れ場で確認された循環渦

(図-6(b))の影響である. すなわち, leeward面近くで 暖められた気流がキャニオン内の上昇流によりキャニオ ン風下上空へ運ばれ, windward面近くで循環渦に連行さ れることにより, windward面の近くでも気流温度が上昇 する. このように, キャニオン内の気流温度分布は平均 流れ場の性状と良く対応している.

windward面加熱時には、気流温度は屋根面よりやや下 方でピークを示し、ピーク温度は80.1℃である.加熱壁 面から離れるにしたがい、leeward面加熱時と同様に、気 流温度は急激に低下する.キャニオン内の温度は、 windward面を底辺とした三角形状に10~15℃の上昇領域 が形成されている.これは、加熱されたwindward面近く で生じた上昇流が上空から壁面に沿って下降する循環流 れとぶつかり、加熱された空気がキャニオン風上側へ輸 送されるためである.キャニオン上空の気流温度は接近 流とほぼ等温であり、leeward面加熱時のような温度上昇 は見られないが、風下側建物近くの上空のみ5~15℃温 度が上昇している.これは図-9(WH-3)に示したように、 キャニオン上空を低速流が通過する場合に、windward面 加熱にともなう上昇流が上空まで到達するためである.

4. おわりに

日射による建物壁面の加熱がストリートキャニオン内

の流れに及ぼす影響を解明するため、風速および加熱面 の向きが異なる条件においてキャニオン内の流れ場、温 度場をPIVと熱電対を用いて壁面近傍まで計測し、壁面 加熱の影響を実験的に検討した.本研究で得られた主要 な結果は以下の通りである.

(1) キャニオン風上側建物の風下面(leeward面)加熱時 には、気流温度は壁面近傍の建物高さでピークを示し、

キャニオンから上空に向かう大規模な上昇流が形成される(*Ri*=1.42).本実験で得られたleeward面加熱時の流れ場は、これまで2次元のストリートキャニオンを対象に行われた数値シミュレーション結果と大幅に異なっており、キャニオン側方から進入する流れがキャニオン内の渦形成に大きな影響を与えていることがわかった.

(2) 風下側建物の風上面(windward面)加熱時には,壁 面近くにおいて熱浮力にともなう上昇流に誘起された反 時計回りの渦が形成される.また,時計回りの循環渦の 中心はキャニオン上方へ移動し,その大きさは非加熱時 に比べて小さくなる(*Ri*=1.42).

(3) leeward面, windward面のいずれの壁面加熱時においても, *Ri*数が減少するにしたがい熱浮力の影響は相対的に小さくなり, キャニオン内の流れ場は非加熱時と類似した単一の循環流れに近づく.

謝辞:本研究の一部は,文部科学省科学研究費補助金基盤研究(B)(課題番号:18360234)による財政的援助を 受けた.ここに謝意を表す.

参考文献

- 近藤次郎:自動車排出ガスによる大気汚染の研究,日本機 械学会誌,第76巻,pp.83-91,1973.
- (2) Vardoulakis, S., Fisher, B.E.A., Pericleous, K. and Gonzalez-Flesca, N.: Modelling air quality in street canyons: a review, *Atmos. Environ.*, Vol.37, pp.155-182, 2003.
- (3) Nicholson S.E.: A pollution model for street-level air, *Atmos. Environ.*, Vol. 9, pp.19-31, 1975.
- (4) Ahmad, K., Khare, M. and Chaudhry, K.K.: Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections –a review, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol.93, pp.697-717, 2005.
- (5) Li, X.-X., Liu, C.-H., Leung, D.Y.C. and Lam, K.M.: Recent progress in CFD modelling of wind field and pollutant transport in street canyons, *Atmos. Environ.*, Vol.40, pp.5640-5658, 2006.
- (6) Kanda, M.: Progress in the scale modeling of urban climate: Review, *Theor. Appl. Climatol.*, Vol.84, pp.23-33, 2006.
- (7) 上原清,村上周三,老川進,若松伸司:温度成層流中のストリートキャニオン内の流れに関するLDVを用いた風洞実験一市街地における汚染物の拡散に関する実験的研究 その2-,日本建築学会計画系論文集,第492号, pp.39-46, 1997.
- (8) 上原清,村上周三,老川進,若松伸司:温度成層流中のス トリートキャニオン内の濃度分布に関する風洞実験-市街

地における汚染物の拡散に関する実験的研究 その3-,日本建築学会計画系論文集,第499号, pp.9-16, 1997.

- (9) Kovar-Panskus, A., Moulinneuf. L., Savory, E., Abdelqari, A., Sini, J.-F., Rosant, J.-M., Robins, A. and Toy, N: A wind tunnel investigation of the influence of solar-induced wall-heating on the flow regime within a simulated urban street canyon, *Water Air Soil Pollut. Focus 2*, pp.555-571, 2002.
- (10)Sini, J.-F, Anquetin, S. and Mestayer, P.G.: Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons, *Atmos. Environ.*, Vol.30, pp.2659-2677, 1996.
- (11)Kim, J.-J. and Baik, J.-J.: A numerical study of thermal effects on flow and pollutant dispersion in urban street canyons, *J. Appl. Meteorol.*, Vol.38, pp.1249-1261, 1999.
- (12)Kim, J.-J. and Baik, J.-J.: Urban street-canyon flows with bottom heating, *Atmos. Environ.*, Vol.35, pp.3395-3404, 2001.
- (13)Xie, X., Huang, Z., Wang, J. and Xie, Z.: The impact of solar radiation and street layout on pollutant dispersion in street canyon, *Build. Environ.*, Vol.40, pp.201-212, 2005.
- (14)Xie, X., Liu, C.-H. and Leung, D.Y.C.: Impact of building facades and ground heating on wind flow and pollutant transport in street canyons, *Atmos. Environ.*, Vol.41, pp.9030-9049, 2007.
- (15)Louka, P., Vachon, G., Sini, J.-F., Mestayer, P.G. and Rosant, J.-M.: Thermal effects on the airflow in a street canyon–Nantes'99 experimental results and model simulations, *Water Air Soil Pollut. Focus 2*, pp.351-364, 2002.
- (16)佐藤歩, 瀧本浩史, 道岡武信:不安定成層流中に置かれた 立方体建物後流の風洞実験, 風工学シンポジウム論文集, pp.121-126, 2008.
- (17)瀧本浩史,佐藤歩,小野村史穂,神田 学:PIVを用いた 乱流計測-屋外模型都市と室内模型都市の相互比較-,土 木学会水工学論文集,第53巻,pp.241-246,2009.
- (18)Richards, K., Schatzmann, M. and Leitl, B.: Wind tunnel experiments modelling the thermal effects within the vicinity of a single block building with leeward wall heating, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol.94, pp.621-636, 2006.
- (19)Oke, T.R.: Street design and urban canopy layer climate, *Energy Build.*, Vol.11, pp.103-113, 1988.
- (20)Johnson, G.T. and Hunter, L.J.: A numerical study of dispersion of passive scalars in city canyons, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol.75, pp.235-262, 1995.
- (21)Onomura, S., Takimoto, H. and Kanda, M.: Influence of a heated wall on urban canopy flow using PIV measurements, *Proc. of the 7th International Conference on Urban Climate*, 2009.
- (22)Eliasson, I., Offerle, B., Grimmond, C.S.B. and Lindqvist, S.: Wind fields and turbulence statistics in an urban street canyon, *Atmos. Environ.*, Vol.40, pp.1-16, 2006.
- (23)Walton, A. and Cheng, A.Y.S: Large-eddy simulation of pollution dispersion in an urban street canyon –Part II: idealised canyon simulation, *Atmos. Environ.*, Vol.36, pp.3615-3627, 2002.

(2009.9.30受付)