

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 6 月 7 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360198

研究課題名（和文） 境界層高度を用いた都市接地層乱流のスケーリング則に関する研究

研究課題名（英文） Scaling of turbulence in urban surface layer using boundary layer height

研究代表者

森脇 亮（MORIWAKI RYO）

愛媛大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：10302952

研究成果の概要（和文）：超音波風速計による地上の熱収支計測とシーロメータによる大気境界層計測を同期させることにより，境界層高さをを用いた都市接地境界層乱流の新たなスケーリング則（相似則）を提案することを目的として研究を遂行した．シーロメータを用いた移動観測により，都市域と郊外域で境界層の発達度合いに差が生じることが明らかとなった．またシーロメータの移動観測により得られる都市域と郊外域の光学的厚さを検討したところ，都市上空で雲が発達しやすい傾向にあることが示唆された．地上の熱収支計測と境界層高度の同時観測によって，大気境界層の挙動に対する都市効果を検討する上で重要な知見が得られたものと考えている．

研究成果の概要（英文）：The main interest in this study is the relationship between boundary layer height and the urban surface turbulence and energy balance. We investigated the effects of differences in land use on the formation of clouds, using the summer time datasets from the observations of cloud base level, solar radiation, surface heat flux, air temperature and humidity. The followings are main outcomes. Cloud base level over urban area was higher than that over rural area when wind blew along the border of the abrupt change of land use. Solar radiation over urban area tended to be smaller than that over rural area in the afternoon of sunny days. This was demonstrated by the spatial distribution of water vapor and the development of mixing layer estimated from surface heat flux. Absolute humidity in urban area tended to be lower in comparison with that in rural area. Therefore, the urban dew-point temperature also became lower than that in rural area. As a result, the urban lifted condensation level (LCL) was also lower. The spatial difference of LCL qualitatively coincided with that of observed boundary layer. This indicates that the surface water vapor distribution affected the formation of cloud aloft. In addition, the mixing layer height was estimated from the accumulation of surface heat flux. The estimation shows that the convection developed upward beyond LCL and this is more prominent in urban area. The estimation supports the observation where cloud in urban area tended to develop higher than rural area.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	12,000,000	3,600,000	15,600,000
2011年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2012年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：境界層，乱流，都市気象，フラックス，ヒートアイランド，雲

1. 研究開始当初の背景

近年の全球レベルの気候変動に伴って、ヒートアイランド現象や集中豪雨などの都市スケールの大気環境問題も深刻さを増している。都市が大気に及ぼす現象を定量的に予測するには、現象の引き金となる都市—大気間の乱流輸送過程の把握が重要である。報告者らは、住宅街における乱流フラックスの時間・季節挙動を明らかにし、既存の乱流相似理論が都市境界層では一部破綻することを指摘するなど、世界に先駆ける成果を得てきた。その一連の過程で、都市境界層における運動量や熱や他のスカラー量の乱流輸送過程には、都市キャノピー自体の構造（建物配列や高さ、熱源の不均一性など）に起因する要素だけではなく、上空の大気境界層の性質（境界層高度、物理量分布）の影響を受けやすいことを示唆する結果が得られている。例えば、森林では熱と水蒸気の輸送に相似性が保たれているのに対し、午前中の大気境界層の発達過程において、都市では相似性が保たれにくい (Moriwaki and Kanda, 2006)。すなわち、都市境界層特有の乱流輸送過程を乱流相似関数を用いて適切に表現するには、大気境界層の影響を考慮しなければならないことがわかってきたのである。この問題を解明するためには、地表における乱流輸送量（＝フラックス）の観測に加え、大気境界層高度の同期計測を行い、境界層の性質と地表付近の乱流輸送過程の因果関係を明らかにする必要がある。

また都市化による顕熱フラックスの増大が局所的な集中豪雨の発生原因となっているという指摘もある。例えば、藤部(2004)は首都圏における広域的な都市効果による昇温が収束を強め、都心の強い降水の増加をもたらす可能性を報告している。また下重ら(2010)は、都市の存在により海風の侵入の仕方が変化し、それが局地的な豪雨に繋がることを数値実験で示した。さらに、降水のもとになる対流雲に関する研究も多くある。例えば、甲斐ら(1995)は東京環状八号線道路付近で観測される環八雲は、海風の収束とヒートアイランド循環によって発生すると推定している。また、ヒートアイランドが対流雲をもたらすことを数値実験で示した研究報告もある(1979)。都市と降水の関連を示した研究は多いが、未だ決定的ではなく都市と降水の関連を積極的に支持する証拠は不十分であり、スモール・スケールの現象を取り上げる組織的な観測が必要となっている。

2. 研究の目的

そこで本研究では、申請者が十分に実績を上げている超音波風速計による地上の乱流計測と、シーロメータによる大気境界層計測を同期させることにより、境界層の性質と地表付近の乱流輸送過程の因果関係についての知見を得ることを目的とした。

具体的には、(1) 都市、水田それぞれの接地層内において熱収支および乱流計測を行い、地表面フラックスの特徴を明らかにする。

(2) 地表面フラックスデータとシーロメータによって計測された大気境界層高度や雲の影響などの外的気象因子との関係を調べる。また、大気境界層と地表面フラックスの相互作用について物理的なメカニズムを解明する。

3. 研究の方法

(1) 観測対象地

本研究で対象とする松山平野は、四国の西北部に位置し、一級河川である重信川とその支流である石手川を有する、東西約 20km、南北約 17km、面積約 100km²の沖積平野である。人口約 52 万人の松山市に人口や建物が集中しているが、周辺部には水田などが広がっている。国土数値情報（国土地理院）の土地利用種別（平成 18 年）を基に作成した松山平野の土地利用図を図-1 に示す。上述したように、土地利用のコントラストが明瞭であることが確認できる。特に、重信川を境にして、北側に市街地、南側に水田が広がっている。

(2) 観測方法

a) 雲底高度の移動観測

シーロメーター (CL31, Vaisala) を軽トラックに設置し、雲底高度の移動観測を 2011 年 6 月から 2011 年 11 月の間に計 26 回行った (写真-1)。シーロメーターはライダー

(LIDAR: LIght Detection And Ranging) の原理に基づく。垂直方向にパルスレーザーを射出し、雲等の散乱体にぶつかった後に返ってくる後方散乱光を感知する。そして、レーザーを射出してから後方散乱光が返ってくるまでの時間から散乱体の高度、後方散乱光の強度から雲の有無を判別する。観測ルートに関しては、愛媛大学 (図-1 の A 点) から松前町方面へ南下し、上野郵便局前 (図-1 の B 点) で U ターンして愛媛大学へ戻ってくるまでとした。1 回の観測における所要時間は約 1 時間である。本研究では図-1 の土地利用図を基に、A 点から中川原橋 (図-1 の C 点) までの区間を都市域、C 点から B 点までの区間を郊外域と定義した。GPS ロガーを搭載し、

シーロメーターの後方散乱プロファイルデータと位置データを対応させた。観測日に関しては、天気図や天気予報、目視等により雲の観測が可能であろう日を選定した。

b) 地表面フラックス観測

筆者らは、都市と郊外の放射および熱収支の違いを評価するため、2010年9月2日から2012年9月現在（継続中）、松山平野内の2地点（都市・郊外の代表地点）において地表面フラックスの同期観測を行っている。観測地点に関しては、都市の代表地点として松山市東石井の国土交通省松山第一出張所（図-1の黒色×印）、郊外の代表地点として松前町大間の下深井戸（図-1の白色×印）の2地点を選定している。都市の観測地点の周囲は主に中層商業ビル、アパート、低層住宅地で占められており（写真-2）、郊外の観測地点の周囲は主に圃場で畑や水田が広がっている

（写真-3）。放射収支計（CNR-4, Kipp&ZonenとMR-40, EKO）を使用し、短波放射および長波放射を計測している。本研究では、鉛直下向きの短波放射量のことを日射量として解析に用いた。また、超音波風速温度計

（SAT-550, Kaijo-sonic）とオープンパスガスアナライザー（LI-7500, LI-COR）より、渦相関法を用いて顕熱・潜熱フラックスを算出している。

c) 気温・湿度観測

筆者らは、松山平野内の気温および湿度の時空間分布を把握するため、2010年6月24日から2012年9月現在（継続中）、松山平野内の都市から郊外までを網羅するように選定した21地点において気温および湿度の連続計測を行っている。観測地点は主に小学校であり、百葉箱の中に気温・湿度センサー（U23-001, Onset）を設置している。本研究では、比較的観測ルートに近い2地点（都市・郊外の代表地点）における気温および相対湿度のデータを解析に用いた。都市の代表地点は松山市二番町の番町小学校（図-1の黒色○印）、郊外の代表地点は伊予郡松前町の北伊予小学校（図-1の白色○印）である。

4. 研究成果

(1) 都市と郊外における境界層高度の違い

シーロメーターによる雲底高度の移動観測を行った結果、雲を観測することができたのは計16回であった。これらの中から、都市域と郊外域の地表面の土地利用の違いが雲底高度に与える影響について議論するため、一般的な大気境界層高度の存在範囲である約1000～2000mに雲が存在し、都市域から郊外域にかけて空間的に連続して雲が存在していたケースに着目した。そのケースは計6回あり、case-A：雲底高度が郊外域よりも都市域で高い場合（3回）、case-B：雲底高度が都市域と郊外域でほとんど一定である場

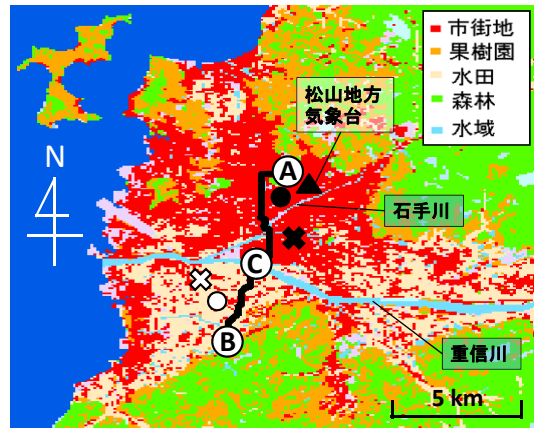


図-1 松山平野の土地利用および各観測地点。
A点：愛媛大学，B点：上野郵便局前，C点：中川原橋
×印：フラックス観測地点（黒色：都市，白色：郊外），
○印：気温・湿度観測地点（黒色：都市，白色：郊外）



写真-1 雲底高度の移動観測の様子



写真-2 地表面フラックス観測の様子（都市）



写真-3 地表面フラックス観測の様子（郊外）

合 (3 回), という 2 種類のケースに分類することができた. 各ケースにおける雲底高度の観測結果の代表例を図-2, 図-3 に示す. 図中の凡例では, 雲底高度を CBL (Cloud Base Level) と表記している. case-A では雲底高度が郊外域よりも都市域で高くなっていることが分かる. 一方, case-B では雲底高度が都市域と郊外域でほとんど一定であることが分かる.

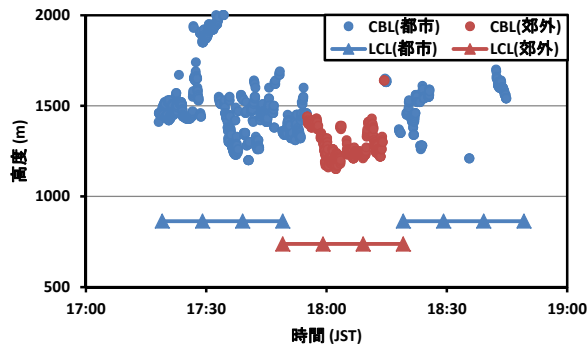


図-2 雲底高度の移動観測結果
(case-A:2011年7月26日17時台)

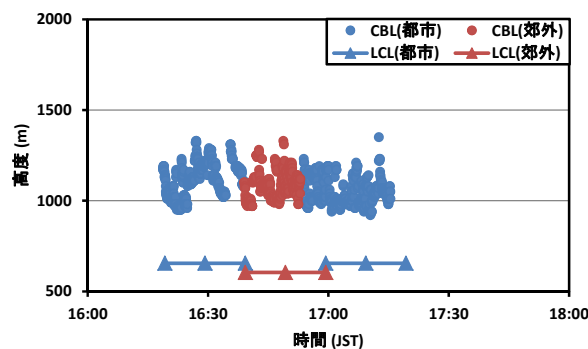


図-3 雲底高度の移動観測結果
(case-B:2011年9月21日16時台)

まず雲底高度が郊外域よりも都市域で高くなる要因について検討を行う. case-A の代表例として図-2 に示した観測日時における都市及び郊外の LCL の算出結果を同図中に示す. 雲底高度は持ち上げ凝結高度 LCL (Lifted Condensation Level) は水蒸気を含んだ大気塊が対流等によって断熱的に持ち上げられて飽和に達する高さであり, 地上の気温・湿度観測データを用いて算出した. 松山平野ではヒートアイランド現象だけでなく, 都市域が郊外域よりも乾燥するドライアイランド現象が確認されている. それゆえ都市域では郊外域に比べて気温が高く相対湿度が低くなるため, 図-2 から分かるように LCL が郊外域よりも都市域で高くなる. 観測された雲底高度の空間分布はこの傾向と定性的に合致していることから, 地表付近の気象要素の差異が雲底高度に差を生じさせると考えられる. しかし観測された雲底高度

が LCL よりも高くなっているのは, この日が曇った日であったために対流が弱く, 大気塊が断熱的には持ち上げられなかったからであると考えられる.

次に, case-A と case-B の気象要素を比較することにより, 雲底高度が都市域と郊外域でほとんど一定になる要因について検討を行う. case-B の代表例として図-3 に示した観測日時における都市及び郊外の LCL の算出結果を同図中に示す. 上述したように, 都市域では郊外域に比べて気温が高く相対湿度が低くなるため, LCL が郊外域よりも都市域で高くなる (図-3). しかしながら, 都市域と郊外域の LCL の差を比較すると, case-A よりも case-B の代表例で小さい. また風向を調べたところ, case-A では東西方向, case-B では南北方向であったことから, 風向の違いが雲底高度の差に影響を与えることが考えられる.

以上のことをまとめて, 都市域と郊外域の地表面の土地利用の違いが雲底高度に与える影響について考察を行う. 松山平野では, 都市域と郊外域が重信川を境にして南北に位置している (図-1 参照). ヒートアイランド現象やドライアイランド現象により, 都市域は郊外域に比べて気温が高く相対湿度が低くなる. 風向が東西方向である場合, 風は都市域と郊外域の境界に沿って吹くために, 地表付近の気象要素の差異が大気境界層上部まで保持され, 結果として雲底高度が郊外域よりも都市域で高くなると考えられる. 一方風向が南北方向である場合, 風は都市域と郊外域の境界に向かって吹くために, 大気間の相互影響により地表付近の気象要素の差異が小さくなる. さらに大気が上空まで持ち上げられる最中にも大気間の相互影響により, 地表付近の気象要素の差異が大気境界層上部まで保持されず, 結果として都市域と郊外域の雲底高度に差が見られなくなると考えられる.

(2) 都市と郊外における雲の厚さの違い

比較的晴れた日における都市と郊外の日射量を比較することにより, 雲の発達程度について検討を行った. 都市及び郊外の日射量の日変化の一例を図-4 に示す. 日射量の値の減少は, その時間に上空に雲が存在し日射が遮られていたことによると考えられる. 本研究では, 熱的な対流が盛んな夏季を対象にして, 2011 年 7 月, 8 月, 9 月の中から日照率 50%以上 80%未満の日を抽出し, 雲があまり存在していない快晴日は解析から除外した. 抽出した日数は計 29 日であった. まず, 日の出後 6 時から日の入り前 18 時までの 1 時間毎の日射減少率を算出し, どの時間帯に雲が日射を遮断する影響が大きいのか検討を行った. 日射減少率は 10 日毎に 10 分間日射量の最大値を求め, その値に対する

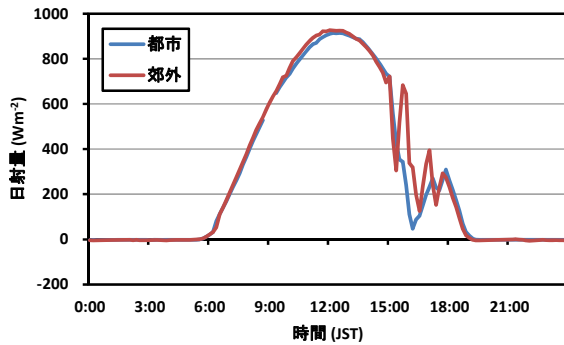


図-4 日射量の日変化の一例 (2011年8月13日)

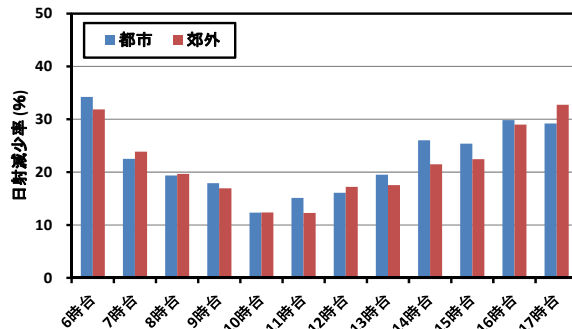


図-5 6時から18時までの1時間毎の日射減少率

解析対象日の同時刻の日射量の減少割合と定義した。つまり日射減少率が大きいほど、雲が日射を遮断する影響が大きいことを表す。6時から18時までの1時間毎の積算値から算出した日射減少率を図-5に示す。この図から、都市・郊外共に明け方と夕方に雲が日射を遮断する影響が大きいことが分かる。すなわち、明け方と夕方に雲が発達しやすい傾向にあることが示唆される。都市と郊外の比較を行うと、日中から夕方にかけて都市の値が郊外の値よりも大きくなる傾向が顕著に見られる。13時から17時の積算値から算出した日射減少率を他の日についても調べたところ、都市の値が大きくなりやすいことが確認され、郊外域よりも都市域で雲が発達しやすい傾向にあることが示唆された。

この要因について検討を行う上で、都市及び郊外について、観測から得られた顕熱フラックスの積算値を用いて混合層の発達高度を推定してLCLと比較した(図-6)。都市では12時頃に高度約1300mで混合層がLCLに達した後さらに上空へ発達しているが、一方郊外では11時頃に高度約900mで混合層がLCLに達した後はあまり発達していないことが分かった。このことから、夕方に雲が発達しやすい傾向にあり、郊外域よりも都市域で雲が発達しやすい傾向にあることが説明される。日の出後、地表からの顕熱の供給によって混合層が発達し地上の空気が持ち上げられ日中にLCLに達して雲が発生する。その後も混合層の発達が続くため、夕方にかけて雲が発達していくと考えられる。前節でも述べ

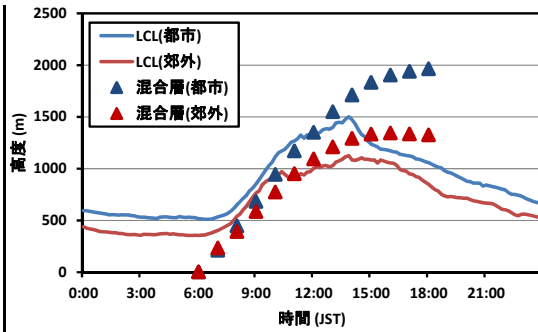


図-6 顕熱フラックスの日変化

(2010年9月の日照率50%以上80%未満の日の平均値)

たように、都市域と郊外域の気象要素の差異によりLCLは郊外域よりも都市域で高くなるため、雲底高度は郊外域よりも都市域で高くなると推測される。さらに都市域では、地表からの顕熱の著しい供給によって対流が活発であり、混合層の発達が大きい。そのため地上の空気はLCLを超えた後もさらに高い高度まで持ち上げられ、都市域上空で雲の発達は大きいと考えられる。一方郊外域では、顕熱の供給が小さく、混合層の発達が小さい。そのため、地上の空気はLCLを超えた後はあまり持ち上げられず、郊外域上空で雲の発達は小さいと考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計7件)

- ①森本一行・山本拓男・重谷祐樹・森脇 亮, 土地利用の違いが雲の形成に与える影響～松山平野における雲底高度及び日射量観測による検討～, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, 69巻, 2013, I_1747-I_1752.
- ②藤森祥文・松尾悠平・木内 豪・森脇 亮, 松山平野の地下水資源の現状と井戸取水による影響, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, 69巻, 2013, I_535-I_540.
- ③森脇 亮・亀井祐紀・藤森祥文, 瀬切れによる河川表面水の消失が河川近傍の温熱環境に及ぼす影響, 土木学会水工学論文集, 査読有, 56巻, 2012, I_1747-I_1752.
- ④渡部桂子・藤井恵人・森脇 亮, 松山平野におけるドライアイランド現象に関する研究, 土木学会水工学論文集, 査読有, 56巻, 2012, I_1765-I_1770.
- ⑤Fujimoto, M., Watanabe, K., Moriwaki, R., The characteristics of spatio- and temporal-variation of rainfall in Matsuyama plain, Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, 査読有, Vol. 30, 2012, 39-47.
- ⑥藤本雅人・渡部桂子・森脇 亮, 松山平野における降水量日変化の時空間特性, 土木学会水工学論文集, 査読有, 55巻, 2011, S_451-S_456.
- ⑦岩堂哲也・森脇 亮・Siegfried RAASCH・

Marcus Oliver LETZEL, 建物アスペクト比の変化に伴う都市キャノピー流れの変化に関する数値実験, 土木学会水工学論文集, 査読有, 55 巻, 2011, S_331-S_336.

〔学会発表〕(計 20 件)

- ①Moriwaki, R., Iwado, T., Raasch, S., and Letzel, M. O. : Turbulent flow within and above different building aspect ratio canopies, 8th International Conference on Urban Climate, 6-10 August 2012, Dublin, Ireland.
- ②渡部桂子, 藤井恵人, 森脇 亮, 松山平野におけるドライアイランド現象に関する研究, 日本気象学会 2012 年度春季大会, つくば市つくば国際会議場, 2012 年 5 月 26 日.
- ③森本一行, 重谷祐樹, 森脇 亮, 松山平野における雲の発生とヒートアイランドの関係, 平成 24 年度土木学会四国支部第 18 回技術研究発表会, 高知工科大学, 2012 年 5 月 19 日.
- ④渡部桂子, 藤本雅人, 森脇 亮, 松山平野における水蒸気の進入挙動と降水の関係, 平成 24 年度土木学会四国支部第 18 回技術研究発表会, 高知工科大学, 2012 年 5 月 19 日.
- ⑤渡部桂子, 藤本雅人, 森脇 亮, 松山平野における水蒸気進入挙動と降水の関係, 土木学会第 67 回年次学術講演会, 名古屋大学, 2012 年 9 月 5 日.
- ⑥山本拓男, 森本一行, 重谷祐樹, 森脇 亮, 松山平野における雲の発生と土地利用の関係, 土木学会第 67 回年次学術講演会, 名古屋大学, 2012 年 9 月 5 日.
- ⑦藤本雅人, 森脇 亮, 渡部桂子, 松山平野における降水量日変化の時空間特性, 平成 23 年度四国支部技術研究発表会, 75, 2011 年 5 月 14 日, 香川大学
- ⑧亀井祐紀, 小出若菜, 森脇 亮, 瀬切れによる河川表面水の消失が河川周辺の温熱環境に及ぼす影響, 平成 23 年度四国支部技術研究発表会, 77, 2011 年 5 月 14 日, 香川大学
- ⑨岩堂哲也, 森脇 亮, 建物アスペクト比の変化に伴う都市キャノピー流れの変化に関する数値実験, 平成 23 年度四国支部技術研究発表会, 107, 2011 年 5 月 14 日, 香川大学
- ⑩森本一行, 森脇 亮, 藤井恵人, 重谷祐樹, 松山平野におけるヒートアイランドの特性とメカニズムの解明, 平成 23 年度四国支部技術研究発表会, 109, 2011 年 5 月 14 日, 香川大学
- ⑪渡部桂子, 森脇 亮, 藤井恵人, 重谷祐樹, 松山平野におけるドライアイランド現象に関する研究, 平成 23 年度四国支部技術研究発表会, 111, 2011 年 5 月 14 日, 香川大学
- ⑫藤本雅人, 森脇 亮, 渡部桂子, 松山平野における降水量日変化の時空間特性, 土木学

会第 66 回年次学術講演会, 303-304, 2011 年 9 月 7-9 日, 愛媛大学

- ⑬渡部 桂子, 森脇 亮, 重谷 祐樹, 藤井 恵人, 松山平野におけるドライアイランド現象に関する研究, 土木学会第 66 回年次学術講演会, 315-316, 2011 年 9 月 7-9 日, 愛媛大学
- ⑭森本 一行, 藤森 祥文, 森脇 亮, 松山平野におけるヒートアイランドの特性とメカニズムの解明, 土木学会第 66 回年次学術講演会, 317-318, 2011 年 9 月 7-9 日, 愛媛大学
- ⑮亀井祐紀, 小出若菜, 森脇 亮, 河川表面水の消失と河川周辺の温熱環境の関係, 土木学会第 66 回年次学術講演会, 319-320, 2011 年 9 月 7-9 日, 愛媛大学
- ⑯藤井恵人, 森脇 亮, 都市スケールモデルおよび水田上の境界層乱流の類似性に対する建物アスペクト比の影響, 土木学会四国支部平成 22 年度技術研究発表会, 2010 年 5 月 15 日, 徳島大学
- ⑰藤本雅人, 森脇 亮, 気象モデル WRF を用いた松山平野における前線性降雨の再現性に関する研究, 土木学会四国支部平成 22 年度技術研究発表会, 2010 年 5 月 15 日, 徳島大学
- ⑱重谷祐樹, 森脇 亮, LES モデルを用いた都市河川の風道効果・冷却効果に関する研究, 土木学会四国支部平成 22 年度技術研究発表会, 2010 年 5 月 15 日, 徳島大学
- ⑲岩堂哲也, 森脇 亮, アスペクト比の変化に伴う都市キャノピー流れの変化に関する数値実験, 土木学会四国支部平成 22 年度技術研究発表会, 2010 年 5 月 15 日, 徳島大学
- ⑳田川耕平, 森脇 亮, 水循環モデルを用いた樹種の違いが松山平野の水収支に及ぼす影響の解析, 土木学会四国支部平成 22 年度技術研究発表会, 2010 年 5 月 15 日, 徳島大学

〔図書〕(計 1 件)

- ①森脇 亮, 他, 日本気象学会, 気象研究ノート「都市の気象と気候」, 第 5 章「都市におけるフラックスと乱流観測」, 2010, 302

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森脇 亮 (MORIWAKI RYO)

愛媛大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 10302952

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし