

19. ストリートキャニオンの構成が屋外熱環境と流れ場に与える影響に関する研究

林 暉¹・一ノ瀬 俊明^{1,2*}

¹ (研) 国立環境研究所 社会環境システム研究センター (〒305-8506茨城県つくば市小野川16-2)

² 名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8601名古屋市千種区不老町)

* E-mail: toshiaki@nies.go.jp

スケールモデルによる風洞実験を通じ、都市表面が加熱される条件下において、都市街区のアスペクト比や建物方位が流れ場に与える影響について、弱風条件下で生じる浮力に注目し、体系的な調査を行った。前半ではLDVの手法を用い、風洞実験において実際の建築表面素材や人工太陽光ランプを用いることの可能性に加え、建物表面特殊コーティングによる、流れ場等屋内外温熱環境の改善効果を明らかにした。また、これらの成果を実際の街区に敷衍するため、後半ではPIVの手法を用い、都市キャニオンにおける卓越風向や加熱条件の違いがもたらす流れ場への影響や、大気汚染物質・熱拡散、人体温熱快適性への影響を明らかにし、屋上緑化や特殊表面素材の適用と街区デザインとの賢い組み合わせの有効性を提示した。

Key Words : wind tunnel, street canyon, thermal environment, flow field, PIV

1. はじめに

従前、都市の高温化対策は、土木構造物や建築物など、都市の地表面構造物の素材の改善と、それらの物理的形狀の改善が独立して研究されており、立地条件（気候）や気象条件（季節・時間帯）などの多様性により、その両者を適切に組み合わせた適用が課題となっていた。建築物の表面、屋根面、垂直壁面の材料、窓の構造などは、蓄熱特性、大気への放射特性を通じて、屋内外の熱環境と気流場に影響する。日射を受けた都市・建築物表面付近の空気には強い浮力（自然対流）が生じ、これに都市地表面の複雑な幾何形状に起因する乱れの効果（強制対流）が加わり、都市の気流場は複雑なものとなる。また、これは都市キャニオンの内外での空気の交換を促進し、屋外の温熱環境にも大きく影響する。

屋外観測に比較した時の風洞実験のメリットは、次のように整理される。流れ場と拡散の計測では、任意の温熱条件下における風速分布のほか、粗度、ドラッグフォースなどの定量的な把握が容易であり、スケールモデル（建物模型）表面の加熱による流れ場の観測事例¹⁾²⁾は多く、都市キャニオン内における汚染物質拡散の研究に活用されてきた。また、乱流・熱輸送量の定量化も屋外よ

り容易である。一方、都市表面における放射とエネルギー収支については、流れ場のような相似則が存在しないほか、その制御も困難であり、スケールモデルを用いた実験事例は、Spronken-Smith and Oke³⁾などによる都市緑地を模したものがわずかに知られるのみである。太陽放射は建物壁面など、都市キャニオンの表面を加熱し、ストリートキャニオンの内部に強い浮力による流れを生じている。この浮力を計算流体力学（CFD）で再現するのは容易ではないが、風洞実験では普通に確認される。この浮力は、低風速条件下でより顕著なものとなる。つまり、ストリートキャニオンにおける流れ場は、建物の形状（アスペクト比など）や表面素材にも影響される。とりわけ風速が弱い場合は、表面素材の効果が屋上面近傍の温熱環境・風環境（風速の増加、乱流拡散の減少など）に対して強く現れるものと考えられる。よって、計算のみでは困難な課題の解決手段として、風洞実験が有効と考えられる。

以上より本研究（図-1）では、近年開発の著しいナノテクノロジーを応用した新しい建築材料を用い、その屋外熱環境改善効果について、風洞実験（つくば市・気象庁気象研究所風洞）等による検証を行う（2章）。また、この成果を実際の街区に敷衍するため、スケールモデル

による風洞実験を通じ、都市表面が加熱される条件下において、都市街区のアスペクト比や建物方位が流れ場を与える影響について、弱風条件下で生じる浮力に注目し、体系的な調査を行う（3章）。

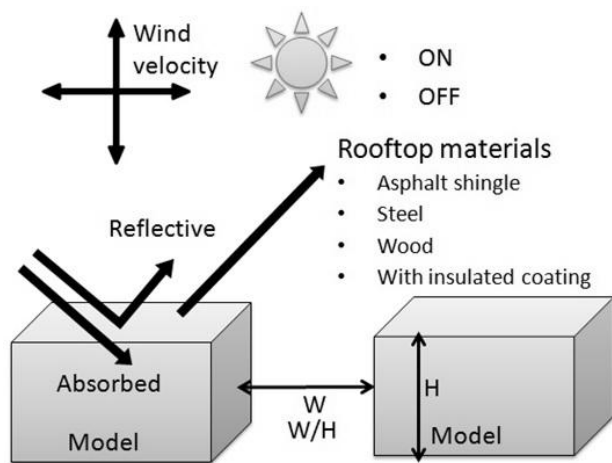


図-1 実験の概要

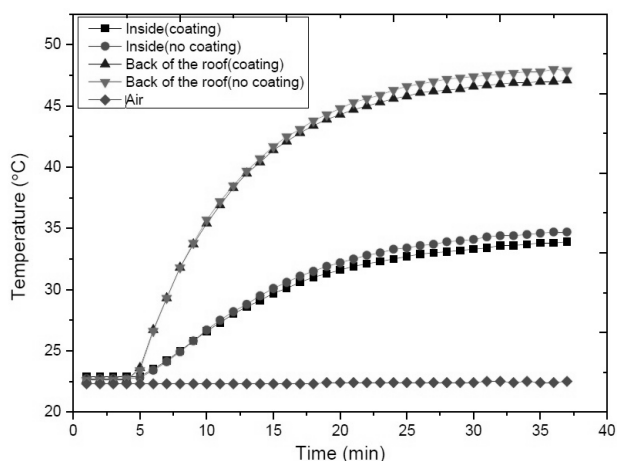


図-2 建物表面特殊コーティング吹きつけのあるなしによる部材表面温度の相違（室内実験）

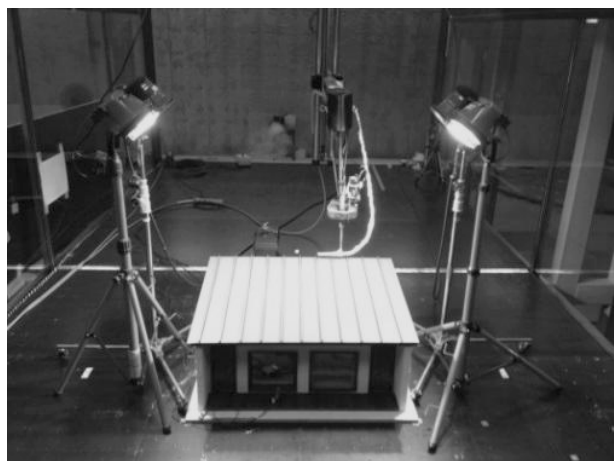


図-3 人工太陽光ランプ（ハロゲン）の設置状況

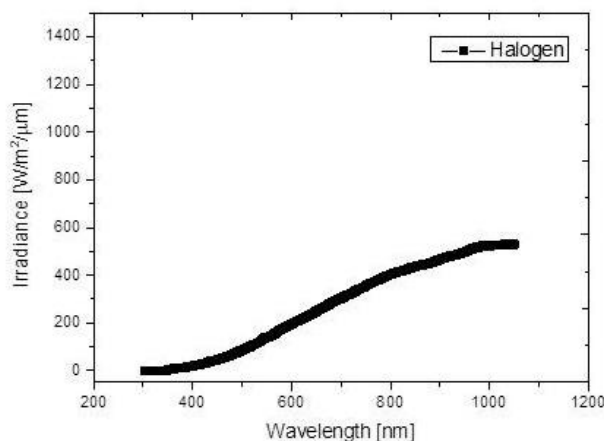
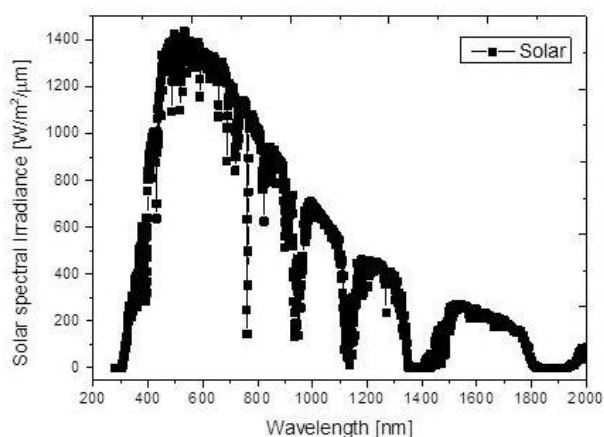


図-4 太陽放射（上）とハロゲンランプ（下）の波長構成の相違

2. 人工太陽光ランプを用いた風洞実験による建物表面素材の評価

従前の研究は、土木・建築表面素材の熱的特性、たとえば色彩、表面温度、表面の粗度、厚さなどが屋内外の温熱環境にもたらす効果のみに着目していた。また、新素材の物性評価についても、単純に材料片を太陽放射にさらすのみで、実際の現場に近い街区形状条件のもとで評価されたわけではなかった。表面素材の蓄熱特性や放射特性を表現するパラメーターは多く、色彩、顔料、表面粗度、反射率、厚さ、方角などがある。とりわけ近年、高反射率の表面素材が注目され、色彩によるもの、素材の相変化によるもの、物理的メカニズムによるものなど、さまざまである。その多くは、高い太陽放射の反射率、とりわけ、素材に吸収され熱に変わりやすい近赤外線領域および短波赤外線領域における高い反射率を示し、低い表面温度の出現に寄与している。その意味では、適切な表面素材を選択することにより、都市の屋内外熱環境と屋内エネルギー消費の改善に貢献できる。本研究では、

それらを代表する具体的な素材として、ナノテクノロジー（ナノ界面フォノン散乱）を応用した高性能断熱と光機能制御の建築材料⁹⁾を用いる（図-2）。

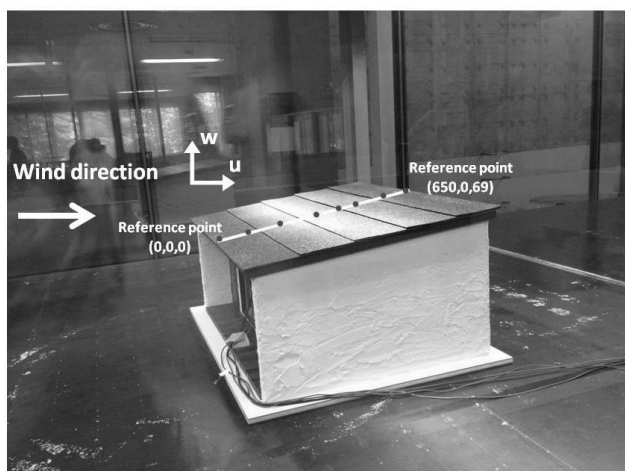


図-5 LDVによる計測の座標系

従前一般の風洞実験においては、建築模型表面を電熱線などで加熱し、建築模型における放射収支を陽に表現しない手法が用いられていた。本研究では流れ場への粗度の影響を最小限にする工夫をしながら、人工太陽光（図-3）としてのハロゲンランプ（光源から約60 cm離れた屋上面中央で800 W/m²前後）を至近に設置し、夏季晴天日の屋外に近い放射条件（図-4）を風洞内に再現するという、風洞実験の新しい手法を試みた。一連の成果および実験の詳細についてはLin *et al.*⁹⁾にまとめられているが、ここではその概要のみ紹介する。

風と温度の計測には、LDV（Laser Doppler Velocimetry）の手法を用い、スケールモデル（約1/100：図-5）のベースとなる屋根面素材にはアスファルトシングルを用いている。

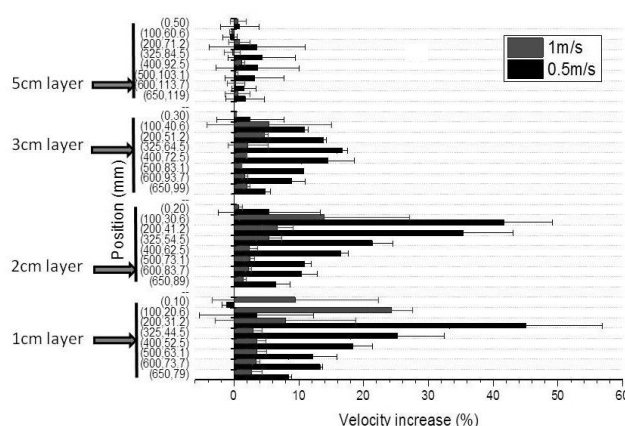


図-6 屋上面加熱による風速の増大
（風速0.5 m/sおよび1.0 m/sの事例）

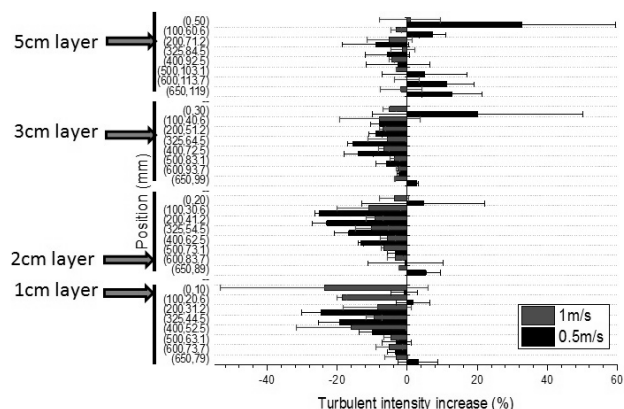


図-7 屋上面加熱による乱流強度の変化
（風速0.5 m/sおよび1.0 m/sの事例）

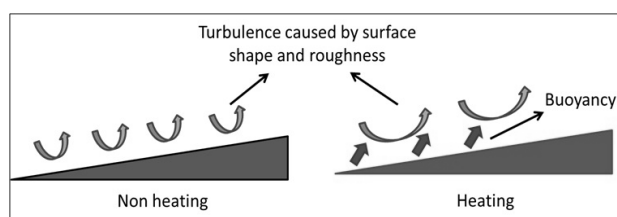


図-8 屋上面加熱による乱流強度変化の模式図

表-1 建物表面特殊コーティング吹きつけのあるなしによる
部材表面温度上昇の相違

	Temperature increase (°C)	
	No coating	coating
Roof	44.47	44.48
Indoor	6.38	5.63

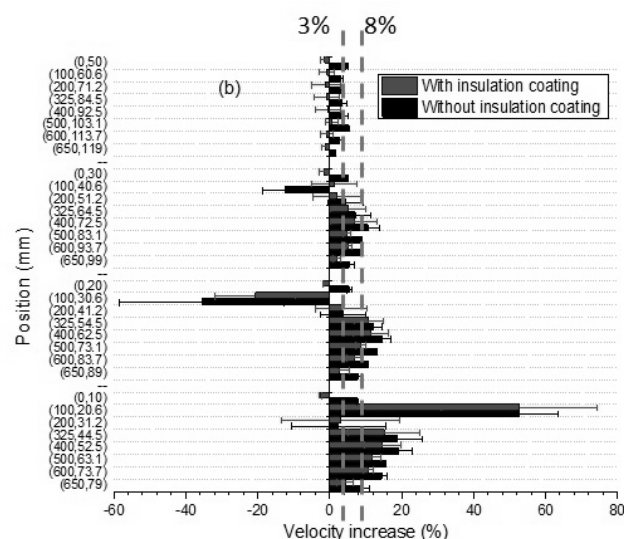


図-9 建物表面特殊コーティング吹きつけのあるなしによる
屋上面加熱時風速増大の相違

風速が小さい条件の下では、流れ場は建物形状や浮力の影響を受けやすい。屋上面を加熱すると、風速の増大

と乱流強度の減少が見られる（図-6；図-7；図-8）．これは大気汚染物質の混合を抑制し，かつ輸送を強化する．また，屋上面に特殊コーティングを施した場合，風速の減少と乱流強度の増大が見られる（表-1；図-9；図-10）．しかしながら，放射が気温センサーに与える影響などの課題も明らかとなった．

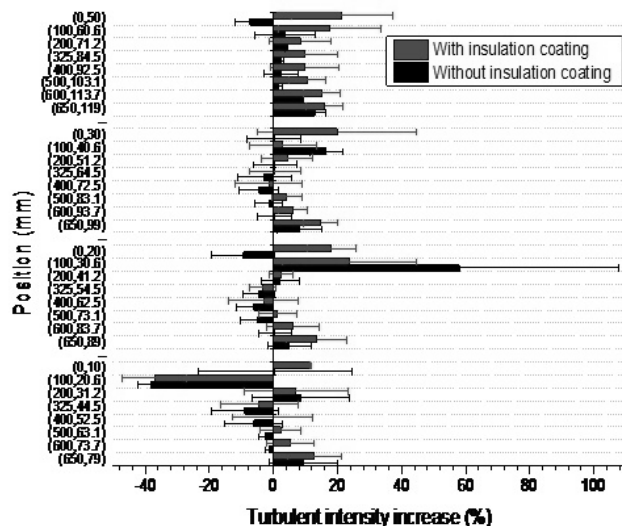


図-10 建物表面特殊コーティング吹きつけのあるなしによる屋上加熱時乱流強度変化の相違

3. 加熱条件下における街区形状の流れ場への影響

ヒートアイランドに代表される都市の温暖化は，建築物や舗装などの人工的地表面被覆にも由来している．周囲の環境にもたらされる有害な影響としては，都市表面蓄熱量の増加，および地表面から大気への熱フラックスの増加，そしてその結果としての気温上昇がある．太陽放射は建物壁面や道路など，都市キャニオンの表面を加熱し，強い浮力による流れ場を生じせしめる．この浮力の効果は，弱風条件下においてより明瞭なものとなる．都市における気流場は，建物の形状や表面構成材料のほか，都市キャニオンのアスペクト比（H/W：道路幅に対する道路脇建物高さの比）に強く影響される．

よって本研究では，スケールモデルによる風洞実験を通じ，都市表面が加熱される条件下において，都市街区のアスペクト比や建物方位（卓越風向に対する建物形状）が流れ場に与える影響について，とりわけ弱風条件下で生じる浮力に注目し，体系的な調査を行った．2章での成果を実際の街区に敷衍するため，ここではPIV（Particle image velocimetry）の手法を用い，都市キャニオンにおける卓越風向や加熱条件の違いがもたらす流れ場や温熱環境への影響について実験を行った．この実験を

通じ，屋上緑化や特殊表面素材の適用と街区デザインとの賢い組み合わせの有効性提示が可能となるものと考えられる．ここでは，ストリートキャニオンを模したアルミニウム製のスケールモデル（10 cm x 10 cm x 100 cm）を用い，風上に粗度ブロックをならべて流入風速の鉛直分布を調整している．PIVカメラの使用により，斜め方向から建物に接近する風が流れ場に与える影響を，鉛直分布と水平分布の両方について，より詳細に観測できる．

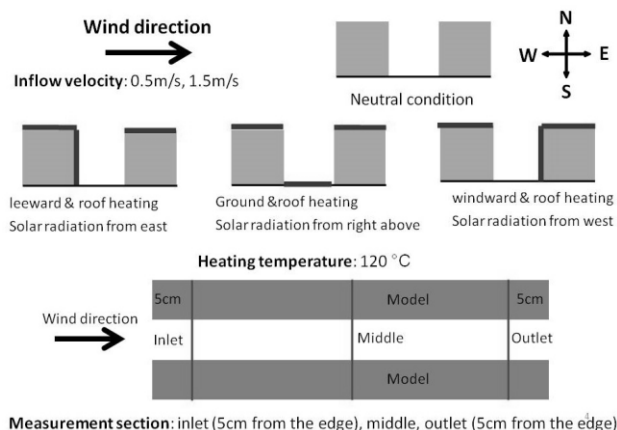


図-11 加熱パターンの設定

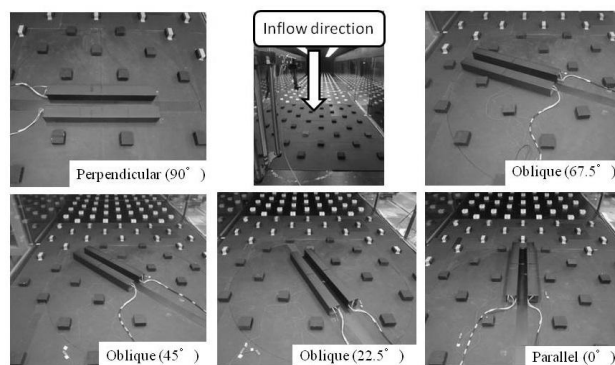


図-12 風向の設定

表-2 各ケースにおける表面温度の設定（℃）

Heating surface	Upwind roof	Downwind roof	Windward wall	Ground	Leeward wall	Background air
Neutral	24.5	24.5	24.4	24.7	24.4	24.6
Windward wall & roof	121.3	137.2	131.8	42.3	69.1	24.4
Leeward wall & roof	124.8	113.1	63.5	41.3	128.9	24.6
Ground & roof	122.6	127.2	69.8	110.4	71.3	25.5

横に長いキャノピー（ストリートキャニオン）の中央部を対象に，気温場と流れ場の計測を行った（図-11；図-12；図-13；図-14）．ここではアスペクト比を1，2，0.67の3段階とし，流入風速を0.5，1.5 m/sの2段階として，さまざまな太陽の方位角・仰角に対応させた4つの異なる加熱ケース（中立，風下側壁面と屋根面，道路面と屋根面，風上側壁面と屋根面）についての実験を行っ

た．表面温度は120℃に設定した（表-2）．また，さまざまな卓越風向条件を表現するため，街路に対する風向を，0°，22.5°，45°，67.5°，90°（街路に平行から垂直まで）の5種類に設定した．さらに，街路（都市キャニオン）におけるポジションの多様性を表現するべく，3つの異なる観測断面（平行風向に対する流入部，中間部，流出部）を設定している．

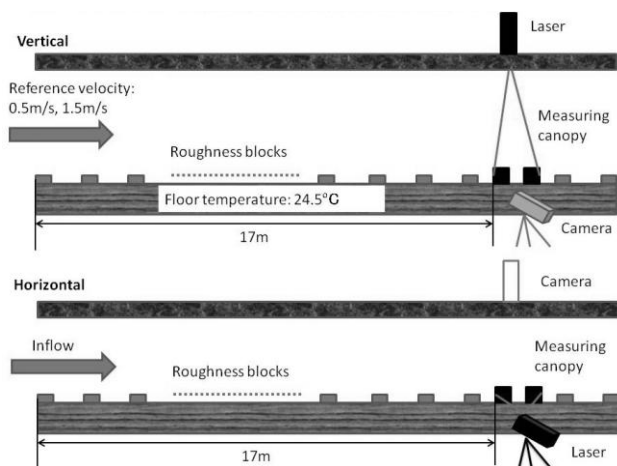


図-13 PIVのレイアウト（上：鉛直断面，下：水平断面）

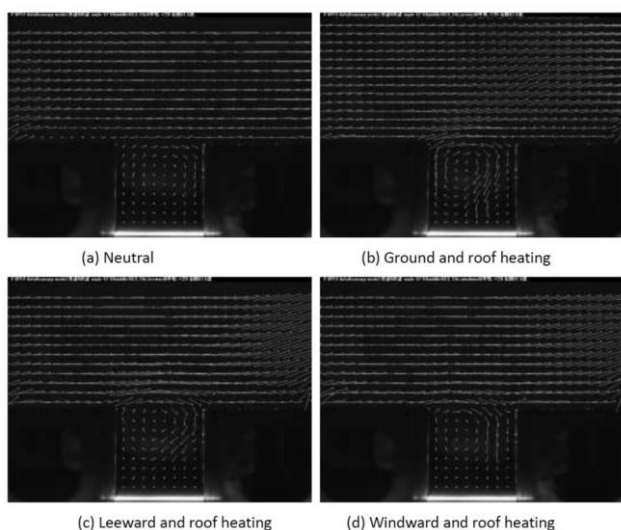


図-14 交角22.5°，0.5m/s，中間部における流れ場の可視化事例（加熱部位による差異）

Oke⁹⁾などを嚆矢とする一連の先行研究事例に対し，今回の実験で新たに明らかにされた主な内容は以下の通りである．

・アスペクト比が2の場合，キャノピー内外の空気交換は非常に困難である（表-3）．壁面を加熱する場合，すべてのアスペクト比において，建物高さの中ほどの空気が最も高温となる．また，壁面の加熱は道路面の加熱よりも気温上昇が大きい．道路面を加熱する場合，アスペ

クト比が1および0.67のケースにおいて，風下に向いた面（風上側壁面）のコーナー部分における気温上昇が大きい．一方，アスペクト比が2の場合は，風上に向いた面（風下側壁面）のコーナー部分における気温上昇が大きい．これらは，キャノピー内に発生する渦の位置の違いによりもたらされる．

表-3 アスペクト比および加熱条件によるストリートキャニオン周辺における熱環境と流れ場の相違

	Ground heating	Leeward heating	Windward heating
H/W=2	Difficult for air exchange; heat accumulate in windward corner.	The highest temperature distribution at half of the model height level. When H/W=2	The highest temperature distribution at half of the model height level. When H/W=2
H/W=1 & 0.67	Heat accumulate in leeward corner.	façade heating has more influence than ground.	façade heating has more influence than ground.

・風速が0.5 m/sの場合，加熱してもキャノピー内に渦は発生せず，浮力による上昇流が卓越する．一方1.5 m/sの場合，ストリートキャニオンの幅が広がるにつれ，加熱の流れ場への影響は見えにくくなる．

・深いキャニオンの場合，壁面加熱による気温上昇は大きい，キャニオンが浅くなるにつれ，道路面加熱による気温上昇が大きくなる．また，風下に向いた面の加熱影響が最も小さい．

表-4 風向および部位によるストリートキャニオン周辺における流れ場の相違（非加熱時）

	Inlet	Middle	Outlet
Perpendicular	A stable central vortex	A stable central vortex	A stable central vortex
Oblique 67.5° & 45°	A central vortex	A central vortex	Weakened vortex near leeward wall
Oblique 22.5°	Two counter rotating vortexes, the lower one is small and in the windward corner	One large main vortex	No vortex
Parallel	From inlet to outlet, the flow moves forward helically, because of the wall's friction, multiple vortexes being observed		

・街路に対する風向（交角）が90°の場合，いずれの断面においても安定した渦がキャノピー中央に形成される（表-4）．67.5°と45°の場合，流入部と中間部においてキャノピー中央に単一渦が形成される一方，流出部においては風下に向いた面へ近づき，45°の場合では顕著に弱くなる．22.5°の場合，流入部において2つの相互に逆向きの渦が発生し，下側の渦は風上に向いた面のコーナー部分に小さく発生する．中間部においては，

一つの大きな渦のみとなり、流出部では渦が消失する。 0° の場合、いずれの断面においても壁面の摩擦によるスパイラル流が見られる。

・一般に、流入部においては加熱の影響はまだほとんど現れていない。加熱の蓄積により、 0° の場合以外では中間部における気温上昇が最も大きい。また、ほとんどのケースにおいて、道路面の加熱効果が壁面の加熱効果よりも顕著である。 0° の場合、流出部においてもっとも気温上昇が大きい。

表-5 風向によるストリートキャニオン周辺における熱環境と流れ場の相違

	Angle	
Air temperature decreases, more heat taken away by channeling wind flow, less influence of thermally induced flow	Perpendicular	Mainly influenced by buoyancy flow
	Oblique 67.5°	Similar to perpendicular flow in neutral condition
	Oblique 45°	Influenced by ground heating in all velocity cases
	Oblique 22.5°	Influenced by ground heating only in 0.5m/s
	Parallel	Received more heat in outlet section. More intense roof heating

・キャノピーの走向と風向との交角が減少していくと、より多くの風がキャノピー内に入り込み、蓄積した熱を効率よく運び去るようになる。これは、キャノピー内の気温低減に効果があることを意味する（表-5）。

・ 0° の場合にキャノピー内における夏季の温熱環境は最も良好な状態を示すものと考えられるが、屋根面の加熱による影響はより大きなものとなった。 90° の場合、キャノピー内の流れ場は主に浮力の影響を受ける。 67.5° の場合、中立の条件下では 90° の場合に類似するが、加熱により変化する。交角が 45° よりも小さくなる場合、流れ場は建物形状に依存するようになるが、それは表面摩擦の影響が浮力に卓越するためである。また、流入風速が 0.5 m/s の場合のみ、道路面加熱の影響が現れる。しかし 45° の場合は、道路面加熱の影響は風速に依存せず常に現れる。さらに風上に向けた面を加熱する場合、気温上昇は最小となる。交角が 0° に近づくとつれ、キャノピーを渡る風により、多くの熱が運び去られ、流れ場への熱的な影響は小さくなり、スパイラル流が現れる。

4. 結論

従前、都市地表面における放射収支、熱容量、熱収支については、風洞実験における再現性や制御の困難さゆえに、これらの要素は陽に扱われてこなかった。ほとん

どの先行研究においては、都市キャニオン内壁面加熱で発生する浮力による流れ場を創出するためには、スケールモデルの表面を電熱線等で直接加熱する方法を採用していた。しかしそれでは、表面を安定的に加熱するのみであるため、日影の効果などをうまく再現できなかった。風洞内で放射を正しく再現することは、太陽高度・方位角、日影の影響のよりよい再現や、都市ヒートアイランド現象の正しい理解に貢献しうる。

これらの研究成果は、アスペクト比や風向、風速の流れ場に与える影響を体系的に描き出しているほか、都市地表面の加熱による都市キャニオン内の大気汚染現象、屋内外温熱環境悪化を避けるための都市計画指針作りに寄与するものであることが確認された。

謝辞：本研究は、林暉が2015年2月に名古屋大学に提出した博士論文の一部である。一連の実験でお世話になった（研）物質・材料研究機構・ウー・ラダー研究員、（研）国立環境研究所・山尾幸夫主任研究員、気象庁気象研究所・毛利英明室長ほかの皆様に謝意を表します。

参考文献

- 1) 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 and Soil Pollution*, 2, 555-571, 2002.
- 2) Allegrini J., Dorer V. and Carmeliet J.: Wind tunnel measurements of buoyant flows in street canyons, *Building and Environment*, 59, 315-326, 2013.
- 3) Spronken-Smith R.A. and Oke T.R.: Scale modelling of nocturnal cooling in urban parks, *Boundary-Layer Meteorology*, 93, 287-312, 1999.
- 4) Virtudazo R.V., Wu R., Zhao S. and Koebel M.: Facile ambient temperature synthesis and characterization of a stable nano-sized hollow silica particles using soluble-poly (methacrylic acid) sodium salt templating, *Materials Letters*, 126, 92-96, 2014.
- 5) Lin Y., Ichinose T., Wu R., Yamao Y., Mouri H. and Virtudazo R.V.: An Experimental Study on Exploring the Possibility of Applying Artificial Light as Radiation in Wind Tunnel, *Journal of Heat Island Institute International*, Vol. 9, No. 2, pp. 108-112, 2014.
- 6) Oke T.R.: Street design and urban canopy layer climate, *Energy and Buildings*, Vol. 11, No. 1, pp. 103-113, 1988.