

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760480

研究課題名(和文)理想数値実験による都市内熱環境場に及ぼす河川・緑地・風況の影響評価

研究課題名(英文)Evaluation of effects of river, plant and wind on urban thermal environment using idealized numerical experiment

研究代表者

馬場 雄也 (Baba, Yuya)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球シミュレータセンター・研究員

研究者番号：60512861

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円、(間接経費) 570,000円

研究成果の概要(和文)：都市内熱環境場に及ぼす河川・緑地・風況の影響を明らかにするために、理想化した都市構造を想定した都市スケール、および気象スケールの異なる時空間スケールで数値実験を行い、影響評価を行った。都市スケールの理想数値実験では、都市構造に対して風向が傾き、都市における樹木の割合が増加すると都市構造が及ぼす空気抵抗が増加することが明らかとなった。この効果を夏季の関東域を対象とした気象スケールにおいて考慮して数値実験による評価を行った。気象条件によって変化する風況場に関わらず、風向と都市構造の変化は空気抵抗を都市部において増加させ、内陸部で気温を上昇させることが分かった。

研究成果の概要(英文)：Effects of river, plant and wind on urban thermal environment are evaluated using idealized urban scale and mesoscale numerical simulations. In the idealized urban scale simulation, the urban structure is simplified to extract effects of each structure component. It is found that both tilted wind direction and increase of plant occupation tend to increase wind stress with respect to urban structure. Mesoscale simulation of urban climate over Kanto plain during summer time revealed that the wind stress increase due to wind tilting and planting ratio change is found to increase in-land temperature, regardless of randomness of meteorological condition.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学、建築環境・設備

キーワード：熱環境

1. 研究開始当初の背景

気候変動下および都市化進行の影響を受けて都市域の気候・気象は変化を続けており、都市計画では都市環境、特にヒートアイランドに代表される熱環境の悪化を改善することが求められている。熱環境の改善を目的とした都市計画として、土地利用の変化が熱環境に影響を持つことから屋上緑化や敷地内緑化率の向上など都市内の緑化が進められており、河川・運河の配置や再生、海陸風による風の道の利用なども試みられてきた。しかしながら限定的な状況では熱環境が改善されるという知見が蓄積されているものの、河川・緑地・風況場の影響を受けて都市内の熱環境場がどのように形成されるか、定量的傾向はよく分かっていない。これは都市が周辺の歴史的な成り立ちから異なる構成要素を持つこと、および熱環境場の形成が風向、日射、湿度などの気象条件にも左右されることに原因がある。

観測による影響評価では人工排熱などの人為的な影響は定量的に評価されているが、河川や緑地の影響はそのときの気象条件に左右されており、熱環境場形成の傾向が把握しにくい。様々な気象条件を考慮した各要素の熱環境への影響を定量的に評価するには、理想化した状況を想定する必要があるが、風況場の形成は風洞実験結果を用いて評価できるものの、各要素の熱環境への影響を評価するのは従来まで困難であった。都市構成要素だけでなく、都市域の熱環境場の形成に重要となるのは気象条件である。熱環境場は気象条件と都市が相互に作用しあって形成されるものであり、都市自体が気象場へ与える影響を考慮することが重要となる。都市域からは運動量や顕熱・潜熱フラックスが発生し、気象場を変化させる。都市が気象条件に与える影響はメソスケールでは平均気温の上昇や気象条件の変化などが明らかにされつつあるが、気象側から都市域への影響は十分に明らかにされていない。

以上の現象を明らかにする上での困難さを克服するためには、理想化した都市をコンピュータ上に構築し、数値シミュレーションによって都市域の熱環境を評価、都市構成要素による環境場変化特性を把握する試みが重要となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、理想数値実験を駆使した解析によって、都市スケールの熱環境場へ及ぼす都市スケール現象の影響、またその気象スケールへの影響、およびこれらの相互作用による都市域熱環境場への影響を明らかにすることである。本研究では都市・気象の2つのスケールの現象を対象とするため、研究段階も2つに分ける必要があり、それぞれの研究段階に分けて、研究目的を次の2点に設定した。

(1) 理想数値実験を実施し、理想化した都

市の熱環境場変化の定量的評価を行い、熱環境場が都市構成要素によって変化するメカニズムを理解する。都市スケールの数値シミュレーションモデルを用いて、都市構成要素の影響を抽出するのに適した都市を構成し、理想実験によって構成要素変化と熱環境変化を対応させることで定量的に評価、熱環境変化のメカニズムを明らかにする。

(2) 都市域の熱環境場から発生する運動量・顕熱/潜熱フラックスの気象条件への影響および都市域・気象間の相互作用を明らかにする。都市域の熱環境場から得られる運動量・顕熱/潜熱フラックスを用いて、気象条件に及ぼす河川・緑地・風況場の影響を推定する。都市域の熱環境場から気象条件への影響を推定し、逆に気象側から熱環境場への影響を推定することで、最終的な都市域の熱環境場を決定する、都市域・気象間の相互作用を明らかにする。

3. 研究の方法

以上の研究の背景と目的を元に計画した研究方法は次のとおりである。ただし、研究進捗状況に応じて当初の計画からは研究方法を変更している。

(1) 都市スケールの理想数値実験

(ステップ1: 理想実験条件の設定) 河川・緑地・風況場の影響を抽出する適切なシミュレーション条件を検討した。季節によって特定の風向や湿度の頻度は高くなるが、気象条件が与える都市域の熱環境変化は現時点では不明なため、夏期の関東域を参考にしてある程度のばらつきを持たせて気象条件を決定する。理想都市構成はパターンを考えれば無限に組み合わせが存在するため、本研究では建物の敷地面積を一つのブロック単位として構成を決定し、各要素の占有面積はすでに入手している都心の土地利用データから平均値を算出して決定、またパラメータとして与え実験条件とする。

(ステップ2: 理想実験の実行と熱環境の評価) ステップ1で決定した条件に従って、理想化した都市を対象とした熱環境場のシミュレーションを実施する。緑地を表現する樹木モデルにはすでに組み込み済みの吉田モデルを使用する。顕熱・潜熱フラックスは建物については環境省のデータ、河川については代表的な夏期の河川水温データを用いて与える。河川には冷気による気温低下の効果、樹木には日射を遮ることで冷気を生み出すプラスの効果期待されるが、それぞれ潜熱フラックスと湿度の上昇と風を遮るマイナスの効果が存在する。熱環境場を不快指数や体感温度など複数の指標で評価し、プラスとマイナスの効果の変化を把握し、河川・緑地・風況場による熱環境変化を評価する(図1)。

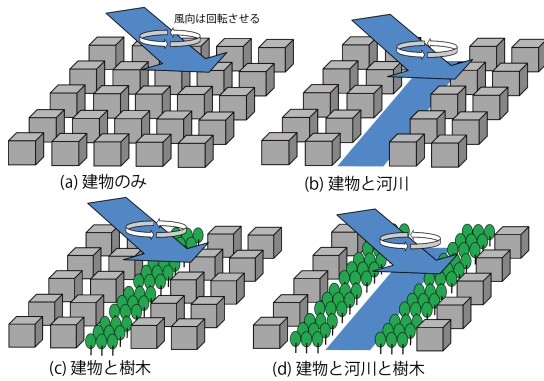


図1：都市スケール数値実験の概略図。

(2) 気象スケールの数値実験

(ステップ1：経験式導出と都市キャノピースキームへの適用) 理想実験から得られた定常となった熱環境場から運動量・顕熱/潜熱フラックスを推定する。理想実験の結果から建物、河川、緑地の影響で各フラックスがどのように変化しているかを調べ、各要素の占める面積・体積と対応した各フラックス変化の相関を見積もる。相関から経験式を求めることができるので、すでに数値モデルに組み込んでいる都市キャノピーモデルに経験式を適用し、メソモデルに組み込む。

(ステップ2：気象スケールの数値実験の遂行と都市内熱環境への相互作用効果の見積もり) 都市構成要素の影響を考慮するように都市キャノピースキームを修正し、メソモデルを用いた数値シミュレーションを実施した。熱環境は都市域の評価と同様に夏期をターゲットとし、先に修正した都市キャノピーモデルを用いて夏期の平均的な熱環境をメソスケールで模擬する。このとき考慮した都市構成要素に応じた経験式を使うことで、再現された熱環境場に差異が発生する。この差異が都市構成要素によりメソスケールを通じて都市域の熱環境場へ及ぼされる相互作用効果となる。この相互作用による熱環境場の変化から、最終的に決定される都市域の熱環境場を見積もり都市構成要素が及ぼす熱環境場変化を評価する(図2)。

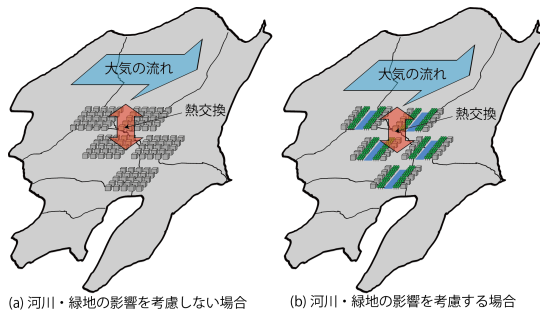


図2：気象スケール数値実験の概略図。

4. 研究成果

本研究では研究段階に応じて2つの異なる都市・気象スケールの現象を対象とし、それぞれの対象について研究成果が得られた。研究成果を得るにあたって、当初計画した研究

方法からの変更点がいくつかあり、変更点についてもここで述べる。

(1) 都市スケールの理想数値実験

(都市構造に対する風向変化による空気抵抗変化の検証) 都市スケールの理想数値実験を実施し、都市構造の構成要素によって変化する各種地表面フラックス(運動量、顕熱・潜熱フラックス)を調べることが当初の目標であった。しかし、研究が進むにつれて都市構造に応じた運動量フラックスの変化が多様であることが判明し、また都市スケールの熱流体解析における顕熱・潜熱フラックスのモデル式が確立していないこと、および顕熱・潜熱フラックスは運動量フラックスの影響を受けることから、都市構造に応じた運動量フラックスの変化を明らかにすることを優先した。理想数値実験の条件は、既往研究および実際の都市における土地利用状況から推定できる代表値を設定することで決定した。気象条件が持つランダム性は都市構造に対する風向の代表値を設定することで考慮した。まず、風洞実験との比較によって構築した都市スケールのシミュレーションモデルの妥当性を検証し、モデルが現実を妥当に再現できることを示した(図3)。風向による空気抵抗の変化を計測した結果、都市構造に対して風向が傾くと傾度が上昇するに伴って空気抵抗が上昇する傾向があることが分かった。これは風向が傾くことで、空気抵抗に寄与する都市構造の前面投影面積率が増加することが原因であり、運動量の減少量から圧力損失見積もられることが分かった。

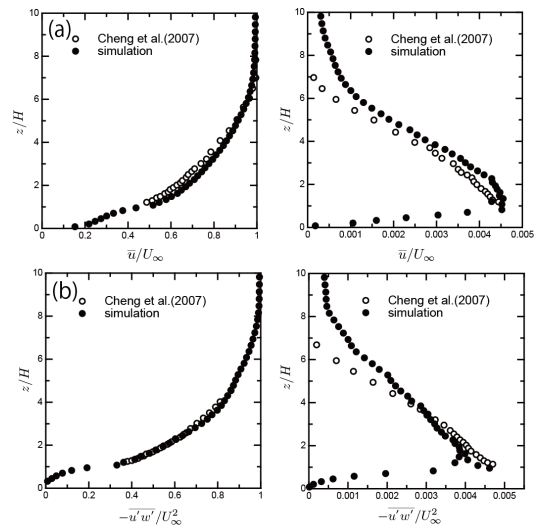


図3：Cheng ら(2007)の風洞実験とシミュレーションモデル結果の統計値比較(左：水平風速の平均値, 右：レイノルズ応力の平均値)。前面投影面積率：(a) 25%, (b) 6.25%。

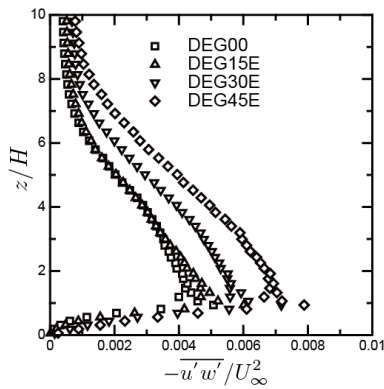


図4：都市構造に対して風向を変化させた場合のレイノルズ応力の変化。図中 DEG00 は風向 0 度、DEG15 は風向 15 度、DEG30 は風向 30 度、DEG45 は風向 45 度を示す。

(都市内熱環境へ及ぼす運動量フラックス変化の影響)理想的な都市構成要素の設定のうち、河川・樹木を含む設定において同様に都市構造が及ぼす空気抵抗を計測した。結果河川は建物前面投影面積率が高い場合には都市内部の風通しを良くし、空気抵抗を低下させることが分かった。しかしながら、建物前面投影面積率が 0.2 程度のときに河川を配置すると、空気抵抗が増加することが分かった。これは、粗度長の変化が建物前面投影面積率と単純な比例関係になく、ある範囲では粗度長が増加し、空気抵抗を増加させる傾向を持つことに起因していることが分かった。樹木を配置した場合、樹木は河川に較べてさらに都市構造による空気抵抗を増加させた。通常の建物投影面積率を樹木にも適用し、樹木割合に対する粗度長の変化を整理したところ、樹木については逆に粗度長が低下する傾向となり、従来の建物投影面積率・粗度長の関係では樹木による空気抵抗が表現できないことが明らかになった。建物と異なり、運動量が樹木体積内部で減衰することを考慮し、圧力損失を考慮すると樹木割合が増加することで粗度長が増加する傾向が表現でき、空気抵抗の増加が表現できることが明らかとなった(図5)。

(2) 気象スケールの数値実験

(運動量フラックス変化を考慮する空気抵抗モデルの導出)気象スケールシミュレーションでは都市の影響を考慮するために、都市キャノピーモデルがよく用いられる。気象スケールのシミュレーションでは都市構造を直接計算格子で解像することができないので、都市内部の風況・熱環境を大幅にモデル化した都市キャノピーモデルを用いて間接的に考慮することになる。空気抵抗は地表面の粗度によって影響を受けることが知られており、一般的な都市キャノピーモデルでも地表面の粗度に応じた空気抵抗モデルが導入されている。このモデル化を踏まえて、都市構造の変化は粗度長で代表できるものとし、風向と建物前面投影面積率とを用いて

空気抵抗を解析的に決定する粗度長モデルを考案した。この粗度長モデルから得られる粗度長および空気抵抗値を理想数値実験から得られたデータと比較したところ、よい一致が見られ、考案したモデルが簡略化した式を用いて現実の粗度長をモデル化できることを示した(表1)。

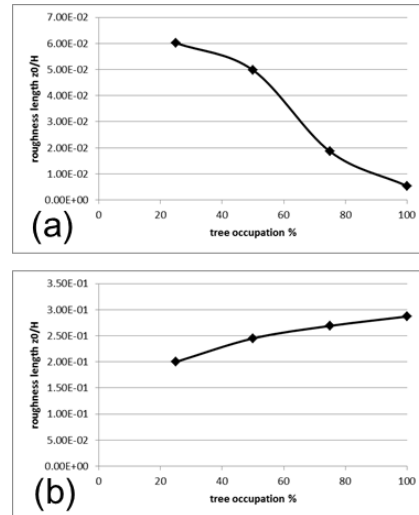


図5：樹木割合による粗度長の変化。(a) 圧力損失の水平成分のみを考慮して算出した粗度長の変化、(b)圧力損失の鉛直成分を考慮して算出した粗度長の変化。

表1：風向に対する抵抗係数と粗度長の変化。 z_0/H は数値実験から得られた粗度長、estimated z_0/H は簡略化したモデル式から見積もった粗度長を示す。

Case	z_0/H	ratio	estimated z_0/H
DEG00	0.096	1.00	0.096
DEG15	0.129	1.26	0.122
DEG30	0.155	1.58	0.151
DEG45	0.183	2.00	0.192

(領域気候モデルの構築とそれに伴う雲微物理過程の開発)関東域を対象とした気象シミュレーションを実施するにあたり、ヒートアイランド現象を含めた都市気候をシミュレーションによって再現する必要がある。これは領域気候モデルを構築することで実現することができる。しかしながら、領域気候を再現するためには、長期的な大気状態の再現性が必要であり、これは熱・水物質の循環によって大きく左右される。モデル要素の中でこのエネルギーバランスを決定するのは雲モデルであることが知られている。そこで、領域気候モデルの構築と並行して長期的なエネルギーバランスが成立するように雲モデルの改良を行った。また、領域気候を計算するのに適した、低計算負荷であり、エネルギーバランスが優れた単層都市キャノ

ピーモデルの実装も加えて行った。結果、雲モデルの氷過程を改良することで、大気のエネルギーバランスが改善することが明らかとなり、関東域を対象とした領域気候シミュレーションも観測と比較して妥当な結果を示すことが明らかにした(図6)。

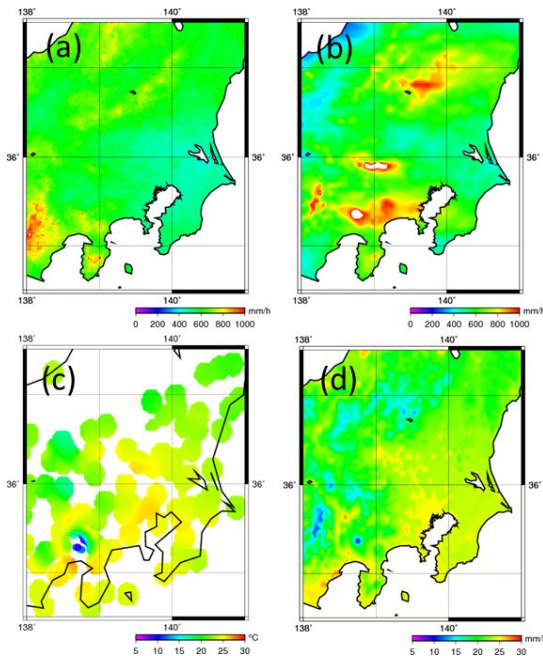


図6：関東域領域気候の比較(4年平均)。(a)観測による積算降水量、(b)シミュレーションによる積算降水量、(c)観測による地表面温度、(d)シミュレーションによる地表面温度。

(領域気候モデルを用いた都市部熱環境の変化の検証)都市スケールの理想数値実験によって得られた、都市構造に応じたフラックス関係式(粗度長モデル)を都市キャノピーモデルに組み込み、都市構造の変化で都市部の熱環境がどのように変化するかを検証した。代表的な夏季の気象条件を現況としコントロール実験として、風向による影響と都市構造の違いの影響を考慮した数値実験を行った。河川による影響は都市スケールの実験では影響が小さかったため除外し、都市部における樹木の割合を増加させた。

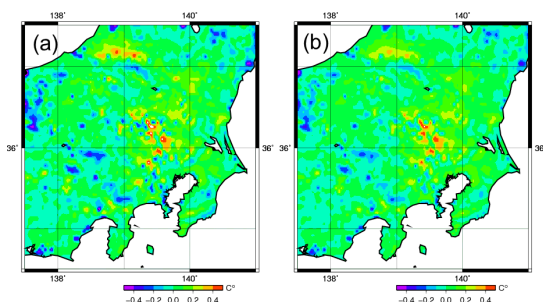


図7：風向による影響と都市構造の変化を考慮した場合の地表面温度および気温の偏差(一ヶ月平均)。(a)地表面温度の偏差、(b)10m高度の気温の偏差。

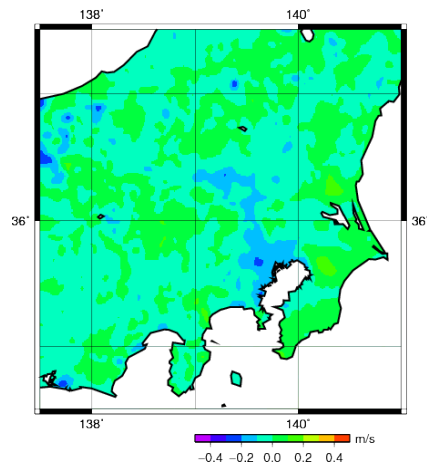


図8：風向による影響と都市構造の変化を考慮した場合の風速強度の偏差(一ヶ月平均)。

結果、直接都市部の地表面温度が上がるわけではなく、内陸部を中心として地表面温度の上昇が見られた。地表面温度(地表から0m高度)の上昇割合は地表面温度で0.5度程度であった(図7)。一方で10m高度までは一様に都市部でも気温上昇が見られた。このときの風況を調べた結果、都市部を中心として風速強度が低下し、内陸部まで到達していることが確認できた(図8)。このことから、風向による空気抵抗を正しく考慮し、樹木の割合を増加させると、都市部では風通しが悪くなるが、気温上昇は都市部よりも内陸部で顕著に現れることが明らかになった。ただし、この検討では研究進捗上発生した困難さから、河川や樹木の伝熱効果を考慮することができなかったため、この結論は都市構造の変化による影響のみに限定される。

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2件)

Yuya Baba, "Sensitivity of atmospheric energy budget on two-moment representation of cloud microphysics in idealized simulations of convective radiative quasi-equilibrium", Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, (2014), doi:10.1002/qj.2342. (査読有り)

Yuya Baba, Keiko Takahashi, "Dependency of stratiform precipitation on a two-moment cloud microphysical scheme in mid-latitude squall line", Atmospheric Research, Vol.138 (2014), pp.394-413. (査読有り)

[学会発表](計3件)

馬場雄也, 高橋桂子, "建物、河川、樹木による風況場の形成と大気への抵抗変化", 第21回地球環境シンポジウム,

2013年9月17日(東北大学).
Yuya Baba, “Analysis for urban climate change over Tokyo metropolitan area under global warming”, AOGS (Asia Oceania Geosciences Society) 10th Annual Meeting (AOGS2013), 2013年6月27日(オーストラリア・ブリスベンコンベンションセンター).

馬場 雄也, 高橋 桂子, MSSG one/two-moment スキームを用いた関東域領域気候モデルの構築, 日本気象学会 2012 年度秋季大会, 2012 年 10 月 3 日(北海道大学).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

馬場 雄也 (BABA, Yuya)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球シミュレータセンター・研究員

研究者番号：60512861