水文・水資源学会誌
J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour.
Vol. 16, No. 5(2003) pp. 491-500

都市接地層における熱・水蒸気・CO₂の乱流輸送効率の相似性

Turbulent Transfer Efficiency of Heat, Vapor, and CO₂ Measured in an Urban Surface Layer

森脇 亮・神田 学* (東京工業大学大学院理工学研究科)

Ryo MORIWAKI・Manabu KANDA

Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

菅原広史** (防衛大学地球海洋学科)

Hirofumi SUGAWARA

Dept. of Earth and Oceanic Science, National Defense Academy of Japan

A long-term field measurement was performed to investigate turbulent transfer in a densely built-up urban surface layer. The turbulent transfer efficiencies of heat, vapor, and CO₂ were examined. In the morning the low-frequency eddies penetrating the entire atmospheric boundary layer transfer water vapor efficiently due to the entrainment of dry air from upper to the surface. M.O.S. theory predicts that relative transfer efficiencies are unity and have no dependency on stability. But ratios for vapor/heat and CO₂/heat observed show that the transfer efficiencies of vapor and CO₂ are smaller than heat. This tendency is more significant in unstable condition. In order to discuss this result, wavelet analysis for transfer efficiency of scalars was conducted. The thermal structure and organized structure transfer heat efficiently. Vapor and CO₂ are also transferred as well as heat by some structures. But they are not or adversely transferred by other structures. Followings are considered as this reason. (1) Heat is an active scalar and produces the thermal structures by itself. Hence, the heat is transferred most efficiently. Vapor and CO₂ are transferred passively and the efficiency is less than heat. (2) The absorption/source of vapor and CO₂ is inhomogeneous. As a result, the heterogeneity of vapor and CO₂ concentration distribution causes their transfer efficiency lower.

Key words: Urban surface layer, Turbulent transfer, Scalar, Field observation, Wavelet analysis

都市接地層内における熱・水蒸気・CO₂輸送を把握するため、東京都大田区久が原の住宅地にて長期観測を行った。フラックスの相関係数を用いてスカラー間の輸送効率を調べたところ、以下のことが明らかになった。1) 熱と水蒸気の輸送効率比は、朝方大きく日中にかけて小さくなる傾向がみられる。朝方の不安定時は、大きなスケールの渦構造によって混合層上端からの乾燥空気が連行されることにより、熱に比べて水蒸気が効率的に輸送されると考えられる。2) 日中の定常と見なせる時間帯において、スカラー間の相関係数を比較したところ、熱・水蒸気・CO₂の順で輸送効率が悪くなる。スペクトル解析・ウェーブレット解析を用いて輸送効率に寄与する渦スケールの特定を行った結果、サーマルやシアア不安定による組織渦が熱、水蒸気、CO₂それぞれの輸送を担っている。しかし、これらの輸送イベントの各スカラー量に対する効果は同一ではない。その原因として、スカラー間の濃度分布の不均一性に差異があること、熱がアクティブなスカラー量であるのに対し水蒸気・CO₂が受動的なスカラー量であること、が理由として挙げられる。

キーワード：都市、乱流輸送、スカラー、現地観測、ウェーブレット解析

I. はじめに

1968年に行われたアメリカ・カンザス州での大規模野外観測を代表に、平原・森林・海上といった

フィールドで大気乱流による地表面・大気間の運動量・熱・水蒸気の輸送過程に関する観測研究が数多く行われ、接地層ではモニナーオブコフ相似則(以下, MOST)が成立することが多くの研究で認められ

*東京工業大学大学院理工学研究科 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1

Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo 152-8552, Japan

**防衛大学地球海洋学科

Dept. of Earth and Oceanic Science, National Defense Academy of Japan, Yokosuka 239-8686, Japan

てきた．この相似則は，運動量や熱だけでなく他のスカラー量にも拡張適用され，例えば Ohtak (1985) は CO_2 の乱流統計量にも MOST が認められると述べている．しかし我々の生活拠点である都市域においては MOST の成立を保証するような観測例は少ない．Roth and Oke (1993, 1995) や神田ら (2000) は都市における観測結果に基づき，鉛直風速や温度や水蒸気の相関係数に相似性が成り立たず，平原と都市では乱流輸送特性が一部異なる傾向を示すことを指摘している．これらの観測は短期的なものであり一般論として見なすには慎重を期する必要があるが，接地境界層理論の根底に関わる極めて重要な指摘である．著者らは都市と大気間のエネルギー・物質輸送を包括的に把握することを目的に，東京都久が原の住宅地において都市におけるフラックスの長期的な観測を行っている．夏季のデータの一部であるが水文陸面パラメータや都市接地層の成立条件については，森脇ら (2002)，渡邊ら (2002) などですでに報告してきた．本論は，長期観測に基づき都市接地層内のフラックス特性について述べるものであり，第 1 報 (森脇・神田，2002) でフラックスの季節変化の特徴を示した．本報は第 2 報にあたり，スカラー間の乱流輸送の相似性について検討する．数ある相似則の中で特に重要なものが，風速や温度などの無次元勾配 (シア関数) であるが，その前段階として本研究では，Roth and Oke (1993) に従ってスカラー間の乱流相関係数に着目して議論する．またこれまで都市では報告されていない CO_2 の乱流輸送の相似性についても検討した．

II. 観測概要およびデータ処理方法

1. 観測場所および測定方法

東京都大田区久が原の住宅地上空において 2001 年 5 月より継続的な乱流計測が行われている．タワー周辺の住宅地は 1 km 四方に渡り第一種低層住宅専用地域に指定されており建物の殆どが 2 階建の住宅である．建蔽率は約 47% であり欧米諸国に比べて密な住宅街といえる．建物高さ測定の結果，建物高さの平均値は 7.3 m，標準偏差は 1.3 m であり住宅街はほぼ一様な高さの建物で構成されている．観測場所の詳細については，森脇・神田 (2003) を参照されたい．都市における運動量粗度 (z_0) およびゼロ面変位 (z_d) には数多くの算出法が提案されているが (Grimmond and Oke, (1999) に詳しい)，本研究では比較的広範な幾何条件に適用できる式として彼ら

表 - 1 都市の幾何パラメータ
Table 1 Geometric parameters of the site

建物高さ	z_H	平均	7.3m
		標準偏差	1.3m
建蔽率	λ_p		47.4%
フロントルエリア インデックス	λ_f		52.0%
緑被率			22.0%
運動量粗度	z_0		0.58m
ゼロ面変位	z_d		5.3m

が推奨している Macdonald *et al.* (1998) の定式化を用いることにする．

$$\frac{z_d}{z_h} = 1 + 4.43 \cdot (p - 1) \quad (1)$$

$$\frac{z_0}{z_h} = \left(1 - \frac{z_d}{z_h} \right) \exp \left[- \left[0.5 \frac{c_d}{k^2} \left(1 - \frac{z_d}{z_h} \right) \right]^f \right]^{0.5} \quad (2)$$

ここで， z_h は建物高さ， c_d は抵抗係数 1/2， k はカルマン定数 0.4， p は屋根・敷地面積比 (建蔽率)， f は鉛直壁・敷地積比である．都市の幾何パラメータと z_0 ・ z_d をまとめて表 - 1 に示す．

本研究では都市の接地境界層内での計測を行うため，高度 29.0 m (建物高さの約 4 倍，タワー頂上部) に計測機器を設置した．この高さに内部境界層が発達するには，性状の変わらない住宅街が数百～1 km に渡って広がっていることが必要である．本研究で観測対象としているエリアはこの条件を満たしている．本観測における測定高度の決定方法や接地境界層の成立性の詳細については渡邊ら (2002) を参照されたい．観測に使用したタワーはトラス式構造の自立型タワーであり充実率 (水平風速に対する部材の射影面積比) は 0.27 である．タワーによる気流の乱れの影響を排除するため，タワーと乱流計測機器の距離はタワー幅の 1.5 倍とした．三次元超音波風速温度計 (Metek 社; USA-1) とオープンパス $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ アナライザー (Li-cor 社; LI-7500) を用いて，3 次元風速・気温・ CO_2 濃度・水蒸気濃度の瞬間値を 8 Hz のサンプリング周期で計測した．

2. データ解析手法

フラックスの算出には渦相関法を用いた．フラックス算出の乱流統計時間は 60 分とした．バイアス除去のため McMillen (1988) に倣い，平均横断風速 $\overline{v} = 0$ ，平均鉛直風速 $\overline{w} = 0$ ， $\overline{v \cdot w} = 0$ となるよう風速の座標変換を行った．潜熱・ CO_2 フラックスに対し

ては Webb *et al.* (1980) の密度変動補正を加えた．

本稿ではスカラー間の鉛直輸送効率について議論する．以下に示す乱流相関係数はスカラー量の鉛直輸送効率を表すパラメータであり，0 (相関無し) から 1 (最も効率良く輸送) の値をとる．

$$r_{wT} = |wT| / wT \tag{3}$$

$$r_{wq} = |wq| / wq \tag{4}$$

$$r_{wc} = |wc| / wc \tag{5}$$

ここでは w 風速の鉛直方向成分を表し， T は気温， q は比湿， c は CO_2 濃度を表す． は標準偏差である．ブライムは時間平均値 (上付きバーで表される) からの瞬間的な偏差である．これら乱流相関係数の比をとることで，スカラー間の相対的な輸送効率を調べることができる．

3．解析に使用したデータ

本論では2001年5月1日～12月31日までのデータを使用した．データの品質を高めるために下記のような基準を設けた．(1)日照率が80%を超える晴天日のデータのみを使用する．晴天日の決定方法や日数については，森脇・神田 (2003) を参照されたい．(2)統計的な不安定を避けるため，表 - 2 のようにそれぞれのフラックスに下限値を設定し，フラックスの絶対値がこれより小さいデータは除去した．(3)モニン オブコフ相似則 (MOST) は定常な気象条件時に適用できる．そのため，MOST の成立性を議論するⅢ章2節では，日射量，気温，比湿，風速の変化率が小さく定常と見なせる日中の11時から14時のデータに限って解析を行った．

Ⅲ．乱流相関係数

1．熱と水蒸気の輸送効率比の時間変化パターン

MOST の枠組で議論を行うためには気象場が定常であることが条件となる．しかし気象場が定常である時間帯は一日の中でも数時間しか存在せず，その他の時間帯を含めたスカラー輸送特性を知ることにも極めて重要である．そこでスカラー間の輸送効率比の時間変化挙動を追ったところ興味深い傾向が見出

表 - 2 フラックスの下限値
Table 2 Lower limits of fluxes

運動量フラックス	0.05 ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
顕熱	30 (Wm^{-2})
潜熱	30 (Wm^{-2})
CO_2 フラックス	0.02 ($\text{mgm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

図 - 1 5月・7月・12月の晴天日における， r_{wq}/r_{wT} の時間変化パターン．図中の棒グラフは海風侵入時刻の確率分布

Fig. 1 Diurnal change of r_{wq}/r_{wT} in May (top), July (middle) and December (bottom). A bar graph indicates the probability distribution of sea breeze penetration

せたので，ここでは熱と水蒸気の輸送効率比 (r_{wq}/r_{wT}) の時間変化を例に挙げて議論する．

図 - 1 に5月・7月・12月の晴天日における， r_{wq}/r_{wT} の時間変化挙動のアンサンブル平均を示す．プロットで平均値を表し，誤差バーで標準偏差を表した．また各プロットには平均データ個数を数字で示している．朝方と夕刻にデータが少ないのはフラックスの下限値設定によってデータが除去されているためである． r_{wq}/r_{wT} は朝方に大きくなる傾向が見て取れ，その値は1と同等かそれより大きくなる．つまり朝方は水蒸気の輸送効率が悪くなるという興味深い結果が得られている．一方MOSTが仮定できる気象場の定常な正午付近の値でも輸送効率比は1にならず0.5程度である．つまり水蒸気の輸送効率が熱に対して小さくなっていることを意味する．定常時に r_{wq}/r_{wT} が1にならないことについては次節で詳しく検討し，ここでは r_{wq}/r_{wT} の時間変化の特徴に着目し，熱と水蒸気の輸送効率比 r_{wq}/r_{wT} が朝方に大

きく日中になると小さくなる理由について検討する。

気温や比湿は1日の中で時間変化する。そのため、トレンドとして捉えられる気温や比湿の日変化が(標準偏差)を大きくする可能性があり、これが r_{wq}/r_{wT} の時間変化に影響している可能性がある。しかし、各データセットに対しトレンドを線形除去しても r_{wq}/r_{wT} の時間変化の特徴は変わらない。そこで次に、接地層におけるスカラー量の輸送効率を大きく変化させる要因として、1) 海風の侵入、2) 混合層上部との交換過程、の可能性について検討する。まず第一に海風の侵入との関係について考察する。海風のフロントが通過するようなイベントでは、混合層内の風速や気温や比湿の分布が大きく変化し、接地層におけるスカラー輸送に影響を与えることは可能性として十分に考えられる。図中に棒グラフで示したのは海風侵入時刻の確率分布である。春季(5月)も夏季(7月)も南からの海風の侵入は明確であり、侵入時刻は5月は10時~13時ころ、7月は8~11時ころに集中している。しかし r_{wq}/r_{wT} は朝6~8時ころにはすでに大きく変化しており、海風の侵入時刻に先だっている。一方12月は北寄りの風が卓越し日中の海風の侵入は明確でないにも関わらず、 r_{wq}/r_{wT} には変化が認められる。そこで次に2) 混合層上部との交換過程、の影響について検討する。図-2に夏季における混合層高度の時間変化パターンを示す。各時刻の混合層高度はライダーを用いて後方散乱強度の鉛直分布より推定した。結果は2002年の夏季に東京工業大学屋上(フラックス観測地点との距離は3 km)で測定されたデータのうち、晴天日の

図-2 夏季の混合層高さの時間変化パターン(2002年8月6日~9月2日までの晴天日のアンサンブル平均)

Fig. 2 Diurnal change of mixing layer height, ensemble averaged over clear days from Aug. 6 to Sep. 2 in 2002

データをアンサンブル平均したものである。プロットで平均値を示し、誤差バーで標準偏差を示している。プロットの右肩の数字は平均したデータ個数である。混合層高度は朝方に低くその高さは400~600m程度である。日中は急激に発達して1200~1600mの高度に達する。その後夜間にかけて高度は緩やかに低下する。 r_{wq}/r_{wT} の時間変化はこの混合層の変化と対応しているのではないだろうか。 r_{wq}/r_{wT} が大きい朝方の時間帯は風速が弱く大気不安定な状態となる傾向がある。朝方に混合層が発達し始める段階では、混合層上部でエントレインメントの作用により取り込まれた上層の乾燥した空気塊が地表付近まで運ばれ結果的に接地層での水蒸気の輸送効率が良くなると推測される。また混合層が発達するにつれて、接地層での輸送に対する混合層上との交換過程の影響は弱まり、水蒸気の輸送効率は低下していく。そこで r_{wq}/r_{wT} の挙動が典型的である7月11日に注目し(r_{wq}/r_{wT} , 風速, 大気安定度 z/L の時間変化を図-3に示す), 大気不安定な朝方7~8時の $wT/wT, wT/wT, w/wT, T/T, q/q$ の時系列データに対して時間周波数解析の一つであるウェーブレット解析を行った。ウェーブレット解

図-3 2001年7月11日における r_{wq}/r_{wT} (上)と主流平均風速(中)と大気安定度(下)の時間変化
Fig. 3 Diurnal change of r_{wq}/r_{wT} (top), horizontal wind speed (middle) and atmospheric stability (bottom) on Jul. 11 in 2001

図 - 4 解析に用いたマザーウェーブレット (a はタイムスケール)

Fig. 4 Analyzing wavelet function. a indicates time scale of the wavelet

析によって熱および水蒸気の輸送に寄与している乱流渦のスケールとその発生時刻が容易に把握出来る。マザーウェーブレットには図 - 4 に示すようなメキシカン・ハット (ガウス確率密度関数の2階導関数) を用いた。メキシカンハット関数は時間においても周波数においてもよく局在化されている利点があり、大気乱流の研究にもよく用いられている (例えば, Gao and Li, (1993))。図 - 5 にウェーブレット解析結果を示す。縦軸はマザーウェーブレットのタイムスケール (図 - 4 中の a) であり、存在する渦のスケールと解釈されたい。また横軸は時間軸である。マザーウェーブレットとの正の相関が強い部分を黒、負の相関が強い部分を白でコンターを書いた。(a) 中で破線で囲った部分は、時間スケール a が 64sec ~ 128sec であること、上昇気流が起きていて気温も上昇していること (図(c), (d)参照), から判断してサーマルによる上向きの熱輸送が生じていると考えられる。熱はサーマルによって効率良く輸送が行われているが、水蒸気はサーマルによって輸送が行われず、行われなかったりする。この原因についてはIV章で詳細に検討する。ここで注目したいのは、実線で囲った部分 (7:50 ~ 8:00頃) である。このスケールはサーマルとほぼ同等であるが、この構造では熱は全く輸送されず水蒸気のみ輸送が効率良く行われている。(c)を見るとこの構造では下降流が生じており、このとき温度は上昇、比湿は低下している。このことからサーマルとは異なる現象によりスカラー輸送が生じていると考えられる。この構造が朝方のみに見られること、スケールの大きい構造で

図 - 5 (a) $w'T'/w_T$, (b) $w'q'/w_q$, (c) w'/w , (d) T'/T , (e) q'/q に対するウェーブレット係数のコンター図。7月11日 7:00 ~ 8:00

Fig. 5 Contours of wavelet coefficients for (a) $w'T'/w_T$, (b) $w'q'/w_q$, (c) w'/w , (d) T'/T , (e) q'/q from 7:00 to 8:00 on Jul. 11 in 2001.

あることの2点から、境界層スケールの大きな渦が混合層が急激に発達する過程において上空の乾燥した空気を取り込んでいると考えられる。その結果、この空気と地表面付近の相対的に湿潤な空気の交換が行われ、水蒸気の輸送効率が高くなると考えられる。夕刻、混合層高度はゆっくりと低下しながら残留層へと推移する。残留層の存在により上層大気と地表の間には水蒸気の交換が生じにくいと考えられる。

2. スカラー間の輸送効率比と大気安定度の関係

前節より乱流相関係数は1日の混合層変化に対応しており、その原因として混合層上空気塊との交換過程について議論した。本来、MOSTは気象条件が定常的であることを前提にしているので、本節では

図 - 6 水蒸気の熱に対する鉛直輸送効率比

Fig. 6 Relative efficiencies of turbulent transfer of vapor to heat (r_{wq}/r_{wT}) versus atmospheric stability

図 - 7 二酸化炭素の熱に対する鉛直輸送効率比

Fig. 7 Relative efficiencies of turbulent transfer of CO_2 to heat (r_{wc}/r_{wT}) versus atmospheric stability

日中の定常と見なせる時間帯（11時から14時）にのみデータを絞り、スカラー間の輸送効率比と大気安定度との関係について検討した。

図 - 6 に大気安定度に対する水蒸気と熱、図 - 7 に CO_2 と熱の相関係数の比を示す。MOST によるとスカラー量は大気安定度によらず全て同等に輸送されるとされているため、スカラー間の輸送効率比は1になることが期待される。しかし測定結果は1を下回り、熱に比べて水蒸気、 CO_2 の順で相関係数（輸送効率）が小さくなる傾向が見られた。Roth and Oke (1993) もバンクーバーの住宅街上の観測結果をもとに、水蒸気と熱の輸送効率比は1にならないことを指摘しており、その原因として、(1)発生源の不均一性、(2)放射に対する雲の効果、(3)逆転層上大気とのインタラクション、などを挙げている。本研究では、混合層が十分に発達している晴天日の

昼間のデータのみを使用しているため雲の影響や上層大気とのインタラクションが起きているとは考えにくい。ここではソースの不均一性について考察する。日中太陽に加熱される都市（家屋、道路、庭木など）は熱に対して均一な発生源として取り扱ってよいと考えられる（神田ら、2000）。一方森脇・神田（2003）は水蒸気や CO_2 の発生源について詳細に調べており、水蒸気に対しては庭木が発生源に、 CO_2 に対しては家庭・自動車交通が発生源、庭木は逆に吸収源になっているとしている。このように考えると、フラックスの大きさに対する発生源の不均一性は、熱よりも水蒸気の方が大きく、水蒸気よりも CO_2 の方が大きくなる。この発生源の不均一性のため、水蒸気や CO_2 の濃度分布にも空間的なむらが生じやすく、フラックスに寄与しない q や c が増大したために、水蒸気や CO_2 の相関係数が熱に比べて小さくなったと考えられる。水蒸気の場合は顕著ではないが、特に CO_2 の場合、大気が不安定になるにつれて輸送効率比が小さくなるのは不安定時に熱が効率よく輸送されやすくなるためと考えられるが、詳細な輸送メカニズムについては次章にて検討する。

IV. 乱流輸送のメカニズム

1. スカラー輸送に支配的な乱流構造

7月11日 (r_{wq}/r_{wT} , 風速, z/L の時間変化は図 - 3 参照) の13時における、熱・水蒸気・ CO_2 フラックスのコスペクトルを図 - 8 に示す。コスペクトルはそれぞれ鉛直風速とスカラー量の標準偏差で規格化し、周波数で重み付けしている。スカラーフラックスのコスペクトルには共通したピークが認められ（図中に示したハッチング）、各スカラー量はある共通した乱流構造によって主に輸送されていると考えられる。図中に示した矢印と番号に対応する乱流構造は、その周波数帯から、それぞれ(1)シア不安定による組織渦、(2)熱対流（サーマル）であると考えられ、以下それぞれ検討する。

1) 組織渦

境界層における不安定時の $w'T'$ のコスペクトルのピークは測定高度 ($z - z_d$) に比例することが知られている (Kaimal and Finnigan, 1994)。本観測高度 ($z = 29\text{m}$) とゼロ面変位 ($z_d = 5.3\text{m}$) からコスペクトルピークの波長を計算すると、渦の水平スケール m は約300mとなる。この時間帯の風速は 8.5m s^{-1} であるので周波数に換算すると 0.029Hz となる。観測されたコスペクトルのピーク（図 - 8 に示した

図 - 8 スカラー輸送の規格化コスペクトル．2001年7月11日（13：00～14：00）

Fig. 8 Normalized co-spectrum of heat, vapor and CO₂ from 13:00 to 14:00 on Jul. 11 in 2001.

ハッチング）はこの周波数を含むが、より高周波側（0.03～0.1Hz）にも強いピークが見られる。つまり接地層理論で得られるスペクトルピークよりもやや高周波側にピークが推移している。植生キャノピー内とその近傍では、抵抗体（草や樹木）の存在によって風速分布に変曲点が存在し、シア不安定による組織構造が乱れを支配していることが知られている（例えば、Kanda and Hino, 1994; Raupach *et al.*, 1996）。Ho and Huerre（1984）によると、流速分布に変曲点を有するせん断流れにおいて発生する渦の最大発達率を示す周波数 f は、

$$\frac{f}{U_m} = 0.032 \quad (6)$$

で与えられる。ここに U_m はキャノピーの存在による運動量欠損を U_∞^2 で割った運動量厚さ、 U_∞ はキャノピー上で流速がほぼ一定となる値、 U_m はせん断層上における流速の平均値である。にゼロ面変位 $z_d = 5.3\text{m}$ （表 - 1）を与え、 U_m に高度29mで測定された風速 8.5m s^{-1} を与えたところ、 f は約0.05Hzとなった。上述した高周波側にピークが推移している理由は、この組織渦の影響によると考えられる。植生キャノピーの場合、組織渦の影響範囲はキャノピー高さの2倍程度までと言われているが（Raupach *et al.*, 1996）、本観測ではキャノピー高さの4

倍の高さにおいてもコスペクトルの周波数特性に組織渦の影響が認められた。その理由の一つに本観測場所が都市の上空であることが挙げられる。植生と都市のキャノピー構造には抵抗体の透過性に大きな相違点がある。都市では建物の背後にキャノピースケールの後流が形成される。この後流と組織渦の相互作用が、その影響範囲を大きくしているのかもしれない。都市における乱流データを整理した Roth（2000）は都市キャノピー近傍において乱れの組織構造のスケールが植生に比べて大きくなることを指摘しており、本結果と合わせて興味深い。この周波数帯の水蒸気およびCO₂のスペクトル強度は、熱のスペクトル強度の約50%程度である。これは前章で述べたようにフラックスに寄与しない濃度変動（標準偏差）が大きいためだと考えられる。

2) サーマル

実験室内の熱対流のアスペクト比（縦に対する横の比）は約1であるが、実際の大気中に存在する熱対流はこれよりも大きくなることが数値計算によって確かめられている（神田，1994）。図 - 2より日中の混合層高さは1500mであり、アスペクト比を1～5程度であるとすると、サーマルの水平スケールは1500～7500mに達すると考えられる。この時間帯の平均風速は 8.5m s^{-1} なので、サーマルの周期は200～900秒程度（ $1.1 \sim 5.3 \times 10^{-3}\text{Hz}$ ）となる。この乱流構造は全てのフラックスにスペクトルピークとして確認でき、サーマルがフラックスに寄与していることがわかる。各スカラー間でその強度を比較すると、水蒸気は熱の約50%、CO₂は熱の約20%である。熱はアクティブなスカラーであるため、熱自体が作り出すサーマルでは熱は効率よく輸送される。しかしCO₂は濃度の空間的非一様性が大きいためサーマルによる輸送効率が著しく低下すると考えられる。図 - 7において大気が不安定になるほど r_{wc}/r_{wT} が小さくなるのはこの理由によると思われる。一方、水蒸気は熱の50%程度でCO₂のスペクトル強度より大きい。この理由ははっきりしないが、サーマル程度の大きいスケールでは、CO₂と比べて水蒸気の濃度分布は一樣である（より熱に近い）とみなせ、サーマルによって輸送されやすいためかもしれない。次節ではウェーブレット解析を用いてさらに詳しく検討する。

図 - 9 ウェーブレット係数のコンター図。(a) $w'T'/w_T$, (b) $w'q'/w_q$, (c) $w'c'/w_c$. 左図: 2001年7月11日 (13:00~14:00), 右図: 左図中の白四角の拡大図. 図中, 実線で囲んだ円がサーマルを, 破線で囲んだ円が組織渦を示す.

Fig. 9 Contours of wavelet coefficients for $w'T'/w_T$ (top), $w'q'/w_q$ (middle), $w'c'/w_c$ (bottom). Left figures: from 13:00 to 14:00 on Jul. 11 in 2001. Right figures: from 13:20 to 13:35 on Jul. 11 in 2001

2. ウェーブレット解析によるスカラー間の輸送効率の相連性

スカラー間の輸送効率の差異をさらに詳細に検討するため前章同様ウェーブレット解析を行った. 解析例として7月11日13:00~14:00の熱, 水蒸気, CO_2 の輸送効率に対するウェーブレット係数のコンターを図-9に示す. 縦軸の時間スケールは図-4に示したメキシカンハット関数のスケールである. 図左側の白四角で囲った部分の拡大図を図右側に表示している. マザーウェーブレットのフーリエ変換はある範囲をもった周波数帯にパワーが存在するため, 一般にウェーブレットの時間スケールをフーリエ変換における波数に厳密には置き換えられない(詳細は Perrier *et al.*, 1995)が, メキシカンハット関数の場合は $a = 1/4f$ でほぼ置き換えることができる. $a < 1$ ではウェーブレット係数が大きくなるような構造はみられず, このような小スケールではフラックスの生成に寄与するような乱流構造は起きていない. 一方, $a > 64$ の大きい構造(図中で実線で囲った部分)は前節で述べたサーマルに対応していると考えられる. サーマルは規則的ではなく間欠的

に生じている様子がわかる. またこれら中間的なスケール ($2 < a < 16$) に存在する破線で囲った乱流構造は組織渦に相当していると考えられる. この結果では, 朝方に目立っていたサーマルによるスカラー輸送(図-5の相関の高い部分)の強度は相対的に弱くなっている. これは無次元化に用いた標準偏差 (w_T , q_T など) が日中に大きくなることが一因だが, 風速の弱 強に対応している. 朝方は混合層の発達とともに境界層厚さスケールのサーマルがスカラー量の輸送を担っているが, 日中に風が強まるとシアーによる比較的小さなスケールの組織渦がスカラー輸送を支配する. 組織渦によるスカラー量の輸送は, サーマルによる輸送が起きている時間帯に一致しており, 大きな乱流構造(サーマル)が小さな乱流構造(組織渦)のトリガーになっているようにも見える. 同様の結果は Gao and Li (1993) による森林内外の気温変動に対するウェーブレット解析にも認められている.

図-9左を見ると, 熱はサーマルによって常に効率良く鉛直上向きに輸送されている(実線によって囲まれた部分). 一方, 水蒸気や CO_2 には, 熱と同

様に輸送されるイベントもあれば、輸送されなかったり逆に輸送されたりするイベントがある。前章でも述べたように都市においては水蒸気や CO_2 の主な発生・吸収源は、家屋や庭木や自動車交通などであり、その強度もスカラー量によって異なる(森脇・神田, 2003) ため、スカラー濃度分布にも空間的なむらが生じやすくなり、その不均一性は、熱 < 水蒸気 < CO_2 の順となる。熱はそれ自体が輸送を生み出すアクティブスカラー量であるため、サーマルが生じる際に効率よく輸送されるが、水蒸気や CO_2 は受動的に輸送されるパッシブスカラー量であるため、サーマル発生時に熱と同様に効率よく輸送される事もあれば輸送されないイベントもある。そのため前節でも議論したように、熱 > 水蒸気 > CO_2 の順で輸送効率が低下していくのだと考えられる。一方、組織構造(図 - 9 右)においてもスカラー輸送の相似性は維持されておらず、熱、水蒸気、 CO_2 が同じように輸送される場合もあれば、全く異なる場合もある(図中の波線部分を比較されたい)。組織渦の場合は熱は乱れの駆動力とはならないが、前述したスカラー濃度分布の不均一性の差異によって、このスケールの渦構造においても熱の輸送効率がよいという結果になったと考えられる。

まとめ

都市接地層内における熱・水蒸気・ CO_2 輸送を把握するため、東京都大田区久が原の住宅地にて長期観測を行った。フラックスの相関係数を用いてスカラー間の輸送効率を調べたところ、以下のことが明らかになった。

1) 熱と水蒸気の輸送効率比 r_{wq}/r_{wt} は、朝方大きく日中にかけて小さくなる傾向がみられる。朝方の不安定時は、大きなスケールの渦構造によって混合層上端からの乾燥空気が連行されることにより、熱に比べて水蒸気が効率的に輸送されると考えられる。

2) 日中の定常と見なせる時間帯において、スカラー間の相関係数を比較したところ、熱・水蒸気・ CO_2 の順で輸送効率が落ちていく。スペクトル解析・ウェーブレット解析を用いて輸送効率に寄与する渦スケールの特定を行った結果、サーマルやシア不安定による組織渦が熱、水蒸気、 CO_2 それぞれの輸送を担っている。しかし、これらの輸送イベントの各スカラー量に対する効果は同一ではない。その原因として、スカラー間の濃度分布の不均一性に差異があること、熱がアクティブなスカラー量で

あるのに対し水蒸気・ CO_2 が受動的なスカラー量であること、が理由として挙げられる。

謝辞: 本研究は文部省科学研究費補助金基盤研究(B)(2) (課題番号: 12450197), 若手研究(B) (課題番号: 14750425), 科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業(代表: 神田学) による財政的援助を受けた。また観測場所の提供には、宗教法人カトリックお告げのフランシスコ修道会(代表: 釘宮禮子様) に多大なるご協力をいただいた。また建物高さの測定に使用したレーザー距離計は、東京工業大学国際開発工学専攻太田教授にお借りした。また東京工業大学大学院学生の渡邊倫樹さん、松永和章さんには観測の準備段階からデータ解析まで全般に渡り協力を頂いた。ここに合わせて謝意を表す。

引用文献

- Gao, W. and Li, B. L. (1993): Wavelet analysis of coherent structures at the atmosphere-forest interface, *J. Applied Meteorol.*, **32**, pp. 1717-1725.
- Grimmond, C. S. B. and Oke, T. R. (1999): Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form, *J. Appl. Meteor.*, **38**, pp. 1262-1292.
- Ho, C-M. and Huerre, P. (1984): Perturbed Free Shear Layers, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **16**, pp. 365-424.
- Kaimal, J.C. and Finnigan, J.J. (1994): *Atmospheric Boundary Layer Flows*, 289pp., Oxford Univ. Press, New York.
- 神田 学 (1994): 大気 植生 土壌および水面の相互作用を考慮した水文気象に関する研究, 東京工業大学土木工学科学学位論文。
- Kanda, M. and Hino, M. (1994): Organized structures in developing turbulent flow within and above a plant canopy, using a large eddy simulation, *Boundary-Layer Meteorol.*, **68**, pp. 237-257.
- 神田 学・森脇 亮・鈴木 譲・Roth M., Oke, T. R. (2000): 都市の接地境界層における乱流相似関数について: 天気, **47**, pp. 493-501.
- Macdonald, R. W., Griffiths, R. F. and Hall, D. J. (1998): An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays, *Atmos. Environ.*, **32**, pp. 1857-1864.
- McMillen, R. T. (1988): An eddy correlation tech-

- nique with extended applicability to non-simple terrain., *Boundary-Layer Meteor.*, **43**, pp. 231-245.
- 森脇 亮・神田 学 (2003): 都市境界層における放射・熱・水・CO₂フラックスの長期連続観測, 水文・水資源学会誌, **16**, pp. 477-490.
- 森脇 亮・神田 学・松永和章・渡邊倫樹 (2002): 都市域の陸面パラメーターの算定, 土木学会水工学論文集, **46**, pp. 79-84.
- Ohtaki, E. (1985): On the similarity in atmospheric fluctuation of carbon dioxide, water vapor and temperature over vegetated fields, *Boundary-Layer Meteor.*, **32**, pp. 25-37.
- Perrier, V., Philipovitch, T., and Basdevant, C. (1995): Wavelet spectra compared to Fourier spectra, *J. Math. Phys.*, **36**, pp. 1506-1519.
- Raupach, M. R., Finnigan, J. J., and Brunet, Y. (1996): Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: The mixing-layer analogy, *Boundary-Layer Meteor.*, **78**, pp. 351-382.
- Roth, M. and Oke, T. R. (1993): Turbulent transfer relationships over an urban surface. I: Spectral characteristics: *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **119**, pp. 1071-1104.
- Roth, M. and Oke, T. R. (1995): Relative efficiencies of turbulent transfer of heat, mass, and momentum over a patchy urban surface: *J. Atmos. Sci.*, **52**, pp. 1863-1874.
- Roth, M. (2000): Review of atmospheric turbulence over cities, *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.*, **126**, pp. 941-990.
- 渡邊倫樹・森脇 亮・神田 学・松永和章 (2002): 都市域におけるコンスタント・フラックス層の存在条件について, 土木学会水工学論文集, **46**, pp. 79-84.
- Webb, E. K., Pearman, G. I. and Leuning, R. (1980): Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer, *Quart. J. of Roy. Met. Soc.*, **106**, pp. 85-100.
- (受付 : 2002年9月10日 , 受理 : 2003年2月22日)