

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月17日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22686053

研究課題名（和文） 都市型短時間集中豪雨と都市化進展の関連性に関する解析及び観測による基礎的検討

研究課題名（英文） An initial study on the relationship between urbanization and heavy rainfall in the urban area by observation and numerical analysis

研究代表者

川本 陽一（KAWAMOTO YOICHI）

九州大学・芸術工学研究院・助教

研究者番号：70569730

研究成果の概要（和文）：本研究はゲリラ豪雨と通称される都市部での短時間集中豪雨と都市化の関連について検討を行った。東京首都圏の夏期のゲリラ豪雨については、東京湾・相模湾より吹き込む南からの海風と鹿島灘より吹き込む東風の収束域で多く発生する事が報告されている。東京首都圏の都市化の進展が東京湾からの海風進入性状に与える影響を検討する為、高層観測による海風の現状の把握と、シミュレーションを用いた海風の性状に対する都市化の影響の評価を行った。

研究成果の概要（英文）：The relationship between urbanization process and heavy rainfall in the urban area was considered. Some cases of heavy rainfall in summer in Tokyo metropolitan area came up in the region where southerly sea breeze from Tokyo bay and easterly sea breeze from Kashimanada were converged. To investigate the effect of urbanization in Tokyo metropolitan area on property of the sea breeze from Tokyo bay, upper-air observation and numerical simulation were adopted.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2011年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2012年度	1,800,000	540,000	2,340,000
総計	8,800,000	2,640,000	11,440,000

研究分野：建築・都市環境工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：地球・都市環境、都市気候

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化による全世界規模での気候変動が喫緊の課題として各分野で取り組まれている一方で、都市部においても人間活動に起因する局所的な気候変動が生じており、これら都市部に特有の気候は都市気候と呼ばれる。都市気候の諸問題は、地球規模での気候変動と同じく産業革命以降に生じている。化石燃料の使用により都市部では大量のエネルギーが消費され、また都市は高密度化しより複雑な形態を呈する様になった。都市気

候の中でも顕著な例としては、都市部の気温が郊外に比べて高くなるヒートアイランド現象が挙げられる。ヒートアイランド現象は産業革命期のロンドンにて初めて観測された。日本においては1970年代以降にヒートアイランド現象へ注目が集まり、2004年にヒートアイランド対策大綱が策定され一般にも広範に認知される問題となり、またそのメカニズムについて、観測、及び、数値シミュレーションによる研究が多数為されてきた。同様に都市気候の問題として都市部での

人為起源による汚染物質による大気汚染も、多くの研究が為され、汚染物質の排出量規制などによりかつてに比べて状況は改善している。

一方で、近年ゲリラ豪雨と呼称される都市型の短時間集中豪雨が問題視され始めている。特に 2008 年には兵庫県神戸市都賀川や東京都豊島区の下水道工事現場等で人命が奪われる事故が立て続けに発生した。これら都市部での短時間集中豪雨と都市化の関連を示唆する報告が見られる。それらによると、都市部で発生した人為起源のエアロゾルが凝結核となり積乱雲の発達に寄与する、都市化により東京首都圏では東京湾および相模湾からの海風と鹿島灘からの海風の吹き方が変わりそれらの収束域で強雨が発生しやすくなった、などである。

筆者はこれまで主に夏期の東京首都圏のヒートアイランド現象を対象とし、シミュレーションによる数値解析を用いてそのメカニズム解明に努めてきた。夏期の東京首都圏のヒートアイランド現象は東京湾から流入する海風の影響を強く受けており、メソスケール気象モデルを用いた数値解析手法は有効な手法である。本研究ではヒートアイランド現象の数値解析により培った経験を基に、東京首都圏でのゲリラ豪雨発生の原因の一つと考えられる海風の性状について解析する事を目指す。

2. 研究の目的

一般にゲリラ豪雨と通称される現象は、都市気候と気象の問題として捉えられる。ヒートアイランド現象に代表される都市気候の諸問題は都市の存在により特徴付けられるのに対し、短時間集中豪雨は広域の気象条件にも左右される気象現象でありながら都市の影響による都市気候としての様相も呈する、複雑な現象であると言える。筆者は数値気象モデルを適用して都市部の気象現象の傾向、即ち都市気候の解明を試みてきた。気象モデルを用いている事から、シミュレーションの初期条件・境界条件を適切に設定する事により、将来的には短時間集中豪雨の予測も可能となると考えられる。また上述した様に、都市部の気象解析に関しても適用可能性を示すものである。しかし降雨現象の予測については、モデル解像度、境界条件（観測データの組込）、降雨モデル、等々の複合的かつ広範な問題が残されており、早急に解決を見る事は困難な課題である。本研究では解決すべきこれら諸問題に対し、基礎的検討として、以下 2 点に関して取り組む。

(1) 高層観測による海風の性状の把握

陸は熱容量が小さく地表付近の気温の日変化が大きいのに対し、海は熱容量が大きく

海面上の気温は 1 日を通して日変化が小さい。そのため日中は海上に対して陸上は気温が高くなり、陸上では上昇流が生じ、それを補うために海から陸に向かう風が吹き、これが海風と呼ばれる。逆に夜間は陸から海に向かう陸風が生じ、これらを海陸風循環と呼ぶ。日中に吹く海風は数百 m 程度の厚みを持っているため、AMeDAS の様に地表面の風向・風速の観測のみではその性状を十分に捉える事は出来ない。そこで本研究では高層観測を行い、海風の性状を立体的に把握する事を目的とした。

(2) 数値解析による海風の進入性状の検証

筆者はこれまで、メソスケール気象モデルを用いた数値解析により、東京首都圏のヒートアイランド現象の解析を行うと同時に、解析モデルの改良を続けてきた。本研究においては都市化が東京湾から東京首都圏へと吹き込む海風の性状に与える影響を、数値解析により検証する事を目的とした。

3. 研究の方法

(1) 高層観測による海風の性状の把握

海風到達時の上空の風環境の性状を捉えるため、2011 年及び 2012 年に高層観測を行った。

① 2011 年高層観測

東京湾湾岸に近い東京都内（東京大学本郷キャンパス内、図 1 中“Tokyo”）と、東京湾より進入する海風の風下側となる内陸部の埼玉県内（埼玉大学内、図 2 中“Saitama”）の 2 地点においてドップラーライダーを用いて上空風の同時観測を行った。観測は 2011 年 8 月 8 日より 12 日に行われた。

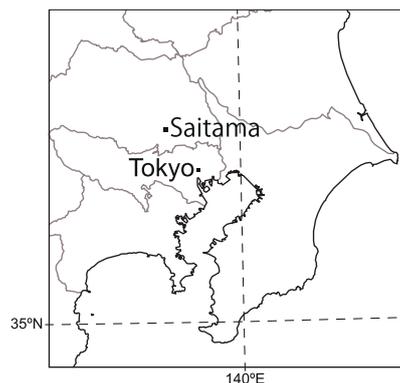


図 1 観測地点

ドップラーライダーは大気中にレーザ光を発射、エアロゾルによる散乱光を受信し、ドップラー効果による周波数変化を解析する事によりエアロゾルの移動速度、即ち上空の風速を計測する観測装置である。ドップラーライダーを用いた風速算出法は簡略化 VAD (Velocity Azimuth Display) 法を用い、鉛

直方向の各高度に於ける水平風速成分を観測した。簡略化 VAD 法ではドップラーライダーのスカナを一定仰角で回転させる。本研究では仰角を 60° とし分解能を 150m と設定したので、鉛直方向の解像度は約 130m ($150 \times \sin 60^\circ$) である。また観測の時間間隔は 10 分である。ドップラーライダーによる観測の様子を図 2 に示す。



図 2 ドップラーライダー

②2012 年高層観測

ドップラーライダーは短い時間間隔で上空の風向・風速を観測できるメリットがあるが、一方で風以外の要素について観測が出来ない。2012 年は風以外の気象要素も観測するため、低層 GPS ゾンデを用いて上空の温度・湿度・風向・風速の観測を行った。

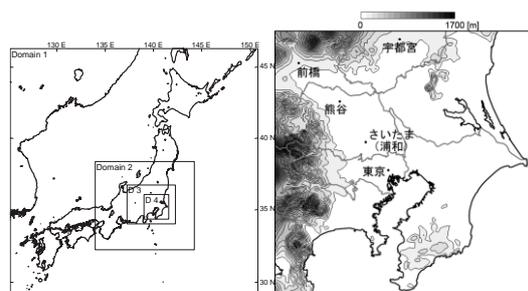
観測点は東京大学本郷キャンパス内 (図 1 中“Tokyo”) の 1 地点のみで行った。GPS 低層ゾンデは 2012 年 7 月 24 日より 27 日までの各日、09:00 から 16:30 (最終日 7 月 27 日のみ 15:00) まで 1.5 時間間隔で放球し観測を行った。

(2) 数値解析による海風の進入性状の検証

都市化の進展が海風の性状に与えた影響を検証するため、メソスケール気象モデルを用いた数値解析を行った。本研究においてはアメリカのペンシルベニア州立大学と NCAR (National Center for Atmospheric Research) により開発されたメソスケールモデル MM5 を用いた。都市化の影響を反映させるため、国土数値情報の土地利用データを組み込む様に MM5 に改良を施し、1970 年代と 1990 年代の土地利用データを用いた数値解析を行った。

数値解析は 1980 年代に行われた高層観測の期間に合わせ、1986 年 7 月 31 日を対象とし、昭和 51 (1976 年) 年、昭和 62 (1987) 年、平成 9 (1997) 年の土地利用データセットを用いて解析を行った。以降、それぞれ Case 76、Case 87、Case 97 とする。

対象領域は図 3 に示す Domain 1 (東西 1890km×南北 1890km、解像度 27km) ・ 2 (756×675, 9) ・ 3 (369×297, 3) ・ Domain 4 (189×189, 1) の 4 領域について、広範な領域の解析結果を境界条件として小領域の計算を行うネスティングと呼ばれる手法を用いて解析を行い、Domain 4 を評価対象とした。



a) 全領域 b) Domain 4 詳細
図 3 数値解析領域

4. 研究成果

(1) 高層観測による海風の性状の把握

①2011 年高層観測

観測期間中、8 月 8 日は準備及び予備観測とした。9 日及び 10 日は明確な海風の進入が見られ、11 日と 12 日に東京都内及び埼玉県内にて降雨が確認された。なお 11 日 12 日共に降雨の範囲が限られていたため、それぞれの観測点近傍の AMeDAS では降雨は観測されていない。

図 3 に海風の進入が顕著に見られた 2011 年 8 月 10 日の水平風速ベクトル高度時間断面図を示す。ベクトルは各高度の水平風速を示す。無色部分は欠測値である。ドップラーライダーは大気中のエアロゾルによる散乱光を計測するため、十分な量のエアロゾルが存在しない場合には良好な結果を得られないため欠測となる。また、埼玉観測点に設置した機器は観測期間中に数回異常停止となり欠測が多い。

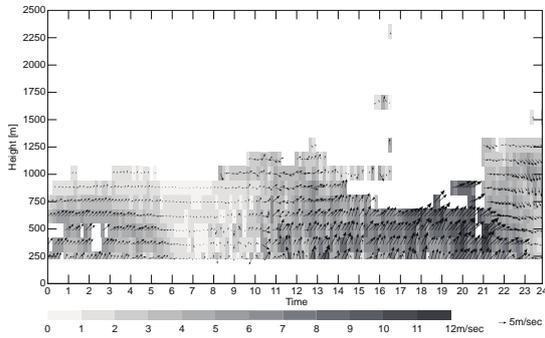
東京観測点では 10:30 頃より南寄りの風が強くなり始め、この時刻に海風が到達したものと考えられる。一方の埼玉観測点では 13:40 頃より南寄りの風が強くなる。高度 1000m 以上では欠測が多いため確言は出来ないが、海風の厚さとしては約 1000m 程度まで達すると考えられる。

図 4 に降雨が発生した 2011 年 8 月 11 日の水平風速ベクトル高度時間断面図を示す。当日の気象状況は、13:00 前より奥多摩・秩父の山間部で雨雲が発達し東京・埼玉の県境に沿う様に東進した。図 5 に 15:00 の降水強度分布を示す。17:00 以降は両観測点に於いても降水の可能性があったため観測を中止している。

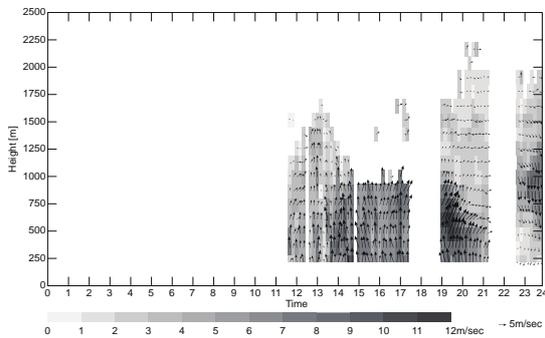
両観測点に於いて海風の進入は見られず、特に埼玉観測点では 12:00 以降、雨雲が近傍を通過するまで 14:40 頃まで高度 1000m 以下では北寄りの風が強く、積雲対流に向けて吹き込む様子が見られる。

海風が観測された 8 月 10 日の結果と比較し、8 月 11 日の明け方は上空まで風向・風速のデータが得られた。先述した様にドップラーライダーは上空のエアロゾルによる光の散乱を捉える装置であり、降雨が発生した 8 月

11日の方が上空のエアロゾル濃度が高かった事が示唆される。エアロゾルは積乱雲中で凝結核として働き降雨に寄与するため、当該観測日の降雨とエアロゾル分布の関連について今後検討を行う。

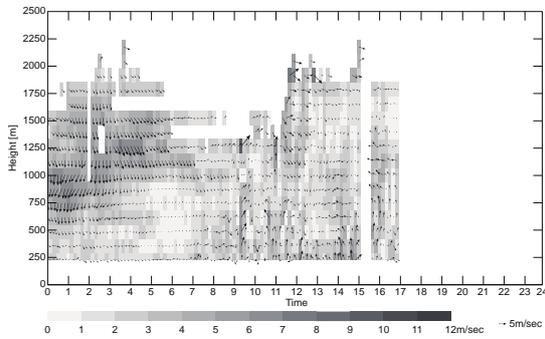


a) 東京観測点

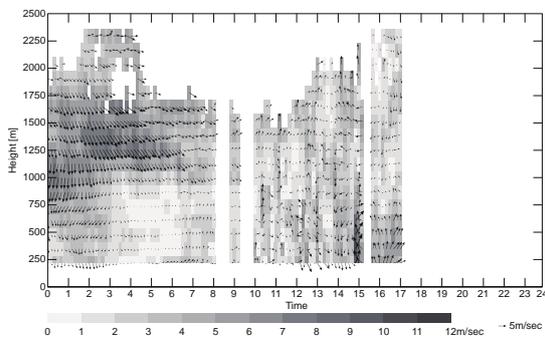


b) 埼玉観測点

図4 水平風速ベクトル高度時間断面図 (2011年8月10日)



a) 東京観測点



b) 埼玉観測点

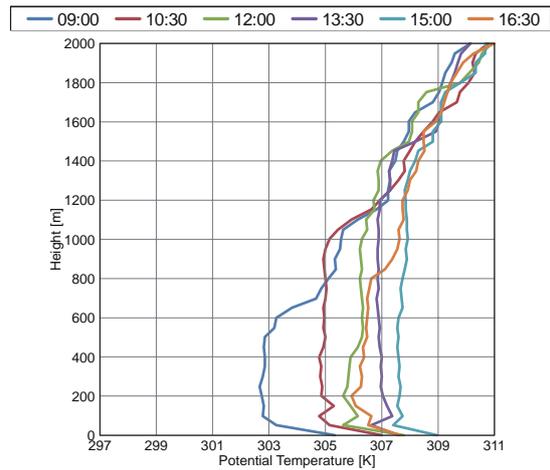
図5 水平風速ベクトル高度時間断面図 (2011年8月11日)

②2012年高層観測

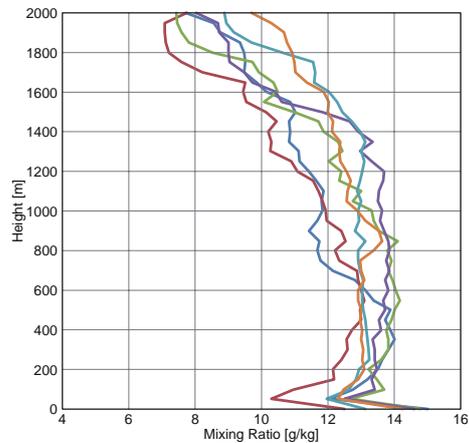
観測期間の内、東京観測点において明瞭に海風の進入が観測された7月26日の結果を示す。温位プロファイルを図1-b)、混合比プロファイルを図1-c)に示す。温位とは空気塊を1000hPaに断熱変化させた温度であり、これにより上空の大気と地表面の大気の温度の比較が可能となる。

当該観測日は12:00頃より南寄りの風が強く吹き始め、海風の到達と考えられる。温位勾配がほぼ垂直となっている層は大気の鉛直混合が盛んであり、混合層と呼ばれる。海風到達時刻の12:00には混合層高度は1400m程度まで上昇しており、また海風到達後に混合層内部の混合比(絶対湿度)の上昇も見られ、湿潤な海風による加湿の効果が観測された。

本研究では東京観測点の1点のみの観測であるが、同時に研究分担者として参画している基板研究(A)(課題番号:22246074、研究代表:吉門洋)において、同時期に埼玉県内でGPS低層ゾンデによる高層観測を実施しており、今後は両観測データを併せて解析を行う。



a) 温位プロファイル



b) 混合比プロファイル

図6 2012年7月26日高層観測結果

(2) 数値解析による海風の進入性状の検証

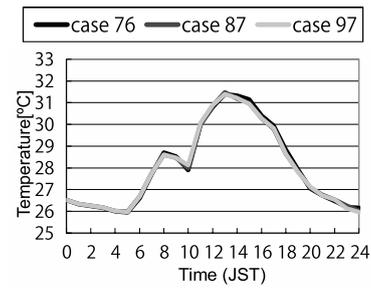
先ず始めに、先行研究として 1986 年夏期に行われた高層観測 (H. Yoshikado, H. Kondo, Inland penetration of the sea breeze over the suburban area of Tokyo. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.48, pp.389-407, 1989) に合わせ、昭和 62 (1987) 年の土地利用データを用いた解析を行い、観測結果と検証し十分な解析精度を有する事を確認した。続いて行った昭和 51 (1976) 年の土地利用データを用いた解析結果と、平成 9 (1997) 年の土地利用データを用いた解析結果の比較を示す。以降、それぞれ Case 76、Case 87、Case 97 とする。

東京管区気象台・さいたま AMeDAS 観測点・熊谷地方気象台を含むメッシュでの気温 (地上 2m) の日変化を図 7 に示す。核観測点の位置は図 3 に示す。各値は毎正時前 10 分の平均値である。

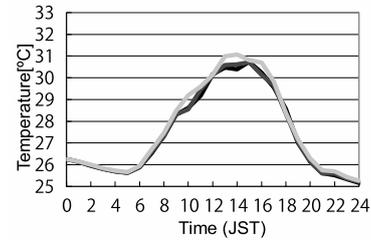
1970 年代と 1990 年代の土地利用データを比較すると、都心部では建物用地等は殆ど増加していないため、東京管区気象台付近においては各ケースで気温の差異はごく僅かな結果となった。しかし内陸部ほど都市化の影響を受け、さいたま AMeDAS 観測点付近では Case 76 に対して Case 97 は日最高気温で約 0.3°C、熊谷では約 0.6°C の上昇が見られた。これは、1) 僅かとは言え都市化が進行した風上側の都心部からの間接的な影響、2) 郊外で都市化が顕著に進んでおり、その直接的な影響、の双方に起因すると考えられる。

都市化の影響が海風の進入に与える影響を検討するため、図 8 に東京管区気象台・さいたま AMeDAS 観測点・熊谷地方気象台を含むメッシュでの風速・風向 (地上 10m) の日変化を示す。海風の進入時間を比較するため、各値は毎正 10 分の 10 分間平均値とした。

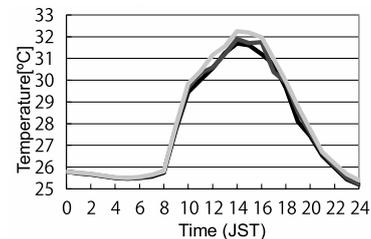
Case 87 では東京管区気象台付近を 08:00 に海風が通過する様子が認められた。Case 76 のみ 10:00 前後に風速が弱まるが、概ね一日を通じて各ケースは同様の傾向を示し、海風進入時刻についても差異は認められなかった。一方さいたま AMeDAS 観測点付近に於いては、Case 76 は Case 87 と同様に 14:00 (図 8 b) 点線) に風速がピークを示し海風の進入を示すが、Case 97 のみ 14:20 分頃 (図 8 b) 一点鎖線) に遅れ、東京首都圏の都市化の影響が海風の到達時間に影響を及ぼしている事が示された。



a) 東京

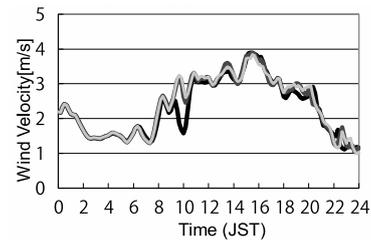


b) さいたま

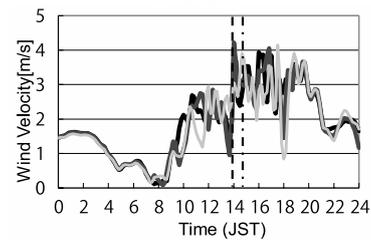


c) 熊谷

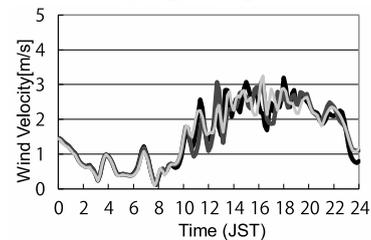
図 7 気温日変化 (地上 2m)



a) 東京



b) さいたま



c) 熊谷

図 8 風速日変化 (地上 10m)

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 4 件)

- ① C.S.B. Grimmond, M. Blackett, M.J. Best, J.-J. Baik, S.E. Belcher, J. Beringer, S.I. Bohnenstengel, I. Calmet, F. Chen, A. Coutts, A. Dandou, K. Fortuniak, M.L. Gouvea, R. Hamdi, M. Hendry, M. Kanda, T. Kawai, Y. Kawamoto, H. Kondo, E.S. Krayenhoff, S.-H. Lee, T. Loridan, A. Martilli, V. Masson, S. Miao, K. Oleson, R. Ooka, G. Pigeon, A. Porson, Y.-H. Ryu, F. Salamanca, G.J. Steeneveld, M. Tombrou, J. A. Voogt, D.T. Younga and N. Zhangu, Initial results from Phase 2 of the international urban energy balance model comparison, *International Journal of Climatology*, 査読有, Vol.31, 2011, pp.244-272
DOI: 10.1002/joc.2227
- ② R. Ooka, T. Sato, K. Harayama, S. Murakami and Y. Kawamoto, Thermal Energy Balance Analysis of Tokyo Metropolitan Area Using a Mesoscale Meteorological Model Incorporating an Urban Canopy Model, *Boundary Layer Meteorology*, 査読有, Vol. 138, 2011, pp.77-97
DOI: 10.1007/s10546-010-9550-8
- ③ M. Khiem, R. Ooka, H. Hayami, H. Yoshikado, H. Huang and Y. Kawamoto, Process analysis of ozone formation under different weather conditions over the Kanto region of Japan using the MM5/CMAQ modelling system, *Atmospheric Environment*, Vol.44, 2010, pp.4463-4473
DOI: 10.1016/j.atmosenv.2010.07.038
- ④ C.S.B. Grimmond, M. Blackett, M.J. Best, J. Barlow, J.-J. Baik, S.E. Belcher, S.I. Bohnenstengel, I. Calmet, F. Chen, A. Dandou, K. Fortuniak, M.L. Gouvea, R. Hamdi, M. Hendry, T. Kawai, Y. Kawamoto, H. Kondo, E.S. Krayenhoff, S.-H. Lee, T. Loridan, A. Martilli, V. Masson, S. Miao, K. Oleson, G. Pigeon, A. Porson, Y.-H. Ryu, F. Salamanca, L. Shashua-Bar, G.-J. Steeneveld, M. Tombrou, J. Voogt, D. Young and N. Zhang, The International Urban Energy Balance Models Comparison Project: First results from Phase 1, *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, No. 49, 2010, pp.1268-92

DOI: 10.1175/2010JAMC2354.1

[学会発表] (計 5 件)

- ① Y. Kawamoto, Doppler lidar observations of wind fields over the Tokyo metropolitan area, 5th Japanese-German Meeting on Urban Climatology, 2012年9月22日, 広島工業大学
- ② 川本陽一, ドップラーライダーを用いた東京首都圏上空の風環境観測, 日本建築学会大会, 2012年9月14日, 名古屋大学
- ③ Y. Kawamoto, Doppler lidar observations of wind fields over the Tokyo metropolitan area, 8th International Conference on Urban Climate, 2012年8月7日, University College Dublin, Dublin, Ireland
- ④ 川本陽一, メソスケール気象モデルの地表モデル改良による地表面熱収支解析への影響検討, 日本建築学会大会, 2011年8月23日, 早稲田大学
- ⑤ Y. Kawamoto, H. Yoshikado, R. Ooka, H. Hayami, H. Huang and M. V. Khiem, Study on Progress of Large Scale Heat Island Phenomenon in Tokyo Metropolitan Area, First International Conference on Sustainable Urbanization, 2010年12月16日, Harbour Grand Kowloon Hotel, Hong Kong.

[図書] (計 1 件)

- ① Z. Bu, H. Hayami, K. Hiyama, T. Hoshiko, H. Huang, S. Kato, Y. Kawamoto, M.V. Khiem, M.F.B. Mohammed, F. Nakajima, K. Nakao, R. Ooka, T. Prueksasit, H.B. Rijal, K. Yamamoto, H. Yoshikado, Springer, *Ventilating Cities – Air-flow Criteria for Healthy and Comfortable Urban Living*, 2012, pp.11-32

6. 研究組織

(1)研究代表者

川本 陽一 (KAWAMOTO YOICHI)

九州大学・芸術工学研究院・助教

研究者番号：70569730