

17. 都市熱環境における河川の影響評価に関する 理想実験シミュレーション

馬場 雄也^{1*}・木田 新一郎¹・高橋 桂子¹

¹(独)海洋研究開発機構 地球シミュレータセンター (〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25)

* E-mail: babay@jamstec.go.jp

都市部の熱環境に及ぼす河川の影響を評価するために、均質な建物から構成される理想化した都市を仮定して数値シミュレーションを実施した。河川が存在することで都市部における建物の摩擦効果は低減され、境界層の対流性が弱くなることが確認された。体感温度は河川によって低下する効果があるが、地表面フラックスが大きい場合には河川による温度低下の効果は小さくなり、加えて体感温度を低下させるには河川面積よりも風速による効果が大きいことが分かった。河川による顕熱・潜熱フラックスの変化は河川以外の地表面フラックスの大きさに左右され、境界層の対流性が強まるほど河川による顕熱・潜熱フラックスの低下は見られなくなる。

Key Words : Urban Climate, Thermal Environment, Boundary Layer, Large-eddy simulation

1. 緒言

地球温暖化によってもたらされる気候変動下では、都市気候は従来の気候から変化・変動する可能性があり、都市の脆弱性を強める恐れがあるとして、都市計画には気候変動に適応した都市環境の構築が求められている。都市環境の改善にはヒートアイランド現象に代表されるように、特に悪化が著しい夏季の熱環境を改善することが重要である。夏季の熱環境を改善するためには都市域で気温を低下させる可能性がある風・水・緑が重要であると考えられ、これらの要素をどのように都市環境に組み込んでいくかが気候変動下での都市環境を改善するための鍵となる。

しかしながら、風・水・緑がどのように都市環境に影響を及ぼすかは、世界中にまったく同じ都市が存在しないように、都市構造が多様性を持つがゆえに評価し辛いのが現状であり、都市環境改善を目指した都市計画にも十分に反映されていない。そこで本研究では風・水・緑がそれぞれどのように都市環境に影響を及ぼすのかを明らかにするために、理想化した都市環境を数値シミュレーション上に構築し、特に風と水の影響に着目した影響評価を行った。加えて、都市気候に影響を及ぼすと考えられる、都市域から発生する運動量、顕熱・潜熱フラックスが河川や水辺によりどのように変化するのか解析

を行った。

2. 理想実験設定

計算領域の概略（水平分布）を図-1に示す。水平解像度は5mである。理想化した都市を構成する建物形状は50m×50m×50mとし、領域中に等間隔に配置する。計算領域の大きさは建物形状と建蔽率、建物数から図-1のように決定する。境界条件は側面は全て周期境界、上端・下端はそれぞれスリップ、ノンスリップ壁面境界で、上端にはRayleigh dampingとNewtonian cooling（運動量・熱量に対するショック吸収）をかける。建物形状はすべての条件で同じとしているが、建蔽率はケースによって変化させる。さらに建蔽率によって建物が完全に周期的に配置されるように計算領域も変化させる。ここで建蔽率は次で定義される建物敷地に占める建物の面積を表す。

$$\lambda_p = H^2 / H_N H_s \quad (1)$$

この建蔽率変化と建物数、格子点数などとともに計算ケースを表-1にまとめる。すべての条件で高度400mまでを計算領域として設定する。

都市スケールの乱流場では温度の厚みが運動量の厚みに比べて非常に小さく、通常のフラックススキームを用いて予測することは困難であるため、固定フラックスを

与える¹⁾。地表面には都市で発生する代表的な顕熱・潜熱フラックス(17W/m², 55W/m²)を与えた²⁾。一方、河川や水辺の顕熱・潜熱フラックスは東京湾のフラックス値³⁾と同様だと仮定して与えている(-10W/m², 150W/m²)。運動量フラックスについては付加的なフラックスは与えないものとする。

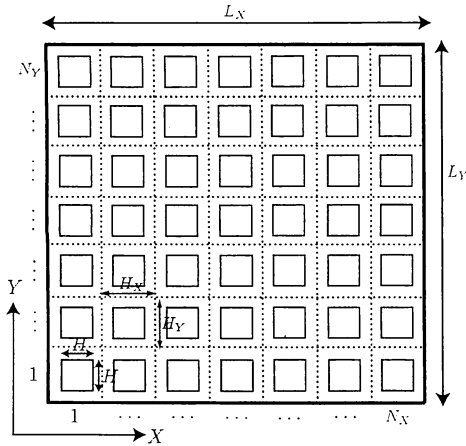


図-1：計算領域と建物の配置

表-1：シミュレーションケース一覧

case	λ_p	$N_x \times N_y$	grid number	river	U m/s
RUN1	0.694	15×15	180×180×80	-	5
RUN2	0.510	16×16	224×224×80	-	5
RUN3	0.390	12×12	192×192×80	-	5
RUN1R	0.694	15×15	180×180×80	line	5
RUN2R	0.510	16×16	224×224×80	line	5
RUN3R	0.390	12×12	192×192×80	line	5
RUNBS	0.694	15×15	180×180×80	box (small)	0.5
RUNBM	0.694	15×15	180×180×80	box (medium)	0.5
RUNBL	0.694	15×15	180×180×80	box (large)	0.5

河川の配置パターンには (1)河川がない場合、(2)河川がある(建物の一部を河川に変えた)場合、(3)水辺を配置した場合、の3通りを考慮した。ここで川幅の大きさは建物幅と同じ50mとし、(2)の場合はX軸方向の1列の建物をすべて河川に置き換える。(3)の場合には領域中心の建物を水辺に置き換え(それぞれ面積90m², 135m², 180m²)、無風に近い状態を考慮するために弱い風速を与えている。すべての条件で風速は常に都市部にX軸方向に風が一定に吹き続けるように、かつ、領域中の平均風速が一定となるようにフォーシングを与えることで調整している⁴⁾。

数値モデルとしてMSSGモデル⁵⁾を使用する。MSSGモデルは全球・領域の大気・海洋結合モデルであるが、本実験では大気モデル部分だけを使用する。大気の支配方程式を高い解像度で計算するためにヘルムホルツソルバーを使用し、都市域で発生する3次元的な乱流を再現する

ために移流項は中心差分法で計算した⁶⁾。乱流のモデル化はスマゴリンスキーモデルによるLarge-eddy simulation(LES)とした。本研究では流れ場に注目するため、熱環境に大きな影響を持つと考えられるものの、3次元放射は計算負荷の高さから解かないこととした。時間積分は流れ場が安定するまで1時間程度行った。

3. 結果

(1) 定常状態の流れ場

都市の熱環境を知るためには、どのように熱が循環しているかを把握するために都市が含まれる境界層の構造を知る必要がある。建物や河川の配置に対応してどのような境界層が形成されているかを把握するため、定常状態の流れ場の構造を調べた。

a) 風速分布

河川がない場合(RUN1-RUN3)の風速の水平・鉛直分布を比較した(図-2)。Kandaらによって指摘されているようにストリーク構造が建物の直上に現れている⁷⁾。ただし、境界層は熱フラックスによる対流性境界層になっているため、この場合には上昇流によって低風速領域が形成され、その結果ストリークが形成されている。このストリーク構造は建蔽率が下がるとともに強化されていることが分かる。

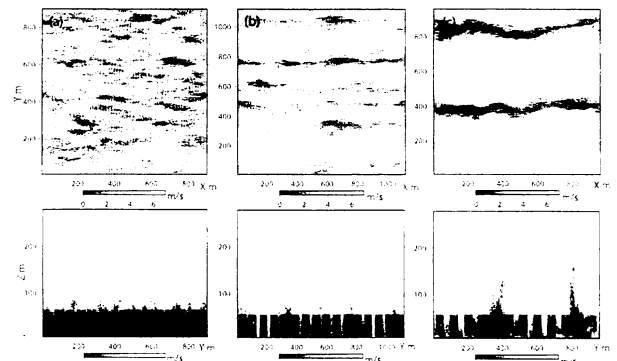


図-2：風速の水平(Z=70m)・鉛直分布
(a)RUN1, (b)RUN2, (c)RUN3

河川がある場合(RUN1R-RUN3R)の風速の水平・鉛直分布を比較した(図-3)。河川が無い場合に比べて、ストリーク構造に加え、河川があることで河川に依存した高風速領域が形成されている。河川上は建物が存在しないため、顕熱フラックスが小さく、河川上で上昇流は発生していない。

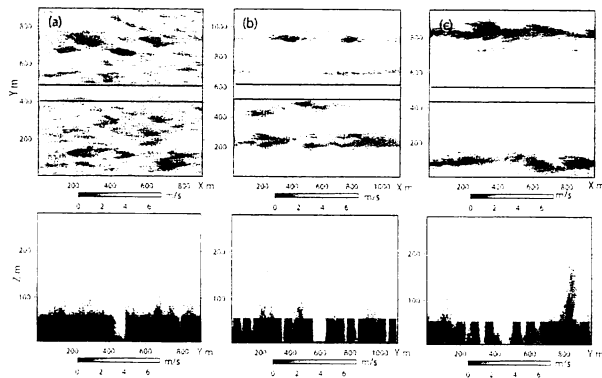


図-3：風速の水平(Z=70m)・鉛直分布

(a) RUN1R, (b) RUN2R, (c) RUN3R (実線は河川位置)

水辺がある場合 (RUN1BS-RUN1BL) の風速の水平分布を比較した (図-4)．前述したケースと同様に水辺上空には上昇流が発生していないが、低風速領域が形成されている。これは水辺の面積が河川よりも大きく、負の顕熱フラックスが大気を冷やしていることが原因であると考えられる。

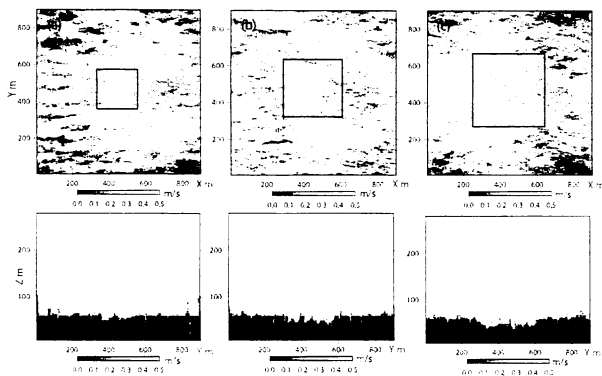


図-4：風速の水平(Z=70m)・鉛直分布

(a) RUN1BS, (b) RUN1BM, (c) RUN1BL (実線は河川位置)

流れ場の統計的な構造を調べるため、水平風速の鉛直分布を比較した (図-5)．鉛直分布は水平空間平均および10分程度の時間平均によって算出している (以下、鉛直分布は全て同様の方法で算出)．全てのケースで風速は建物高さ50m以下では建物によって風が遮られるために風速が低下している。

河川の有無を比較すると、河川があることで50m以下で風速の増加が見られるが平均風速で見るとその差はかなり小さい。

建蔽率の違いを比較すると、建蔽率が下がることで地表面付近では風速が速くなっているが、地表面フラックスが増加し、境界層が中立から対流性に遷移していることが分かる (上空での風速が一定に近い)。

一方で水辺を配置した場合には水辺面積の違いは風速

にほぼ影響を及ぼしていないことが分かる。

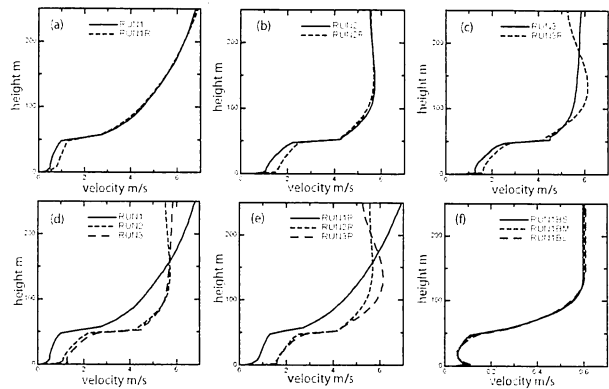


図-5：水平風速の比較 (a) RUN1-RUN1R (b) RUN2-RUN2R (c) RUN3-RUN3R (河川有無の比較), (d) RUN1-RUN1R, (e) RUN1R-RUN1R (河川有りの比較), (f) RUN1BS-RUN1BL (水辺有りの比較)

このときの鉛直風速の比較を図-6に示す。河川の有無を比較すると、建蔽率が低いほど河川があることで鉛直風速が弱まる傾向があることが分かる。これは建物による摩擦効果が建物を河川で置き換えたことで低下していることが主な原因であると考えられる。水辺を配置した場合には水辺面積が広がるほど鉛直風速が弱まっている。この原因については後述する。

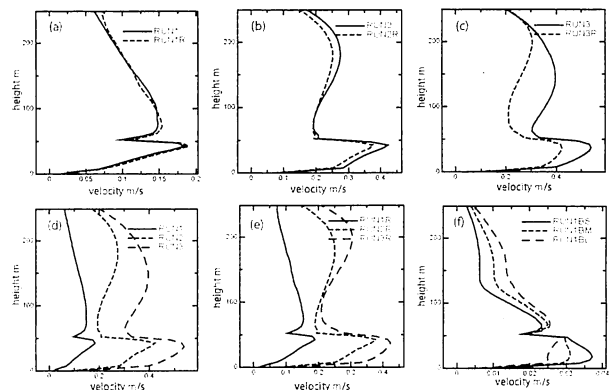


図-6：鉛直風速の比較 (図-5と同じ)

b) スカラー分布

河川がない場合には水蒸気濃度は低く、建蔽率が高いほど一様、建蔽率が低いほど非一様な分布へと遷移する (図-7)．水蒸気濃度の水平分布が非一様へと変化することは境界層の対流性が強化され、変動スケールが大きくなる対流性境界層の特徴と一致している。

河川がある場合、RUN2Rで高い水蒸気濃度がみられるが、RUN3Rでは対流性が強化されて水蒸気濃度が高い面積は低下している。

水辺を配置した場合には、水辺中心の濃度は低いものの、周囲に高い水蒸気濃度分布が形成されていることが

分かる。このことから水辺を配置した場合、水面上では下降流が発生し周囲に上昇流が発生していると推測される。水蒸気濃度が低い領域は水辺面積が拡大するにつれて大きくなっており、沈み込む効果は水辺面積によって大きくなっていると判断することができ、図-6で見られた鉛直風速の低下傾向と一致する。

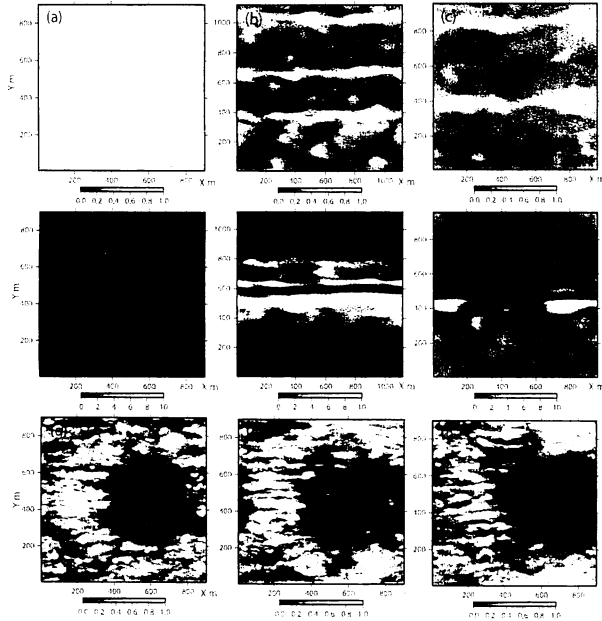


図-7：水蒸気の水平分布($\times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $z=70\text{m}$), (a)から(i)まで順にRUN1～RUN1BLに対応(表-1参照)

水蒸気濃度の鉛直分布を比較すると、河川がない場合には建蔽率が高いと下層において建物による混合の影響で水蒸気濃度が高くなっていることが分かる(図-8)。一方で建蔽率が低くなると下層での水蒸気は減少し、かわりに上層で高くなる。これは建蔽率の低下により地表面フラックスが増加したことが原因である。

河川がある場合、河川上の潜熱フラックスの影響で河川がない場合に比べて水蒸気濃度は全体的に高くなる。河川がない場合と同様に、建蔽率が低くなると地表面フラックスが大きくなるため、対流性が強まり、水蒸気濃度は上層まで高くなる。

水辺を配置した場合、地表面付近でのみ差異が現れており、水辺面積に比例して水蒸気濃度は高くなっている。

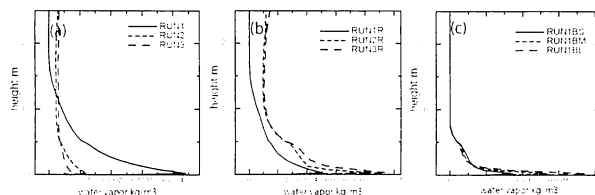


図-8：水蒸気の鉛直分布, (a) RUN1-RUN3, (b) RUN1R-RUN3R, (c) RUN1BS-RUN3BS

(c) RUN1BS-RUN1BL

c) 体感温度

熱環境を評価するために、このときの体感温度を比較した。体感温度(net effective temperature, NET)は気温(T)、湿度(RH)、風速(v)による関数であり、次で与えられる⁷⁾。

$$NET = 37 - \frac{37 - T}{0.68 - 0.0014RH + A} - 0.29T(1 - 0.01RH) \quad (2)$$

$$A = (1.76 + 1.4v^{0.75})^{-1} \quad (3)$$

不快指数(Discomfort index)も環境評価の指標として用いられるが、風速の影響が考慮されていないためここでは使用しない。

100mまでの体感温度を比較すると、地表面フラックスが少なく、河川が有る場合(RUN1)に最も低い体感温度が得られていることが分かる(図-9)。建蔽率が低くなり、地表面フラックスの影響が大きくなるほど河川による体感温度低下の効果は見られなくなっていく。水辺を配置した場合にはほぼ無風となっており、他ケースよりも高い体感温度を示している。このことから水辺面積よりも風速が体感温度に大きな影響を持つことが分かる。

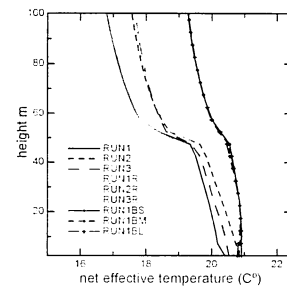


図-9：100m高度までの体感温度の比較

(3) 運動量、顕熱・潜熱フラックス

都市気候を考えると、都市が気候変化に与える影響としてはメソスケールへ影響を与え得る境界層のバルクの運動量、顕熱・潜熱フラックスの変化が重要である。得られた境界層の構造を踏まえて、次に境界層の運動量および顕熱・潜熱フラックスを解析した。

a) 運動量フラックス

運動量フラックスは次の式で計算する。

$$F_m = (\overline{u - u_0})w', \quad (4)$$

ここで u は水平風速, u_0 は水平風速の基準値, w' は鉛

直風速の変動値であり、上付き棒線は水平平均および時間平均を表す。風速の基準値にはフォーシングで与える値を用いた。

運動量フラックスの全体的傾向を見ると、地表面と建物によって水平運動量が減衰するため、運動量フラックスは負の値を示し、さらに境界層の対流性が増していくにつれて（建蔽率が下がるにつれて）、負の運動量フラックスは強くなっていく（図-10）。この傾向は同時に、建蔽率が下がると対流と建物の摩擦効果による水平運動量の鉛直運動量への変換が強く起きていることを示している。

河川の有無を比較すると、対流性が増していくことで負の運動量フラックスが大きくなるものの、河川がある場合には建物が存在しないために、建物の摩擦効果は低下しており、河川がない場合に比べて負の運動量フラックスは抑制されていることが分かる。この効果により運動量フラックスは最大で半分になっている（図-10 (c)）。水面を配置した場合には、水辺面積による運動量フラックスに差異はほぼ見られない。

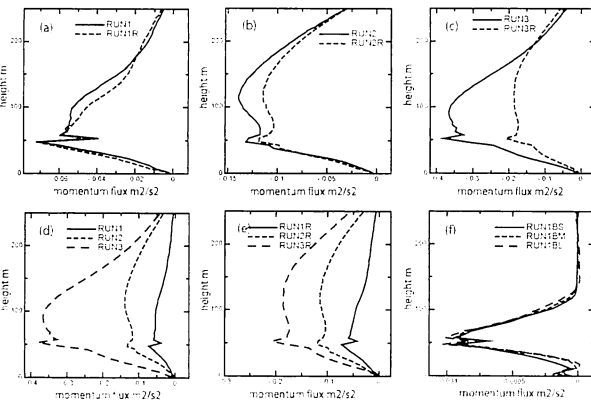


図-10：運動量フラックスの比較（図-5と同じ）

b) 顕熱フラックス

顕熱・潜熱フラックスは次の式から算出する。

$$F_s = \overline{\rho c (T - T_0) w'}, \quad (5)$$

$$F_c = \overline{\rho (q - q_0) L w'}, \quad (6)$$

ここで ρ は密度、 c は比熱、 T は温度、 T_0 は温度の基準値、 q は水蒸気混合比、 q_0 は水蒸気混合比の基準値、 L は蒸発潜熱である。ここで基準値には初期条件の値を用いた。

河川の有無を比較すると、河川ありの場合のほうが顕熱フラックスが全体的に小さくなるが、建蔽率が下がりすぎると顕熱フラックスはさほど下らない。これは地

表面フラックスにより顕熱低下が見られなくなるためである。このことから河川以外の地表面フラックスが小さく、対流性が弱い場合にのみ、河川による顕熱フラックスの低下が見込めることが分かる。

水辺を配置した場合には水辺上空に負の顕熱フラックスが見られるが、水辺面積が拡大しても顕熱フラックスに大きな変化は見られない。

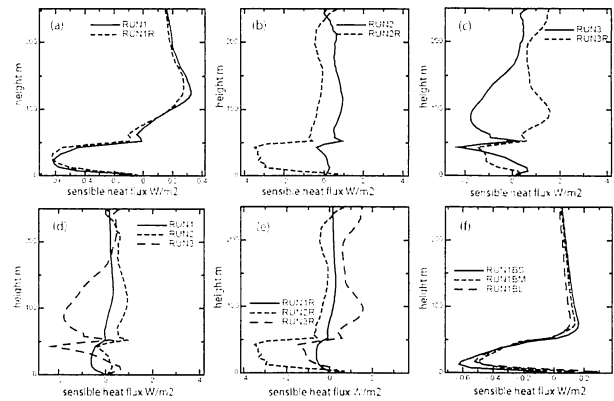


図-11：顕熱フラックスの比較（図-5と同じ）

c) 潜熱フラックス

河川上での潜熱フラックスが大きいために、河川ありの場合の方が全体的に潜熱フラックスが大きくなっている（図-12）。ただし、河川面積が同じ場合でも、建蔽率が高いRUN2Rの方がRUN3Rよりも潜熱フラックスが大きくなっている。対流性がRUN1RとRUN3Rの間であるRUN2Rで潜熱フラックスが最大となる原因ははっきりしないが、水蒸気の下層への滞留（水蒸気の移流・対流による移動が他のケースに比べて弱い）が原因であると考えられる。境界層の対流性が強くなるRUN3Rでは、水蒸気分布の変動が大きくなるため、結果として潜熱フラックスが低下したものと考えられる。

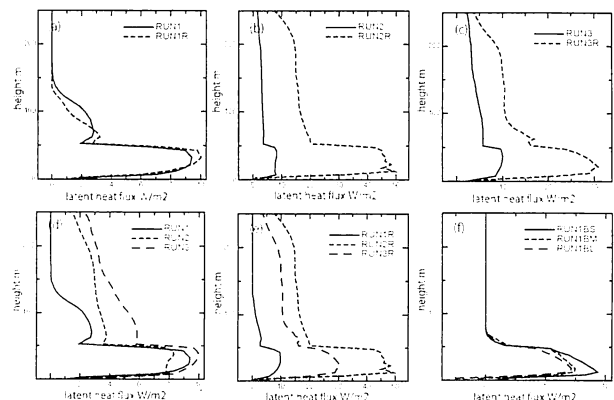


図-12：潜熱フラックスの比較（図-5と同じ）

水面を配置した場合にはRUN1BSで潜熱フラックスが大きいものの、水辺面積の違いで潜熱フラックスの大きさはあまり変化しない。

4. 結言

都市における河川の熱環境への影響を評価するため、数値モデルを使用して理想実験を実施した。得られた知見は以下のとおりである。

(1) 河川がない場合、流れ場には既往研究で指摘されているストリーク構造が観察された。建蔽率を下げっていくと地表面フラックスの影響が大きくなり、境界層は対流性境界層へと遷移し、同時にストリーク構造が強化される様子が観察された。河川がある場合には建物を河川で置き換えたことで河川形状に依存した高風速領域が形成され、対流性は抑制される。無風時の水辺上では水辺の冷却によって下向き風速が発生する。

(2) 体感温度を比較すると、地表面フラックスが小さい場合、河川によって体感温度は低下するが、地表面フラックスが大きくなると水蒸気の増加と温度上昇によって河川の影響は見られなくなる。体感温度に対する風の影響は大きく、地表面フラックスが大きい場合よりも無風時の体感温度は高くなる。

(3) 都市部では運動量フラックスは負の値を示し、その大きさは境界層の対流性が強いほど大きくなる。河川がある場合、対流の強さが抑制されるため、負の運動量フラックスは最大で約半分になる。顕熱フラックスは地表面フラックスが小さい場合には河川による影響を受けて小さくなるが、地表面フラックスが大きくなると河川による顕熱フラックスの低下は見込めなくなる。河川があることで潜熱フラックスは増加するが、増加量は境界層の対流性が増し、変動スケールが大きくなるため、建蔽率の増加に対して一様でない。無風時の水辺では顕

熱・潜熱フラックスは水辺面積に反比例して小さくなるが面積によりあまり大きな差は見られない。

(4) 建物上部に顕熱・潜熱フラックスがない状況を想定したため、地表面フラックスの大きさは建蔽率に反比例する結果となった。建蔽率の変化のみによる境界層変化を抽出するためには、建物上部にも顕熱・潜熱フラックスを与え、単位面積あたりのフラックス量を固定する実験を行う必要がある。

参考文献

- 1) Kanda, M., Kanega, M., Kawai, T., Moriwaki, R., Roughness lengths for momentum and heat derived from outdoor urban scale models. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol.46 (2007), pp.1067-1079.
- 2) 国土交通省・環境省 平成 15 年度「都市における人工排熱抑制によるヒートアイランド対策調査報告書」
- 3) Oda, R., Kanda, M., Observed sea surface temperature of Tokyo bay and its impact on urban air temperature. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol.48 (2009), pp.2054-2068.
- 4) Kanda, M., Moriwaki, R., Kasamatsu, F., Large-eddy simulation of turbulent organized structures within and above explicitly resolved cube arrays. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.112 (2004), pp.343-368.
- 5) Baba, Y., Takahashi, K., Sugimura, T., Goto, K., Dynamical core of an atmospheric general circulation model on a Yin-Yang grid. *Monthly Weather Review*, Vol.138 (2010), pp.3988-4005.
- 6) Baba, Y., Takahashi, K., Large-eddy simulation of convective boundary layer with density stratification. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol.89 (2011), pp.105-117.
- 7) Li, P. W., Chan, S. T., Application of a weather stress index for alerting the public to stressful weather in Hong Kong. *Meteorological Application*, Vol.7 (2000), pp.369-375.