

都市接地境界層における熱・水蒸気・二酸化炭素の乱流輸送について

東京工業大学 正会員 森脇 亮
東京工業大学 正会員 神田 学
東京工業大学 学生会員 渡辺 倫樹

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。都市における接地境界層では、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がされており (Roth and Oke(1993))、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。本研究では、住宅街の接地境界層内で、乱流、気温、水蒸気密度、二酸化炭素濃度を同時計測し、スカラーの乱流輸送の特性を議論する。

2. 現地観測

観測は東京都大田区久が原の住宅街で2000年9月19日昼から20日夕刻にかけて行った。この住宅街は1km四方に渡ってほとんどが2階建ての建物であり、平均的な建物高さは8mであった。MacDonald et al. 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。風速と気温の測定には、三次元超音波風速温度計 (Metek社, USA-1) を、水蒸気と二酸化炭素濃度の計測には、オープンパスアナライザー (Li-cor社, LI7500) を用いた。高所作業車 (株) シンエイ, SK240) を用いて地上25mの高さに機器を設置した (写真-1)。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。測定データは30分毎に統計処理し、バイアス除去のためMcMillenの傾度補正、フラックスの算定にはWebbの補正を行った。

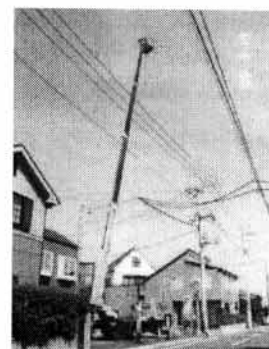


写真-1 観測の様子。

3. スカラーの無次元標準偏差

図-1に、(a)温度、(b)水蒸気、(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。(a)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。図中の実線や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、これらの相似関数と一致した傾向を示している。この傾向は他の住宅街でも同様であることが神田やRoth and Okeによって指摘されている。(b)水蒸気の無次元標準偏差は、温度と同様に不安定性が強くなると減少するが、平原で得られた相似関数 (実線) と比べて大きくなる傾向がある。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、無次元標準偏差 (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。(c)二酸化炭素の無次元標準偏差は、不安定時水蒸気に比べて値が大きくなる。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。水蒸気に比べ発生源の空間的非一様性がさらに大きくなるため、無次元標準偏差が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、モニニーオブコフ相似則が成立しないことが判断できる。

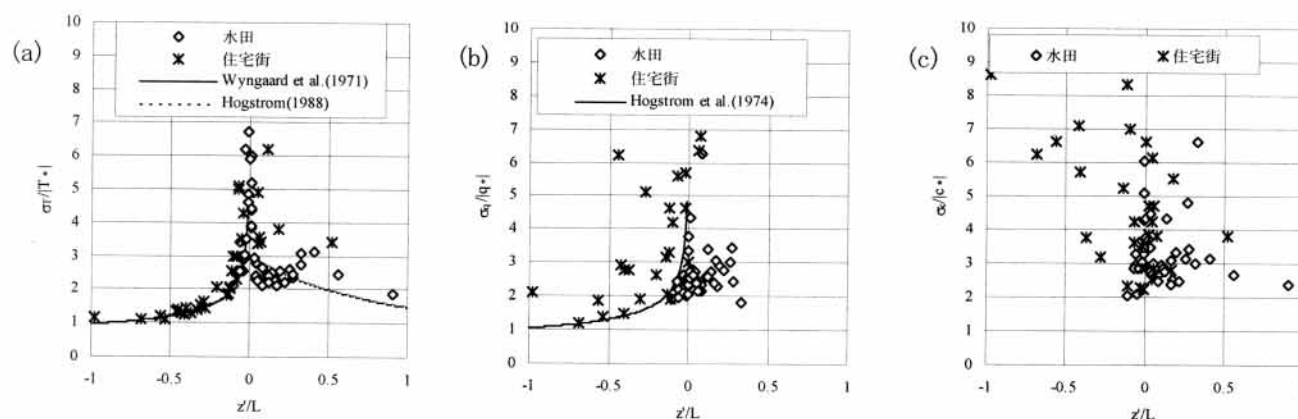


図-1 大気安定度に対する無次元標準偏差 (a) 温度、(b) 水蒸気、(c) 二酸化炭素。

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)

キーワード：乱流輸送、接地境界層、都市、熱、水蒸気、二酸化炭素

連絡先：〒158-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1 TEL 03-5734-2597 FAX 03-5734-3577

4. 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 ($|r_w/r_q|$) 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 $|r_w/r_q|$ を図-2に示す。不安定性が強くなると $|r_w/r_q|$ 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の水蒸気の輸送効率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タリングに反する。

5. スペクトルとウェーブレット解析

この輸送メカニズムの違いについてさらに詳しく調べるために、二酸化炭素と水蒸気の輸送効率比 $|r_w/r_q|$ が1より小さい値を示した30分データセットに対する解析結果を例に挙げ、スペクトル解析とウェーブレット解析を行った。マザーウェーブレットには二次のガウシアン関数を選んだ。

二酸化炭素と水蒸気の相関係数スペクトルを図-3に示した。 $f < 0.03$ 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。それ以上の周波数帯では、水蒸気と二酸化炭素のスペクトル強度に系統的な差は見られず大小が逆転している。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、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 $|r_w/r_q|$ が小さくなる場合は、概ね低周波域 ($f = 0.01 \sim 0.03$) で水蒸気が二酸化炭素を卓越する事例が多く見られた。スペクトルピークは $f = 0.1 \sim 0.8$ に鋭く存在する。この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多いケースと大きく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が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。

図-4に、(a)水蒸気と(b)二酸化炭素の相関係数ウェーブレット係数の白黒コンターを示す。渦のスケールにより、大きく4つの領域に分けられる。(I) $a < 4\text{sec}$ の小さいスケール。(II) $4 < a < 50$ の建物からの剥離渦と推測されるスケール。(III) $50 < a < 200$ 程度の接地層内の組織渦によるスケール。(IV) $200 < a$ の混合層内の熱対流によると思われるスケール。水蒸気と二酸化炭素の輸送にはII～IVの渦が大きく寄与しているがその挙動は同じではない。例えば、IIIのスケールを見ると、水蒸気と二酸化炭素は鉛直輸送が行われている時間が一致していない。またIVのスケールでは、水蒸気が正の輸送であるのに対し二酸化炭素は負の輸送が行われている。このスケールでは各物質の混合層内鉛直濃度分布の差異が乱流輸送に反映されている可能性がある。以上のように、都市の接地境界層では従来のモニタリングの枠組みでは説明しきれない現象が起きている。現在、東京都大田区久が原の住宅街で進行中のタワー観測プロジェクトによって乱流データを蓄積することにより、新たなスケールや相似則の模索を含めて、接地境界層内の乱流輸送のメカニズムを明らかにしていく予定である。

6. 結論

- 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) 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。
- 3) スカラーの輸送は3つの渦スケールに大きく分けられ、それぞれ①建物からの剥離渦、②組織渦、③境界層内の対流によると推測される。それぞれのスケールにおいても、水蒸気と二酸化炭素の輸送は異なる挙動を示していることがわかった。

参考文献

- 1) Roth, M. and Oke, T.R.: Turbulent transfer relationships over an urban surface. 1: Spectral characteristics, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 119, 1071-1104, 1993.
- 2) 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*, 47, 493-501, 2000.

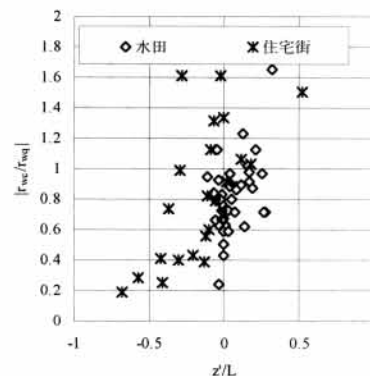


図-2 大気安定度に対する二酸化炭素／水蒸気の輸送効率比。

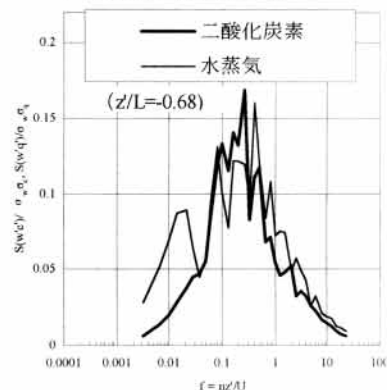


図-3 水蒸気と二酸化炭素の相関係数スペクトル

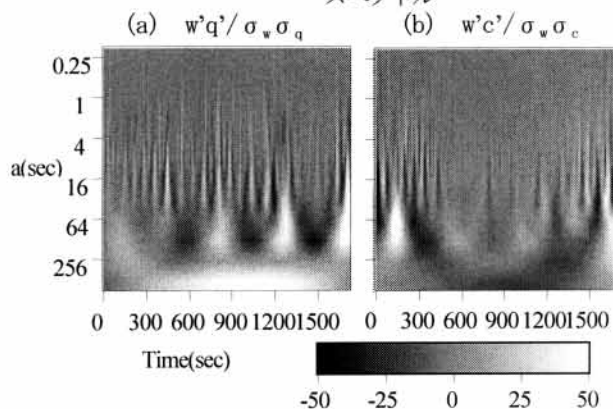


図-4 (a)水蒸気と(b)二酸化炭素の相関係数ウェーブレット
a: マザーウェーブレットのスケール