

都市域における熱輸送

菅原 広史¹⁾, 山野 満男²⁾, 萩島 理³⁾, 成田 健一⁴⁾

2018年11月26日受付, 2018年12月27日受理

都市の暑熱環境は, 将来の気候変動下において重要性を増す社会的課題である. 本報では都市キャノピー上における熱輸送について実例を用いて解説した. 大気中で熱を鉛直上向きに輸送するのは暖気の上昇と冷気の下降であるが, 大気成層が不安定な状態においてキャノピー上での熱輸送を担うのは, 上昇する暖気であった. 不安定性が強くなるほど, 回数は少ないが強い乱流変動によって熱が輸送されていた. キャノピー上での暖気上昇が, 日射で加熱された建物壁面での上昇流と関連している例を示した.

Heat transfer in cities

Hirofumi Sugawara¹, Mitsuo Yamano², Aya Hagishima³ and Ken-ichi Narita⁴

Turbulent heat transport in urban atmospheric boundary layer was investigated through the quadrant analysis with a field observation data. Heat flux above the buildings was dominated by upward ejection of warmer air in unstable stratification. In more unstable conditions, less frequent but stronger eddies accounted for a dominant portion of the turbulent heat transfer. An example was shown for a linkage in which the ejection above buildings corresponds to the buoyancy-driven upflow at the building walls.

キーワード: 熱輸送, 乱流, 都市気候
Heat flux, Turbulence, Urban climatology

1. はじめに

都市域では, 地球温暖化と別の都市化に伴うローカルな温暖化が生じている. 東京では都市化による気温上昇は地球温暖化によるものと同程度以上であることが指摘されている(気象庁, 2002). 都市化は特に下層大気に対して多大な影響を及ぼすと考えられている. 例えば, 沿岸域において都市の内陸側では海風の進行が遅くなる現

象が知られており, 都市・郊外間に形成される水平対流のような大気循環が原因とされている(Yoshikado, 1990; Ohashi and Kida, 2002). また, 都市の存在が暖候期における短時間強雨の一因となっている(Sugawara et al. 2018; 高橋, 2003)との指摘もある. ただし, 降水過程は様々な要因が複雑に作用しているため, 慎重な議論が必要である(Kusaka et al. 2014).

また, 世界人口のうち約50%は都市で生活しており,

連絡先

菅原 広史

防衛大学校 地球海洋学科

〒239-8686 横須賀市走水1-10-20

Tel. 046-841-8310 ext 3304

e-mail: hiros@nda.ac.jp

1) 防衛大学校 地球海洋学科

Department of Earth and Ocean Sciences, National Defense Academy of Japan, Yokosuka, Japan

2) 航空自衛隊

Japan Air Self Defense Force, Fuchu, Japan

3) 九州大学 総合理工学研究院

Faculty of Engineering Sciences, Kyushu University, Fukuoka, Japan

4) 日本工業大学 建築学科

Faculty of Architecture, Nippon-Institute of Technology, Miyashiro, Saitama, Japan

都市域の大気環境, 特に夏季の暑熱環境は社会的に重要な研究課題である。例えば, 熱帯夜は人間の健康に影響を与える(井原・玄地, 2008)。熱中症による死亡者数と気温には正の相関がある(藤部, 2013)。

都市における夏季の暑熱環境を緩和する方法は, スケール別に考えることができる(図1)。一番小さい人間スケールでは体感温度を下げることを目的とした暑熱対策が有効であり, 例えば日射遮蔽(Sakai et al., 2012)や遮熱舗装(赤川ほか, 2008)がある。建物スケールでは建物から大気への熱輸送を抑制する方法が検討されており, 屋上や壁面の緑化(一ノ瀬ほか, 2006)や高反射性塗料(近藤ほか, 2008), あるいはいわゆる省エネ対策がこれにあたる。街区スケール(建物がいくつか集まったスケール, 後に述べる都市キャノピーもこれにあたる)では逆に熱を外へ出すことが目標となる。つまり街区から上空への熱輸送を促進し, 街区内の人間空間をより低温にするわけである。例えば都市計画において風通しのよい建物配置を行うなどの方法である(持田・石田, 2009)。都市スケールでは, 山風や海風など, 自然に形成される冷気を活用して都市を冷やす都市計画が考えられている(一ノ瀬, 1993)。

本報では街区スケールの熱輸送に着目する。都市を街区スケールで捉える場合, 個々の建物の形状は無視され,

都市キャノピーとして捉えるのが一般的である。都市キャノピーとは, 地面から建物の上端付近までの層を指す。なお, 都市気候では建物キャニオンという用語もある。これは建物に挟まれた空間のことで, キャノピーよりは少し小さい空間スケールを指す。

都市域を含めて一般に地表面と上空との間の乱流による熱輸送は, sweep と ejection という2つの空気の動き(乱流構造)によって行われている。熱が上向きに輸送されている場合(すなわち上空が低温な場合)を考えると, sweep は上空の低温空気塊が下降流により運ばれてくる現象, ejection は逆に高温空気塊が上昇流で運ばれる現象である。sweep と ejection どちらも熱を鉛直上向きに輸送している。菅原・成田(2012)は都市内に海風が進入する際, sweep が ejection より優位であることを示している。街区スケールでの暑熱対策を考える際, このような熱輸送のメカニズムの理解が重要となる。

この sweep, ejection は, 都市キャノピーのみならず植生キャノピーにおいてもみられる乱流構造である。一方で, 熱ではなく運動量の輸送については, 都市キャノピーと植生キャノピーとで乱流構造が異なるとされている(森脇・菅原, 2012)。具体的には, 大気が不安定成層となっている場合, 都市キャノピーでは ejection が卓越することが報告されている(Feigenwinter and Vogt,

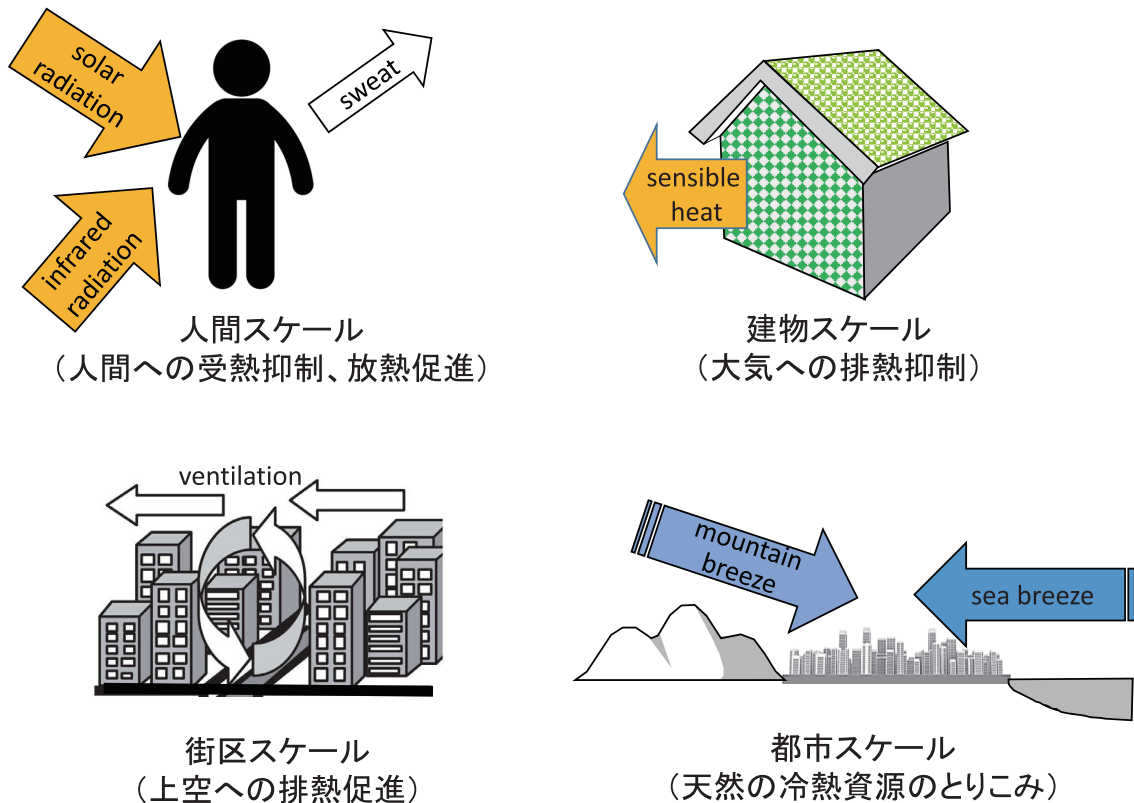


図1: 都市の暑熱環境改善の考え方。

2005; Oikawa and Meng, 1995). 一方で植生キャノピーでは sweep が卓越する (Gao et al., 1992). この相違の理由は, 植生キャノピーと都市キャノピーで構成要素(葉と建物壁)の空間スケールの違いによるものと考えられる (森脇・菅原, 2012).

しかしながら, 熱輸送に関してはそのような知見はまだ得られていない. そもそも sweep/ejection といった乱流構造の把握は都市域ではあまり報告されていないのが実状である. そこで, 本報では都市キャノピーでの熱輸送における乱流構造 (sweep/ejection) について, 特に大気安定度との関係を中心に実測例を示すことにする.

なお, どのような場所を「都市」あるいは「郊外」や「田舎」と呼ぶかは, 一般社会においては人それぞれ異なるであろう. 都市気候学分野では, 地上気温に影響を与える要素 (建物などの幾何形状, 地表面の材質, 人間活動に伴う排熱) の程度によって都市が分類されている (Stewart and Oke, 2012). 幾何形状は例えば建物高さで表現され, 高層の建築物ほど大気の動きを抑制する効果が大きく, 結果的に地上における日向部分の気温を高めることにつながる. 材質については, 例えばアスファルトなどの非透水性の材質で覆われている場所では日中の表面温度が高くなる. 排熱としてはエアコンの室外機からの排熱や自動車の排気ガスなどがある. あるいは, 土地被覆ではなく人口密度も都市化の指標となる (Skoulika et al. 2014). しかしながら, 人口密度 100–300 人/km² 程度の一般的には田舎と考えられるような場所であっても, 都市化によると思われる高温傾向が報告されており (Fujibe, 2000), どのようなメカニズムによって高温傾向が表れているのか非常に興味深い.

2. 研究方法

2.1 住宅団地における計測

計測は東京都杉並区にある荻窪団地 (35.7 N, 139.6 E) において 2007 年の 6–11 月に行った. 団地周辺の地形はほぼ平坦で, 周辺の土地被覆は 2–3 階建ての住宅が主である. Stewart and Oke (2012) の土地被覆分類 (local climate zone) では “compact midrise” に相当する.

観測開始時点において荻窪団地はすでに取り壊すことが決まっており, 住民は退去した後であった. したがって人工排熱の発生はなかった. これは都市気候の観測という面では大きな利点であり, 建物が大気に与える熱的影響をピュアに捉えることができる.

団地は個々の建物が高さ 14.3 m で東西方向に長い構

造である. 東西方向の長さは 36 m, 南北方向の建物間隔は 23.5 m である. 200×200 m² のエリアにほぼ同じ形状の建物が 20 棟並んでいる.

計測は団地内の 2 つの場所で行った. ひとつは, 団地のほぼ中央に位置する給水塔頂上 (高さ 37.4 m, 給水塔屋上面からは 1.6 m) における 3 次元超音波風速計による計測である. 測定時間間隔は 0.1 秒である. 給水塔は細長い構造 (平面が 3×3 m) をしているため, 給水塔自体により形成される風の乱れは小さいと考えられる. もうひとつは, この給水塔から 50 m ほど離れた場所にある, 都市キャニオンにおける風と気温の 2 次元分布 (南北・鉛直断面) 測定である. 図 2 に測器の配置図を示す. 3 次元超音波風向風速計と温度計 (強制通風式放射シールド付きの熱電対) を壁と地面に設置した. 壁および地面からの距離は約 1 m である. 測定時間間隔は風速は 0.1 秒, 気温は 2 秒である. このキャニオンのアスペクト比 (高さ/幅) は 0.61 であった. 都市気候ではこのアスペクト比が都市キャノピーの形状パラメータとしてよく使われる (例えば Grimmond and Oke, 1999). キャニオンの底面 (地面) は草地となっていた.

2.2 データのクオリティコントロール

計 15 台の超音波風速計は 5 台のデータ記録装置に分散して接続した. これはケーブル長や記録装置のチャンネル数制限のためである. データ記録装置は約 2 週間に 1 回の頻度で時刻合わせを行った. データの同期を保証するため, ここでは時刻合わせから 3 日後までのデータを使用する.

また, 解析は晴天日を抽出して行った. 晴天日は日照時間が可照時間の 70% 以上である日とした. さらに, 現象が解釈しやすいよう, 南風あるいは北風時のデータを使用することとした. この風向は都市キャニオンに直交する方向である. 最終的には夏の 3 日間 (8 月 6, 7, 22 日) および冬の 2 日間 (11 月 23 日, 12 月 14 日) を解析対象とした.

2.3 熱輸送量の計算

乱流による顕熱輸送量 H は, 超音波風速計で計測される温度 T および鉛直風速 w を用いて以下のように書ける.

$$H = \overline{T'w'} \quad (1)$$

ただし, $\overline{\quad}$ は時間平均値を表す. T' および w' はそれぞれ時間平均値からの偏差である.

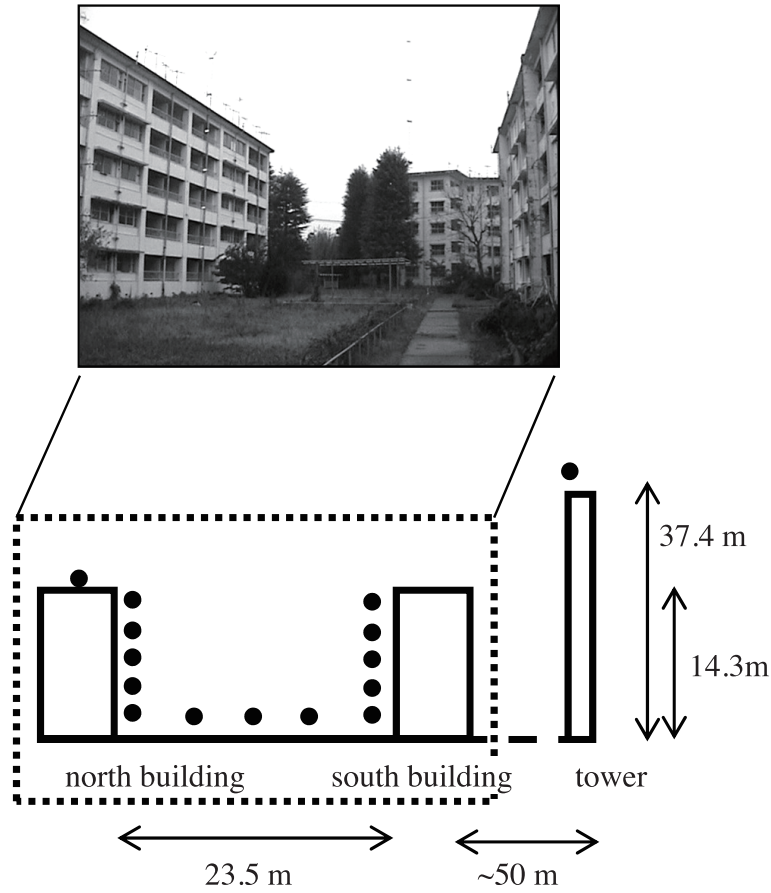


図2：観測機材の配置図。

黒丸が超音波風速計。写真は建物間の空間の南北断面を西側から撮影したもの。

$$T' = T - \bar{T} \quad (2)$$

$$w' = w - \bar{w} \quad (3)$$

式(1)により、観測条件等にしがって設定される平均時間ごとの顕熱輸送量が計算される。この手法による熱輸送量の計測・計算は渦相関法と呼ばれる。なお、詳細は省略するが、実際の計算においては、鉛直軸修正のための座標回転および水蒸気変動の補正(塚本ほか, 2001)を行っている。

2.4 4象限解析

乱流による熱輸送を sweep と ejection に分解して両者の強度や出現頻度を比較するため4象限解析と呼ばれる手法を用いる。4象限解析は顕熱輸送量 $(T'w')$ を (T', w') 平面上で4つの象限に分解する(図3)。それぞれの象限の乱流変動は以下のように呼ぶこととする(Shaw et al., 1983)。

第1象限 ($T' > 0, w' > 0$) : ejection

第2象限 ($T' < 0, w' > 0$) : outward interaction

第3象限 ($T' < 0, w' < 0$) : sweep

第4象限 ($T' > 0, w' < 0$) : inward interaction

ejection と sweep は熱を上向きに、outward interaction と inward interaction は下向きに輸送する。

トータルの顕熱輸送量に占める第*i*象限の割合 S_i は

$$S_i = \frac{\langle T'w' \rangle_i}{T'w'} \quad (1)$$

のように表される。ただし、

$$\langle T'w' \rangle_i = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau T'w' Q_i dt \quad (2)$$

$$Q_i = \begin{cases} 1 & (T'w' \text{ is in } i\text{-th quadrant}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3)$$

τ は平均時間である。sweep と ejection の熱輸送への寄与度の比 R_s は以下のように書ける。

$$R_s = \frac{S_1}{S_3} \quad (4)$$

また、時間上での第*i*象限の出現頻度 J_i およびその sweep・ejection での比 R_τ は

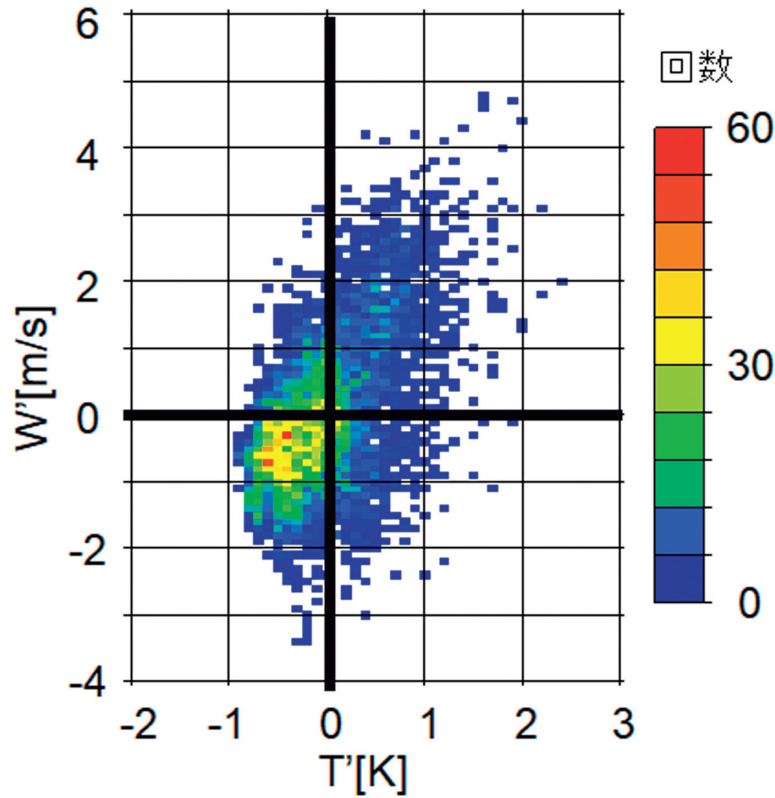


図3: 乱流変動を $T' \cdot w'$ 平面上の4象限に分割した例。キャノピー上における計測例。8月22日12:20-12:30。回数は0.1秒ごとの計測を1データとしてカウントしたもの。

$$J_i = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} Q_i dt \quad (5)$$

$$R_T = \frac{J_1}{J_3} \quad (6)$$

となる。ここで式(2)において解析対象とする T' や w' の絶対値に下限値を設け、弱い乱流(小さな温度・速度変動)を除いて S_i を求める方法がある(例えば Feigenwinter, 2000)。しかし、ここでは下限値は設けず、全ての乱流変動を解析対象とすることで、現象の全体像を捉えることとした。

大気安定度の指標として、測定高度 z とモニンオブコフ長 L の比 z/L を用いる。 L は

$$L = \frac{u_*^2}{k \left(\frac{g}{T} \right) T_*} \quad (7)$$

u_* は摩擦速度、 k はカルマン定数(0.4)、 g は重力加速度、 T は平均気温、 T_* は摩擦温度である。 z/L は安定成層時には正の値をとり、不安定成層時には負となる。

本報では平均時間 τ を10分としている。これは一般的な大気境界層研究における渦相関法の平均時間(10~

30分)(塚本ほか, 2001)からすると若干短い。しかしながら、ここでは一般風の風向の変化に対応したキャノピー内の流れ場の変化を示すため、短めの平均時間をとった。平均時間内に風向の変化があると、その計測時刻における輸送量計測値の品質が落ちるためである。

3. 熱輸送を担う乱流構造の日・季節変化

図4に晴天日の日変化として夏季(8月22日)と冬季(11月23日)の例を示す。風向は終日ほぼ一定で8月22日は南より11月23日は北よりであった。 R_S と R_T は都市キャノピー上(給水塔)で測定したものであり、顕熱輸送量の絶対値が 10 Wm^{-2} 以上の時間帯についてのみプロットしてある。

R_S は夏季であればほぼ終日1を超えており、ejectionがsweepより強いことがわかる。また、 R_S は大気が不安定な時間帯ほど大きな値をとっている。この傾向は Feigenwinter (2000) でも見られている。 R_S の季節による違いを見ても、やはり夏季の方が大きな値をとっていることがわかる。これは、夏季は冬季よりも日射が強い

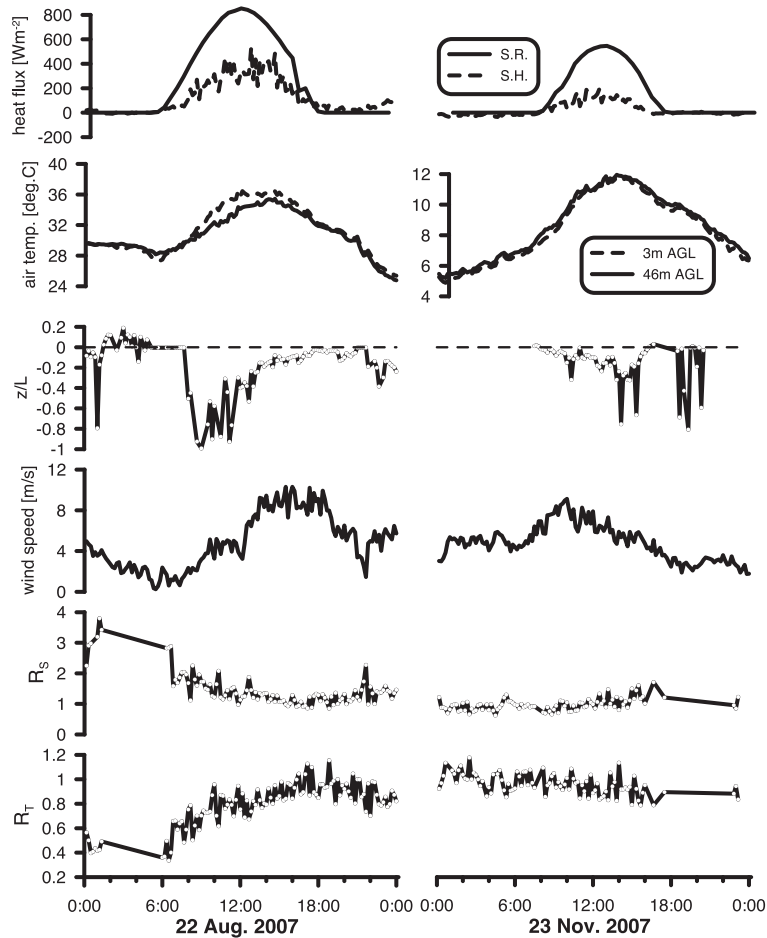


図4：夏季および冬季の典型的晴天日における日変化。S.R.とS.H.は日射量および顕熱輸送量。大気安定度、風速、 R_s 、 R_T はキャノピー上における計測値。

ために大気が不安定になりやすく、その不安定成層下での大きな浮力がejectionの発生に寄与しているものと考えられる。

一方で、時間占有比率 R_T は夏季に1を下回っており、かつ冬季より小さい。夏季は冬季に比べて、回数は少ないが強い乱流変動が顕熱輸送を担っていることがわかる。 R_s と R_T の負の相関は夏冬それぞれの日変化においてもみられる。

4. 熱輸送を担う乱流構造の気象条件への依存性

図5は、大気安定度と R_s 、 R_T の関係について、解析対象とした晴天日5日間のデータを示したものである。ここでは不安定側($z/L < 0$)のデータのみ示している。 R_s は大気が不安定になるほど(z/L がマイナスに大きくなるほど)大きくなり、 R_T は逆に小さくなっている。このことから、不安定時には頻度は少ないが強い乱流によって熱が輸送されていることがわかる。

図6はこの大気安定度依存性を別の視点から見たものである。データは図5のものと同じで、横軸はスカラー平均風速である。縦軸横軸とも解析時間10分間の標準偏差で規格化してある。図6(a)と(b)からは、水平風速偏差が大きいと気温と鉛直風速は負の偏差を示すことがわかる。一方、風速変動が負の側(平均風速よりも弱風)では気温と鉛直風速は正の偏差を示している。sweepとejectionは瞬時の T' と w' で判定されるものであり、図6のようなアンサンブル平均された値の正・負とは必ずしも一致しない。しかしながら、図6では気温と鉛直風速の正・負が明確に分離しており、sweepは強風時に、ejectionは弱風時に発生していると考えられる。

図6(c)は顕熱輸送量であり、夏季と冬季に明確な違いがみられる。夏季は弱風、強風いずれにおいても水平風速の偏差が小さい時よりも顕熱輸送量が大きくなっているが、冬季は強風時のみ顕熱輸送量の増加がみられる。したがって、夏季はsweepとejectionの両方で熱輸送が

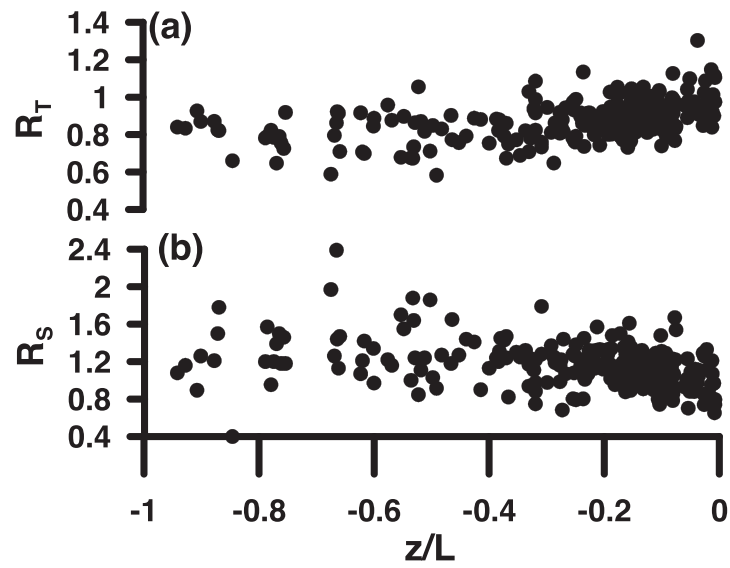


図5：大気安定度と R_S , R_T の関係.

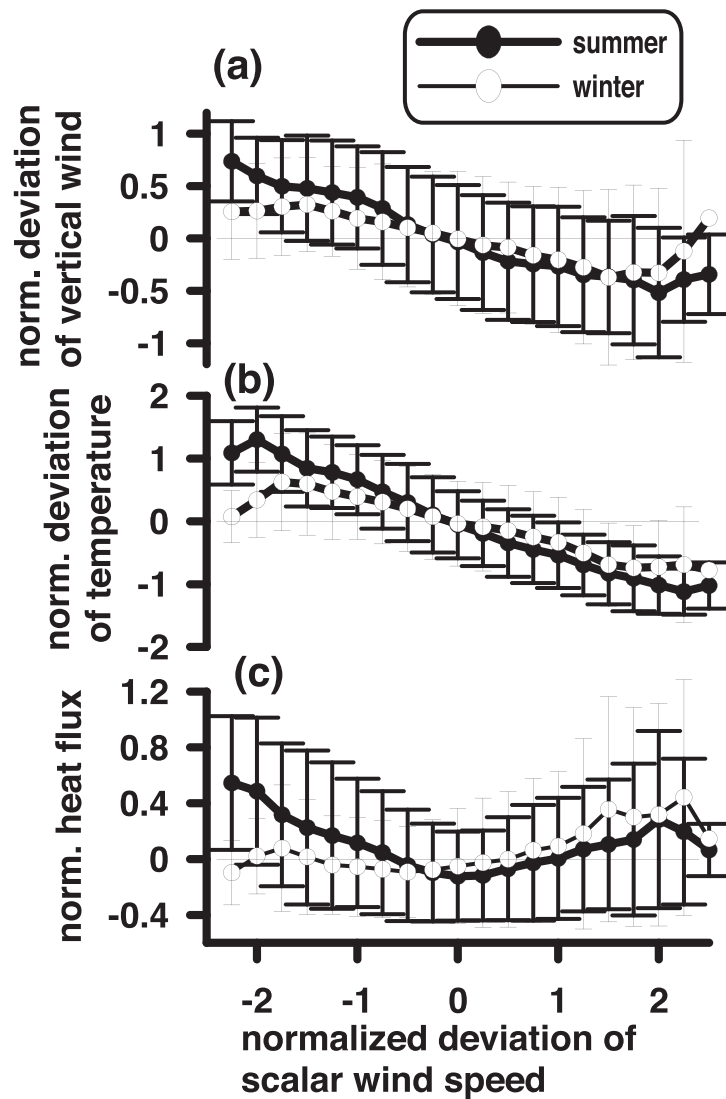


図6：風速と鉛直風速・気温・顕熱輸送量の関係.
縦軸横軸は10分間の標準偏差で規格化した偏差.

なされているが, 冬季は sweep が主であるといえる。

5. キャノピー上での ejection 現象とキャノピー内気流構造の関係

前章では, キャノピー上の顕熱輸送には弱風時に発生する ejection が影響を与えていることがわかった。ここでは, その ejection とキャノピー内の流れ場との対応について一例を示す。図7はキャノピー内の流れ場(南北風と鉛直風の合成ベクトル)の南北・鉛直断面上での分布である。屋上高さでの風が強い時には, 図7(a)のようなキャノピー内を周回する流れがよく見られる。このような流れ場の存在は既往研究においても指摘されており(Eliasson et al., 2006; Sugawara et al., 2008), キャノピー上の速い流れが風下側壁面付近でキャノピー内に入り込み, 壁面や地面に沿って周回するものと考えられる。この上空の速い流れが下降する動きは乱流輸送における sweep と対応することが想像される。一方, 屋上での風が弱いとき(図7b)には風上側だけでなく風下側の壁面においても上昇流がみられ, 強風時とは明らかに異なった流れ場となっている。風下側壁面での上昇流は, 周回する流れのように上空の速い流れのキャノピー内への入り込みではなく, 日射により加熱された壁面において浮

力により生じたもの(例えば Offerle et al., 2007)と考えられる。

このとき, 上空での熱輸送はどうなっていたであろうか? 図8に給水塔屋上での顕熱輸送量 $T'w'$ (10秒間の移動平均)を示した。ここで T' および w' は10分平均値からの偏差である。図7(b)に相当する時刻の30秒前(12:25:30)に顕熱輸送のピークが見られ(図8a), それは ejection で生じていることがわかる(図8b)。30秒の時間ずれば, キャノピー計測場所と給水塔との距離(キャノピーが給水塔の風下50m)および, この時の屋上面での風速(南風 2.5 m s^{-1})と整合的である。したがって, キャノピー内での両側壁面での上昇流は, 上空での ejection と対応する現象であることがわかる。すなわち, キャノピー上を比較的速度の遅い(風速の小さい)空気塊が通過することで, 上空では大気が不安定になり ejection が発生し, キャノピー内では浮力により両側壁面での上昇流が生じたといえる。浮力によってキャノピー上へ出た空気塊は, 上空大気をより不安定化させると考えられる。この事例ではキャノピーが給水塔よりも風下側にあるため, 上昇流でキャノピー内を出た空気塊を給水塔で直接測定できているわけではない。給水塔の風上側にもほぼ同じ形状の建物が並んでおり, そこでも弱風時には図7(b)のようなキャノピー内の流れが生じ

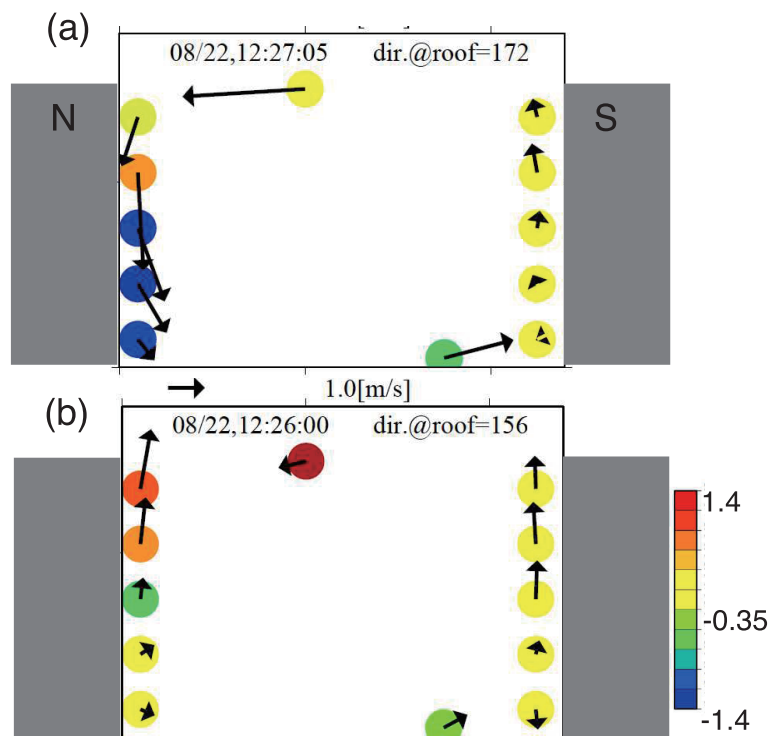


図7: キャノピー内の流れ場。
8月22日。図2に示した南北断面上での分布で, 矢印は5秒平均の南北・鉛直風合成ベクトル。図左右両端の灰色四角は建物を示している。図中央上端の矢印は北側建物屋上での計測値。

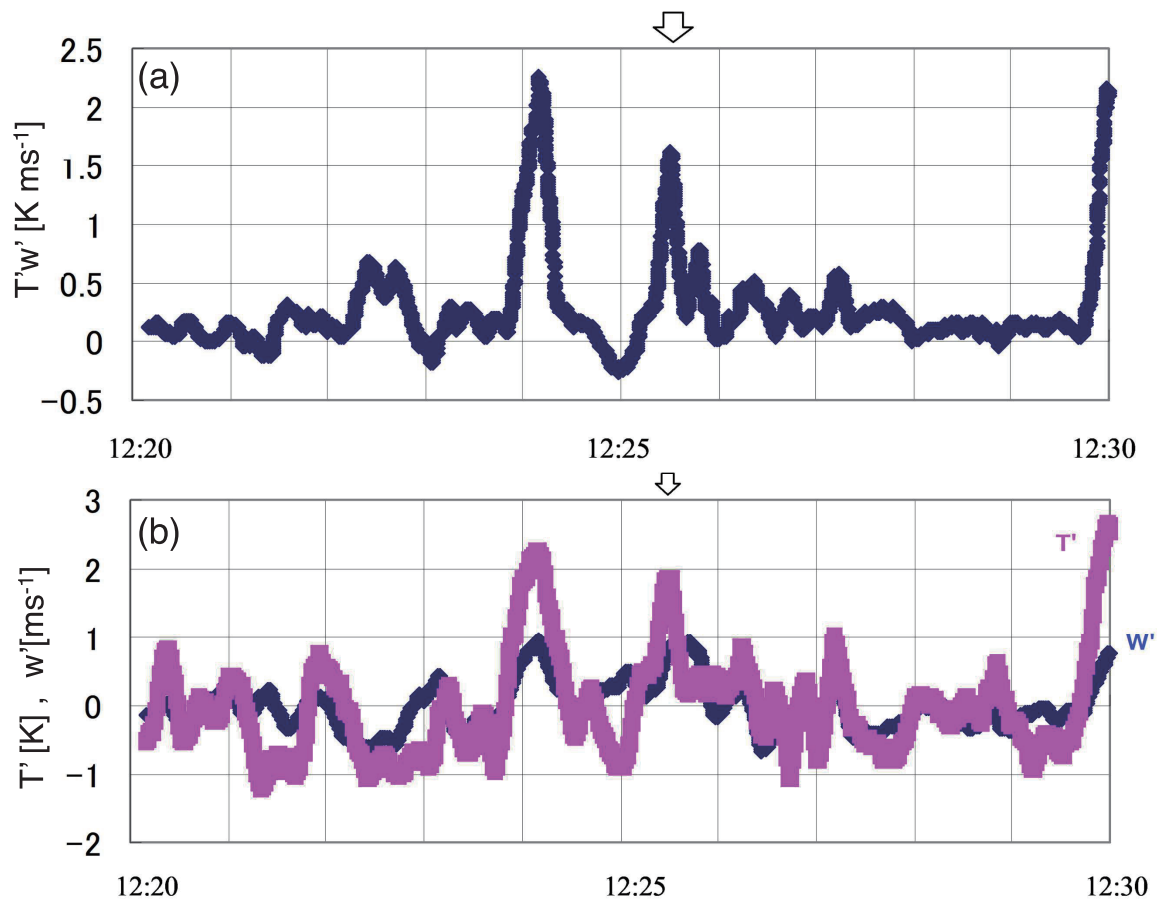


図8：図7と対応した時刻のキャノピー上での時系列。
8月22日。矢印が水平位置を考慮したうえで図7(b)と対応する時刻。

ていたことが想像できる。

6. まとめ

都市キャノピーから上空への熱輸送は、人間の生活空間から外へ熱を逃がすものであり、都市の暑熱環境対策を考える上で非常に重要である。都市計画では建物配置を工夫してこの熱輸送を促進する方策が実際にとられている。一方で、上空へ輸送された熱は大気を不安定化させることで、都市周辺の風系を変え大気汚染物質の集積を引き起こし (Ohashi and Kida, 2002)、対流性降水を助長する (Sugawara et al., 2018)。少なくとも数 10 km のスケールでみて、都市が大気現象に与える影響は無視できないものである。本報ではこのキャノピー上での熱輸送について大気安定度との関係、そしてキャノピー内の流れ場との関係性について実例を示した。

熱輸送を担う乱流は、大気の成層状態が不安定なほど、回数は少ないが強い ejection の特徴をもっていた。また、キャノピー上空での ejection と壁面での日射加熱に

よる上昇流は、いずれも速度の遅い空気塊時に発生した一連の現象であることが示唆された。

本稿で示されたように、日射加熱が流れ場を変えるのであれば、エアコンや自動車からの人工排熱も影響していると考えられる。人工排熱はその絶対量の推定 (Moriwaki et al., 2008) や都市域の短時間強雨との関係 (Sugawara et al., 2018) からも研究が進められている。人工排熱は当然のことながら人間活動の強度によりその量が変化する。したがって都市気候は、例えば経済活動との関連も考えられ (足立, 1997)、自然科学の枠にはまらない学際的な学問領域であると言える。

謝辞

観測においては (独) 都市再生機構の協力を得た。

参考文献

足立アホロ (1997) 経済活動が都市温度に及ぼす影響—名古屋

- 屋市を例として一. 天気, **44**, 621-629.
- 赤川宏幸, 竹林英樹, 森山正和 (2008) 湿潤舗装と遮熱舗装上の温熱環境改善効果に関する実験的研究. 日本建築学会環境系論文集, **73**, 85-91.
- Eliasson, I., B. Offerle, C.S.B. Grimmond and S. Lindqvist (2006) Wind fields and turbulence statistics in an urban street canyon. *Atmos. Environ.*, **40**, 1-16.
- Feigenwinter, C. (2000) *The vertical structure of turbulence above an urban canopy*. Doctor thesis, University of Basel.
- Feigenwinter, C. and R. Vogt (2005) Detection and analysis of coherent structures in urban turbulence. *Theor. Appl. Climatol.*, **81**, 219-230.
- Fujibe, F. (2000) Detection of urban warming in recent temperature trends in Japan. *Int. J. Clim.*, **29**, 1811-1822.
- 藤部文昭 (2013) 暑熱 (熱中症) による国内死者数と夏季気温の長期変動. 天気, **60**, 372-381.
- Gao, W., R. H. Shaw and K. U. Paw (1992) Conditional analysis of temperature and humidity microfronts and ejection/sweep motions within and above a deciduous forest. *Bound.-Layer Meteorol.*, **59**, 35-57.
- Grimmond, C. S. B. and T. R. Oke (1999) Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *J. Appl. Meteor.*, **38**, 262-292.
- 一ノ瀬俊明 (1993) シュトゥットガルトにおける「風の道」—都市計画で都市気候を制御する試み—. 天気, **40**, 691-693.
- 一ノ瀬雅之, 石野久彌, 郡公子, 永田明寛 (2006) ヒートアイランド低減化手法としての屋上緑化の実測評価. 日本建築学会環境系論文集, **71**, 47-54.
- 井原智彦, 玄地裕 (2008) 被害算定型ライフサイクル影響評価手法によるヒートアイランド現象の環境影響評価. 日本建築学会環境系論文集, **73**, 1407-1415.
- 気象庁 (2002) 20世紀の日本の気候. 気象庁. 東京.
- 近藤靖史, 小笠原岳, 大木泰祐, 有働邦広 (2008) 建物屋根面の日射反射性能向上によるヒートアイランド緩和効果. 日本建築学会環境系論文集, **73**, 923-929.
- Kusaka, H., K. Nawata, A. Suzuki-Parker, et al. (2014) Mechanism of Precipitation Increase with Urbanization in Tokyo as Revealed by Ensemble Climate Simulations. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **53**, 824-839.
- 持田灯, 石田泰之 (2009) 風の道. 天気, **56**, 571-572
- Moriwaki, R., M. Kanda, H. Senoo, A. Hagishima and T. Kinouchi (2008) Anthropogenic water vapor emissions in Tokyo. *Water Resour. Res.*, **44**, W11424.
- 森脇亮, 菅原広史 (2012) 都市におけるフラックスおよび乱流観測 (気象研究ノート第224号 都市の気象と気候). 日本気象学会, 103-154.
- Offerle, B., I. Eliasson, C.S.B. Grimmond and B. Holmer (2007) Surface heating in relation to air temperature, wind and turbulence in an urban street canyon. *Bound.-Layer Meteorol.*, **122**, 273-292.
- Ohashi, Y. and Kida, H. (2002) Numerical experiments on the weak-wind region formed ahead of the sea-breeze front. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **80**, 519-527.
- Oikawa, S. and Y. Meng (1995) Turbulence characteristics and organized motion in a suburban roughness sublayer. *Bound.-Layer Meteorol.*, **74**, 289-312.
- Sakai, S., M. Nakamura, K. Furuya, N. Amemura, M. Onishi, I. Iizawa, J. Nakata, K. Yamaji, R. Asano and K. Tamotsu (2012) Sierpinski's forest: New technology of cool roof with fractal shapes. *Energy Build.*, **55**, 28-34.
- Shaw, R. H., J. Tavangar and D.P. Ward (1983) Structure of the Reynolds stress in a canopy layer. *J. Appl. Meteorol.*, **22**, 1922-1931.
- Skoulika F., M. Santamouris, D. Kolokotsa and N. Boemi (2014) On the thermal characteristics and the mitigation potential of a medium size urban park in Athens, Greece. *Landsc. Urban Plan.*, **123**, 73-86.
- Stewart, I. D. and T. R. Oke (2012) Local climate zones for urban temperature studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **93**, 1879-1900.
- Sugawara, H., A. Hagishima, K. Narita, H. Ogawa and M. Yamano (2008) Temperature and wind distribution in an E-W-oriented urban street canyon. *SOLA*, **4**, 53-56.
- 菅原広史, 成田健一 (2012) 都市内河川による暑熱環境の緩和効果. 水文・水資源学会誌, **25**, 351-361.
- Sugawara, H., R. Oda and N. Seino (2018) Urban thermal influence on the background environment of convective precipitation. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **96A**, 67-76.
- 高橋日出男 (2003) 東京とその周辺における夏季 (6~9月) 日降水量の階級別出現特性の経年変化. 天気, **50**, 31-41.
- 塚本修, 文字信孝, 伊藤芳樹 (2001) 乱流変動法による運動量・顕熱・潜熱 (水蒸気) のフラックス測定 (気象研究ノート第199号 地表面フラックス測定法). 日本気象学会, 19-56.
- Yoshikado, H. (1990) Vertical structure of the sea breeze Penetrating through a large urban complex. *J. Appl. Meteorol.*, **29**, 878-891.