

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

EXISTENCE OF CONSTANT-FLUX LAYER ABOVE THE URBAN AREA

渡邊倫樹¹・森脇 亮²・神田 学³・松永和章¹

Tomoki WATANABE, Ryo MORIWAKI, Manabu KANDA and Kazuaki MATSUNAGA

¹学生会員 東京工業大学 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 東京工業大学助手 理工学研究科土木工学専攻 (同上)

³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 (同上)

Using the data of the continuous field observation at residential site in Tokyo from March 2001, following results are obtained; 1) The existence of constant-flux layers for momentum, sensible-heat and latent-heat flux above the urban area are confirmed. 2) The probabilities of constant-flux layer achievement (C.F.-rate) are 32.5%, 51.1%, 43.9% and 17.0%, for momentum, sensible-heat, latent-heat and carbon dioxide flux, respectively. The C.F.-rate for all fluxes simultaneously is only 0.9%. 3) In this observation site, the C.F.-rate is less affected by the wind direction but slightly related to the atmospheric stability. 4) When a large-scale turbulence or front passes through a sensor, the sensible-heat flux ratio of 29m to 21m is diverted from 1.

Key Words : Constant flux layer, C.F.-rate, flux ratio, Urban, Field measurement

1. 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、裸地・森林・海上といったフィールドで大気乱流による地表面-大気間のエネルギー・熱・水・物質輸送過程に関する観測・研究が数多く行われてきた。しかしながら我々の生活拠点である都市域における観測例は少なく、未解明な部分が多々ある。

地表面-大気間における各物理量の輸送過程の解明には地表の影響を強く受ける接地境界層内、厳密に言えばその中のコンスタント・フラックス層 (Constant Flux Layer 以下、C.F.層) 内での観測が必要である。都市域における乱流観測データが著しく不足しているのは、このC.F.層内での観測が非常に困難であることに起因している。

都市境界層の概念図を図-1に示した。最下層には地表面の影響を直接的に受けるキャノピー層 (Canopy Layer) があり、理想的にはその上に遷移層 (Roughness Sub-Layer) を経てC.F.層が存在し、続いて対流混合層 (Convective Mixed Layer) が存在する。キャノピー層内

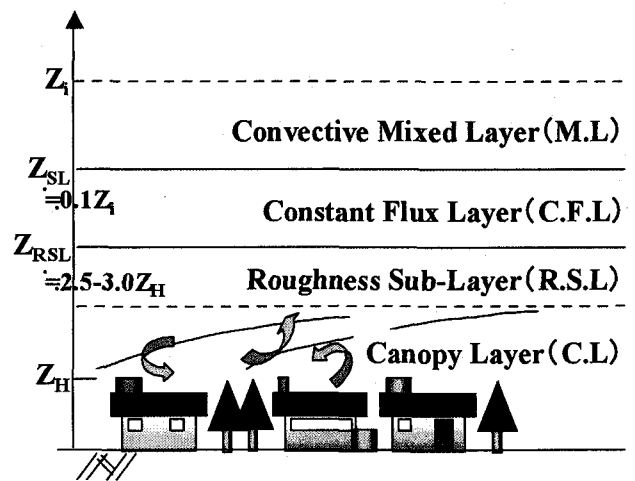


図-1 都市境界層概念図

の乱流は3次的に複雑な挙動を示すが、C.F.層内の乱流は、統計的には鉛直1次的なものであると言われている。

C.F.層となっている下限高度は建物高さの少なくとも2.5~3.0倍程度以上とされており (Roth (2000)¹⁾)、建物の平均高さが10mの住宅地でC.F.層内での乱流観測を行うには25~30mの高度に計測測器を設置しなければならない。また、C.F.層の上限高度は対流混合層の10%であ

る。更にこれとは別にC.F.層の厚さはフェッチ（風上距離）の1/10～1/100のオーダーとされているため、10m以上の層が発達するには1km程度以上のフェッチ（風上距離）が必要とされる。このように広範囲に渡って均一な建物高さと配列が維持されている都市は殆ど見当たらない。これらの制約条件が都市域における観測を困難なものにしている。

更に、都市域における観測データを元にした研究の中でもC.F.層の存在の有無、及びその存在高度等についての具体的な記述が見当たらず、都市上空にはC.F.層が存在し得ない可能性も示唆されている（Rotach（1999）²⁾）。

近年、ヒートアイランド現象や光化学スモッグといった都市大気環境問題に大きな関心が集まる中、都市における熱・物質等の乱流輸送過程の解明は急務である。それらの乱流輸送過程に一般性を持たせるためにはC.F.層内での観測が必要であり、C.F.層の存在確認は全ての基礎となるものである。

我々は2001年3月より東京都久が原の住宅街で継続的な乱流観測を行っている。本稿ではこれまで蓄積されたデータをもとに、都市域におけるC.F.層の存在の確認とその成立条件に対する一考察を述べたいと思う。

2. 観測概要およびフラックス算出方法

2001年3月より東京都大田区久が原の住宅街に観測用のタワーを設置し継続的な観測を行っている。タワー周辺の住宅街は1km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。現地測量の結果、平均的な建物高さは7.3mであり、建蔽率など地表面幾何パラメーターを用いるMacdonald et al.(1998)³⁾の形態学的手法に習い算出した粗度及びゼロ面変位はそれぞれ0.59m、5.3mであった。

タワーはトラス式構造の自立型タワーであり、充実率は0.27である。タワー幅の1.5倍に延ばしたアームの先に高度29.0mと21.0mに瞬間的な風速（3成分）と気温を計測する三次元超音波風速温度計（Metek社；USA-1）と瞬間的な二酸化炭素濃度及び水蒸気濃度を計測する赤外線式オープンパス濃度計（Li-cor社；LI-7500）をそれぞれ設置している（写真-1）。

データは8Hzでデータロガー（Campbell；CR10X）に一次収録した後ノートPCに保存している。

測定データは1時間毎に統計処理を行っている。データ品質管理のため1時間中のデータ合計28800個（3600秒×8Hz）のうち欠損、あるいはエラーデータが1つでも含まれていた場合、その1時間データセットは解析対象データから除外した。測器はアームに固定されており主流風速方向に適宜方向を変えることが出来ないため、主

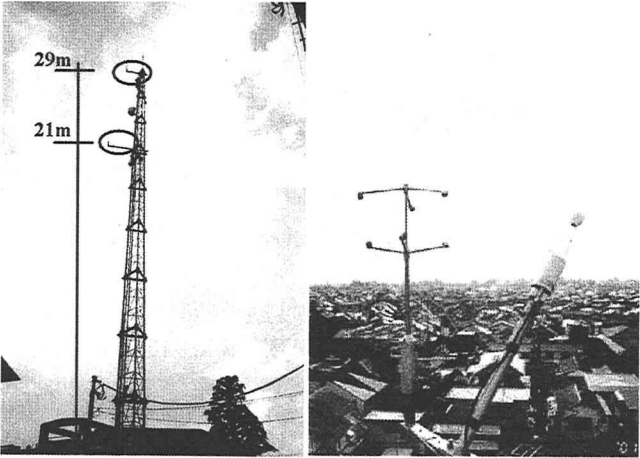


写真-1 観測タワーと観測測器（奥:USA-1 手前:LI-7500）

表-1 各フラックスの解析下限値

	解析対象下限値
運動量フラックス	0.05[(m/s) ²]
顕熱フラックス	30[W/m ²]
潜熱フラックス	50[W/m ²]
二酸化炭素フラックス	0.2[mg/m ² /s]

流風速の算出はMcMillen(1988)⁴⁾の傾度補正方法を用いている。各フラックスは渦相関法を用いて算出しており、二酸化炭素・潜熱フラックスはWebb et al.(1980)⁵⁾の密度変動補正を加えている。

顕熱・潜熱・二酸化炭素フラックスの鉛直方向の収支を考える際、測定2高度間の空気に貯留される「貯留項」を考慮しなければならない。顕熱フラックスを例にとり貯留項の算出方法を以下に示す。

ある1時間の顕熱貯留（貯熱）項（storageH_θ）は、前1時間の2高度平均気温 $\overline{T_{(t-1)}}$ と後ろ1時間の2高度平均気温 $\overline{T_{(t+1)}}$ を用いて算出される気温の時間変化率と、空気の体積熱容量 $c_p\rho$ 、高度差（8m）をかけ合わせて算出される。

$$\begin{aligned} storageH_{(t)} &= c_p\rho \frac{\partial T}{\partial t} \Delta z \\ &= c_p\rho \frac{\overline{T_{(t+1)}} - \overline{T_{(t-1)}}}{7200} \times 8.0 \end{aligned} \tag{1}$$

二酸化炭素フラックス・潜熱フラックスの貯留項も2高度平均二酸化炭素濃度・水蒸気量を用いて同様に算出した。

更に解析では各フラックスに対する下限値（絶対値）を設定し、これ以下の値は解析対象データから除外した（表-1）。これらの値は測器の計測分解能の2倍以上に設定しており、解析に使用されるデータは十分に有意な値と判断できる。

本解析には4/27から7/15の2ヶ月半のデータを使用している。

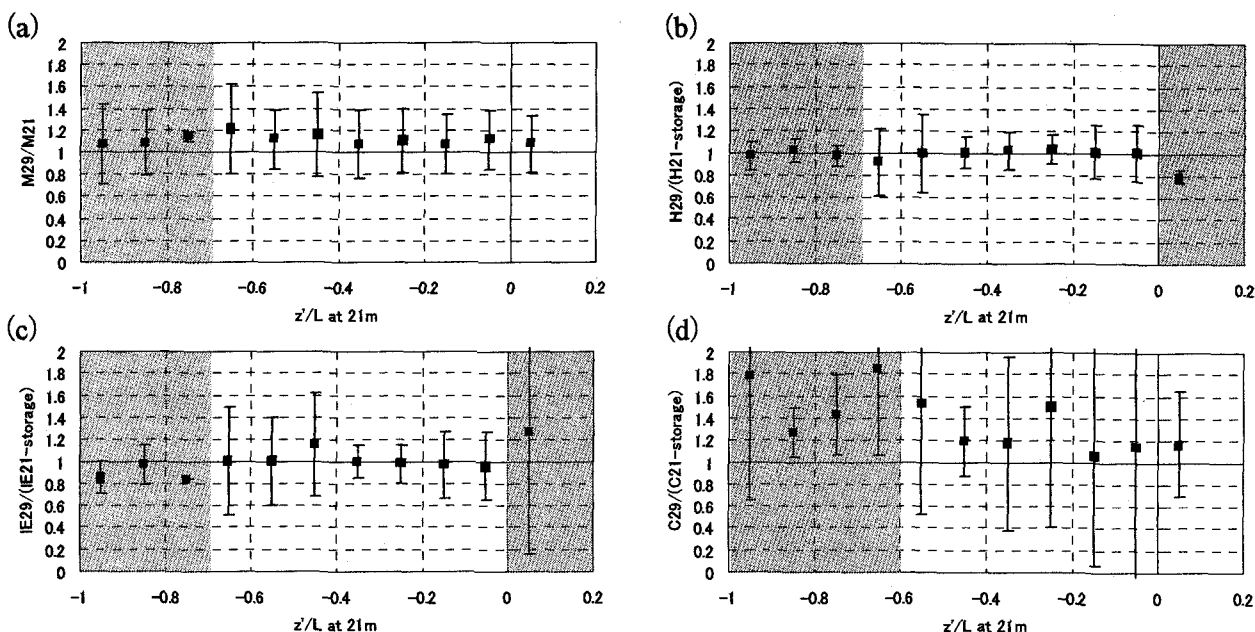


図-2 大気安定度 (z/L) に対する各フラックスの2高度比 (a) 運動量 (b) 顕熱 (c) 潜熱 (d) 二酸化炭素
 図中、プロットは平均値を表し、エラーバーで標準偏差を表している。
 (c), (d) 図中の網かけ部分はデータサンプルが10以下のデータである。

3. コンスタント・フラックス層の存在

(a)運動量フラックス・(b)顕熱フラックス・(c)潜熱フラックス・(d)二酸化炭素フラックスについて、21mで計測されたフラックスから貯留項を引いた値に対する29mで計測されたフラックスの比を大気安定度パラメーター z/L で整理した図が図-2である。 z' は計測高度 z からゼロ面変位 d を引いた値で、本解析では $z=21\text{m}$, $d=5.3\text{m}$ である。データサンプル数に応じて大気安定度の範囲を決め、その範囲内のデータの平均値をプロットし、データの標準偏差をエラーバーで表している。

大局的に見ると運動量・顕熱・潜熱に対する2高度フラックス比が1に近い。二酸化炭素のみ2高度フラックス比の平均値が1から外れ、ばらつきを表す標準偏差が大きいという傾向が見られる。以下にフラックス毎の考察を述べる。

まず(a)の運動量フラックスについて議論する。表-1に記述の通り運動量フラックスの下限值は $0.05(\text{m/s})^2$ に設定されており、風の極端に弱い場のデータは除かれている。2高度フラックス比の平均値は大気安定度によらず1付近にある。また、標準偏差も大気安定度に依存しているようには見えない。このことから運動量フラックスに対するC.F.層は大気の状態によらず存在していると言える。

次に(b)顕熱フラックスについて議論する。顕熱フラックスの下限值設定は 30W/m^2 であり、解析対象のデータ

は殆ど日中のデータである。大気安定度に関わらずフラックスの2高度比の平均値は1に近い値を示す。また標準偏差も非常に小さく、顕熱フラックスに関しては日中、安定度のかなりの範囲においてC.F.層が存在していると言える。

次に(c)の潜熱フラックスについて議論する。フラックス2高度比の平均値は運動量・顕熱フラックス同様、大気安定度によらず1付近にある。しかし顕熱フラックスと比較すると若干データのばらつきが大きく見られ、顕熱フラックスほどC.F.層が存在しているとは言えない。

最後に(d)の二酸化炭素フラックスについて議論する。フラックス2高度比の平均値が他のフラックスに比べ1から外れている。また大気安定度の全般に渡りばらつきが大きく、特に中立付近で非常に大きい。これは二酸化炭素発生・吸収源の空間的不均一性によるものと考察され、二酸化炭素フラックスに対してはこの指標ではC.F.層の存在の確認には至らなかった。

運動量フラックス、顕熱フラックスについてはカンザスの実験で得られた2高度のフラックスの比が大気安定度で整理されC.F.層存在の根拠として用いられているが(Haugen et al.(1971)⁶)、それらの図と比較しても遜色ない結果が得られており、都市上空においてもC.F.層の存在が確認された。潜熱フラックスについても、ばらつきが大きいものの大局的にはC.F.層の存在が確認された。しかし、同じパッシブなスカラー量の二酸化炭素フラックスについてはこの指標からではC.F.層の存在が疑わしいという結果になった。

表-2 各フラックスのコンスタント・フラックス率

	C.F.率(%)	有効サンプル数	C.F.サンプル数
運動量フラックス	32.5	1089	354
顕熱フラックス	51.1	517	264
潜熱フラックス	43.9	346	152
二酸化炭素フラックス	17	435	74
運動量・顕熱フラックス	18.6	468	87
運動量・顕熱・潜熱フラックス	13.4	299	40
全フラックス	0.9	113	1

表中、各フラックスの有効サンプル数は解析下限値条件を満たしたデータ数を、C.F.サンプル数はコンスタント・フラックス条件を満たしたデータ数を表す。

4. コンスタント・フラックス成立条件

(1)コンスタント・フラックス条件の定義

竹内、近藤(1981)⁷⁾を参考に2高度で計測されたフラックスと計測高度間の空気に貯留される貯留項から

$$0.9 \leq F(29m) / (F(21m) - storage) \leq 1.1 \quad (2)$$

の関係が成立しているときを鉛直方向にフラックスが閉じていると見なし「コンスタント・フラックス条件 (C.F.条件) を満たしているデータである」と定義した。ここで、 $F(29m)$ 、 $F(21m)$ はそれぞれ高度29.0m、21.0mで測定されたフラックス、 $storage$ は2高度間の空気に寄与する貯留項を表している。

表-2に各フラックスのコンスタント・フラックス率 (C.F.率) を示す。C.F.率とは解析対象下限値以上の値を持った有効サンプル数に対する、式 (2) のC.F.条件を満たしたC.F.サンプル数の割合である。項目毎に有効サンプル数が異なるが、これは各々のフラックスについて解析下限値設定が異なるためである。

フラックス別に比較すると顕熱フラックスのC.F.率が最も高く、次いで潜熱フラックス、運動量フラックス、二酸化炭素フラックスの順となっている。解析下限値を設定し、データの品質管理を行っているにも関わらず最もC.F.率の高い顕熱フラックスでさえ50%程度しかC.F.条件を満たしていない。なかでも二酸化炭素フラックスのC.F.率が著しく低いが、この原因として考察されるのは前章での指摘同様、発生・吸収源の空間的不均一性によるものと考えられる。

また、表-2には複数のフラックスが同時にC.F.条件を満たす割合も示している。複数のフラックスについて成立するC.F.率は物理量を加えるごとに減少していき、水文過程にとって重要である運動量・顕熱・潜熱フラックスが同時にC.F.条件を満たしている割合は、わずか10%余りである。更に二酸化炭素フラックスを加えた全フラックスに対するC.F.率は1%に過ぎない。このことから全フラックスに対してのC.F.層は、都市境界層では

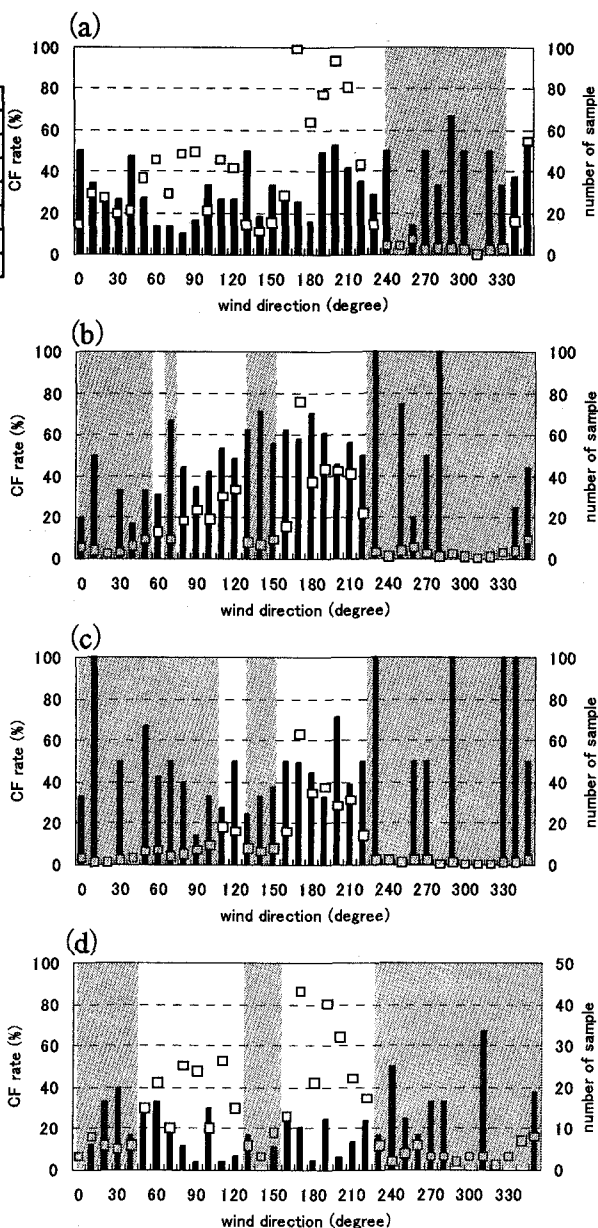


図-3 風向別に整理したコンスタント・フラックス率
0°, 360° が北を、90° が東、180° が南、270° が西を表す。プロットは風向サンプル数を表す。
(a) 運動量フラックス (b) 顕熱フラックス
(c) 潜熱フラックス (d) 二酸化炭素フラックス
網かけ部分はC.F.率の母数となる風向サンプル数が10以下の風向である。

殆ど存在しないということになる。

(2)コンスタント・フラックス条件の抽出

各フラックスのC.F.率を風向別、大気安定度別に整理し、C.F.成立条件を見出そうと試みた。

a) 風向別コンスタント・フラックス率

本研究の観測地である久が原は均一に広がる住宅街であ

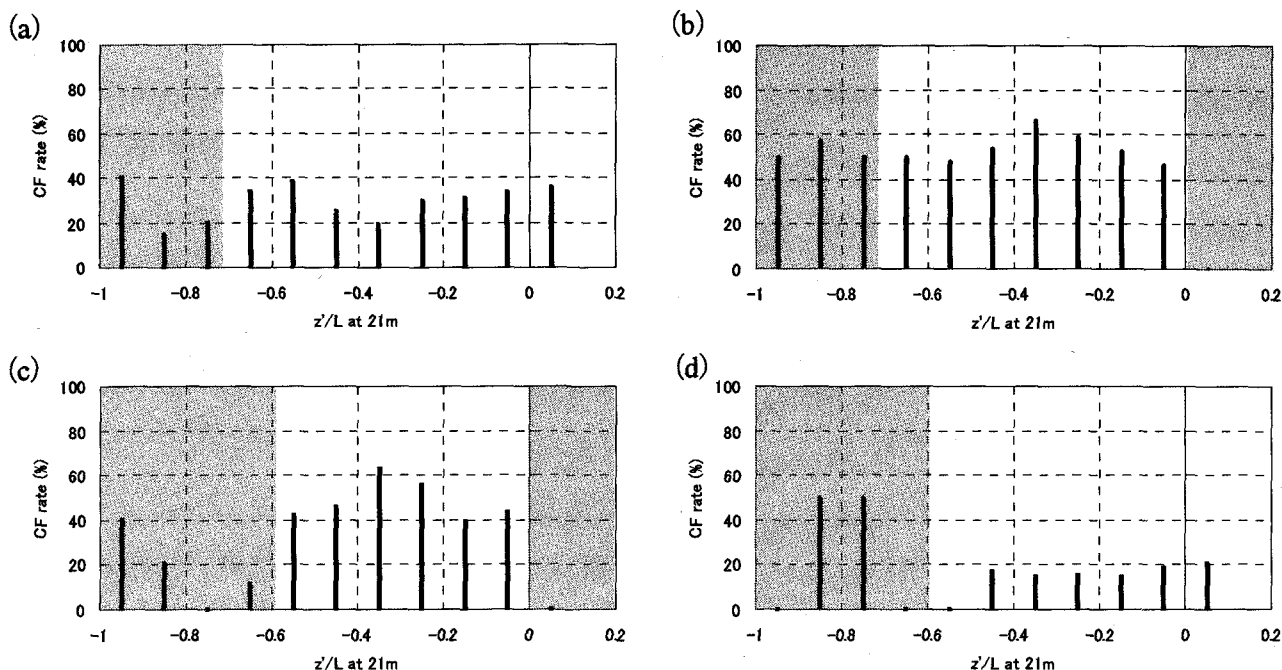


図-4 大気安定度別に整理したコンスタント・フラックス率 (a) 運動量フラックス (b) 顕熱フラックス (c) 潜熱フラックス (d) 二酸化炭素フラックス 図中の網かけ部分はデータサンプルが10以下のデータである。

るが、区画によって多少建蔽率や緑被率などの地表面パラメーターに違いが生じている。その違いが各フラックスのC.F.率に影響を及ぼしていないかを判断するため風向別のC.F.率を調べた。図-3に各フラックスの風向別に整理したC.F.率と風向サンプル数を示す。網かけの部分は風向サンプル数が10以下である風向である。図より、大局的に見ると全フラックスに共通する風向依存性は見られず、フラックス値に影響を及ぼすと考えられている風上側の地表面領域（ソースエリア）の違いがC.F.率に大きく寄与することは無いと結論づけた。

b) 大気安定度(z'/L)別コンスタント・フラックス率

次に大気安定度を表すパラメーター z'/L で各フラックスのC.F.率を整理した(図-4)。対応する大気安定度は図-2と同値である。

(a)の運動量フラックスは大気安定度が中立付近ではC.F.率が若干高く、不安定になるに従って減少していき安定度-0.4付近で最小となる。更に不安定になると一転してC.F.率は増加する傾向が見られる。

(b)の顕熱フラックスについては大気安定度が中立から-0.4になるに従ってC.F.率が高くなり、更に不安定側ではC.F.率が減少する。

(c)の潜熱フラックスに関しても顕熱フラックスと同様に大気安定度が中立から安定度-0.4になるに従ってC.F.率が高くなり、-0.4を境に減少に転じる。これら顕熱・潜熱フラックスの挙動は運動量フラックスの挙動と相反するものであり、興味深い。

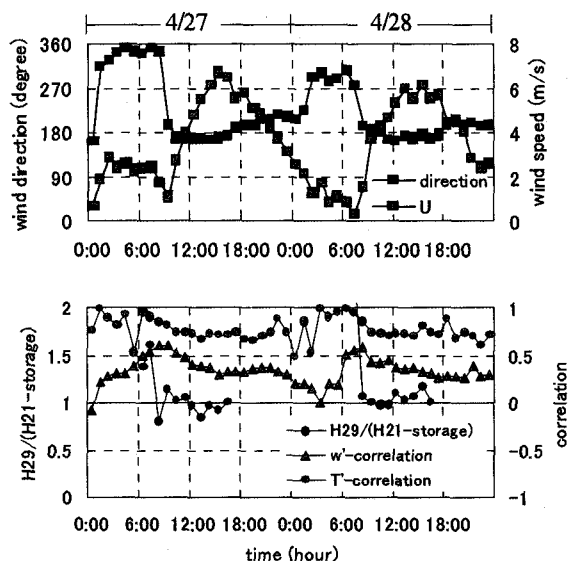


図-5 4/27-28の風向,主流風速,顕熱フラックス比,鉛直風速偏差の2高度相関,気温偏差の2高度相関の時系列データ

(d)の二酸化炭素フラックスに関しては全般にC.F.率が低く、大気安定度別に議論することは困難である。

(3) 2高度フラックス比の時系列比較

前節では風向や大気安定度といった指標を用い統計的にデータ整理を行ったが、本節ではフラックス比の時系列データに着目しフラックス比が1から外れるとき、ど

のようなイベントが起こっているのかを把握しようと試みた。ここでは紙面の都合上、顕熱フラックスのみを取り上げる。

図-5に特徴的な挙動が見られた4/27-28の風向、主流風速(U)、顕熱フラックス比($H_{29}/(H_{21}-\text{storage})$)、鉛直風速についての平均値からの瞬間的な偏差(w'_{21}, w'_{29})の2高度相関(w' -correlation)、同じく気温についての平均値からの瞬間的な偏差(T'_{21}, T'_{29})の2高度相関(T' -correlation)の時系列データを示す。顕熱フラックス比が1から逸脱している時間(4/27の6:00から9:00、4/28の7:00)に注目すると、その時間前後で w' -correlationの値が0.5を超えていることが見て取れる。この時間帯の T' -correlationには特徴的な挙動は見られず顕熱フラックス比の変動に寄与しているのは w' -correlationであると言える。 w' の2高度相関が高くなるときに、2高度のフラックス比が等しくならないのは一見逆説的に思える。このことについて次のように考察した。

w' -correlationの値が大きくなる時間帯は対流混合層が急激に発達する朝方や、風向・風速の変化から見て取れるように海風の進入時刻と一致していることが分かった。通常、小さなスケールの渦が空間を占めているとき鉛直方向に8mの距離で設置された2高度の超音波風速計で感知される鉛直風速の相関は小さくなり、逆に観測タワーと比較して大きなスケールの渦構造が空間を占めているときには、2高度で測定された鉛直風速の相関は大きくなると考えられる。

朝方の不安定時や海風進入時にはこのような渦構造が場を優先していると予想され、 w' -correlationの値が大きくなると考えられる。このような状況下ではフラックスは鉛直一次元で閉じておらず、2高度フラックス比が1から逸脱する傾向があるようである。

5. 結論

東京都大田区久が原の住宅街上空で行っている観測をもとに、都市域におけるC.F.層の存在並びに存在条件について以下のような結論を得た。

- 1) フラックスの下限値設定などデータの品質管理を行い整理した結果、運動量・顕熱・潜熱フラックスに対してのC.F.層が都市上空にも存在し得ることが確認された。
- 2) C.F.層の成立確率(C.F.率)は各フラックスによって異なり、運動量・顕熱・潜熱フラックスに関しては30~50%ほどであり、二酸化炭素フラックスに関しては17%程度に過ぎない。また全てのフラックスに対してC.F.条件が満たされている例はわずか1例しか見られなかった。

3) 本観測地において風向別に整理したC.F.率に共通した傾向は見られず、建蔽率や緑被率などの微妙な違いによるC.F.率への影響は大きくないと考えられる。

4) 顕熱フラックスにおいて、2高度のフラックス比が1から逸脱するときには鉛直風速の平均値からの瞬間的な偏差(w')の2高度相関(w' -correlation)が高くなっており、この時間帯は朝方や海風の侵入時刻と一致する。

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。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 白石幸子様)および社会福祉法人お告げのフランシスコ姉妹会聖フランシスコ子供寮(寮長 釘宮禮子様)に多大なるご協力を頂きました。ここにあわせて感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Roth, M.: Review of atmospheric turbulence over cities., *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol.126, pp.941-990, 2000.
- 2) Rotach, M.W.: On the influence of the urban roughness sublayer on turbulence and dispersion., *Atmospheric Environment*, 33, pp.4001-4008, 1999.
- 3) Macdonald, R.W., R.F.Griffiths, and D.J.Hall.: An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays., *Atmos. Environ.*, Vol.32, pp.1857-1864, 1998.
- 4) McMillen, R.T.: An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain., *Boundary-Layer Meteor.*, Vol.43, pp.231-245, 1988
- 5) Webb, E.K., G.I.Pearman, and R.Leuning.: Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer., *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol.106, pp.85-100, 1980
- 6) Haugen, D.A., J.C.Kaimal and E.F.Bradly: An experimental study of Reynolds stress and heat flux in the atmospheric surface layer., *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol.97, pp.563-589, 1971.
- 7) 竹内清秀, 近藤純正: 大気科学講座1, pp.5-7, 東京大学出版会, 1981.

(2001.10.1受付)