

地表面状態の変化が埼玉県熊谷市における 都市と郊外の比湿差に及ぼす影響

伊藤 智 洸* 中村 祐 輔* 渡来 靖** 重田 祥 範***

キーワード：定点観測、地表面状態、比湿、日変化、二毛作

1. はじめに

都市は、活発な人間活動に伴う人工排熱やアスファルトなどの人工被覆の広がり、ビルなどの人工構造物の林立による地表面粗度や不透水性地表面の増加などの影響により、都市特有の気候、いわゆる都市気候が形成されることが知られる。都市が郊外に比べて高温となり島嶼状の等温線が形成されるヒートアイランド現象は、最も顕著な都市気候の特徴の一つであり世界中の様々な都市を対象とした多くの研究がなされており、観測的研究も行われている。しかし、都市による気候への影響は気温以外の様々な気候要素にも現れており、その一つに都市内外に生じる湿度差が挙げられる。例えば、Unger (1999) はハンガリーのセゲドにおける都市内外の水蒸気圧を調査し、夏季日中において都市が郊外よりも湿潤であったと報告している。その要因として、夏季の郊外では小麦やトウモロコシの栽培により土壌が乾燥している一方、都市域では公園や民家の庭における散水により地表面は比較的湿潤であることも影響し、気温が郊外よりも高くなる都市では蒸発散がより活発となったことを挙げている。その一方で榊原 (1995) は、埼玉県越谷市を対象に自動車による都市と郊外の水蒸気圧の移動観測を行ったところ、冬季以外の季節において都市の水蒸気圧が郊外より低くなり、この傾向は夏季の日中に最大になることを報告している。榊原 (1995) はその要因として、夏季日中の水田域において蒸発散が活発になり水蒸気圧が高くなった結果、都市と郊外の水蒸気圧差が大きくなったとしている。このように、都市内外の湿度差に関する既存の研究結果は、都市が郊外に比べて乾燥傾向を示すものから、反対に湿潤傾向を示すものまで様々であり、さらなる研究の蓄積が必要である。また、郊外の地表面状態の違いにより都市と郊外の湿度差の大小が大きく変化することを指摘する研究もある。例えば榊原 (2001) は、長野県小布施町を対象とした移動観測結果により都市と水田の水蒸気圧差が都市と果樹園の差に比べて2倍程度大きいことを報告している。伊藤 (2017MS) は埼玉県熊谷市において定点観測による絶対湿度の調査を行い、暖候期において都市が郊外の水田域と比較して乾燥傾向であることを報告した。しかし熊谷市周辺の水田域では、季節による作付作物（稲・麦）の違いや灌水の有無といった地表面状態の大きな年変化がみられる。伊藤 (2017MS) の調査は対象期間が暖候期に限られ、水田に稲が作付されている期間の一部でその大部分が灌水期であったため、都市内外の湿度差に対する地表面状態の変化の影響を考慮していなかった。また、伊藤 (2017MS) が用いた絶対湿度は単位体積の空気に含まれる水蒸気質量（すなわち水蒸気密度）を表す物理量であるから、気温や気圧の変化に伴う気塊の膨張・収縮により値が変化してしまう。一方、単位質量の空気に含まれる水蒸気質量で定義される比湿は気温や気圧の変化に対して不変であり、気塊内での凝結・蒸発や他の気塊との混合、または外部からの水蒸気の入りが無い限り保存される。従って、ヒートアイランド現象により気温差が生じる都市と郊外において、両者の水蒸気量差を生じさせる要因を考察する上で、絶対湿度よりも比湿を用いるほうが適切である。そこで本研究は、空気中の水蒸気量を表現する指標として比湿を用い、麦と稲の二毛作が営まれる地域である埼玉県熊谷市を対象に、郊外の地表面状態の変化が都市との比湿差に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

* 立正大学大学院・地球環境科学研究科・大学院生

** 立正大学地球環境科学部

*** 公立鳥取環境大学環境学部

2. 研究手法

2.1 定点観測

本研究では、都市内外における地表面状態の違いに着目して気温と比湿について比較・検討を行う。熊谷市郊外には水田域が広がっており、都市内外の気象要素を比較する上で、郊外の観測点を水田域に置くことで熊谷市の典型的な郊外の気象要素を捉えることが出来る。さらに、熊谷市郊外に広がる水田域が都市内外の比湿差に及ぼす影響を評価するために、水田域以外における観測点を郊外に置くことが必要となる。このため、都市と比較する郊外の観測点は水田域と非水田域に展開された。具体的には、熊谷市街地内（以降都市とする）2地点と、熊谷市街地郊外の水田域（水田とする）2地点、および大規模公園2地点の計6地点において定点地上気象観測を行った（図1）。測定要素は気温、相対湿度、気圧の3要素とし、測定間隔は5分（瞬間値）とした。気温と相対湿度の測定にはOnset社製HOBO Pro v2、気圧の測定にはT&D社製おんどりTR-73Uを用いた。これらの検出器を、重田（2012）に準拠して自作した自然通風式シェルターの内部に気温と相対湿度の検出器を組み込み、気圧の検出器をシェルター外部に取り付け、樹木や建物の陰にならない街灯の地表面から2.5mの高さに設置した。観測期間は2017年5月24日～2018年10月2日である。なおHOBO Pro v2については、人工気象室において、気温25～28℃、相対湿度30～75%の範囲で器差検定を行った。その結果、各測定時刻における全センサーの平均値に対する各センサー観測値の偏差はそれぞれ、気温は-0.1℃～+0.0℃の範囲、相対湿度は-0.2%～+0.5%の範囲を示した。仕様書の公称測定精度は、気温±0.2℃（0～50℃）、相対湿度±2.5%（10～90℃）であることから、器差の影響は無視できると判断し、器差補正は行わなかった。なお、気圧計の器差の測定は行っていないが、仕様書の公称測定精度は±1.5hPaである。

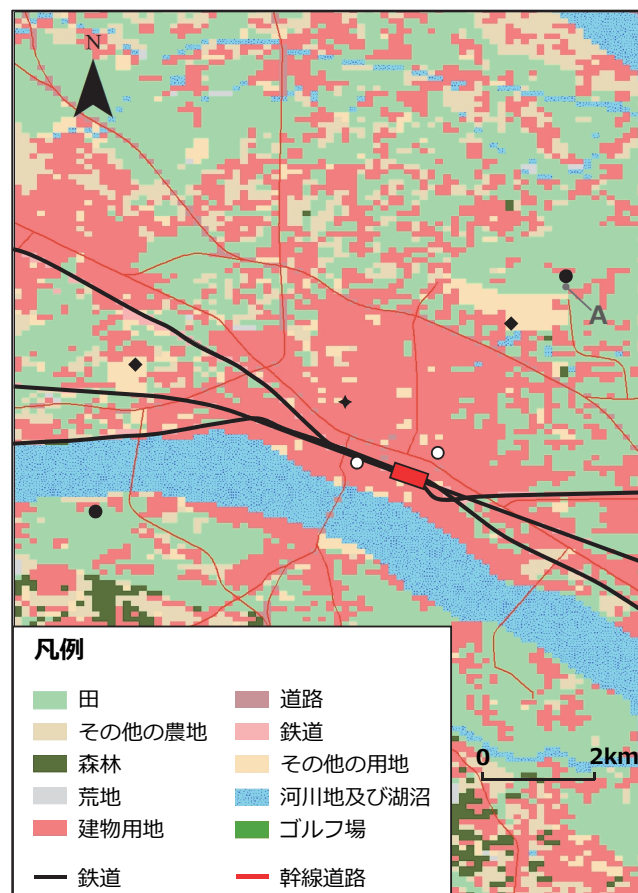


図1 研究対象地域の土地利用の概観と定点観測地点の展開。図中の○は都市、●は水田、◆は大規模公園の観測地点、◆は熊谷地方気象台、■はJR熊谷駅をそれぞれ示す。図中の色分類は国土数値情報土地利用細分メッシュデータ（2014年調査）に基づく。Aは図2の撮影を行った地点を表す。

2.2 比湿の算出方法とその誤差の見積もり

前述のように、比湿 q [kg/kg] は単位質量の空気中に含まれる水蒸気質量であるから、空気密度 ρ [kg/m³] に対する水蒸気密度 ρ_w [kg/m³] の比として

$$q = \frac{\rho_w}{\rho} = \frac{\rho_w}{\rho_d + \rho_w} \quad (1)$$

と表せる。ここで、 ρ_d [kg/m³] は乾燥空気の密度である。乾燥空気および水蒸気の状態方程式はそれぞれ

$$p - e = \rho_d R_d T \quad (2)$$

$$e = \rho_w R_w T \quad (3)$$

で表される。ここで、 p [hPa] は気圧、 e [hPa] は水蒸気圧、 T [K] は温度、 $R_d = 287$ J/(kg · K) は乾燥空気の気体定数、 $R_w = 462$ J/(kg · K) は水蒸気の気体定数である。式 (2) および (3) を式 (1) に代入すると、

$$q = \frac{\varepsilon e}{p - (1 - \varepsilon)e} \quad (4)$$

となる。ここで、 $\varepsilon = \frac{R_d}{R_w} = 0.622$ であり、密度比と呼ばれる。

定点観測から得られた気温 t [°C]、相対湿度 RH [%] および気圧 p [hPa] を用いて比湿 q を算出するにあたり、まず観測された気温 t を Tetens の式

$$E = 6.11 \times 10^{\frac{at}{b+t}} \quad (5)$$

に代入して、飽和水蒸気圧 E [hPa] を求めた。ここで、係数 a 、 b は実験定数であり $a = 7.5$ 、 $b = 237.3$ である。次に、式 (5) で求まる E と観測された相対湿度 RH より

$$e = \frac{RH}{100} E \quad (6)$$

によって水蒸気圧 e [hPa] を求めた。式 (6) で求まる e と観測された気圧 p を式 (4) に代入し 10^3 倍して比湿 q を g/kg の単位で求めた。

$$q = \frac{622e}{p - 0.378e} = \frac{1}{\frac{p}{622e} - \frac{0.378}{622}} \quad (7)$$

ここで、比湿 q の誤差 σ_q について検討する。

$$\frac{\partial q}{\partial p} = - \left(\frac{p}{622e} - \frac{0.378}{622} \right)^{-2} \frac{1}{622e} \quad (8)$$

$$\frac{\partial q}{\partial e} = + \left(\frac{p}{622e} - \frac{0.378}{622} \right)^{-2} \frac{p}{622e^2} \quad (9)$$

となるので誤差伝搬の法則により

$$\sigma_q^2 = \left(\frac{\partial q}{\partial p} \right)^2 \sigma_p^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial e} \right)^2 \sigma_e^2 = \left(\frac{\bar{p}}{622\bar{e}} - \frac{0.378}{622} \right)^{-4} \left(\frac{1}{622\bar{e}} \right)^2 \left\{ \sigma_p^2 + \left(\frac{\bar{p}}{\bar{e}} \right)^2 \sigma_e^2 \right\} \quad (10)$$

となる。ここで、 σ_p 、 σ_e はそれぞれ気圧および水蒸気圧の誤差を示し、上付きバー (̄) は最良推定値を意味する。

$\bar{p} = 1013\text{hPa}$ および $\bar{e} = 20\text{hPa}$ とすると

$$\sigma_q = \sqrt{0.00015\sigma_p^2 + 0.3854\sigma_e^2} \quad (11)$$

と見積もられる。20℃付近における飽和水蒸気圧曲線の勾配は1.4hPa/K程度で気温の測定誤差は0.2℃なので、飽和水蒸気圧の見積もり誤差は0.2hPa程度であり、相対湿度の誤差が2.5%程度だと、水蒸気圧の誤差も0.2hPaと見積もられる。すなわち、 $\sigma_p = 1.5\text{hPa}$ 、 $\sigma_e = 0.2\text{hPa}$ 程度だとすると、

$$\sigma_q = \sqrt{0.00015\sigma_p^2 + 0.3854\sigma_e^2} = 0.12 \quad (12)$$

程度と見積もられる。従って、0.12g/kg程度以上の比湿差であれば、本研究で用いた機器で有効に検出できると見積もられる。

2.3 地表面状態の把握

郊外の水田域における地表面状態の季節変化は、地域や区画によって位相差はあるものの、おおよそ当該地域の農業暦に沿った生産活動に依存していると見做せる。そこで、現地調査によって作物の生育状態を観察し、農業暦に当てはめることで、水田域の地表面状態の季節変化を把握した。農業暦は、埼玉県農林総合研究センター（2011）、JAグループさいたま・埼玉うまい米づくり推進協議会（2016）、埼玉県農業技術研究センター（2017 a, b, 2018 a, b）および埼玉県（2018）を参考にして、稲作期を a～f の6個、麦作期を g～j の4個、計10個の生育ステージに区分した。水田観測点2地点において10～20日間隔程度の頻度で現地調査を行い、観測点周辺の水田の様子を観察結果に基づき、どの生育ステージに当たるかを同定した。同定結果を表1に示し、麦成熟期（非灌漑期）、浅水管理期（灌漑期）における水田の様子をそれぞれ図2（a）、（b）に示す。同定の際、前回の同定結果と同じになった場合は前

表1 熊谷市街地周辺の乾田でおこなわれている農業暦^{注)}

	符号	生育ステージ	同定された生育期の期間
稲作	a	耕転・代かき・移植	2017/6/2～2017/6/23 2018/5/27～2018/7/1
	b	浅水管理	2017/7/3～2017/7/24 2018/7/13～2018/7/14
	c	中干し	2017/8/3～2017/8/13 2018/7/26～2018/8/2
	d	出穂（水稻）	2017/8/14～2017/8/26 2017/8/14～2018/9/4
	e	間断灌水	2017/9/8～2017/9/19 2018/9/5～2018/10/2
	f	成熟（水稻）	2017/9/20～2017/11/9
麦作	g	裸地・播種	2017/11/11～2018/2/27
	h	莖立	2018/2/28～2018/4/13
	i	出穂（麦）	2018/4/14～2018/4/28
	j	成熟（麦）	2018/4/29～2018/5/26

注) 符号横に施した実線矢印は灌漑期、破線矢印は灌漑と非灌漑が交互に入れ替わる時期、その他矢印を施していない時期は非灌漑期を表す。対応期間は2017年6月2日～2018年10月2日に実施した現地調査により同定。



図2 (a) 2018年5月27日(麦成熟期より1日経過) および(b) 2018年7月13日(浅水管理期)における水田の様子。図1のA地点より、東北東の方向を撮影したものである(撮影者:筆頭著者)。

回の生育ステージが継続していたものと判断し、前回の同定結果とは異なる生育ステージと判断された場合は、直近の2回の調査日の間は移行期とみなして生育ステージの同定は行わなかった。これらの同定は水田観測点ごとに実施し、2地点の生育ステージが一致する期間のみを当該の生育ステージとした。

さらに、熊谷周辺における植生の状況の季節変化を調べるため、人工衛星データを用いてNDVI (Normalized Difference Vegetation Index; 正規化植生指標) の算出を行った。使用した衛星は、空間分解能が10mと小さく水田の区画スケールで地表面状態を把握でき、時間分解能も5~10日と細かなESA (European Space Agency; 欧州宇宙機関) の気象・地球観測衛星Sentinel-2である。Sentinel-2衛星に搭載されているMSI (Multispectral Imager) のBand4 (中心波長: 665nm、波長幅: 30nm) とBand8 (中心波長: 842nm、波長幅: 115nm) を用いて次式 (13)

$$NDVI = \frac{Band8 - Band4}{Band8 + Band4} \quad (13)$$

によりNDVIを求めた。植物は太陽光中の近赤外の反射率に比べて可視光の反射率が小さいため、植生量が多いほどNDVIは大きくなる。定点観測地点から半径250mの範囲の1960~1976個の10mピクセルごとに算出されたNDVIを平均して当該地点のNDVIを求め、更に都市、水田、大規模公園それぞれの平均値と標準偏差を比較した。

3. 結果

3.1 正規化植生指標の季節変化

図3は、Sentinel-2衛星データに基づいて算出された都市(太破線)、水田(実線)および大規模公園(細点線)におけるNDVIの年変化である。ただし、Sentinel-2衛星データの時間分解能が上述の如く5~10日であることに加えて、曇天時など地表面が見えない場合にはNDVIの算出ができないため、NDVIが算出できたのは図中のドットで示された29日分だけである。都市のNDVIは夏季に高く冬季に低い季節変化を示すが、その変動幅は0.03~0.12程度であり、都市は一年を通して植生の活動度が低く年変化も小さい。これに対し、水田や大規模公園におけるNDVIは、都市に

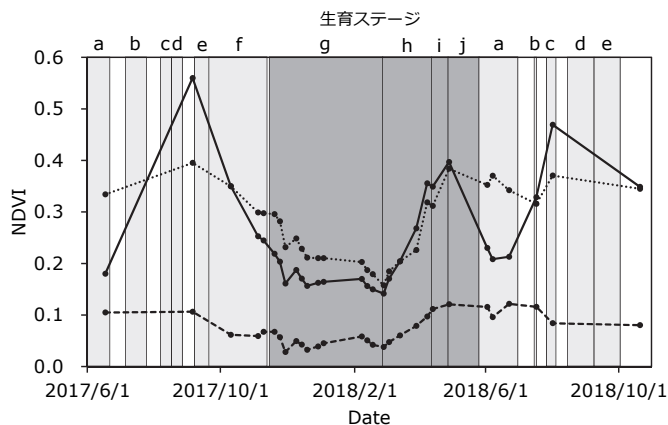


図3 2017年6月17日～2018年10月20日におけるNDVIの変化。太破線は都市、実線は水田、細点線は大規模公園をそれぞれ示す。図中の網掛けは農業暦における生育ステージを表し（移行期間を除く）、濃網掛は麦の作付期間、薄網掛は稲の作付期間を示す。a～jは表1の符号と対応している。

比べて年変化が大きい。冬季は水田も大規模公園もNDVIは0.2程度で推移するが、3月頃から上昇に転じ、4月下旬にNDVIが約0.4に達した。冬季～春季にかけては水田と大規模公園のNDVIは類似した値を示すが、5月～秋季にかけては水田と大規模公園で異なる特徴が見られた。大規模公園では4月下旬以降、NDVIが約0.4で大きな変化なく推移し、11月になると徐々に減少した。一方、水田では、5月になるとNDVIがいったん大きく減少し、6月になると約0.2を示した。この時期は、水田のNDVI値は大規模公園（約0.4）よりもむしろ都市（約0.1）の値に近づく。水田のNDVIはその後、6月下旬から8月上旬にかけて再び上昇して大規模公園のNDVIよりも大きくなり、8～9月の時期には約0.5を示して2度目のピークを迎えた。このように、水田におけるNDVIは年に2度のピークを示す特徴的な年変化をしている。これに農業暦における生育ステージを重ね合わせると（図3のa～j）、4月下旬頃にピークを示す1つ目の高NDVI期には麦の生育期間が、8～9月にピークを示す2つ目の高NDVI期には稲の生育期間が、それぞれ対応することがわかる。従って、Sentinel-2衛星データにより求められるNDVIの年変化は、熊谷市郊外の水田域における植生の生育状況の年変化をよく捉えていると考えられる。

3.2 異なる農業暦区分に対する気温および比湿の日変化の比較

農業暦におけるa～j10個の生育ステージのうち、5月の麦成熟期（非灌漑期）（図3のj）は1つ目のNDVIピークを過ぎ、NDVIが低下している時期に相当する。また7月の浅水管理期（灌漑期）（図3のb）は2つ目のNDVIピークに向けてNDVIが上昇している時期に相当する。どちらの時期もNDVIは0.3～0.4程度であり、NDVIの値に大きな差はみられない。しかしながら、麦成熟期（非灌漑期）の地表面は乾いており、浅水管理期（灌漑期）の地表面は湿っている。そこでこの2期を対象に、都市－水田および大規模公園の気温差と比湿差に対する地表面状態の影響を調査した。

本研究では、麦成熟期（非灌漑期）と浅水管理期（灌漑期）それぞれの期間において、晴天日における気温および比湿の日変化を比較した。ここで晴天日は、熊谷地方気象台において積算日照時間6時間以上の日とした。観測期間内における各生育ステージの晴天日数は麦成熟期（非灌漑期）、浅水管理期（灌漑期）ともに17日であった。晴天日毎正時の観測値を平均して各生育ステージのコンポジット時系列を作成し両者を比較した。

図4は、晴天日平均の気温日変化を示す。麦成熟期（非灌漑期）（図4a）においては、都市の気温は14時に最大27.0℃、5時に最小15.0℃を示し相対的に低温であるものの日較差は12.0℃に達した。一方、浅水管理期（灌漑期）（図4b）の都市の気温は14時に最大34.2℃、4時に最小24.8℃を示し相対的に高温であるものの日較差は9.4℃に過ぎなかった。このように、日較差は麦成熟期（非灌漑期）が浅水管理期（灌漑期）に比べて2.6℃大きいが、日平均気温は麦成熟期（非灌漑期）が20.6℃、浅水管理期（灌漑期）が28.9℃となり、浅水管理期（灌漑期）の方が8.3℃高かった。気温日較差は、麦成熟期（非灌漑期）も浅水管理期（灌漑期）も、都市に比べて水田や大規模公園の方が大きく、特に夜間に都市気温が他に比べて高いことに灌漑の有無が起因している。

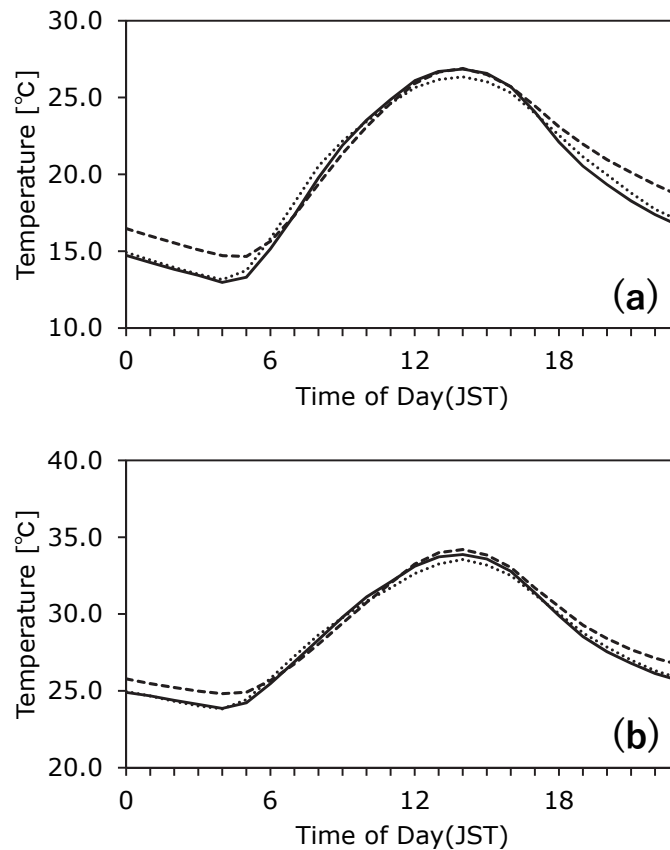


図4 (a) 麦成熟期および (b) 浅水管理期における晴天日の気温の日変化。太破線が都市、実線が郊外、細点線が大規模公園を示す。

図5は、晴天日平均の比湿の日変化を示す。麦成熟期（非灌漑期）の都市の日平均比湿は8.2g/kgであるのに対し、浅水管理期（灌漑期）の日平均比湿は16.5g/kgであり、日平均気温の上昇も影響して浅水管理期（灌漑期）の方が8.3g/kg高かった。比湿の日変化は約半日周期が卓越しており、0時頃と9時頃に極大、4時頃と14時頃に極小となる特徴が麦成熟期（非灌漑期）でも浅水管理期（灌漑期）でも見られ、3つの地域で共通して見られた。この日変化は大気潮汐の周期と類似しているが、比湿は気圧変化による影響を受けないため、別の要因によるものと考えられる。比湿は、どちらの時期も、1日を通して水田が最も大きく、都市が最も小さい。4時頃に極小値となってから9時頃に極大となるまでの比湿の増加率は水田や大規模公園で高い一方、都市では比較的緩やかに上昇するため、9時頃の極大時における都市と水田あるいは大規模公園との比湿差が大きくなっていった。9時以降14時頃にかけての比湿は、麦成熟期（非灌漑期）では3つの地域でほぼ同様な減少率で1g/kg程度減少するが、浅水管理期（灌漑期）では水田の減少量が約1g/kgであるのに対し都市や大規模公園ではより急変化して2g/kg程度減少した。その結果、浅水管理期（灌漑期）における14時前後の水田と都市あるいは大規模公園との比湿差は非常に大きくなった。

麦成熟期（非灌漑期）、浅水管理期（灌漑期）それぞれの期間の晴天日についてコンポジットされた都市－水田、都市－大規模公園の気温差を図6に示す。両気温差ともに、20時～5時の夜間にはほぼ一定の大きな正値を示し、ヒートアイランドが形成されていることがわかる。一方、日中については、午前中は負値で午後には正値となる傾向が見られるものの気温差の大きさは小さく、都市と水田あるいは大規模公園との間の顕著な気温差は見られなかった。このような日変化の特徴は麦成熟期（非灌漑期）と浅水管理期（灌漑期）に共通して見られるが、気温差の振幅は浅水管理期（灌漑期）に比べて麦成熟期（非灌漑期）の方が大きく、麦成熟期（非灌漑期）における夜間の気温差は1.5～1.8℃であるのに対し、浅水管理期（灌漑期）は0.8～1.0℃である。すなわち、麦成熟期（非灌漑期）の方が浅水管理期（灌漑期）に比べて、晴天日平均でより顕著なヒートアイランドが形成されていたと言える。両期間における都市－水田の気温差と都市－大規模公園の気温差を比較すると、日中における気温差は都市－大規模公園の方がやや大きく、反対に夜間においては都市－水田の方がやや大きい傾向や、都市－大規模公園の方が都市－水田に比べて

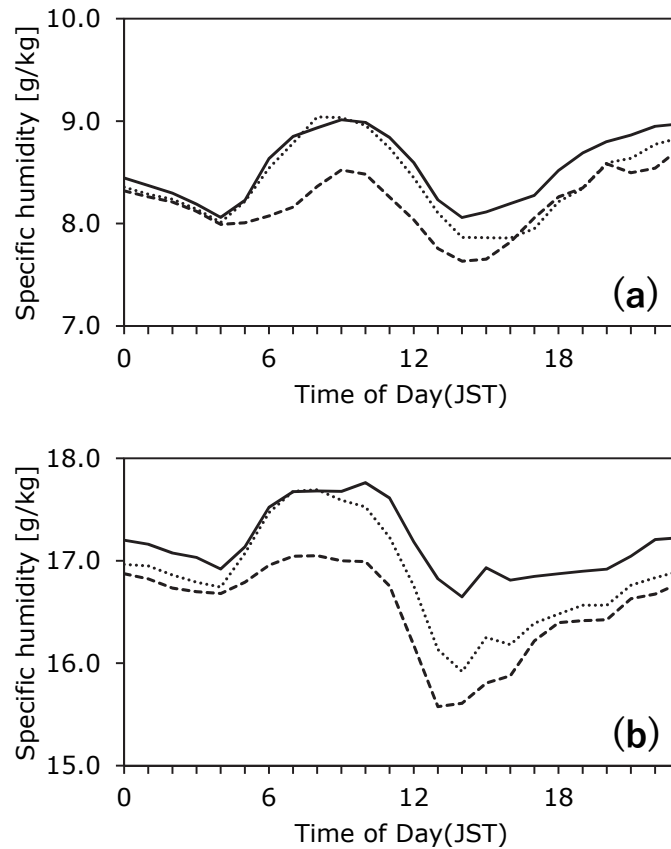


図5 (a) 麦成熟期および (b) 浅水管理期における晴天日の比湿の日変化。太破線が都市、実線が水田、細点線が大規模公園を示す。

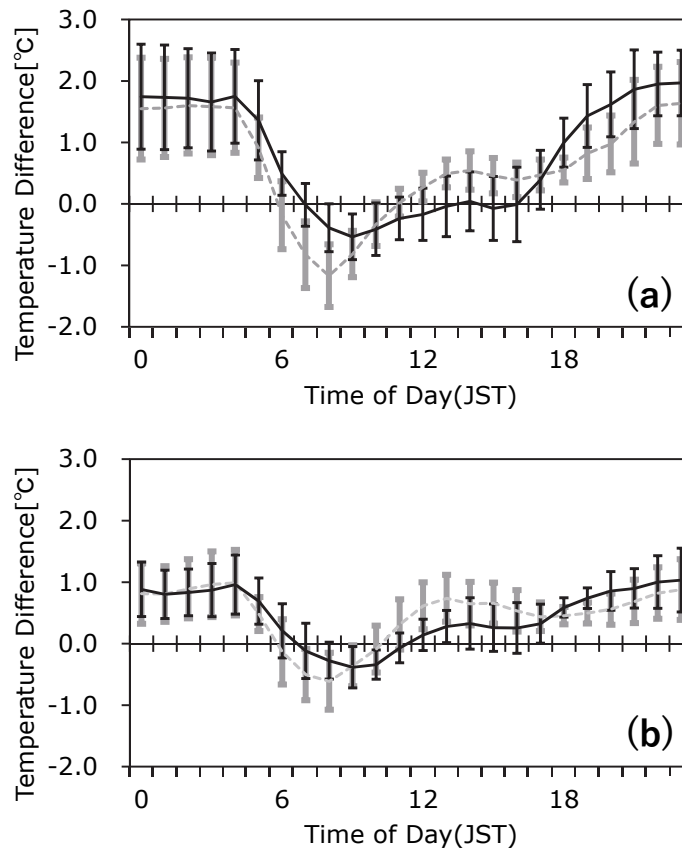


図6 (a) 麦成熟期および (b) 浅水管理期における晴天日の都市と郊外の気温差の日変化。実線は都市と水田の気温差、破線は都市と大規模公園の気温差、エラーバーは標準偏差を表す。

日変化の位相が1時間程度先行している傾向が見られるものの、1時間毎の両者の値に大きな差があるとは断定できない。都市ヒートアイランド強度を都市と郊外の代表的観測点における気温差で評価する場合、観測点が都市、郊外をそれぞれ代表しているか否かについてはしばしば問題となる（日下ほか2012、中村・重田2014）。本研究における観測網では、熊谷市街地内外を網羅する水平分布観測については実施していない。そのため各観測点の空間代表性については確認できず、局所的な空間の観測結果に過ぎないものと考えられる。本研究の観測結果からは、郊外観測点を水田とした場合と大規模公園とした場合で、都市-郊外の気温差に大きな相違は認められなかった。

図7は、晴天日についてコンポジットされた都市-水田および都市-大規模公園の比湿差の日変化を示す。比湿差の日変化は気温差とは異なり、夜間は比湿差の大きさがほぼ0となっていて都市内外で比湿差がほとんどないのに対して、日中は負値となっていて都市が水田あるいは大規模公園に比べて乾燥傾向にある。麦成熟期（非灌漑期）（図7a）においては、5時頃より都市と水田および大規模公園との比湿差が拡大し、7~8時に差の大きさが最大で約0.7g/kgに達した。その後、日中にかけて徐々に比湿差の大きさは減少している。このような日変化は都市-水田の比湿差と都市-大規模公園の比湿差でほぼ共通していた。浅水管理期（灌漑期）（図7b）においては、都市-大規模公園の比湿差は麦成熟期（非灌漑期）とほぼ同様な日変化をしており、日中は8時に比湿差の最大を迎えて以降、夕方にかけて徐々に0に近づく推移を示す。一方、都市-水田の比湿差は、8時に都市-大規模公園の比湿差が最大となって以降も拡大を続け、13時に最大比湿差1.3g/kgとなった。都市-水田および都市-大規模公園の比湿差は14時に最も差が生じ、それぞれ-1.0g/kg、-0.3g/kgを示し、都市-水田の比湿差が都市-大規模公園の比湿差の3.3倍にもなった。浅水管理期（灌漑期）においては、夜間においても都市-大規模公園の比湿差に比べて都市-水田の比湿差の方が大きい傾向があるが、日によるばらつきが大きく両者に有意な差があるとは言い難い。一方、都市-水田で最大比湿差を迎える13~15時の時間帯は都市-大規模公園比湿に比べて明らかに比湿差が大きい。

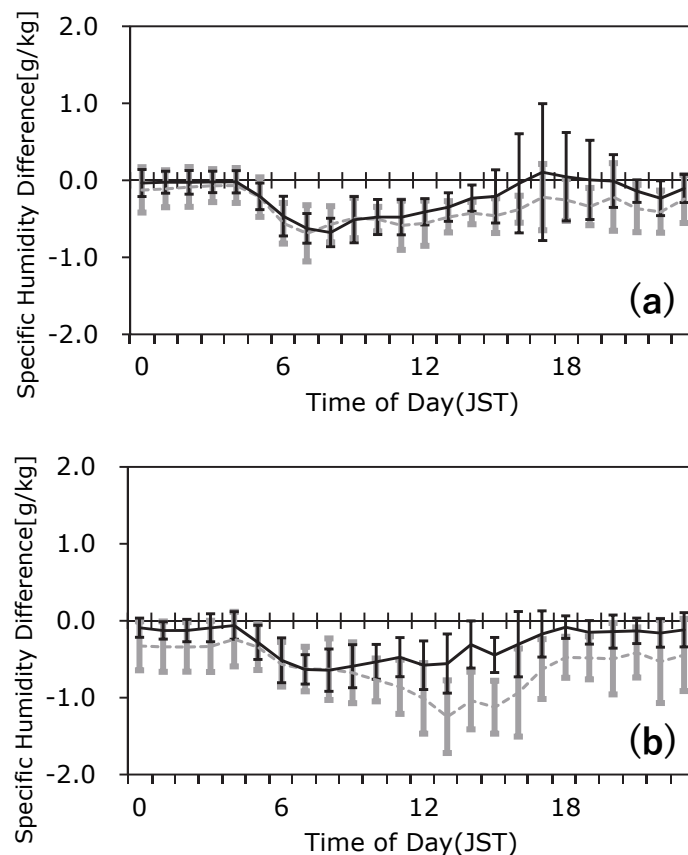


図7 (a) 麦成熟期および (b) 浅水管理期における晴天日の都市と郊外の比湿差の日変化。実線は都市と水田の比湿差、破線は都市と大規模公園の比湿差、エラーバーは標準偏差を表す。

4. 考察

水田の地表面状態が非灌漑状態である麦成熟期（非灌漑期）と灌漑状態である浅水管理期（灌漑期）において、都市－水田および都市－大規模公園の気温差と比湿差の比較を行った。都市と郊外（水田および大規模公園）との気温差については、図6に示すように夜間に明瞭なヒートアイランドが現れたが、麦成熟期（非灌漑期）および浅水管理期（灌漑期）におけるヒートアイランド強度に違いが見られた。麦成熟期（非灌漑期）においては晴天日平均で1.5～1.8℃の気温差となったのに対し、浅水管理期（灌漑期）においては0.8～1.0℃であり、都市と郊外の気温差は麦成熟期（非灌漑期）の方が1℃近く大きかった。これまでの諸都市における夜間ヒートアイランドに関する研究結果では、暖候期に比べて寒候期にヒートアイランド強度が強くなるとするものが多い。熊谷市におけるヒートアイランド強度の季節変化を調査したNakamura et al. (2018) では、熊谷市街地に形成される夜間ヒートアイランドの強度のピークは5月である一方、6、7月が最も弱いという結果が示されている。本研究の結果はNakamura et al. (2018) の結果と整合的であり興味深い。また前述のように、麦成熟期（非灌漑期）と浅水管理期（灌漑期）の大きな違いは非灌漑と灌漑、すなわち水田表面の乾湿の違いである。浅水管理期（灌漑期）では、水田には深さ10cm程度の灌水状態が維持される。その結果、乾いた土壌面が地表面となる麦成熟期（非灌漑期）の地表面に比べて、浅水管理期（灌漑期）の水田は熱容量が大きい。従って、浅水管理期（灌漑期）においては水面の効果により夜間の地表面温度低下が緩やかとなり、放射冷却が抑制されて郊外の気温低下も抑えられ、結果としてヒートアイランド強度が麦成熟期（非灌漑期）に比べて弱くなったとも考えられる。ただし、浅水管理期（灌漑期）における都市－水田の気温差と都市－大規模公園の気温差との差は小さくなく、郊外内における気温の局所性は比較的小さい。

図7で示された都市－水田の比湿差には、非灌漑状態である麦成熟期（非灌漑期）と灌漑状態である浅水管理期（灌漑期）で大きな違いが見られた。麦成熟期（非灌漑期）における日中の比湿差は8時頃最大差に達し、その後夕方にかけて徐々に0に減衰したが、浅水管理期（灌漑期）においては8時以降も比湿差は拡大し続け13時に最大差に達した。都市－大規模公園の比湿差の日変化には両期間で大きな違いがなかったことから、都市－水田の比湿差における両期間の違いは、水田のみで生じる変化をもたらした可能性が高い。大規模公園では見られず、水田で見られる最も顕著な変化は、乾いた地表面から湿った地表面（浅水面）への変化である。従って、浅水管理期（灌漑期）には地表面である水面からの蒸発や植物（稲）を介した蒸散がより活発となり、地表面から大気への水蒸気供給量が増加したことが、地上付近の大気の比湿増加に繋がった可能性がある。また、このような麦成熟期（非灌漑期）と浅水管理期（灌漑期）の比湿差の違いは都市－水田の比湿差にのみ顕著に現れている。郊外域に含まれる大規模公園と水田の比湿差を示した図8は、浅水管理期においては午後の日中に差が大きく、-0.7g/kgを示す。この事実は、都市と郊外の比湿差を見積もる際、水田を郊外代表点とした場合と大規模公園を郊外代表点とした場合とでは、最大0.7g/kgの比湿差の相違をもたらすことを示唆し、都市と郊外の比湿差の見積もりにおいて郊外の地表面状態の違いが大きい影響することを示していると思われる。

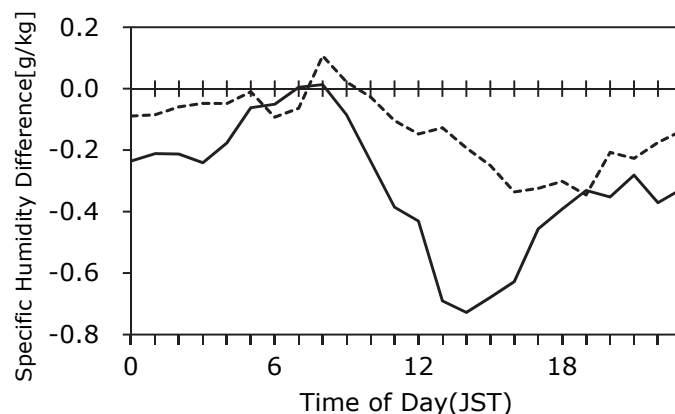


図8 大規模公園と水田の比湿差の日変化。麦成熟期（破線）および浅水管理期（実線）における大規模公園と水田の比湿差。

浅水管理期（灌漑期）における都市－水田の比湿差と、両期間における都市－大規模公園の比湿差の日変化は、日出頃の5時前後に差が大きくなり始め、8時頃に最大差となり、その後夕方にかけて徐々に差が減少するという推移を示す。図5が示す比湿の日変化を見ると、日出頃上昇をはじめて8～9時頃極大となり、その後は減少に転じるという時系列を示している。このような比湿の日変化を単純な鉛直一次元モデルを用いて考察する。鉛直一次元大気においては、水蒸気の供給源は主として地表面である。日出を迎えて太陽放射が地表面に入射されると、エネルギー再配分により地表面から大気への長波放射、顕熱、潜熱の各フラックスおよび地表面から地中への伝導熱フラックスが増大する。

潜熱フラックスに伴って地表面から大気へ水蒸気が供給される一方、顕熱フラックスによって大気下層が加熱されて対流が起り、混合層が形成される。混合層は日中の継続的な顕熱加熱に伴い時間とともに発達し、混合層厚が増加していく。混合層内はよく攪拌されており温位と比湿は層内ではほぼ同様である。従って、混合層内の水蒸気総量を一定とした場合、混合層厚の増加は比湿の低下をもたらす。すなわち、鉛直一次元大気において、地表面からの潜熱フラックスは比湿増加に働き、混合層厚の増加は比湿減少に働くので、比湿の時間変化は両者の大小で決まってくる。これを図5で見られた比湿の時系列に当てはめると、日出から9時頃までは、地表面からの水蒸気供給による比湿増加が混合層の発達による比湿減少に勝っているため比湿が増加し、9時以降は混合層発達の影響が強くなるため比湿は減少に転じると解釈できる。さらに、図7で見られた8時頃に出現する都市と郊外の最大比湿差は、図5で見られるように、日出以降の数時間にかけて都市における比湿の増加率が、郊外に比べて緩やかであることに起因していると思われる。この点についても、もし都市の混合層の発達速度が郊外に比べて速いと仮定できると鉛直一次元大気モデルで説明できる可能性がある。晴天夜間において、郊外では放射冷却により接地逆転層が形成されているが、都市では都市混合層が形成されると考えられる。日出後の早朝において郊外では接地逆転層を破壊して混合層を形成するのに時間がかかる一方、都市では比較的速やかに日中の混合層が発達することは起こりうると推測される。しかし本研究では、地上での気象観測にとどまっておらず、観測結果からこの仮説を確かめることができない。今後、上空を含めた観測を実施したり、数値モデル研究を実施したりするなど、さらなる研究が必要である。また、水蒸気の水平移流や水平拡散などの効果についても考慮した解析が必要である。

5. 結論

都市域と郊外の土地利用区分が明瞭で、郊外では麦と稲の二毛作が営まれ、特徴的な郊外の地表面状態の変化を有する埼玉県熊谷市を対象に、郊外の地表面状態の違いが都市と郊外の比湿差に及ぼす影響を調査した。水田において麦が生育している麦成熟期（非灌漑期）と、稲が生育している浅水管理期（灌漑期）を比較した結果、浅水管理期（灌漑期）においては都市－水田の比湿差の大きさが都市－大規模公園に比べて日中に大きく、最大で14時に3.3倍となった。一方、麦成熟期（非灌漑期）では、都市－水田と都市－大規模公園の比湿差には、一日を通してその差がほとんどなかった。これらの結果は、郊外における地表面状態、特に地表面の乾湿が都市と郊外の比湿差に多大な影響を与えていることを示唆するものである。また、参照する郊外を水田とする場合で、都市と郊外の比湿差やその日変化が時期により大きく異なっていた。熊谷市街地の郊外域は二毛作を行っている水田が占める割合が大きく、熊谷における都市と郊外の比湿差の大きさやその日変化、および季節変化に郊外の水田が与える影響が大きいと考えられる。しかし、本研究では地表面からの水蒸気フラックス等の測定を行っておらず、本研究で得られた比湿差が地表面の影響によるものかを明らかにするためには、更なる調査が必要である。

謝辞

本研究は、筆頭著者が立正大学大学院地球環境科学研究科に提出した2018年度修士学位請求論文の骨子をまとめ直したものであり、熊谷市の「めざせ！暑さ対策研究日本一支援事業」の支援を受けて実施したものである。本研究を進めるにあたって、観測場所を提供して下さいました熊谷市役所都市整備部公園緑地課、熊谷運動公園施設管理事務所、公益財団法人埼玉県公園緑地協会熊谷スポーツ文化公園管理事務所、ご協力頂いた関係自治会の皆様に心より御礼申し上げます。

引用文献

- 伊藤智洗, 2017MS: 熊谷市における定点型観測に基づく水蒸気量の水平分布と日変化の特徴—2016年暖候期を対象として—。立正大学地球環境科学部環境システム学科卒業論文, 40p.
- JAグループさいたま・埼玉うまい米づくり推進協議会, 2016: 暑さに負けない! 彩のかがやき栽培暦。
<https://www.pref.saitama.lg.jp/b0909/documents/sainokagayaki-koyomi.pdf> (2019/2/15最終閲覧).
- 日下博幸, 高根雄也, 阿部紫織, 高木美彩, 重田祥範, 大橋唯太, 布和宝音, 2012: オープンスペースで実施した定点観測によって捉えられた夏季晴天日におけるつくば市のヒートアイランド: 都市内外の気温差に関する不確実性の評価. 日本ヒートアイランド学会論文集, **7**, 1-9.
- 中村祐輔, 重田祥範, 2014: 定点型観測と多変量解析によるヒートアイランド強度の日変化パターンの抽出~2013年8月の埼玉県熊谷市を対象として~. 環境情報科学学術研究論文集, **28**, 379-384.
- Nakamura, Y., Y. Shigeta and Y. Watarai, 2018: Seasonal variations of the urban heat island in Kumagaya, Japan. *Geographical Review of Japan Series B*, **91**, (29-39).
- 埼玉県, 2018: 二条大麦「彩の星」栽培暦。
<https://www.pref.saitama.lg.jp/b0909/documents/170922sainohoshi-koyomi.pdf> (2019/2/15最終閲覧).
- 埼玉県農林総合研究センター, 2011: 水稲・小麦・大豆の不耕起播種栽培マニュアルVer.1 (2011年度版).
<https://www.pref.saitama.lg.jp/b0909/documents/hukoki2.pdf> (2019/2/15最終閲覧).
- 埼玉県農業技術研究センター, 2017 a: 平成29年産麦類の作柄概況。
<http://www.pref.saitama.lg.jp/b0909/documents/h29mugi-sakugara.pdf> (2019/2/15最終閲覧).
- 埼玉県農業技術研究センター, 2017 b: 平成29年産水稲の作柄概況。
<http://www.pref.saitama.lg.jp/b0909/documents/h29suitou-sakugaragaikyoku.pdf> (2019/2/15最終閲覧).
- 埼玉県農業技術研究センター, 2018 a: 平成30年産麦類の作柄概況。
<http://www.pref.saitama.lg.jp/b0909/documents/20180723mugisakugara.pdf> (2019/2/15最終閲覧).
- 埼玉県農業技術研究センター, 2018 b: 平成30年産水稲の作柄概況。
<http://www.pref.saitama.lg.jp/b0909/documents/2018suitosakugara.pdf> (2019/2/15最終閲覧).
- 榊原保志, 1995: 越谷市南東部における市街地と水田域の水蒸気圧差の特徴. 天気, **42**, 355-361.
- 榊原保志, 2001: 長野県小布施町における市街地と郊外の水蒸気圧差の特徴. 天気, **48**, 151-158.
- 重田祥範, 2012: 自然通風式シェルターと小型グローブ温度計の開発—熱中症指標WBGT観測への適用性について—. 日本生気象学会雑誌, **49**, 83.
- Unger, J., 1999: Urban-rural air humidity differences in Szeged, Hungary. *International Journal of Climatology*, **19**, 1509-1515.

Influence of the Change in Ground Surface Condition on the Difference of Specific Humidity between Urban and Rural Areas in Kumagaya City, Saitama Prefecture, Japan

ITO Tomohiro*, NAKAMURA Yusuke*, WATARAI Yasushi** and SHIGETA Yoshinori**

* Graduate Student, Graduate School of Geo-environmental Science, Rissho University

** Faculty of Geo-environmental Science, Rissho University

*** Faculty of Environmental Studies, Tottori University of Environmental Studies

Key words: Fixed-point observation, Ground surface condition, Specific humidity, Diurnal variation, Double cropping