

## 住宅街の接地境界層における乱流フラックスの実測

## —シンチロメーターの利用—

神 田 学\*1・森 脇 亮\*2・鈴 木 譲\*2

マティアス ロート\*3・ティム オーク\*4

## 要 旨

密集低層住宅街（世田谷）の接地境界層において、渦相関法とシンチロメーター法を併用した乱流フラックス観測を行い、以下の結論を得た。

- (1) 世田谷住宅街における放射収支・熱収支解析データを提示し、その特徴を示した。
- (2) 2 高度におけるシンチロメーター計測により、顕熱と同時にゼロ面変位を推定する手法を提案した。推定されたゼロ面変位は、平均的には MacDonald *et al.* (1998) の形態学的手法から算定された値とほぼ一致した。また、ゼロ面変位が気象安定度に依存することを指摘した。
- (3) 渦相関法とシンチロメーター法の比較により乱流フラックスの空間代表性が検討された。シンチロメーター法のソースエリアは渦相関法のそれに対して、不安定時で 2～3 倍の広さを持つ。30分平均値での顕熱は両手法で有意な差がない。顕熱の標準偏差は気象安定度に関わらずシンチロメーター法の値が小さい。これは計測スパンの長いシンチロメーター法における渦の空間積分効果であると考えられる。

## 1. はじめに

都市の接地境界層における熱収支の実態把握とモデル化は気象学の重要な課題の 1 つである。境界層観測に要求される様々な制約条件（神田ほか，2000）により、森林などと比べ都市域での熱収支データは世界的に見ても極めて少ない。Cleugh and Oke (1986) はカナダの都市域と郊外での熱収支の違いを実測により明らかにしている。Grimmond and Oke (1999a) はこれを発展させ、カナダ・アメリカの諸都市において渦相関法によって算定された熱収支の実測データを整理

し、都市構造や立地条件と熱収支の因果関係に関して考察を行っている。日本では著者らの知る限り銀座における計測例（神田ほか，1997）だけであり、欧米と異なる都市構造を有する我が国での熱収支データの蓄積が望まれる。短期集中観測ではあるが、カナダ・アメリカの観測例とは異なる過密した低層住宅街における放射収支・熱収支データの一例を提示するのが本研究の第 1 の目的である。

空間平均的な顕熱および運動量フラックスを計測する新しい測定機器として、最近、シンチロメーター（例えば、Thiermann and Grassl, 1992）が、注目されている。地表面被覆の非一様性の大きい都市域では特にその応用が期待されるが、測定原理上、ゼロ面変位を予め与えなければならず、都市の接地境界層の観測において大きな欠点となっていた（神田ほか，1997）。そこで本論では、2 セットのシンチロメーターを用いてコンスタントフラックス層（以下、CFL）内の 2 高度で計測することにより、顕熱と同時に都市域のゼロ面

\*1 東京工業大学理工学研究科国際開発工学専攻。  
E-mail : kanda@fluid.cv.titech.ac.jp

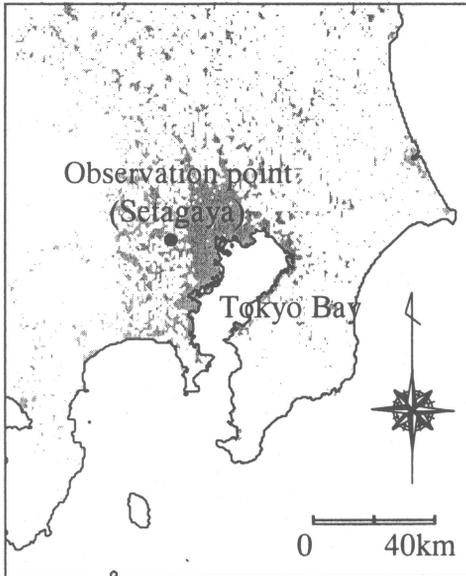
\*2 東京工業大学理工学研究科国際開発工業専攻。

\*3 シンガポール・シンガポール大学地理学科。

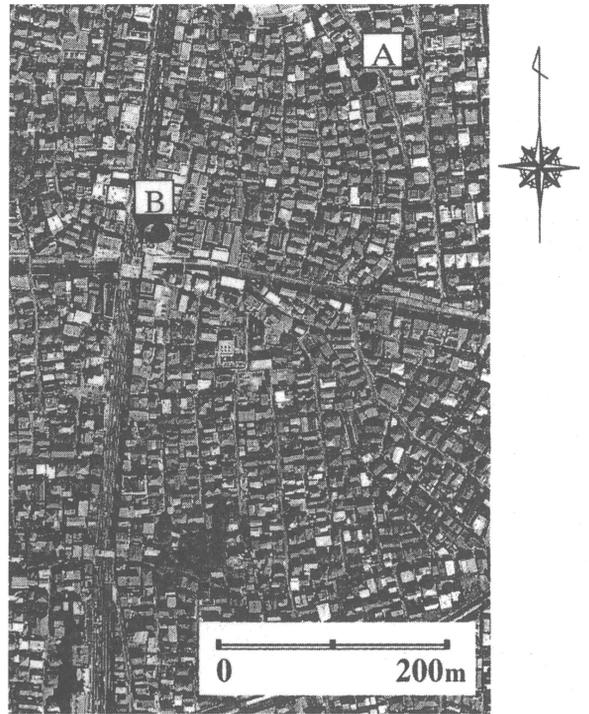
\*4 カナダ・ブリティッシュコロンビア大学地理学科。

—1999年 3月14日受領—

—2000年 3月22日受理—



第1図 観測場所（東京都世田谷区）の位置。灰色の領域は市街地の範囲を示す。



第2図 観測場所近傍の航空写真（撮影：中日本航空（株），撮影月日：1997年10月）。点A，Bは観測場所を示す。

変位を推定する新しい手法を提案する。これが第2の目的である。最近，Grimmond and Oke (1999b) は、プロファイル法をはじめ，流体力学的粗度やゼロ面変位を推定する複数の手法を都市の幾何パラメーター別に整理し，比較検討しているが，推定値のばらつきが極めて大きく，決定的な推定手法がないことを指摘しており，ゼロ面変位を直接計測する新しい手法を提案することは意義があると考えられる。

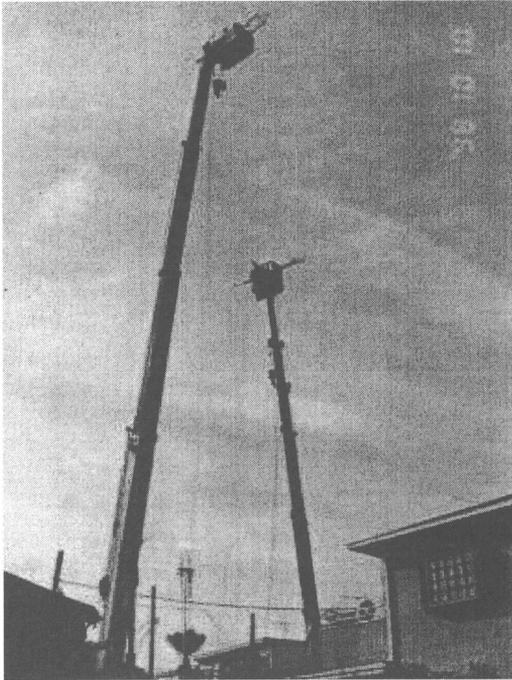
都市キャノピー上の接地境界層における乱流フラックスデータを解析・モデル化する際には，その空間代表性に十分留意しなければならない。そこでシンチロメーター法と渦相関法による顕熱を比較し，その空間代表性について定量的に検討を行うのが，本研究の第3の目的である。シンチロメーターは超音波風速温度計に比べてその計測スパン長が著しく大きいという利点を持ち，乱流データの空間代表性を比較・検討する上で好都合である。

## 2. 観測概要

観測地点の位置と航空写真を第1図と第2図にそれぞれ示す。観測の中心となった東京都世田谷区新代田6丁目（第2図中点A）を中心に南北方向それぞれ約数kmにわたってほぼ均一で一様な低層住宅街が広

がっている。住宅街は若干の植生も含んでいる（緑被率は14%）。建物は2階建て住宅がほとんどで建物高さは平均8.5m，その建坪率は60%である。MacDonald *et al.* (1998) にならって，形態学的情報から流体力学的粗度とゼロ面変位を算出すると，それぞれ0.16mおよび7.0mとなる。観測時，この地点の風向は，日中が南，夜間が北となる。南北いずれの風向においても地上35m（本観測における観測高度）に測定器を設置すれば，CFL内における乱流フラックスの基本的成立条件を満たすことになる（神田ほか，1999）。

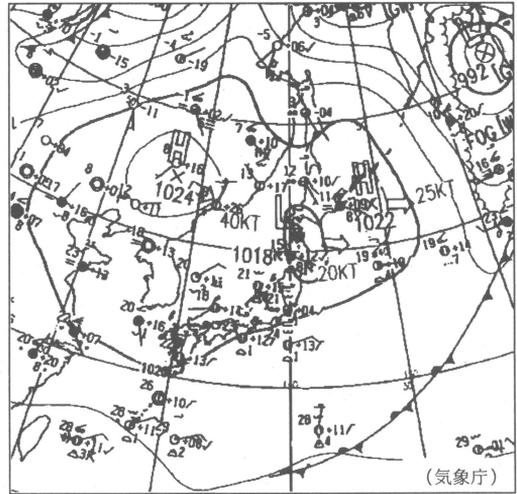
観測点Aは，住宅1軒分の空き地であり，20m×20mの敷地面積内に2台の35mクレーン車を導入し観測タワーとして使用した。観測点Bは住宅都市整備公団（現，都市基盤整備公団）の10階建てアパートであり，シンチロメーターの発信器2台を設置した。ここから観測点Aにおける2台のクレーン車に搭載されたシンチロメーターの受信器に向けてレーザービームを発射する。シンチロメーターのパス長は約250mである。観測点Aの東1.5kmに位置する東京大学先端技術研究所においてラジオゾンデによる高層気象デー



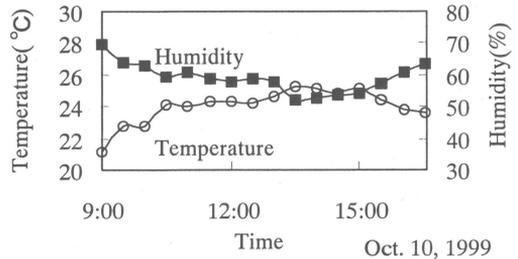
第3図 観測点 A (第2図) における観測風景.



第4図 観測点 A の35 m ゴンドラから見たシンチロメーターの計測パス (写真左上の建物が観測点 B で、丸印は発信器の位置、黒丸: 35 m 高度、白丸: 19 m 高度).



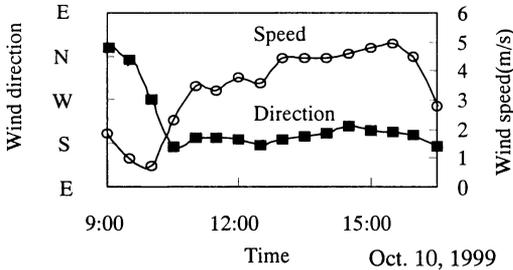
第5図 観測日 (1998年10月10日 9:00) の地上天気図 (気象庁提供).



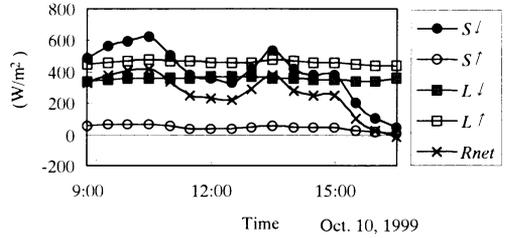
第6図 地上35 m における気温・相対湿度の日変化.

タを取得した。第3図、第4図にはそれぞれ観測点 A における2台のクレーン車の様子とシンチロメーターの計測風景を示す。シンチロメーターによる計測は地上35 m と19 m の2高度で行った。各高度における計測器およびデータ収録システムはクレーン車のゴンドラ内に全て収容し、地上から電源のみを供給した。ゴ

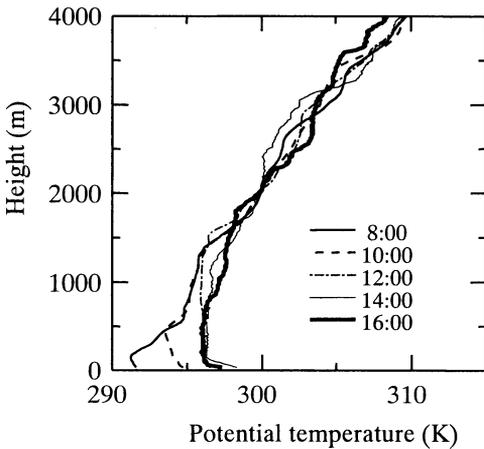
ンドラ上の風速が5 m/s 以下であれば、クレーン車の揺れは体感できず、超音波風速計による風速の乱流データのスペクトル形状をチェックした限りにおいては、ゴンドラの揺れに対応するようなスペクトルピークは検出されなかった。乱流解析に用いられる超音波風速温度計 ((株) カイジョー, WA (T) 395型式3 D および CA27T 型式1 D) とハイグロメーター (Campbell Scientific Inc., SAT 1126/KH20 1011型式) は10 Hz でサンプリングされデータロガー (Campbell Scientific Inc., 21X) に自動収録した。ハイグロメーターの校正法は Roth and Oke (1993) にならった。シンチロメーター (Scintec Atmosphären-messtechnik GmbH, SLS20) は750 Hz でサンプリングしたレーザー受信強度から1分毎に顕熱を計算し PC (RS232接続) に自動収録した。上向き・下向き短波放射 (英弘



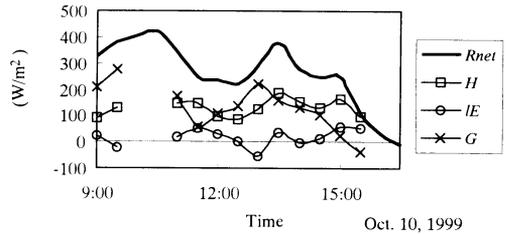
第7図 地上35 mにおける風向・スカラー風速の日変化。



第9図 放射収支の日変化(地上35 m). S:短波放射, L:長波放射, ↑, ↓:それぞれ上向き, 下向き, Rnet:純放射。



第8図 ラジオゾンデによる上空大気の温度分布。



第10図 熱収支の日変化(地上35 m). H:顕熱, IE:潜熱, G:貯熱, Rnet:純放射。

精機(株), MS-64)および上向き・下向き長波放射(英弘精機(株), MS-200)の4つの放射成分と, 気温・相対湿度(ヴァイサラ(株), HMP133-Y)については1秒毎にサンプリングしたものを1分平均し, また風向・スカラー風速(Campbell Scientific Inc., 3000-5)については1分毎のデータをデータロガー(Campbell Scientific Inc., CR10)に自動収録した。

観測は, 1998年10月4日から11日まで行われたが, 本論では比較的天気良かった10月10日のデータを中心に, 10月9日16:00から19:30までと10月10日9:00から16:30までのデータを用いる。第5図は10月10日の地上天気図である。この日は高気圧が北偏しており日中に多少雲が出ていた。

3. 放射収支と熱収支の観測結果

10月10日における局地気象の変化を把握するため, 地上35 mで計測された気温・相対湿度の30分平均値

(第6図), 風向・スカラー風速の30分平均値(第7図)およびゾンデによる上空温度分布(第8図)をそれぞれ示す。平均操作には, 表示時刻の前後15分, 合計30分のデータを用いた。10:30以降, 南風になっており, この間のデータは同じ方向のフェッチの影響を受けたデータとして乱流データの比較が可能である。また, ラジオゾンデの結果より12:00から16:00頃, 地上1.5 km前後に達する対流混合層が形成されていることがわかる。

10月10日における放射収支の時間変化を第9図に示す。アルベドは約0.11となっている。純放射は日中で最大で約400 W/m<sup>2</sup>となっており, 16:30頃には負の値となる。熱収支の時間変化を第10図に示す。ここで, 顕熱・潜熱は35 mにおける渦相関法による算定値が使われている。また, 貯熱は, 測定が困難であり, 熱収支の残差として算定されている。潜熱の寄与が小さく最大でも50 W/m<sup>2</sup>程度となっている。これは住宅街に存在するわずかな庭木などの蒸散活動の寄与であろう。夏季の銀座で観測されたような大きな潜熱(冷房によると思われる, 神田ほか, 1997)は観測されなかった。日中は顕熱と建物・地面による貯熱が同程度の割

合で純放射とバランスしており、カナダの住宅域における結果 (Cleugh and Oke, 1986; Roth and Oke, 1994) と類似している。森林域などに比べて放射収支・熱収支がそろった実測データはきわめて少なく、今後のモデルの検証に有効であろう。

#### 4. シンチロメーターによるゼロ面変位の推定

シンチロメーターはレーザー光を用いた乱流計測装置で、超音波風速温度計等の1地点での計測とは異なり、レーザーの発信器・受信器間の光線の軌跡で空間平均化された乱流変動値を求める点が大きな特徴である。シンチロメーターには数多くの手法があり、Hill (1992) のレビューに詳しい。ここでは、本研究で用いた2偏波型シンチロメーター (Scintec Atmosphärenmesstechnik GmbH, SLS20) の測定原理のみ以下に簡単に述べる。発信される平行した2本の偏向レーザーが、光路中の乱流により屈折率の変動を起こすのを光の強度変動として捉え、その2つの相関および光路距離などから、まず構造関数パラメーターと乱れの内部スケールが直接計測される。構造関数パラメーターは湿度の構造関数と温度の構造関数に依存するが、本観測のように顕熱が潜熱よりも大きい (ボーエン比が1より大きい) 場合には (第10図の熱収支参照)、構造関数パラメーターは温度の構造関数パラメーター  $C_T^2$  のみに依存することがわかっている (例えば、Green and Hayashi, 1998)。また乱れの内部スケールからはエネルギー散逸率  $\epsilon$  が算出される (Hill, 1992)。要するに、2本の偏向レーザーのゆらぎから2変数の乱流情報 ( $C_T^2$  と  $\epsilon$ ) が得られるわけである。ここで、接地境界層の相似理論が適用できるものと仮定すると、 $C_T^2$  と  $\epsilon$  の無次元関数 ( $\phi_{C_T}$ ,  $\phi_\epsilon$ ) はモニン・オブコフ相似則による3つの基本スケール ( $L$ : モニン・オブコフ長さ,  $T_*$ : 摩擦温度,  $u_*$ : 摩擦速度) と以下の式 (1) ~ (3) によって関係づけられる。実質的な測定高度  $z'$  ( $=z-z_d$ ) が与えられれば、式 (1) ~ (3) より3つの未知変数が求まり、式 (4) より顕熱が算定される。

$$L = Tu_*^2 / kgT_* \quad (1)$$

不安定時

$$\begin{aligned} \phi_{C_T} &= C_T^2 (kz')^{2/3} T_*^{-2} = 4\beta_1 \phi_N \phi_\epsilon^{-1/3} \\ &= 4\beta_1 [0.68(1-9.69(z'/L))^{-1/2}] \cdot \\ &\quad [(1-10.5(z'/L))^{-1} - (z'/L)]^{-1/3} \end{aligned} \quad (2a)$$

安定時

$$\begin{aligned} \phi_{C_T} &= C_T^2 (kz')^{2/3} T_*^{-2} = \\ &= 4\beta_1 (1+7z'/L+20(z'/L)^2)^{1/3} \end{aligned} \quad (2b)$$

不安定時

$$\phi_\epsilon = \epsilon kz' u_*^{-3} = (1-10.5(z'/L))^{-1} - z'/L \quad (3a)$$

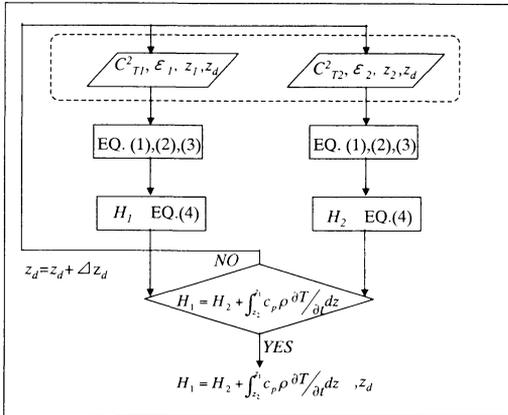
安定時

$$\phi_\epsilon = \epsilon kz' u_*^{-3} = (1+4z'/L+16(z'/L)^2)^{1/2} \quad (3b)$$

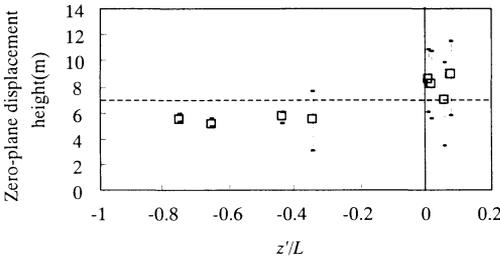
$$H = -c_p \rho u_* T_* \quad (4)$$

ここで、 $T$ : 温度,  $z$ : 地上高,  $z_d$ : ゼロ面変位,  $k$ : カルマン定数 (0.4),  $g$ : 重力加速度 (9.81 m/s<sup>2</sup>),  $\beta_1$ : Obkhov-Corrsin 定数 (0.86),  $c_p$ : 定圧比熱,  $\rho$ : 空気密度,  $\phi_N$ : 無次元化された温度散逸率である。測定原理の詳細については Thiermann (1992) を参照されたい。

シンチロメーターの大きな欠点は、モニン・オブコフ相似則に基づく相似関数を仮定していることと、ゼロ面変位 (以下  $z_d$ ) をあらかじめ決定しなければならないこと、の2点である。都市境界層における構造関数とエネルギー散逸率の相似関数の成立については、世田谷・銀座・バンクーバーの3都市における超音波風速温度計を用いた乱流実測データから確認されており、式 (2a), (3a) はそれら3都市の結果に基づいて提案された新しい相似関数式である (神田ほか, 1999)。シンチロメーター法を都市域で適用するため、これらの相似関数がシンチロメーターで予め仮定されているもの (Thiermann and Grassl, 1992) とは異なる関数形となっていることに留意されたい。なお、関数形の違いが算定される顕熱に及ぼす影響は、最大で10~20 W/m<sup>2</sup>程度である。また、幾何形状の複雑な都市においては、 $z_d$  の仮定値は顕熱の算定値に対して非常に敏感であり (神田ほか, 1997),  $z_d$  をあらかじめ与えなければならないことはきわめて不都合である。ここではシンチロメーターを2セット用いることにより  $z_d$  そのものを推定する手法を適用する。同じパス間に設置高度を変えた2セットのシンチロメーター計測を行う。CFL内の乱流フラックスは高さ方向にほとんど変化しないが、厳密には等しくないため、2高度間の大気に蓄熱される非定常項を考慮しなければならない。この非定常項は日中最大で、数 W/m<sup>2</sup>程度である。これより2高度間での熱フラックス収支が式 (5) で表せる。



第11図 顕熱とゼロ面変位  $z_d$  の推定アルゴリズム.



第12図 ゼロ面変位  $z_d$  と大気安定度 ( $z'/L$ ) の関係. 白四角: シンチロメーター法, 点線: 形態学的手法 (MacDonald *et al.*, 1998)

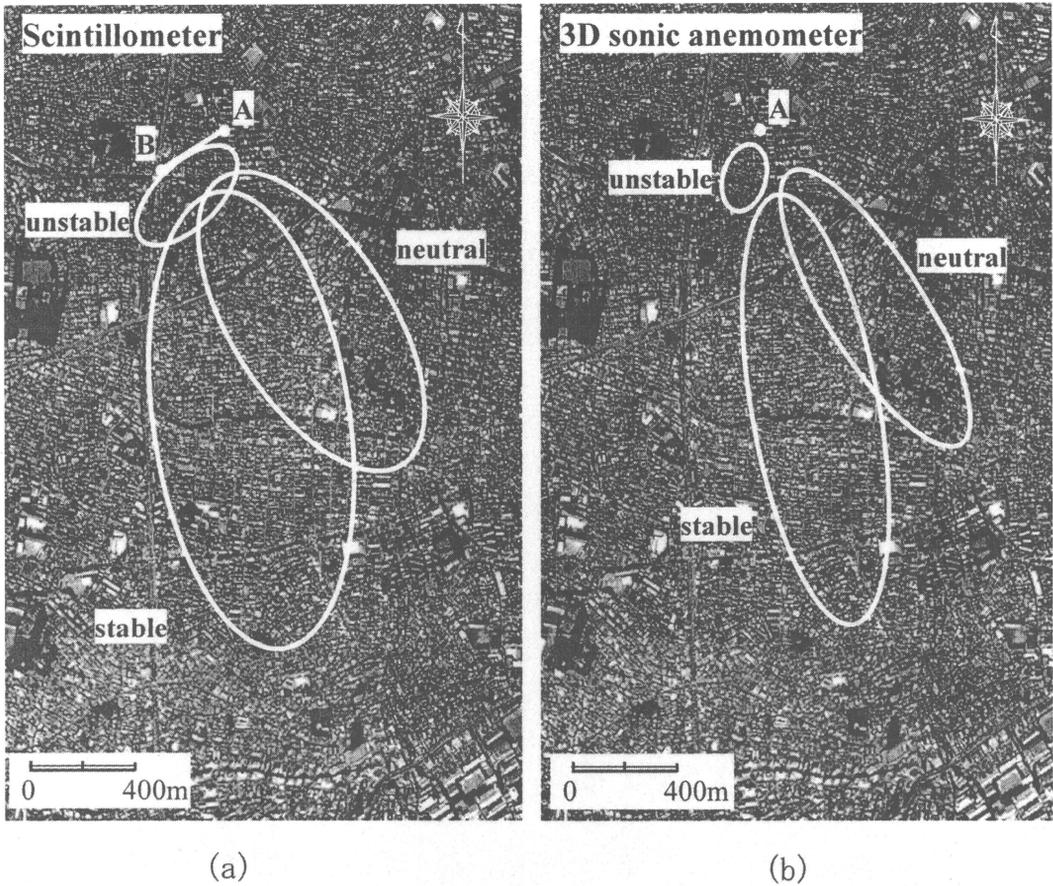
$$H_1 = H_2 + \int_{z_1}^{z_2} c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} dz \quad (5)$$

ここで、下添え字1, 2は測定高度の識別子である。2セットのシンチロメーターの出力信号と式(5)を追加したことにより、もう1つの未知変数として式(2), (3)内の  $z_d$  を算出することが可能となる。顕熱とゼロ面変位 ( $z_d$ ) の同時推定アルゴリズムを第11図に示す。この手法は水平一様な草原においてテスト測定を行いその有効性が確認されている(森脇ほか, 1999)。

第12図には上記により推定されたゼロ面変位  $z_d$  と超音波風速温度計によって得られた大気安定度の関係を示す。この図では10月9, 10日に得られたすべての測定結果のうち、風向が145°~200°の範囲の(ビル(第2図の点B)による後流の影響を受けない)事例、かつ水平風速の分散値が1.0より小さい(風が安定して吹

いた)事例を提示している。本手法は2高度のシンチロメーターによる測定結果の差を利用するため、観測期間中でも特に条件のよい事例を選択している。Grimmond and Oke (1999b) は、プロファイル法・渦相関法・形態学的手法による都市域の  $z_d$  の算定精度について詳細な比較検討を行っており、現在のところ決定的な手法がないと結論づけている。相対的には、都市の幾何形状から粗度パラメーターを推定する形態学的手法が推奨されている。そこで、シンチロメーター法との比較のため、代表的な形態学的手法の1つ (MacDonald *et al.*, 1998) による算出結果も合わせて示す。形態学的手法とは、単位土地面積中に占める建物面積の割合と、主風速方向に対する建物投影面積から、物体の抵抗則を用いて粗度パラメーターを推定する手法であるが、建物の相乗効果による抵抗係数の変化などいくつかの過程に経験則が用いられている。

シンチロメーター法による  $z_d$  は全データ平均で6.9 m となり、形態学的手法から算出された7.0 m とほぼ一致している。2台のシンチロメーターはキャリブレーションによっても  $\pm 1.5 \text{ W/m}^2$  程度の器差を持ちうる。2高度間における大気の蓄熱項(式(5)の右辺第2項)は数  $\text{W/m}^2$  程度のオーダーであることから、これらの器差は計測原理上、無視することが出来ない。2台のシンチロメーターの器差が  $z_d$  の推定値に与える影響を、第12図中の各データの誤差バーで示した。大気が不安定になるほど推定精度が向上することが示される。大気が安定の際には、わずか  $1 \sim 2 \text{ W/m}^2$  の顕熱誤差が  $1 \sim 2 \text{ m}$  の推定誤差を生み出す。一方、大気が不安定な場合は、わずか数 cm~数10 cm 程度に抑えられる。この理由は、不安定時ほど顕熱の絶対値そのものが大きくなるので、相対的に器差の影響が小さくなること、および、フラックス算定において用いられる相似関数式(2)および(3)の性質として、大気が安定になるほど無次元関数 ( $\phi_{c_r}$ ,  $\phi_c$ ) が顕熱の絶対値に対して敏感になってくること、が挙げられる。このような器差を考慮しても第12図から大気不安定化とともに  $z_d$  が漸減していく傾向が読みとれる。同様の傾向は、30 cm 高さの植物キャノピーにおいて、より明確に確かめられている(森脇ほか, 1999)。  $z_d$  の算出手法自体に決定的なものがないため、  $z_d$  の大気安定度依存性は過去の研究ではほとんど議論されていない。しかし、不安定時は、サーマルなどの熱対流による乱流鉛直混合が卓越するため、形状抵抗の影響が軽減され、  $z_d$  が小さくなることが考えられる。また、安定時には、



第13図 大気安定度別ソースエリア. 左図：シンチロメーター法, 右図：渦相関法.

第1表 ソースエリア算出のための大気条件と結果.

大気安定度 ( $z'/L$ )	日時	平均風速 (m/s)	無次元 速度分散	風軸方向 の径(m)	横断方向 の径(m)
安定 (0.082)	18:00 9 Oct.	3.1	1.92	1660	448
中立 (0.011)	17:30 9 Oct.	3.4	1.77	1240	352
不安定 (-0.76)	13:30 10 Oct.	3.5	2.55	304	167

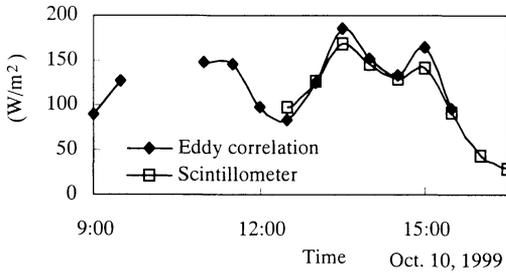
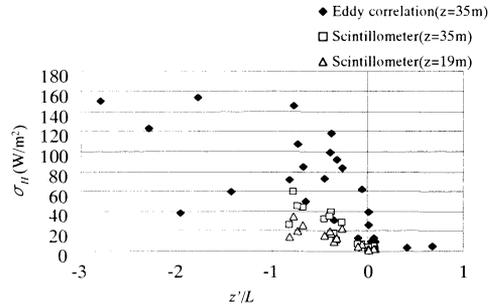
建物間のキャビティー領域が大気成層の効果により流体力学的な淀み域となりキャノピー下層での運動量交換がより抑制され、 $z_d$ が大きくなることが考えられる。

## 5. 渦相関法とシンチロメーター法の比較による顕熱の空間代表性に関する検討

### 5.1 ソースエリアの比較

都市あるいは森林上の大気境界層におけるエネルギーや物質フラックスを考える上で、計測点の代表性は依然として興味あるトピックの1つである。

Schmid (1994) は、計測点のフラックス値に影響を

第14図 30分平均顕熱 ( $H_{30}$ ) の日変化.第15図 顕熱の標準偏差 ( $\sigma_H$ ) と大気安定度 ( $z'/L$ ) の関係.

及ぼしていると考えられる風上側地表領域を逆トラジェクトリー的手法で算出する手法を提案し、その領域を「ソースエリア」と名付けた。通常は計測点におけるフラックスの90%に影響を及ぼす範囲として定義されている。ソースエリアは、具体的には、風向・風速・大気安定度などの気象要素および観測高度を入力条件とし、接地境界層における移流・拡散理論から決定される。シンチロメーターと超音波風速温度計はセンサー間隔が大きく異なるため、それぞれから算出される顕熱を比較することにより、ソースエリアやセンサー間隔がフラックス計測値に及ぼす影響を議論することができる。第13図には、シンチロメーター法と渦相関法それぞれに対するソースエリアを代表的な大気安定度別に示す。大気安定度には超音波風速温度計による値を用いた。その計算諸元と結果の要約を第1表に示す。シンチロメーター・超音波風速温度計いずれのソースエリアも、オーダー的には数100 m～1 km程度の径をもち、また大気が安定化するほどソースエリアは大きくなる。センサー間隔比(約5000:1)から想像されるほど、シンチロメーターのソースエリアが極端に広いわけではない。特に大気安定時にはほとんど有意な差はない。このことは逆に言えば、鉄塔などを用いて十分な観測高度(建物高さの2.5～3倍が目安, Roth and Oke, 1995)が確保された場合の渦相関法の有用性を裏付けている。しかしながら、不安定大気条件下においては、シンチロメーターのソースエリアの径は渦相関法のそれと比べて約2～3倍となっており、空間代表性の点でより有利となることは注目値する。第13図に示すように大気の不安定化に伴いソースエリアは減少するため、大気が不安定化し顕熱が大きくなる日中の観測値は空間代表性の点で特に注意が必要だからである。

以上の点を踏まえて、両手法による顕熱を比較してみる。なお、シンチロメーター法による顕熱は、第4

章の手法により算出されている。

## 5.2 顕熱とその標準偏差値の比較

第14図には、平均化時間30分における顕熱 ( $H_{30}$ ) の時間変化を示す。この日は純放射に対応して、顕熱も数時間周期の大きな変動を示しているが、シンチロメーターの方が変動の振幅が小さく、最大で数10 W/m<sup>2</sup>程度の差異が見られる。しかし、時間変動傾向はよく一致しており、通常よく用いられる30分平均化時間における顕熱については両手法で定量的に大きな差がないと判断される。センサー間隔の小さい超音波風速温度計でも平均化時間を長くとることにより大規模スケールの渦の影響を考慮できるからであり、これが渦相関法の適用根拠にもなっているわけである。

次に30分平均化時間における顕熱の標準偏差 ( $\sigma_H$ ) を比較する。 $\sigma_H$ は以下のように定義した。

$$\sigma_H^2 = \overline{(\rho c_p w' t' |_{1\text{min}} - \rho c_p \bar{w} \bar{t}')^2} \quad (6)$$

$$w' = w - \bar{w}, \quad t' = t - \bar{t} \quad (7)$$

ここで、 $w$ ,  $T$  はそれぞれ鉛直風速、気温の瞬時値を、プライムはそれぞれ乱流成分を、上付きバーはそれぞれの30分平均値を表す。ただし式(6)の下付添え字(1 min)を伴う上付きバーのみ1分平均値を表す。

第15図には顕熱の標準偏差 ( $\sigma_H$ ) を大気安定度との関係で示した。 $\sigma_H$ は大気の安定化に伴い減少するが、これはセンサーを通過する渦の統計的安定性が変化することによるものである。いずれの大気安定度においてもシンチロメーター法の  $\sigma_H$  は渦相関法よりも小さい。これはシンチロメーターのセンサー間隔(250 m)がソースエリアとほぼ同オーダーであり、たとえ短時間の平均化時間においてもソースエリアに起因する様々なスケールの渦の影響を空間的に取り込むことが

できるためである。z=35 m に比べて、z=19 m の方が小さな  $\sigma_H$  を示しているのは、高度に依存した渦のスケールによるものと考えられる。一方、超音波風速温度計のセンサーズパンは5 cm とソースエリアに比べて著しく小さいために、ソースエリアに内在する様々な渦の非一様性に対してシンチロメーターのような空間積分効果が働かない。このことは、シンチロメーター法の場合、渦相関法で要求される乱流平均化時間（通常30分～1時間）よりも短い平均化時間でソースエリアを代表する乱流フラックスが算定できることを意味している。

## 6. まとめ

密集低層住宅街（世田谷）の接地境界層において、渦相関法とシンチロメーター法を併用した乱流フラックス観測を行い、以下の結論を得た。

- (1) 世田谷の住宅街における放射収支・熱収支解析データを提示し、その特徴を示した。
- (2) 2 高度におけるシンチロメーター計測により、顕熱と同時にゼロ面変位を推定する手法を提案した。推定されたゼロ面変位は、平均的には MacDonald *et al.* (1998) の形態学的手法から推定された値とほぼ一致した。また、ゼロ面変位が大気安定度に依存することを指摘した。
- (3) 渦相関法とシンチロメーター法の比較により乱流フラックスの空間代表性が検討された。シンチロメーター法のソースエリアは渦相関法のそれに対して、不安定時で2～3倍の広さを持つ。30分平均値での顕熱は両手法で有意な差がない。顕熱の標準偏差は大気安定度に関わらずシンチロメーター法の値が小さい。これは計測スパンの長いシンチロメーター法における渦の空間積分効果であると考えられる。

本論は、CFL 内の乱流フラックスに限って議論が展開されたが、観測自体は、カナダおよび日本の多くの都市気候研究者が参加したものであり、35 m ゴンドラからの熱画像測定 (J. Voogt, カナダ・西オンタリオ大学)、キャノピー層内の乱流計測や気温のプロファイル (中村泰人教授, 熊本県立大学)、ドップラーソーダー観測、などが同期して行われている。

## 謝 辞

本観測は、植田洋匡教授研究室（京都大学防災研究

所）、中村泰人教授研究室（熊本県立大学環境共生学部）、鶴野伊津志教授研究室（九州大学応用力学研究所）の教授および学生の方々の多大なる技術的・資金的援助を受けました。また、科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業（代表：久保幸夫慶応義塾大学教授）の資金的援助を受けました。また、秋本 肇教授（地球フロンティア研究システム）、花木啓介教授（東京大学）、三上正男博士（気象研究所）、高原和夫氏（住宅都市整備公団（現、都市基盤整備公団））、岸田憲夫氏には、測定器の拝借や観測場所の提供などでご協力いただきました。ここに厚く謝意を申し上げます。

## 参 考 文 献

- Cleugh, H. A. and T. R. Oke, 1986 : Suburban-rural energy balance comparisons in summer for Vancouver, B. C., Bound.-Layer Meteor., **36**, 351-369.
- Green, A. E. and Y. Hayashi, 1998 : Use of scintillation technique over a rice paddy, Japan. Agric. Meteor., **54**, 225-234.
- Grimmond, C. S. B. and T. R. Oke, 1999a : Heat storage in urban areas : local-scale observations and evaluation of a simple model, J. Appl. Meteor., **38**, 922-940.
- Grimmond, C. S. B. and T. R. Oke, 1999b : Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form, J. Appl. Meteor., **38**, 1262-1292.
- Hill, R. J., 1992 : Review of optical scintillation method of measuring the refractive index spectrum, inner scale and surface fluxes, Waves in Random Media, **2**, 179-201.
- 神田 学, 高柳百合子, 横山 仁, 森脇 亮, 1997 : 銀座オフィスビル街における熱収支の特性, 水文・水資源学会誌, **10**, 329-336.
- 神田 学, 森脇 亮, 鈴木 讓, マティアス ロート, ティム オーク, 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 (印刷中).
- MacDonald, R. W., R. F. Griffiths and D. J. Hall, 1998 : An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays, Atmos. Environ., **32**, 1857-1864.
- 森脇 亮, 鈴木 讓, 神田 学, 三上正男, 岩倉 晋, 1999 : シンチロメーターによる空間平均熱フラックス測定に関する基礎的実験, 土木学会水工学論文集, **43**, 91-96.
- Roth, M and T. R. Oke, 1993 : Turbulent transfer relationships over an urban surface. I : Spectral

- characteristics, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **119**, 1071-1104.
- Roth, M and T. R. Oke, 1994 : Comparison of modeled and 'measured' heat storage in suburban terrain, *Beitr. Phys. Atmos.*, **67**, 149-156.
- Roth, M and T. R. Oke, 1995 : Relative efficiencies of turbulent transfer of heat, mass, and momentum over a patchy urban surface, *J. Atmos. Sci.*, **52**, 1863-1874.
- Schmid, H. P., 1994 : Source areas for scalars and scalar fluxes, *Bound.-Layer Meteor.*, **67**, 293-318.
- Thiermann, V., 1992 : A displaced beam scintillometer for line-averaged measurements of surface layer turbulence, 10<sup>th</sup> Symposium on turbulence and diffusion, Portland, Oregon, American Meteorological Society, Boston, MA, 244-247.
- Thiermann, V. and H. Grassl, 1992 : The measurement of turbulent surface-layer fluxes by use of bichromatic scintillation, *Bound.-Layer Meteor.*, **58**, 367-389.

---

## Turbulent Flux Measurement in an Urban Boundary Layer by Using Scintillometer

Manabu Kanda\*<sup>1</sup>, Ryo Moriwaki\*<sup>2</sup>, Jo Suzuki\*<sup>2</sup>,  
Matthias Roth\*<sup>3</sup> and Tim Oke\*<sup>4</sup>

\*<sup>1</sup> (*Corresponding author*) *Department of International Development Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo 152-8552, Japan. E-mail : kanda@fluid.cv.titech.ac.jp*

\*<sup>2</sup> *Department of International Development Engineering, Tokyo Institute of Technology.*

\*<sup>3</sup> *Department of Geography, University of Singapore.*

\*<sup>4</sup> *University of British Columbia.*

(Received 14 March 1999 ; Accepted 22 March 2000)

### Abstract

Field observations to investigate area-averaged turbulence characteristics were performed in a densely built-up residential neighborhood in Tokyo, Japan. Besides eddy-correlation sensors, a scintillometer was used in an urban environment. Several important results are summarized as follows : (1) Radiation balance and energy balance of observation area are obtained. (2) A new technique which uses simultaneous scintillation measurements at two heights is developed to estimate directly both area-averaged zero-plain displacement height  $z_d$  and heat flux  $Q_H$ . The estimated  $z_d$  is found to be slightly dependent on the atmospheric stability parameter (lower  $z_d$  under more unstable conditions). (3) Source areas for the scintillometer are 2-3 times larger than those for the eddy correlation sensors under unstable conditions. 30-min averaged, normalized standard deviations of  $Q_H$  measured by the two methods are compared. Whilst  $Q_H$  estimates agree well, their short time variability was generally larger for the eddy-correlation as compared with the scintillometer data under wide range of stability conditions. This result can be attributed to the superior spatial integration due to the longer averaging path (250 m) of the scintillometer. It is concluded that time-averaging requirements to obtain representative flux measurement for scintillometer applications can be relaxed.