

接地境界層における熱・水蒸気・二酸化炭素の 乱流輸送の相似性について

SIMILARITY OF TURBULENT TRANFER OF HEAT, WATER VAPOR, AND CARBON DIOXIDE IN SURFACE LAYER

森脇 亮¹・神田 学²・渡辺倫樹³

Ryo MORIWAKI, Manabu KANDA and Tomoki WATANABE

¹正会員 学(工) 東京工業大学助手 理工学研究科土木工学専攻
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目12-1)

²正会員 工博 東京工業大学助教授 理工学研究科国際開発工学専攻

³学生会員 学(工) 東京工業大学 理工学研究科土木工学専攻

The present study uses observational data from a residential site in Tokyo, Japan and a rice paddy in Chiba Pref., Japan, to investigate the relative facility with heat, water vapor, and carbon dioxide are transported by turbulence in the surface layer. The ratios of linear correlation coefficients $|r_{wT}/r_{uw}|$ and $|r_{wq}/r_{uw}|$ increase with stability and the ratios at residential area are generally smaller than at rice paddy due to bluff-body effects. At rice paddy, the ratios of linear correlation coefficient $|r_{wc}/r_{wq}|$ is generally smaller than unity. Meanwhile at the residential area, the distribution of the ratio $|r_{wc}/r_{wq}|$ scatters to $|z'/L|$. This inequality may be caused by the complex source patterns of the urban surface and the vertical profile within the canopy. Inequalities of transfer between T, c, and q will imply that the diffusion coefficient between them have different value respectively.

Key Words : *Turbulent transfer, surface layer, heat, water vapor, carbon dioxide, ratio of correlation coefficients*

1. はじめに

地表面近傍の大気乱流は、エネルギーや物質の拡散に重要な役割を担っている。接地境界層における乱流輸送過程は1970年代より多くの研究が行われてきており（例えば、Wyngaard et al.(1971)¹⁾；Panofsky et al.(1977)²⁾，De Bruin et al.(1993)³⁾；Kaimal et al.(1972)⁴⁾），接地境界層において風速や気温にモニニーオブコフ則が成立することが共通の認識になっている。しかしながら、乱流によって受動的に輸送されると考えられる各種物質にはこの法則が適用できるのだろうか。地球温暖化で注目を浴びている二酸化炭素や光化学スモッグの原因物質となる大気汚染物質の数値予報には、地表面の境界条件としてモニニーオブコフ則が適用されているのが現状である。森林や小麦畑などの植生上ではスカラー間のフラックスの相似性が確認されているが（たとえば、Ohtaki(1985)⁵⁾，Monji et al.(1994)⁶⁾），Roth and Oke(1993)⁷⁾によれば、都市キャノピー上空の接地境界層では、水蒸気の乱流統計量にはモニニーオブコフ則が成立していないとの指摘

もされており、受動的なスカラーの輸送過程の解明が必要とされている。またモニニーオブコフ則に基づく乱流相似関数はカンザスの実験を代表例とする、平原での測定結果に基づいて提案されているものであり、これらの都市への適用性にも疑問がもたれている。神田ほか(2000)⁸⁾やRoth(2000)⁹⁾は幾つかの住宅街や商業地において測定されたデータに基づき、従来の相似関数が都市に適用できないことを主張している。また都市接地境界層における二酸化炭素の乱流変動を解析した事例は筆者の知る限りなく、その輸送過程は謎に包まれている。

近年、4波長の赤外線フィルターを備え、相互干渉とドリフトの少ないオープンバス型のCO₂/H₂Oガスアナライザーが開発され、二酸化炭素・水蒸気の精度の良い高周波測定が可能になってきている。筆者らは、この装置を用いて住宅街・水田・海面など種々の地表面において長期的な乱流測定を行っている。まだ短期間の測定結果ではあるが、二酸化炭素を含む乱流輸送に関して、興味深い結果が得られつつあるので、速報性を重視して、その一部を報告する。

本研究では、水田と住宅街という幾何学的に性質の異

なる二つの接地境界層内で、乱流、気温、水蒸気密度、二酸化炭素濃度を同時計測している。パッシブなスカラー量である水蒸気と二酸化炭素、および運動量と熱の輸送過程を調べるために、Roth and Oke(1993)⁷⁾にならない、鉛直輸送に関わる以下の乱流相関係数を用いて、これらの特性を議論する。

$$r_{uw} = \overline{u'w'} / \sigma_u \sigma_w \quad (1a)$$

$$r_{wT} = \overline{w'T'} / \sigma_w \sigma_T \quad (1b)$$

$$r_{wq} = \overline{w'q'} / \sigma_w \sigma_q \quad (1c)$$

$$r_{wc} = \overline{w'c'} / \sigma_w \sigma_c \quad (1d)$$

ここで、 u, w はそれぞれ風速の主流方向成分と鉛直成分、 T は気流温度、 q は水蒸気濃度、 c は二酸化炭素濃度、 σ は標準偏差である。プライムは時間平均値（上付きバーで示される）からの瞬間的な偏差を示している。以上の相関係数は、それぞれ運動量、熱、水蒸気、二酸化炭素の鉛直輸送効率の尺度と見なすことが出来、その絶対値は0（相関なし）～1（最も効率的な輸送）までの値をとる。例えば、二酸化炭素と水蒸気の相対的な鉛直輸送効率を調べるためには、以下のように2つの相関係数の比（ r_{wc} / r_{wq} ）をとればよい。スカラー間の相対的な鉛直輸送効率比は、次式のように、それぞれの無次元化された乱流標準偏差の比に変形できる。

$$\frac{r_{wc}}{r_{wq}} = - \frac{u_* c_* \sigma_w \sigma_q}{\sigma_w \sigma_c u_* q_*} = - \frac{\sigma_q / q_*}{\sigma_c / c_*} \quad (2)$$

ここで、 q_* は摩擦比湿、 c_* は次式で定義される物理量（温度や比湿に対応させて、摩擦二酸化炭素濃度と呼ぶ）である。

$$c_* = \overline{w'c'} / u_* \quad (3)$$

モニニーオブコフ則によれば、乱流によって受動的に輸送される物質は同じメカニズムで輸送されるため、スカラーの輸送効率比（例えば、 r_{wc} / r_{wq} ）は1の値を示すはずである。本研究ではこの点に着目して解析を行った。

2. 現地観測

水田の観測は、千葉県柏市北利根にある河川敷の水田で行った。観測場所の周辺は1km四方に渡って水平で均質な水田が広がっている。収穫直前である田は水が抜かれ、平均的な水稻の高さは75cmであった。一般的に植生におけるゼロ面変位は植生高さの2/3と言われており（例えば、De Bruin and Verhoef(1997)¹⁰⁾），本研究ではこれを50cmとした。観測は2000年9月1日午前から2日夕刻にかけて行い、天気は晴れで南風が定常的に吹いていた。一方、住宅街の観測は、東京都大田区久が原に広が

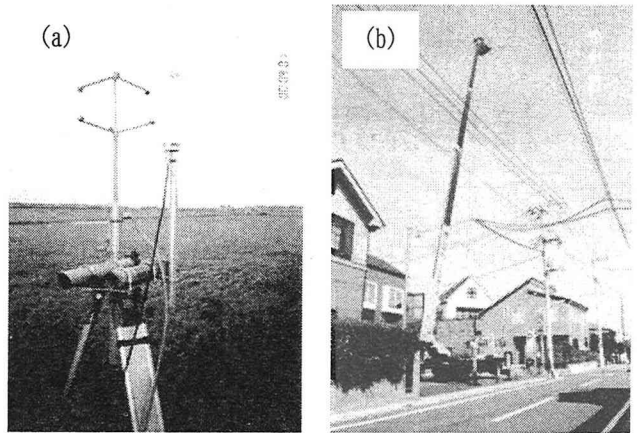


写真-1 観測システムの様子。 (a) 水田, (b) 住宅街。

る住宅街で行った。この住宅街は1km四方に渡って第一種低層住宅専用地域に指定されており、建物のほとんどが2階建ての住居である。平均的な建物高さは8mであった。MacDonald et al.¹¹⁾を参考にして、建蔽率などの形態学的情報からゼロ面変位を推定したところ、7mであった。結果観測は2000年9月19日昼から20日夕刻にかけて行い、北東から南東の風が主流であった。

瞬間的な風速と気温測定には、三次元超音波風速温度計（Metek社、USA-1）を、瞬間的な水蒸気濃度と二酸化炭素濃度の計測には、赤外線式オープンパス濃度計（Li-cor社、LI7500）を用いた。接地境界層における乱流計測は、キャノピー高さの3倍以上で行うことが望ましいとされているため（例えばRoth⁹⁾），水田では三脚を用いて地上3mで、住宅街では高所作業車（株）シンエイ、SK240）を用いて地上25mで測定を行った。高所作業車のバケットによる影響を避けるため、バケットから風上方向に1.5mほどブームを延ばして、その先に機器を設置した。2つの測定器は同高度で40cmほど離して隣接させた。計測システムは風向に合わせて回転させ、測定器どうしの干渉が最小限になるようにした。水田・住宅街それぞれの測定システムの外観を写真-1に示す。

データは8Hzでデータロガー（Campbell, CR10X）に一時収録しノートPCに保存した。エイリアジング除去のため、4Hzのカットオフ周波数をもつローパスフィルターを使用した。測定データは30分毎に統計処理した。また超音波風速計のバイアス除去のため、McMillen¹²⁾の方法を用いて傾度補正を行った。測定期間中、30分runのデータは水田で61セット、住宅街で54セット取得された。本論では輸送効率の比を中心に議論するため、上記のうち、鉛直方向のフラックスが小さく輸送効率が良くないときのデータ（具体的には、相関係数の値が0.15以下）は品質管理のため解析対象外とした。期間中の風速は0.5～5.0ms⁻¹、気温は23～35℃、絶対湿度は10～20gkg⁻¹、二酸化炭素濃度は640～740mgm⁻³、大気安定度は-1.2～+1の範囲であった。

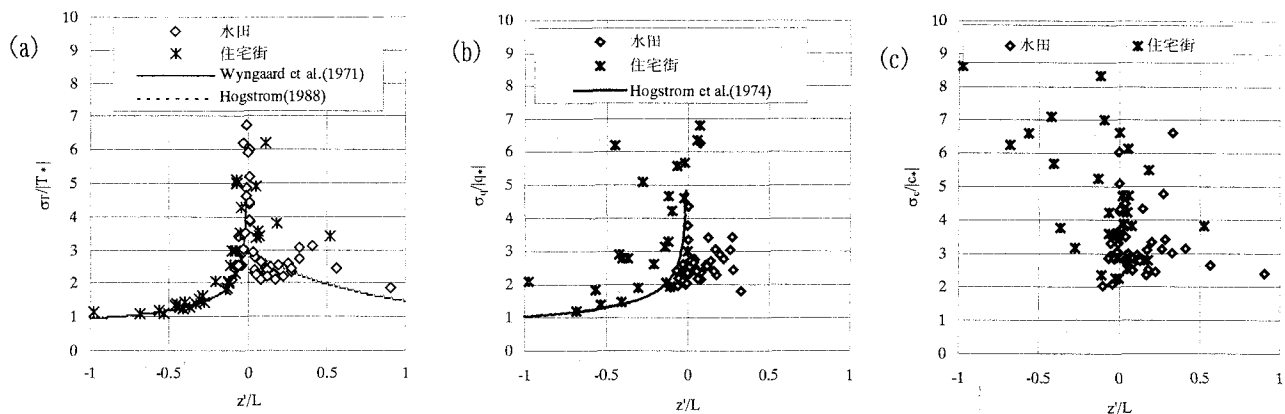


図-1 大気安定度に対する無次元標準偏差 (a)温度, (b)水蒸気, (c)二酸化炭素。

図中で、白丸：水田のデータ，星印：住宅街のデータ，実線：平原での観測による相似関数，

破線：都市の観測による相似関数，をそれぞれ表す。 z : z_s , d (z_s : 測定高度, d : ゼロ面変位)

3. 鉛直輸送効率 (乱流相関係数)

(1) スカラーの無次元標準偏差

図-1に、(a)温度、(b)水蒸気および(c)二酸化炭素濃度の無次元標準偏差と大気安定度の関係を示す。白丸は水田のデータを示し、星印は住宅街のデータを示す。まず(a)温度について議論する。水田では中立 ($z'/L=0$) に近い点を除くと主に2~3の値を示している。住宅街では不安定時、大気安定度とともに無次元温度分散は減少し、 $z'/L=-1.0$ でその値は約1である。図中の実線と波線は平原での観測データに基づいて提案された相似関数であり、本観測で得られたデータは、水田、住宅街に関わらず、これらの相似関数と一致した傾向を示している。温度の無次元標準偏差が一つの相似関数で表現できるという事実は多くの研究が示すところであり、この傾向は住宅街でも同様であることが神田⁸⁾やRoth and Oke⁷⁾によって指摘されている。次に(b)水蒸気について議論する。水田では水蒸気の無次元標準偏差は2~4の値をとり、Ohtaki⁷⁾と同様の結果が得られている。一方住宅街では不安定性が強くなると共に無次元標準偏差は減少し、この傾向は(a)温度と一致している。しかし平原の観測結果から得られた相似関数 (実線) ¹³⁾からは逸脱し大きな値となる傾向がある。晴天日の住宅街では、太陽放射は建物表面、庭木、道路などに一様に照射され、各構成物は全体的に温められ大気に顕熱を供給するが、水蒸気の場合はそのような外力は働かず、庭木や裸地など局所的に点在する発生源がフラックスに寄与する。したがって、フラックスに対する濃度の変動強度は水蒸気の方が大きくなると考えられる。Katul et al.(1995)¹⁴⁾は発生源の空間的非一様性が無次元スカラー標準偏差を大きくすると述べており、住宅街のように、スカラーの発生源が点在するようなキャノピー上の接地境界層では、従来の均質な平原で得られたスカラーの無次元標準偏差の相似関数があてはまらない可能性があるため注意が必要である。

最後に(c)二酸化炭素について議論する。水田のデータをみると、二酸化炭素の無次元分散量は水蒸気に比べてばらつく傾向があり、また水蒸気より若干大きい傾向がある。一方住宅街に注目すると、不安定時、二酸化炭素の無次元標準偏差は水蒸気に比べて値が大きくなる。水蒸気同様、発生源の空間分布の観点から考察を試みる。日中の住宅街における二酸化炭素の発生源は、土壌などの自然条件だけでなく、道路を通る車両や家屋からの発生など人工的な要素も含まれる。また庭の植生は逆に吸収源として作用する。発生源と吸収源が混在する結果、濃度変動に対してフラックスが小さくなり、水蒸気に比べて無次元標準偏差がさらに増大したと考えられる。また水蒸気と異なり、無次元標準偏差に大気安定度依存性は見られず値がばらついた。この観測結果を見る限り、住宅街において二酸化炭素濃度の無次元標準偏差には、モニン-オブコフ相似則が成立しないことが判断できる。

(2) スカラーと運動量の輸送効率比

大気安定度に対する、熱、水蒸気、二酸化炭素と運動量の相対的な鉛直輸送効率 ($|r_{wq}/r_{uw}|$, $|r_{wc}/r_{uw}|$, $|r_{sc}/r_{uw}|$)を図-2に示す。水田におけるデータは、安定時も不安定時も大気安定度とともに増大し、それぞれの輸送効率比は大気安定度に対してほぼ同様の分布を持つ。一方住宅街ではその傾向はスカラー毎に異なっている。

図中の太線は、平原の観測から得られた相似関数であり、また細線は実際の都市における観測データから経験的に求められた相似関数である。住宅街のデータは、水田のデータや平原で得られた既存の相似関数と比べて、スカラー/運動量の輸送効率が小さくなっていることがわかる。この傾向は、Roth and Oke⁷⁾や神田⁸⁾が指摘しているように、都市域ではキャノピー層内の建物による形状抵抗が、運動量の鉛直交換を促進させ、表面摩擦の効果が卓越する平坦な草地に比べて、運動量の輸送効率が向上しているためであると考えられる。この形状抵抗による効果は、運動量の輸送効率により有効に影響を与え

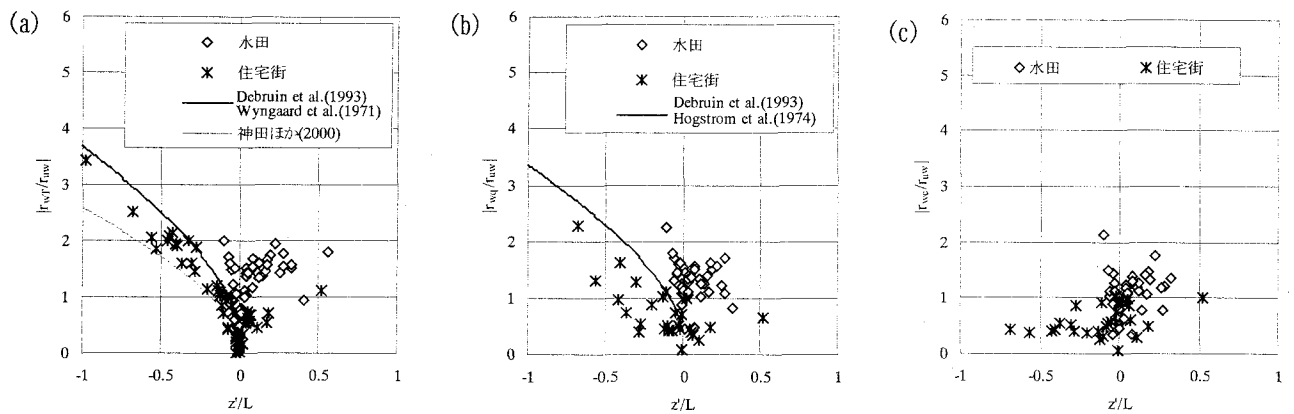


図-2 大気安定度に対する乱流相関係数の比 (a)熱／運動量, (b)水蒸気／運動量, (c)二酸化炭素／運動量. 記号は図-1と同じ.

るため、スカラーの相対的な輸送効率比、住宅街において小さくなったと考えられる。

住宅街で得られた(a)熱／運動量の比は、神田ほか⁸⁾が提案した都市の相似関数に比べて若干大きい、ほぼ同様の傾向を示している。(b)水蒸気／運動量の比も大気安定度に依存しているがばらつきは大きい。(c)二酸化炭素／運動量の比は比較できる事例が他にないが、熱や水蒸気と異なるのは、不安定時 ($z/L < 0$ の時) に、大気安定度に対する依存性が見られず、0.3～1.0の範囲でばらついている。この結果は後章で議論する。

(3) 二酸化炭素と水蒸気の輸送効率比

次に二酸化炭素と水蒸気の相関係数比 ($|r_{wc}/r_{wq}|$) に着目して、スカラーどうしの輸送効率比について調べる。大気安定度に対する $|r_{wc}/r_{wq}|$ を図-3に示す。水田ではデータの多くが0.6～1の間に集中する傾向がある。また住宅街で $|r_{wc}/r_{wq}|$ の値はばらついているが、不安定性が強くなると $|r_{wc}/r_{wq}|$ は1より小さくなる傾向がある。つまり、不安定時は二酸化炭素の輸送効率比が水蒸気の輸送効率比に対して低下することを意味している。このように2つのスカラーの輸送効率比が1と等しくならないという事実は、均一な接地境界層では二酸化炭素や水蒸気が同じメカニズムで輸送されることを仮定しているモニー-オブコフ則に反する。前述したように輸送効率比はそれぞれのスカラーの無次元分散量に帰着できるが、(1)で議論したように、二酸化炭素は水蒸気よりも無次元分散量が大きく輸送効率が悪い。これは主に二酸化炭素の発生源および吸収源に空間的なむらがあり、水蒸気に比べて非一様性が大きいからであると考えられる。Roth and Oke⁷⁾によっても、都市の接地境界層で水蒸気／熱の輸送効率比が1とならないことが指摘されている。都市境界層では水蒸気フラックスの見積もりにモニー-オブコフ則の従来の相似関数をそのまま適用するには注意が必要である。特に二酸化炭素の場合は相似則自体が成り立たない可能性がある。

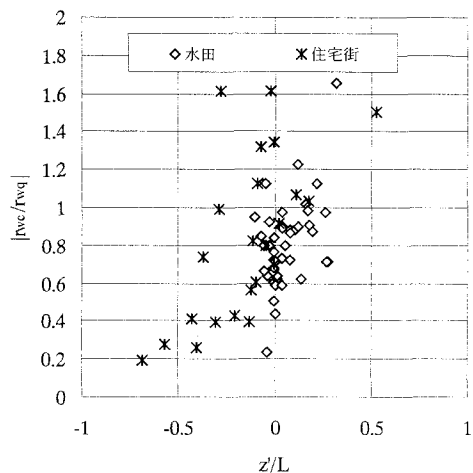


図-3 大気安定度に対する二酸化炭素／水蒸気の輸送効率比. 記号の意味は図-1と同じ.

4. スペクトル解析

前章で二酸化炭素と水蒸気の輸送効率に差異が認められた。この輸送メカニズムの違いをさらに詳細に検討するため、スペクトル解析を行った。解析にはFFT法を用い、周波数とともに平均区間幅が大きくなるように周波数の平滑化¹⁵⁾を行っている。これ以後では、紙面の都合上、二酸化炭素と水蒸気の輸送効率比 $|r_{wc}/r_{wq}|$ が1より小さい値を示した30分データセットに対するスペクトル解析結果を例に挙げ、そのメカニズムについて考察する。

(1) 二酸化炭素と水蒸気の相関係数スペクトル比

図-4に二酸化炭素と水蒸気の相関係数スペクトルの比 $[S(wc)/\sigma_w\sigma_c]/[S(wq)/\sigma_w\sigma_q]$ を無次元周波数 f に対して示す。前章で述べたように、モニー-オブコフ則では全てのスカラーは同じメカニズムで輸送されると仮定されているため、物質間の輸送効率比を周波数分解しても、すべて1の値となるはずである。30分統計量としての輸送効率比が1の値にならないことは既に述べたが、

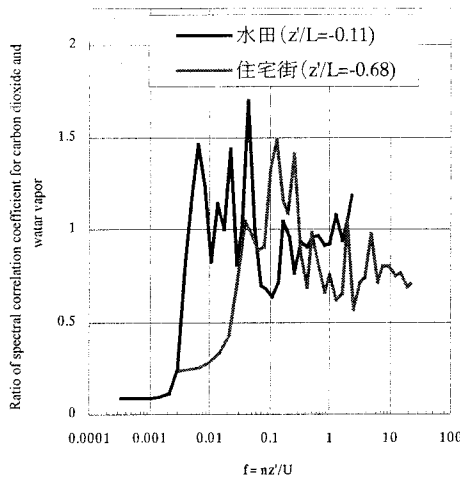


図-4 二酸化炭素と水蒸気の相関係数スペクトルの比

図-4を見る限り、その値は周波数に対しても変化していることがわかる。

この図はある30分区間のデータセットに対して解析を行ったものであるが、図-4中で水田と住宅で共通する点は、①低周波側では値が1より小さくなること、② $f=0.01\sim 1$ の範囲で周波数によって値が大きくばらつくこと、③高周波側で値が1に近づく傾向があること、である。これらの現象に対する議論やその有意性については次節で述べる。上記のうち、水田、住宅街ともに高周波域 ($f > 1$) で相関比が1の値に近づく傾向は、慣性小領域で乱流量のあらゆる相関がなくなる事から予想される結果と合致する。

(2) 二酸化炭素と水蒸気の変動と輸送特性

以上の特徴を検討するために、二酸化炭素と水蒸気の相関係数スペクトル $S(wc)/\sigma_w\sigma_c$, $S(wq)/\sigma_w\sigma_q$ をそれぞれ図-5に示した。(a)が水田、(b)が住宅街の結果である。(a)水田の結果を見ると、二酸化炭素と水蒸気はほぼ同様の傾向を示し、 $f < 0.004$ の範囲を除いて、相似性は良好であると言える。 $f < 0.004$ の範囲では二酸化炭素に比べて水蒸気が相対的に大きな値を示している。第3章で議論した、水蒸気に対する二酸化炭素の輸送効率比が小さくなる傾向は、この低周波域の差異が原因になっていると考えられる。低周波域の差異は長周期トレンドの処理方法に影響されるため注意が必要であるが、本観測の範囲内では、輸送効率比 $|r_{wc}/r_{wq}|$ が小さくなる場合は、概ね低周波域 ($f=0.001\sim 0.004$) で水蒸気が二酸化炭素を卓越する事例が多く見られた。

つぎに $f=0.01\sim 1$ の範囲に着目すると、両者の大小は周波数帯によって逆転しているが、観測期間中に得られた他の時間帯のデータと比較したところ、ある特定の傾向を見いだすことはできなかった。

つぎに (b) 住宅街の結果について検討する。住宅街

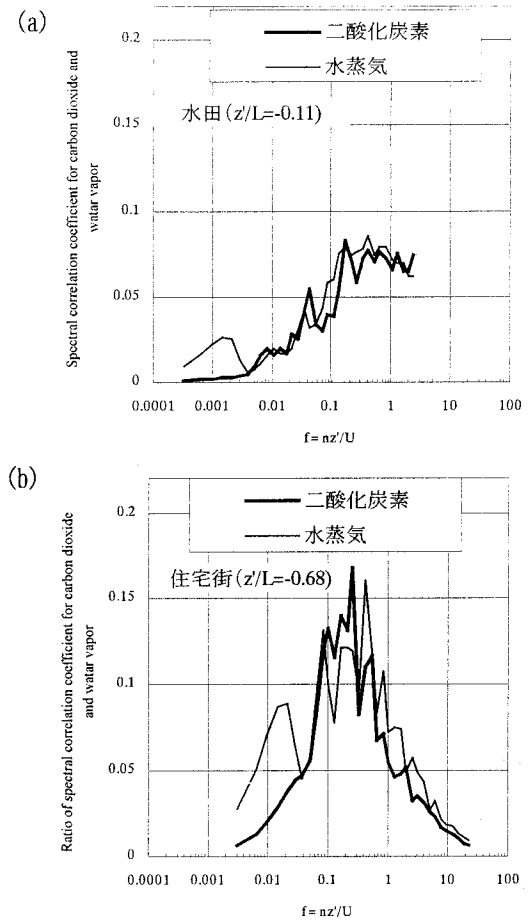


図-5 水蒸気と二酸化炭素の鉛直輸送効率スペクトル
(a) 水田 (b) 住宅街。

ではスペクトルのピークは $f=0.1\sim 0.8$ に存在する。水田に比べてピークが鋭く、ある固有の周波数をもつ渦がフラックスに寄与していることが予想される。住宅街で考えられる固有の渦として、個別の建物の後流による影響が第一に挙げられる。建物を直径10mの円柱と仮定したカルマン渦に相当する無次元周波数を求めたところ $f=0.34$ であり、本観測で得られたピーク周波数とオーダーが一致する。建物によって誘起された渦がスカラーフラックスに寄与している可能性が指摘できる。 $f=0.1\sim 0.3$ 付近の周波数帯では、データセットによって二酸化炭素が大きいケースと水蒸気が大きいケースと大きく2分される。建物起因の渦に関連して、二酸化炭素または水蒸気を選択的に輸送されるメカニズムが存在することが予想されるが、現在のところその特徴は抽出できていない。低周波域では、水田と同様に水蒸気の寄与度が二酸化炭素に比べて大きくなっており、輸送効率比 $|r_{wc}/r_{wq}|$ を1より小さくする原因となっている。他の多くのケースでも同様の傾向が確認できた。

5. 結論

水田および住宅街の接地境界層における乱流観測によって、以下の主要な結論を得た。

1) 熱・水蒸気の無次元分散には大気安定度への依存性が見られ、従来の相似関数と同様の傾向が見られたが、二酸化炭素にはこのような傾向が見られない。

2) 住宅街では、スカラーの運動量に対する輸送効率は平原で得られた相似関数と比べて小さい傾向にあり、これは建物の存在によって運動量が効率的に輸送されるためであると考えられる。

3) 水蒸気と二酸化炭素ではその輸送効率に差があり、特に住宅街においてその傾向が顕著である。両者の差は発生源の空間非一様性や長周期変動の差異に原因があると思われる。

今後より広い範囲の風速・風向・安定度における観測データを蓄積し、スカラーの乱流輸送特性についてさらに詳しく検討していく予定である。

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）による財政的援助を受けました。宇佐見昭二氏には水田での観測場所を提供していただきました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) Wyngaard, J.C., Cote, O.R. and Izumi, Y. : The budgets of turbulent kinetic energy and temperature variance in the atmospheric surface layer, *J. Atmos. Sci.*, Vol.28, pp.190-201, 1971.
- 2) Panofsky, H.A., Tennekes, H., Lenschow, D.H. and Wyngaard J.C.: The characteristics of turbulent velocity components in the surface layer under unstable conditions, *Boundary-Layer Meteor.*, Vol.11, pp.355-361, 1977.
- 3) De Bruin, H.A.R., Kohsiek, W. and Van Den Hurk, J.J.M. : A verification of some methods to determine the fluxes of momentum, sensible heat, and water vapor using standard

deviation and structure parameter of scalar meteorological quantities, *Boundary-Layer Meteor.*, Vol. 63, pp.231-257, 1993.

- 4) Kaimal, J.C., Wyngaard, J.C., Izumi, Y. and Cote, O.R. : Spectral characteristics of surface-layer turbulence, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol.98, pp.563-589, 1972.
- 5) Ohtaki, E. : On the similarity in atmospheric fluctuation of carbon dioxide, water vapor and temperature over vegetated fields, *Boundary-Layer Meteor.*, Vol. 32, pp.25-37, 1985.
- 6) Monji, N., Okuda, J. and Hamotani, K. : Comparison of eddy heat fluxes between inside and above a coniferous forest, *J Agric. Meteor.*, Vol. 50, pp.23-31, 1994.
- 7) Roth, M. and Oke, T.R. : Turbulent transfer relationships over an urban surface. 1: Spectral characteristics, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol.119, pp.1071-1104, 1993.
- 8) 神田学, 森脇亮, 鈴木謙, Roth, M., Oke, T.R. : 都市の接地境界層における乱流相似関数について, *天気*, Vol. 47, pp.493-501, 2000.
- 9) Roth, M., 2000 : Review of atmospheric turbulence over cities, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol.126, pp.941-990, 2000.
- 10) De Bruin, H.A.R. and Verhoef, A. : A new method to determine the zero-plane displacement, *Boundary-Layer Meteor.*, Vol.82, pp.159-164, 1997.
- 11) Macdonald, R.W., Griffiths, R.F. and Hall, D.J. : An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays, *Atmos. Environ.*, Vol.32, pp.1857-1864, 1998.
- 12) McMillen, R.T. : An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain, *Boundary-Layer Meteor.*, Vol.43, pp.231-245, 1988.
- 13) Hogstrom, U. and Smedman-Hogstrom, A.-S. : Turbulence mechanisms at an agricultural site, *Boundary-Layer Meteor.*, Vol.7, pp.373-389, 1974.
- 14) Katul, G., Goltz, S.M., Hsieh, C. Cheng, Y. Mowry, F. and Sigmon J. : Estimation of surface heat and momentum fluxes using the flux-variance method above uniform and non-uniform terrain, *Boundary-Layer Meteor.*, Vol.74, pp.237-260, 1995.
- 15) カイマルJ.C. : 微細気象学, 技報堂出版, pp.93, 1993.

(2000. 10. 2受付)