
シンクロメータによる 都市域の顕熱フラックス評価に関する研究

(課題番号：12650601)

平成12・13年度科学研究費補助金
基盤研究(C)(2)

研究成果報告書

平成14年3月

研究代表者 成田 健一

(日本工業大学工学部・教授)

研究目的と背景

本研究は、地表層乱流測定装置（シンチロメータ）の性能評価を行い、建築空間における乱流フラックス、とりわけ顕熱フラックスの定量的評価方法の確立をめざすものである。

地表面の改変による乱流フラックスの変化は、都市熱環境形成の重要な要因であり、各種地表面におけるフラックスの定量的な評価が今後の都市構造のあり方を考えるための重要なポイントである。現在、都市気候のモデリングが一方で進められているが、その検証を行うための適切な実測データが少なく、この分野の進展の大きな障害となっている。都市は、複雑な形状を持つため、既存の大気環境学的な測定手法の適用が難しく、明確な空間代表性を得るという点においては、シンチロメータによる測定が現状では唯一の信頼できるものとなっている。

シンチロメータは、レーザー光を使った乱流計測器で、送受信器間の光路中の乱流による屈折率の変動から乱流による、運動量フラックス・顕熱フラックス・エネルギー消散率などを計測するものである。現在、このような乱流フラックスを空間平均として求められる測器はこのシンチロメータしかない。環境共生をめざした都市のあり方を考える重要な視点として、ヒートアイランドに代表される熱環境の制御が挙げられる。これまで街路空間や緑地を対象として地表面熱収支の研究を続けてきたが、緑化や透水性舗装などの施策あるいは都市内河川が周辺の熱環境にどのような効果をもたらすかを定量的に評価するためには、本測器が唯一かつ不可欠のものであるといえる。

しかしながら、シンチロメータの歴史はまだ浅く、建築空間のフラックス評価の手法が確立しているとは言い難い。すなわち、本来十分なフェッチを有する地表面における大気境界層理論を出発点として開発された測器であるため、光の揺らぎに関する構造関数を乱流フラックスに変換する過程において、一種の経験式が適用されており、その部分が都市域のような複雑な形状を有する境界層にどの程度適用可能であるかは、種々の既存の測定方法との比較実験を行い、検証していくことが必要である。また、測定に際しては、いわゆる地面修正量を含んだ実質的な測定高度を入力する必要があるとあり、複雑な粗度を有する地表面では、この測定高度の決定がネックとなる。これまで、渦相関など他の測定手法と比較し、例えば日平均値が等しくなるように調整する試みや、シンチロメータでの2高度同時測定から両者のフラックスが等しくなる共通の地面修正量を求める試みが報告されているが、必ずしも十分とはいえない。

筆者は、これまで建物壁面からの顕熱フラックスの評価をめざした一連の研究を10年程続けてきており、特に建物外表面の対流熱伝達率の定量化に独自の実験方法を導入しながら、風洞実験と実大スケールの長期観測に取り組んできた。その結果、自然風下における強制対流熱伝達の評価にはほぼ見通しを得たが、建物表面が高温化した場合に寄与が大きくなる、自然対流成分の評価が課題として残されている。伝熱工学分野で求められている既存の実験式は、無次元式で表現されているものの、実際にはスケールによる適用限界があり、建築スケールでの自然対流の評価、あるいは強制対流との共存条件下における対流熱伝達率の振る舞いは、十分に把握されていない。本研究では、これまで世界的にも例がないシンチロメータによる建物鉛直壁面からの顕熱フラックス評価を試みることを念頭に、ミラーを用いたパス変更システムの確立とその測定可能性の検証をもう一つの目的としている。

また、このようなミラーシステムによりパス設定に自由度がでることは、限定したエリア

においてより空間代表性を有するフラックス測定の実現が可能となることを意味する。現在の測器では、パス間距離の設定が 50m から 250m（推奨距離は 100m から 200m）となっているが、V 字あるいは W 字などのパス設定が可能となれば、より狭い測定対象エリアへの適用も可能となる。

研究組織

研究代表者：成田健一（日本工業大学工学部教授）
研究協力者：吉田篤正（岡山大学工学部助教授）
植村明子（日本工業大学大学院生）
寒林晃弘（日本工業大学大学院生）
笹沼宏之（日本工業大学大学院生）

研究経費

平成 12 年度	3,200 千円
平成 13 年度	400 千円
合 計	3,600 千円

研究発表

（１）学会誌等

- 1) 成田健一・植村明子・三坂育正：都市気候に及ぼす河川水の熱的影響に関する実測研究－隅田川における熱収支と周辺影響の検討－、日本建築学会計画系論文集、第 545 号、pp.71-78、2001.7
- 2) 吉田伸治・村上周三・成田健一・ほか 4 名：団地内キャニオン空間内における夏期の屋外温熱環境の実測、日本建築学会計画系論文集、第 552 号、pp.69-76、2002.2

（２）口頭発表

- 1) 寒林晃弘・成田健一・植村明子・三坂育正：隅田川が周辺の温熱環境に及ぼす効果の実測（その 2）水温の年変化と水面熱収支、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-1、pp.1119-1120、2000.9
- 2) 笹沼宏之・成田健一ほか 8 名：対流・放射・湿気連成解析における屋外環境共生空間の研究（その 12）－団地内実測による各種温熱環境パラメータの同定、D-1、pp.1139-1140、2000.9
- 3) 三坂育正・成田健一：緑化による屋外熱環境の緩和に関する研究－その 1－草地における熱収支特性の実測評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-1、pp.615-616、2000.9
- 4) 成田健一・植村明子・三坂育正：隅田川が周辺の温熱環境に及ぼす効果の実測（その 1）移動観測による影響範囲の把握、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-1 pp.1117-1118、2000.9
- 5) 三坂育正・成田健一ほか 3 名：ステップガーデンを有する建物周辺の温熱環境実測評価（その 2）－熱収支の解析結果－、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-1、pp.727-728、2001.9
- 6) 松嶋篤・片山忠久・成田健一・谷本潤・萩島理・三坂育正：ステップガーデンを有する建物とその周辺市街地の熱環境に関する実測と研究－その 1－測定概要とステップガーデン内外の温度分布特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、2002.9（印刷中）
- 7) 尾之上真弓・成田健一・三坂育正・片山忠久・谷本潤・萩島理：ステップガーデンを有する建物とその周辺市街地の熱環境に関する実測と研究－その 2－熱収支の解析結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、2002.9（印刷中）

- 8) 高野武将・成田健一・三上岳彦・本條毅・菅原広史・木村圭司：新宿御苑におけるクールアイランド現象の実測（その2）－芝生地・樹林地の温熱環境比較と市街地熱収支の把握－、日本建築学会大会学術講演梗概集、2002.9（印刷中）
- 9) 成田健一・三上岳彦・本條毅・菅原広史・木村圭司・高野武将：新宿御苑におけるクールアイランド現象の実測（その3）－芝生面の熱収支－、日本建築学会大会学術講演梗概集、2002.9（印刷中）

～目 次～

第1章 測定法の原理	1
1-1 シンチレーション法	
1-2 渦相関法	
第2章 一様な地表面における顕熱フラックス検証	7
2-1 都市内大規模公園の芝生広場	
2-2 都市内河川水面一隅田川	
2-3 水田（春季・夏季）	
2-4 水理実験センター圃場内草地面（春季・夏季）	
第3章 複雑な地表面における顕熱フラックス検証	44
3-1 集合住宅団地の棟間芝生面	
3-2 屋上緑化ステップガーデン	
第4章 シンチロメータの2高度測定による地面修正量の推定	59
4-1 都市内大規模公園の芝生広場	
4-2 グラウンド大規模草地面	
第5章 ミラー反射によるパス操作の基礎的検討	68
5-1 ミラー校正の室内実験	
5-2 ミラーを使用した顕熱フラックス測定の可能性検討のための屋外実測 （その1）－岡山市内運動公園グラウンドー	
5-3 ミラーを使用した顕熱フラックス測定の可能性検討のための屋外実測 （その2）－日本工業大学キャンパス内グラウンドー	
謝辞	88

第1章 測定法の原理

1-1 シンチレーション法

シンチロメータ【SLS20,SLS40-A:Scintec Atmosphärenmesstechnik AG】はレーザー光を用いた乱流計測装置で、超音波風速温度計による渦相関法とは異なり、発信器と受信器の間のパスに沿って空間平均化された乱流変動量を測定する。送信器から偏光面の異なる2本のレーザーを受信器に放出する。レーザーがパス間の乱流により屈折率の変動を起こすのをレーザー光の強度変動として捉える。さらに2本のレーザー光の屈折率相関から平均渦径が算出される。それらから、経験式により顕熱フラックスが算出される。レーザーの受信強度分散から、屈折率のパラメータ C_n^2 、2本のレーザーの相関から乱れのスケール 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るため、 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 はコル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、経験関数 (Thiermann) によって記述される。従って、接地境界層の相似理論が適用できることと、実質的な測定高度が何らかの方法で与えられることが条件となる。

<測定理論>

波長 λ 、波数 $K=2\pi/\lambda$ の光が伝播方向と直交する距離 d だけ離れている2つの光源から発せられ、この光が (パスに平行な) 同じ方向にある同距離 d だけ離れた直径 D の2つの検出器で独立に観測されたとすると、受信された光の強度の対数の共分散は次式で与えられる。

$$B_{12} = 4\pi^2 K^2 \int_0^R dx \int_0^\infty dk k \Phi_n(k) J_0(kd) \sin^2 \left[\frac{k^2 x(R-x)}{2KR} \right] \left[\frac{4J_1^2(kDx/(2R))}{(kDx/2R)^2} \right] \quad (1)$$

ここで、 R は伝播パス長さ、 x はパスに沿った座標、 Φ_n は屈折率の不均一さの3次元スペクトル、 J_0 、 J_1 は第一種のベッセル関数である。式(1)は、散乱が弱い、すなわち $B_{12} < 0.3$ の条件で成り立つ。そうでない場合は、飽和が起こる。この場合、測定された B_{12} は(1)式で示される値より小さくなる。

$d=0$ における(1)式は、同様に単一検出器における B_1 や B_2 の分散を表す。

(1)式の内側の積分は、パス重み付き関数である。パス長さ 100m で、内部スケールの値が 2mm、4mm、10mm の場合の分散と共分散のパス重み付き関数が図 A.1 と A.2 に示されている。

Φ_n は次の形をもつ

$$\Phi_n(k) = 0.033 C_n^2 k^{-1/3} f_\Phi(kl_0) \quad (2)$$

ここで C_n^2 は乱流の慣性小領域における屈折率の構造関数、 $f_\Phi(kl_0)$ は消散領域における屈折率変動の減衰を表す関数である。 f_Φ に関しては Hill のモデルが仮定されている。

(1)式に(2)式を代入すると、 C_n^2 と l_0 および測器の物理的大きさが既知の場合の共分散と分散が定義される。従って、 B_{12} と B_1 あるいは B_2 の測定から C_n^2 と l_0 を導くことができる。相関係数 $r = B_{12} / (B_1 B_2)^{1/2} = B_{12} / B_1 = B_{12} / B_2$ は l_0 だけの関数となる。パス長さ 100m の場合のこの関係が、図 A.3 に示されている。また、 B_1 や B_2 の分散は C_n^2 に比例するだけでなく l_0 にも依存する。これらの依存関係はファイル SLSCAL.XXX に含まれている。

B_i の対数強度の分散よりも強さの分散 σ^2 が測られるため、 σ^2 は B_i に変換されなければならない。

対数正規分布に関しては、次の関係が適用できる。

$$Bi = \frac{1}{4} \log \left(\frac{\sigma_i^2}{\langle I_i \rangle^2} + 1 \right) \quad (3)$$

次の式で、 C_n^2 から温度の構造関数 C_T^2 が計算できる。

$$C_T^2 = \left(\frac{T^2}{ap} \right)^2 C_n^2 \quad (4)$$

ここで、 T は気温 (K)、 p は気圧 (hPa) である。 a は波長 670nm において、 $7.89 \times 10^{-5} (\text{K/hPa})$ である。

(4) 式は、湿度変動の寄与を無視している。湿度変動の存在下では僅かな誤差が生じる。相似の理論から、 C_T^2 誤差はボーエン比の逆数 (潜熱フラックス/顕熱フラックス) の 3% 程度と見積もられる。この誤差は、超音波温度計の湿度誤差の半分程度である。

内部スケール l_0 は、乱流の運動エネルギー消散率 ε に密接に関係している：

$$\varepsilon = \nu^3 \left(\frac{7.4}{l_0} \right)^4 \quad (5)$$

ここで、 ν は空気の動粘性係数 (m^2/s) で、温度 T (K) と空気の密度 ρ (kg/m^3) から次式で計算される

$$\nu = \frac{1.718 + 0.0049(T - 273.15)}{\rho} \quad (6)$$

モニン-オブコフの相似則を用いることにより、 C_T^2 と ε から熱の乱流フラックス Q_0 (単位 K m/s) と

モーメント- u_*^2 (m^2/s^2) が計算できる。摩擦温度 $T_* = -Q_0 / u_*$ 、モニン-オブコフ長さ $L = Tu_*^2 / kgT_*$ 、

地表からの高さ z 、カルマン定数 $k=0.4$ 、重力加速度 $g=9.81$ (m/s^2)、Obkhov-Corrin 定数 $\beta_1=0.86$ とすると、次の半経験式が非常に高い精度で成立する。

$z/L < 0$ (不安定) のとき、

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

$$\varepsilon k(z-d) u_*^{-3} = \left(1 - 3 \frac{z-d}{L} \right)^{-1} - \frac{z-d}{L} \quad (8)$$

$z/L > 0$ (安定) のとき、

$$C_T^2 \{k(z-d)\}^{2/3} T_*^{-2} = 4\beta_1 \left\{ 1 + 7 \frac{z-d}{L} + 20 \left(\frac{z-d}{L} \right)^2 \right\}^{1/3} \quad (9)$$

$$\varepsilon k(z-d)u_*^{-3} = \left\{ 1 + 4 \frac{z-d}{L} + 16 \left(\frac{z-d}{L} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (10)$$

収束計算を行うことにより (7)、(8)、(9)、(10) 式をみたす u_* 、 T_* が決定され、次式を用いて顕熱フラックス H (W/m²) と運動量フラックス M (kg/ms²) が決定される。

$$H = -C_p \rho u_* T_* \quad (11)$$

$$M = -\rho u_*^2 \quad (12)$$

C_p : 空気の定圧比熱[J/kg·h]

ρ : 湿潤空気の密度[kg/m³]

Fig. A.1

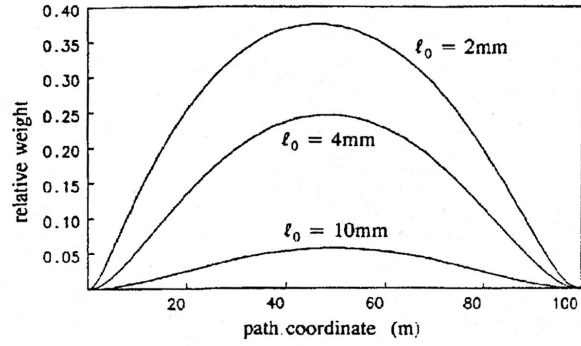


Fig. A.2

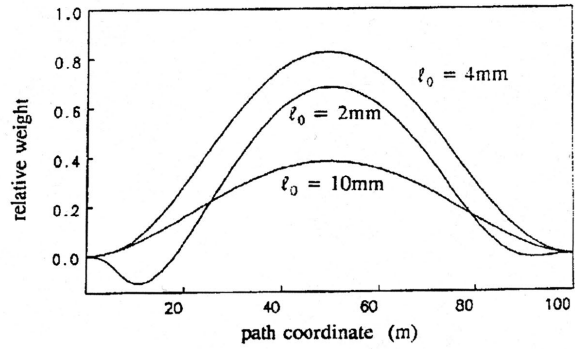
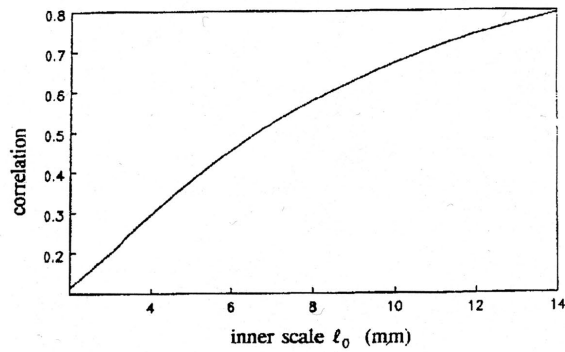
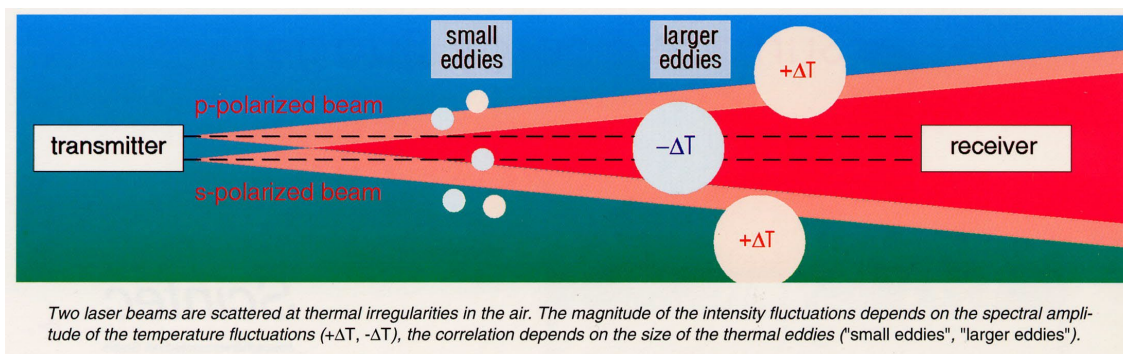


Fig. A.3



<使用したシンチロメータの仕様>

測定範囲	屈折率変動の構造関数定数 C_n^2	:	$1 \times 10^{-16} \sim 3 \times 10^{-12}$	($\text{m}^{-2/3}$)
	内部スケール l_0	:	2~16	(mm)
	温度変動の構造関数定数 C_T^2	:	$1 \times 10^{-4} \sim 3$	($\text{Km}^{-2/3}$)
	エネルギー消散率 ε	:	$2 \times 10^{-4} \sim 1$	(m^2s^{-3})
	顕熱フラックス	:	2~600 (Wm ⁻² 不安定状態) -2~-120 (Wm ⁻² 安定状態)	
	運動フラックス	:	$4 \times 10^{-3} \sim 1.2$	(Nm ⁻²)
仕様	レーザー光源	:	670nm 1mW	(クラス 3A)
	変調周波数	:	20kHz	
	ビームの広がり	:	5mrad	



1-2 渦相関法

渦相関法とは、対流運動による実在量の鉛直輸送量を評価する方法で、瞬時的な値を基礎としている。測器をおいたレベルを渦が通過するときに渦の特定を測り、流束を直接求めようとするものである。1つの渦が含む特性、すなわち渦とともに運ばれる特性とは、その質量単位体積を考えればその密度 (ρ)、鉛直速度 (w) および渦が有する任意の実在量の容量 (s) である。 ρ を一定とみなして、 w 、 s をそれぞれ平均 (バー) と変動成分 (ダッシュ) に分けると、実在量の平均密度 (S) は、

$$S = \rho \{ (\bar{w} + w') (\bar{s} + s') \}$$

と表せる。さらにこれを展開すると、

$$S = \rho (\bar{w}\bar{s} + \bar{w}s' + w'\bar{s} + w's')$$

となり、ここで、 $\bar{w}' = \bar{s}' = 0$ かつ、 $\bar{w} = 0$ であるから、

$$S = \overline{\rho w' s'}$$

となる。これが渦相関法の基礎となる式である。

ここで扱うのは、熱流に関する式であるので、顕熱流束 H をこの式を用いて表すと、

$$H = C_p \overline{\rho w' t'}$$

H : 顕熱流束 [W/m²] C_p : 空気の定圧比熱 [J/kg・h] ρ : 空気の密度 [kg/m³]

w' : 鉛直風の変動成分 [m/s] t' : 温度の変動成分 [K]

・鉛直風速の変動成分(w')の算定 空気の量の変動を考えると広域な範囲である場合、連続性からしてある時間以上の期間では上方に動く空気の量と下方に動く空気の量は同量となる。つまり、鉛直風速の平均 ($\bar{w}$) は、0 ということになる。よってここでは実在量を評価するため鉛直風速の瞬時値 (w) を平均風速 ($\bar{w}$) との差、変動成分 (w') として用いる。

$$w' = w - \bar{w}$$

・温度の変動成分(t')の算定 鉛直風速の変動成分と同様に、温度に対する変動成分を算定する。

$$t' = t - \bar{t}$$

この方法によって求めた顕熱流束は測器の測定高度の 1 点における値である。それゆえ、地表面状態が空間的に一様とみなされない場合には、空間代表性問題がでてくるので注意する必要がある。

＜超音波風向風速温度計の原理＞

図 1-1 のように P_1 および P_2 の位置に、向かい合わせに超音波パルスの送受信素子（ヘッド）を設置する。ヘッドから、一定時間ごとに交互に繰り返して超音波パルス信号を送受信する。これにより、一対の相互に逆方向の伝播測定ができる。

ヘッド間の距離を L 、音速を c 、スパン方向の風速を u 、 P_1 および P_2 から発信した場合の伝播時間をそれぞれ t_1 および t_2 とすれば、次式が成り立つ。

$$t_1 = \frac{L}{c+u}, \quad t_2 = \frac{L}{c-u}$$

したがって

$$u = \frac{L}{2} \cdot \frac{t_1 - t_2}{t_1 \cdot t_2}$$

となり、スパン方向の風速がもとまる。さらに次式から音速がわかり、気温変動 θ も測定できる。つまり、

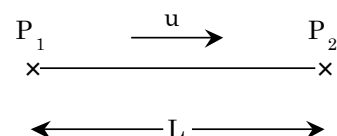


図 1-1 超音波風速温度計の原理

$$c = \frac{L}{2} \cdot \frac{t_1 + t_2}{t_1 \cdot t_2}$$

一方、音速と気温に関する次式が成り立つ。

$$c \doteq 20.067(\theta + \Theta)^{1/2}$$

$(\theta + \Theta)$: 気温[K] (θ : 温度変動[K] Θ : 平均温度[K]) c : 音速[m/s]

したがって近似的に θ 、

$$\theta \propto (\Theta/c) \triangleq c$$

音の伝播時間 t_1 、 t_2 は電氣的に計測される。

今回の測定で使用した三次元超音波風向風速温度計【TR-61,TR-90AH:KAIJO】プローブを図1－2に示す。

超音波風速温度計は、他の風速計と違い、風速の3成分が別々に取れるところに特徴がある。また、三杯風速計などのような駆動力がなく、「回り過ぎ」などの機械的な力で回転する風速計特有の誤差がなく、吹きはじめなどの応答に優れている。

このような超音波風速計の測定誤差要因としては、送受信機、および支持柱周辺気流の乱れの及ぼす影響が考えられる。これは、音波経路と風向が一致する場合、すなわち主風向が、送受信機を結ぶ線と重なるときに最も大きくなる。この問題は、送受信機が極めて小さくならない限り、解決は難しい。また、送受信機間の距離より小さい渦に関しては小さな値に、すなわち空間的に平均化されるという問題点もある。そのため細かい模型実験には使用できない。

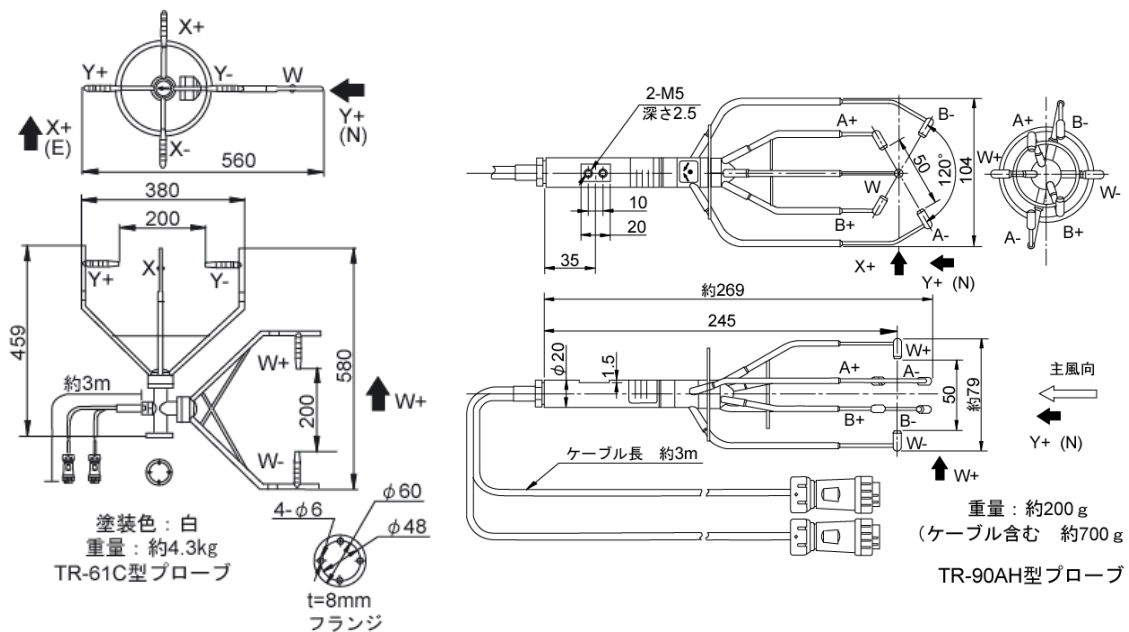


図1－2 超音波風速温度計のプローブ

第2章 一様な地表面における顕熱フラックス検証

2-1 都市内大規模公園の芝生広場

新宿御苑内芝生広場において2001年7月30日から8月6日の8日間測定を行った。図2-1に示すように、シンチロメータ2台(日工大・国立環境研)を平行に設置し、受信側に超音波風速温度計を設置した。気温を取得するため樹幹下に日射遮蔽小型温湿度記録計(SK-L200TH:佐藤計量器製作所)を設置した。シンチロメータは測定高度を日工大2.45m、国立環境研1.55mとし測定距離は200メートルとした。シンチロメータの2高度測定に関する考察は第4章で述べる。長短波放射収支計(EKO MR-40)で放射収支を、5cm スパンの3次元超音波風速温度計(KAIJO DA-600)と赤外吸収湿度変動計(KAIJO AH-300)を用いて顕熱と潜熱を渦相関法により求めた。測定高度は1.52m、サンプリング間隔は放射各成分1分毎、乱流成分は10Hz、評価時間は30分とした



図2-1 測器配置図



写真2-1. シンチロメータ設置状況(受信側から送信側を見る)



写真2-2. シンチロメータ（送信側）



写真2-3. 超音波風速温度計と湿度変動計



写真2-4. 受信側付近の周囲状況



写真2-5. 長短波放射収支計

（1）芝生面の熱収支とパラメータの同定

図2-2に短波放射(S)と長波放射(L)の下向き・上向きの各成分とアルベドの時間変化を示す。芝地のアルベドは平均0.22であった。上記の放射4成分から求めた正味放射量(R_n)、ならびに渦相関法(e.c.)による顕熱フラックス(H)と潜熱フラックス(LE)の変化を図2-3に示す。なお、地中伝導熱流束(G)はこれらの残差($R_n - H - LE$)として求めた。図2-6には、顕熱および潜熱と正味放射量の関係を併せて示したが、正味放射量の約2/3が潜熱に変換されており、顕熱はその1/4すなわち正味放射量の約1/6となっている。なお、顕熱は夜間マイナスとなるが、潜熱はほぼ終日プラスで推移している。

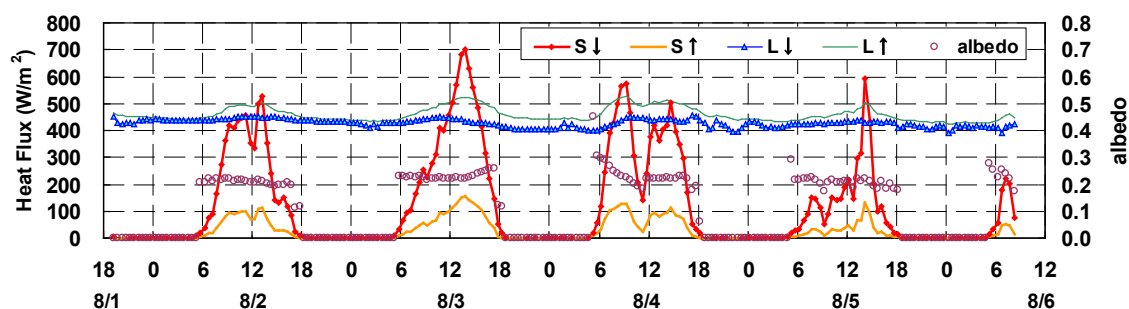


図2-2. 放射各成分とアルベドの時間変化

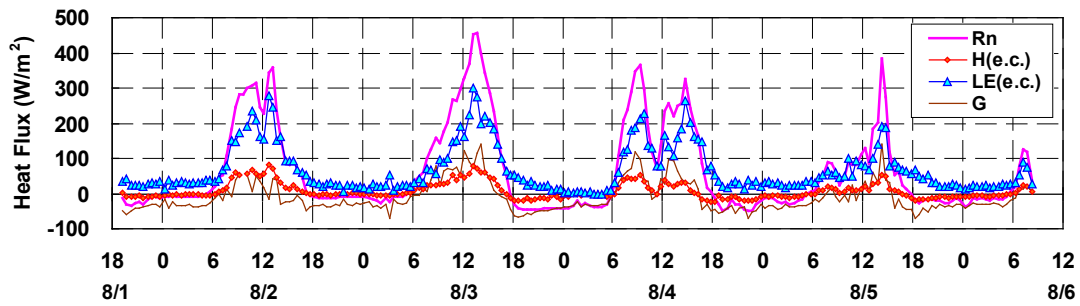


図 2-3. 熱収支各成分の時間変

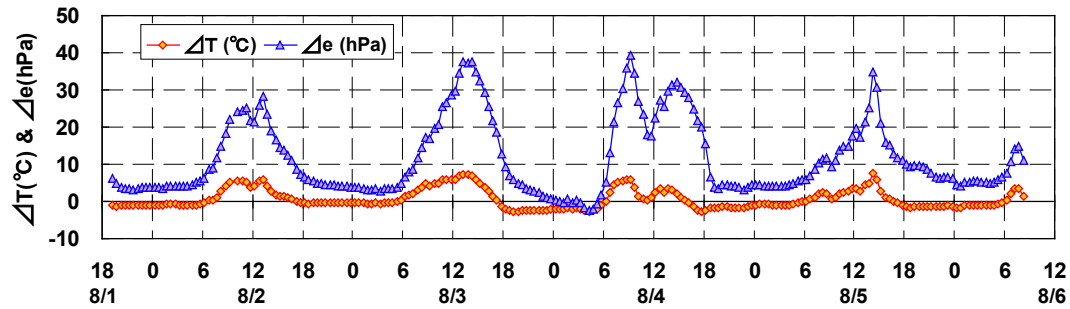


図 2-4. 温度差と蒸気圧差（表面－気層）の時間変

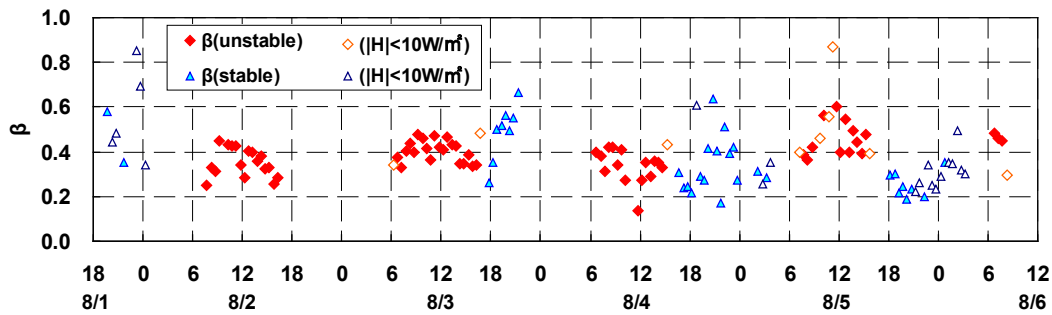


図 2-5. 蒸発効率の時間変

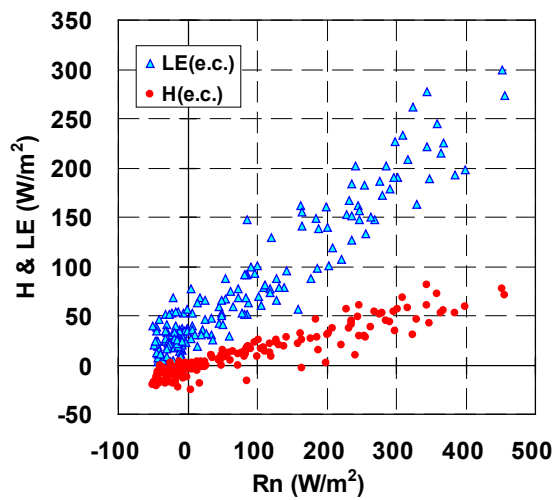


図 2-6. 顕熱・潜熱と正味放射量の関係

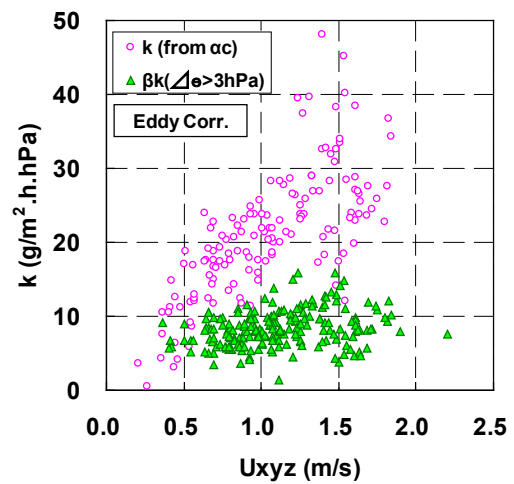


図 2-7. 物質伝達率と風速の関係

図 2-4 は芝生表面と空気層（高さ 1.52m）との温度差 ΔT と蒸気圧差 Δe の変化を示したもので、表面温度 (T_s) は放射率 $\varepsilon = 0.97$ を仮定し、次式から求めた。

$$L \uparrow = \varepsilon \sigma T_s^4 + (1 - \varepsilon) L \downarrow$$

Hを ΔT で割ることで対流熱伝達率(α_c)を、LEを Δe で割ることで物質伝達率(k)と蒸発効率(β)の積 βk を求めた。さらに熱伝達と物質伝達のアナロジーを仮定し、 α_c からkを求めた。これらと3次元合成風速(高さ 1.52m)との関係を示したのが図2-7である。これらの比として最終的に算定された蒸発効率 β の時間変化を、図2-5に示す。フラックスの絶対値が一定以上で比較的精度が高いと考えられる日中の値に注目すると、概ね0.4前後で推移している。

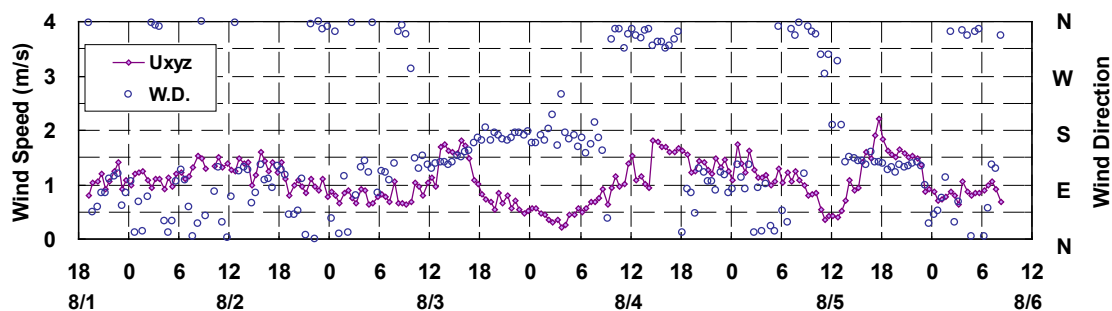


図2-8. 風向・風速の時間変化

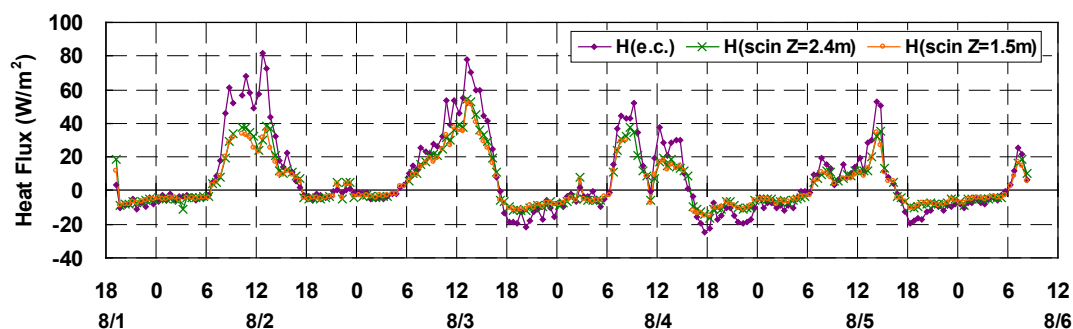


図2-9. 渦相関法とシンチレーション法による顕熱フラックスの時間変化

(2) 渦相関法とシンチレーション法の顕熱比較

2高度で測定したシンチレーション法による顕熱フラックスと渦相関法による顕熱フラックスの比較を図2-9に示す。2つの異なる高さにおけるシンチレーション法の結果は非常に良く一致している(図2-11)が、それらの値は、渦相関法による顕熱よりもかなり小さく、平均すると概ね2/3程度の値となっている(図2-10)。図2-12は、顕熱フラックスとして渦相関法の値を用いた場合とシンチレーション法を用いた場合の対流熱伝達率 α_c を比較したものである。顕熱の差を反映して α_c も約2/3の値となるが、バラツキはシンチレーション法の方がはるかに小さく、渦相関法よりも安定したフラックスが得られていることを示唆している。これはパス平均の値を測定するシンチレーション法の空間代表性における優位性が現れた結果と思われる。また図2-9によれば、両者の比率は8/2の日中と8/3の日中ではやや異なっている。これは図2-8の風向の変化と対応させると、両日の風向の違いに起因していると思われる。図2-13は渦相関法を適用した超音波風速計の乱れの強さ(T.I.)と風向の関係で、十分な芝地のフェッチが確保されるNW~NE~SEでは概ね0.2以下であるのに対し、それ以外の樹林地からの風向では乱れの強さが格段に大きくなっている。このような局所的な乱流性状の変化が渦相関法によるフラックスに影響したものと考えられる。なお、両日で図2-5の β に大きな差異が現れなかったのは、潜熱・顕熱の両方に上記の影響が同様に作用したためと思われる。

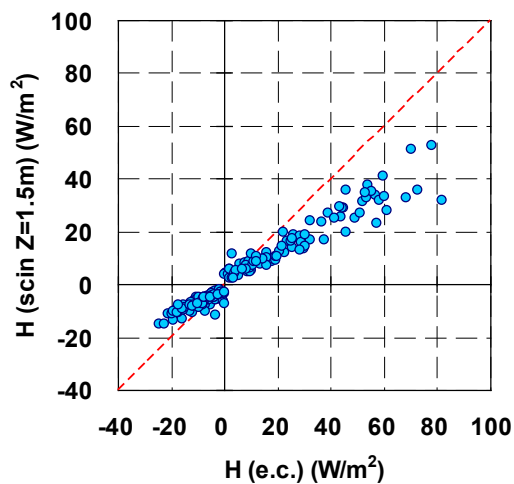


図 2-10. 渦相関法とシンチレーション法の比較

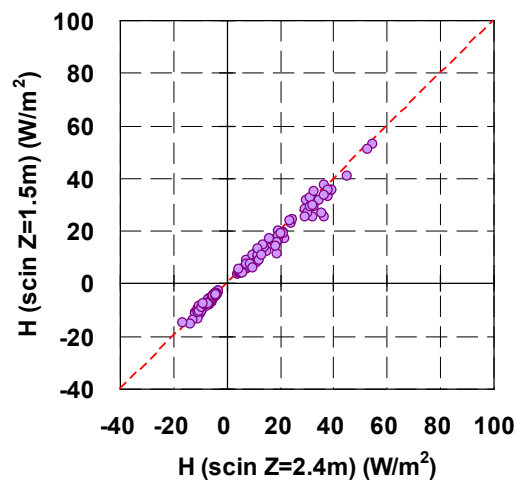


図 2-11. シンチレーション法の 2 高度比較

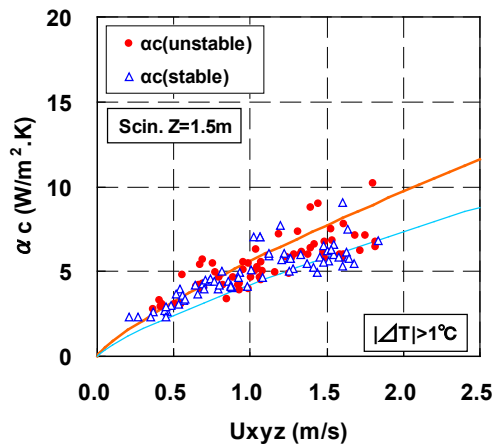
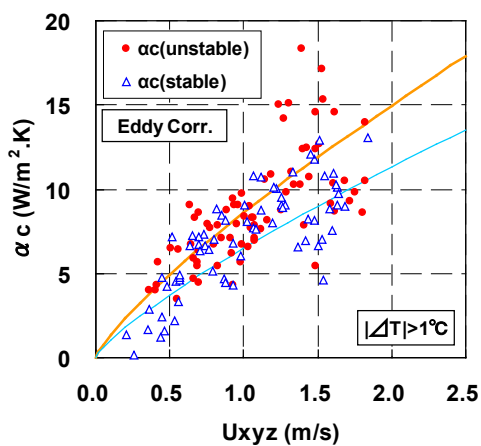


図 2-12. 渦相関法（左）とシンチレーション法（右）による対流熱伝達率の比較

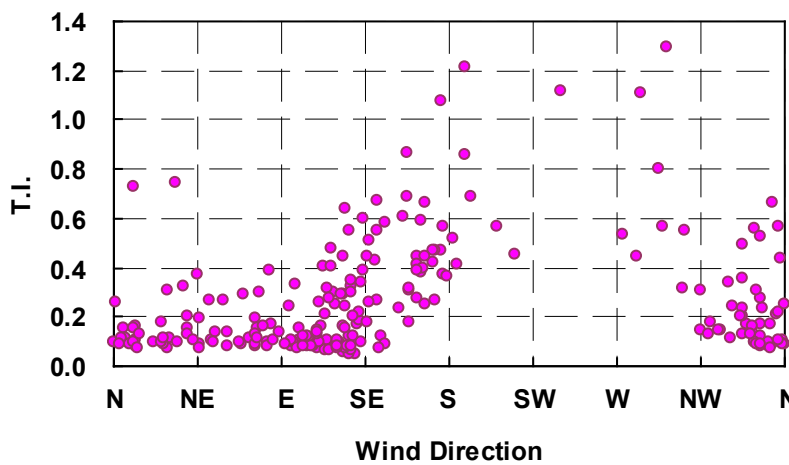


図 2-13. 超音波風速計の乱れの強さと風向の関係

2-2 都市内河川水面－隅田川

都市内の水面は、緑地同様、ヒートアイランドの緩和効果が期待されている地表面である。そこで、東京都内の都心部を貫流する隅田川を対象に、熱収支の観測を試みた。図2-14・15に測定対象エリア周辺の状況と測器の配置を示す。主な対象エリアは隅田川下流の永代橋周辺で、東京駅の東方約2kmに位置する。兩岸の親水テラスを含めた河道の幅は約200mで、河道軸はほぼ北北東－南南西方向となっている。平均水深は約4mで河口に近い感潮域のため、1m程度の水位変化がある。永代橋の上流側には西方より日本橋川が合流しており、また右岸側の箱崎地区では河川水を利用した地域冷暖房システムが稼動している。この永代橋エリアに加えて、その上流約2kmに位置する両国橋の周辺においても、補足的に実測を行った。なお、両エリアとも水上バスをはじめとする船舶の往来はかなり頻繁にある。実測期間は、1999年8月19日6時～20日18時である。

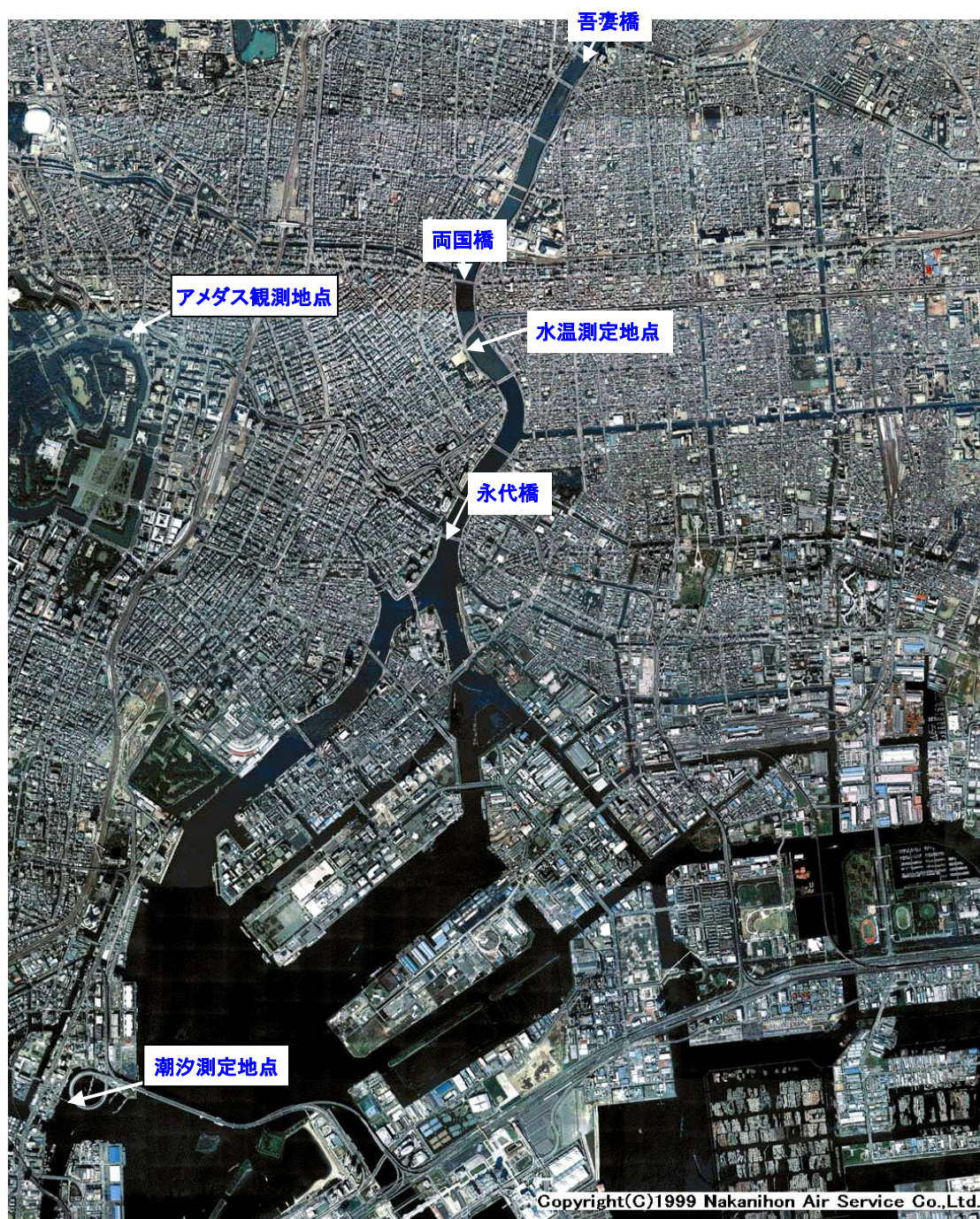


図2-14. 測定点の位置と周辺状況（航空写真）

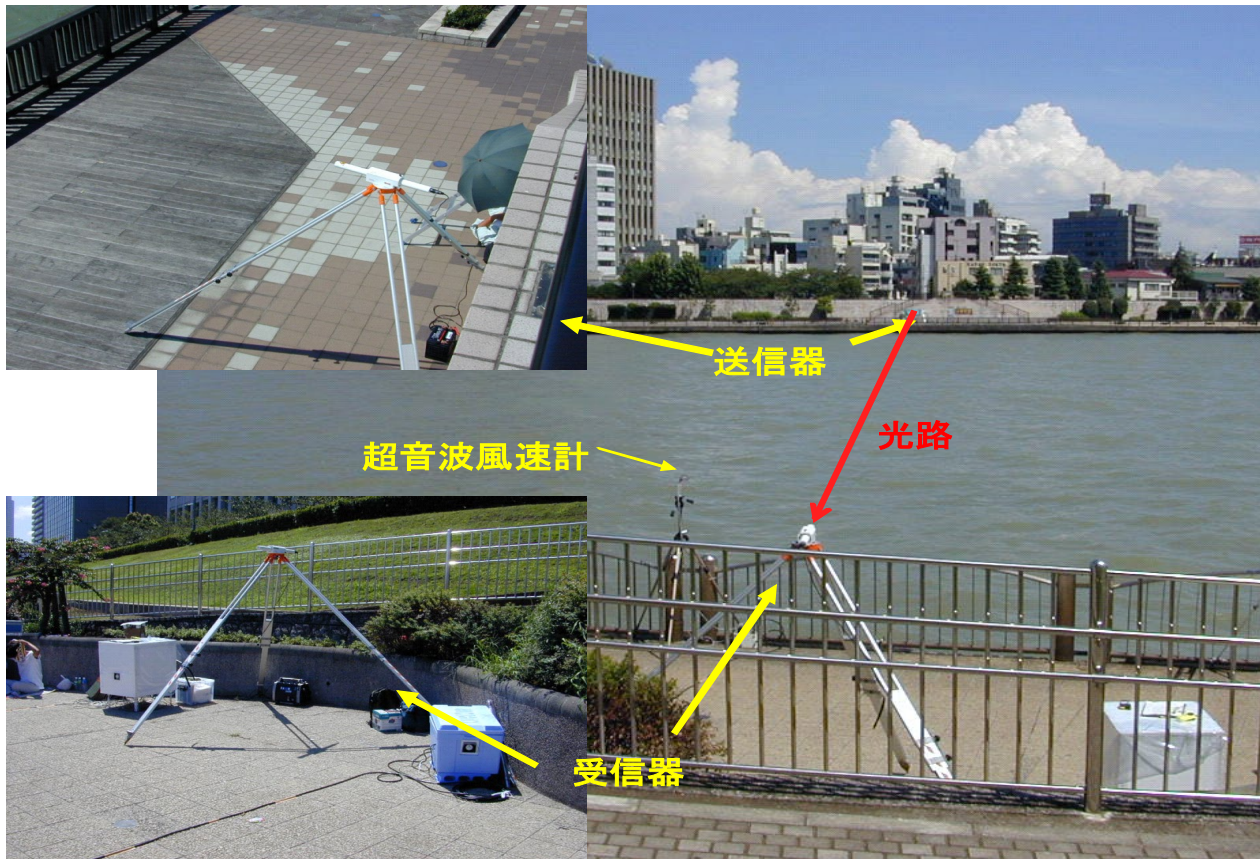
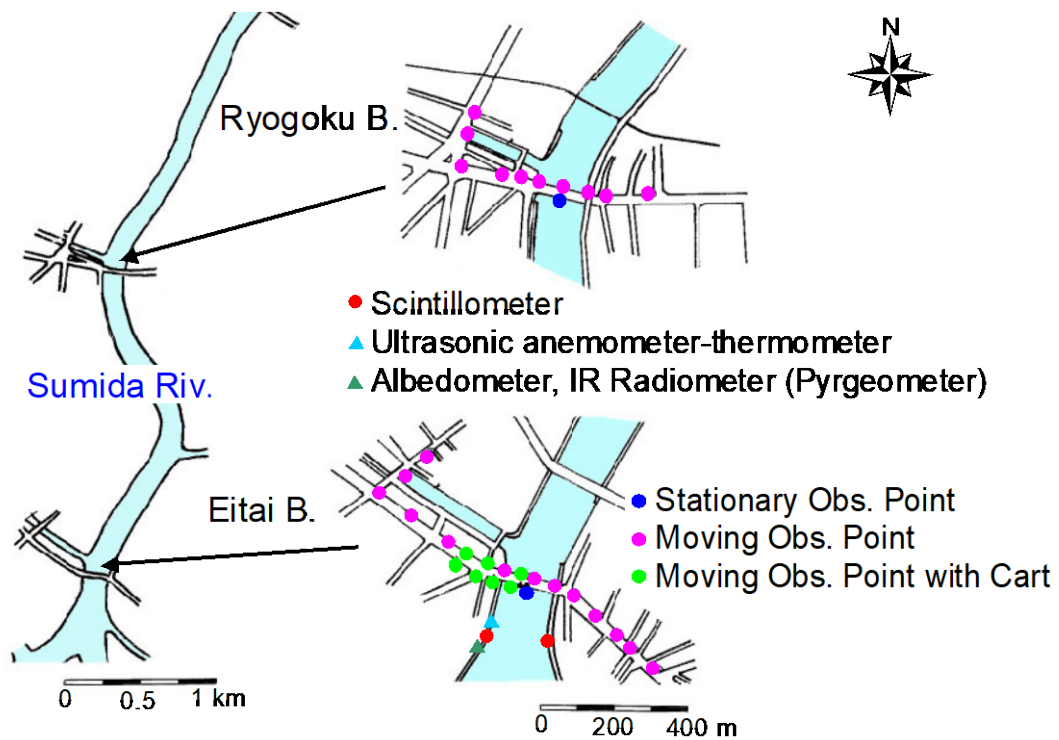


写真2-6. 測器の配置状況



Observation area and the arrangement of measuring apparatus

図2-15. 観測エリアと測器の配置状況

(1) 実測方法

永代橋の下流、約 50m の右岸側の親水テラスにおいて、全天日射量($Q\downarrow$)と反射日射量($Q\uparrow$)、下向き長波放射量($I\downarrow$)を測定した。 $Q\downarrow$ と $Q\uparrow$ は岸から水面上へ約 1m 突き出したアルベドメータで、 $I\downarrow$ はテラス上で精密赤外放射計で測定した。測定高度はテラス上約 1.5m で、 $Q\uparrow$ には水面からの反射の他にテラスからの反射も含まれる。ほぼ同じ位置の水際、高さ 1.5m に 5cm スパンの 3 次元超音波風速温度計を設置し、サンプリング周波数 10Hz でデータを収録した。さらに、左右兩岸のテラス上 2.50m にシンチロメータを設置し、河道と直交する方向にパスを設定した。パス間距離は 190m、水面からのパス高さは 3.07~3.90m である。

なお水温は、右岸テラスおよび永代橋中央から浮きにつけたサーミスタ温度計を水面に下ろして 30 分毎に測定した。また、流路内の水温分布をチェックする目的で橋上からの放射カメラ・スポット型放射温度計による測定も併用した。河川上の温湿度は、永代橋中央南側の定点（次項の移動観測の基準点を兼ねる）で測定した値を代表値とした。橋上定点の高さは、水面から約 10m である。

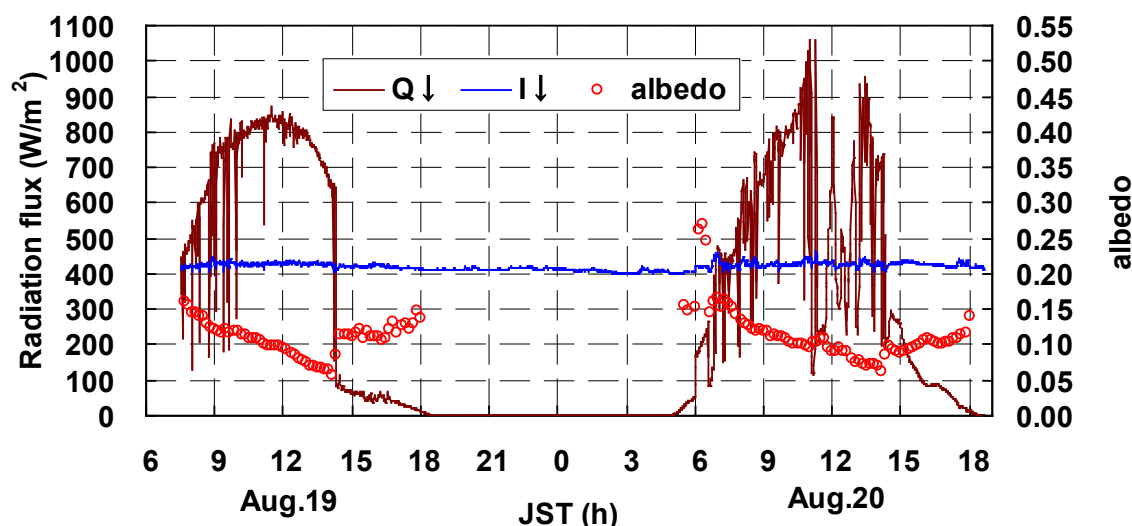


図 2-16. 放射フラックスの時間変化

(2) 観測期間の気象概況

図 2-16 に、河岸テラスで実測された全天日射量($Q\downarrow$)と下向き長波放射量($I\downarrow$)の変化、ならびにアルベドの時間変化を示す。19 日はほぼ晴天であったが、20 日は雲が多く、とくに正午前後の数時間は厚い雲に覆われた。なお両日とも 14 時過ぎから日射が激減しているのは、実測位置の右岸テラスが西側の建物の陰に入るためである。初日に比べ 2 日目の減衰が小さいのは、散乱日射の比率が高かったためである。 $I\downarrow$ の値は、420~430W/m²程度で安定している。水面のアルベドは通常 0.06~0.08 とされており、太陽高度が 60 度以下になると太陽高度依存性が現れ増大する。実測結果はあくまで参考値であるが、ほぼ妥当な変化を示している。

図 2-17 は、実測エリアの西約 3km に位置する大手町気象台、および永代橋中央定点における風向・風速、気温の変化を示したもので、気温については永代橋・両国橋の橋上定点と大手町との気温差を併示した。データはすべて 30 分平均値で表示している。風向は、実測期間を通じて終始南よりの風で、いわゆる海陸風循環は現れていない。風速は日中 6~7m/s、夜間は 2~3m/s 程度である。永代橋の気温は、大手町に比べ日中は 2℃程度低くなっているが、夜間の気温差は 0.5℃以下と小さい。上流の両国橋では、終日永代橋よりも気温が高くなっており、同じ隅田川上でも河口からの距離の違いで明確な気温差が現れている。2 日目の正午前に気温差が大きく変動しているのは、大手町で局所

的な降雨があったため、この間隅田川上の両地点では降雨は観測されていない。図には、永代橋における水温の変化も併せて示したが、25～27℃の範囲で、常に気温より低かった。なお、水温変化と水位変化との対応関係は、日変化に打ち消されてあまり明確には現れていない。日中の水温が1日目より2日目の方がわずかに高くなっているが、その原因は定かではない。

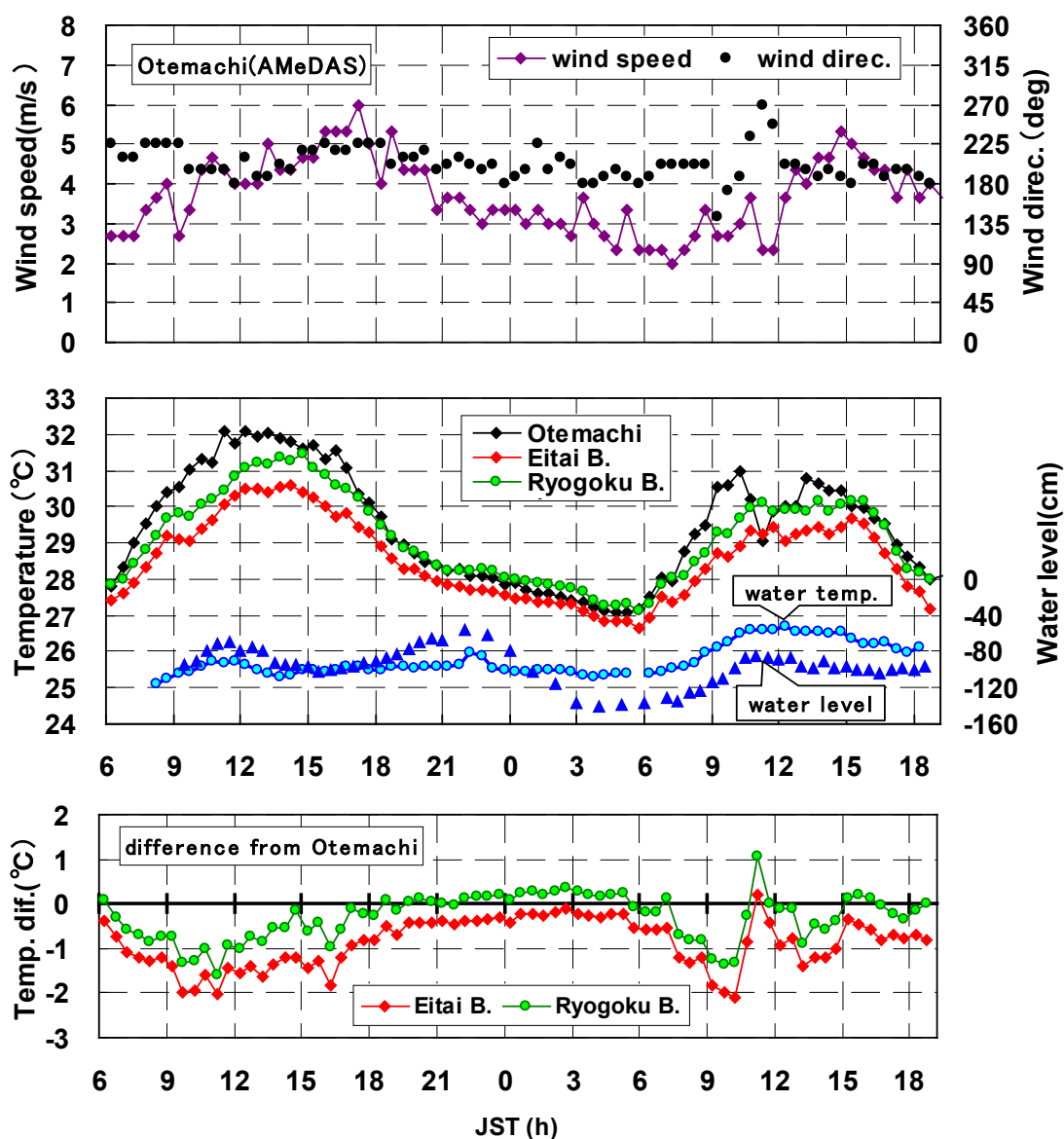


図2-17. 実測期間の気象概況—アメダスと橋上定点の比較

(3) 水面における顕熱・潜熱フラックスと熱伝達率

右岸テラスに設置した超音波風速温度計による渦相関法、シンチロメータによるシンチレーション法、ならびに大気安定度を考慮したバルク法による顕熱フラックスを比較した。フラックスの評価時間は30分に統一した。なお、テラスにおける前者2つの測定に関しては、初日から2日目の早朝6時までの測定である。ただし、渦相関法に関しては、2日目の午前中のみ、移動カートに設置し直した測器を用いて、永代橋中央南側の定点ポイントでの測定も試みた。

渦相関法による鉛直フラックスの算定では、鉛直風の平均値がゼロになることが仮定されている。しかしながら多くの場合、無限平坦という理想的な場所は現実には望めないという設置場所の制約、およびいくら鉛直に注意して測器を設置しても現場では完全に鉛直とすることはほとんど困難である

という理由から、この仮定が十分満たされない。今回の実測では、テラス上では水平風向により多少変化するが0～5度程度、橋上定点では10～15度程度の吹上風となっている。以上の結果を考慮し、ここでは各評価時間毎に平均値がゼロになるよう軸回転を施し、乱流成分のみの値を算出した。このような座標変換による方法は、局所的な流線面に垂直な方向に w 軸を合せることを意味する。かなり一般的に行われている手法ではあるが、フラックスの推定に常に有効かどうかは検討の余地がある。

バルク法は、表面と1高度の温度・湿度、ならびにバルク係数からフラックスを求めるもので、バルク係数の妥当性がフラックスの算定結果を左右する。

$$H/\rho c_p = C_H U (T_s - T) \quad (1)$$

$$E/\rho = C_E U (q_s - q) \quad (2)$$

ここで、 C_H ：顕熱に関するバルク係数、 C_E ：蒸発に関するバルク係数、 T_s ：水表面温度（℃）、 q_s ： T_s に対応した飽和比湿（kg/kg） E ：蒸発量(kg/m²・s)、 U ：ある高度の風速(m/s)、 T ：ある高度の気温（℃）、 q ：ある高度の比湿（kg/kg）をあらわす。

バルク係数については、中立時の値を

$$C_H \doteq C_E \doteq 1.2 \times 10^{-3} \quad (3)$$

とし、安定度に関する補正には以下の近藤（1992）を用いた。

すなわち、安定度を表す助変数として次式を用い

$$S = S_0 \{ |S_0| / (|S_0| + 0.01) \} \quad (4)$$

$$S_0 = (T_s - T) / [U^2 \{1.0 + \log_{10}(10/z)\}^2] \quad (5)$$

安定のとき、($T_s - T < 0$)

$$C_{HD} / C_H \doteq C_{ED} / C_E \doteq 0.1 + 0.03S + 0.9 \exp(4.8S) \quad (6)$$

$$-3.3 < S < 0$$

なお、 C_{HD} 、 C_{ED} は、安定度を考慮した場合のバルク係数。 z は風速 U の測定高度(m)を表すが、ここでは橋上定点（水面上10m）の値を用いた。参考として、図2-18に式(3)～(6)で示されるバルク係数の変化を図示した。なお、今回の実測データにおけるパラメータ S は、-0.66～-0.04となっており、式(6)の条件を満たしている。

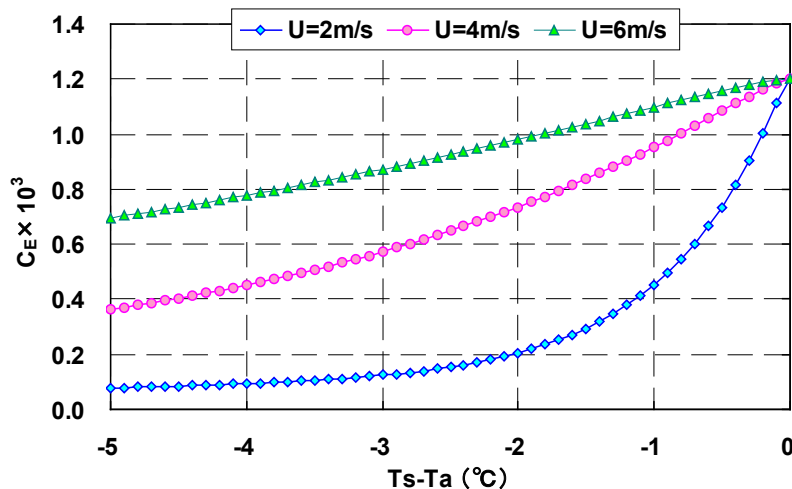


図2-18. 安定条件下でのバルク係数の変化

図2-19に、シンチロメータによる1分毎の顕熱フラックスの測定結果を示す。間欠的に出現している鋭いピークは、船舶の通過に伴いレーザ光が切断されたことによるものである。シンチロメータでは、このように、安定と不安定の両方の式を適用した正負2種類のフラックス値が常に出力される。このため、安定か不安定かの判別は別途観測により決定する必要がある。なお、20日はカートによる移動観測を行ったため、電源の関係でシンチロメータによるフラックス測定は、20日の早朝までである。

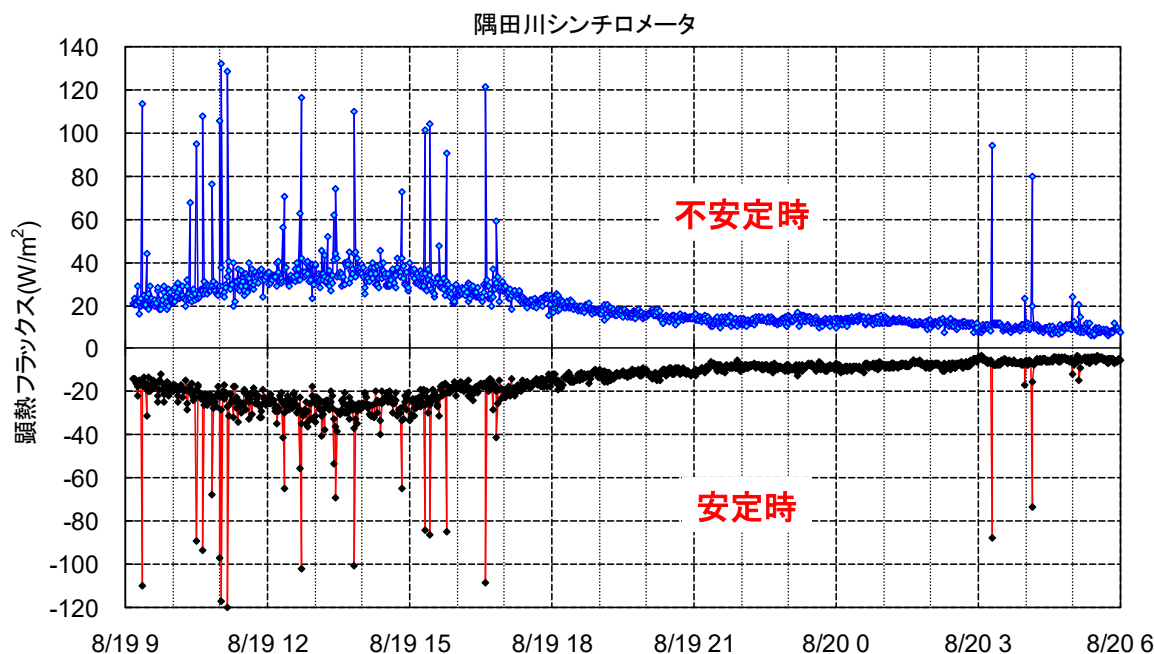


図2-19. シンチロメータによる1分毎のフラックス出力

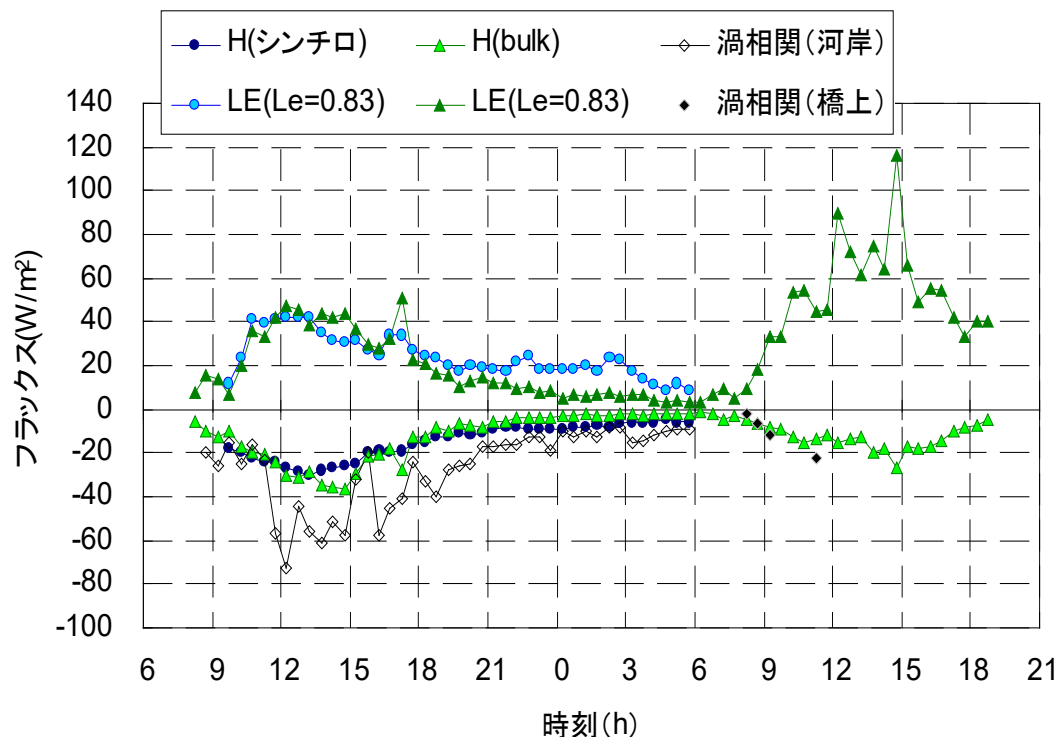


図2-20. 各種測定法による顕熱・潜熱フラックスの時間変化

図 2-20 に、それぞれの算定法による顕熱フラックスの変化を示す。期間を通して顕熱フラックスは負の値、すなわち水体がヒートシンクとなっている向きである。シンチレーション法とバルク法の値は非常に良く一致しており、橋上定点の渦相関法の値もバルク法とほぼ一致している。それに対して、河岸テラスにおける渦相関法は他の方法よりやや絶対値が大きく過大評価となっている。これは水際という測定位置による影響で、テラスや市街地からの暖気の流入で局所的に鉛直方向の温度勾配が大きくなっていることが原因と考えられる。なお、顕熱フラックスの絶対値は日中でも 50W/m^2 以下で、放射フラックスに比べると非常に小さな値となっている。

図 2-21 は、シンチレーション法と渦相関法による顕熱フラックスから求めた対流熱伝達率と、使用したバルク係数を対流熱伝達率の形に変換した値を、各々風速に対してプロットしたものである。また、熱伝達と物質伝達のアナロジーを適用して、これらの熱伝達率から物質伝達率を求め、蒸気圧差の変化から潜熱フラックス(LE)を算出した。その結果は、先の図 2-20 に併せて示している。比較的曇りがちであった 2 日目の LE の方が 1 日目より大きくなっている原因は、2 日目の水温がわずかながら高かったためである。

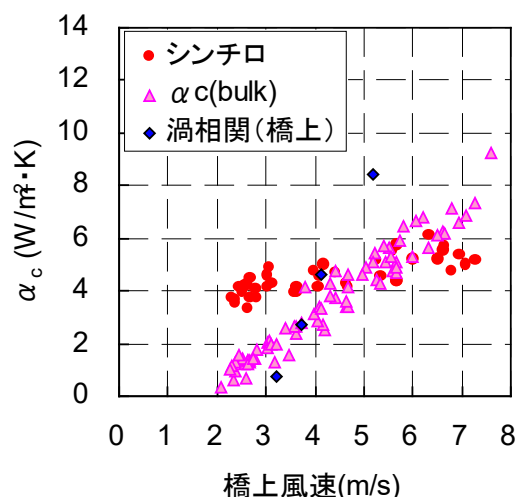


図 2-21. 対流伝達率と橋上風速の関係

図 2-21 によれば、顕熱フラックスの変化では絶対値が小さかったため顕著に現れなかったが、熱伝達率で比較するとシンチレーション法による結果は風速に対する傾きが小さい。使用したバルク係数は、安定条件下では、弱風時に急激に小さくなる設定となっており、数℃の温度差でも風速 2m/s 付近で熱伝達率がほぼゼロとなる (図 2-18)。風速の日変化を考慮すると、結果としてシンチレーション法はバルク法に比べ、日中は過小評価、夜間は過大評価する傾向となっている。シンチレーション法に関しては、ボーエン比が 0.5 以下となるような湿潤な条件下では、湿度の影響で日中のフラックスを過小評価、夜間のフラックスを過大評価する傾向があるとの報告がある。しかしながら、この湿度効果についてはまだ十分解明されていない。一方、都市内河川という今回のサイト条件を考慮すると、河川周辺に林立する建物の粗度効果により、広い水面を仮定したバルク係数に比べ、比較的弱風時でも伝達率が大きくなっていた可能性も考えられる。これらについては今後の課題である。なお、橋上の渦相関法による熱伝達率は、他の値に比べ強風時に大きくなる傾向が認められるが、算定に用いている顕熱フラックスの絶対値が 30W/m^2 以下と非常に小さくデータ数も限られるため、明確に議論できる精度ではないと考えられる。

図 2-22 は以上の結果をふまえ、最終的に水面における熱収支各項の変化を算定した結果である。正味放射量(Rn)は(8)式により、 $Q\downarrow$ 、 $Q\uparrow$ 、 $I\downarrow$ と水温 T_s の実測値から $\epsilon = 0.96$ を仮定して算出、水体への貯熱量(G)は、バルク法の H と LE を採用し、(7)式の残差として求めた。

$$Rn = H + LE + G \quad (7)$$

$$Rn = Q\downarrow - Q\uparrow + I\downarrow - \epsilon \sigma T_s^4 \quad (8)$$

顕熱・潜熱フラックスの値は正味放射量に比べ非常に小さく、結果的に正味放射のほとんどが水体への貯熱量となっている。その比率 G/Rn は、ほとんどの時間帯で 0.9 以上となっている。前述のよ

うに、14 時以降は R_n に局所的な建物影響が含まれていることを考慮すると、ほぼ日中を通して 0.9 以上、ほぼ 1 に近い値とみなせる。荒川の例では R_n の 8 割以上が G に転換されているとしており、今回の結果は、それとほぼ同等ないしはさらに貯熱への比率が強調される結果となった。これは、主に蒸発散による潜熱フラックスの寄与で低温となっている緑地とは、表面温度が低く保たれるメカニズムが、河川では全く異なっていることを意味している。

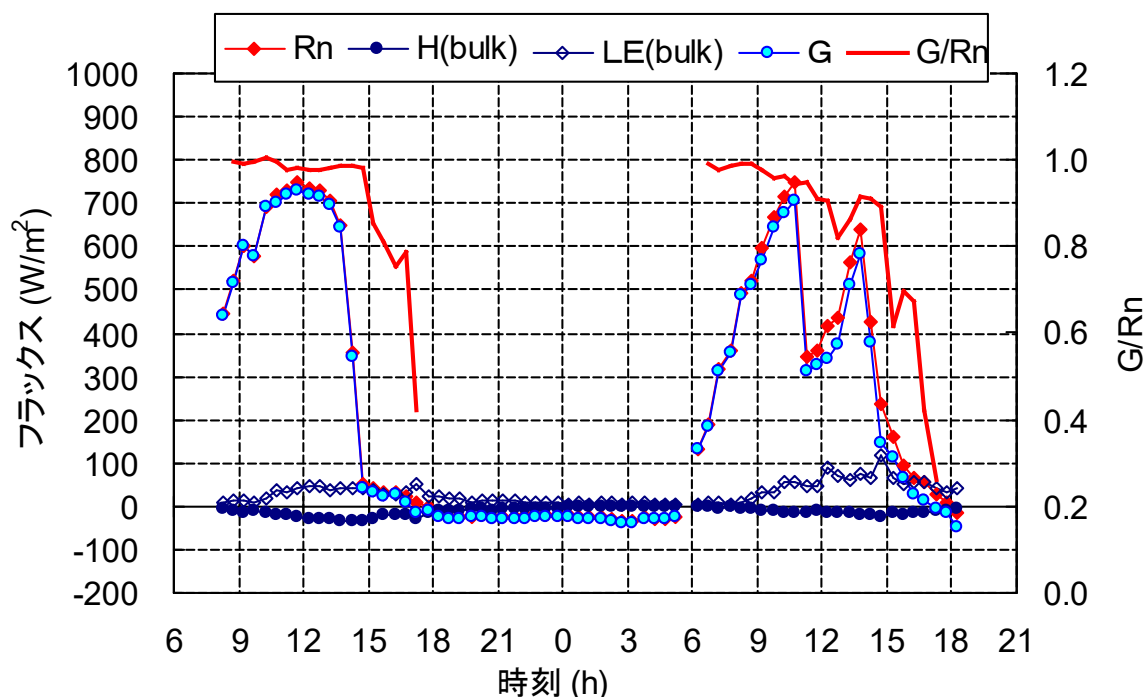


図 2-22. 水面における熱収支フラックスの時間変化

以上のような大きな貯熱量が生じる理由は、水面では短波放射の一部が水中に透過し水体内部で顕熱に変換されること、もう一つは水体自身の混合により水体表層の熱が効果的に水体深部へ輸送されることによる。通常の熱収支の取り扱いでは、水面においても日射は表面で完全に吸収されるとし、水体の温度変化を全て貯熱量 G で表現する。ここでは一つの試みとして、後者の水体の対流混合による効果を 1 次元熱伝導モデルで評価し、河川における対流混合を含んだ「見かけの熱伝導率」を求めた。結果を図 2-23 に示す。下端境界を現地水深の 4m とし、下端では温度一定・断熱境界条件で実測値の温湿度・風速を与えて熱収支を解き、実測値の水面温度を再現する熱伝導率を推定した。なお、下端境界温度の設定値は 25.5℃とした。はじめに実測表面温度の日平均値 (25.9℃) を設定して計算した結果、計算値の表面温度が実測値とわずかにずれたため、両者が重なるように調整した。ここでは、見かけの熱伝導率を推定するという目的であるためこのような方法を採用した。以上の結果、静止水体の 0.61W/m・K に対し、約 40 倍の値を設定した場合にほぼ実測水温が再現された。メソスケールのモデル等では、これまで河川は海洋と同じく水温一定という扱いをすることが多かったが、この値を用いれば他の地表面と同様の扱いが可能となる。ただし、算定に用いた境界条件の妥当性と他の河川への適用可能性については検討が必要である。

図 A.4 に、参考として Kondo(1979)の式による水中への日射透過量の算定結果を示す。b は水のにごりを表すパラメータで、きれいな外海水で 1、沿岸水で 2~3、かなりにごった湖沼で 5~9 である。

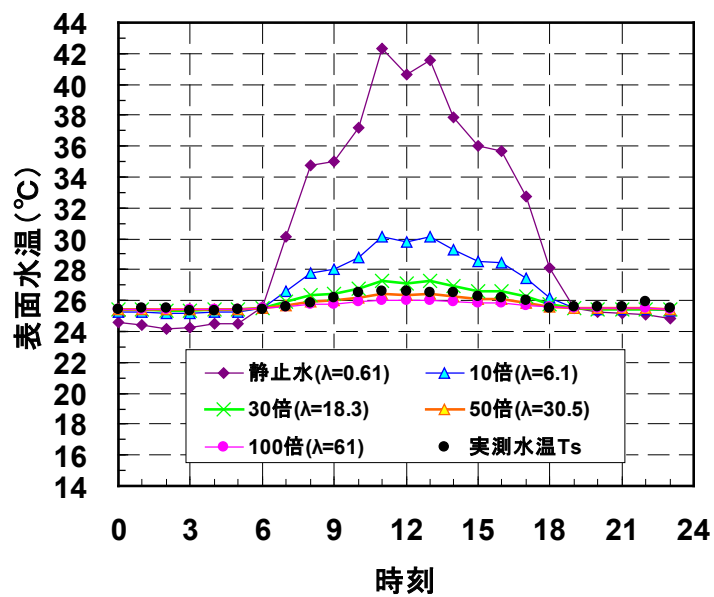


図 2-23. 河川における「見かけの熱伝導率」の推定

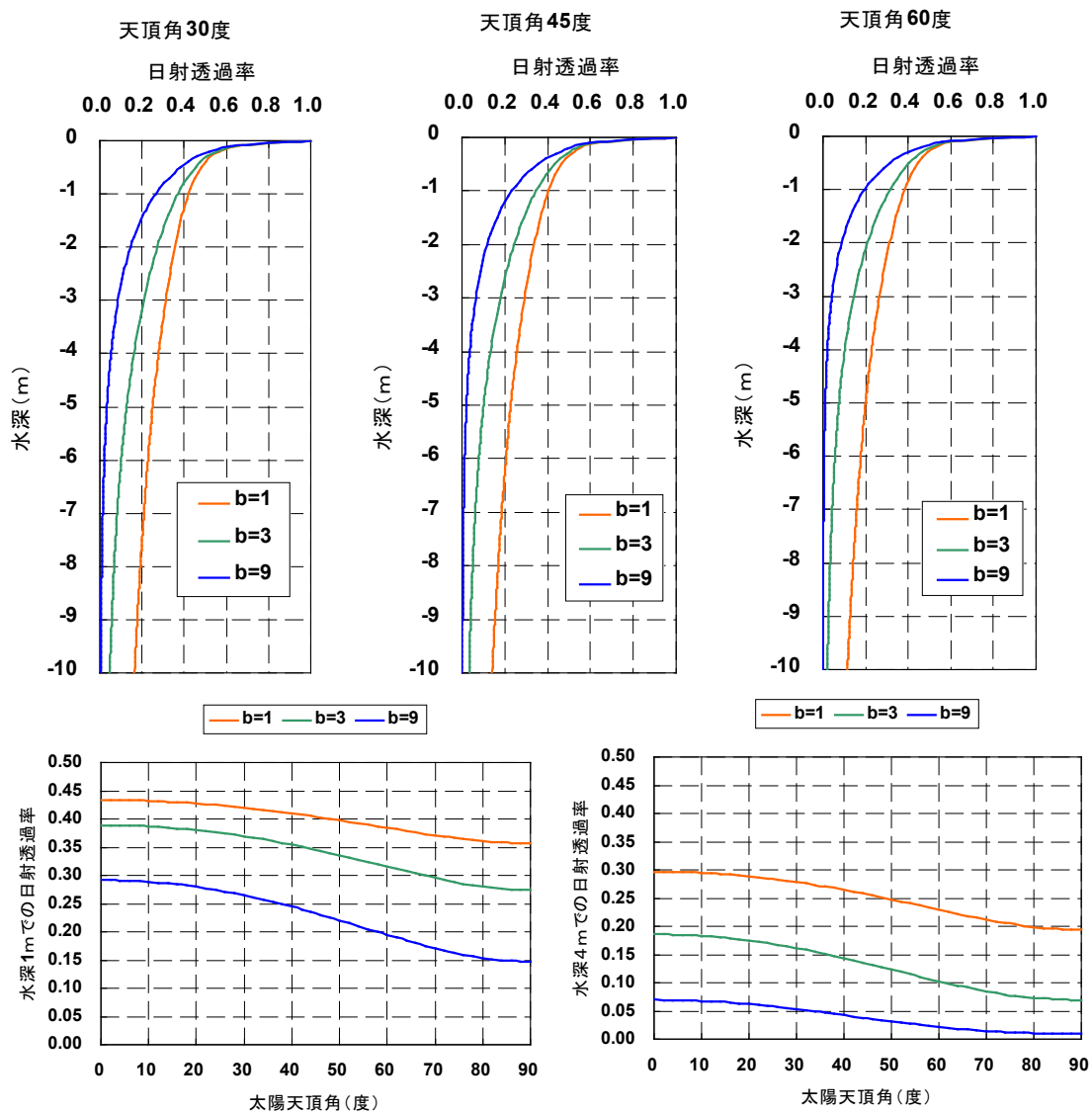


図 A.4. 水中への日射透過量の算定結果

2-3 水田(春季・夏季)

(1) 観測場所・観測期間

観測は、埼玉県宮代町宮東の水田にて春季と夏季の2回に分けて実施した(図2-24)。春季は、2000年5月25日と26日に、夏季は2000年8月24日と25日に、それぞれ2日間、約30時間の定点観測を行った。

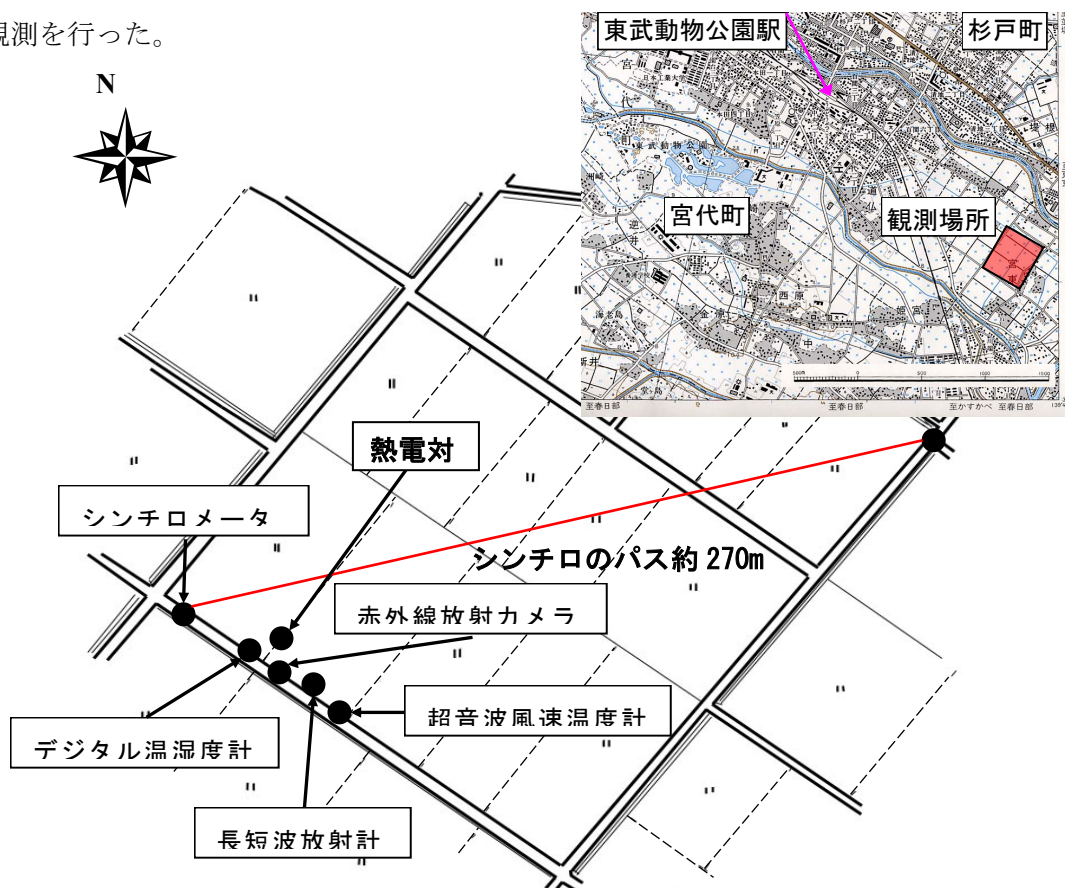


図2-24 観測場所と測器の設置ポイント

(2) 測定方法と測器の設置状況

設置状況は、向かって左の写真が春季を右の写真が夏季を表している。(地中温度の項目は異なる) なお、春季と夏季の観測は同一の測定方法で実施しており、設置場所および設置状況についても概ね同一である。

i) 風向・風速

超音波風速温度計(KAIJO DA600-3TV)を用いて測定を行った。超音波風速温度計は地表面に対して水平になるようし、センサ(プローブ)の向きは北から東へ約40°ずれた位置で、高さ1.8mに設置した。測定は0.1秒間隔で行った。



写真2-7 超音波風速温度計の設置状況

ii) 気温・湿度

デジタル温湿度計（神栄 TRH-3A）を用いて測定を行った。デジタル温湿度計のセンサ部分が、放射の影響を受けないように、日射遮蔽通風筒図 2-25 を用いた。センサを取り付けた日射遮蔽通風筒を高さ 1.5m に設置し、測定は 10 秒間隔で行った。

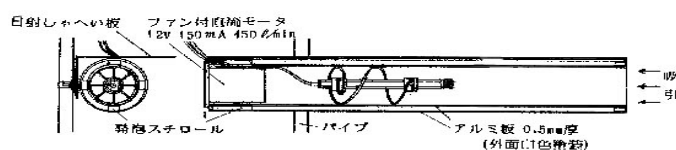


図 2-25 日射遮蔽通風筒

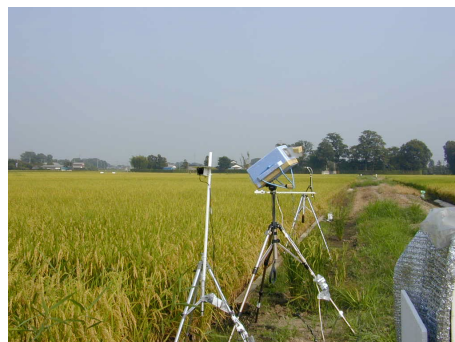


写真 2-8 デジタル温湿度計の設置状況

iii) 放射量

長短波放射計（英弘精機 MR-40）で、下向短波放射量 $Q\downarrow$ 、上向短波放射量 $Q\uparrow$ 、下向長波放射量 $I\downarrow$ 、上向長波放射量 $I\uparrow$ の測定を行った。長短波放射計は、地表面から高さ 1.5m に設置し、測定は 10 秒間隔で行った。



写真 2-9 超短波放射計の設置状況

iv) 顕熱流速

シンチロメータの送受信機を水田の両端に、お互いが向き合うように設置して、測定は 1 分間隔で行った。設置高さは 2.0m で、送受信間の距離は約 270m である。

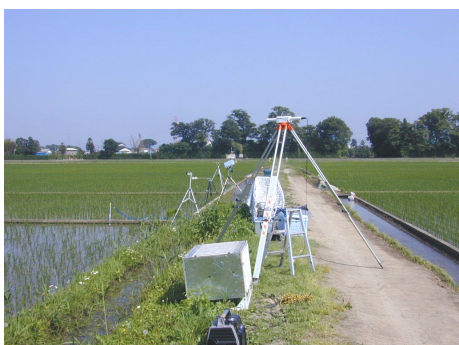


写真 2-10 シンチロメータの設置状況

v) 表面温度

赤外線放射カメラ（日本アビオニクス ネオサーモ TVS-600）を水田の端に地表面から高さ 1.5m で設置し、測定は 10 分間隔で行った。

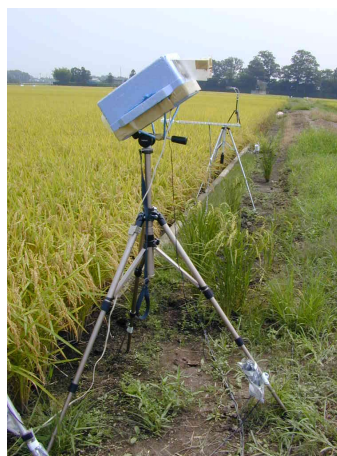
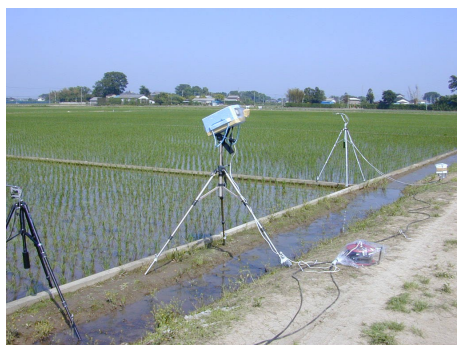


写真 2-11 赤外線放射カメラの設置状況

vi) 地中温度

熱電対を杭に取り付けて水田に押しこんでいった。熱電対（センサ）は、地表面をゼロとして、+10 cm、+20 cm、0 cm、-2 cm、-4 cm、-6 cm、-10 cm、-15 cm、-20 cm、-25 cmの位置になるように設置して、測定は 10 秒間隔で行った。



写真 2-12 熱電対を取り付けた杭と設置の状況

表 2-1 測定項目と使用測器

測定項目	測定高さ	測定器	データロガー	測定間隔
風向風速	1.8m	超音波風速温度計 (KAJIO DA600-3TV)	DR-M3 (TEAC)	10Hz
温湿度	1.5m	デジタル温湿度 (神栄 TRH-3A)	ソラック V (英弘精機 MP-092)	10sec
放射量	1.5m	長短波放射計 (英光精機 MR-40)	ソラック V	10sec
顕熱流速	2.0m	シンチロメータ (Scintec SLS20)	ノートPC	1min
	1.8m	超音波風速温度計	DR-M3	10Hz
表面温度	1.5m	赤外線放射カメラ (日本アビオニクス TVS-600)		
地中温度		熱電対		

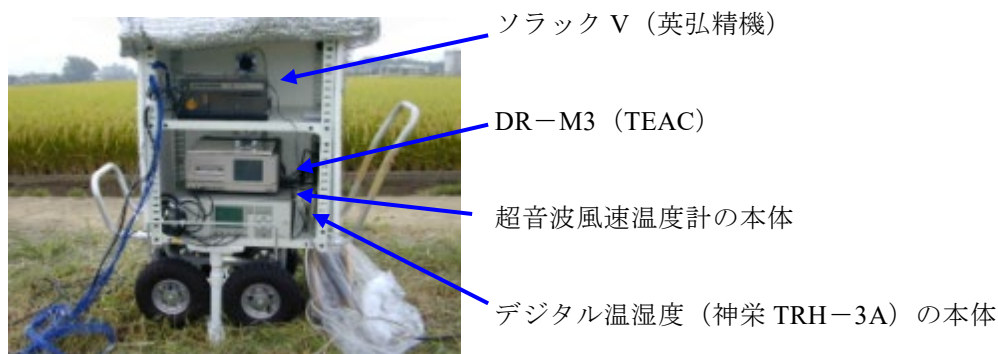


写真 2-13 データロガーの設置状況

(1) 水田上の放射収支

全天日射量 ($Q\downarrow$) と反射日射量 ($Q\uparrow$)、下向き長波放射量 ($I\downarrow$) と上向き長波放射量 ($I\uparrow$) の日変化を春季と夏季に分けて図 4-2 と図 4-3 に示す。春季の測定は、1 日目、2 日目ともに晴天日であった。夏季の測定 1 日目は、晴天日であったが、2 日目は時折曇りがちな日であった。

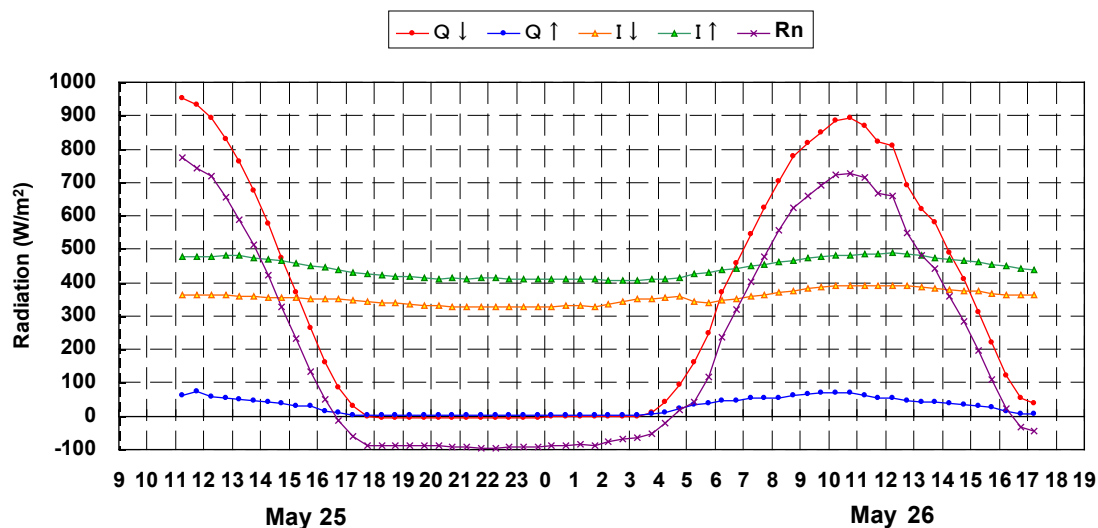


図 2-26 春季 (2000.5/25・26) 水田上の放射収支

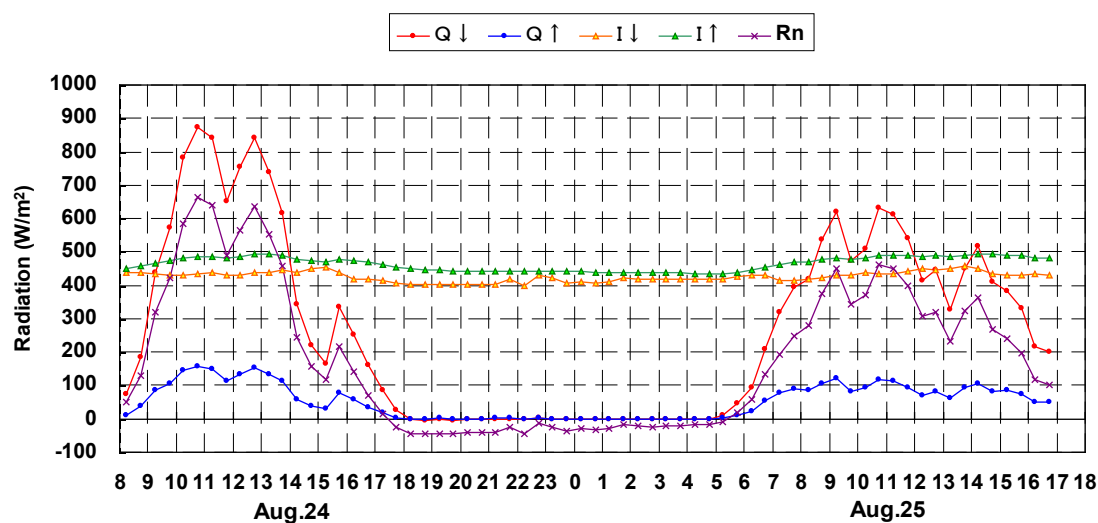


図 2-27 夏季 (2000.8/24・25) 水田上の放射収支

春季の日射量のグラフは滑らかな曲線を描いているのに対して、夏季のグラフは日射が雲の影響を受けているため変動の激しい形となっている。正味放射量 ($R_n = Q_{\downarrow} - Q_{\uparrow} + I_{\downarrow} - I_{\uparrow}$) は、春季の方が高い値を示しており、月平均の全天日射量が夏季よりも春季の方が高いことと一致している。また、下向きの長波放射量は春季、夏季ともに、昼夜を通じて $320 \sim 450 \text{ W/m}^2$ と安定していた。

(2) 水田上の熱収支

一般的に地表面の熱収支を解析する際は、地表面の形成状態や測定の方法により各熱流速（フラックス）の算定方法が異なる。そこで、ここでは各熱流速の算定を春季と夏季に分けてまとめ、その上で春季と夏季の水田上熱収支の解析結果を示す。

$$R_n = H + LE + G \quad (\text{単位: } \text{W/m}^2)$$

R_n : 正味放射量、 H : 顕熱輸送量 [顕熱流速]、 LE : 潜熱輸送量 [潜熱流速]、 G : 地中への伝導熱流 [地中熱流量] (W/m^2)

i) 地中への伝導熱流 [地中熱流量]

土壌温度（地温）は空間的・時間的変動が起こるので、その地温変動を解析することにより、地中への伝導熱流を算定することができる。

* 春季の場合

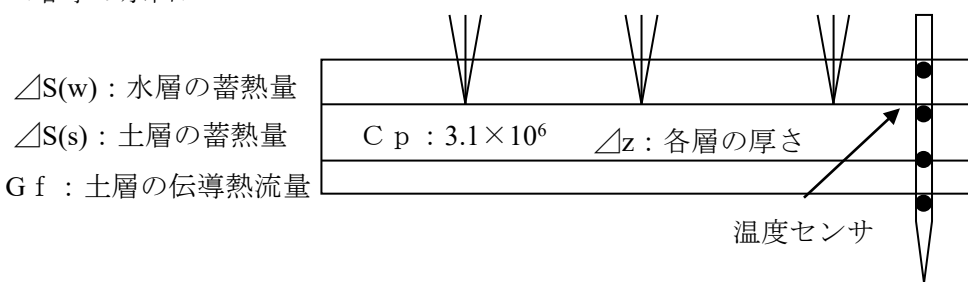
地中への伝導熱流を算定する際は、地表面と土中の形成状態を考慮して算定しなければならない。そこで、春季の水田については、土層の熱伝導率を粘土質の湿潤土壌に対応する $1.58 [\text{W/mK}]$ に、比熱を水層が 4.186×10^6 、土層が $3.10 \times 10^6 (\text{J/kg} \cdot \text{K})$ に、密度は水層、土層、ともに $1000 (\text{kg/m}^3)$ と仮定し、以下に示す算定式を用いて解析を行った。春季の水田における地中への伝導熱流の時間変化を図 2-28 に示す。

$$G = \Delta S(w) \text{水層の蓄熱量} + \Delta S(s) \text{粘土層の蓄熱量} + G_f \text{土層の伝導熱流量}$$

$$\Delta S = C_p \rho \Delta \theta \Delta z \quad G_f = \lambda \Delta \theta / \Delta z \quad (9)$$

λ : 熱伝導率 (W/mK) $\Delta \theta$: 昇温量・温度差 (K/h) Δz : 層の深さ (m)
 C_p : 比熱 ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$) ρ : 密度 (kg/m^3)

< 春季の水田 >



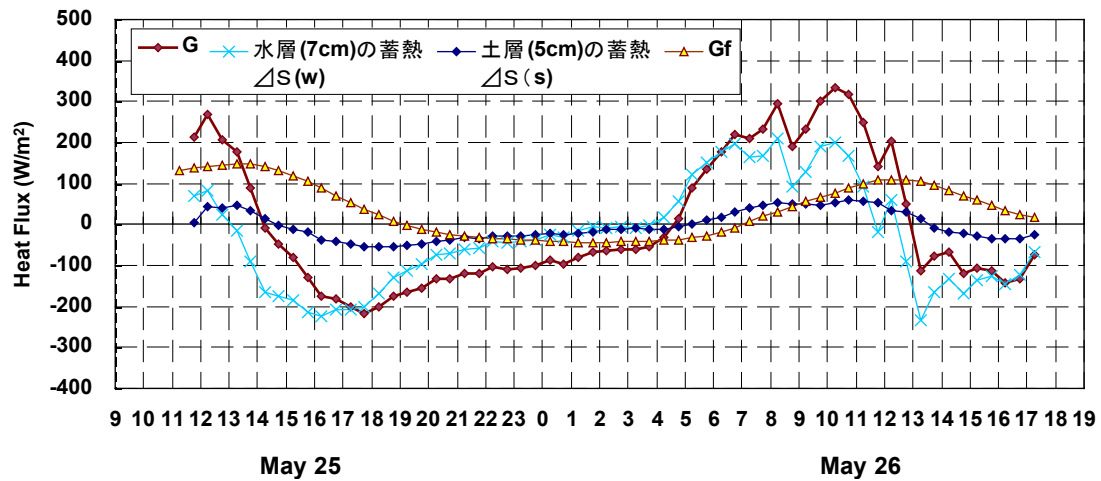


図 2-28 春季（2000.5/25・26）水田の地中への伝導熱流 [地中熱流量]

* 夏季の場合

夏季の水田には水は張られていないが、土は湿った状態にあったので、土層熱伝導率を 1.58[W/mK]と仮定し、以下に示す算定を用いて地中への伝導熱流を求めた。地中への伝導熱流の春季と夏季の時間変化を比較したグラフを図 2-29 に示す。

$$G = \lambda \frac{\Delta\theta}{\Delta z} \quad (10)$$

λ : 熱伝導率 $\Delta\theta$: 昇温量・温度差 (K/h) Δz : 層の深さ (m)

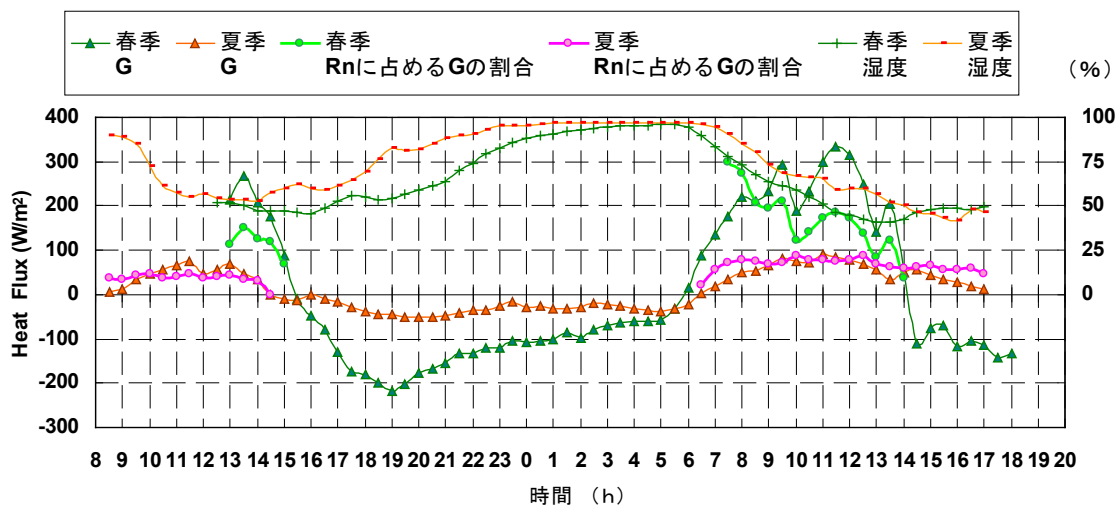


図 2-29 地中への伝導熱流 [地中熱流量]の春季と夏季の比較

地中への伝導熱流を比較すると春季は非常に大きい値を示している。春季の水田には水が張られており、水中への貯熱が伝導熱流に大きく関係している。春季の水田では、水中への貯熱により周辺空気層の加熱を抑制する効果（冷却効果）が大きいことがわかる。

ii) 顕熱輸送量 [顕熱流速 (顕熱フラックス)]

顕熱輸送量の算定には、渦相関法とシンチレーション法を用いた。各算定方法から求めた顕熱輸送量の時間変化を図2-30 (春季) 図2-31 (夏季) に示す。

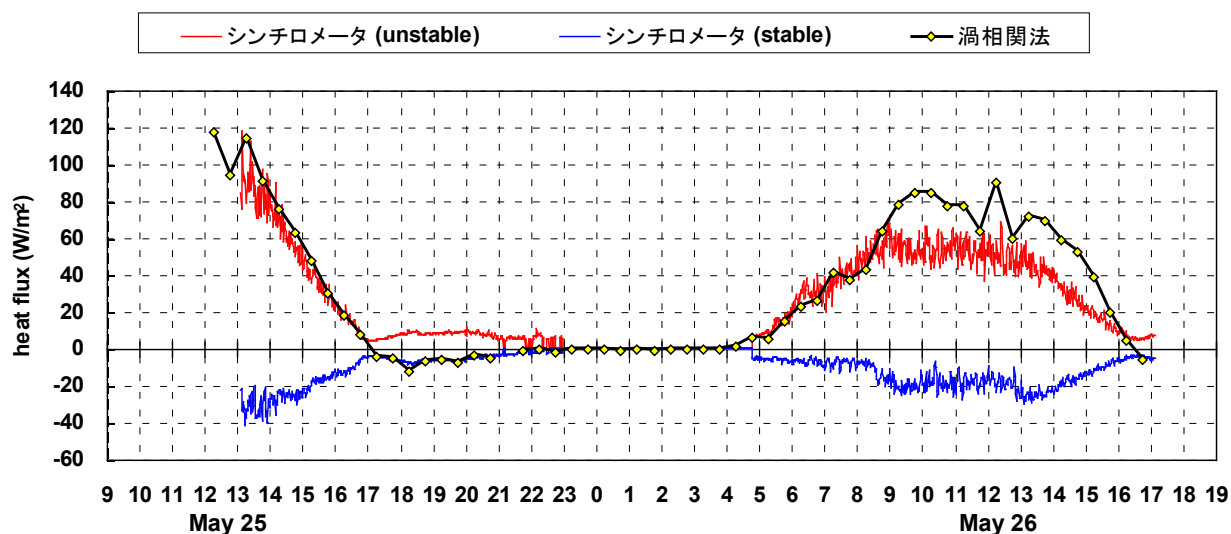


図2-30 春季 (2000.5/25・26) 水田上の顕熱輸送量 [顕熱流速]

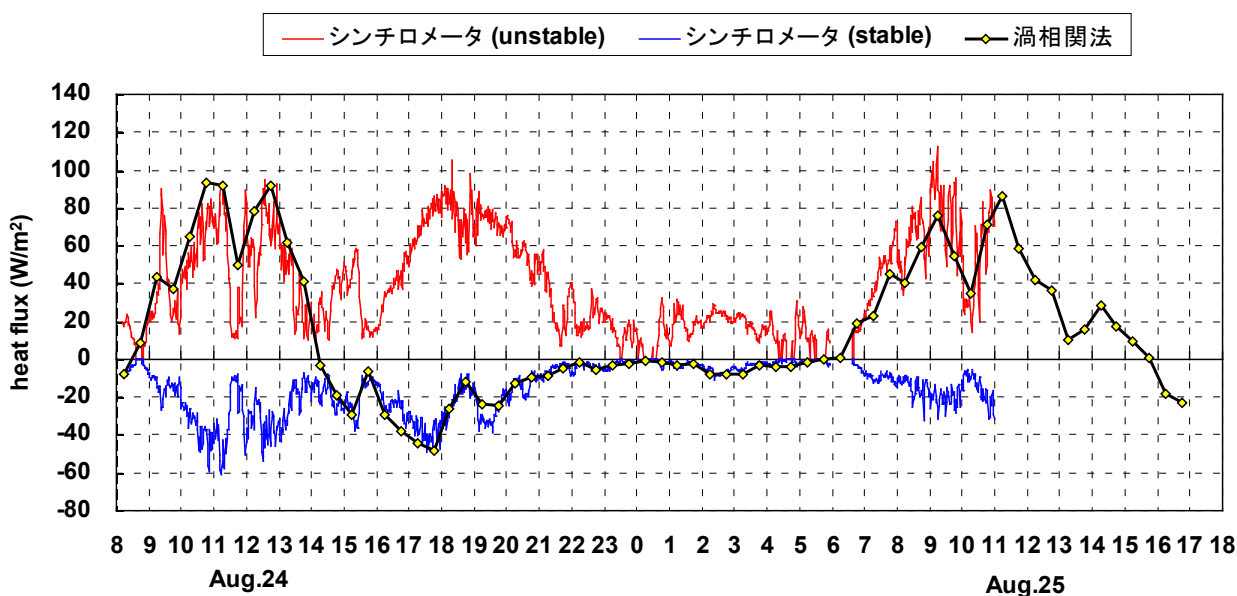


図2-31 夏季 (2000.8/24・25) 水田上の顕熱輸送量 [顕熱流速]

渦相関法とシンチレーション法による顕熱フラックスの値は、春季、夏季ともにおおよそ一致しており、高い精度で顕熱を観測することができた。夏季における顕熱は、正午辺りをピークに春季よりも早いペースで下降し、さらに負の値が大きいことから周辺空気を冷やしていることが確認できる。春季、夏季ともに大気を加熱する顕熱 (H) は非常に小さい点が特徴である。

各熱流速の算定結果を基に、水田上の熱収支を時間変化で表すと図 2-32、図 2-33 のようになる。顕熱フラックス (H) は、データが継続的に取れていることから渦相関法より求めた値を採用している。

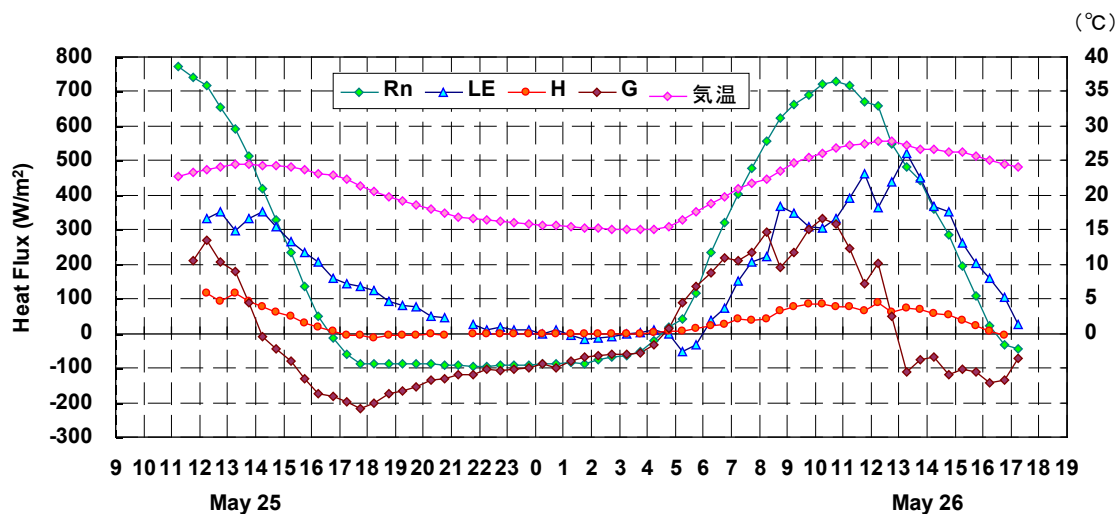


図 2-32 春季水田上 (2000.5/25・26) の熱収支時間変化

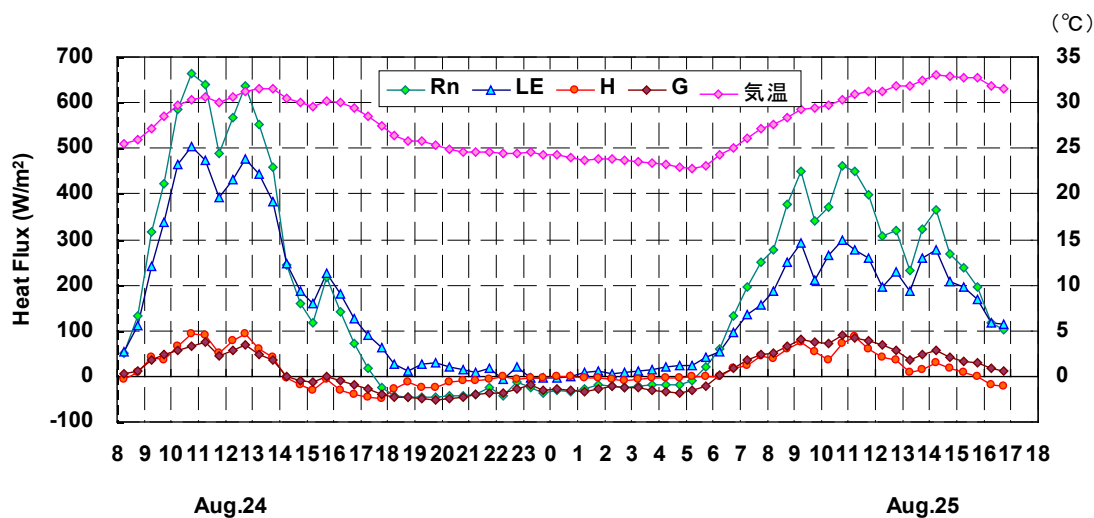


図 2-33 夏季 (2000.8/24・25) 水田上の熱収支時間変化

各熱流速が正味放射に占める割合が春季と夏季では大きく異なることがわかる。春季の水田は、水が張ってあることから地中への伝導熱流の割合が大きく、水中への貯熱により周辺空気層の加熱を抑制する効果 (冷却効果) が大きいことがわかる。また、正午からは蒸発散に伴う潜熱 (LE) の配分が大きくなるのが特徴である。夏季の日射エネルギーの大半は蒸発散に伴う潜熱に配分され、大気を加熱する顕熱 (H) や蓄熱となる成分 (G) は、非常に小さい点が特徴である。また、夏季の顕熱は正午辺りをピークに春季よりも早いペースで下降しており、夕方前からは顕熱が負の値を示すことから周辺空気を冷やしていることが確認できる。

(2) 対流熱伝達率の算定

固体表面とそれに接する流体との間では、伝導と対流によって熱が移動する。つまり、固体表面と流体との間で温度差があるときに熱が移動する現象で、対流熱伝達と言われている。ここでは、以下に示す算定式(11)を用いて対流熱伝達率を求めた。図 2-34 春季、図 2-35 夏季

$$\alpha_c = H / (T_s - T_a) \quad (11)$$

α_c : 対流熱伝達率 ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$) H : 顕熱輸送量 [顕熱流速] (W/m^2)

T_s : 表面温度 ($^{\circ}\text{C}$) T_a : 気温 ($^{\circ}\text{C}$)

対流熱伝達率の算定は、表面温度がいかに正確に取れているかがポイントで、赤外線放射カメラなど地表面からの赤外線放射を利用した測定値を利用する場合は、地表面からの放射を十分に考慮し、表面温度を与えなければいけない。ここでは、放射率を 0.97 と仮定し補正を行った。また、赤外線放射カメラでの測定結果だけでは信頼性に欠けるので、地表面から放出される長波放射量 $I_{\uparrow}$ から放射温度を求め対流熱伝達率の算定を行った。赤外線放射カメラと長波放射量 $I_{\uparrow}$ から算定した表面温度から気温を引いた値 (温度) と顕熱輸送量 H の時間変化を図 2-34 (春季)、図 2-35 (夏季) に示す。

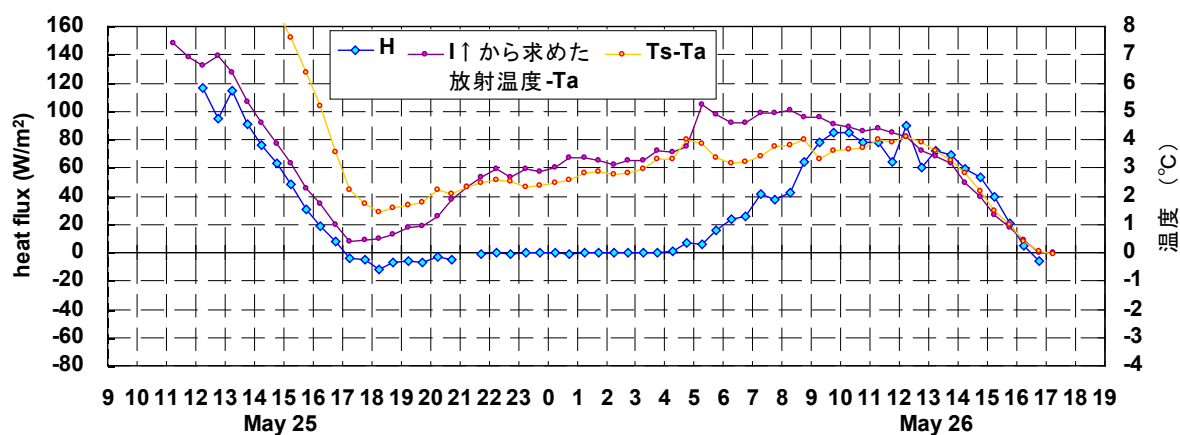


図 2-34 顕熱フラックスと表面温度と気温の差の時間変化 (2000.5/25・26)

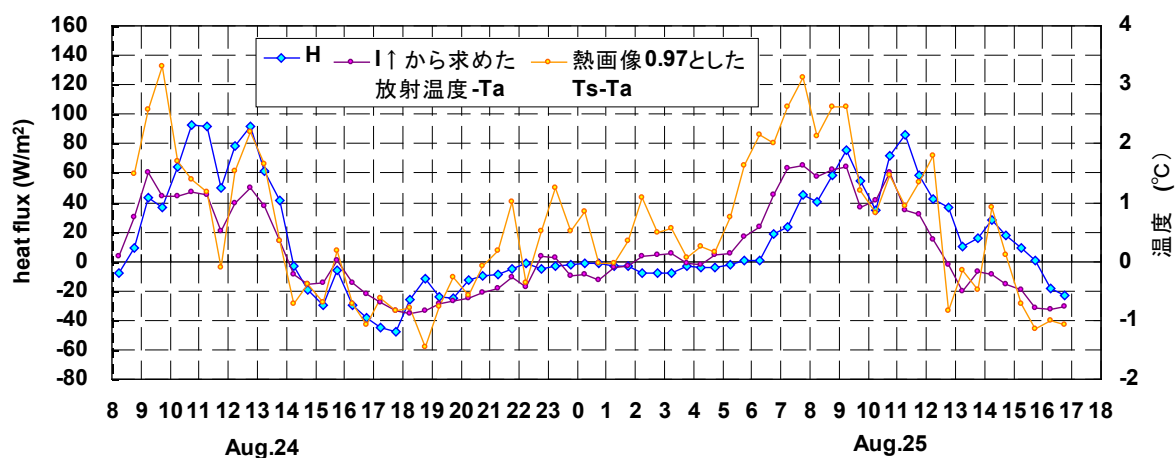


図 2-35 顕熱フラックスと表面温度と気温の差の時間変化 (2000.8/24・25)

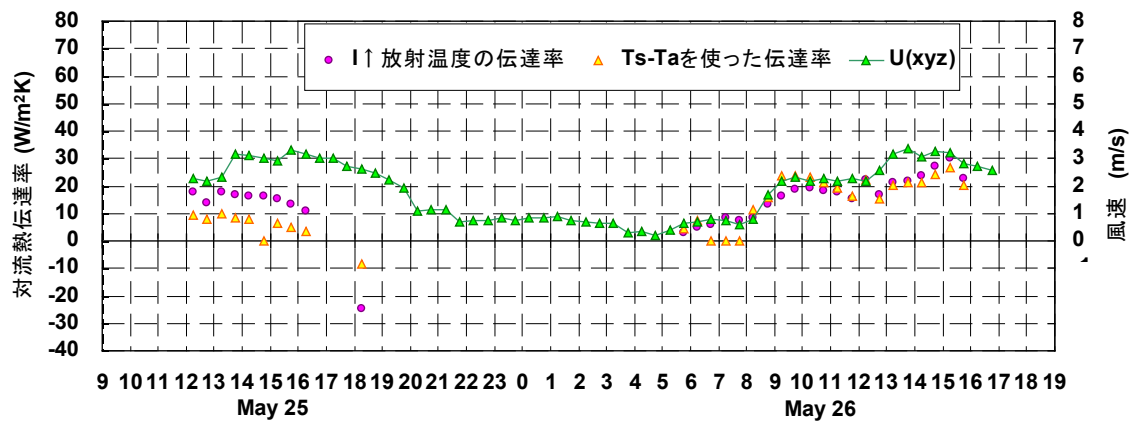


図 2-36 春季水田上の対流熱伝達率

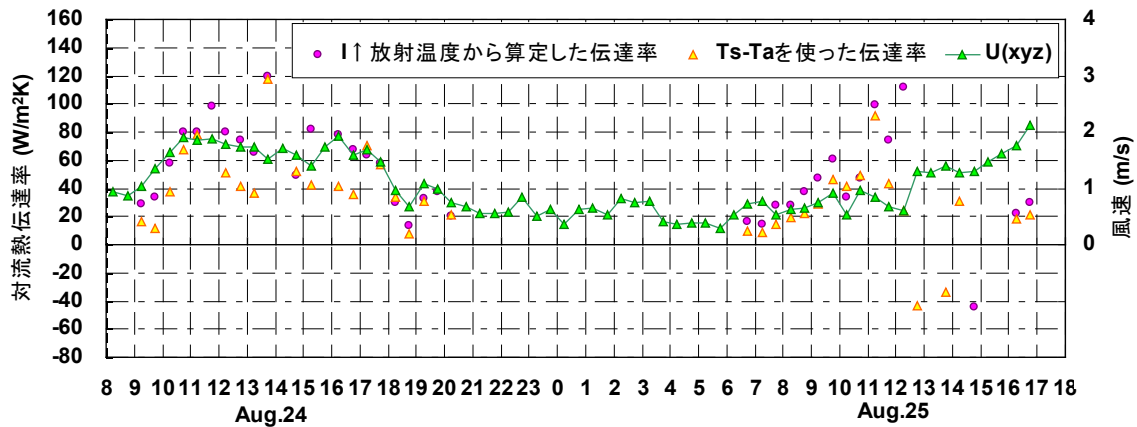


図 2-37 夏季水田上の対流熱伝達率

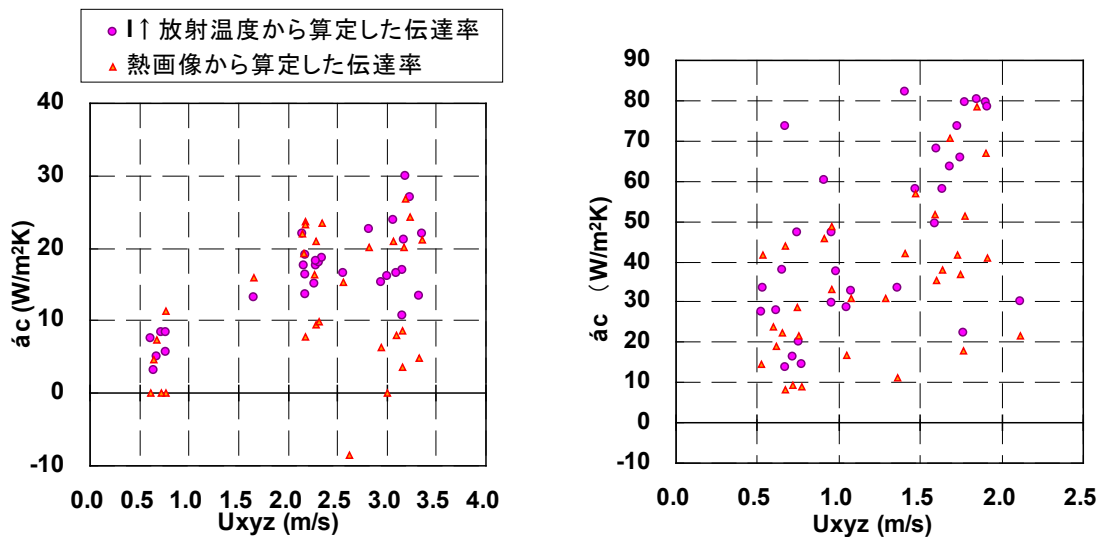


図 2-38 風速と対流熱伝達率との関係（左が春季、右が夏季）

対流熱伝達率の算定には、表面温度の測定が部分的であったことから超音波風速温度計による渦相関法から算定した顕熱フラックス（H）を用いた。春季に比べ夏は非常に高い値を示している。夏季の α_c にばらつきが見られるのは、表面温度の測定対象面（植物＝稲穂）が風の影響で揺れるため、赤外線放射カメラによる表面温度の測定精度が低くなったことが原因と考えられる。しかし、 $I\uparrow$ 放射温度から算定した伝達率だけで捉えると良い結果（データ）を得ることができたといえる。 $I\uparrow$ 放射温度から表面温度を決定すると良い結果が得られた。

2-4 水理実験センター圃場内草地面(春季・夏季)

筑波大学水理センターの熱収支・水収支観測システムとは、筑波大学水理実験センター観測圃場（半径 80m、面積約 20,100 m²）の中央にある高さ 30m の観測用鉄塔（写真 2-2-1）や圃場内に埋設されている測器（ライシメータ等）から熱収支・水収支関係の約 33 要素のルーチンデータを、オンライン・リアルタイム方式の気象日報作成装置に収録するシステムのことで、ここではルーチンデータと圃場内に設置した測器の測定値と比較するため、7 月 23 日から 31 日の部分を利用した。



写真 2-14 気象観測塔



写真 2-15 ライシメータ

表 2-2 ルーチンデータの観測項目

NO	入力要素	記号	測定高度(m)	測定器	単位	NO	入力要素	記号	測定高度(m)	測定器	単位
1	風向	D	30.5	超音波風速計	deg	18	"	TG-2	-0.1	"	"
2	風速	U-1	2.1	"	m/s	19	"	TG-3	-0.5	"	"
3	"	U-2	30.5	"	"	20	"	TG-4	-1.0	"	"
4	"	U-3	29.5	"	"	21	地下水位	GW-1	-2.2	圧力式水位計	m
5	運動フラックス	UW-1	2.1	"	(m/s) ²	22	"	GW-2	-10.0	"	"
6	"	UW-2	30.5	"	"	23	"	GW-3	-22.0	"	"
7	"	UW-3	29.5	"	"	24	露点温度	TD-1	1.6	露点計	°C
8	顕熱フラックス	WT-1	2.1	"	°Cm/s	25	"	TD-2	12.3	"	"
9	"	WT-2	30.5	"	"	26	"	TD-3	29.5	"	"
10	"	WT-3	29.5	"	"	27	蒸発量	E	0.2	蒸発パン	mm
11	全短波放射量	I	1.5	日射計	W/m ²	28	降水量	P	0.3	転倒ます式雨量計	"
12	正味放射量	Rn	"	正味放射計	"	29	蒸発散量	ET	0.0	秤量式ライシメータ	"
13	地中熱流量	G1	0.0	地中熱流板	"	30	気圧	AP	5.0	アネロイド型気圧計	hPa
14	気温	T-1	1.6	白金測温抵抗体通風乾湿計	°C	31	風速	U-4	30.5	超音波風速計	m/s
15	"	T-2	12.3	"	"	32	外部電圧信号	AUX	-	-	mv
16	"	T-3	29.5	"	"	33	日照時間	N	8.0	回転式日照計	min
17	地温	TG-1	0.0	白金測温抵抗体	"						

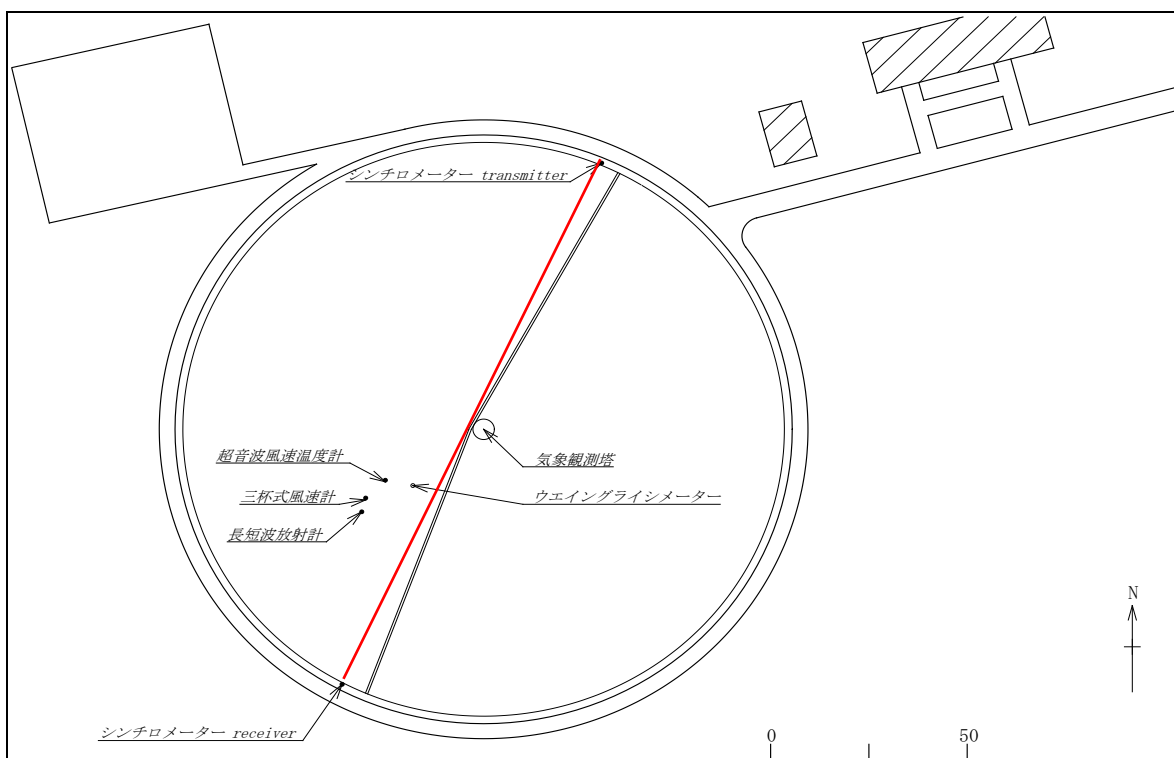


図 2-39. 水理実験センターにおける測器配置図

<測定概要>

風速・風向

超音波風速温度計（KAIJO DA600-3TV）は地表面に対して水平になるように、方角的に北から東へ149°ずれた位置に南西に向け、高さ2.0mに設置した。測定は、0.1秒間隔で、7月23日から7月31日まで連続で行った（写真2-16）。

一方、光電式三杯風速計（牧野応用測器）については、風速計の向きは南西にむけ、高さ1.5、2.0、3.0、4.0mに設置した。測定は1分間隔で、測定期間は超音波と同じである（写真2-17）。

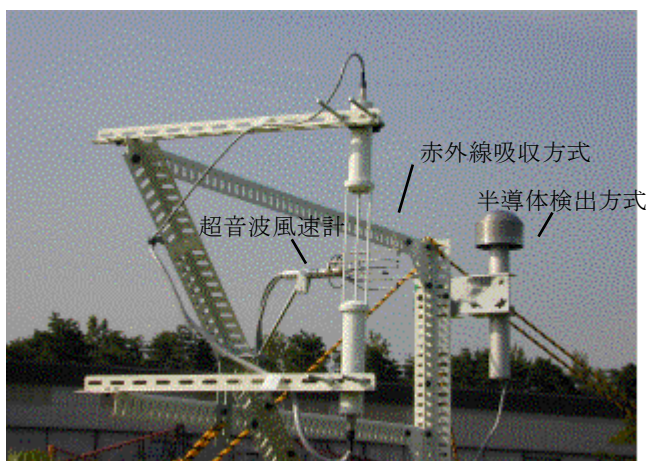


写真 2-16 各測器設置状況

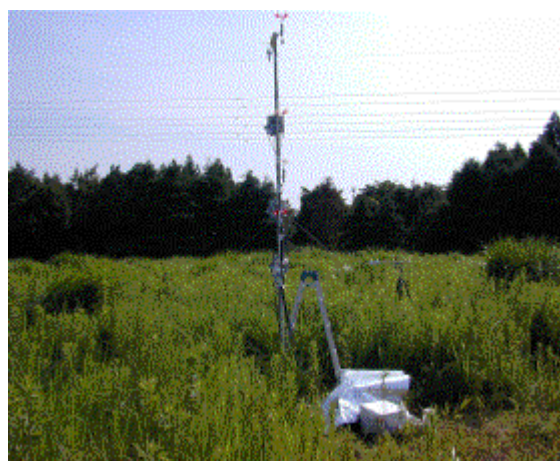


写真 2-17 三杯風速計設置状況

気温・湿度

気温・相対湿度は半導体検出方式（KAIJO AH-300）、赤外線吸収方式を設置高さ2.0mし、静電容量型温度計を光電式三杯風速計のポールにそれぞれ1.5、2.1、3.0mに設置した（写真2-16）。また、超音波風速温度計においても気温を測定した。乾球温度、湿球温度は白金抵抗温度計を光電式三杯風速計のポールにそれぞれ、1.5、2.1、3.0mに設置した。

放射量

放射量は全天日射計、上向短波放射量、下向長波放射量、上向長波放射量を長短波放射計（英弘精機 MS - 40）で測定を行った（写真 2 - 18）。

顕熱流束

顕熱流束はシンチロメータ（Scintec SLS20）の送受信器を圃場外周の両端に置き、お互いが向き合うように設置した。また、設置高さは 2.4m、送受信間の距離は 160m である（写真 2 - 19）。



写真 2 - 18 長短波放射計設置状況



写真 2 - 19 シンチロメータ設置状況



写真 2 - 20 赤外線放射カメラ設置状況

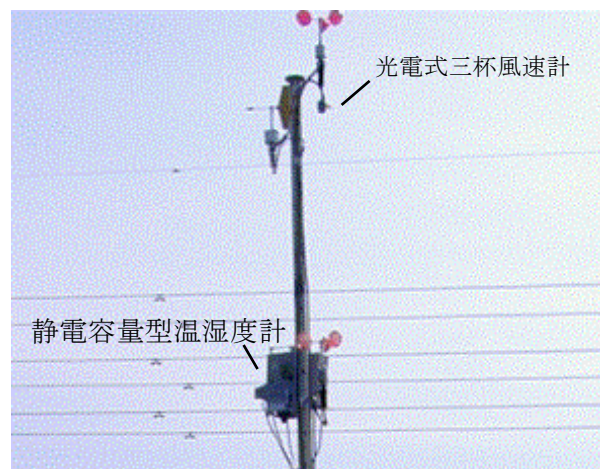


写真 2 - 21 光電式三杯風速計・
静電容量型温湿度計

表面温度

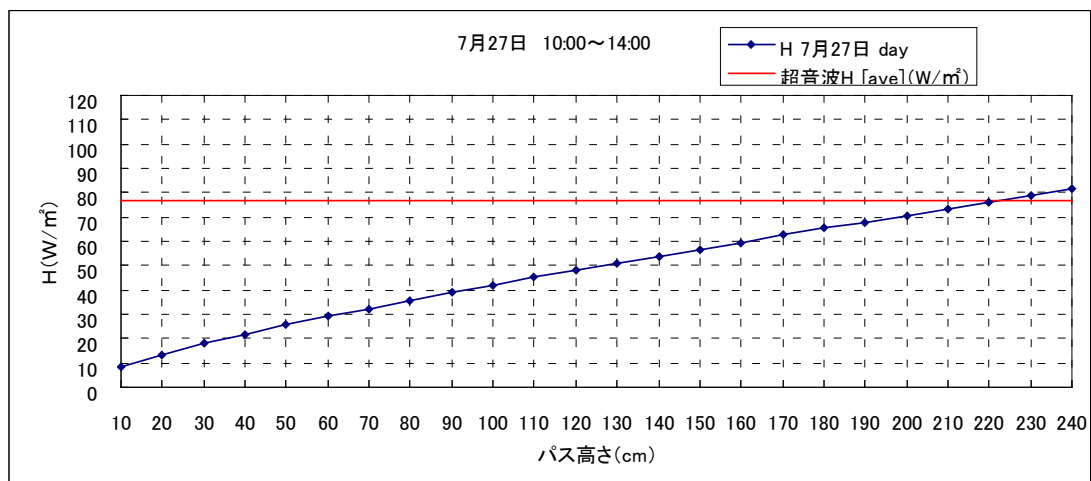
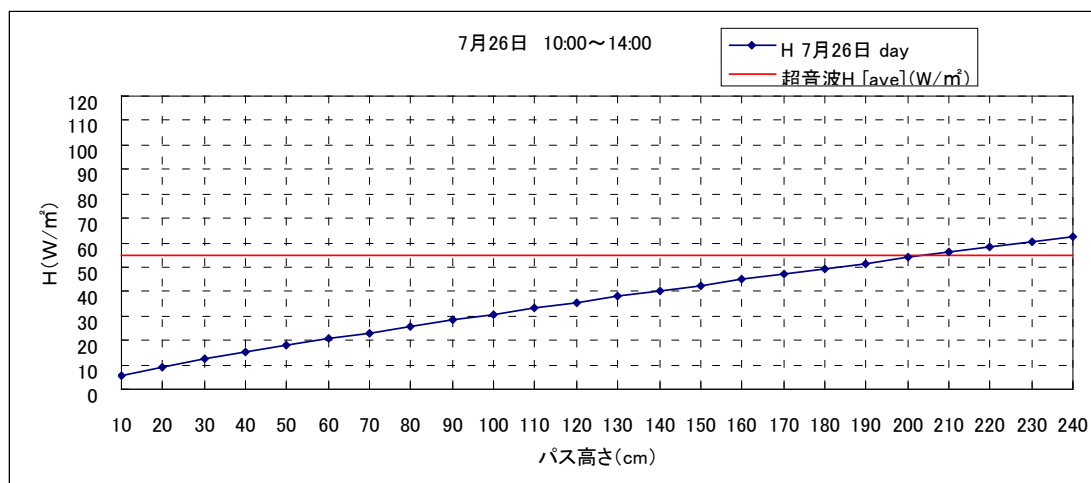
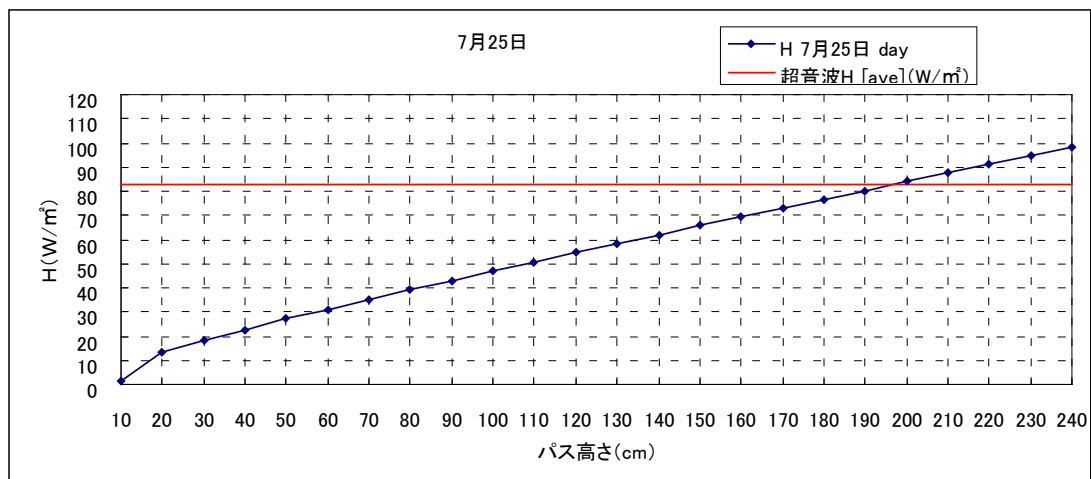
草地面表面温度は赤外線放射カメラ [Neo Thermo（日本アビオニクス TVS-2000）] を観測圃場の中央にある高さ 30m の観測用鉄塔の 12m 付近に南東に向け設置した（写真 2 - 20）。

葉面温度・土壌面温度

葉面温度は C - C 型熱電対をススキの葉面に貼り付けて測定を行なった。また、土壌温度は C - C 型熱電対を葉面温度測定点の下と長短波放射計の下に設置した。

＜シンチロメータの地面修正量の算出＞

本研究では超音波風速計を併用する方法を用いて d を求めた。図 2-40 はシンチロメータのパス高さ別の顕熱流束 (DAY) と渦相関法の顕熱流束の関係を示す。日中の 10 時から 14 時までの顕熱流束の変動が大きい時間帯を選び、シンチロメータの顕熱流束を 10cm から 240cm まで 10cm ごとにパス高さを変えて再計算をした。その再計算した値と渦相関法によるフラックスが等しくなる値 (交差した点) を d (地面修正量) と仮定した。その再計算された顕熱流束と渦相関法を用いて求めた顕熱流束どうしを各日ごとに比較した結果、25 日はパス高さ約 195cm、26 日は約 205cm、27 日は約 220cm、29 日は約 230cm、30 日は約 219cm で日によって異なる結果となった。



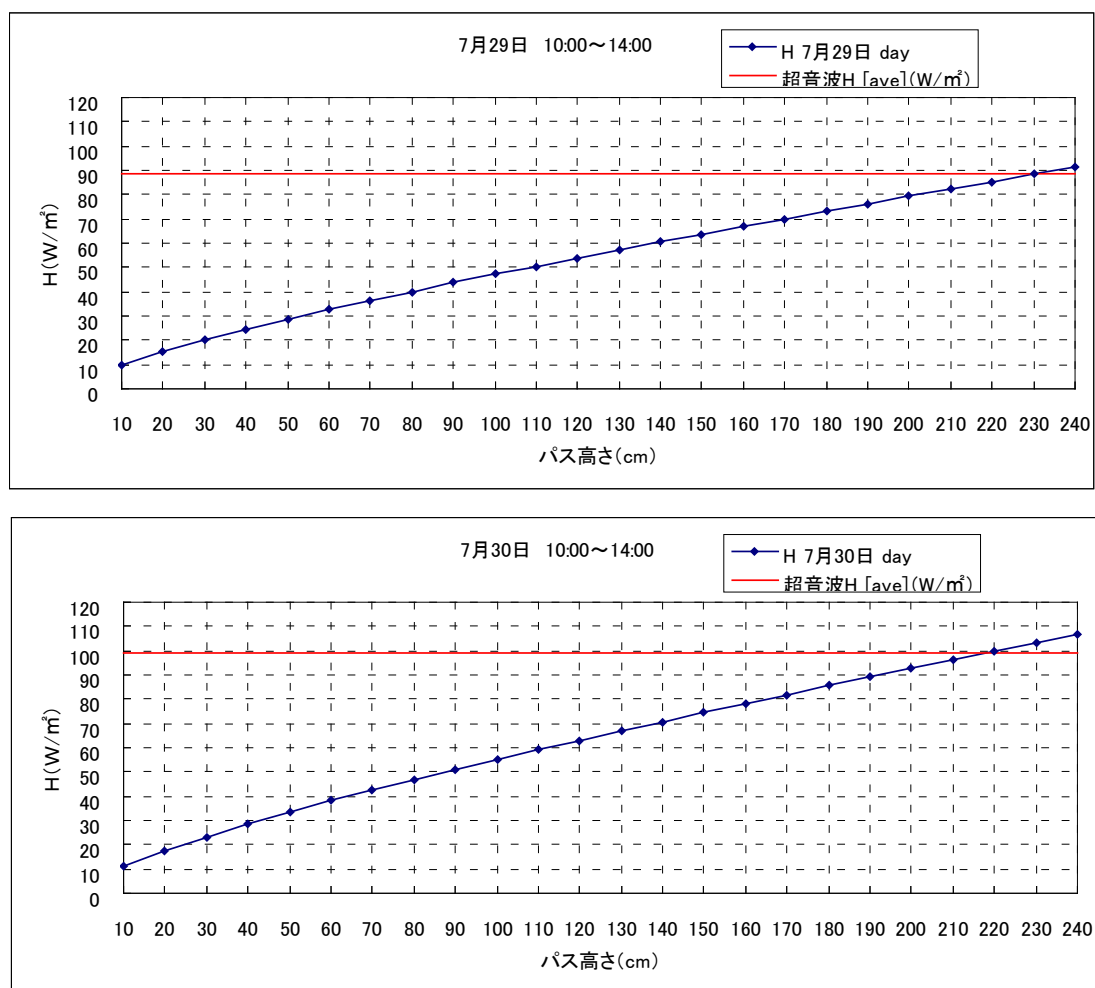
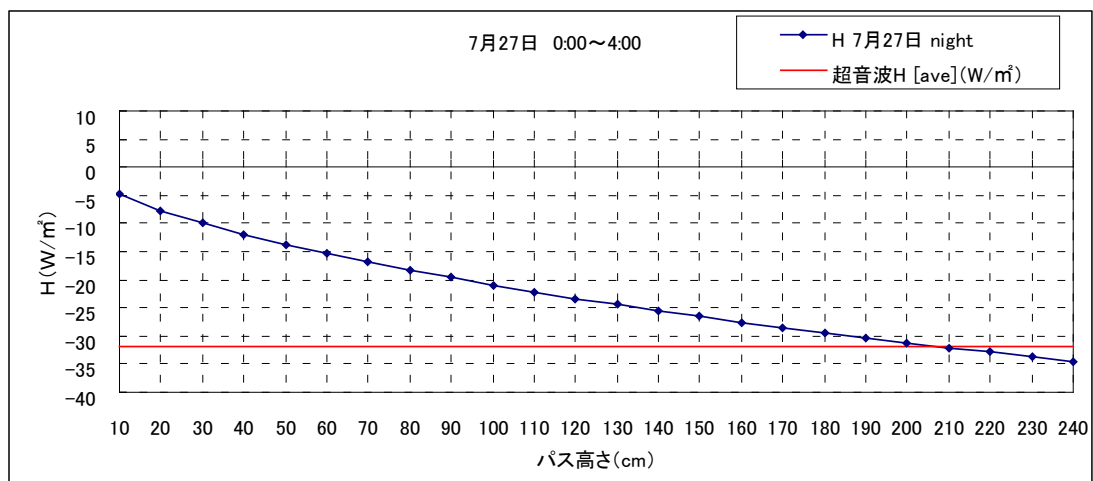


図 2-40 シンチロメータのパス高さ別の顕熱流速(DAY)と渦相関法の顕熱流速の関係

図 2-41 はシンチロメータのパス高さ別の顕熱流束 (NIGHT) と渦相関法の顕熱流束の関係を示す。こちらは夜間の 0 時から 4 時までの時間帯を選んで図 2-40 と同じようにシンチロメータのパス高さを変えて再計算をして渦相関法により求められた顕熱流束と比較した。

25 日は約 140cm、27 日は約 210cm、29 日は約 180cm、31 日は約 200cm で 26 日と 30 日はシンチロメータのフラックスと渦相関法のフラックスが交差していない結果となった。両図を比較してわかるように日によってシンチロの顕熱流束と渦相関法による顕熱流束が交差するパス高さが変わってしまう。また、同じ日でも日中と夜間ではパス高さが異なっている。



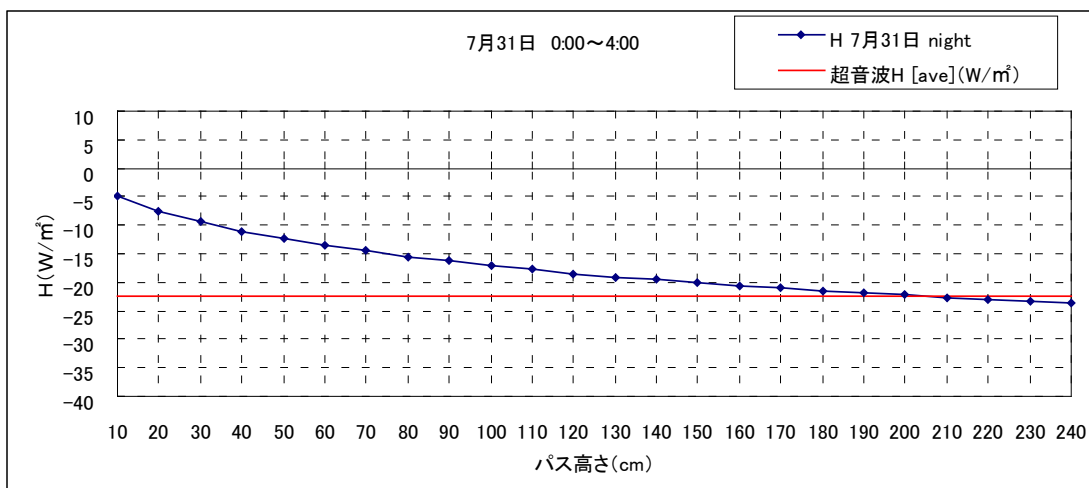
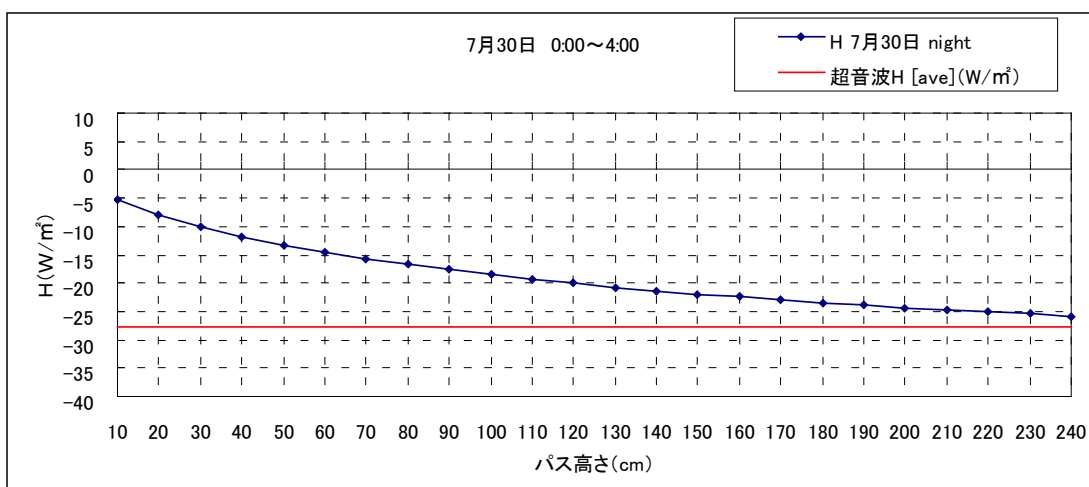
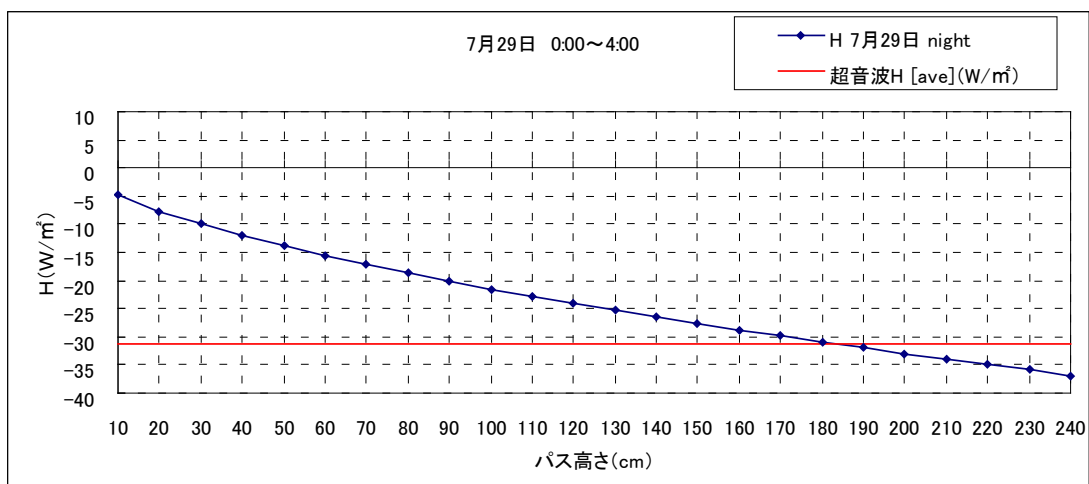


図 2-41 シンチロメータのパス高さ別の顕熱流速(NIGHT)と渦相関法の顕熱流速の関係

このことから今回の測定では正確な d が求めることが出来なかったといえる。このような結果となった要因としては、渦相関法で求めた顕熱流束の値が予想していたものより低くでてしまったこと、草地面の高さが均一でないこと、土壌面や草地面に貯えられた熱（貯熱）による影響が予想していたものより大きかったこと、シンチロメータの湿度補正方法が確立されていないことにより正確な湿度補正ができないこと等が考えられる。

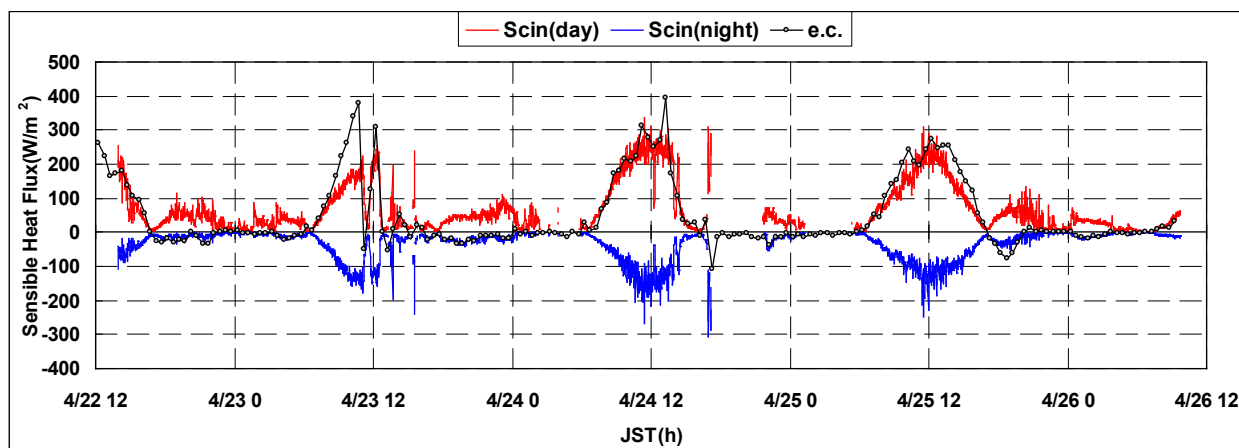


図 2-42 シンチロメータと渦相関法の顕熱流速の時間変化

＜シンチロメータによる顕熱流束と温度差の比較＞

図 2-43 はシンチロメータによる顕熱流束と温度差の時間変化を示す。測定高度 1.5m と 2.1m では時間帯によるが温度差に最大約 1℃の差があるが、日中の気温が高い時間帯のときにこの温度差がシンチロメータによる各高度の顕熱流束の値に与える影響はそれほど大きくないといえる。しかし、気温が下がり始め顕熱流束の値が低下してくるに従い、1.5m と 2.1m で顕熱流束の値で多少、異差が出てきている。また、フラックスの値が夕方から夜間にかけて正から負に切り替わるときの変動を見ても 1.5m より 2.1m のほうがやや遅いことがわかる（普通、夜間は土壌や植物などに貯えられた熱が放出されるためフラックスの値は負となる）。

測定した顕熱流束が日中の放射などによって地表面や草地に貯えられていた熱の影響を受けていると考えられ、1.5m より 2.1m の方がより多く貯熱の影響を受けているために差が出ると推測される。

25 日の 22:00 から 26 日の 6:00 間は夜間にもかかわらず各顕熱流束の値が限りなく 0 に近い。これは、夜間は基本的に接地境界層が安定状態にあるため、この時間帯は風速が弱い状態が続き、乱流の運動エネルギーが弱められる。それにより乱流活動が弱い状態になり、顕熱流束の値が 0 に近いものになると思われる。

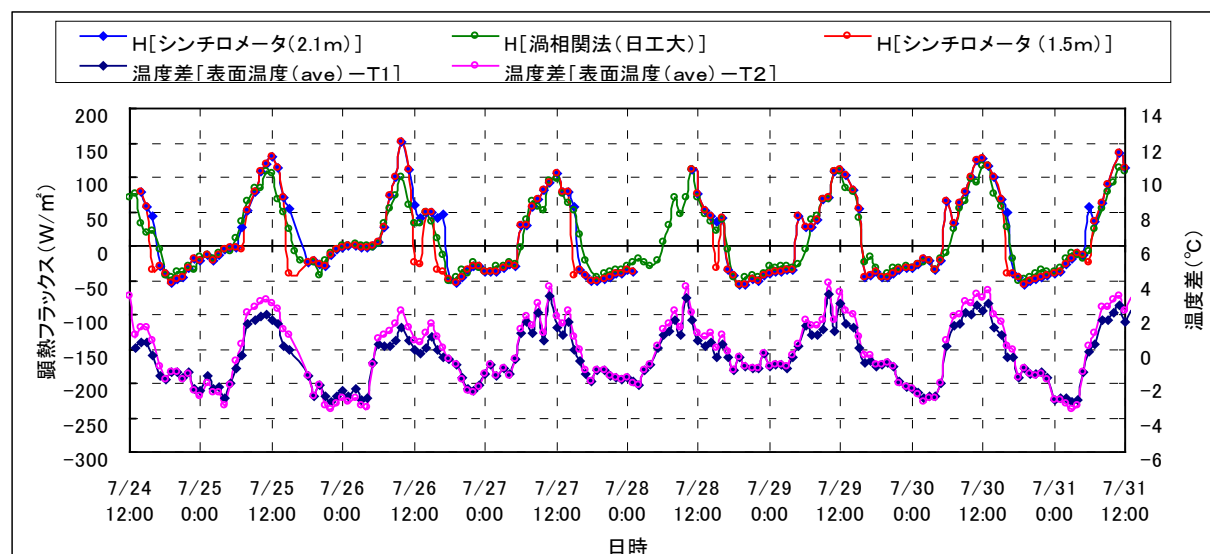


図 2-43 シンチロメータによる顕熱流速と気温差の時間変化

＜シンチロメータによる各高度別の顕熱流束の比較＞

図2-44 にシンチロメータによる各高度別の顕熱流束と各測定法の顕熱流束の時間変化を示す。10cm ごとにパス高度を変え、再計算をした値を比較した（図では0.6mから0.3m ずつ2.4mまでを示す）。各測定法による顕熱流束を比較すると、渦相関法で求めた顕熱流束の変動に近いものが2.4mの顕熱流束の値、傾度法で求めた顕熱流束の変動に近いものは1.2mの顕熱流束の値といえる。

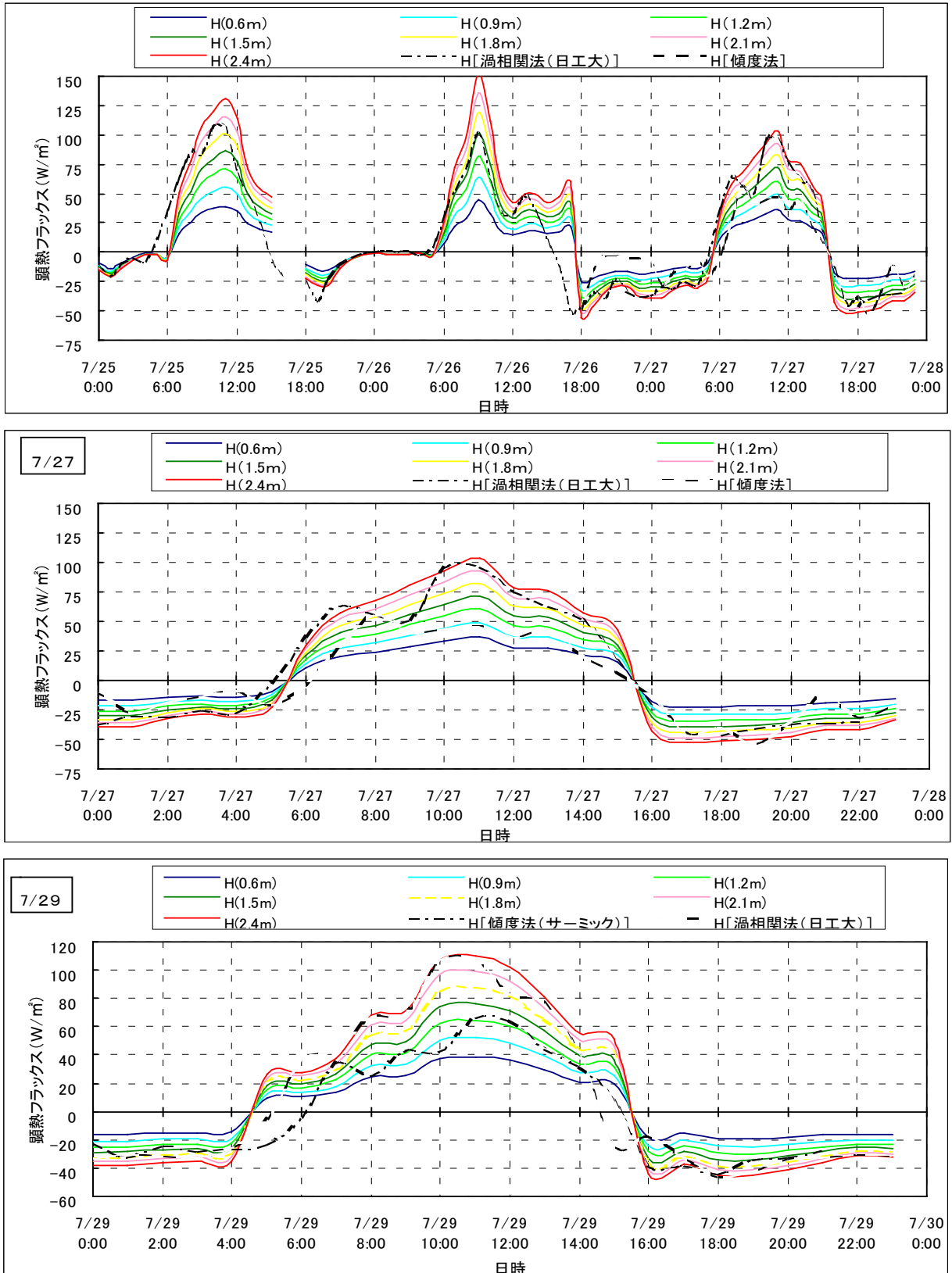


図2-44 シンチロメータによる各高度の顕熱流速と各測定法の顕熱流速の時間変化

<傾度法による算出>

傾度法とは、測定場所が十分な拡がりをもつ均質な平坦面であることを条件に、接地気層内の 2 高度で測定した風速、気温、比湿の平均値から運動量、顕熱、水蒸気のフラックスを求める方法である。算出式は以下に示す。圃場内の葉群落上の運動量 (τ)、顕熱流束 (H)、すすきの葉面温度 (T_s) の測定高度 (z_{Ts}) における平均比湿 (q_{Ts})、群落上のある高さ (z_1)、における平均気温 (T_1)、平均比湿 (q_1) とし、次式のように表される。

$$\tau = K_m \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} \quad (12)$$

$$H = -K_h C_p \rho \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} = -K_h C_p \rho \frac{T_1 - T_s}{z_1 - z_{Ts}} \quad (13)$$

H : 顕熱流束 [W/m^2] K_h : 熱の乱流拡散係数 [m^2/s] C_p : 空気の比熱 [$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{h}$]

ρ : 空気の密度 [kg/m^3] T_1 : 群落上にある高さの平均気温 [$^{\circ}\text{C}$]

T_s : すすきの葉面温度 [$^{\circ}\text{C}$] z_1 : 群落上のある高さ [m]

z_{Ts} : 群落表面温度の測定高度 [m]

ここで、 K_m 、 K_h 、 K_q は運動量、熱、水蒸気の乱流拡散係数で、 C_p は空気の定圧比熱、 ρ は空気密度、 $\bar{U}$ 、 $\bar{T}$ 、 $\bar{q}$ は風速、温度比湿の平均値である。地表面に近い部分、中立温度成層中では風速の鉛直プロファイルが対数分布をしていると仮定できる。この場合、運動量の乱流拡散係数 (K_m) は摩擦速度 (u_*) を用いると (14) 式のように表される。

$$K_m = k z u_* \quad (14)$$

ここで z は代表高度であり、 z_1 と z_{Ts} の幾何平均、すなわち

$$z = \sqrt{(z_1 - d)(z_{Ts} - d)} \quad (15)$$

である。 d は地面修正量、 k はカルマン定数 (0.4) である。地表面付近で $K_m = K_h = K_q$ が成立すると仮定すると、(13) よりすすきの葉面温度を使用して、顕熱流束を推定することができる。

<渦相関法による顕熱流束の変化>

図 2-45 は渦相関法による顕熱流束と合成風速の時間変化を示す。顕熱流束は合成風速及び気温の差という 2 つの要素により変化するものである。渦相関法で求めたフラックスと合成風速を比較したとき、合成風速は測定期間中はほぼ毎日、14 時頃に最高値となり、夜明け前 4 時頃に最小値になる。フラックスの変動の仕方は最高値と最小値を迎える時間帯が合成風速より約 2 時間ずれている。(日工大)と(ルーチン)ともに日中におけるフラックスの値はほぼ同じ変動をみせている。しかし、変動の大きさで多少差が出ており日中より夜間の方でその差が最大で約 40 (W/m^2) とより顕著に出ている。29 日の 0 時から 6 時までの時間帯は他の日の同時時間帯に比べて合成風速が多少高いが顕熱流束は他の日と比較してもあまり差はみられない。図 2-46 は渦相関法による顕熱流束と気温差の時間変化を示す。測定期間中、気温の変化で特に変わったところはなく、顕熱流束の変動を見たとき気温の変化とよく一致しているといえる。

両方の図を比較してみたとき、合成風速、気温の変化とも日中や夜間において極端に大きな変化、特に目立った点がみられなかった。顕熱流束と気温差、合成風速の変化について比較したとき、両方ともに顕熱流束の変化に比較的類似しているといえるが、合成風速よりは気温の方が顕熱流束の

変化に酷似している結果になった。このことから、合成風速の変化が顕熱流束に及ぼす影響よりも、気温が与える影響の方が強いと推測される。

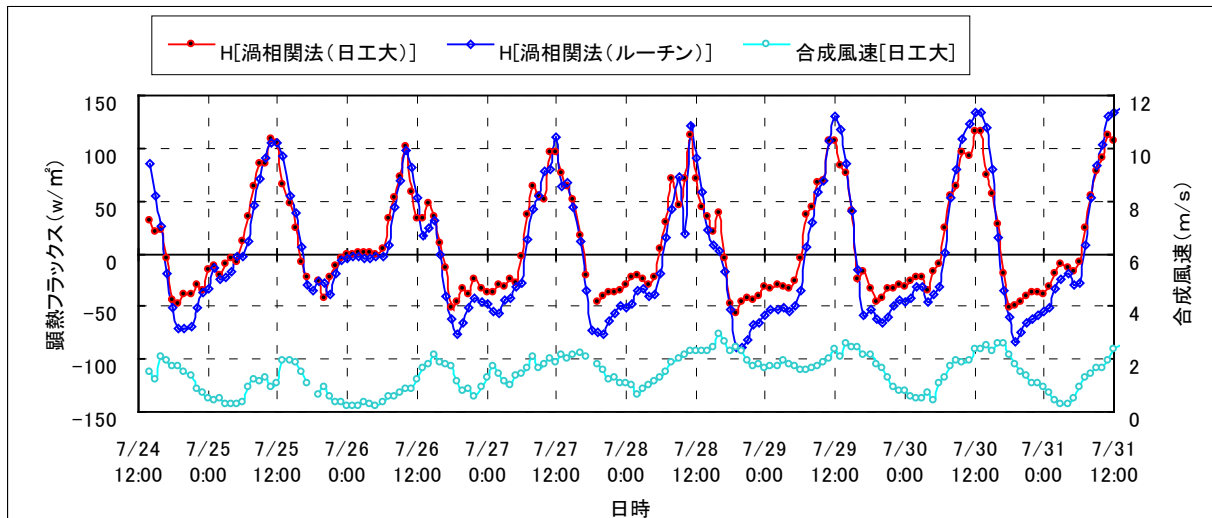


図 2-45 渦相関法の顕熱流速と合成風速の時間変化

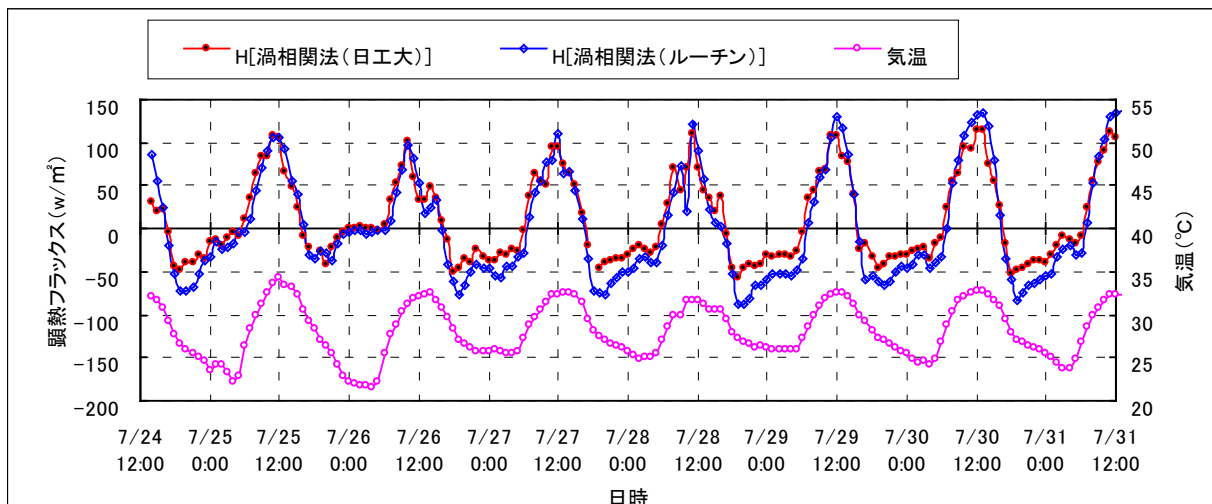


図 2-46 渦相関法の顕熱流速と気温の時間変化

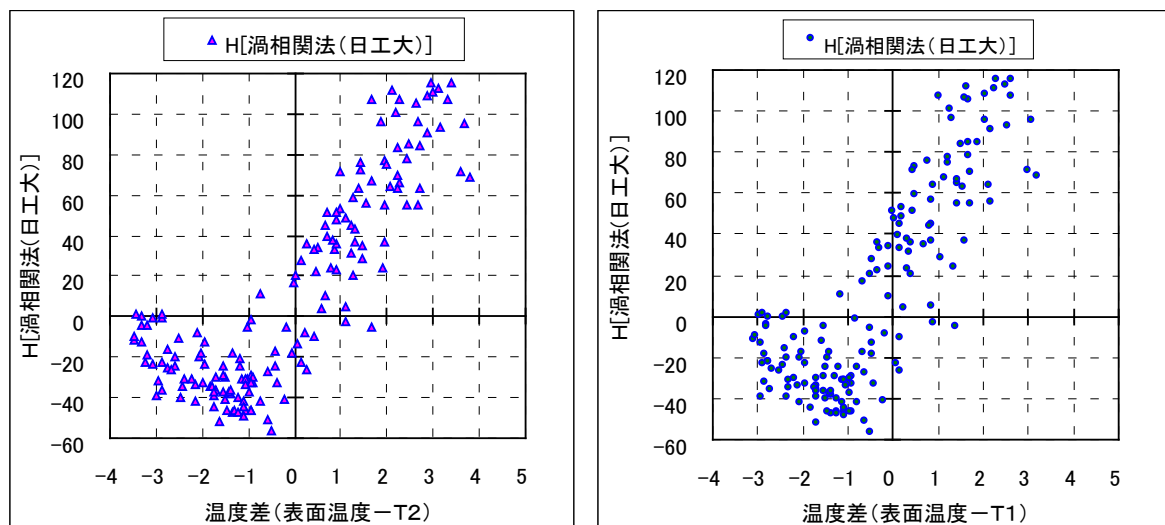


図 2-47 温度差と渦相関法の顕熱流速の関係

図 2-47 は温度差と渦相関法の顕熱流束の関係を示す。温度差（表面温度－T1〔測定高さ 1.5 m〕左側の図参照、温度差（表面温度－T2〔測定高さ 2.1m〕）右側の図参照との顕熱流束の分布を比較したとき、左側の図は右側の図に比べて基本的な分布は同じといえるが第三象現、第四象現の分布に少し差がみえる。

＜傾度法による顕熱流束の変化＞

顕熱流束は三杯式風速計 2 高度の風速(4m、2m)、静電容量型温湿度計 2 高度の気温(2.1m、1.5m)、C-C 型熱電対からのすすきの葉面温度による測定値から (13) 式を用いて算出した。

図 2-48 は傾度法による顕熱流束と合成風速の時間変化を示す。傾度法で求めたフラックスと合成風速を比較すると、前項の渦相関法と同様、顕熱流束の最高値・最小値の時間が合成風速と比べて約 2 時間ずれている。図 2-49 は傾度法による顕熱流束と気温の時間変化を示す。これも前項の渦相関法と同様、気温の変動と顕熱流束の変動の仕方がよく一致している。

図 2-50 は温度差と傾度法による顕熱流束の関係を示す。傾度法で求めた顕熱流束と 2 つの温度差を比較してみると温度差（表面温度－T1〔測定高さ 1.5m〕左側の図参照）と温度差（表面温度－T2〔測定高さ 2.1m〕右側の図参照）とも分布の仕方が基本的にはあまり変わらないといえるが左側の図の方が右側の図に比べて第三象現、第四象現に分布する点が少なく、顕熱流束の値として信頼性が高いといえる。

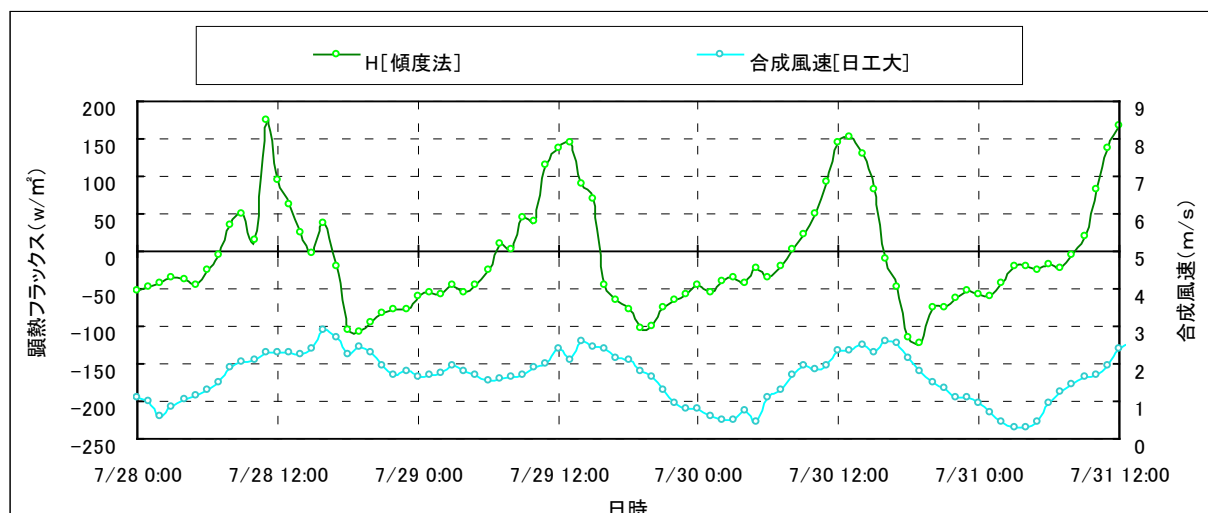


図 2-48 傾度法の顕熱流速と合成風速の時間変化

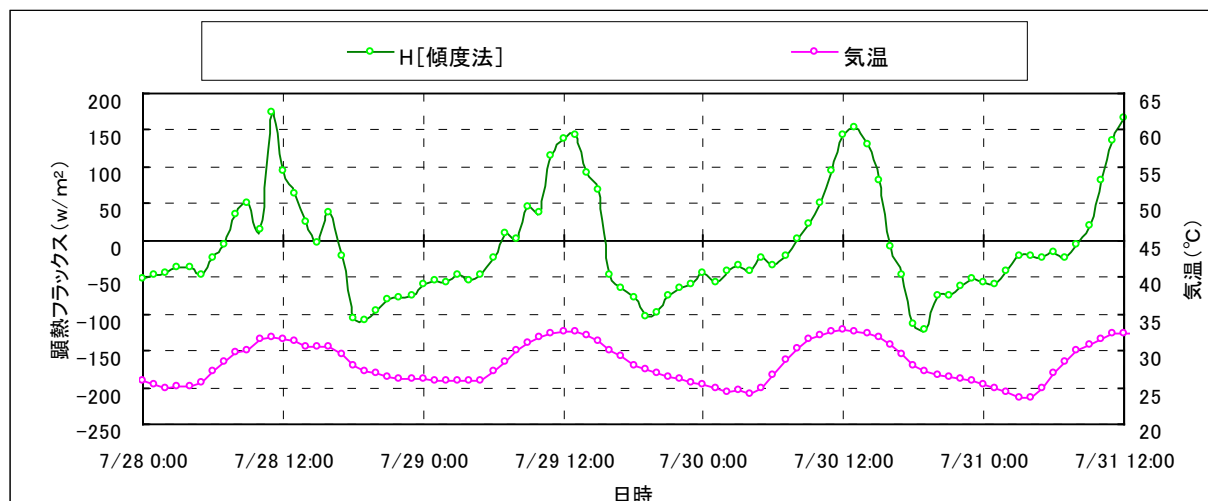


図 2-49 傾度法による顕熱流速の気温の時間変化

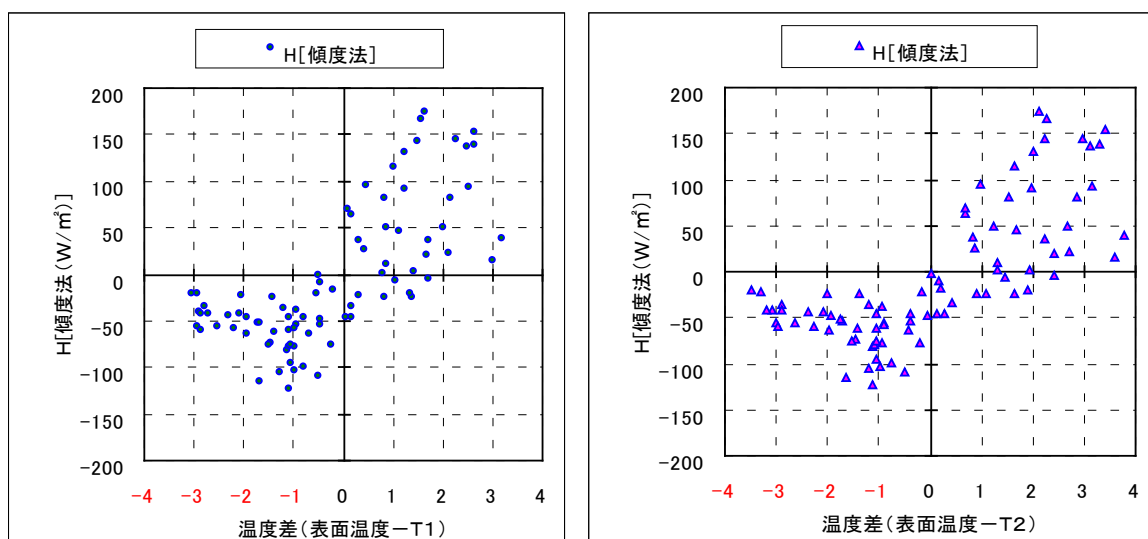


図 2-50 温度差と傾度法の顕熱流速の関係

＜各算出方法による顕熱流束の比較＞

図 2-51 は各算出方法による顕熱流束の時間変化を示す。各算出方法で求めた顕熱流束はほぼ一致しており、その中でも渦相関法（ルーチン）の顕熱流束と渦相関法（日工大）の変動の仕方がよく一致している。夜間にフラックスが負になったとき、最大で約 50 (W/m^2) の差が出てくるが日中ではそんなに極端な差はない。しかし、シンチロメータの顕熱流束の変動が数ヶ所ずれているところがある。これは土壌面や葉群層に貯えられた熱の影響によるものと、シンチロメータの計測はレーザー間の乱れを平均的に測定しているのに対して渦相関法（超音波風速計）、傾度法（三杯式風速計）では一点での計測であるために局地的な乱れに反応しやすいことによるためと推測される。

図 2-52 は各算出方法による顕熱流束の相関図である。シンチロメータの顕熱流束と比較した場合は渦相関法（日工大）との相関が 0.908 と高い。傾度法で相関を比較した場合は渦相関法（ルーチン）が 0.915 と相関性が高い。渦相関法どうしの相関（ルーチン、日工大）は 0.940 である。これらのことにより相関性が最も高いのが渦相関法どうしの相関であり、渦相関法で求めた顕熱流束の値（ルーチン、日工大）が他の算出方法より信頼性が高いといえる。

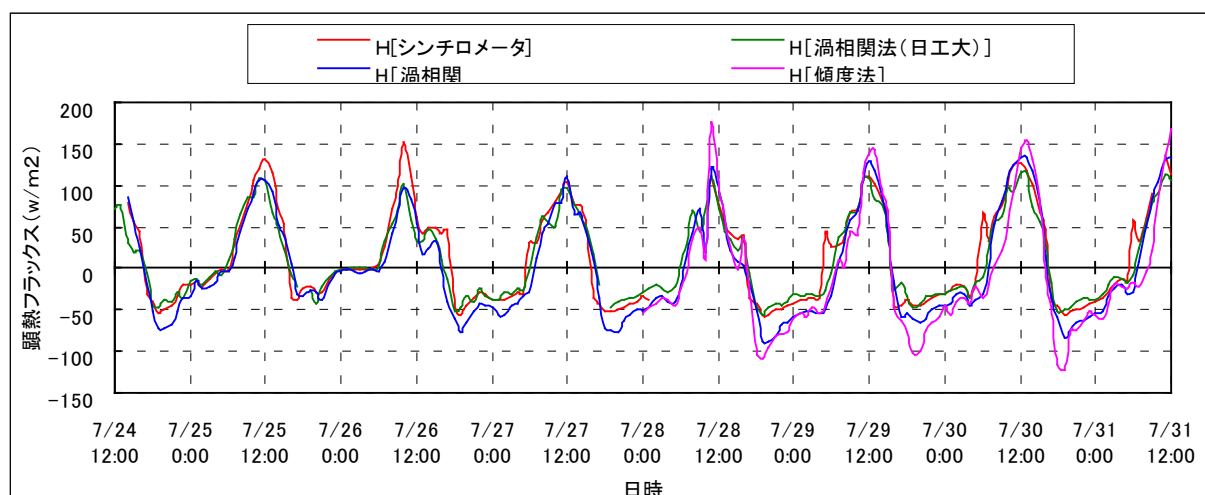


図 2-51 各算出法による顕熱流速の時間変化

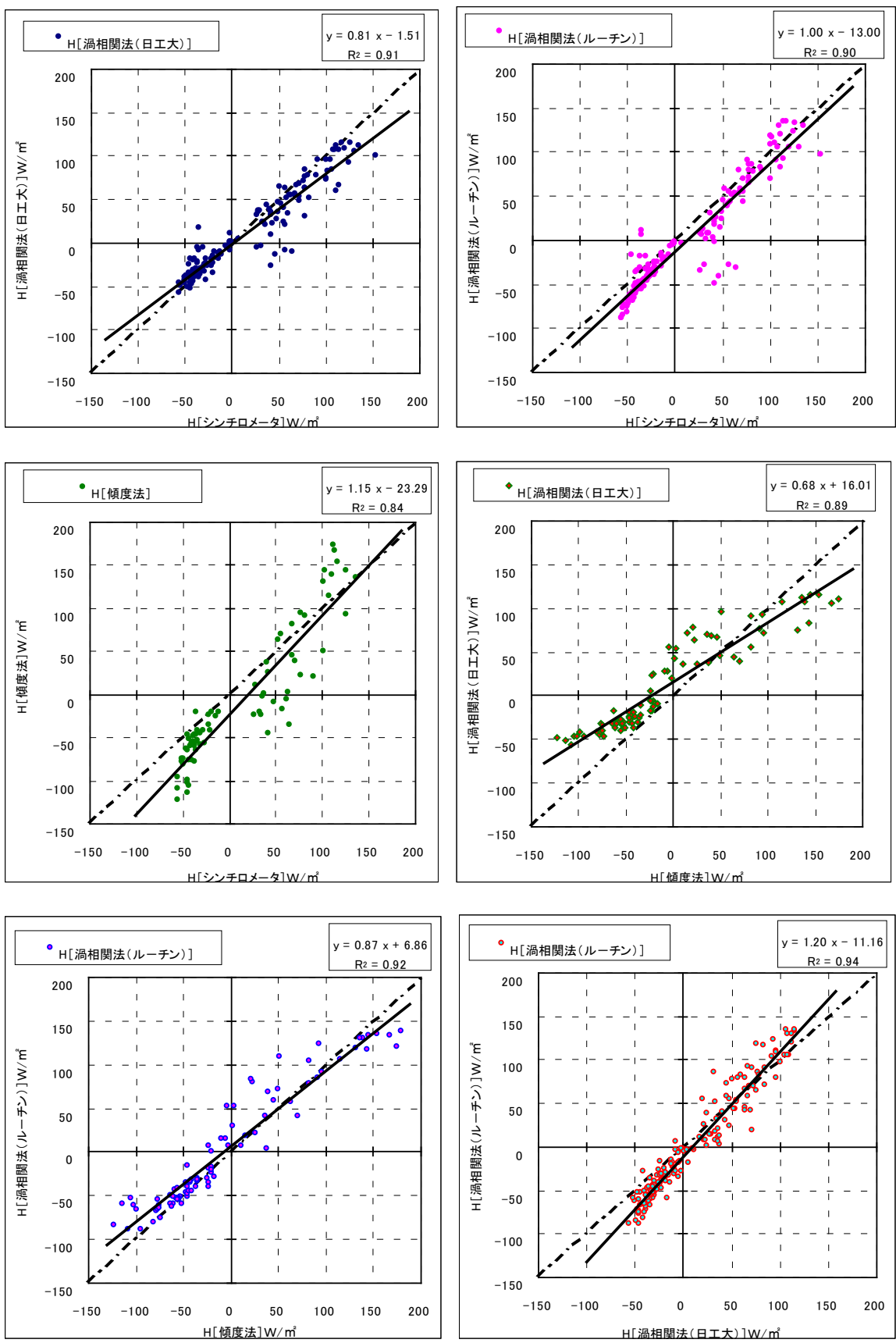


図 2-52 各算出法による顕熱流速の相関図

第3章 複雑な地表面における顕熱フラックス検証

3-1 集合住宅団地の棟間芝生面

(1) 実測対象

東京都北区の赤羽台団地の1区画を対象とする。図3-1に対象領域周辺の地図を示す。同団地は南東に高低差約12mの崖を有しており、その崖の上に立地している。

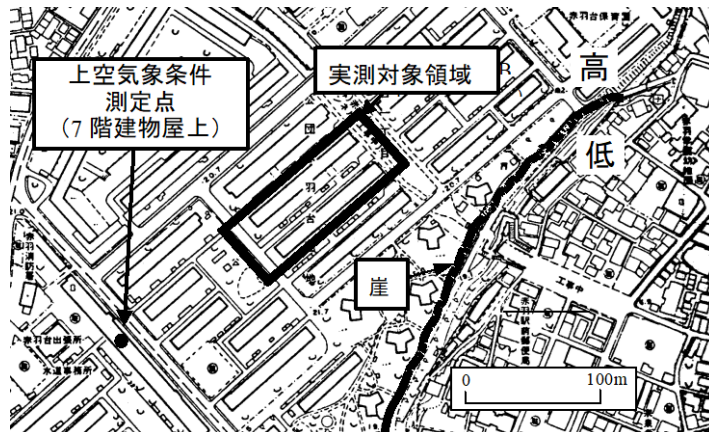


図3-1 実測対象領域

(2) 実測期間ならびに測定方法

実測期間は平成11年8月2日(月)～8月6日(金)。図3-1中実線枠内の実測対象領域(測定領域B)内の数点において風速、気温、グローブ温度、相対湿度、地表面並びに地中温度の時間変化を測定した。図3-2に各測定点を示す。また実測対象領域内の数点(図3-2△印、測定点⑨～⑭)において、各樹木の樹冠の日射透過率 τ を測定し、これと樹冠部分の透過距離 l からその樹木帯の葉面積密度 F を推定した。また、実測時の上空の気象条件(風向・風速、気温、湿度、グローブ温度)を実測対象領域の南西(図3-1)にある7階建て団地棟(建物高さ21m)の屋上(測定点A)で測定した。ここで風向、風速は3次元超音波風速温度計を長さ6mのポール上(地上から27m)に設置して測定した。他の物理量は団地棟屋上から1.5m高さ(地上から22.5m)で測定した。

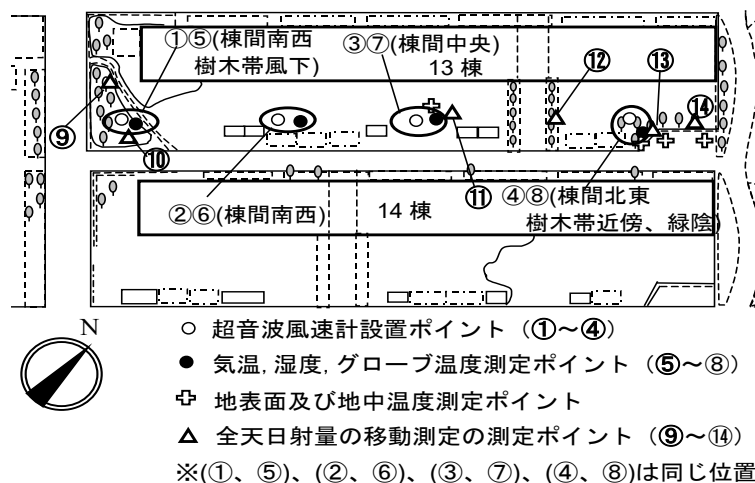


図3-2 測器の配置状況

また、草地ならびにアスファルト表面の熱収支を測定した。草地面の熱収支は、棟間中央(図3-2、測定点③、⑦付近)を測定ポイントとして、放射(下向き短波放射、上向き短波放射、

下向き長波放射、正味放射)の測定と秤量法による蒸発散量の測定、および熱流板の埋設による地中伝導熱流を測定した。ここで、草地面蒸発散量の測定は、土壌の表層厚さ 10cm を攪乱せずに切り取ってアクリル製の容器 (33cm 角) に移し、元の場所に周囲と同化するように埋設し、この容器全体の重量を 1 時間毎に電子天秤で測定し、その重量変化から蒸発散量を算出した (秤量法)。10cm という土層厚は熱収支解析の観点からは決して十分ではないが、現地の土層厚さ自体が 15cm 程度しかなかったため 10cm とした。土層試料の作成は測定開始前日の 8 月 2 日に行っており、数日間の水分移動の把握に対しては概ね問題ないと思われる。この土層試料の重量変化測定位置の横に水面容器を設置し、こちらの重量変化も同時に測定し、両者の差から蒸発効率 β を求めた。なお、後述するように本研究では β の算出において草地面と水面の物質伝達率は等しいと仮定している。この仮定の妥当性、すなわち両者の表面粗度の違いが蒸発効率に与える影響は無視し得ることを確認する目的で、水面に人工草を設置したモデルも別途用意し、水面のみの場合と比較検討した。水面用容器の直径は約 250mm 深さ 85mm で、人工草は金魚鉢に用いられる合成樹脂製のもの数種を用い、周囲の草丈・密度と同化させた(図 3-3)。使用した天秤は 0.1g 精度、各測定試料の重量変化は 10~50g/h のオーダーであった。アスファルト舗装面については、直径 10cm のコア抜きを現場で行い、表面から 1.5cm の位置で切断し、熱流板と熱電対を挟んだ後再び同所に埋設した。舗装面の厚さは約 5cm で、切断面の隙間はストレートアスファルトを溶かして充填し接着した。なお、参考として、住棟間の草地上でシンチロメータによる顕熱 flux の測定を試みた。パス方向は住棟に平行とし、パス間距離 58m、高度は 2.3m とした。



写真 3-1 測器の配置状況



写真 3-2 草地面蒸発散測定のための簡易ライシメータの作成状況



写真 3－3 アスファルト舗装面のコア抜きとセンサーの設置状況

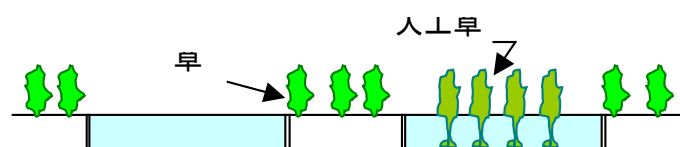


図 3－3. 水面蒸発量測定器（左：水面のみ、右：人工草付き）

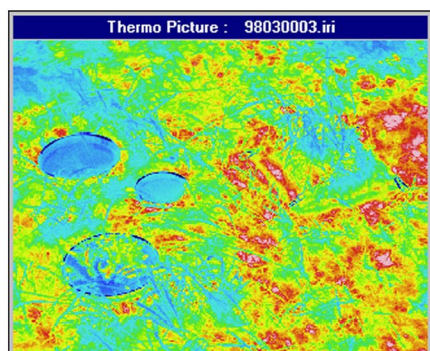


写真 3-4 簡易ライシメータの設置状況

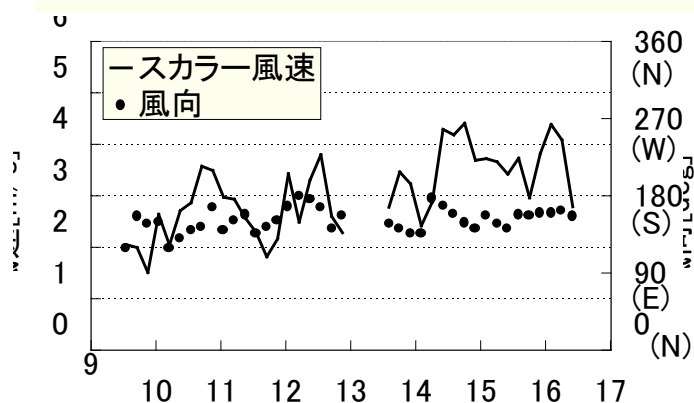
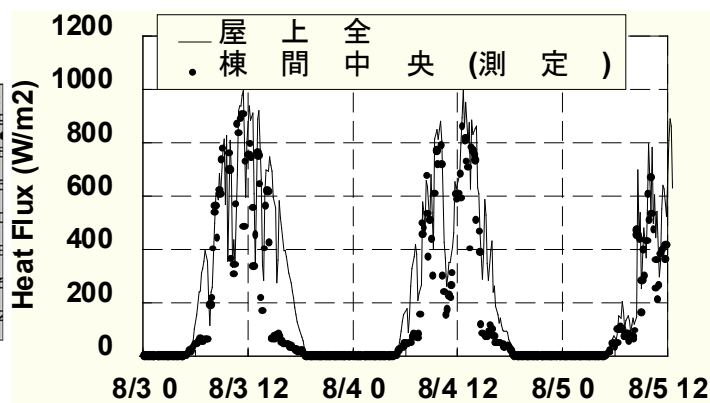


図 3-4 上空の気象条件

(3) 気象条件

図 3-4 に測定点 A 並びに団地棟間の中央 (測定点⑩) において測定した全天日射量の時間変化を示す。実測中、8 月 3 日、4 日は晴天であったが、4 日深夜から 5 日早朝まで大雨となり、5 日は曇天であった。屋上 (測定点 A) では、日射量は晴天であった 8 月 3 日、4 日では正午前後に 900 W/m^2 を超える値を示し、曇天であった 8 月 5 日においても正午前後に 800 W/m^2 程度の値となった。また、図には示さぬが、下向き長波放射量は実測期間を通じ $400 \sim 450 \text{ W/m}^2$ 程度の値を示した。図 3-4 に測定点 A において測定した 8 月 4 日における上空の風速・風向の時間変化 (10 分間平均) を示す。風向は南から南東を示し、測定全般を通じて大変安定しており、風速は平均値で 3.0 m/s 程度の値となった。

(4) 草地面の熱収支とこれに関わるパラメータ値の同定

本節では団地棟間中央 (図 3-2 測定点②、⑦近傍) において測定した草地面の熱収支並びにこれに関わるパラメータとしてアルベド並びに蒸発効率の値を同定した結果を示す。

1) アルベド (図 3-5)

草地面における上向き全天日射量と下向き全天日射量の値の比から草地面のアルベドを推定した。その結果を図 3-5 に示す。測定期間全般を通じて $0.15 \sim 0.2$ 程度の値を示し時間ごとの大きな変化は無い。

2) 蒸発効率 (図 3-6～図 3-8)

次に秤量法より求めた蒸発(散)量 E を基に草地面の蒸発効率 β を推定した。ここでは、蒸発(散)量 E と表面温度および空気側の温湿度から求まる絶対湿度差 ΔX から、 $E/\Delta X$ を水面と草地面について算出し、水面の蒸発効率 β を 1、湿気伝達率 α_w は水面も草地面も等しいと仮定し、 $E/\Delta X$ の両者の比から草地面の β を算出した。

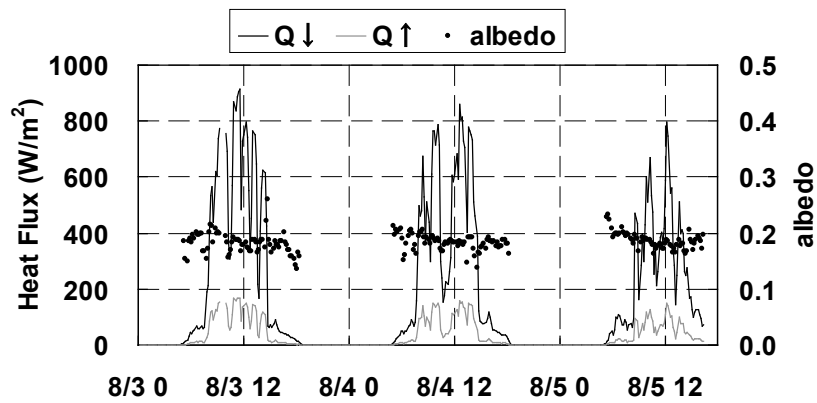


図 3-5. 日射量と草地面のアルベドの変化

$$E = \beta \cdot \alpha_w \cdot \Delta X \quad (1)$$

$$\Delta X = (X_s - X_a) \quad (2)$$

X_s : 表面温度に対する飽和絶対湿度、 X_a : 空気の大気湿度

ここでは空気側の湿度は草地上 42cm において、日射遮蔽板を取り付けた通風二重筒（アルミ製）の内部にサーミスタ温度計と容量型湿度計を装着して測定している。通風速度は約 4m/s である。

以上のようなプロセスによる α_w と β の推定では、 X_s の計算に必要な表面温度が結果の精度に大きく影響する。特に草地面に関しては、上向き長波放射に寄与する表面温度と顕熱に寄与する表面温度が異なるという可能性もあり、厳密には表面温度の定義により α_w と β の値が異なってくる。ここでは、モデルで表面温度の使い分けがなされていないことを考慮し、表面温度はひとつの値とみなした扱いをしている。測定法に関しては、草地における表面温度の不均一性を考慮し、空間平均が求まる熱画像の平均値を基本とした。ただし熱画像による温度は絶対値に問題があるため、画角内に別途用意した小水槽の水温をサーミスタ温度計で直接測定し更正した。なお、人工草付水槽に関しては蒸発面である水面部分が熱画像では撮れないため、スポット型の放射温度計を併用した。

図 3-6 に各試料面についての $E/\Delta X$ 、また図 3-7 に草地面の β の時間変化を各々示す。図 3-7 の 2 種類の値は、草地の β を算出する際に基準とする水面の値として「水面のみ」を使用したか「人工草付」を使用したかを意味している。降雨前 2 日間の β の平均は 0.47 となり、また人工草を設置した効果は結果的に非常にわずかで、水面上の気流性状は今回の測定状況では周囲の草地と同等と見なせる結果となった。

このときの湿気伝達率 α_w と高さ 1.5m の風速との関係を示したのが図 3-8 である。本測定では風速と α_w との間に非常にきれいな対が、これはスポット型の放射温度計の測定精度が原因と思われる。

3) 土壌の熱伝導率並びに熱容量 (図 3-9、10)

図 3-9 は熱流板により測定した地中への伝導熱流 G_f と地温勾配 $\Delta T/\Delta z$ から土層の熱伝導率 λ を算定した結果である。深さ 5cm における G_f は 0cm と 10cm の地温による $\Delta T/\Delta z$ に対して、深さ 10cm における G_f は 5cm と 15cm の地温による $\Delta T/\Delta z$ に対してプロットした。本測定では $\lambda = 0.43 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ という値となった。また、深さ 5cm と 10cm における G_f の差から求めた 5~10cm 層の蓄熱量 ΔS と同層の温度の時間変化から土壌の熱容量 ρC_p を算定した結果を図 3-10 に示す。ここでは、地層

全体の平均温度を上下境界(5cm と 10cm)における地温の平均値で近似しているため、実際の地温プロファイルとのずれから昇温時には過大評価、降温時には過小評価となる。対象土層が 5cm とやや厚いため、その影響が無視できず相関はやや悪くなっているが、 $\rho C_p = 2.5 \times 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$ という値が得られた。土壌の熱物性値は土質によりかなりの幅はあるが、一般には熱伝導率 λ が乾燥土で 0.3・湿潤土で 2.0 [$\text{W/m} \cdot \text{K}$] 程度、一方熱容量 ρC_p は乾燥土で 1.3・湿潤土で 3.0 [$\times 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$] 程度とされている。本実測で得られた値は、 λ がかなり乾燥した土壌、 ρC_p はやや湿潤な土壌に相当する値であるが、いずれもほぼ妥当な結果と言える。実測終了後、秤量した草地面サンプルの土壌を 110℃で 7 日間乾燥させ乾燥重量を測定し、それをもとに測定期間中の土壌の含水比を求めた。降雨があった 4 日深夜までは、含水比は漸減しており、3 日午前で 0.36、4 日夕方で 0.28、降雨後の 5 日午前は 0.54 であった。

4) 草地面の熱収支 (図 3-11、12)

図 3-11 に 8 月 4 日の草地面の熱収支を示す。

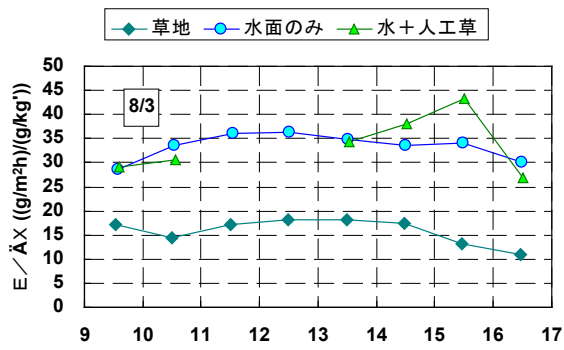
$$R_n = H + LE + G \quad (3)$$

$$G = G_f + \Delta S \quad (4)$$

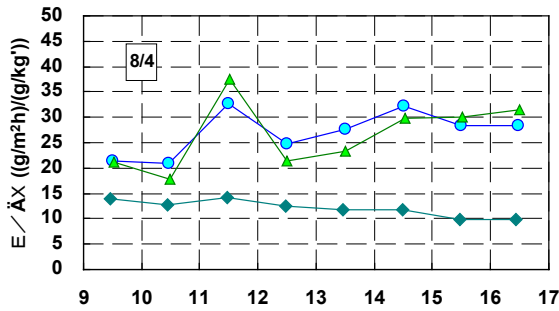
R_n : 正味放射量, H : 顕熱 flux, LE : 潜熱 flux

ここでは、 R_n は正味放射計による実測値、 LE は秤量法による蒸発散量の実測値から求めた値である。 G_f は深さ 5cm の熱流の実測値、 ΔS は図 3-10 で求めた土層の熱容量 ρC_p を用いて表層 5cm の地温の時間変化から算出した表面から G_f の測定深さ 5cm までの土層の蓄熱量で、両者の和が表面の地中伝導熱流 G となる。

また、図 3-12 は草地面における顕熱 flux H についてその推定方法の違いによる差異を検討した結果である。ここでは、①(5)式の熱収支項の残差として求まる顕熱 flux ($R_n - LE - G$)、②1.5m 高さの超音波風速温度計による渦相関法 $H(e.c.)$ 、③シンチロメータによる値 $H(scn)$ 、④モデルで仮定しているルイス則を用いて図 3-8 に示す湿気伝達率から算定される対流熱伝達率と(表面温度-気温)との積から求めた値 $H(Le)$ 、の 4 つを比較している。ルイス則は、シュミット数 Sc とプラントル数 Pr の比で定義されるルイス数 $Le (= Sc/Pr)$ を用いて、 $\alpha_c / C_p = \alpha_w (Le)^n$ のように表わせる。ただし C_p は湿り空気の比熱である。本報ではモデルに従い $(Le)^n = 0.86$ とした。どの方法による顕熱が妥当であるかの判断は難しいが、以下の諸点は指摘できる。図 3-11 によれば、蓄熱項 ΔS が日射の変動と対応していない。これは 5cm という深さの地温変化を用いているため時間後れの影響が現れた結果である。このような誤差を小さくするためには、 G_f の評価深度をできるだけ浅くすることが得策であるが、今回は高密度な根系の存在のため 5cm とするのが限界であった。結果として、熱収支残差による顕熱($R_n - LE - G$)は午前中、 R_n の変動と対応していない。1.5m 高さの超音波風速計による渦相関法は、草地面のスケールを考慮すると空間代表性に難があると判断される。従って、後述する周囲のアスファルト舗装面からの顕熱を拾い、過大評価となると予想される。以上の諸点から、本測定においてはルイス則による顕熱が最も信頼できると考えるのが妥当と思われる。なお、他の 3 つの方法の中でルイス則による算定値と最も良く一致したのは、シンチレーション法による顕熱という結果となった。シンチレーション法は、原理的にパス間の空間平均 flux が求まる利点はあるが、計算に使用している経験式の適用限界など、今後検討すべき点が残されている。

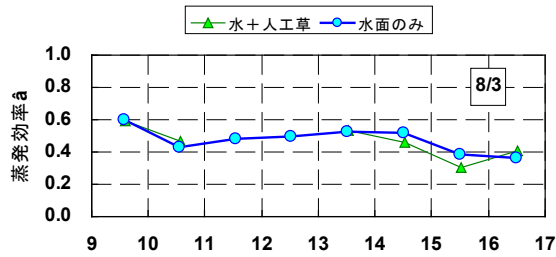


(1) 8月3日

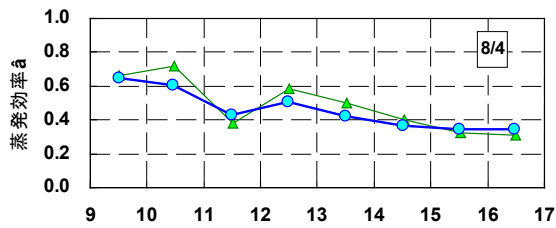


(2) 8月4日

図3-6 草地・水面における $E/\Delta X$ の時間変化



(1) 8月3日



(2) 8月4日

図3-7 草地の蒸発効率 β の時間変化

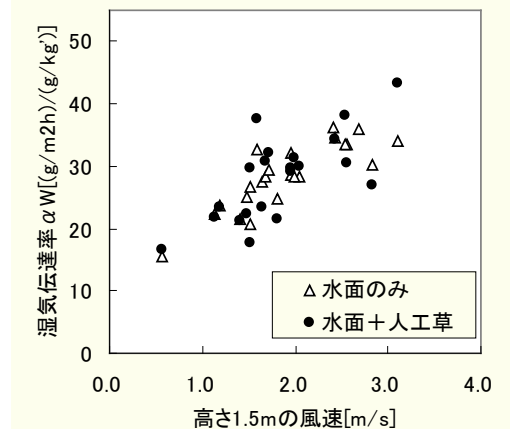


図3-8 湿気伝達率 α_W と風速の関係

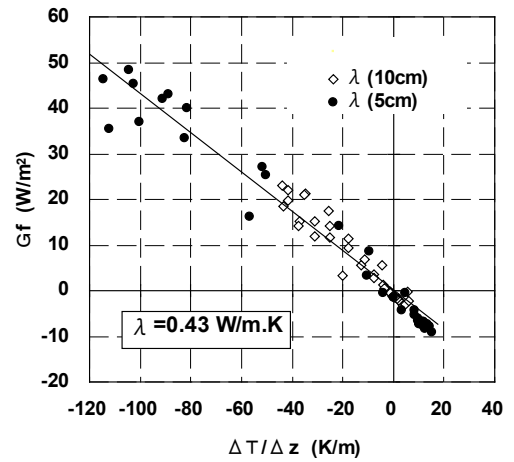


図3-9 土層の熱伝導率 λ の算定

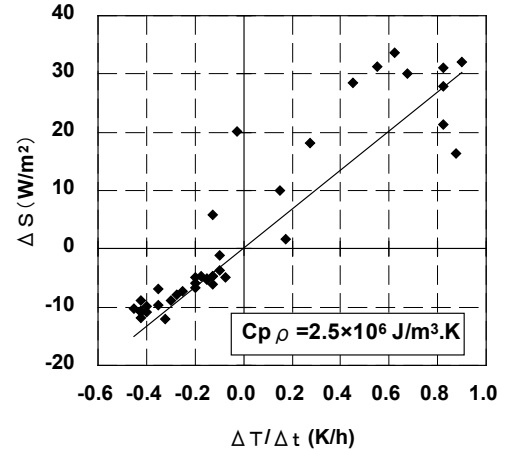


図3-10 土層の熱容量 ρC_p の算定

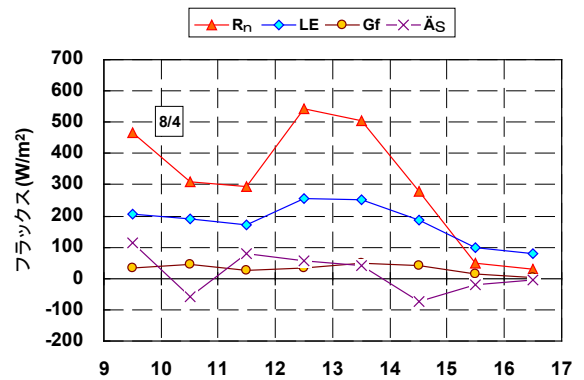


図3-11 草地の熱収支

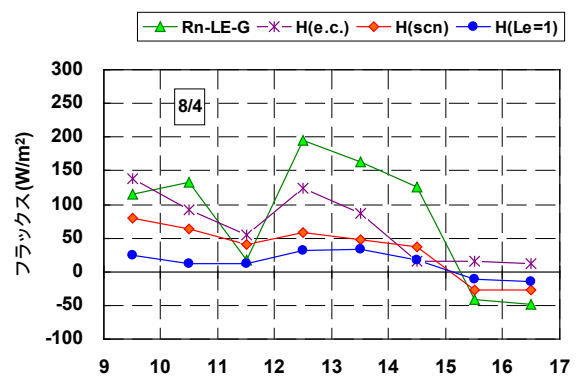


図3-12 測定方法による草地の顕熱の差異

(5) アスファルト表面の熱収支

図3-13に8月4日のアスファルト舗装面の熱収支結果を示す。下向短波・下向長波は草地と同様とし、表面温度実測値から求めた上向長波(放射率 0.97 を仮定)、さらにアルベドの実測値 0.09 を用いて正味放射量 R_n を推定した。また、アスファルト層の熱容量 ($2.3 \times 10^6 \text{J/m}^3 \cdot \text{K}$) と温度時間変化から蓄熱量 ΔS (表面~1.5cm 層)を算出し、深さ 1.5cm における熱流の実測値 G_f との和から G を求め、潜熱 $LE=0$ を仮定し、 G と R_n の差から顕熱 H を推定した。アスファルト面では G の寄与が大きく、 H は最大でも 200W/m^2 に達していない。この H と温度差(表面温度-気温)から対流熱伝達率 α_c を求め、風速との関係を示したのが図3-14である。ここでは図3-8で示した草地の α_w と風速の関係を重ねて再掲した。左右の縦軸目盛はレイス則による湿気伝達率 α_w と熱伝達率 α_c の対応関係を表わしている。このように、まったく独立に求めた α_w と α_c がほぼ一致したことから、本実測の測定精度の高さが確認された。

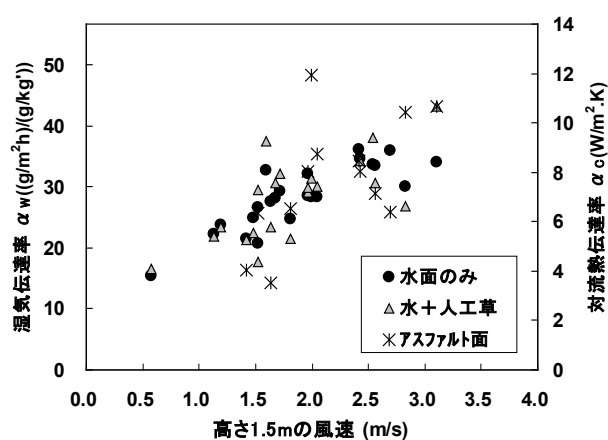
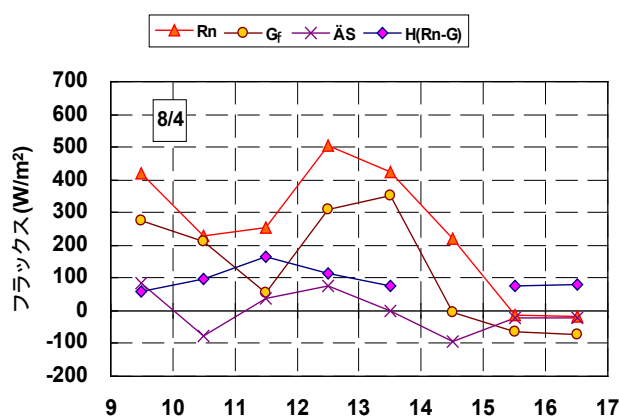


図3-13 アスファルト面の熱収支図

図3-14 対流熱伝達率 α_c と風速の関係

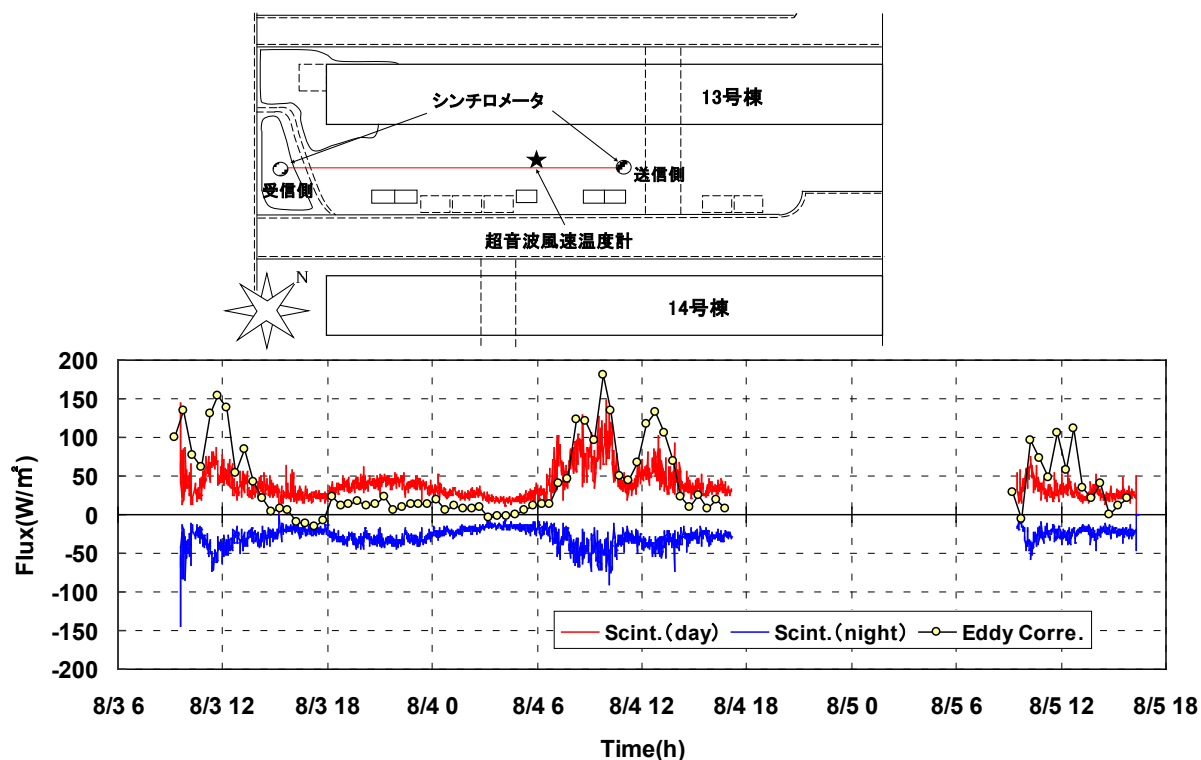


図3-15 シンチロメータと渦相関法による顕熱フラックスの比較

3-2 屋上緑化ステップガーデン

今回の測定は、福岡県福岡市中央区天神にあるアクロス福岡ビルにて行った。このビルは鉄筋コンクリート造で地下4階、地上14階、となっている。ビル南東面がステップガーデン（階段状屋上庭園）になっており、そこには76種類、33,000本もの樹木が植栽されている。ステップガーデンは全13層から成り、1層の大きさは、東西方向に120m（1階）～98m（最上階）、奥行き6mである。植栽の植物は低木を主とし、植え込みの平均高さは、1.7m～1.9mである。また、建物の南側には東西方向約100m、南北方向250mの公園が広がっており、ステップガーデンと一体となった緑地帯を形成している。測定期間は、2001年8月17日から8月25日までである。



写真3-5 アクロス福岡ステップガーデン全景

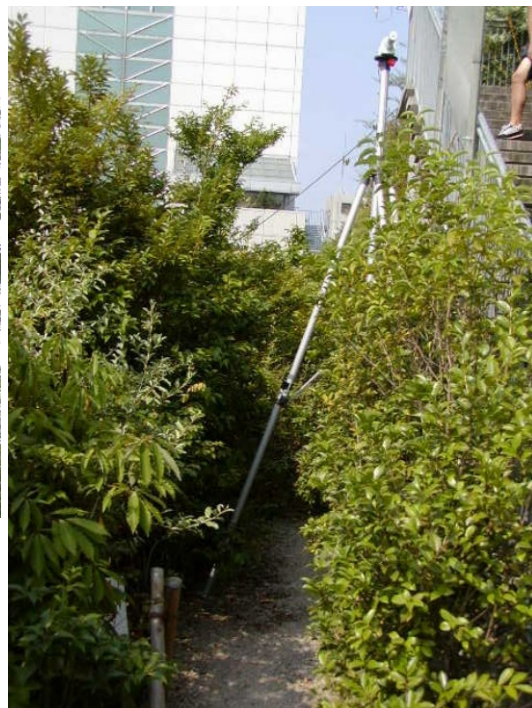
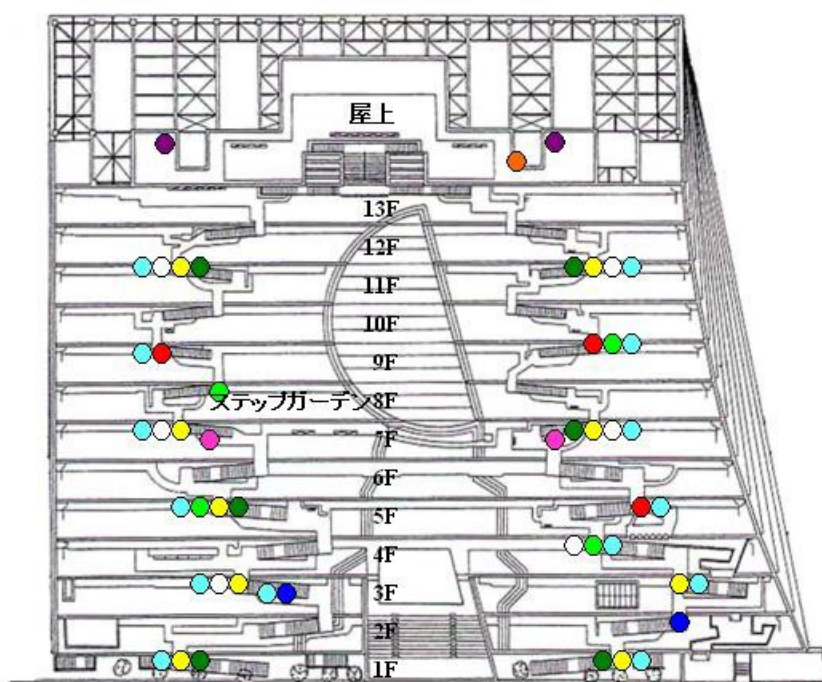


写真３－６ シンチロメータ設置状況



測定器	凡例	設置場所
3次元超音波風速計20cm	●	東側6, 10階、西側10階
3次元超音波風速計5cm	●	東側2, 4, 8, 12階、西側2, 4, 6, 8, 12階
1次元超音波風速計20cm	●	東側3階、西側3階
シンチロメータ	●	東側7階、西側7階
精密長短波放射計	●	東側5, 10階、西側6, 9階
デジタル温湿度計	○	東側2, 3, 4, 6, 8, 10, 12、西側2, 3, 4, 6, 8, 10, 12
赤外線吸収式湿度変動計	○	東側4, 8, 12階、西側4, 8, 12階
通風式温湿度計		
簡易日射計	●	屋上
三杯式風速計+プロベラ風向計	●	屋上（東西）
熱電対	●	東側2, 6, 12階、西側2, 6, 9, 12階（各階4つつつ）

図３－１６ アクロス福岡における測器配置図

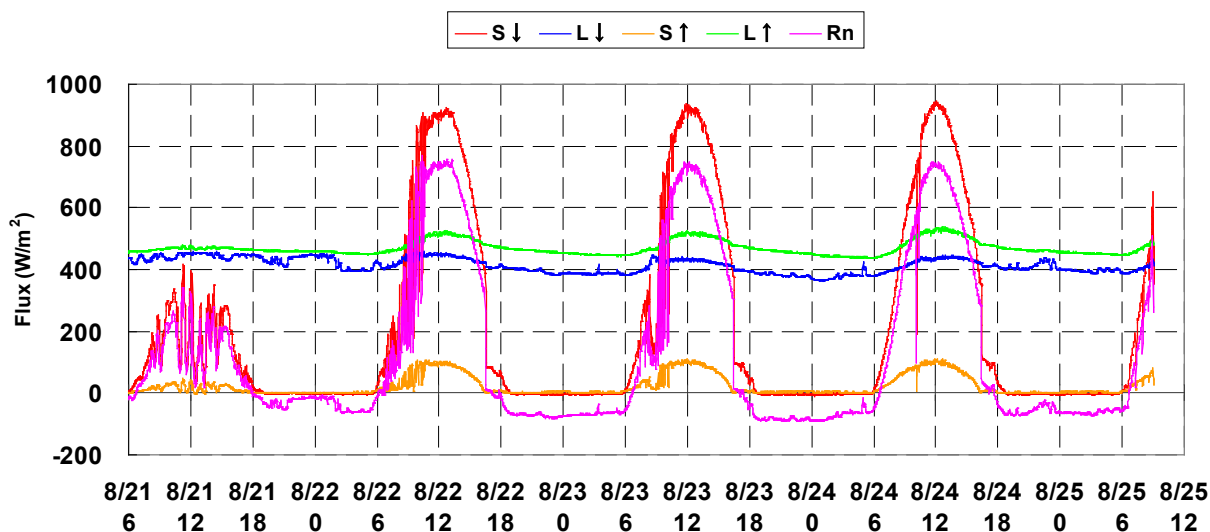


図 3-17 観測期間の放射フラックスの時間変化

図 3-17 に、観測期間における放射フラックスの各成分と正味放射量(Rn)の変化を示した。22 日、23 日、24 日の 3 日間ほぼ晴天に恵まれた。図 3-18 に、シンチロメータの 1 分毎の顕熱フラックス出力を、図 3-19 と 20 に評価時間を 30 分とした渦相関法による顕熱フラックスの時間変化を示す。なお、渦相関法については、設置場所が斜面状であることから風速の鉛直成分の平均値がゼロにならないため、軸回転を施し平均値がゼロとなる方向の値を求めている。日中の顕熱は Rn の 4 割程度で、西側の方が東側よりやや大きくなっている。地点別の変化を見ると、東側は比較的差異が小さいが、西側は各階で大きなばらつきがある。これは、東側は河川に接しているのに対し、西側は 10 階以上の建物が林立する市街地であることが影響していると思われる。

＜地面修正量の推定＞

シンチロメータによるフラックス測定においては、植被面のような地面修正量が無視できない場所では、それを含めたパス高さを何らかの方法で決定して入力する必要がある。ここでは、渦相関法によるフラックスと平均値が一致するようパス高さを決めた。図 3-21 は設置高度 3.3m から 0.1m 毎にパス高さを変化させて再計算した 7 階のシンチロメータによる顕熱フラックスと渦相関法（6,8 階の東西 4 点の平均）の値を比較した結果である。両者は 3 日間とも、パス高さ 1.4m 付近で交差しており、水理実験センターにおける結果とは異なり、安定した変化を示した。図 3-22 は、各 3 日の地面修正量を変化させた場合のシンチロメータの顕熱フラックスと渦相関法との結果を時間変化の形で比較したものである。これらの結果から地面修正量は $3.3 - 1.4 = 1.9\text{m}$ という値が得られた。この値はステップガーデンの植栽高さを考慮すると、ほぼ妥当な値と考えられる。地面修正量を加味したシンチロメータによる顕熱の時間変化の日変化パターンは、渦相関法のそれと非常によく一致した。

なお、今回の測定では、夜間に明確な負の値が現れておらず、放射冷却が弱かったことを示唆している。超音波風速計による風速変化でも、放射冷却に伴う斜面下降流は、あまり発達していなかった。

以上の顕熱フラックスの値は、おおむね妥当な値と思われるが、軸補正を施した渦相関法の値が正しいかどうかについては、まだ検討の余地が残されている。

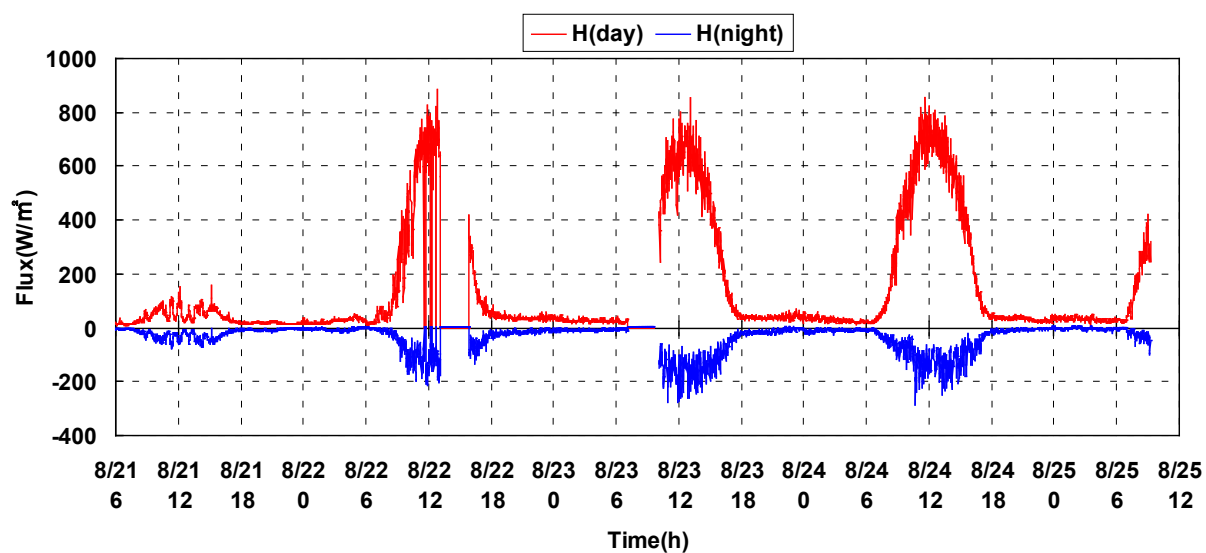


図 3-18 シンチロメータによる顕熱フラックス（高さ補正前）

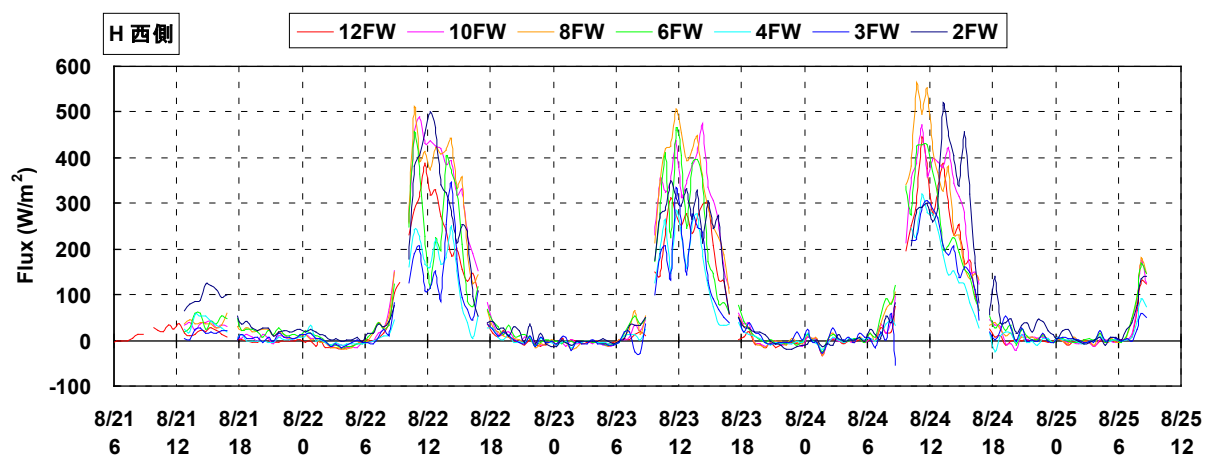


図 3-19 渦相関法による顕熱フラックス（西側）

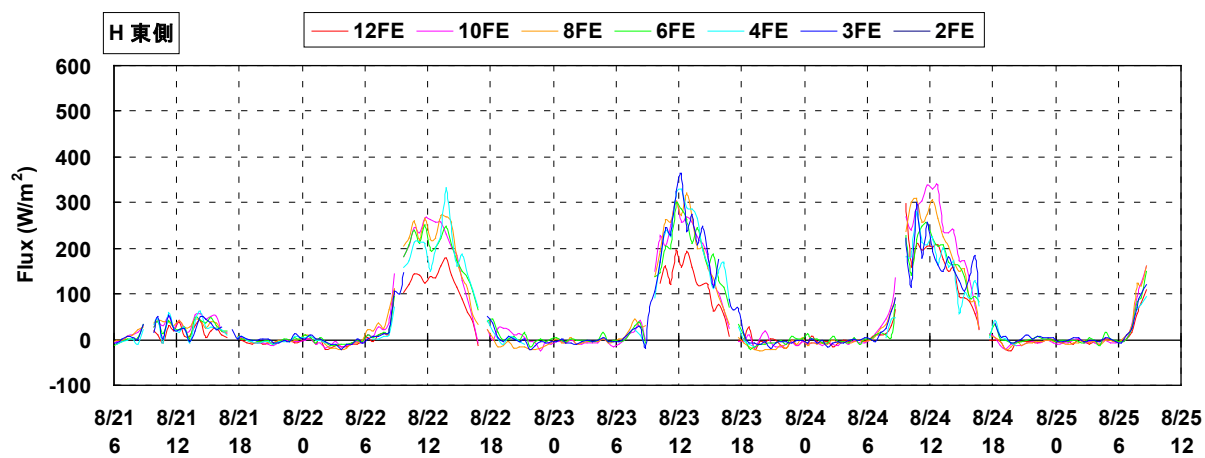


図 3-20 渦相関法による顕熱フラックス（東側）

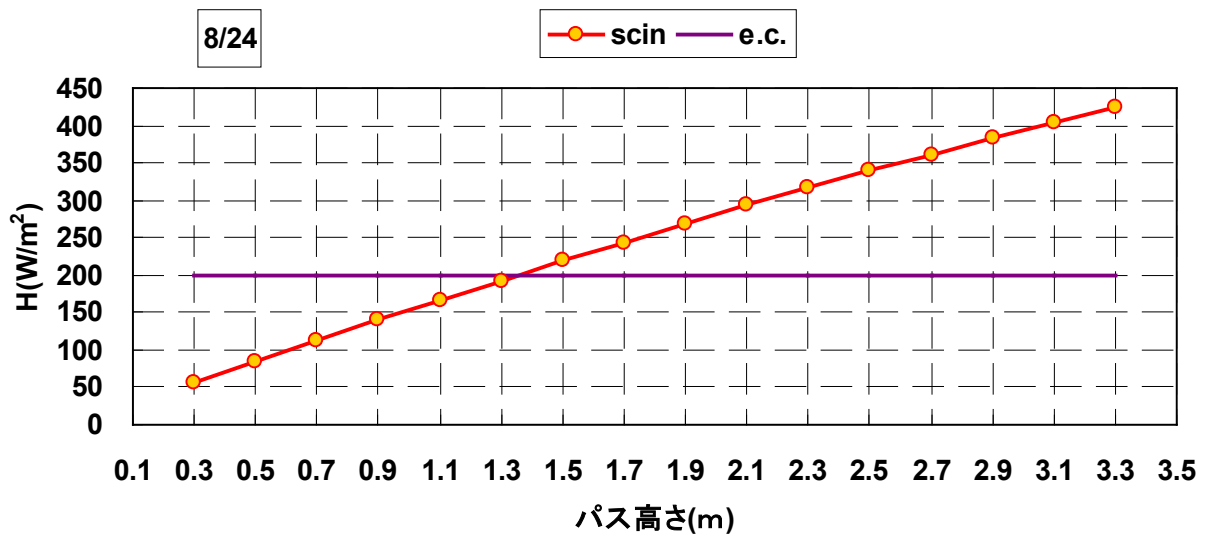
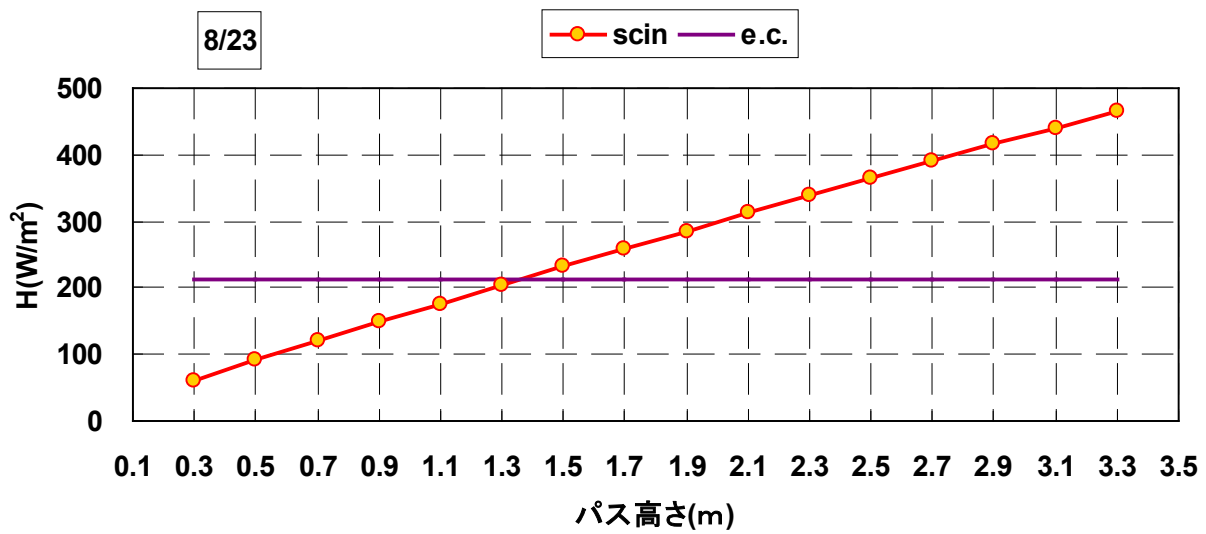
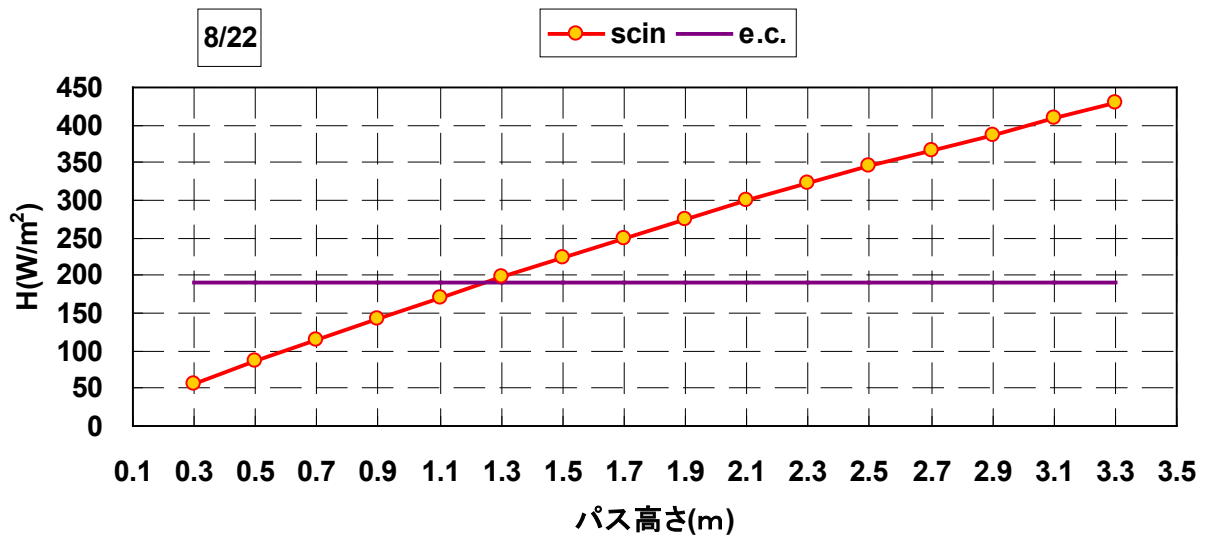


図 3-21 シンチロメータの高さ補正—渦相関法との比較

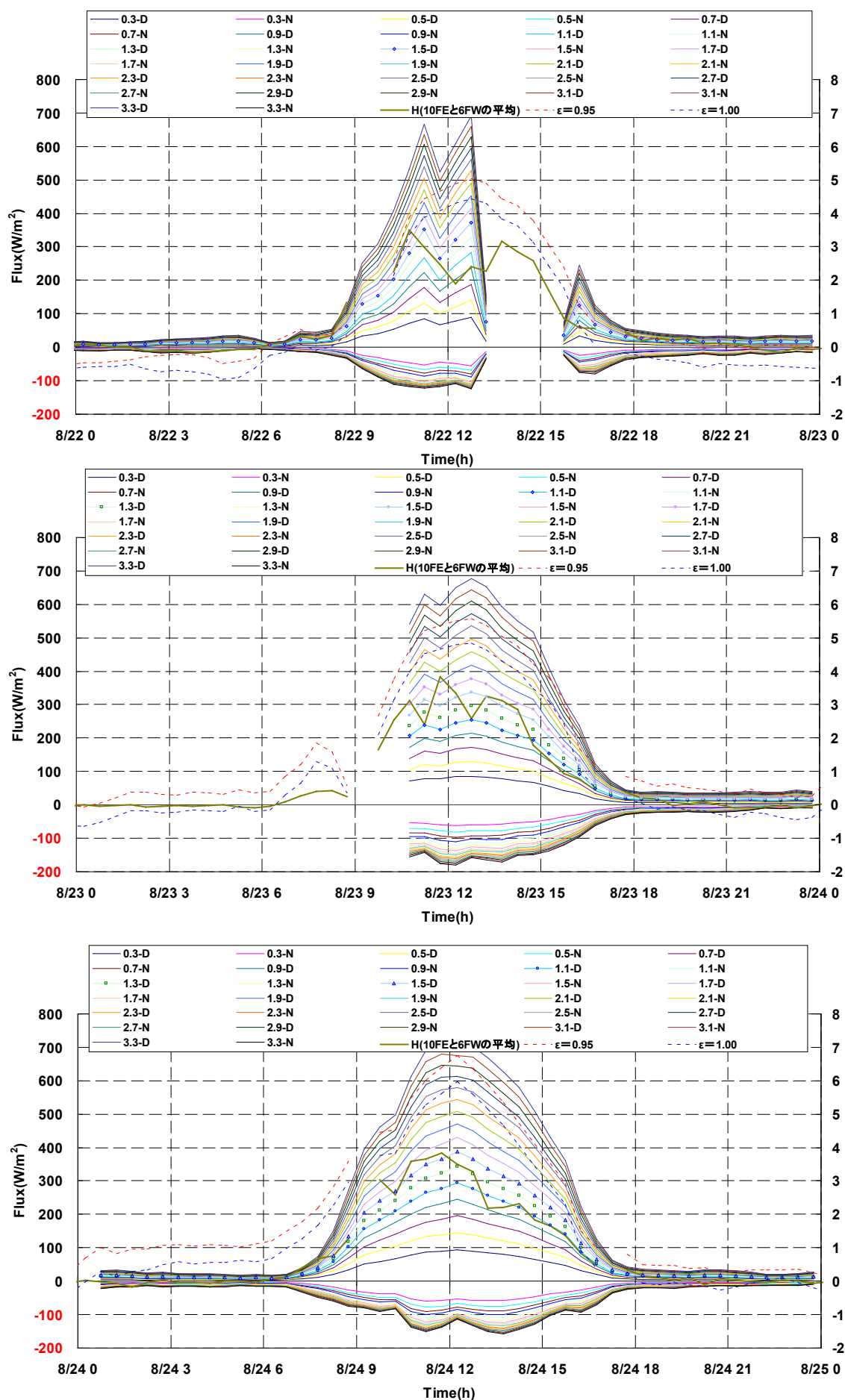


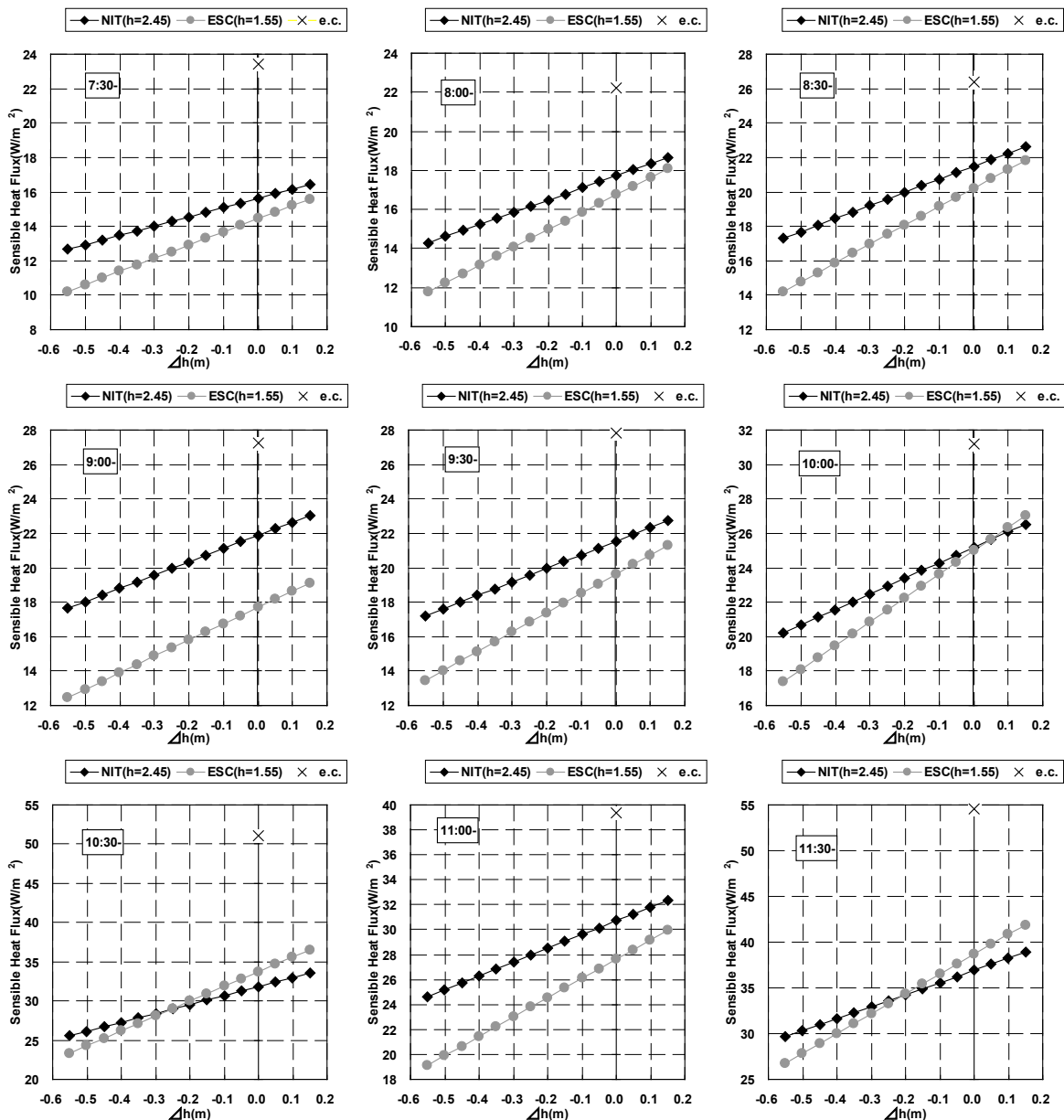
図 3-22 シンチロメータの高さ補正結果—渦相関法との比較

第4章 シンチロメータの2高度測定による地面修正量の推定

4-1 都市内大規模公園の芝生広場

すでに 2-1 で述べた新宿御苑の芝生広場における測定では、平行なパスに 2 台のシンチロメータを設置し同時観測を行っている。ここでは、2 台のシンチロメータの結果から、これまでの渦相関法との比較ではなく、両者のフラックスが等しくなることで地面修正量を求めることを試みた。

図 4-1 と図 4-2 は、2.45m と 1.55m で測定した各々のシンチロメータにおいて、-70cm から +30cm の範囲で 10cm ごとに地面修正量を仮定し、再計算した結果である。2 台の測定が正しければ、両者の結果が交差する高さが、地面修正量を加味した高さとなるはずである。観測地点の地被状況は、草丈 5cm 程度の芝生であることから、本来なら 0 ないし -10cm 程度でクロスするはずである。しかしながら、結果をみると、交差する高さは時間ごとによりばらついており、計算した範囲内でクロスしない時間帯も多く見受けられる。図には、参考として渦相関法による顕熱フラックスの値を×印で併記したが、シンチロメータの値がクロスしたときのフラックス値と渦相関法の値にも明確な関連性は認められない。



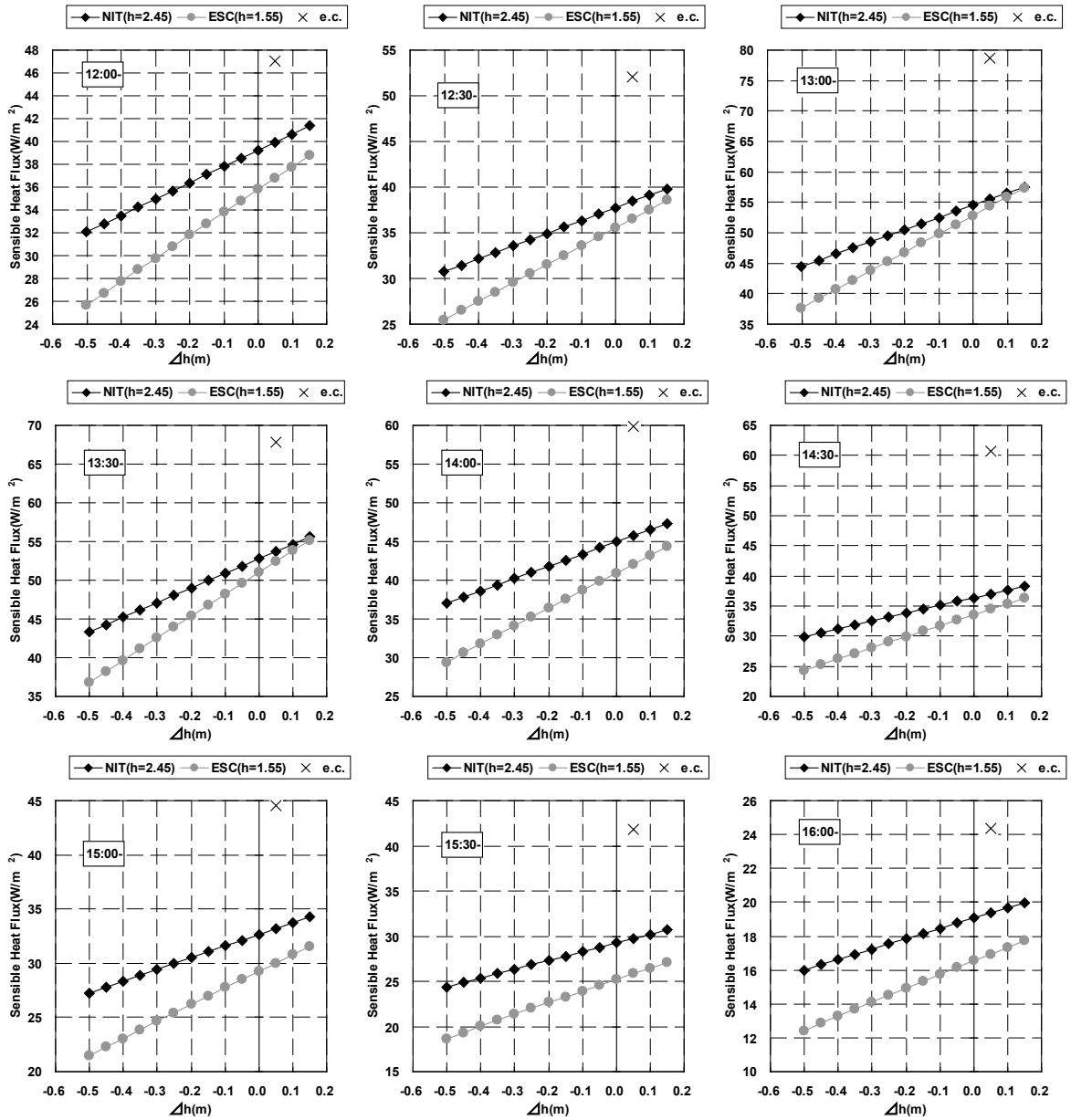
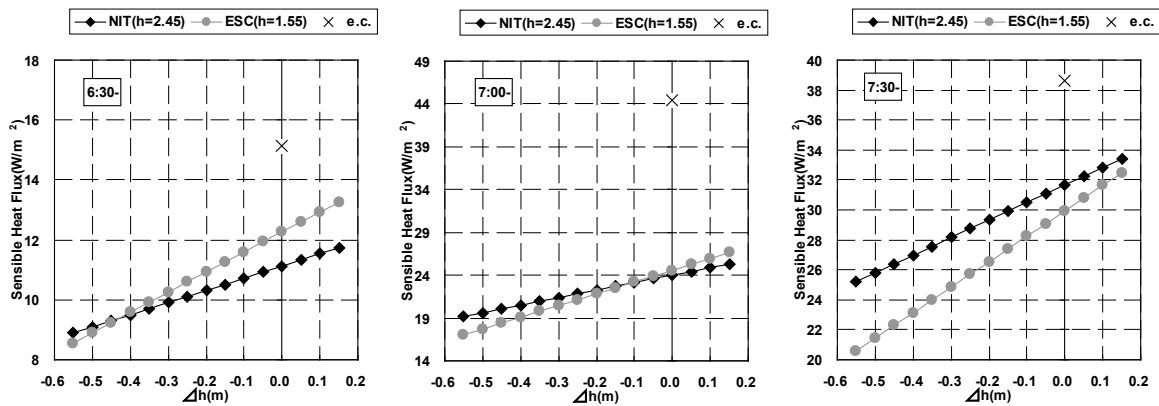


図 4-1 2 台のシンチロメータによる地面修正量の推定結果 (8 月 3 日)



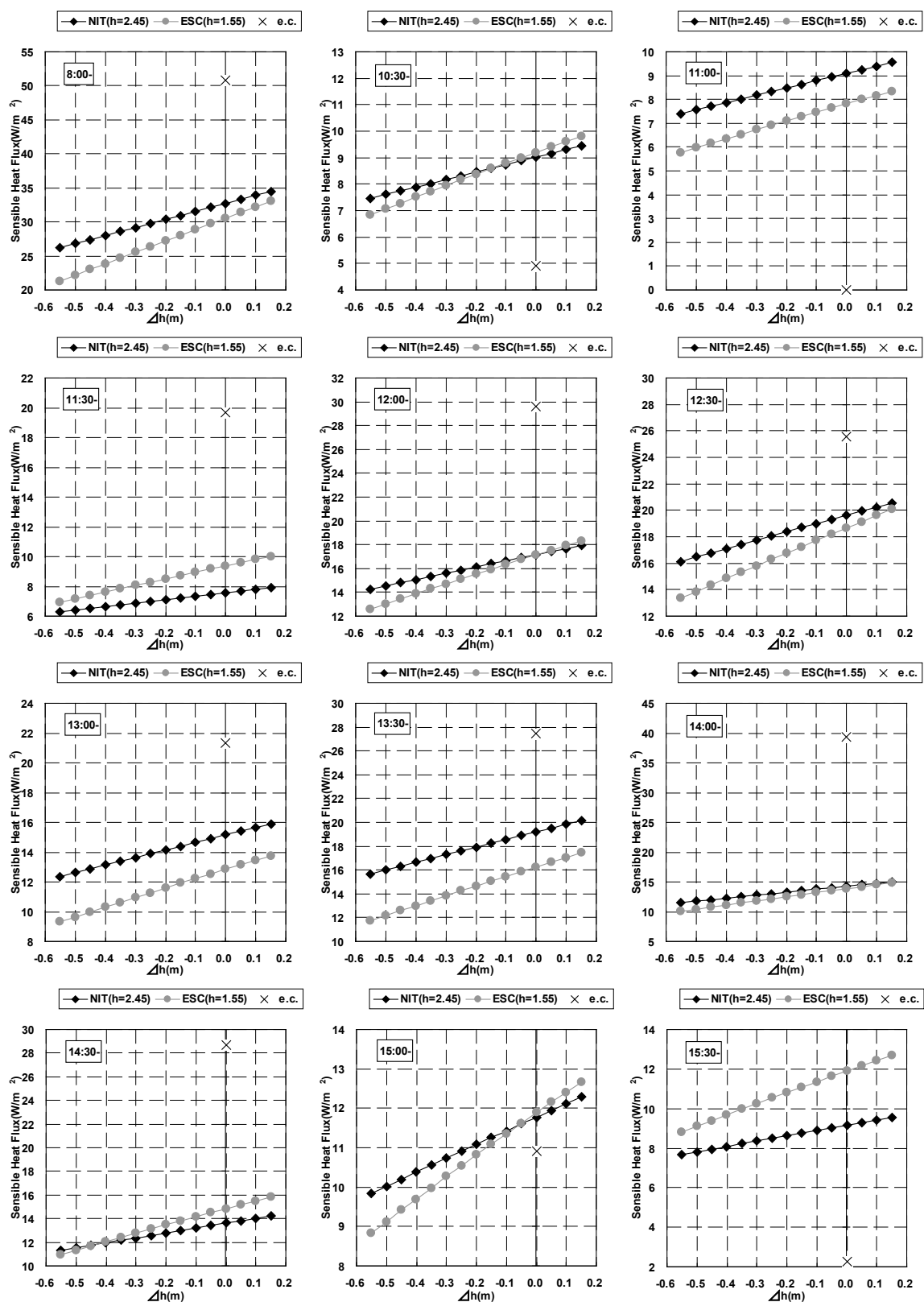


図4-2 2台のシンチロメータによる地面修正量の推定結果 (8月4日)

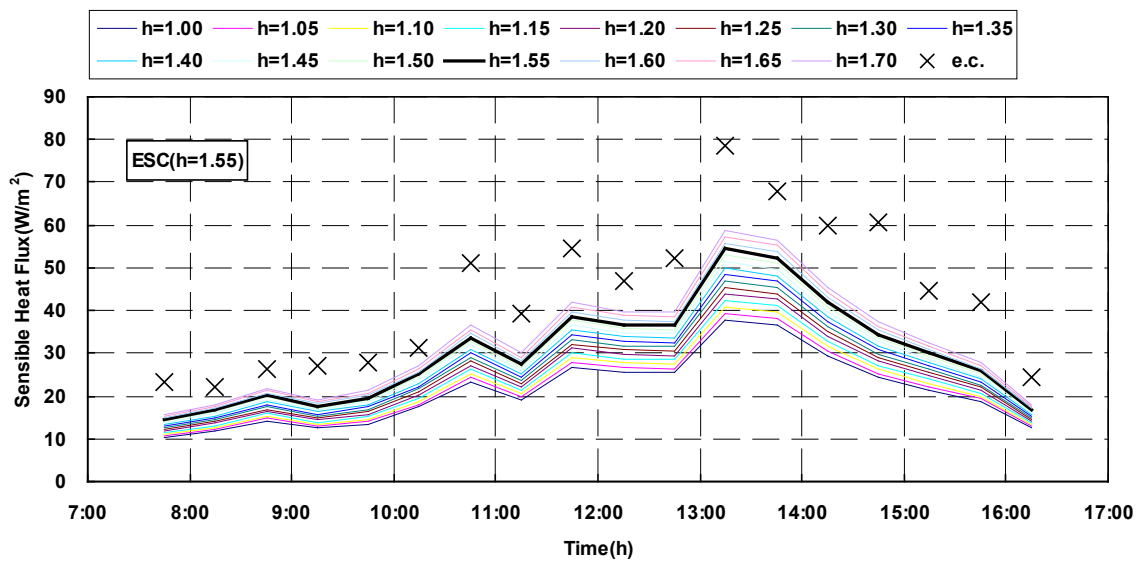
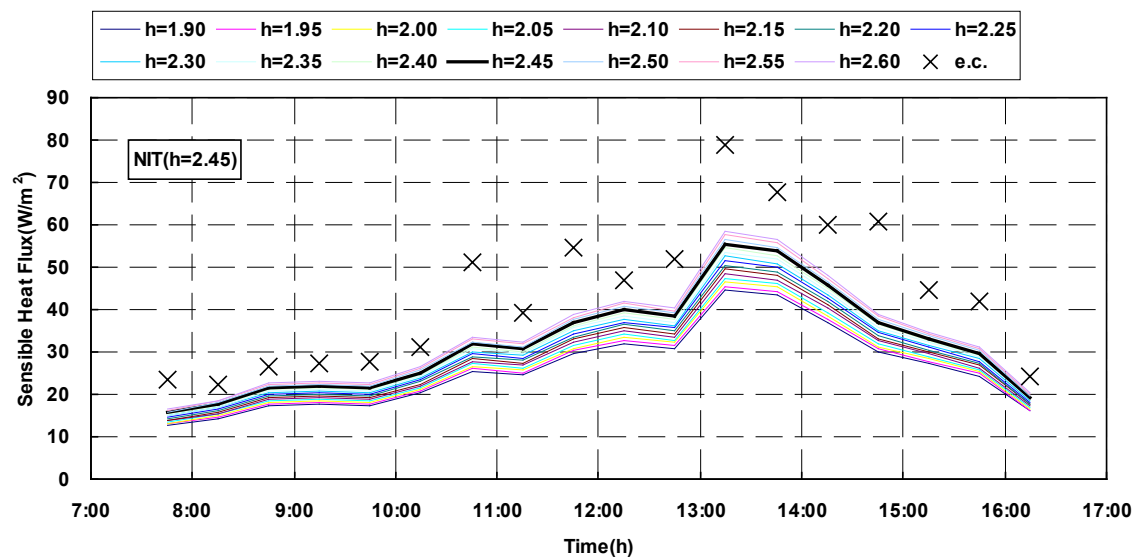


図 4-3 各々のシンチロメータによる地面修正量の推定結果 (8 月 3 日)

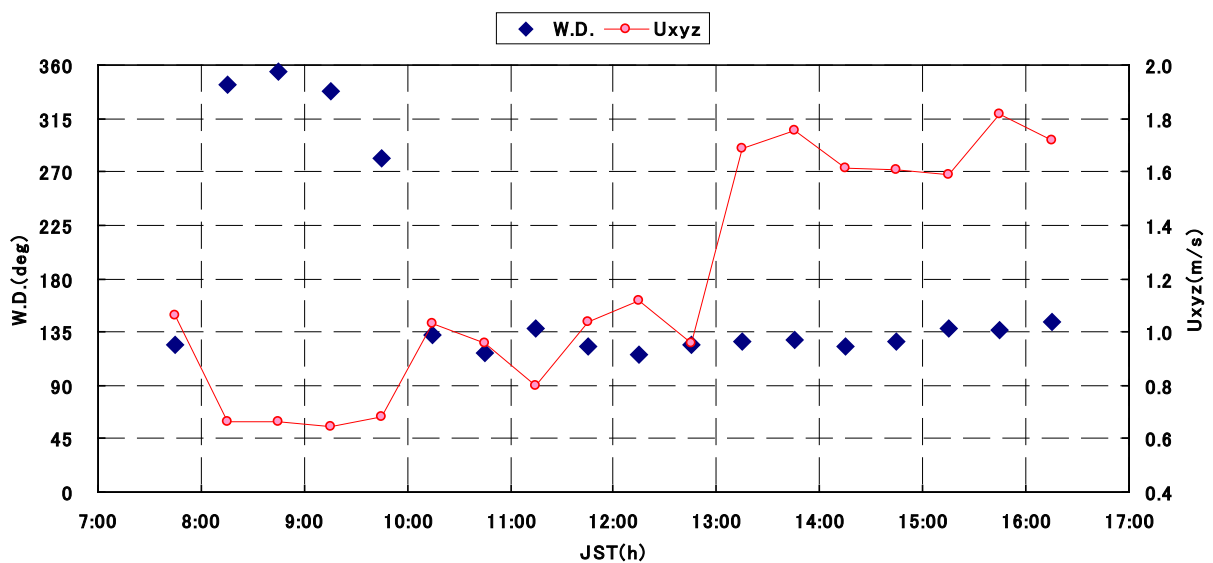


図 4-4 風向風速の時間変化 (8 月 3 日)

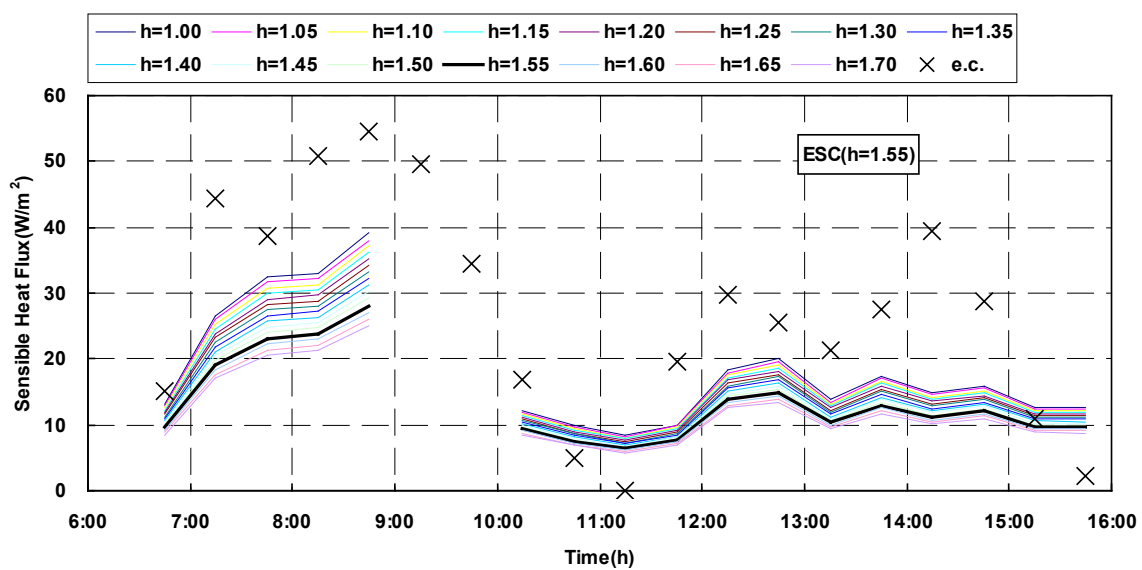
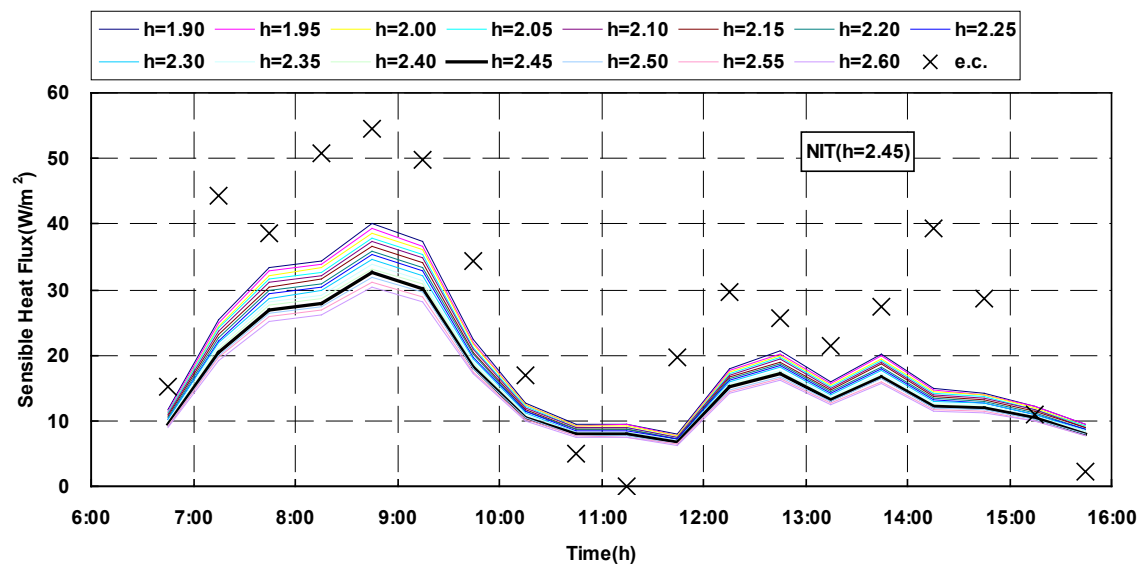


図 4-5 各々のシンチロメータによる地面修正量の推定結果 (8 月 4 日)

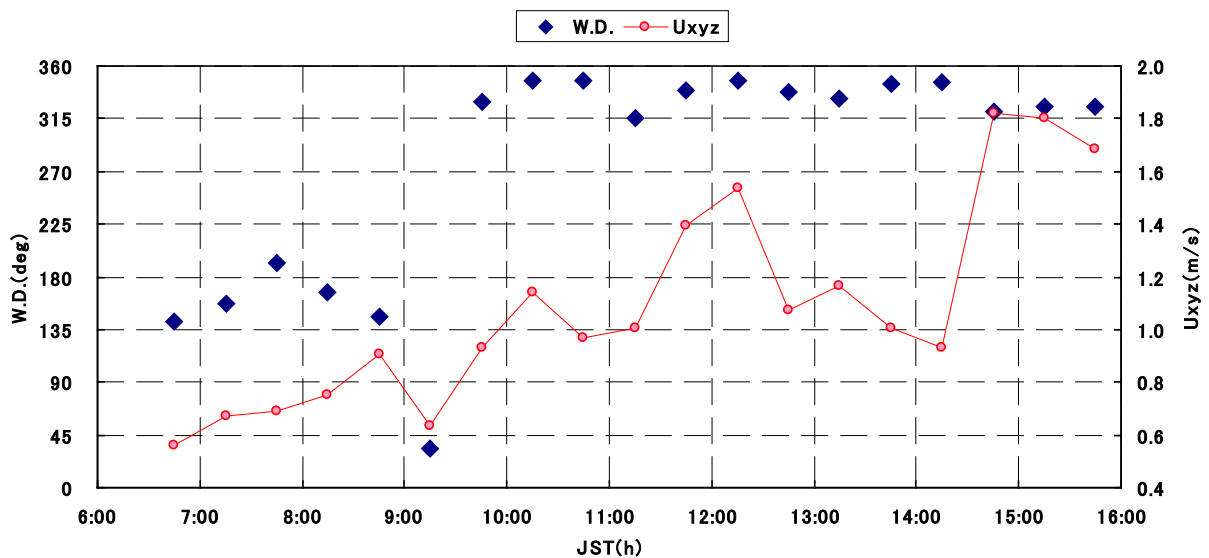
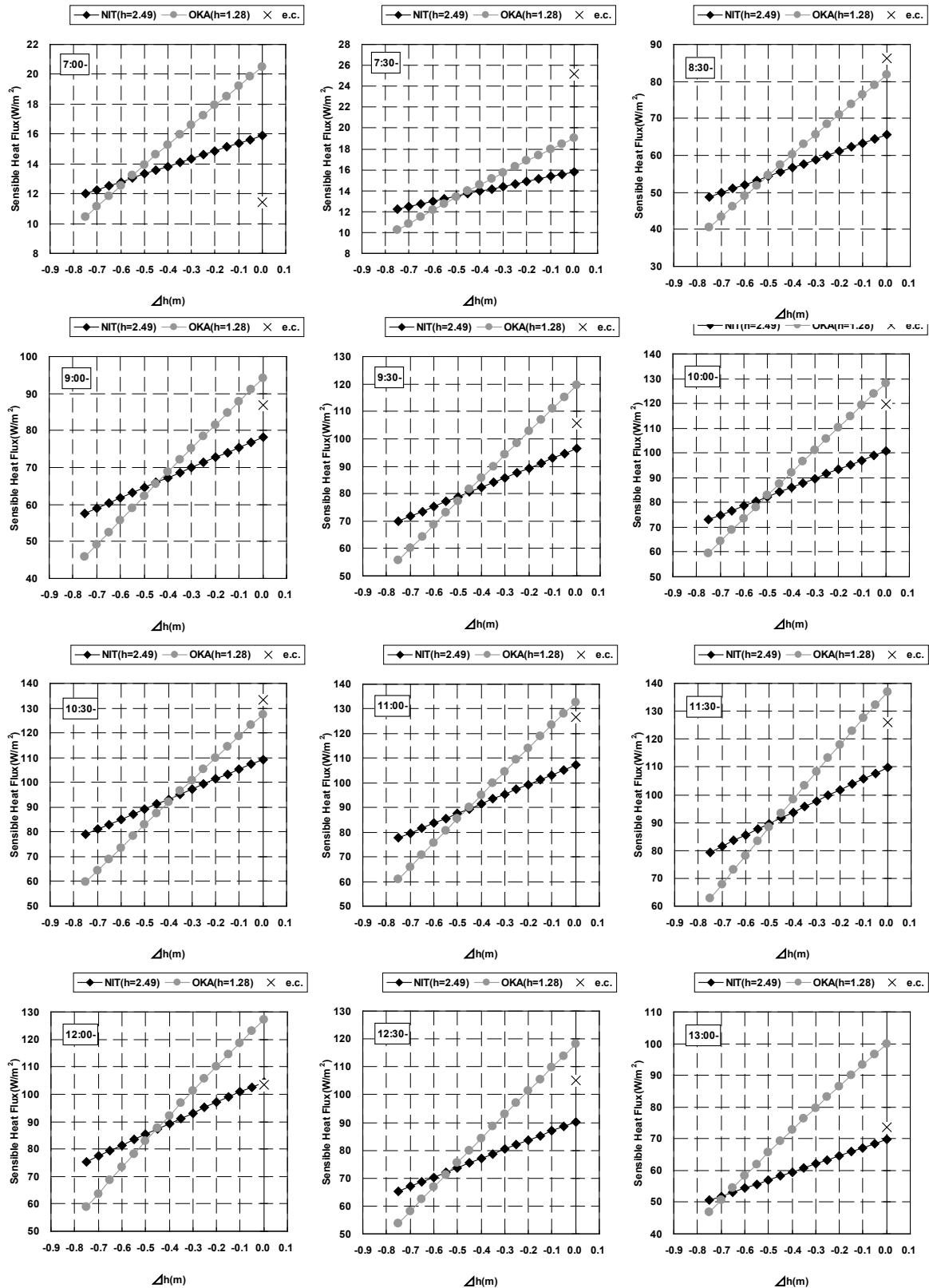


図 4-6 風向風速の時間変化 (8 月 4 日)

4-2 グラウンド大規模草地面

新宿御苑での測定が、満足のいくものではなかったため、日工大キャンパス内のグラウンドにおいて、再度2高度同時測定を試みた。各々のシンチロメータの高さは、2.49m と 1.28m とした。測定場所の詳細は、次章で述べる。

図4-7に、-75cm まで 5cm 毎に地面修正量を仮定した結果を示す。今回はほぼ系統的に交差する点が現れ、地面修正量は 0.3m~0.6m という範囲で推移した。



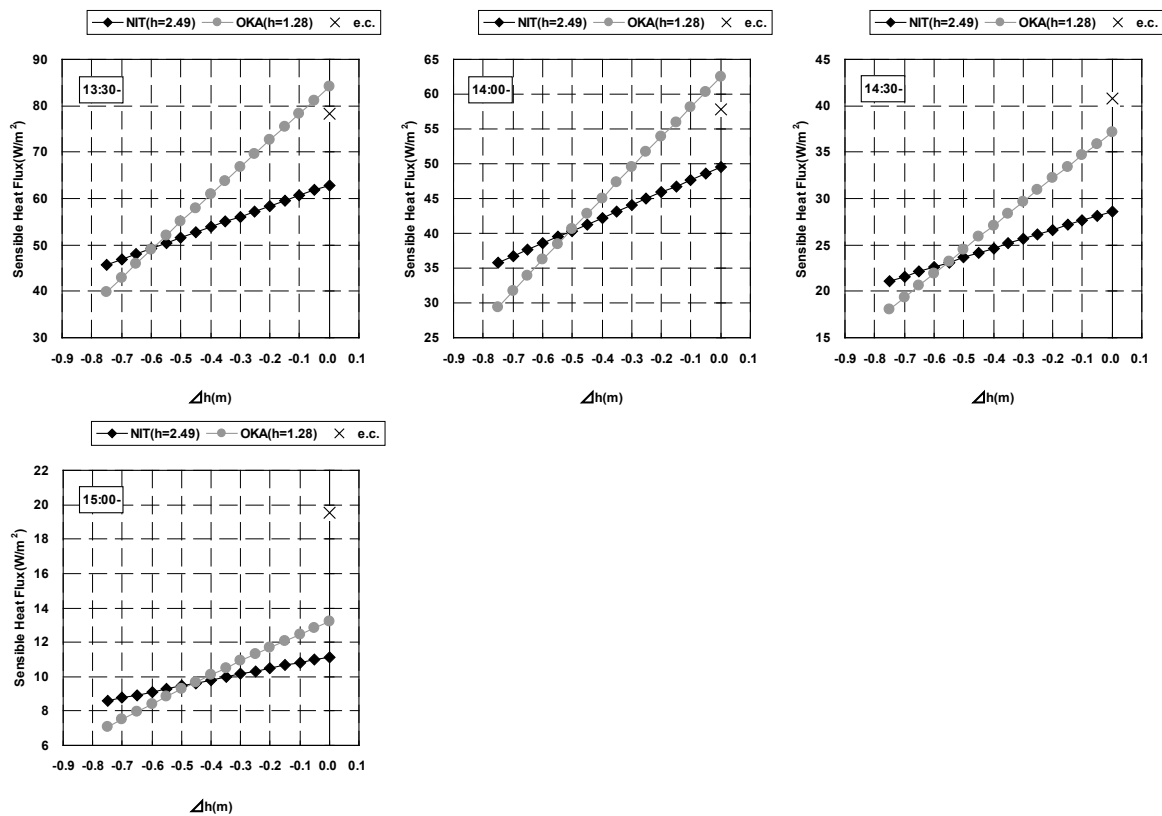


図 4-7 2 台のシンチロメータによる地面修正量の推定結果（グラウンド）

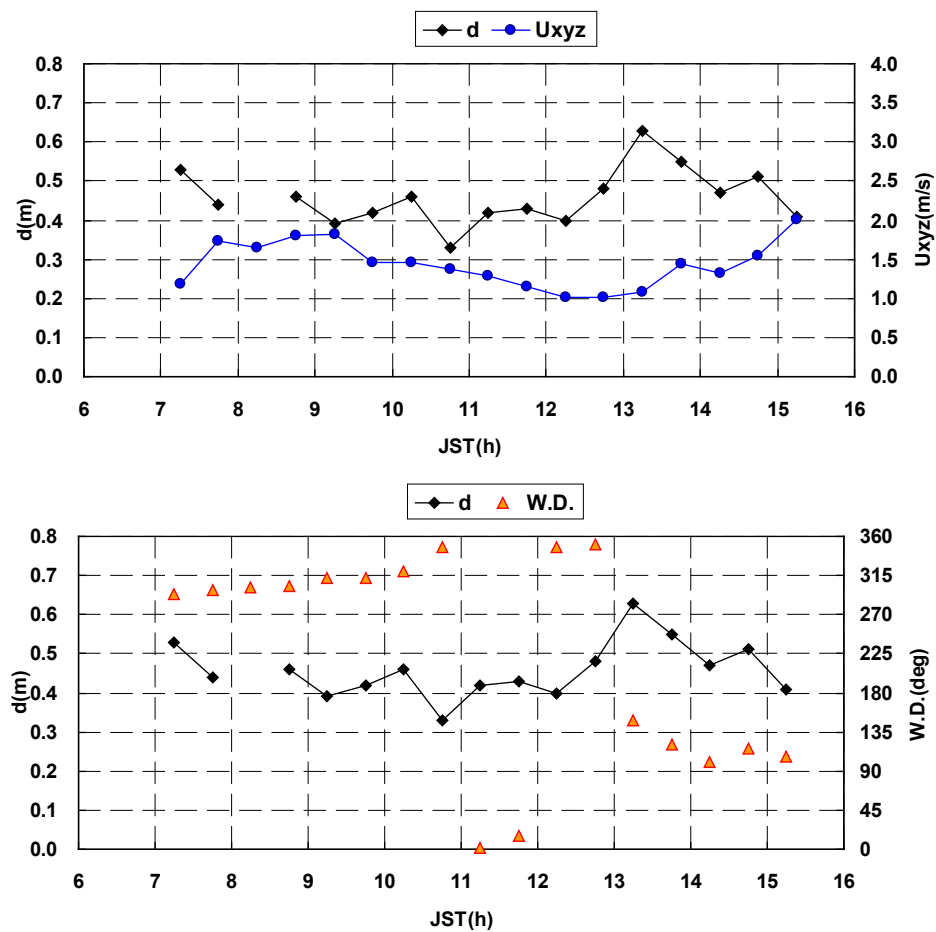


図 4-8 地面修正量の時間変化と風速・風向との関係

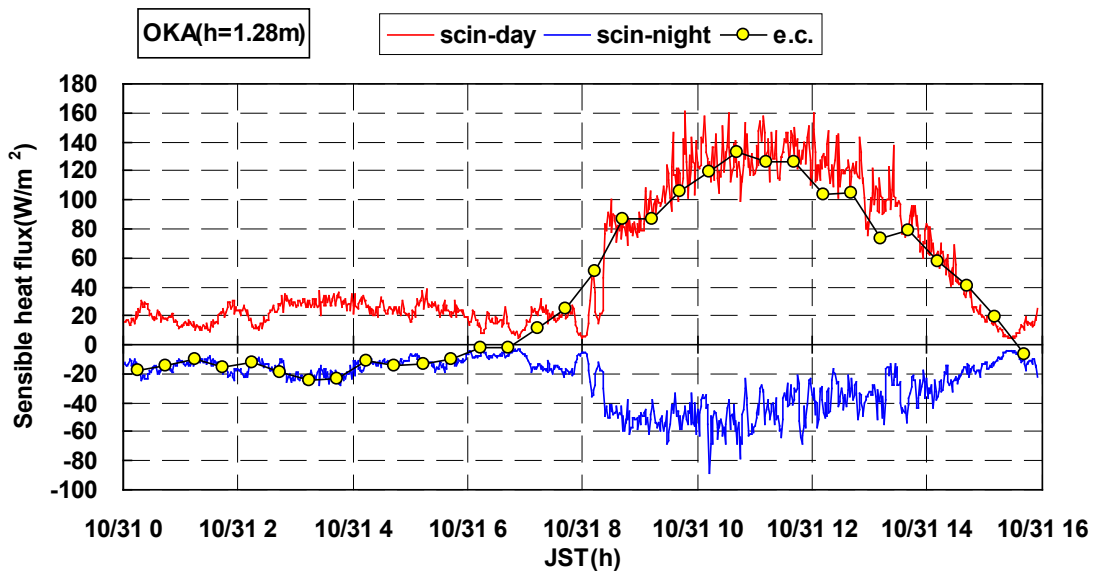
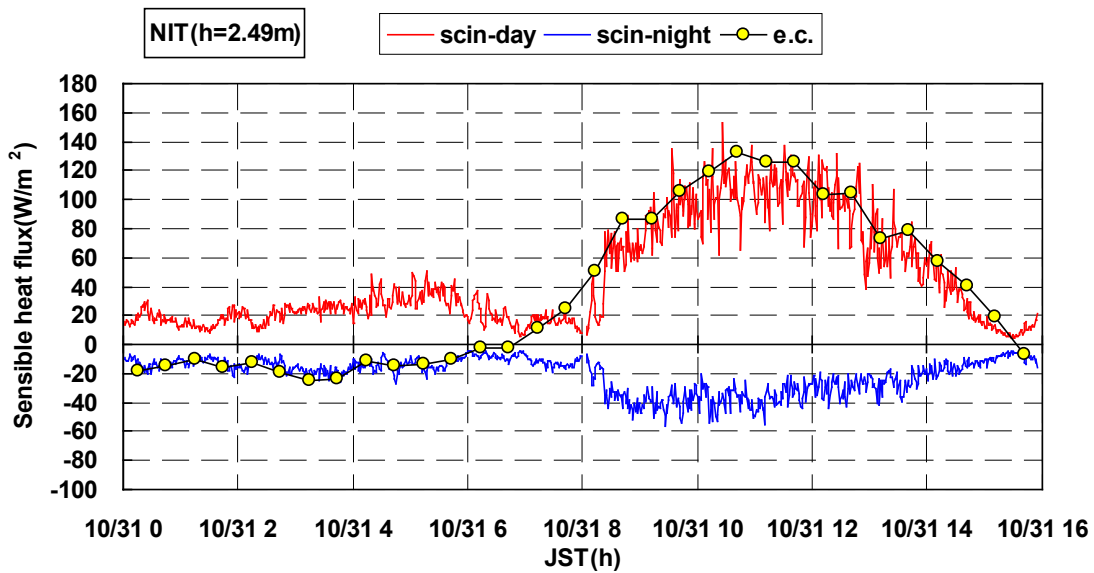


図４－９ シンチロメータと渦相関法による顕熱フラックスの時間変化

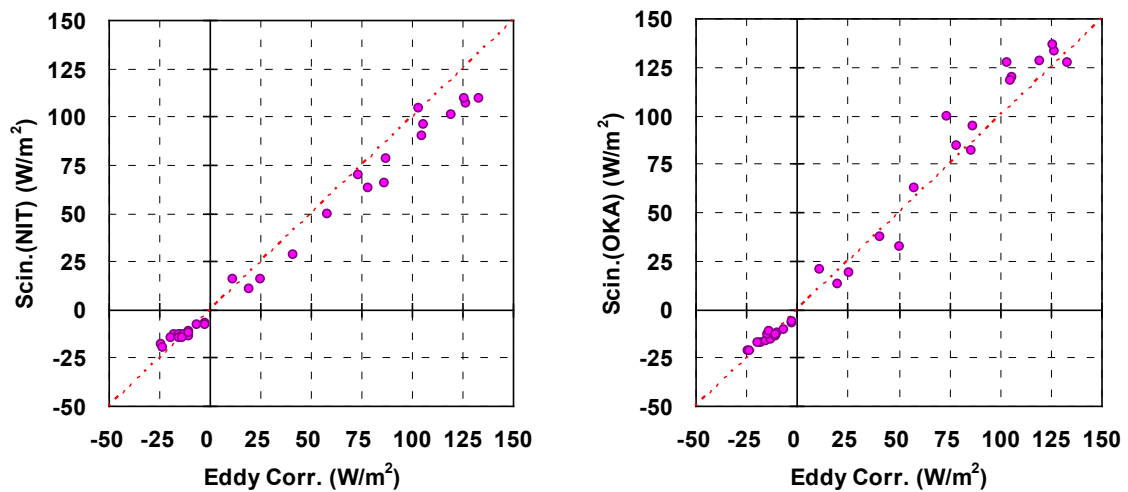


図４－10 シンチロメータと渦相関法による顕熱フラックスの比較

図4-8に、地面修正量の時間変化と風向・風速の変化を示す。風向が北から南東に変化した13時を境に、地面修正量に変化が現れているように見受けられる。

図4-9と図4-10に、シンチロメータと渦相関法による顕熱フラックスの比較を示す。超音波の設置高度に近いOKAでは、地面修正量なしでほぼ1:1の関係が得られている。一方NITでは、全体に渦相関よりも小さく9割程度の値となっている。地面修正量を加味すると、この差はさらに拡大してしまう結果となった(図4-11)。

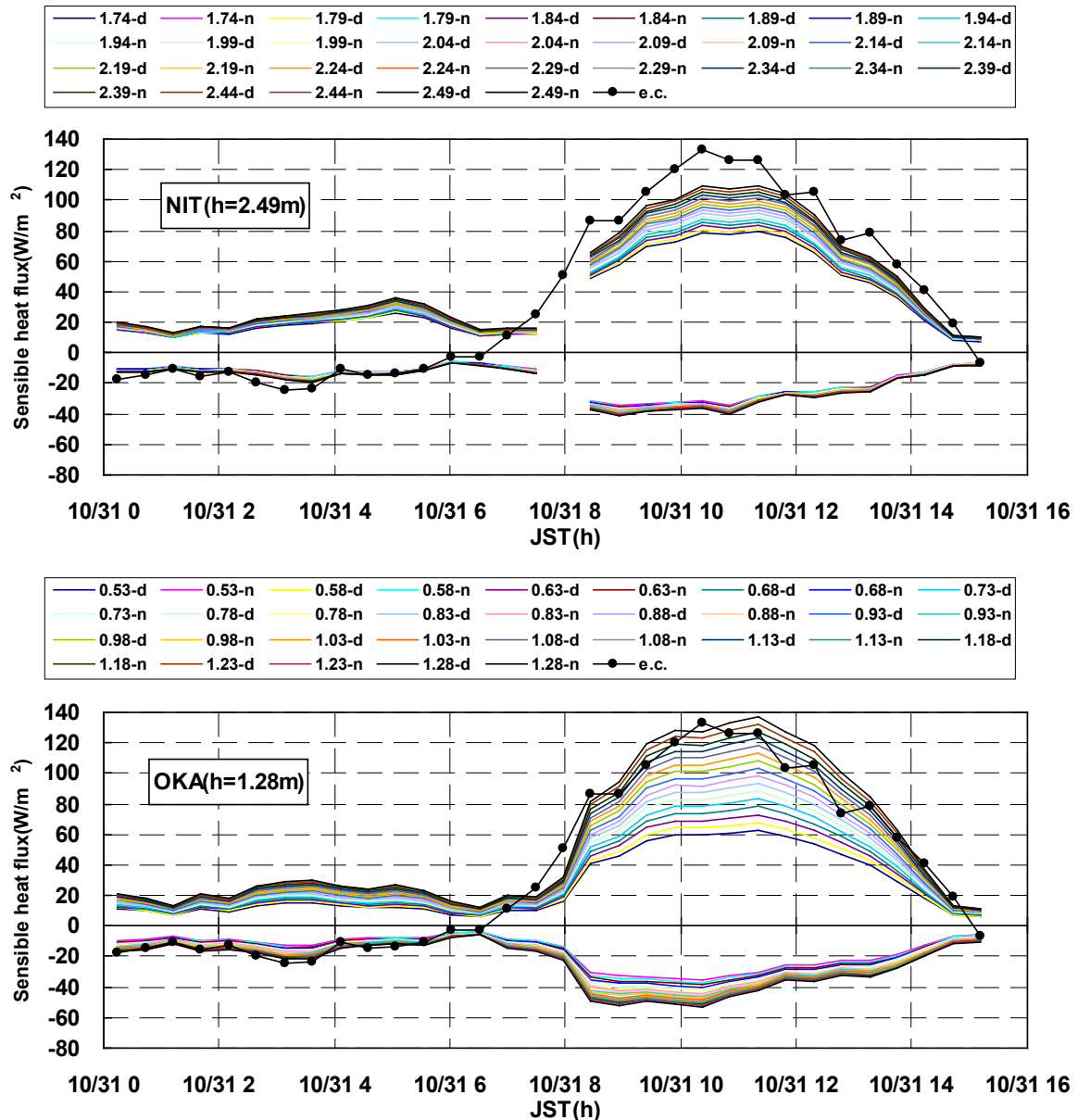


図4-11 地面修正量を考慮した場合の顕熱フラックスの変化

第5章 ミラー反射によるパス操作の基礎的検討

5-1 ミラー校正の室内実験

今回使用したミラーは多層銀薄膜、直径 30mm（レーザメイト株式会社製）のものである。

（１）平面鏡での反射角が異なる場合のレーザ光の強度変化について

1) 実験方法

実験装置の概要を図 5-1 に示す。

ほぼ直線偏光している He-Ne レーザ（最大出力 5 mW、波長 632.8nm）から出力されたレーザ光を平面鏡を用いて反射角が $35\sim 55^\circ$ の範囲で反射させ、その反射光をレーザ光に対して垂直に設置したシリコンフォトダイオード（受光面 $100\times 100\text{mm}$ ）によって検知する。その検知器の出力を求めることによって反射角が異なる場合でのレーザ光の強度変化を調べた。またレーザを 90° 回転させ偏光面を変えた場合についても同様の実験を行った。

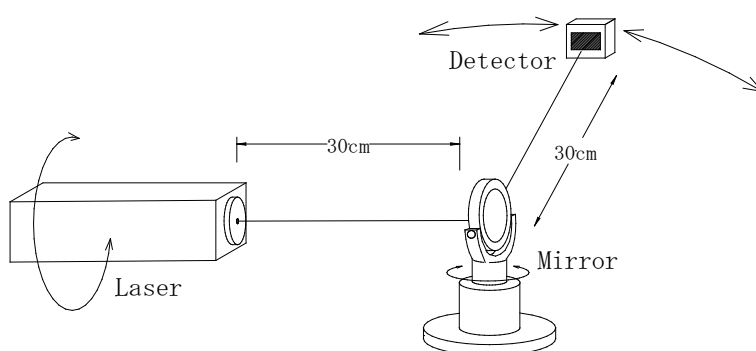


図 5-1 実験装置の概要

2) 実験結果

実験を行った結果を図 5-2 に示す。

反射角が 45° の時の検知器の出力を 1 としてそれぞれの反射角における検知器の出力の相対値を求めた。

いずれの反射角においても目立った角度依存性は見られず、また偏光面を変えることによる影響も見られなかった。

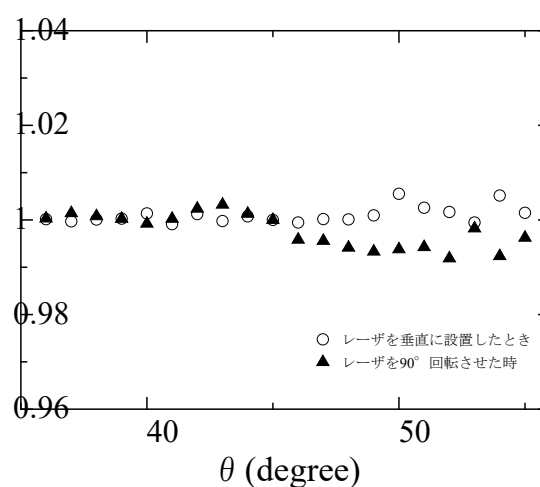


図 5-2 ミラー反射率と反射角の関係

(2) 平面鏡での反射角が異なる場合でのレーザー光の強度変化について（偏光子を用いた場合）

1) 偏光面を変えたときのレーザーの強度変化

実験装置の概要を図5-3に示す。レーザーの射出口と検知の間に偏光フィルタを設置し、偏光面が鉛直に向いているときの検知器の出力を1として、偏光子を回転させ偏光面を変化させた時の検知器の出力の相対値を求めた。

実験の結果を図5-4に示す。実験の結果よ

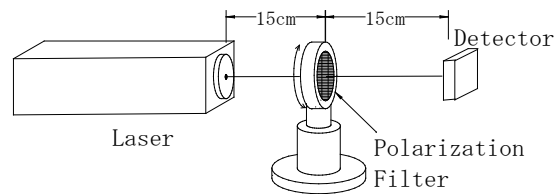


図5-3 実験装置の概要

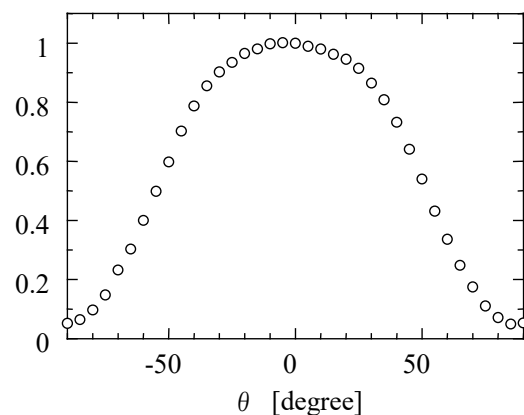


図5-4 偏光子の回転角とレーザーの強度変化

2) 反射角が異なる場合でのレーザー光の強度変化

実験装置の概要を図5-5に示す。レーザー、平面鏡、検知器は前回の実験で用いたものと同じものを利用した。

偏光面が鉛直の時と、90° 回転させた時のそれぞれの場合において、反射角を変えた場合の検知器の出力の変化を図5-6に示す。前回の実験と同様に反射角が45° の時の検知器の出力を1としてその相対値を求めた。今回の実験においても目立った角度依存性は見られず、また偏光面を変える事による影響も見られなかった。しかし偏光フィルタを用いていなかった前回の実験結果と比較して、いずれの向きの偏光面の出力も反射角を変える事による検知器の出力のばらつきが少なくほぼ一定値であった。

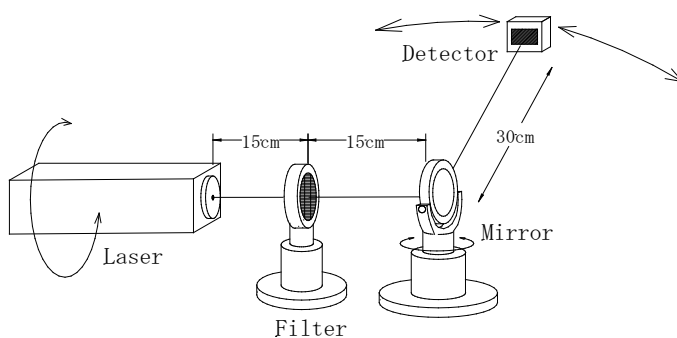


図5-5 実験装置の概要

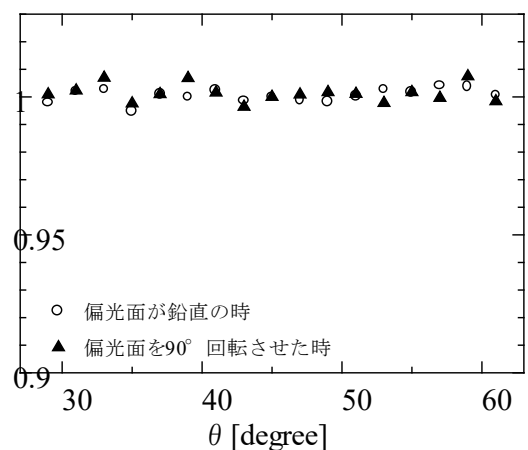


図5-6 反射角を変えたときの検知器の出力の変化

5-2 ミラーを使用した顕熱フラックス測定の可能性検討のための屋外実測（その1） ー岡山市内運動公園グラウンドー

室内実験の結果を踏まえ、ミラーを利用した顕熱フラックス測定に関する屋外検証実験を行った。場所は、岡山市内の運動公園グラウンドで、期間は2001年9月3日から6日である。測器配置と周辺状況を図5-7に示す。地表面は芝生面で、図の上方向には高さ4m程度のスタンドがある。また周囲は高さ20から30mの樹木が植えられている。検証実験では、岡山大学の塚本研究室所有のシンチロメータをお借りし、ミラーありの場合とミラーなしの標準測定状態とを同時測定し、比較検討した。

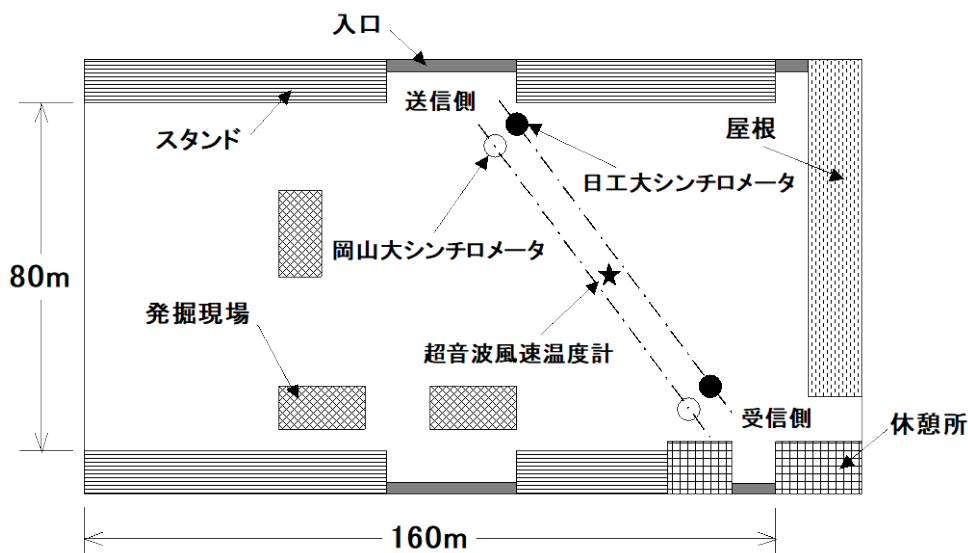


図5-7 屋外検証実験サイトの状況と測器配置

検証実験を行った測定パターンを図5-8に示す。ミラーなしで行った器差検定のほかに、送信器直後にミラーを設置した場合、受信器の直前にミラーを設置した場合、そしてその両方に2枚ミラーを設置した場合を行った。以上はいずれも入射角45度の90度パス変更である。以上に加え、入射角13.5度でV字に反射させるパターンについても検討した。

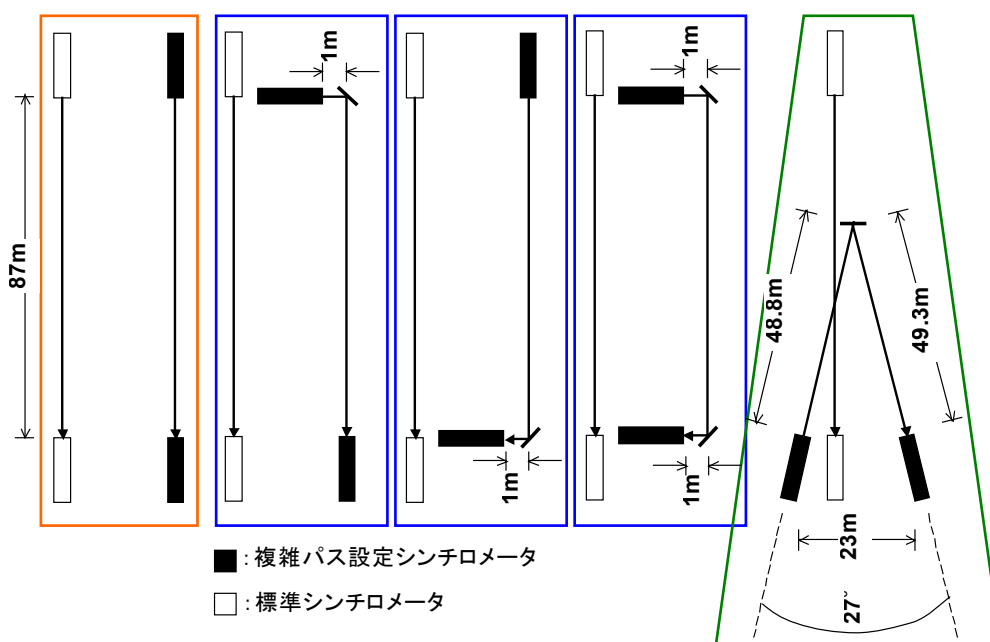


図5-8 検証実験の測定パターン



写真５－１ 器差検定の設置状況



写真５－２ 観測サイトの全景

写真５－３ 使用したミラー（直径 30mm）



写真５－４ 電動ミラーステージ

写真５－５ ミラーステージ・コントローラ



写真5-6 送信側ミラーの設置状況



写真5-7 送信側ミラーからのレーザー光

写真5-8 受信側ミラーの設置状況



写真5-9 受信側ミラーでの受光（夜間映像）

写真5-10 受信側後ろの壁面に映ったミラーの影



写真5-11 V字測定の設置状況（左：ミラー後方から見た様子、右：手前が受信器・奥が送信器）



写真5-12 V字測定の状況（左：送信器からみたミラー、右：受信器からみたミラー）

＜ミラーを使用した場合の光軸合わせ＞

送信側ミラーの場合、送信器からの光をミラーに合わせるのは、レーザーがまだ拡散していない状況であるため、比較的容易である。日中でも、白い紙片にレーザーの赤い点を当て、それをずらしていくことで照準が可能である。ただし、ミラーからの反射光を受信器に合わせるのはかなり難しい。今回の測定では、電動のミラーステージをコントローラで操作するという方法を採用したが、はじめはミラーからの反射光をやはり紙片で追ひ、ある程度離れたところからは、受信器とミラーの間に立ち、目視で光の位置を確認しながら、後ずさりするというやり方で合わせた。その間、ミラー側から光を確認している人間の位置を覗き、受信器の方向と合っているかを確認しながらミラー角度の微調整を繰り返す必要がある。なお、この光軸合わせは、夜間に行うと格段に容易になるため、2回目からは夜間にこの作業を行うようにした。

受信側ミラーの場合は、ミラー位置で、標準測定と同じように送信側の光軸をまず合わせる。次にミラーの角度を調節するが、このプロセスがやはり容易ではない。受信器の直前に立ち、ミラーを覗いて送信機が映る位置を探す。ミラーの径が小さいため、光軸上に大きめの目標物を置いてこの操作をする比較的探しやすい。

なお、今回使用した電動ミラーステージは、87mの距離で最小ステップ角の移動は光軸を10cm程度シフトさせるという精度で、十分今回の目的に使用可能なものであった。

測定全期間の２台のシンチロメータおよび渦相関法による顕熱フラックスの変化を図５－９に示す。

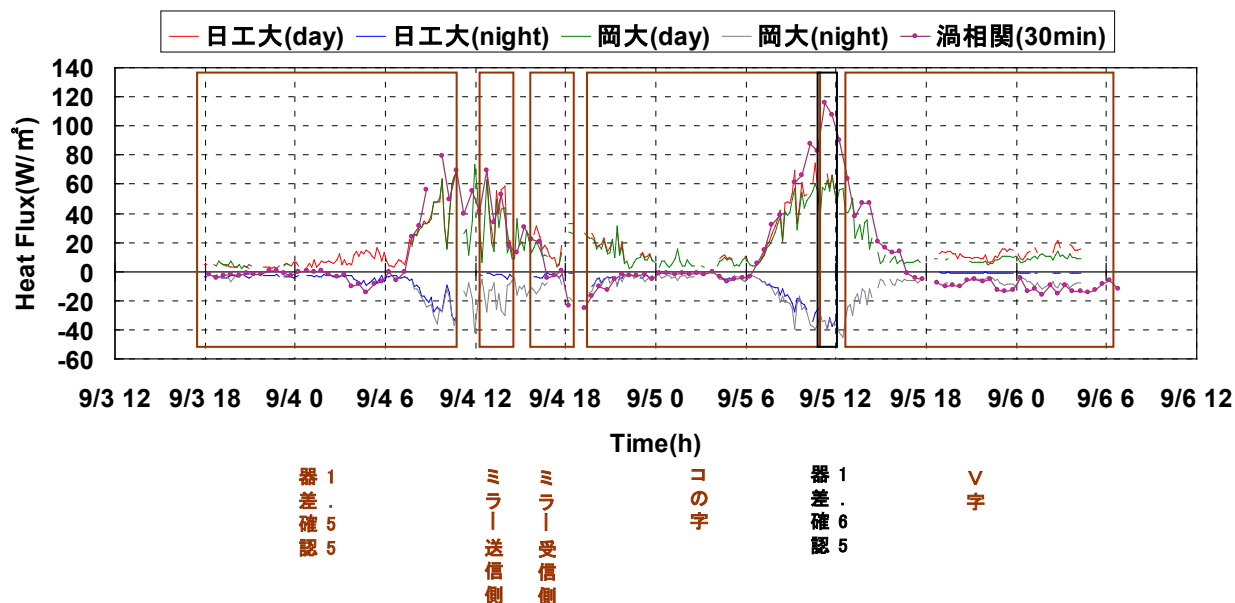


図５－９ 測定全期間における変化と各パターンの実施時間帯

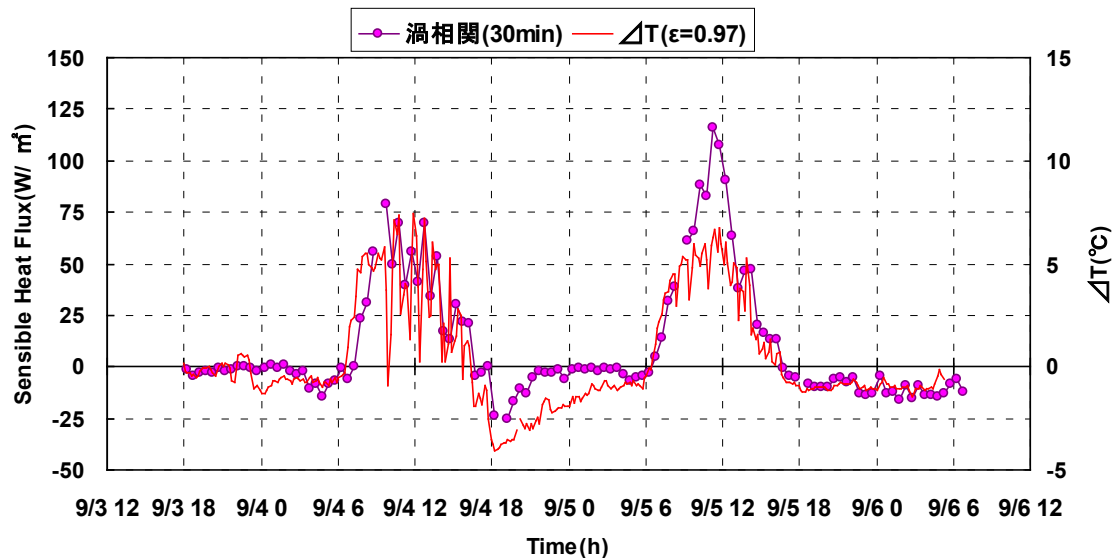


図５－１０ 渦相関法によるフラックスと温度差（表面—気温）の変化

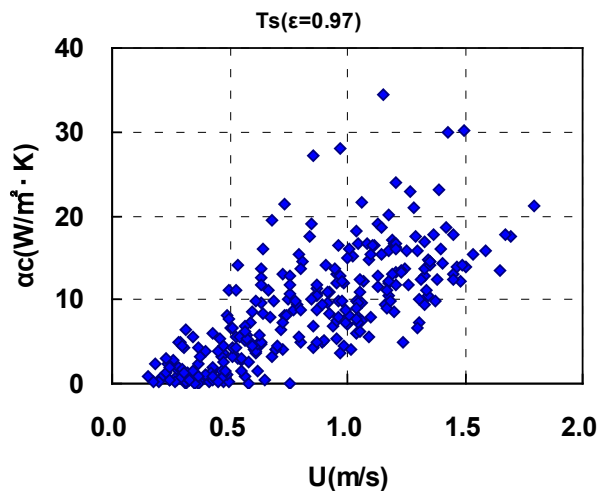


図５－１１ 渦相関法による対流熱伝達率と風速の関係

上向き長波放射量から射出率 0.97 を仮定して算出した表面温度を用いた表面と気温の温度差と顕熱フラックスの時間変化を図 5-10、これから算出した対流熱伝達率と風速の関係を図 5-11 に示す。

図 5-12 は 2 台のシンクロを平行に設置し、2 台とも標準状態で測定した器差検定の結果である。両者は非常によく一致しており器差は概ね無視できるレベルであるとみなせる。なお、比較のために行ったパス中心での渦相関法のフラックス値に比べると、シンクロメータの値はここでも小さめにしている。

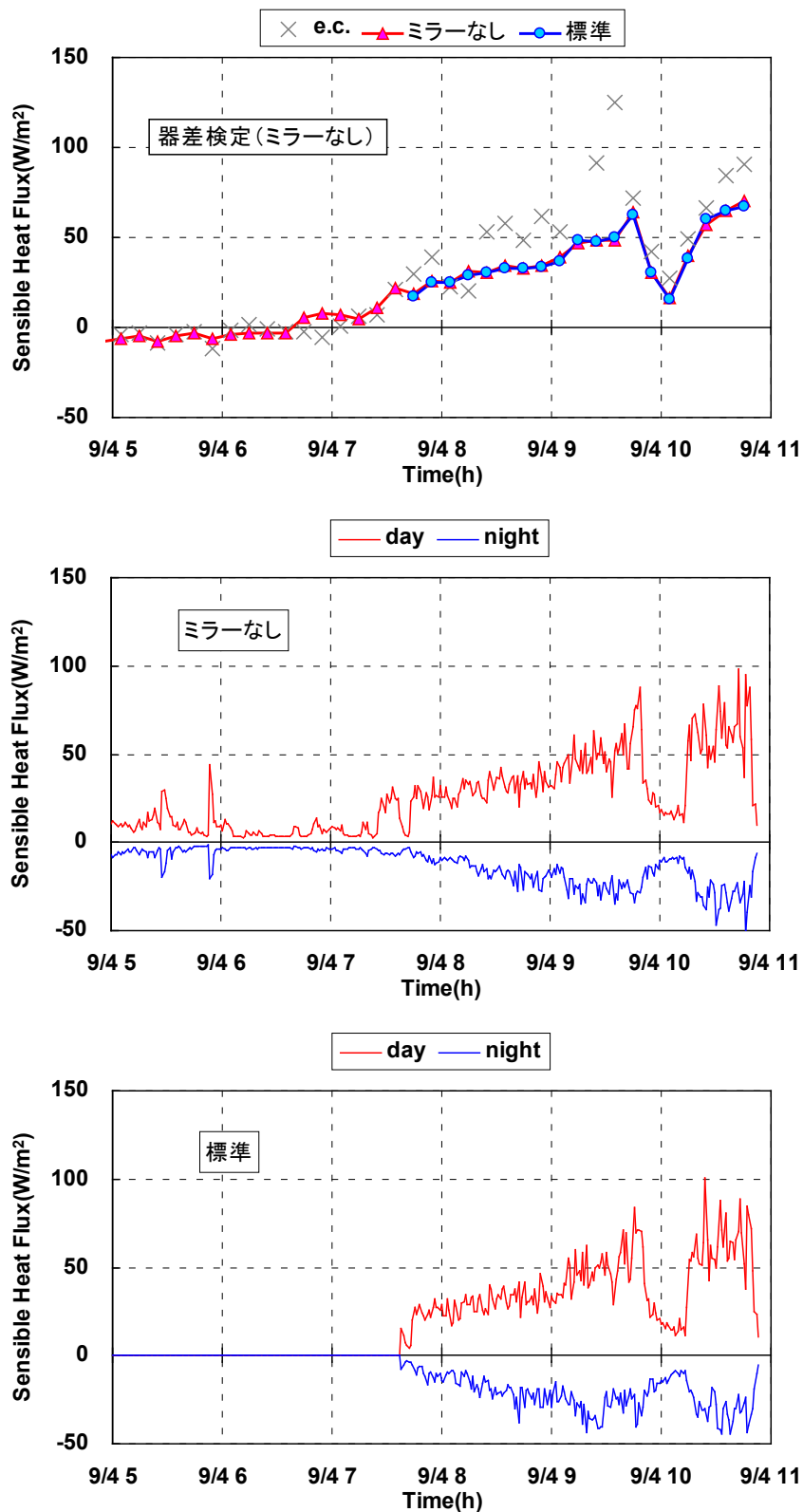


図 5-12 器差検定の結果（上段：10 分平均、中・下段：1 分出力）

送信機の直後約1 mにミラーを設置し、90度パスを変更した場合の結果を図5-13に示す。両者の値はほぼ一致しており、ミラーを介した測定が十分可能であることを示している。ただし、1分毎の出力を見ると、ミラーを介したシンチロでは、安定状態の出力が不安定になっている。

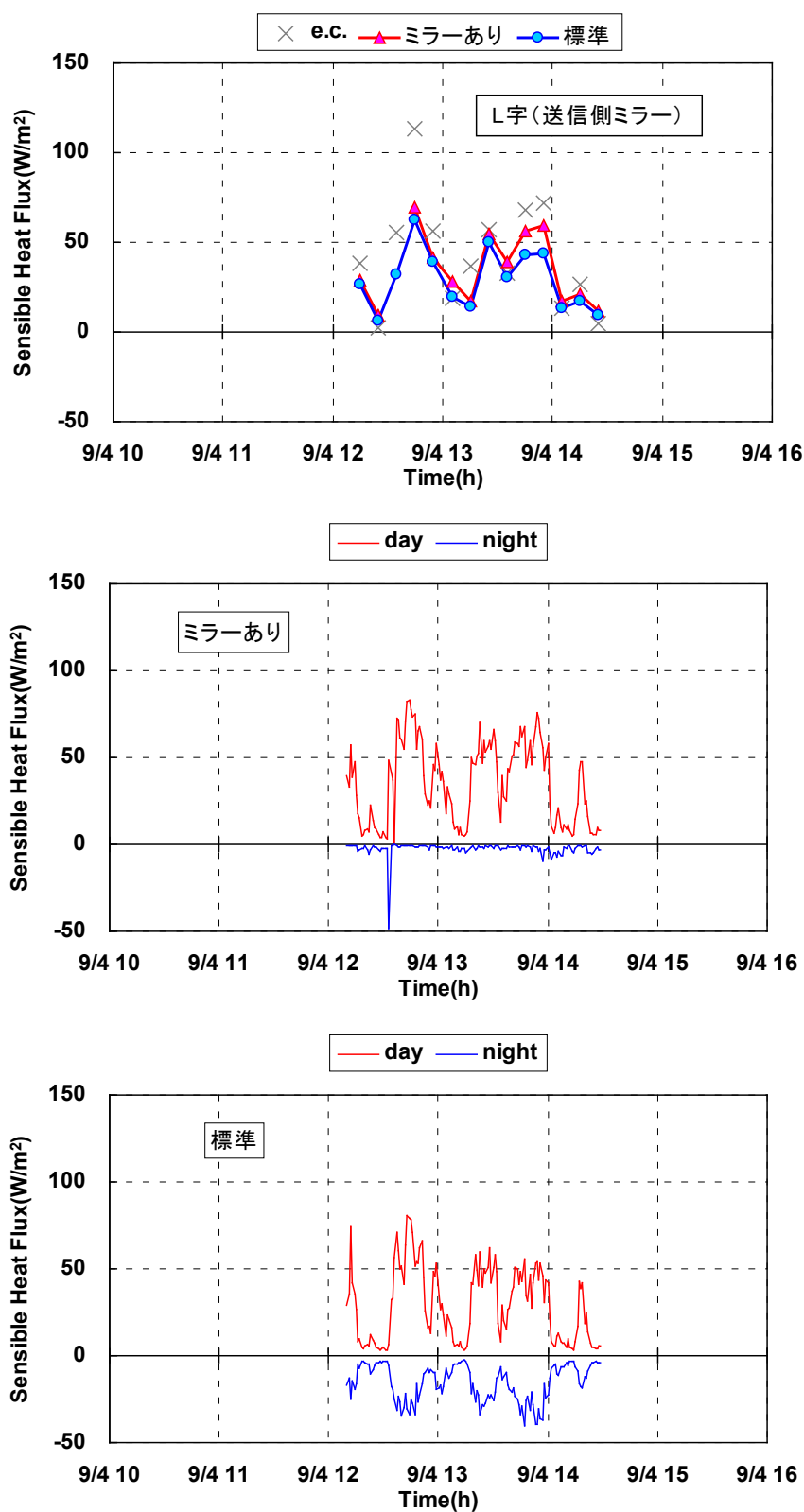


図5-13 送信側ミラーの結果（上段：10分平均、中・下段：1分出力）

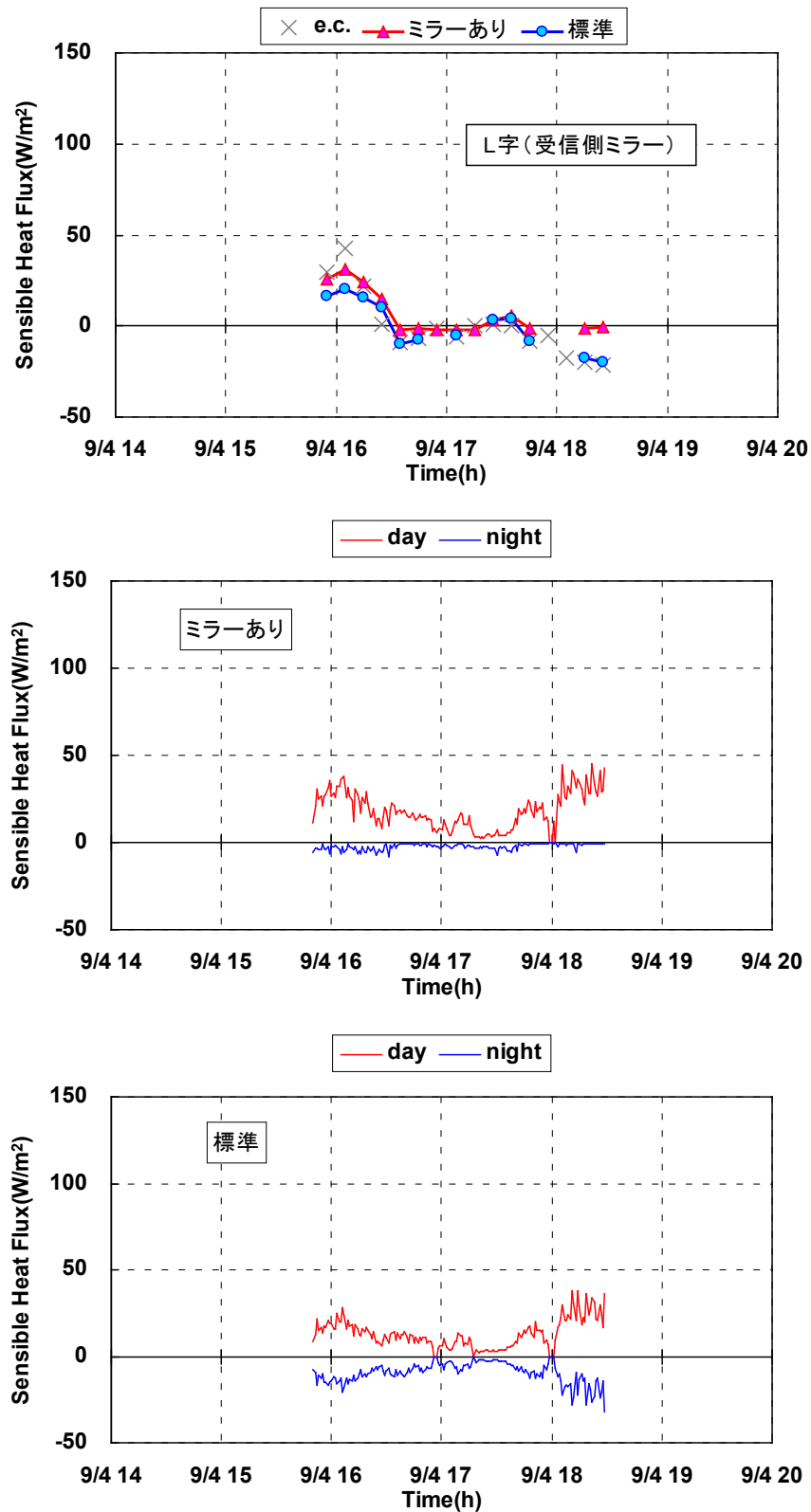


図5-14 受信側ミラーの結果（上段：10分平均、中・下段：1分出力）

図5-14は、受信器の直前1mにミラーを介した場合の結果である。フラックスの絶対値はやや小さく、明確な比較検討はできないが、発信器直後の場合と同様、概ね両者は一致している。なお、ここでもミラーを介したシンチロの安定時のフラックス値が不安定になっている。

前2項の結果を踏まえ、発信器直後1 mと受信器直前1 mの2箇所にミラーを介したコの字パターンの場合の結果を図5-15に示す。ここでも両者はほぼ一致した変化を示しており、2枚のミラーを介しての測定も可能と思われる。なお、前2項に比べ、ミラーを介した場合の安定時の出力は回復しているが、やはり標準測定に比べると絶対値は小さくなっている。

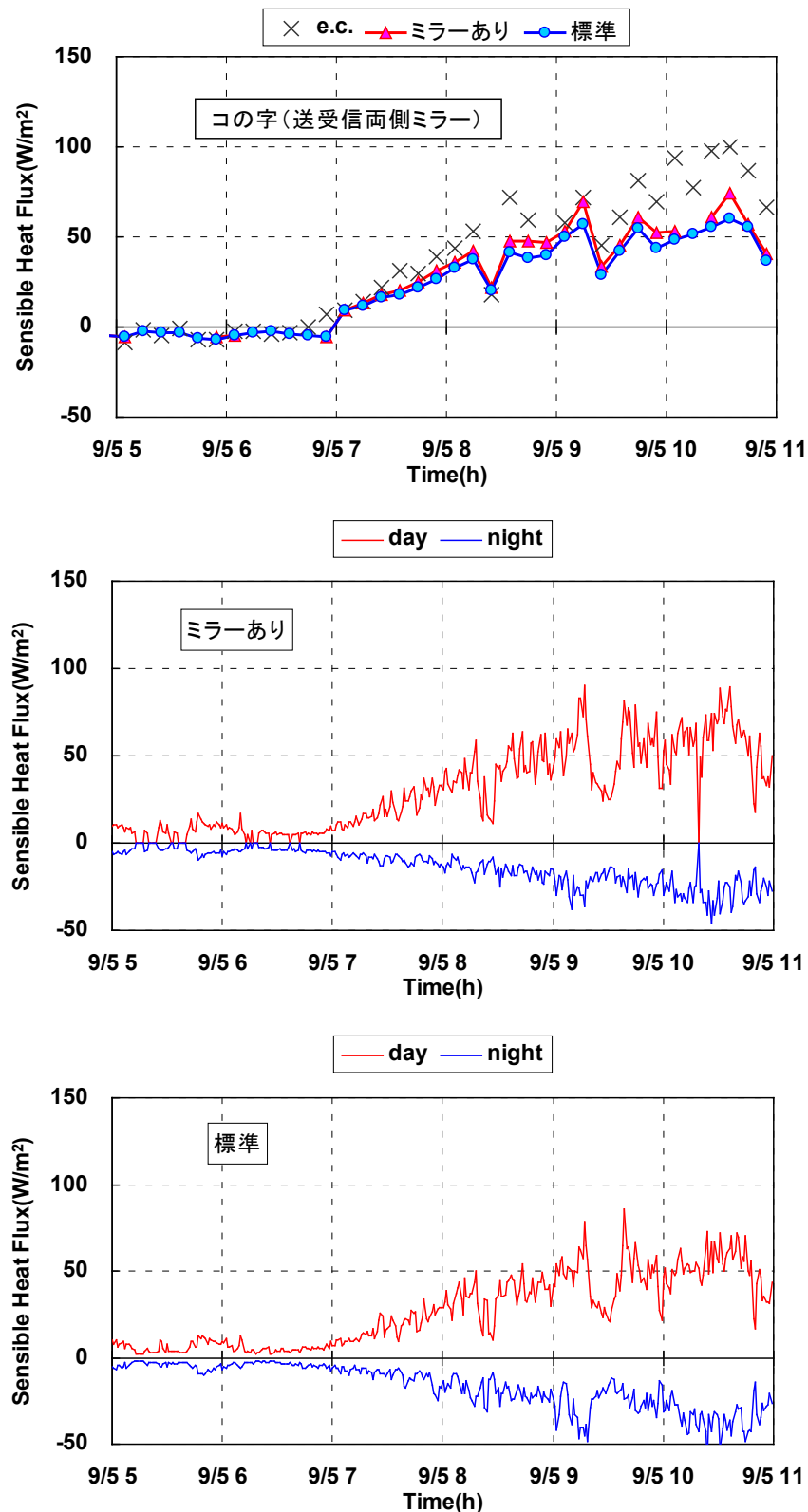


図5-15 送受信両側ミラーの結果（上段：10分平均、中・下段：1分出力）

最後にパス中心にミラーを介したV字測定の結果を示す（図5-16）。正午過ぎから測定を開始したが、日中はバックグラウンド測定を繰り返してもミラーを介したシンチロの受信強度が安定せず夕方まで測定不能となった。夜間は一応、不安定側の出力は出ているが、安定側の出力はほとんどゼロとなった。グラフの時間帯は渦相関法のフラックスがマイナスの値を示しており、安定側を採用すべきと思われるが、ミラーを介したシンチロは測定値が得られなかった。

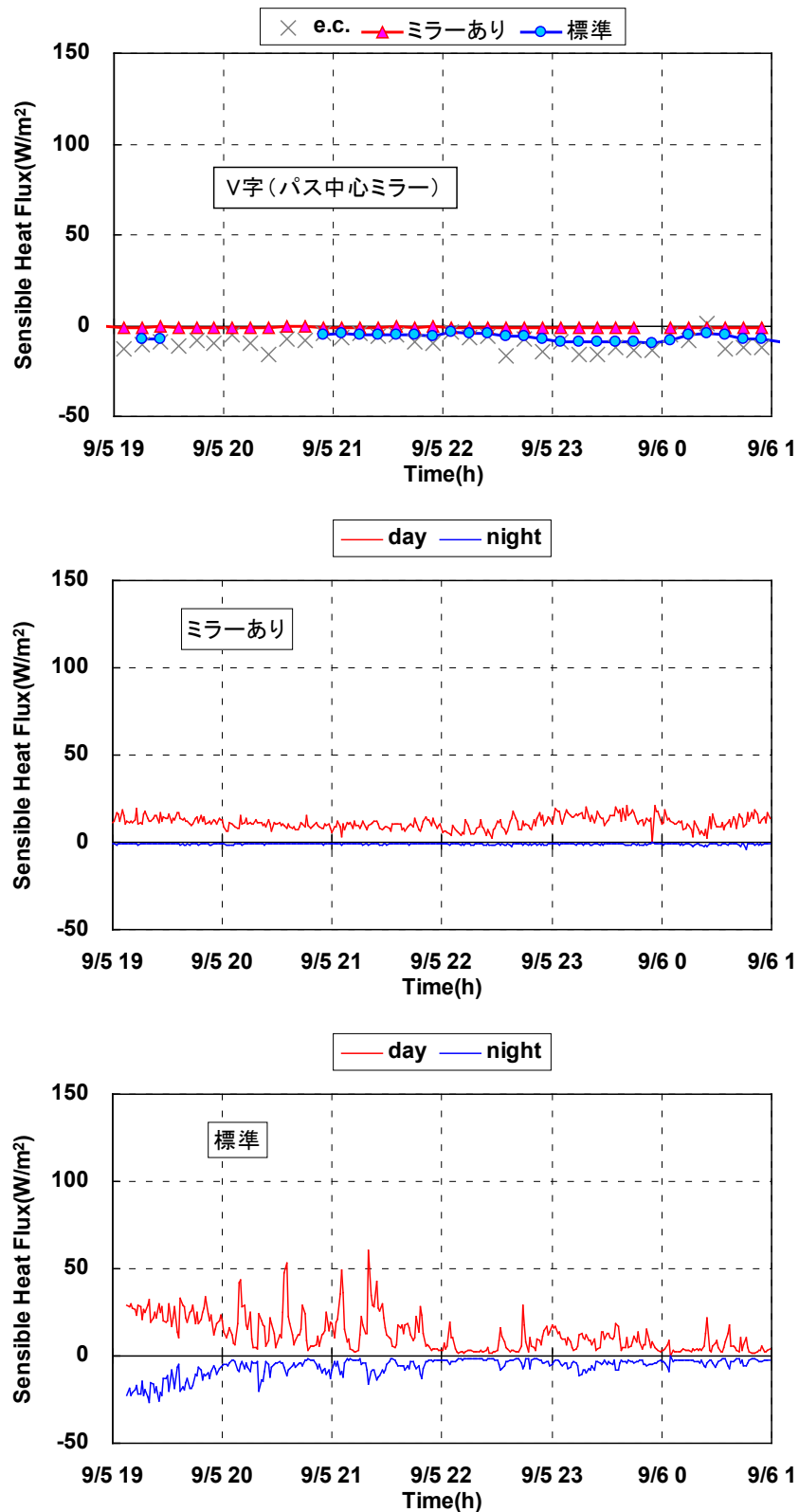


図5-16 V字パス中心ミラーの結果（上段：10分平均、中・下段：1分出力）

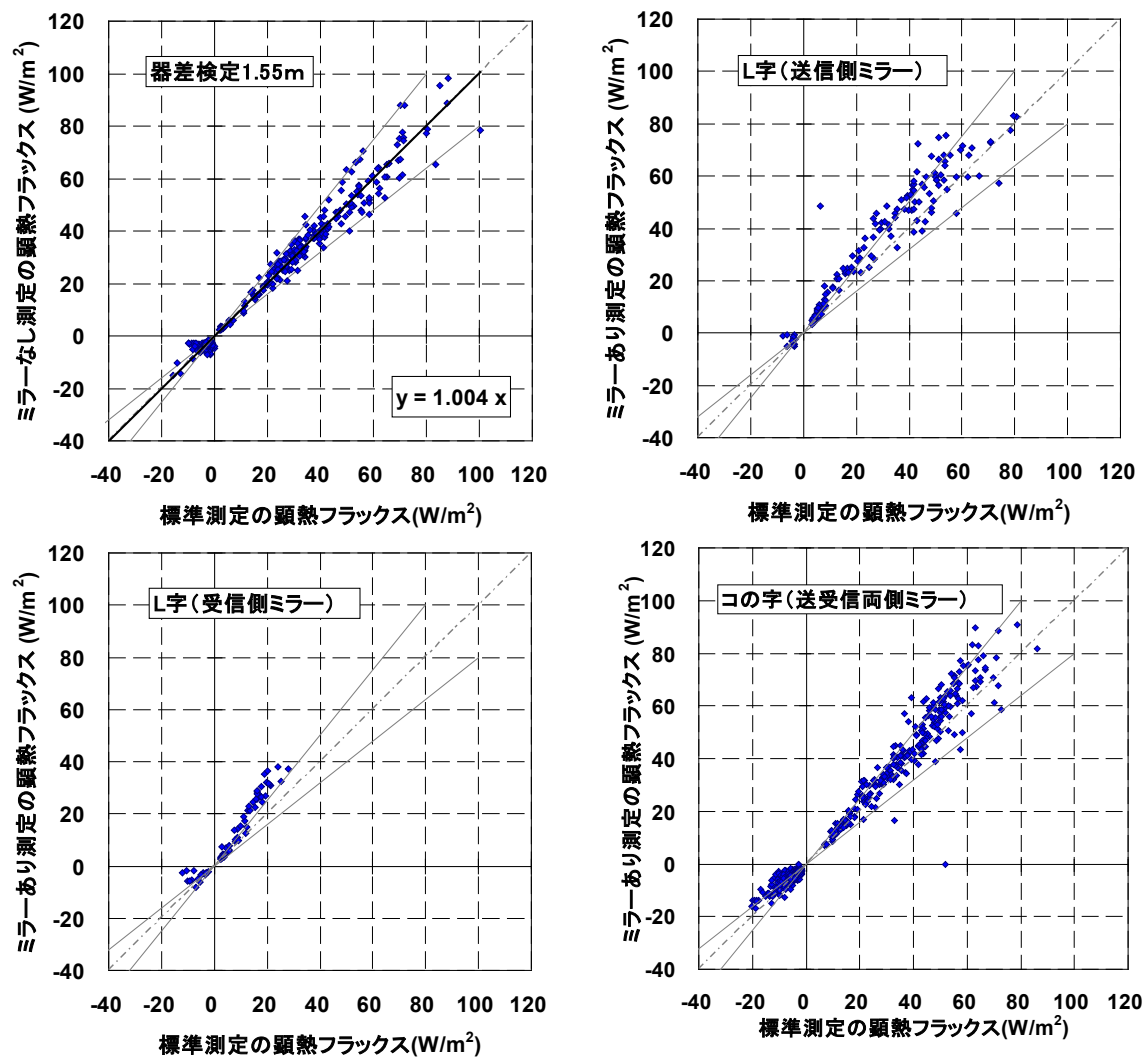


図5-17 ミラーありと標準測定とのフラックス対応関係

図5-17にV字測定を除く各測定パターンにおける、ミラーを用いたシンチロメータのフラックス値と、標準測定のシンチロメータのフラックス値の対応関係を示した。全体的には、ミラーありの方が数%程度大きめに測定される傾向が認められる。

5-3 ミラーを使用した顕熱フラックス測定の可能性検討のための屋外実測（その2）
ー日本工業大学キャンパス内グラウンドー

岡山での測定では、パス中心にミラーを介したV字の測定ができなかった。岡山での実験は時間も限られていたため、この原因を追求する目的で、再度岡山大学のシンチロメータをお借りし、実験を行った。場所は、日本工業大学第二グラウンド草地面で、2001年10月16日、31日、11月1日、8日、18日の5日間測定を行った。2台のシンチロメータ（日工大・岡山大）の設置状況を図5-18に示す。シンチロメータのパス間には、参考として超音波風速温度計を設置した。表5-1に日別の測定概要を示す。

表5-1 日工大での追加実験の実験ケース

	10/16		10/31		11/1		11/8		11/18	
	日工大	岡山大	日工大	岡山大	日工大	岡山大	日工大	岡山大	日工大	岡山大
測定法	通常	通常	通常	通常	ミラー使用 V字	通常	ミラー使用 V字	通常	ミラー使用 V字	通常
					パターン1		パターン2		パターン3	
測定高度 (m)	1.75	1.75	2.49	1.28	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58
測定距離 (m)	87	87	89	89	178	89	120	63	90	88

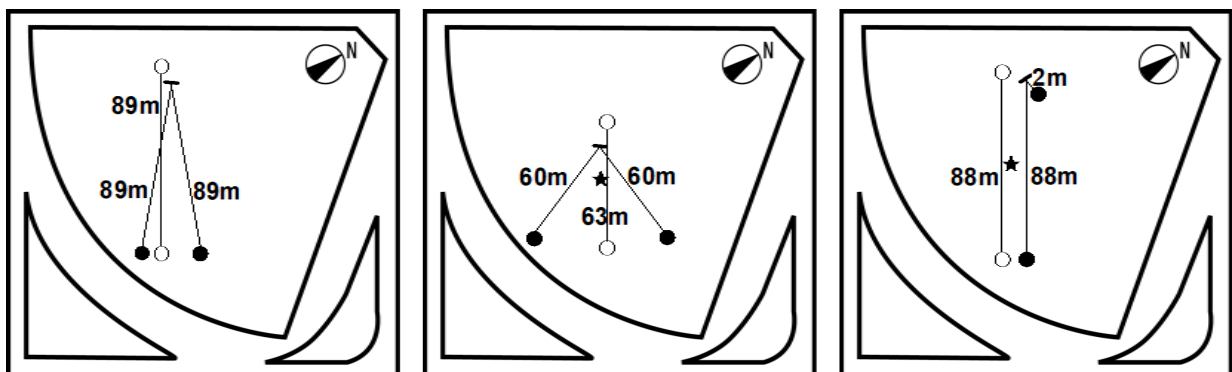


図5-18 日工大における測器の配置パターン（左より、パターン1・パターン2・パターン3）



写真5-13 標準測定時の実験状況



写真5-14 パス中心に設置した超音波風速計



写真5-15 パターン1での測定状況

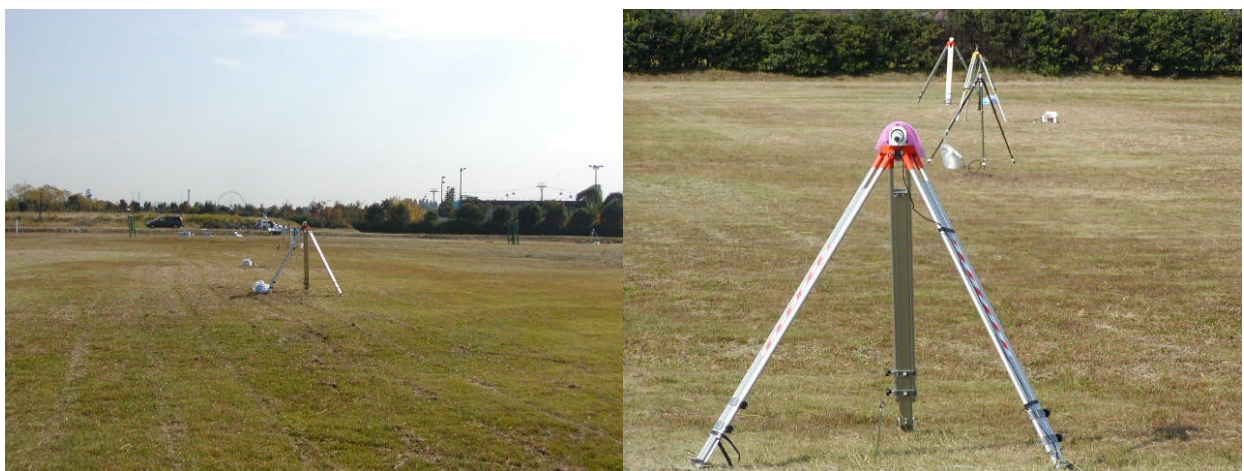


写真5-16 パターン2での測定状況（左：全景、右：標準測定の送受信器とミラー）



写真5-17 パターン2での測定状況（左：ミラーから受信器、右：受信器からミラー）



写真5-18 パターン3での測定状況（左：全景、右：送信器とミラー）



写真5-19 パターン3での測定状況（送信器とミラー）

今回の測定パターンは、前項の岡山でのV字の失敗を踏まえ、その原因追及を念頭に設定した。パターン1はとりあえず岡山と同様の測定を再度試みたもので、パターン2はミラーへの入射角が小さすぎることが原因かを確認するため入射角を成功した45度近くに大きくしたもの、そしてパターン3はミラーがパスの中間位置にあることが原因かを探るため入射角が小さい状態で送信器の直後にミラーを設置した場合である。

図5-19にパターン1での測定結果を示す。岡山と同様、V字での測定はやはり不安定で、ほとんど有意な出力は得られなかった。

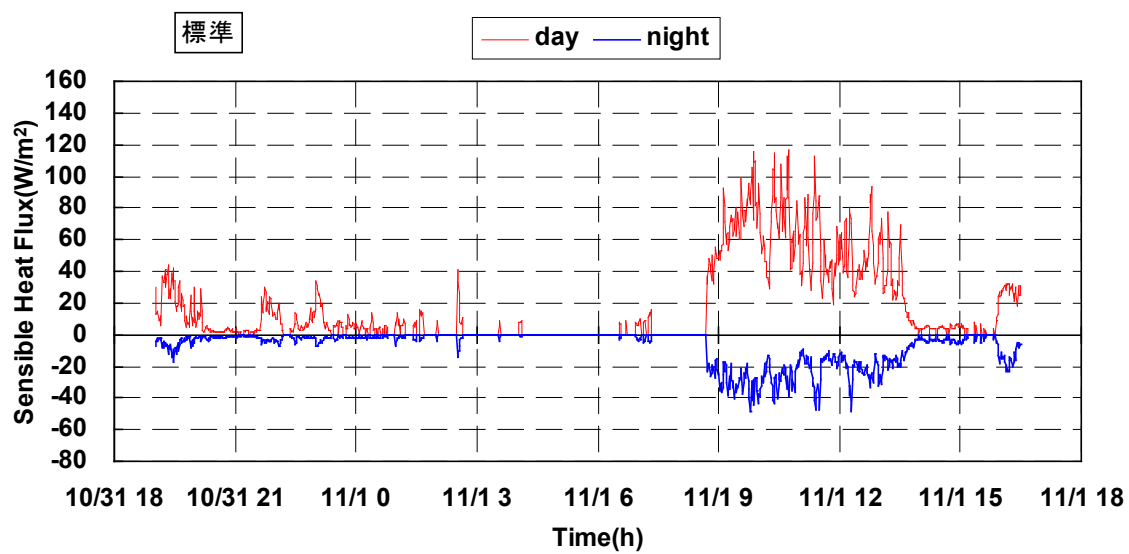
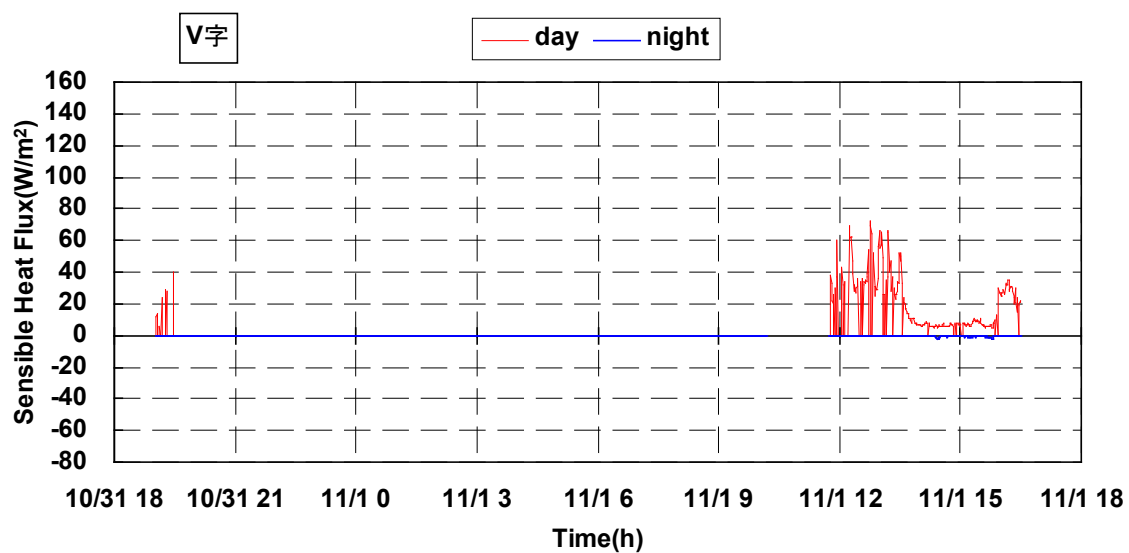
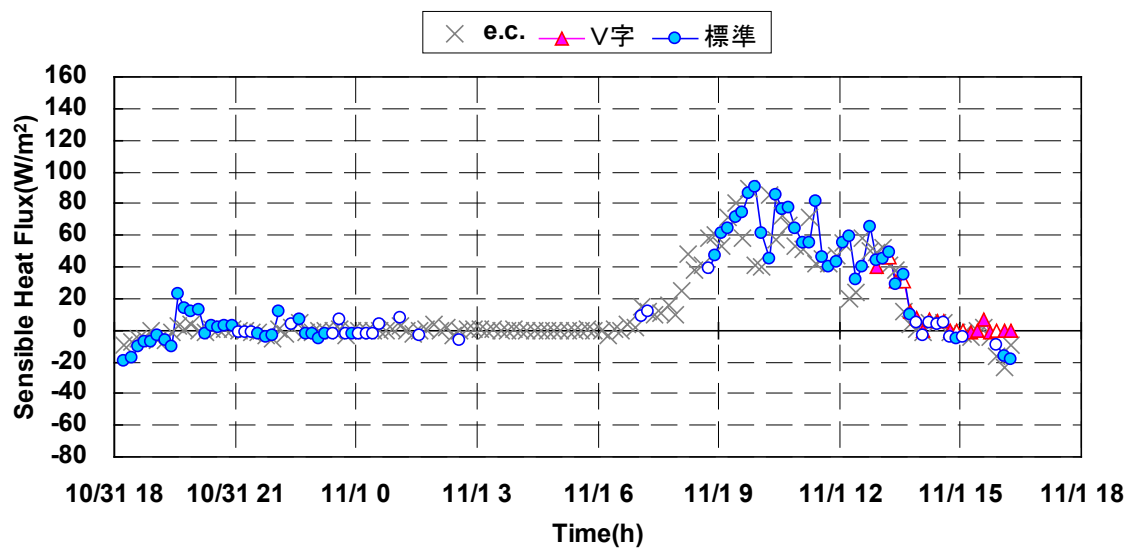


図5-19 パターン1での測定結果（上段：10分平均、中・下段：1分出力）

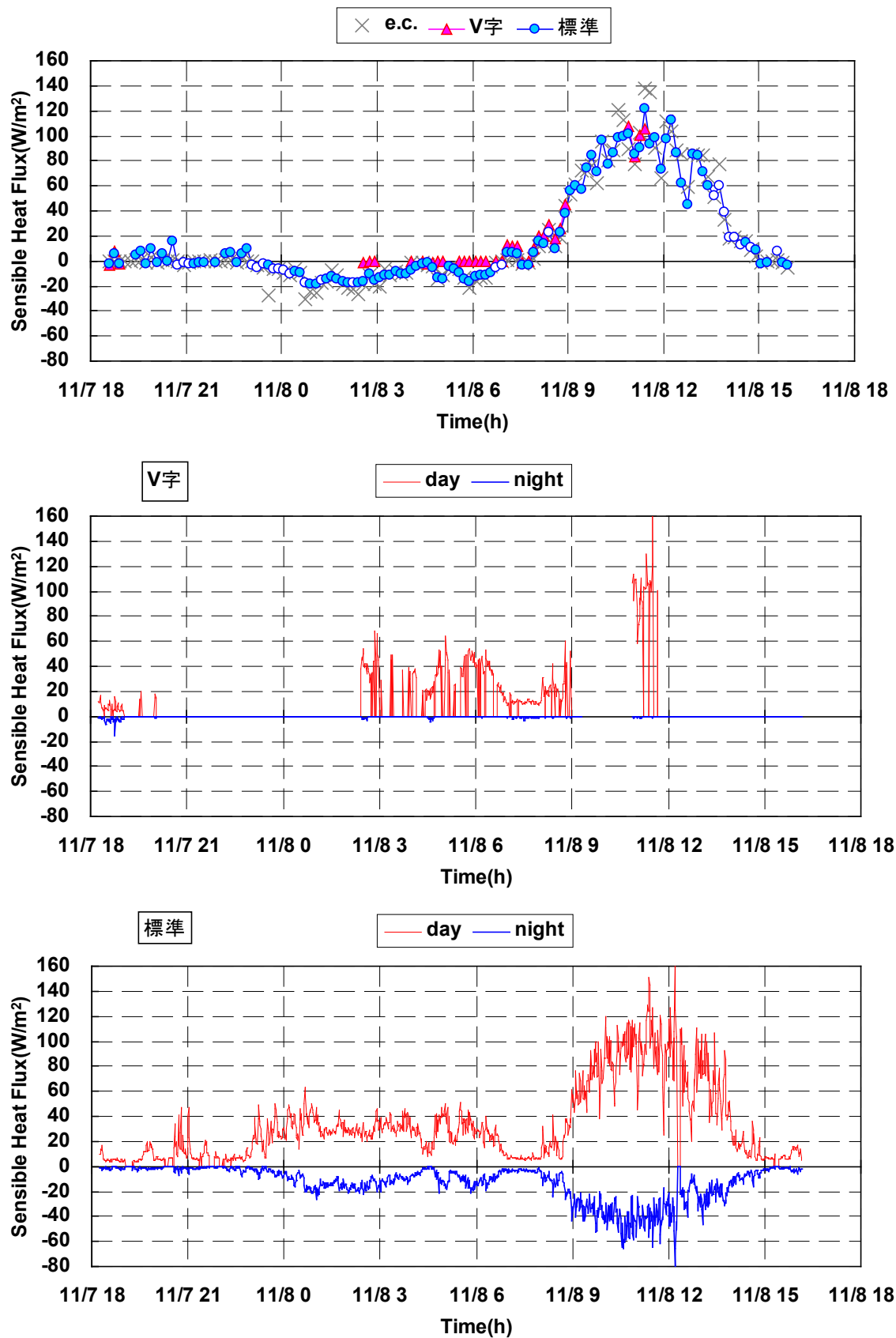


図5-20 パターン2での測定結果（上段：10分平均、中・下段：1分出力）

パターン2での測定結果を図5-20に示す。入射角を広げてみたが、結果は好転しなかった。パターン1とほぼ同様の結果に終わった。

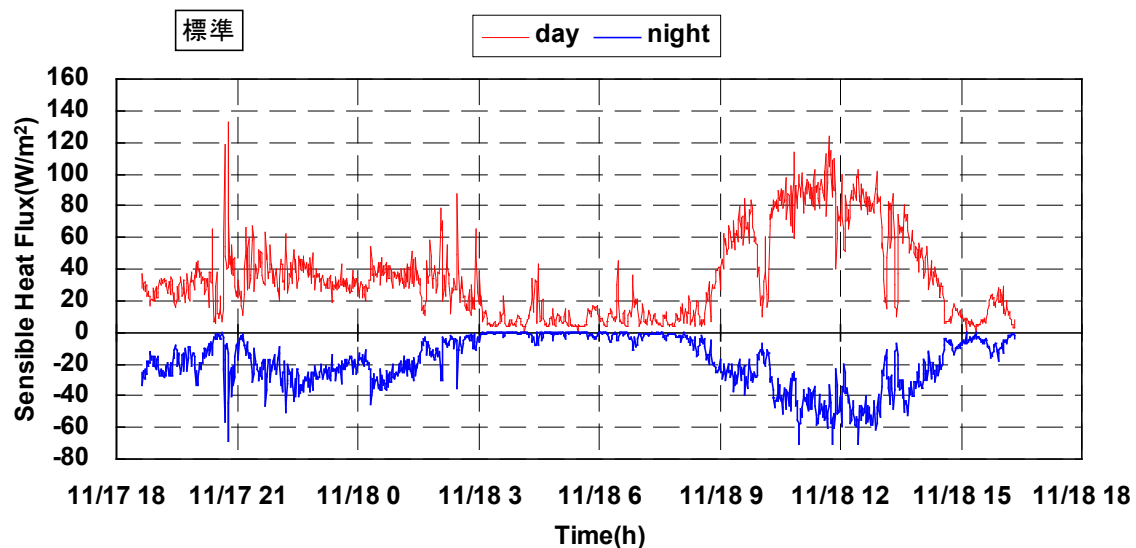
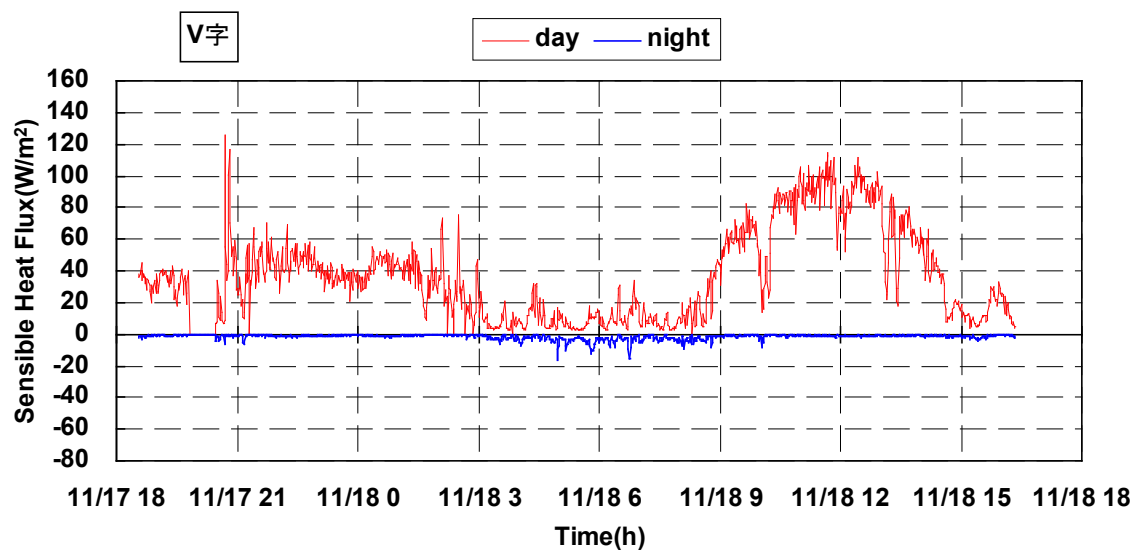
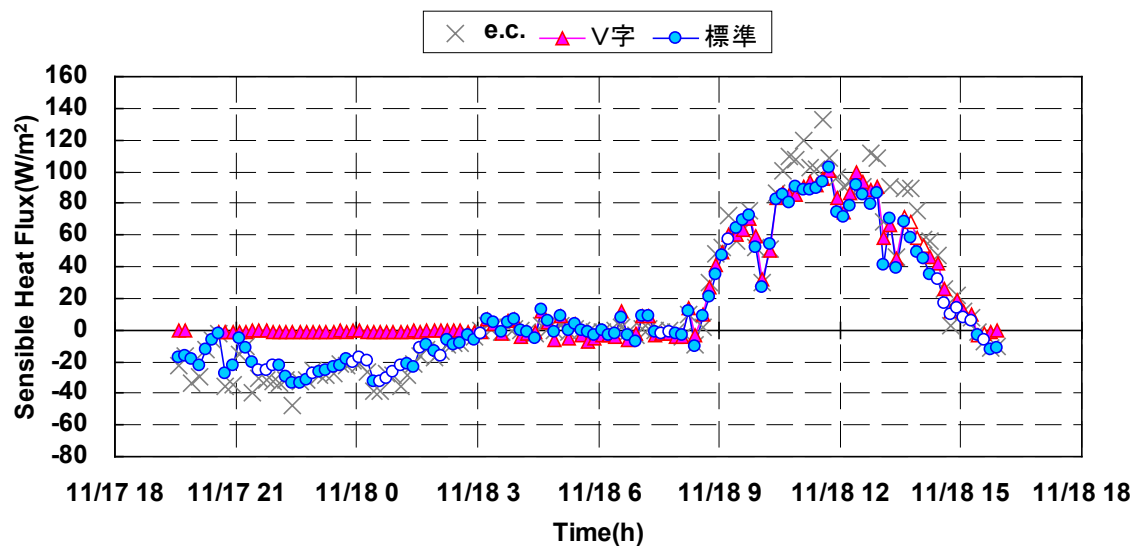


図5-21 パターン3での測定結果（上段：10分平均、中・下段：1分出力）

パターン3での測定結果を図5-21に示す。ミラー位置を送信器直後に移動した結果、少なくとも日中に関しては測定可能となった。しかし、夜間については出力が得られなかった。

以上の結果から、ミラーをパスの中間位置に設置することが、測定不能となる要因と考えられる。ミラーへの入射角は45度から外れて、より法線に近い小さな入射角でも概ね測定可能と思われる。なお、ミラーを介した場合、不安定側の出力は得られても、安定側の出力が得られないケースが多く生じた。この原因については、今のところ不明である。

90度方向変化を2回行うコの字パターンの測定に目途がたったことから、壁面への応用の可能性が示されたといえる。一方、パスの中間地点へのミラー設置が可能になれば、比較的狭い面積のフラックスをパス平均という安定した出力で測定できるのではないかと期待からV字パターンの測定を試みたが、これについては見通しが得られなかった。

今回使用した電動のミラーステージを用いたミラーシステムは、当初の目的を果たすシステムとしては十分な性能を有していることが確認できた。ただし、風によるミラーのわずかな振動がフラックスの測定結果を不安定にする場合が認められた。ミラーの設置においては、このような点に関して注意深く行うことが肝要である。また、ミラーを介した測定は、標準測定に比べ光軸合わせの作業が格段に難しくなる。今回の一連の測定の経験から、光軸合わせはできるだけ夜間に行うことが作業を容易にすることをあえて記しておく。

謝辞

本研究の実施に当たり、岡山大学（現・大阪府立大学）の吉田篤正先生には、ミラーの特性に関する室内実験をはじめ、様々な面でご協力いただいた。同じく岡山大学の塚本修先生には、長期にわたってシンチロメータの貸与を快諾いただいた。また、新潟工科大学の飯野秋成先生からは、ミラーの選定において様々なアドバイスを頂いた。ここに記して心から感謝の意を表します。

なお、本報告書に収録した各々の測定は、様々な機関の方々の協力のもとに実施したものである。新宿御苑の測定では、国立環境研究所の一ノ瀬俊明氏からシンチロメータをお借りした。また、この測定は東京都立大学の三上岳彦先生・木村圭司先生、防衛大学の菅原広史先生、千葉大学の本條毅先生との共同プロジェクトの一環として行ったものである。隅田川ならびに、筑波大学水理実験センターでの測定では、竹中工務店技術研究所の三坂育正氏にご協力いただいた。同じくアクロス福岡での測定は、三坂氏をはじめ九州大学総理工の片山忠久先生・谷本潤先生・萩島理先生との共同観測である。赤羽台団地の実測は、東京大学生産技術研究所の村上周三先生（現・慶応大学）・吉田伸治氏（現・福井大学）、福井大学の大岡龍三先生（現・東京大学生産技術研究所）、東北大学の持田灯先生、新潟工科大学の富永禎秀先生らとのプロジェクトの一環として行ったものである。これらの多くの方々に、心から感謝の意を表します。

最後に、各々の測定に当たっては、日本工業大学の学生諸氏に多大なる協力をいただいた。ここにあらためて深く感謝の意を表します。