

# 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<sup>1</sup>・森脇 亮<sup>2</sup>・神田 学<sup>3</sup>・松永和章<sup>1</sup>

Tomoki WATANABE, Ryo MORIWAKI, Manabu KANDA and Kazuaki MATSUNAGA

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>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 )

<sup>3</sup>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%, 49.5%, 36.3% and 16.1%, 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 and 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年のアメリカ・カンザス州での大規模野外観測を皮切りに、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世界的に見ても数例ほどしか見当たらない。

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

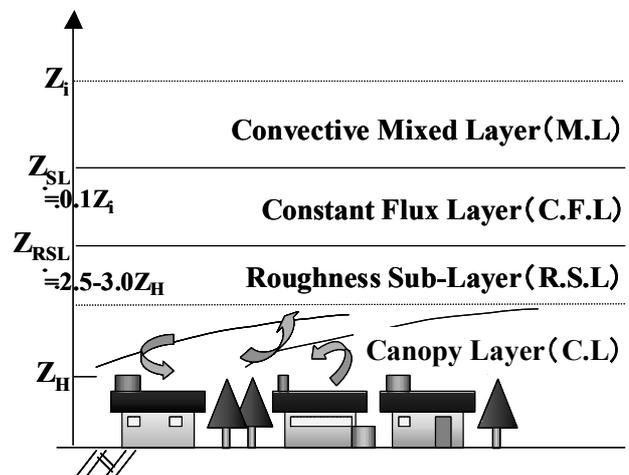


図-1 都市境界層概念図

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)<sup>1)</sup>)、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や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)<sup>2)</sup>）。

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を用いる Macdonald *et al.*(1998)<sup>3)</sup>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) <sup>2</sup> )
顕熱フラックス	30 (W/m <sup>2</sup> )
二酸化炭素フラックス	0.2 (mg/m <sup>2</sup> /s)
潜熱フラックス	50 (W/m <sup>2</sup> )

流風速の算出はMcMillen(1988)<sup>4)</sup>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)<sup>5)</sup>の密度変動補正を加えている。

また顕熱・二酸化炭素・潜熱フラックスに関しては2高度間の空気に寄与する非定常項を加味している。顕熱フラックスを例にとり非定常項の算出方法を以下に示す。

ある1時間の顕熱非定常成分 (*unsteadyH<sub>θ</sub>*) 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  $c_p$ 、密度  $\rho$ 、高度差（8m）をかけ合わせて算出される。

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

二酸化炭素フラックス・潜熱フラックスの非定常成分も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。

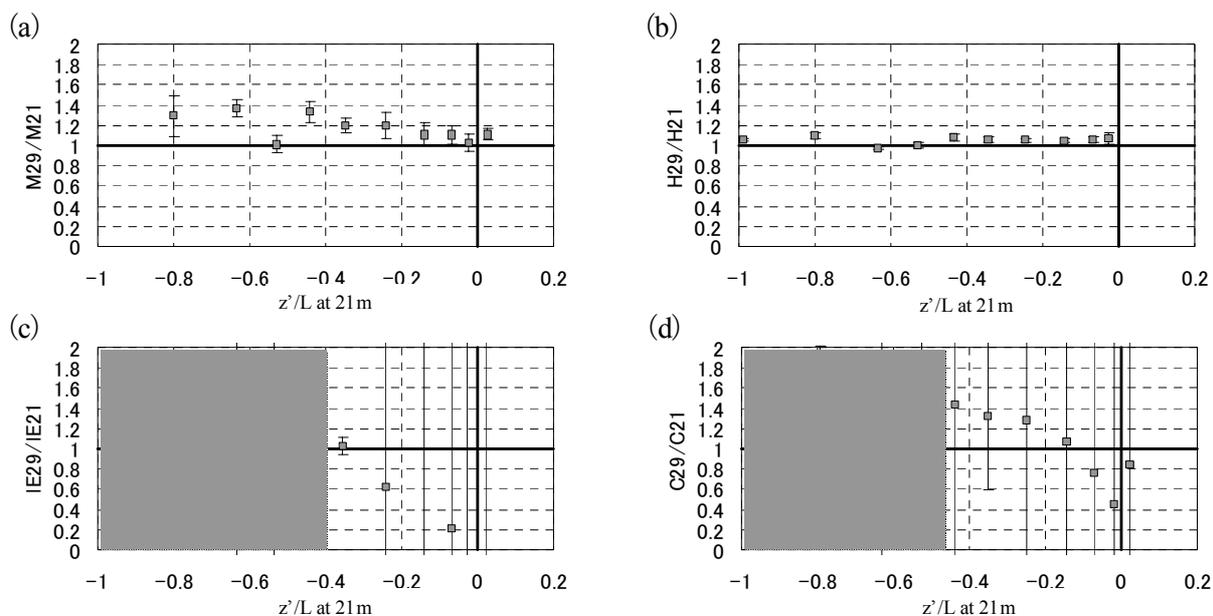


図-2 大気安定度 ( $z'/L$ ) に対する各フラックスの2高度比 (a) 運動量 (b) 顕熱 (c) 潜熱 (d) 二酸化炭素  
 図中、プロットは平均値を表し、エラーバーで標準偏差を表している。  
 (c), (d) 図中の網かけ部分はデータサンプルが10以下のデータである。

### 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)二酸化炭素フラックス・(d)潜熱フラックスについて、21m及び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 $z'/L$ 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・顕熱に対する2高度フラックス比が1に近く、これは乱流輸送がシアーによる強制対流と浮力による自由対流によって行われることに起因していると言えそうである。また潜熱・二酸化炭素はパッシブなスカラー量であり、空間的不均一性の影響も考慮され2高度フラックスは1から外れているように見られる。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。前章に記述の通り運動量フラックスの下限値は $0.05(\text{m/s}^2)$ 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。大気安定度が中立付近(0付近)では平均値が1に近くばらつきを表す標準偏差も小さい。大気の状態が不安定になるに連れて(-1に向かうに連れて)フラックスの比は1から増加する方向に外れて行くという大気安定度に対する依存性が見られる。このことから、一般的に大気安定度が中立付近では運動量フラックスに対するC.F.層が存在していることが多く、大気の状態が不安定にな

るに従って29mの運動量フラックスが21mの運動量フラックスに比べて大きくなり、C.F.層の存在確率が低くなるということが言える。

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値設定は $30(\text{W/m}^2)$ 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。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高度比の平均値に注目すると中立付近では1を下回っているが、大気が不安定になるに従って増加するといった大気安定度依存性が見られる。ばらつきを表す標準偏差は中立付近で非常に大きな値を示すが、これは朝夕方の非定常性の強いデータを含んでいる結果と考えられる。この指標からだけでは潜熱フラックスに対するC.F.層の存在は確認されにくい。

最後に(d)の二酸化炭素フラックスについて議論する。二酸化炭素フラックスも潜熱フラックス同様、フラックス2高度比の平均値が中立付近では1を下回っているが、大気が不安定になるに従って増加する傾向を示す。また大気安定度の全般に渡りばらつきが非常に大きい。これは二酸化炭素発生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もこの指標ではC.F.層の存在の確認には至らない。

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データをまとめた図がHougen *et al.*(1971)<sup>6)</sup>によって発表されているが、それらの図と比較しても遜色

表-2 各フラックスのコンスタント・フラックス率

	有効サンプル数	C.F.サンプル数	C.F.率(%)
運動量フラックス	1020	331	32.5
顕熱フラックス	491	243	49.5
潜熱フラックス	427	155	36.3
二酸化炭素フラックス	615	99	16.1
運動量・顕熱フラックス	436	73	16.7
運動量・顕熱・潜熱フラックス	295	32	10.8
全フラックス	115	1	0.9

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。

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。二酸化炭素フラックス、潜熱フラックスについてはこの指標からではC.F.層の存在自体が疑わしいという結果になった。

#### 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)<sup>7)</sup>の定義に従い2高度で計測されたフラックスの比をとり、その値が0.9から1.1の範囲内に収まっているデータを「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。

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

ここで、 $F(29m)$ は高度29.0mで測定されたフラックス、 $F(21m)$ は高度21.0mで測定されたフラックスを表している。

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.率とは有効サンプル数に対する上記の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。また前章の図-2でC.F.層の存在が疑わしかった潜熱フラックスのC.F.率が顕熱フラックスに次いで高いという意外な結果が得られた。このことはある条件のもとでは潜熱フラックスに対するC.F.層も存在し得るということを示唆している。二酸化炭素フラックスに関しては前章での指摘同様、発生源の空間的不均一性により低いC.F.率となった。

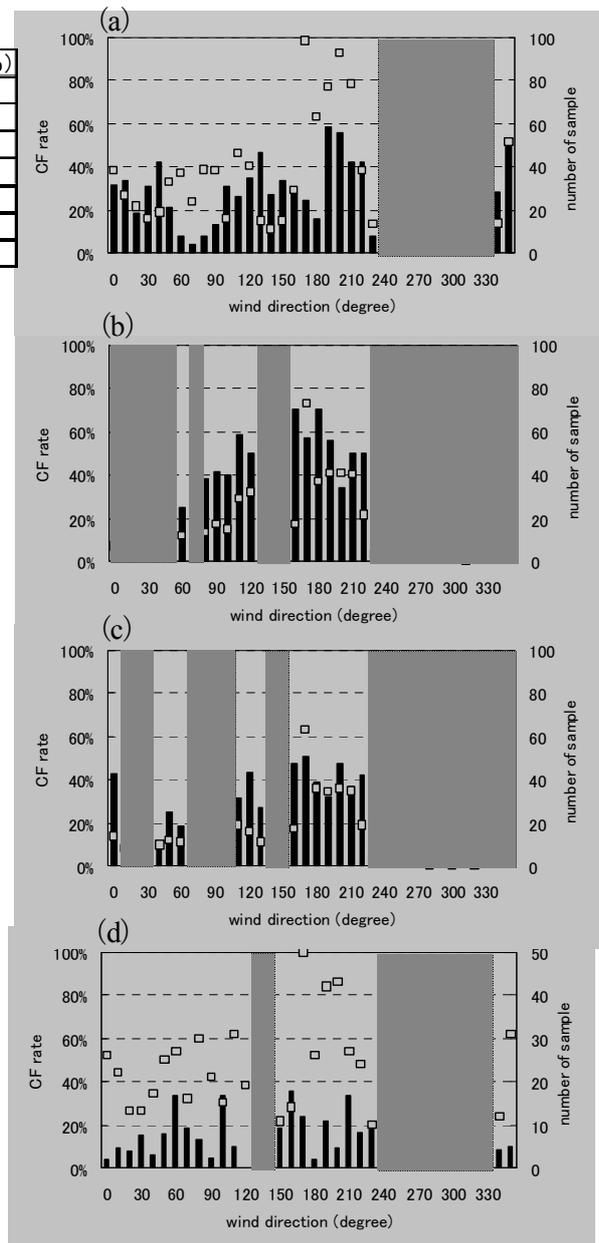


図-3 風向別に整理したコンスタント・フラックス率

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。

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、わずかに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、都市境界層では殆ど存在しないということになる。

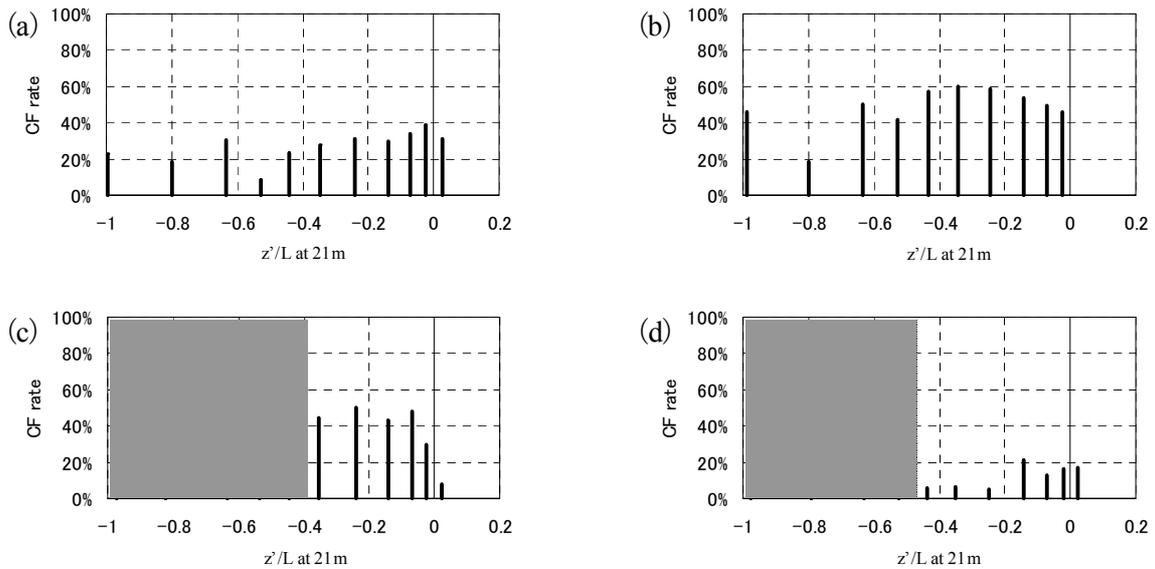


図-4 大気安定度別に整理したコンスタント・フラックス率 (a) 運動量フラックス (b) 顕熱フラックス (c) 潜熱フラックス (d) 二酸化炭素フラックス (c), (d) 図中の網かけ部分はデータサンプルが10以下のデータである。

## (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

次に大気の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.率が高く、不安定になるに従って減少していく。これは前章で議論したのと同様、対流混合層の影響であると推測される。(b)の顕熱フラックスについては安定度-0.2から-0.4付近でC.F.率が高く、中立付近と不安定側で若干C.F.率が落ちる。中立付近ではデータサンプルの中に朝夕方の非定常性の強いデータが含まれているためC.F.率が低くなっていると考えられる。(c)の潜熱フラックスに関しても中立付近において

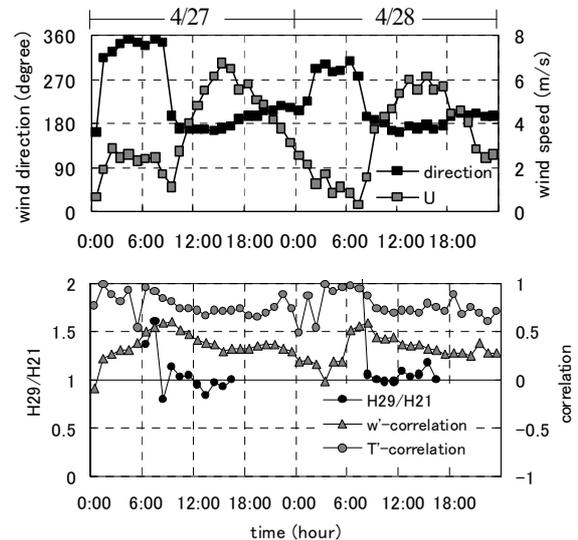


図-5 4/27-28の風向,主流風速,顕熱フラックス比,鉛直風速偏差の2高度相関,気温偏差の2高度相関の時系列データ

C.F.率が低く、大気安定度-0.1から-0.4付近でC.F.率が大きくなる傾向が見られる。この原因についても顕熱フラックスでの議論同様、中立付近のデータサンプルに非定常性の強いデータが含まれていることが原因であると考えられる。(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( $H_{29}/H_{21}$ )、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。 $H_{29}/H_{21}$ と $w'$ -correlationの時系列に注目すると、 $w'$ -correlationの値が0.5を超える時間帯(4/27の6:00から10:00、4/28の6:00から8:00)の多くに $H_{29}/H_{21}$ の値が1から外れ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 $H_{29}/H_{21}$ 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時に、2高度のフラックスが等しくならぬ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。

観測タワーに設置されている測器間の距離は8mであり、それより小さいスケールの乱れに対して同時に感知することができず、計測される $w'$ 値の相関は低くなる。それに対し相対的に大きな乱れがタワーを通過する場合、両高度の測器はその乱れを同様に感知することとなり計測される $w'$ 値の相関は大きくなる。自然界には様々なスケールの乱れが存在する。 $w'$ -correlationの値が大きくなるということは、大スケールの乱れが流れ場に入り込んできているということを示していることに相当する。実際に $w'$ -correlationが大きい時間帯は、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おり、非定常性の強い時間帯である。このような時間帯に2高度のフラックス比が1から外れ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30~50%ほどであり、二酸化炭素フラックスに関しては16%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から外れ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) Hougén, 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)