

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

EXPERIMENTS ON THE MEASUREMENT OF SPATIALLY MEAN HEAT FLUX
BY USING SCINTILLOMETER

森脇亮¹・鈴木譲²・神田学³・三上正男⁴・岩倉晋⁴

Ryo MORIWAKI, Jo SUZUKI, Manabu KANDA, Masao MIKAMI and Shin IWAKURA

¹ 正会員 工学 東京工業大学助手 工学部土木工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目12-1)

² 学生会員 工学 東京工業大学大学院 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 工学部開発システム工学科 (同上)

⁴ 理博 気象庁気象研究所 環境・応用気象研究部 (〒305-0052 茨城県つくば市長峰1-1)

Three types of experiments on the measurements of spatially mean heat flux were performed by using two sets of scintillometer. In the Case-1, two sets of scintillometer are located adjacently and parallel, in the Case-2, their propagation paths are crossed, and in the Case-3 they are located parallel at the different height. The following results are obtained; 1) the fluctuations of the sensible heat fluxes measured by closely located scintillometer agree with each other, 2) the crossed scintillometer agree well when they are averaged every 30min, but their 1 min-averaged data don't agree, 3) the method to estimate the regional zero-displacement height " d " by using two sets of scintillometer is checked and the proper height of d is derived.

Key Words : Regional zero-displacement height, Scintillometer, Ultra sonic anemometer,
Sensible heat flux

1. はじめに

都市や森林などの複雑地形地における空間平均的な熱フラックスを測定できる機器としてシンチロメーターに注目が寄せられている。シンチロメーターは、大気中の乱れによるレーザー光の屈折を利用した乱流測定装置であり、発信器と受信機間の空間平均的な乱流フラックスを測定する機器である。そのためシンチロメーターは超音波風速計など従来の点計測と比較すると計測値の空間代表性に優れており、また乱流平均化時間を短くできる利点もある。しかし現在のところシンチロメーターを用いた測定に関する知見は少なく、その利用法について十分に議論が行われていない。

神田ほか(1997)¹⁾は都市キャノピー上空(東京都中央区銀座)での熱フラックス測定を行い、シンチロメーターと超音波風速計で得られるフラックスに良好な対応関係があることを確認した上で、①ゼロ面変位 d の設定によってシンチロメーターの出力結果が大きく変化すること、②超音波風速計

とシンチロメーターの組み合わせまたは二組のシンチロメーターを用いた測定から測定領域の空間平均 d を逆に推定できる可能性があること、を指摘している。都市における d の決定には微気象学的な手法や建物形状から推定する手法などが検討されているが、都市の非均一性のために困難な問題となっている。複雑キャノピー上の風や乱流の挙動を記述しモデル化するためには d の決定が重要であり、シンチロメーターにより空間の平均的な d を決定できれば画期的である。

本研究ではフラックス測定に適した平坦な草地において、二組のシンチロメーターを用いて幾何学的に異なる三種類のケース(①レーザーパスを隣接させる、②パスを直交する、③パスを二高度に設置する)について実験を行い、シンチロメーターによる計測値の挙動や使用時の注意点、応用方法の可能性について報告する。また神田ほかにより提案された二組のシンチロメーターから d を求める方法を実際に行い、この手法の特性や利用可能性について検討した。

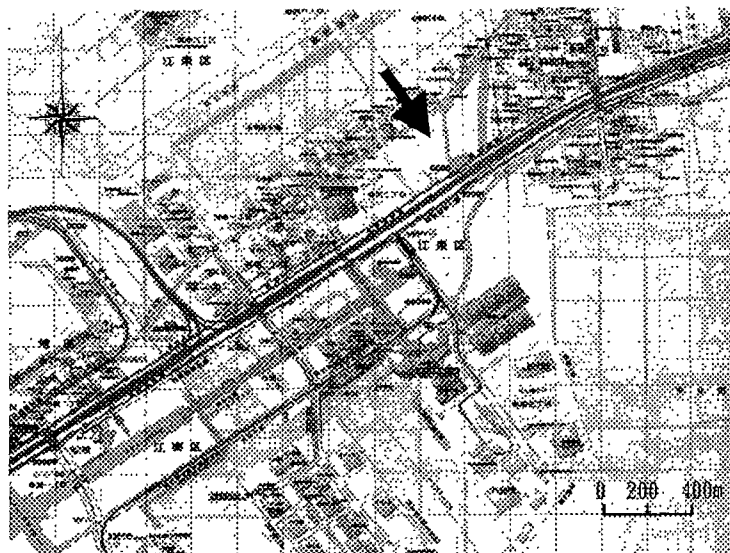


図-1 測定場所周辺図 (矢印が測定場所).

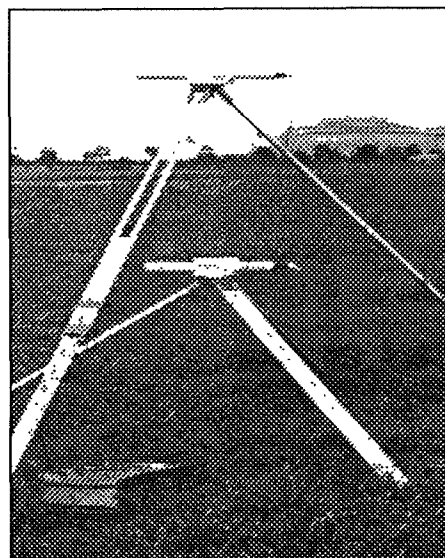


写真-1 測定場所の様子.

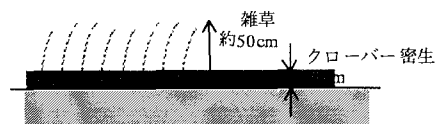
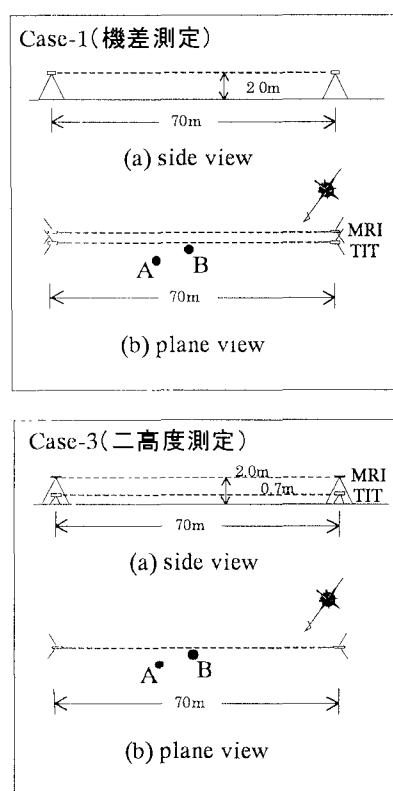
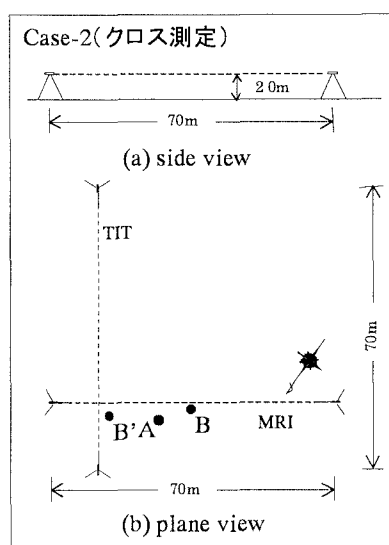


図-2 測定場所の草の様子.



A: Profiles of temp., hum. and wind
B, B': Sonic anemometer

図-3 測定機器配置図.

2. 実験方法

1998年9月8日から1998年9月11日にかけて、東京都江東区有明にある草地(図-1の矢印)において測定を行った。この場所は埋め立てられた土地が広い空き地になっており(写真-1)、フラックス測定には十分広く(フェッチは150m以上)水平である。また図-2に示すように、地表面は平均高さ15cmのクローバーによって密に覆われ、さらに50cmほどの草も測定場所の半分以上を覆っている。

シンチロメーターの測定は大きく分けて、三種類の測定

を行った(図-3)。Case-1(機差測定)は、二つのシンチロメーターの機差を測定するために、二組のシンチロメーターのパスを同高度かつ平行(パス間の距離は50cm)に設置して行った。Case-2(クロス測定)では、二組のパスを同高度でクロスさせ、両者に差異がでるかどうかが調べた。Case-3(二高度測定)は、二組のパスを同じ場所に高度を変えて設置した。この方法によって領域平均の d を求める。三ケースの測定日時、シンチロメーターのパス高さ、パス間の距離などを表-1にまとめる。なお、便宜上二つのシンチロメーターをTITとMRIと呼んで区別する。通常シ

表-1 各測定ケースの目的等.

目的	測定日時	地面からの測定高度	パス
Case-1 機差測定	9/8 14:30 -	TIT 2.0m	平行
	9/9 10:30	MRI 2.0m	
Case-2 クロス測定	9/10 14:00 -	TIT 2.0m	直行
	9/11 15:00	MRI 2.0m	
Case-3 二高度測定よりd算出	9/9 12:00 -	TIT 0.7m	平行
	9/10 12:00	MRI 2.0m	

ンチロメーターの測定では、測定前にバックグラウンド値を測定しなければならないが、Case-1とCase-3では、互いのレーザービームの影響を受け合うため、レーザービームを出した状態でバックグラウンドの測定を行った。またシンチロメーターから得られた結果をより多角的に検討するために、超音波風速計²台によるフラックス測定(図-3の記号B)、風速計、温湿度計を用いたプロファイル測定(図-3の記号A)を同時に行った。用いた測定機器については表-2に示す。

3. シンチロメーターについて

(1)シンチロメーターの測定原理

大気中に発信されたレーザーは光路中の乱れによって屈折され、受信器における光の強度は変動する。シンチロメーター(Scintec社、SLS20)は二本のレーザーを発信させ、受信強度の分散から屈折率の構造パラメータ C_n^2 、両者の相関から乱れの内部スケール l_0 を求める。大気中では屈折率の変動は主に温度変動に依存すると考えられ、 C_n^2 は温度の構造パラメータ C_T^2 に換算できる。また l_0 はコロモゴロフのマイクロスケールに比例し消散率 ε に換算できる。無次元化した C_T^2 と ε はモニン・オブコフ則に従い、基本スケール(u_* :摩擦速度, T_* :摩擦温度, L :モニン・オブコフ長さ)を用いて、下記の経験関数(Thiermann²¹)によって記述される。安定の時、

$$\varepsilon k(z-d)u_*^{-3} = \{1 + 4\frac{z-d}{L} + 16(\frac{z-d}{L})^2\}^{1/2} \quad (1)$$

$$C_T^2\{k(z-d)\}^{2/3}T_*^{-2} = 4\beta_1\{1 + 7\frac{z-d}{L} + 20(\frac{z-d}{L})^2\}^{1/3} \quad (2)$$

不安定の時、

$$\varepsilon k(z-d)u_*^{-3} = (1 - 3\frac{z-d}{L})^{-1} - \frac{z-d}{L} \quad (3)$$

$$C_T^2\{k(z-d)\}^{2/3}T_*^{-2} = 4\beta_1\{1 - 7\frac{z-d}{L} + 75(\frac{z-d}{L})^2\}^{-1/3} \quad (4)$$

ここで、モニン・オブコフ長さは、

$$L = Tu_*^2 / kgT_* \quad (5)$$

ここに、 z :パスの設置高さ、 d :ゼロ面変位、 k :カルマン定数(=0.4)、 β_1 :Obukhov-corsin定数(=0.86)である。収束計算を行うことにより上式を満たす u_* 、 T_* が決定さ

表-2 測定項目、使用機器、データ処理の方法.

測定項目	使用機器	地面からの測定高度	データ処理方法
顕熱フラックス	シンチロメーター2台 (Scintec社、SLS20)	2m	サンプリングレート(6秒)、1分平均値出力、30分平均
顕熱フラックス	超音波風速温度計 (KAIJO Cor., TR-61AとTR-90AH)	1m	サンプリングレート(8Hz)、乱流平均化時間30分
風速	超音波風速温度計 (KAIJO Cor., TR-61AとTR-90AH)	1m	サンプリングレート(8Hz)
風速	三杯式風速計 (Campbell Scientific Inc.)	2m	サンプリングレート(1分)、30分平均
風向	矢羽式風向計 (Campbell Scientific Inc.)	4m	サンプリングレート(1分)、30分平均

れ、次式を用いて顕熱フラックス H と運動量フラックス M が決定される。

$$H = -c_p \rho u_* T_* \quad (6)$$

$$M = -\rho u_*^2 \quad (7)$$

ここで、 c_p : 空気定圧比熱、 ρ : 湿潤空気の密度である。上式からわかるように、 d の与え方によって結果として算出される顕熱フラックスが大きく変化するため、シンチロメーターを使用する際にあたっては d を慎重に与える必要がある。

(2)二高度のシンチロメーターより d を求める方法

地表付近では接地境界層が発達しており、地表のごく近傍を除いて、その内部ではフラックスが一定であると仮定できる。したがって、二高度のシンチロメーターで測定したフラックスは等しくなるはずであり、この条件を満たすように d を決定することができる。これが本研究で目的とする領域平均ゼロ面変位 d である。

本方法では、 d の値を1cm毎に変えていきながら、二組のシンチロメーターの設定高度 z と出力される C_T^2 、 ε をそれぞれ式(1)~(5)に与えて収束計算させ、 $H_1=H_2$ (添え字は高度の違いを示す。)となるとききの d を答えとする。本手法のアルゴリズムを図-4に示す。

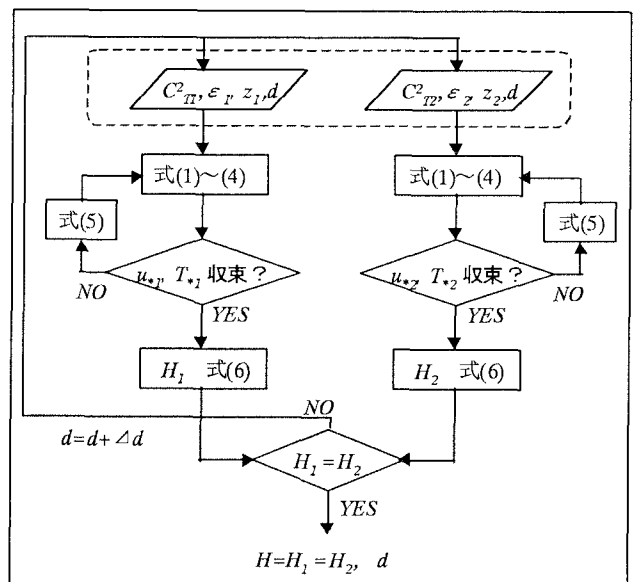


図-4 d 算定のアルゴリズム.

4. 測定結果と考察

(1) 機差測定 (Case-1) の結果と超音波風速計との比較

図-5 にシンチロメーターを隣接させた場合の顕熱フラックス H の日変化 (30 分平均値) を示す. 二つのシンチロメーター (TIT, MRI) は絶対値, 変動の仕方ともに非常によく一致しており, 超音波風速計 (図-3 の B) による測定結果 (sonic) と比較してもほぼ一致している. さらに時間解像度を上げ, 9 月 9 日 10:15 ~ 10:30 のデータについての 1 分平均値を図-6 に示した. 1 分統計値で見ると二組のシンチロメーターは非常によく一致しているが, 超音波風速計の値はシンチロメーターに比べて変動が大きくなっている. シンチロメーターがレーザー間の乱れを平均的に測定しているのに対し, 超音波風速計は一点での計測であるため局所的な乱れに反応しやすいことによりこのよ

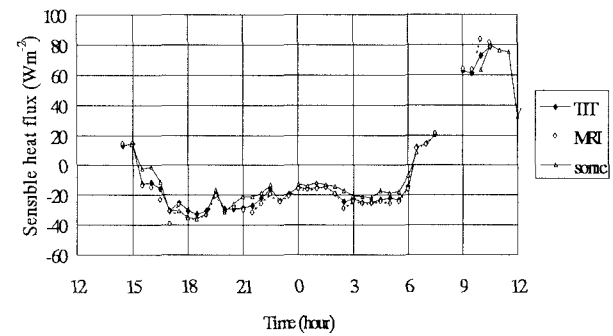


図-5 顕熱フラックスの機差測定結果 (30 分平均値).

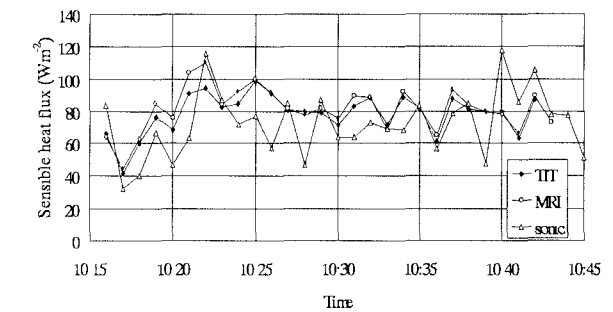


図-6 図-5 に同じ (1 分平均値).

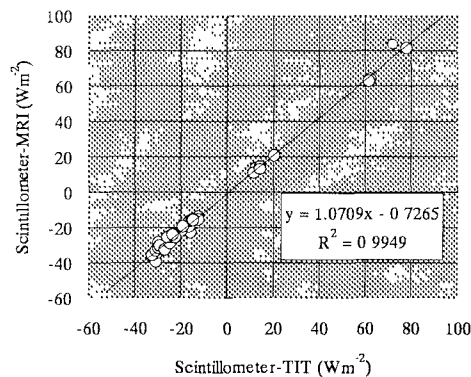


図-7 機差相関図.

うなばらつきが生じたと考えられる. 今回測定を行った場所は水平方向に一樣な場所であるため, 30 分間の平均をとると乱流構造が十分に平均化されシンチロメーターと超音波風速計には差が生じなくなるようである.

後の二高度測定で必要となる機差補正のため二機のシンチロメーターによる H の相関を示したところ (図-7) 両者の相関は 0.9849 であった. 図中に示した数式を用いて今後両者の機差を補正する. なおここでは, $d = 15\text{cm}$ として結果を示しているが, シンチロメーターのパスを高く設置してある (地上から 2m) ので d に対する感度が鈍く結果にはほとんど影響しない (絶対値で数 Wm^{-2} , 機差補正で 0.5 Wm^{-2} 未満). シンチロメーターのパスの高さと d の関係が測定結果に及ぼす影響については後で詳述する.

(2) クロス計測 (Case-2) の結果と風向との関係

シンチロメーターや超音波風速計は原理的にプローブ間の乱れを計測しており, テイラーの凍結乱流仮説を考えると, 上流側から移流してくる乱れを定点に固定されたプローブで測定していることになる. したがって図-8 の概念図に示すように, 超音波風速計が測定対象とするのは風上方向の線的な空間になり局所的な外乱の影響を受けやすい. 一方シンチロメーターの場合はパス間の距離を大きく取れるため, 風向がパスに対して直角であれば (Wind A の場合), パスを通過する渦を平面的に捉えることができる. またパスの軸方向に風が吹けば (Wind B の場合), 超音波風速計と同様, 線的な測定領域をもつ. このような考えに基づき, シンチロメーターの光路をクロスさせた測定の結果について風向との対応を中心に調べた. 図-9 に結果を示す. 二組のシンチロメーターおよび超音波風速計 (配置は図-3 の B') から得られた H の 30 分平均値はほぼ同じ挙動を示している. 図-10 はこのときの風向の時間変化であ

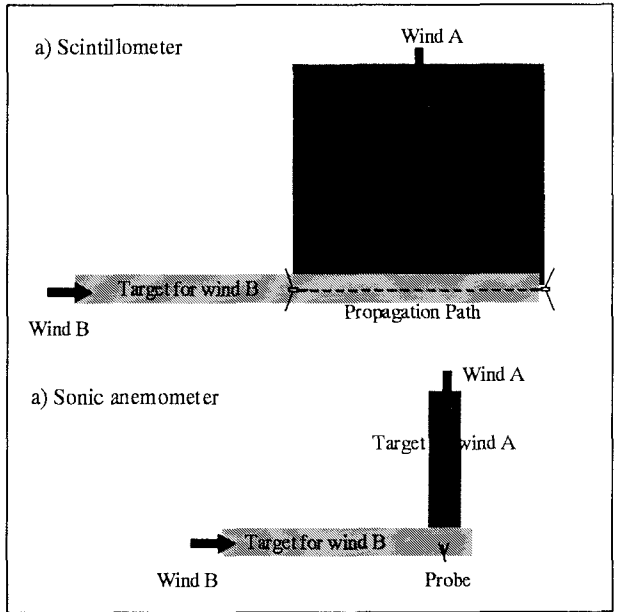


図-8 測定領域の風向による依存性概念図.

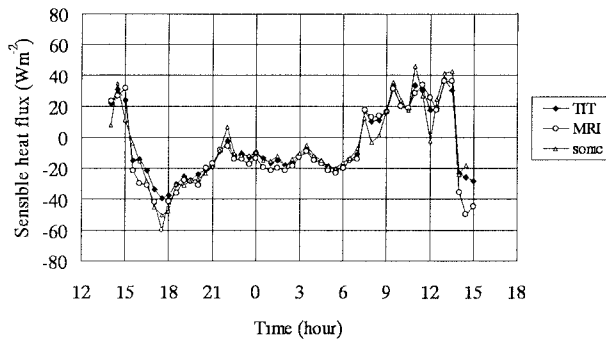


図-9 クロス測定時の顕熱フラックス結果 (30 分平均値).

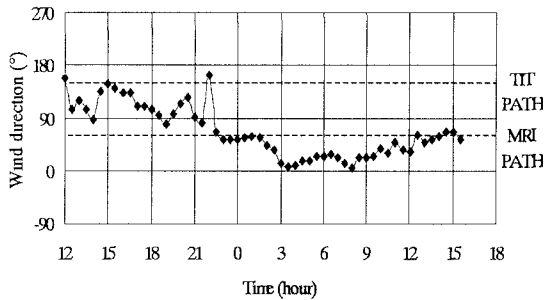


図-10 風向の時間変化.

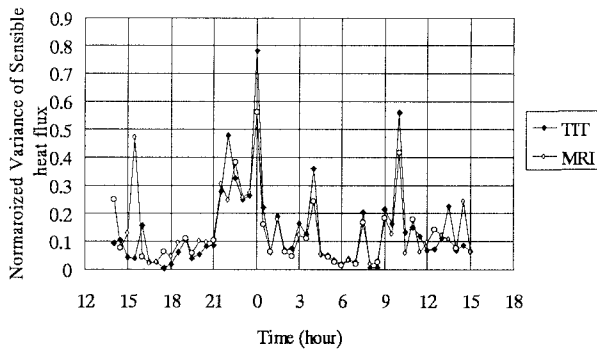


図-11 顕熱フラックス H の絶対値で無次元化した H の分散値の時間変化.

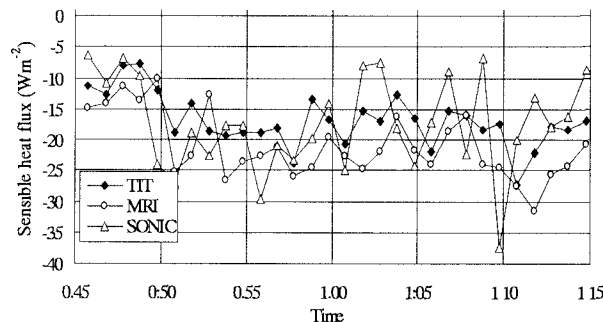


図-12 図-8 に同じ (1 分平均値).

る. 図中の点線はそれぞれのシンチロメーターのパスの軸方向を示している. 風向とパスの軸方向が一致する時間帯に注目しても特徴的な変化は見られず, またデータのばらつきを示す分散値との比較(図-11)についても関係は見られなかった. そこで(1)での考察と同様, 1分ごとの平均値について調べた. 図-12は9月11日の0:45~1:15の1分平均値の時間変化である. シンチロメーターに比べて超

音波風速計の変動が大きいのはCase-1と同じ理由で説明される. しかし, Case-1の結果と比較して異なるのは, 二組のシンチロメーターの変動も一致しなくなっている点である. この現象は他の時間帯にも多く見られ, 明らかに両者の相関が小さい. 差異が大きくなることについて, 風向や風速との相関を調べたが原因の特定はできなかった.

今回行ったクロス測定の結果, 平均化時間を30分とればパスの方向には無関係に H の値はほぼ一致する. しかし1分平均値では両者の挙動に有意な差異が認められる. 30分平均値で差が生じなかった理由としては, ①測定領域が均一なためパスを通過する乱れが均質だった, ②パス間の距離を70mと短く設定したため二組のシンチロメーターの測定対象領域に顕著な差がなかった, ③風向が不安定だったため平均化時間(30分)を通して風が一定方向から吹き続けることが少なかった, などが挙げられる. 今回の測定では測定値の風向依存性について明確に抽出できなかったが, 図-8で示したフェッチを考えると, 風向に対して垂直にパスを設定する方法がよりシンチロメーターの利点を生かした使用法であるといえる.

(3) 二高度測定結果 (Case-3) と d との関係

図-13に二高度で測定したシンチロメーターによる H の結果を示す. (1)に示したシンチロメーターの結果と比べると, 両者には測定値のレベルに若干の違いが見られる. 本来ならば両者は一致するはずであるが, フラックスを求める算定式(1)~(4)中で d に適切な値を与えていないことが, このような結果のずれを生み出している(図は $d=0m$ を与えた結果である). そこで d を変化させることにより, 両者の H がどのように変化するかについて調べた. 図-4に示したアルゴリズムに従い, 9月9日12:00のデータを用いて d を変化させながら H を再計算した結果が図-14である. 両者はパスの設置高度の違い (TITは70cm, MRIは200cm) が原因で, d の増加に伴って差異が縮まり, ある d (この場合は34cm) で両者の H は同じ値を示す. この時の d が神田ほか¹⁾によって提案された二組のシンチロメーターによるゼロ面変位推定値である. また図より, 設置高度の低いシンチロメーター (TIT) の方が d に対する H の変化の勾配が大きいことがわかる. これは H

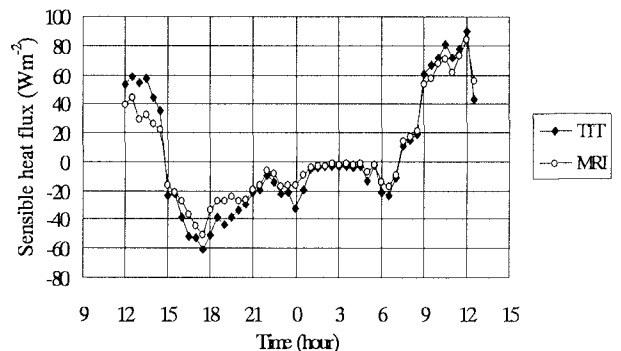


図-13 二高度測定での顕熱フラックスの変化.

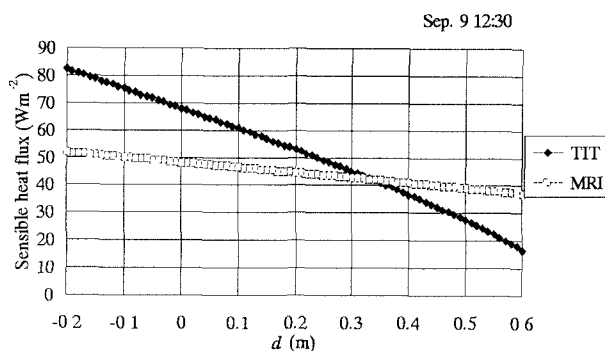


図-14 顕熱フラックスの d に対する変化曲線。

の算定式(1)~(4)からも分かることだが、設置高度 z を予想される d に近づけたほうが同じ d の変化に対する感度が大きくなるからである(この測定条件では d が10cm違うと H は約 10Wm^{-2} 変化する)。逆に設置高度が高いシンチロメーター(MRI)は d に対する感度が鈍り、10cmの d の誤差に対して H は $2\text{--}3\text{Wm}^{-2}$ 変化するだけである。したがって上記のように両者を組み合わせ、 d に対する変化曲線が明確に交わるようにすることが、 d の推定精度を上げる。次に測定機器の誤差による d の感度を調べた。図-7から求めた標準偏差から誤差を $\pm 2.5\text{Wm}^{-2}$ とすると、9月9日12:30(図-14の時間帯)における d の精度は $\pm 4\text{cm}$ である。

図-15は、上記の方法を用いて求めた d の時間変化である。 d の時間変動の傾向について特徴的なのは、1日目と比較して2日目の日中平均値が明らかに小さいことである。 d と大気不安定度との関係を調べたところ(図-16)、大気不安定であるほど d の値は小さくなる傾向がある。不安定な状態では浮力の作用によりキャノピー上方の運動量が内部まで輸送されやすくなり、シアを生み出す抵抗体として草の影響が小さくなるため、 d の値が小さくなったと考えられる。

d の24時間平均値を求めると29cmの値が得られた。図-2に示したように、測定サイトを密に地面を覆うクローバーの草丈が15cmでありさらに約50cmの草がまばらに生えていたことを考えると、この値は妥当な値である。この d が正しいかどうかを検証するには熱線風速計による精緻なプロファイル測定が必要となるが今回の測定ではチェックが行えなかったため、参考までに超音波風速計を併用する方法(詳細については神田ほか¹⁾を参照されたい)で d のチェックを行った。その結果24時間平均値として $d = 33\text{cm}$ が得られた。二組のシンチロメーターから求めた値とは4cmの差があるが、この差異は d の推定精度範囲内である。

今回、草丈そのものが小さいという幾何学的な理由から d が H に与える影響は10数%であったが、都市のようなキャノピーでは d の与え方によって得られる H は数倍変わる(神田ほか¹⁾)。本手法は都市のような不均一性のあるキャノピーにおいて空間平均値としての d を求められる

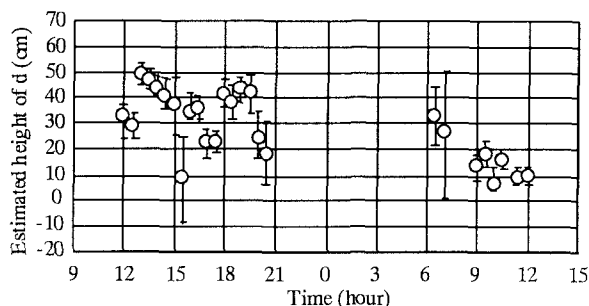


図-15 領域平均 d の時間変化。

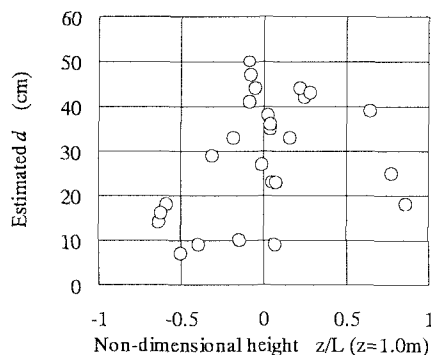


図-16 d と無次元高さの関係。

利点があり、今後本手法を実際の都市や森林に適用し、既存の推定法によって得られる d との比較検討を行っていく必要がある。

5. 結論

本研究で得られた主要な結果は以下の通りである。

- 1) シンチロメーターのパスを隣接させた場合、両者の挙動は細かい時間変動まで非常によく一致した。また超音波風速計とも良好な対応関係が得られた。
- 2) シンチロメーターの出力値と風向の間には特に関係は見いだせなかった。30分の平均時間をとれば両者はよく一致したが、1分平均の変動を見る限りでは、パスを平行にした場合に比べ両者に差異があることがよく認められた。
- 3) 二高度に設置したシンチロメーターの組み合わせより推定された d は31.2cmであり、測定サイトの草丈を考慮すると妥当な値であると判断できた。

謝辞: 本研究は科学技術振興事業団から財政的補助を受けました。また研究を実施するにあたって、東京都東京港防災事務所に、測定場所を提供して頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 神田学, 高柳百合子, 横山仁, 森脇亮: 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, Vol.10, pp.329-336, 1997.
- 2) Thiermann, V.: The measurement of turbulent surface-layer fluxes by use of bichromatic scintillation, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.58, pp.367-389, 1992.

(1998. 9. 30 受付)