

非一様植生面上での大口径シンチロメーターを用いた
地表面熱収支の観測

家本 薫

200323480

平成 17 年 1 月

筑波大学大学院環境科学研究科

平成 16 年度修士（環境科学）学位論文

要旨

地表面フラックスの測定には一般的に地点計測に基づく渦相関法が用いられているが、これは点での観測であるので観測対象が広い場合は観測値の空間的・時間的代表性の問題について慎重に扱う必要がある。そこで2点間の直線上で平均されたフラックスを計測できる大口径シンチロメーター（LAS）を用いて、琵琶湖北東岸の収穫後の水田上でパス長約1200m、モンゴル国の草原上で450～4600mとパス長を変えて、顕熱フラックスを測定しその空間分布を明らかにした。

シンチロメーターの観測からの顕熱フラックスの算定では、一般的に気圧、温度、摩擦速度といった微気象観測値よりも、用いる温度の無次元化構造パラメータにより顕熱フラックスが大きく変わることには留意する必要があることが示された。また、大気の揺らぎが大きすぎるためと思われる観測エラーが発生しており、大気乱流が活発な観測条件下では測定高度を高くするなどして、観測値の絶対値を抑制する必要がある。

シンチロメーターによる顕熱フラックスを渦相関法によるものと比較すると、シンチロメーター法による顕熱フラックスのほうが渦相関法のものよりも約1.5倍大きい値が得られた。またこれらの顕熱フラックスと風向、安定度には特に関係性が見られなかったので、2手法の顕熱フラックスの違いはフットプリントの違いによるものではないことが示された。また、シンチロメーター法の顕熱フラックスを用いたほうが渦相関法によるものよりも熱収支式がより閉じやすい傾向が見られた。

モンゴル観測において、バルク法で航空機パス下の顕熱フラックスを算定したところ、植生の違いを反映した顕熱フラックスの空間分布がシンチロメーター法の観測結果と矛盾しないことから、シンチロメーターは渦相関法によるタワー観測よりも広範囲の顕熱フラックスの空間分布をよく反映していると推測された。

以上のことから、大口径シンチロメーターは顕熱フラックス観測の新たな方法として利用する価値があるものであると判断した。

キーワード

モンゴル, 顕熱フラックス, 広域熱収支, Energy Closure ratio

目次

要旨	i
目次	ii
表目次	iii
図目次	iv
1. 序論	
1. 1 目的	1
2. シンチロメーター法	
2. 1 シンチロメーター法の原理	2
2. 2 顕熱フラックスの算定方法	2
3. 観測概要	
3. 1 使用したシンチロメーターについて	4
3. 2 2002年琵琶湖観測について	
3. 2. 1 プロジェクト概要	4
3. 2. 2 シンチロメーターの観測概要	4
3. 2. 3 その他の使用データ	5
3. 3 2003年モンゴル観測について	
3. 3. 1 プロジェクト概要	7
3. 3. 2 シンチロメーターの観測概要	7
3. 3. 3 その他の使用データ	7
4. 顕熱フラックスの算定に関する結果・考察	
4. 1 3種の無次元関数を用いた顕熱フラックスの比較	17
4. 2 使用データに対する感度実験	21
4. 3 平均化時間の影響	23
4. 4 渦相関法との比較	26
4. 5 Energy Closure ratio について	34
4. 6 まとめ	40
5. 顕熱フラックスの空間分布に関する結果・考察	
5. 1 琵琶湖観測における検証	41
5. 2 モンゴルにおける検証	43
5. 3 顕熱フラックスの空間分布についてまとめ	49
6. 結論	50
7. 謝辞	51
引用文献	52

表目次

表 1	2003 年モンゴル全観測パスと観測日一覧	10
表 2	解析に使用する全観測日時・パス長・地点・設置高度一覧	12
表 3	P, T, u^* による顕熱フラックス H の感度実験結果	22
表 4	平均化時間の影響(観測日毎)	24
表 5	2003 年モンゴル観測における観測日毎の日平均 Energy Closure ratio	35
表 6	各日のバルク係数 C_H	45

図目次

図 1	2002 年琵琶湖観測対象地の各測器の配置	6
図 2	2003 年モンゴル観測対象地周辺図	9
図 3	強い Scintillation のため観測エラーとなった例	11
図 4	A1 サイトとシンチロメーターの送信機	13
図 5(a)~(c)	シンチロメーターの受信機付近の様子	14~16
図 6	3 種の温度の無次元化構造パラメータ Φ_{CT}	18
図 7(a)	使用した Φ_{CT} の違いによる顕熱フラックスの比較 (Hscin (W)と Hscin (T&G))	19
図 7(b)	使用した Φ_{CT} の違いによる顕熱フラックスの比較 (Hscin (W)と Hscin (K))	20
図 8	平均化時間の影響	25
図 9(a)~(h)	2003 年モンゴル観測における各日の地表面フラックス	27~30
図 10	Hscin/Hec の風向に対する依存関係	31
図 11	Hscin/Hec の安定度に対する依存関係	32
図 12	Hscin/Hec の観測パス長への依存関係	33
図 13(a)~(h)	2003 年モンゴル観測における Energy Closure ratio の時系列	36~39
図 14	2002 年琵琶湖観測におけるフットプリントを考慮した Hscin/Hec	42
図 15	各日の航空機飛行経路とシンチロメーターのパス	44
図 16	航空機観測による地表面温度 Ts(3 分平均値)	45
図 17(a), (b)	Tsを用いたバルク法による顕熱フラックス H_{plane} と Hscin	46
図 18	NDVI と LAI の関係	47
図 19(a), (b)	航空機観測による NDVI と LAI	48

1 章 序論

1. 1 目的

一般的に地表面フラックスの測定は渦相関法によるタワー観測が主流であるが、このような点での観測は、観測対象が広い場合は観測値の空間的・時間的代表性の問題について慎重に扱う必要がある。そこで近年、2点間の直線上で平均されたフラックスを計測できるシンチロメーターが注目されている。シンチロメーターは送信機から照射されたビームの強度変動を受信機で観測する測器である。シンチロメーターは慣用的には使用ビームの口径によって2種類に大別される。口径が細いほうを小口径シンチロメーター (Small Aperture Scintillometer ; SAS), 太いほうを大口径シンチロメーター (Large Aperture Scintillometer ; LAS) という。シンチロメーターの利点は、送信機・受信機の2点間の距離を調整することによって、観測対象域と同じ大きさの直線上で空間的に平均化されたフラックスを測定できることである。特に大口径シンチロメーターは、小口径タイプよりも送受信機間を長距離にすることが出来るので、より広範囲の空間平均フラックスが観測可能であり、さらに三脚で固定できるため簡易に設置でき、メンテナンスやデータプロセッシングも容易に行うことが可能であることが利点として挙げられる。反面、出力値が屈折率の構造パラメータ C_n^2 だけなので、フラックス算定には別観測により摩擦速度 u^* を必要とするという欠点を持つ。

Hill *et al.* (1992) では小口径シンチロメーターを用いた観測を行い、風向や安定度が観測に適していない時でも水平方向に一樣な層ではシンチロメーター法は有効であることを指摘している。また大口径シンチロメーターを用いた研究例 (DeBruin (2002) にまとめてリストアップされている) はあまり多くないが、Green and Hayashi (1998) は水田上で大口径シンチロメーターによる熱収支観測を行い、湿潤条件下では水蒸気量の変動を考慮する必要があると報告している。Meijninger *et al.* (2002) は、複数種の畑地からなる不均一地表面上で大口径シンチロメーターを用いて観測した結果、測定高度に注意すれば空間代表性が良い顕熱フラックスが得られることを報告している。

シンチロメーターを用いた過去の観測は小口径シンチロメーターを用いた短いパス (～200m程度) を対象としたものがほとんどであったが、近年、より広範囲で観測可能な大口径シンチロメーターが開発されたため、各種フラックスの空間的な不均一性や、観測において熱収支式が閉じないいわゆるインバランス (Energy Closure) 問題に対する新たなアプローチ方法の一環として期待されている。

そこで本研究では、近年の過放牧や温暖化から乾燥化の進行が懸念されているとされる半乾燥域のモンゴル国において乾燥化の原因やメカニズムの把握のために必要とされている水・熱収支の定量的な各種観測のうち、地表面フラックスの分布や広域平均の定量的な解析を行うために大口径シンチロメーターによる観測を行い、インバランス問題の解明を目的とて行われた CAPS2002 (3.2.1 節参照) の観測データを参照にした上で、モンゴル国 Kherlen 川流域の草原において顕熱フラックスの空間分布を調査することを研究目的とする。

2 章 Scintillometer 法

2. 1 シンチロメーター法の原理

大気中では水蒸気や微量気体，または温度の不均一分布によって大気に密度差が生じ，密度が異なる境界では電磁波が屈折する．シンチロメーターは，送信機から照射された電磁波が大気中で屈折・散乱を経て受信される際の受信強度変動を，屈折率 n の空間分布を表す構造パラメータ C_n^2 として計測する．

構造パラメータ C は以下のように定義される構造関数 D の係数である．

$$D_A \equiv \overline{[A(x) - A(x+r)]^2} = C_A^2 \cdot r^{2/3} \quad (1)$$

構造パラメータ C_A^2 は，任意の変数 A が位置 x と x から距離 r 離れた $x+r$ においてどれほど異なるかを表す指標である． A を屈折率 n として式(1)を表すと，

$$C_n^2 \equiv \frac{D_n(r)}{r^{2/3}} = \frac{\overline{\{n(x+r) - n(x)\}^2}}{r^{2/3}} = \overline{\left(\frac{\delta n}{r^{1/3}}\right)^2} \quad (2)$$

同様に，式(1)を温度 T について表すと，

$$C_T^2 \equiv \frac{D_T(r)}{r^{2/3}} = \frac{\overline{\{T(x+r) - T(x)\}^2}}{r^{2/3}} = \overline{\left(\frac{\delta T}{r^{1/3}}\right)^2} \quad (3)$$

また，Green and Hayashi (1998) より，上記の屈折率 n と温度 T の各構造パラメータ C_n^2 ， C_T^2 には以下の関係がある．

$$C_n^2 = C_T^2 \left(0.78 \times 10^{-6} \frac{\bar{P}}{\bar{T}^2} \right)^2 \left(1 + \frac{0.03}{\beta} \right)^2 \quad (4)$$

(T : 温度 P : 気圧 β : ボーエン比)

2. 2 顕熱フラックスの算定方法

定義より，摩擦温度 T^* ，安定度 ζ は，

$$T^* = \frac{H}{\rho C_p u^*} \quad (5)$$

$$\zeta = \frac{-zkgH \left(1 + \frac{0.07}{\beta} \right)}{\rho C_p u^{*3} \bar{T}} \quad (6)$$

(H : 顕熱フラックス ρ : 大気密度 C_p : 定圧比熱 u^* : 摩擦速度 z : 高さ
 k : カルマン定数 g : 重力加速度)

またモニン・オブコフの相似則より， C_T^2 についての無次元関数 Φ_{CT} は，

$$\Phi_{CT}(\zeta) = \frac{z^{2/3} C_T^2}{T^{*2}} \quad (7)$$

u^* ， T ， P ， β ， Cn^2 は観測値， z ， ρ ， C_P ， k ， g は定数，(7)式は 4.1 節の通り安定度 ζ のみの関数（後述の式 ((8.a)～(8.c)) で表すことが可能なので，最終的に顕熱フラックス H は式(5)～(7)の反復計算により算定される．すなわち，

①(6)式の H に任意の値 H_0 を代入し，仮の ζ を決定する

② Φ_{CT} の経験式を用いて，(7)式の T^* が算定される

③(5)式から H を算出し，①の H_0 との差の絶対値 $|H - H_0|$ を計算する

④③で決定した H を H_0 として再び①～③を繰り返す

以上の反復計算を， $|H - H_0| < 0.001 \text{ W/m}^2$ に収束するまで繰り返して決定する．

3 章 観測概要

3. 1 使用したシンチロメーターについて

本研究では琵琶湖近傍とモンゴル国の 2 観測を扱うが、いずれも使用した大口径シンチロメーターは Scintec 社の Boundary Layer Scintillometer; BLS900 である。波長 880nm の赤外線を送信機の 2 つの LED 盤から 2 本、10 度の広がりを持って発信するため、従来のレーザー光を使用した小口径シンチロメーターと異なり、狭い方向性を持たず精密な光軸あわせを必要としないため、設置が容易でより長距離を観測可能であるという利点がある。

シンチロメーターは直接的には屈折率の構造パラメータ C_n^2 を測定するので、 C_n^2 から モニン - オブコフの相似則を用いた顕熱フラックスの算定を行うためには、温度、気圧、摩擦速度、潜熱フラックス（ボーエン比）が必要となる（2 章参照）。そこで 2 観測とも、シンチロメーターと並行して行なわれた他の微気象観測データを利用する。

3. 2 2002 年琵琶湖観測について

3. 2. 1 プロジェクト概要

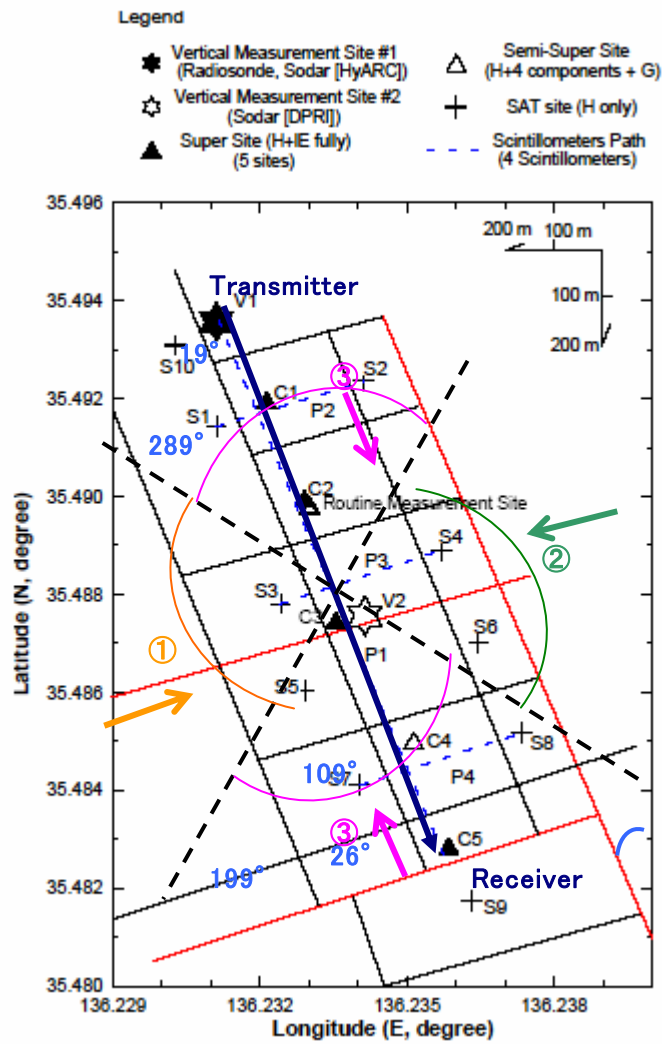
2002 年琵琶湖観測は CAPS2002(Catch a Plume by SATs)プロジェクトに参加して行った。CAPS2002 は超音波風速温度計(SAT)やシンチロメーター等を 100m オーダーで格子状に配置した乱流の面的集中観測によって、1 点観測では分かりにくい乱流の面的分布を解明することを目的として、2002 年 11 月に滋賀県北東岸の長浜近くの木之本・高月地域で行われた。観測は他にもゾンデ観測や航空機観測等が行われた（これらの観測概要は玉川ほか 2004 に詳しい）。集中観測期間は 2002/11/11~11/21 で、この間 SAT とシンチロメーターは常時観測を行った。観測地の周囲は北東が伊吹山地、南西が琵琶湖岸の平地で、格子状の観測対象域の水田地帯は南北に約 2 km、東西に約 1km の長方形をしており、交通量の多い道路に 4 辺を囲まれている。山地と湖の境界域のため、山地からの吹き降ろし風が強く、天候が数時間周期で変わりやすかった。観測を行った水田は収穫後しばらく放置されており、刈り取った後の稲が水抜きした水田面から高さ 20cm 前後まばらに残っていた状態であった。

3. 2. 2 シンチロメーターの観測概要

シンチロメーターは南北方向より 26° 傾いたパスで、北西から南東方向にビームを発信した。送信機は図 1 中の V1 脇に隣接する千田農場の建物（1 階建て）の屋根の上に設置した。受信機は図 1 中の C5 脇に隣接する水田内に建てた櫓の上に設置した。送信機、受信機の設置高度はそれぞれ水田面より 751cm 及び 670cm で、送受信機間のパスは 1232m であった。2002 年の集中観測期間 11/11~11/21 のうち、11/15 までの前半は雨で、11/16 以降の後半は晴天であったので水田面は湿潤な状態であった。シンチロメーターによる観測は 11/13 10:00~11/21 8:45 の期間中連続運用したが、11/15 までは雨天のため、11/17、11/18 は測器が固定できず傾くというトラブルのため、それぞれ解析には使用しない。よって本研究では、無降雨日の 11/19、11/20 の 2 日間のデータのみ解析に利用した。

3. 2. 3 その他の使用データ

図 1 中の S1~S10 サイトでは SAT による乱流観測，C1~C5 サイトでは熱収支各項（顕熱フラックス H ，潜熱フラックス LE ，地中熱流量 G ，正味放射量 R_n ）の観測が同時に行われた．C4 のみ 3 高度（1.00，2.45，5.90m）で測定が行われ，その他は約 2.5m で測定された．シンチロメーターの顕熱フラックスの算定に必要な気圧 P は S10（常設サイト），温度 T ，摩擦速度 u^* はシンチロメーターのパス上かつ高度が最も近い C4 の 5.90m における観測値を用いた．



(玉川ほか(2004)より加筆修正して引用)

図1 2002年琵琶湖観測対象地の各測器の配置．北西-南東方向の太矢印が大口径シンチロメーターの観測パス，図中の角度は北から時計回りに見たもの．①～③はシンチロメーターのパスに対する主風向を3種に分類（5.1節で使用）したもので，①西風よりのパスに垂直な風向； $199 < WD \leq 289$ ，②東風よりのパスに垂直な風向； $19 < WD \leq 109$ ，③北または南風よりのパスに平行な風向； $0 < WD \leq 19$ 、 $289 < WD \leq 360$ または $109 < WD \leq 199$ ．

3. 3 2003年モンゴル観測について

3. 3. 1 プロジェクト概要

2003年モンゴル観測は RAISE (The Rangelands Atmosphere-Hydrosphere-Biosphere Interaction Study Experiment in Northeastern Asia; 北東アジア植生移行域の水循環と生物・大気圏の相互作用の解明) プロジェクトに参加して行った。本プロジェクトは、モンゴルを含む北東アジアの湿潤-乾燥移行域における熱・水環境の現状を定量的に把握することを目的に行われた。観測対象地のモンゴル国は北東アジアの湿潤域から乾燥域の変遷域で、半乾燥気候である。移行域であるという元々の気候場の不安定に加え、近年の過放牧や温暖化から乾燥化・砂漠化の進行が懸念されている。しかし現状ではこの地域の熱・水循環の定量的な解析は十分でないために乾燥化の原因やメカニズムが明確には解明されておらず、正確かつ簡便な熱・水収支観測が必要とされている。

観測地はモンゴル国北東部の Kherlen 川流域にある Kherlenbayan Ulaan 村（北緯 47 度 10～13 分，東経 108 度 42～45 分；以下 KBU と略記）近傍の草原地帯で，2003 年 7～10 月に断続的に観測を行った。付近はほぼ水平な地形が広がる典型的な半乾燥地の草原地帯である。

3. 3. 2 シンチロメーターの観測概要

シンチロメーターの観測は，送信機を固定して，受信機を各パス長に応じて北東－南西方向に設置した。観測期間 2003 年の 7/19～7/22，7/26～7/28，7/30～8/2，8/18，8/19，8/22～8/24，9/22～9/24，9/30～10/4 の 21 日間（表 1）のうち，7/20 は顕熱フラックスの算定に使用する A1 サイトのデータが欠測のため，7/30 は他観測日と比較して，シンチロメーターの顕熱フラックスが大きい異常値であるため使用せず，7/28，7/31，8/1，8/2，8/19，8/22，8/23，8/24，9/30，10/1，10/2，10/3 の計 12 日分を解析に利用した。パスごとには 453m で 2 日間，1050m で 1 日，1500m で 5 日間，3000m での 4 日間の観測が行うことができた。ただし，3000m における 12 時前後の観測と 10/4，および 4570m における全観測では，大気の揺らぎ（Scintillation）が強すぎたため観測値が頭打ちとなり観測エラーとなった（図 3 参照）。よって 3000m における観測値は完全に信頼できる値とは言い切れないので参考値として扱い，4570m における観測値は今研究ではすべて除外した。

シンチロメーターの設置場所と地表面からの設置高度は各日で異なるので表 2 にまとめて記した。平均設置高度は，送信機は 254cm，受信機は 271cm であった。7 月～8 月は地表面は 20cm 程度の草の被覆があり，観測高度付近まで陽炎が目視できるほど大気擾乱が活発で，夕立や，日中でも雷雨が激しい日もあった。9，10 月の観測では地表面植生はほぼ枯れて茶色であった。

3. 3. 3 その他の使用データ

シンチロメーターによる顕熱フラックス H_{scin} を算定するために利用する気圧 P ，温度 T ，摩擦速度 u^* ，ボーエン比 β （または潜熱フラックス LE ）は，シンチロメーターの送信機に隣接する微気象観測サイト（A1 サイト）で 30 分毎に行なわれた常時観測から取得し， H_{scin} の計算に使用した。

また，2003/8/21，22，10/3，4 の 4 日間ではシンチロメーターの観測パスと近い航路で

航空機による地表面温度 T_s および NDVI の観測が行われたので、LAI 観測の結果とあわせて顕熱フラックスの空間分布に関する議論において使用した。

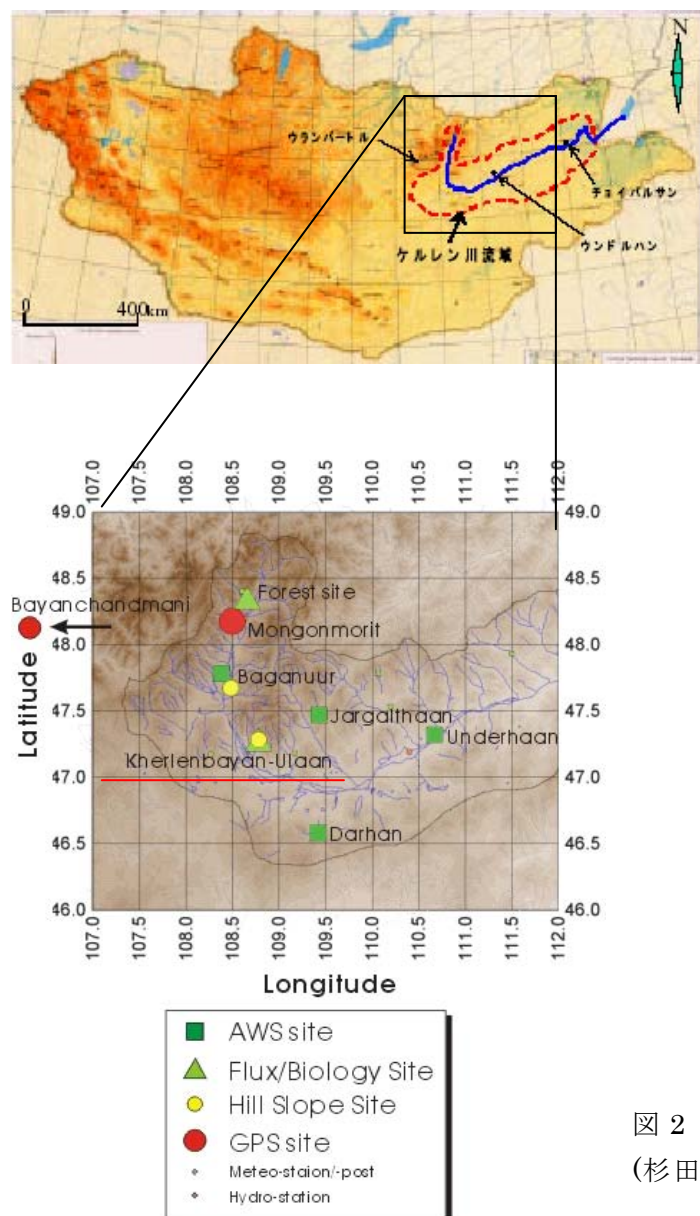


図2 2003年モンゴル観測対象地周辺図
(杉田 2003 より加筆引用)

表 1 2003 年モンゴル全観測パスと観測日一覧(解析に使用しない日も含む). 4570m のデータと 7/30, 10/4 は観測エラー(本文参照)なので解析には使用しない.

date (MM/DD/YY)	path (m)	備考
07/19/03	4570	エラー
07/20/03	453	
07/21/03	1000~4000	中間距離の観測適地探索
07/22/03	4570	エラー
07/26/03	4570	エラー
07/27/03	3001	
07/28/03	1505	
07/30/03	453	エラー
07/31/03	3006	
08/01/03	1505	
08/02/03	1050	
08/18/03	4570	エラー
08/19/03	3008	
08/22/03	1495	
08/23/03	3008	
08/24/03	453	
09/30/03	1490	
10/01/03	3004	
10/02/03	1490	
10/03/03	453	
10/04/03	3004	エラー

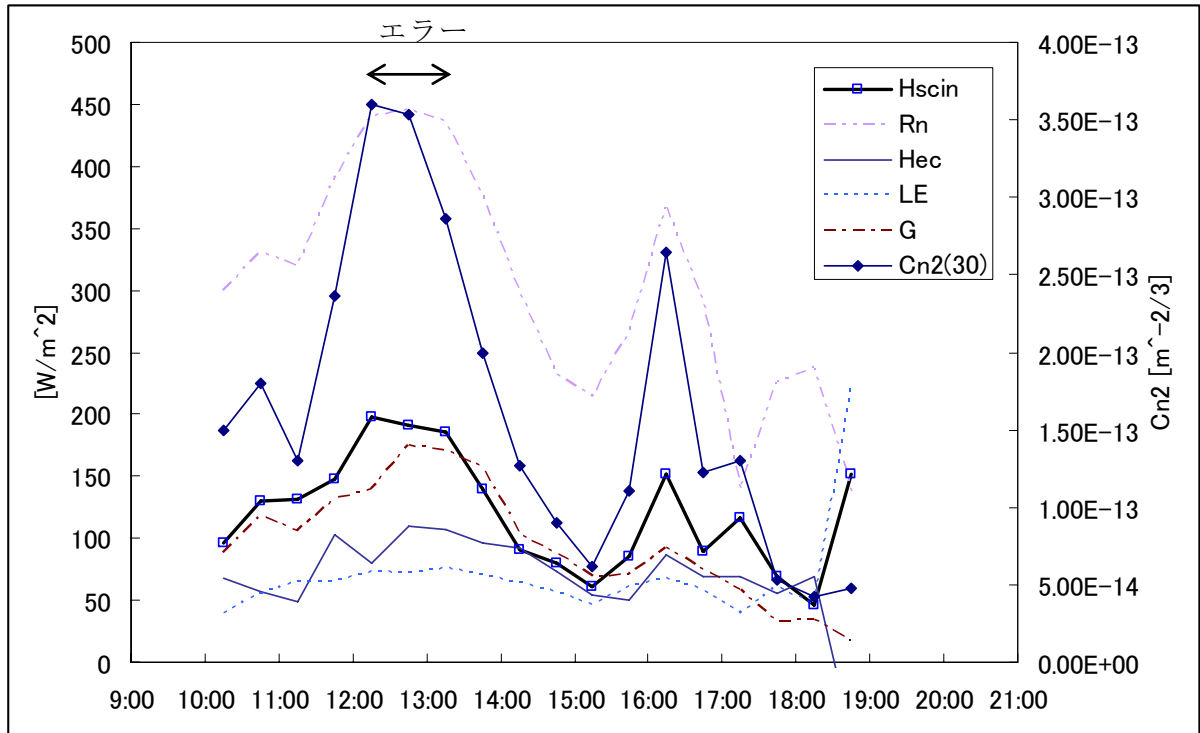


図 3 強い Scintillation のため観測エラーとなった例 (8/19). シンチロメーターはパス 3008m で観測したが，12～13 時の 1 時間は 20% がエラーデータであった．

表 2 解析に使用する全観測日時・パス長・地点・設置高度一覧

Transmitter						Receiver			
date (MM/DD/YY)	path (m)	time (JST)	latitude (deg° min'sec〃)	longitude (deg° min'sec〃)	height (cm)	latitude (deg° min'sec〃)	longitude (deg° min'sec〃)	height (cm)	
2002 琵琶湖									
11/19/02	1232	9:00-15:00	N35° 29'36.0〃	E136° 13'51.0〃	751	N35° 28'57.0〃	E136° 14'07.8〃	670	
11/20/02	1232	11:00-16:00	N35° 29'36.0〃	E136° 13'51.0〃	751	N35° 28'57.0〃	E136° 14'07.8〃	670	
2003 モンゴル									
07/28/03	1505	11:00-19:30	N 47° 12'05.5〃	E108° 40'47.6〃	251	N 47° 12'26.7〃	E108° 43'12.1〃	263	
07/31/03	3006	14:00-20:00	N 47° 12'05.5〃	E108° 40'47.6〃	251	N 47° 11'59.5〃	E108° 42'12.8〃	270	
08/01/03	1505	11:00-20:00	N 47° 12'05.5〃	E108° 40'47.6〃	251	N 47° 12'26.7〃	E108° 43'12.1〃	269	
08/02/03	1050	10:00-20:00	N 47° 12'05.5〃	E108° 40'47.6〃	251	N 47° 12'32.7〃	E108° 43'32.0〃	270	
08/19/03	3008	10:00-19:00	N 47° 12'05.5〃	E108° 40'47.6〃	255	N 47° 11'59.5〃	E108° 42'12.7〃	270	
08/22/03	1495	11:30-19:30	N 47° 12'05.5〃	E108° 40'47.6〃	255	N 47° 12'27.0〃	E108° 43'12.4〃	277	
08/23/03	3008	10:30-19:00	N 47° 12'05.5〃	E108° 40'47.6〃	255	N 47° 11'59.5〃	E108° 42'12.7〃	274	
08/24/03	453	12:00-15:00	N 47° 12'05.5〃	E108° 40'47.6〃	255	N 47° 12'38.9〃	E108° 44'01.4〃	282	
09/30/03	1490	12:00-19:00	N 47° 12'05.5〃	E108° 40'47.6〃	257	N 47° 12'26.8〃	E108° 43'12.8〃	269	
10/01/03	3004	10:00-19:00	N 47° 12'05.5〃	E108° 40'47.6〃	257	N 47° 12'00.0〃	E108° 42'12.5〃	273	
10/02/03	1490	11:00-19:00	N 47° 12'05.5〃	E108° 40'47.6〃	257	N 47° 12'26.8〃	E108° 43'12.8〃	271	
10/03/03	453	10:30-19:00	N 47° 12'05.5〃	E108° 40'47.6〃	257	N 47° 12'00.0〃	E108° 42'12.5〃	260	

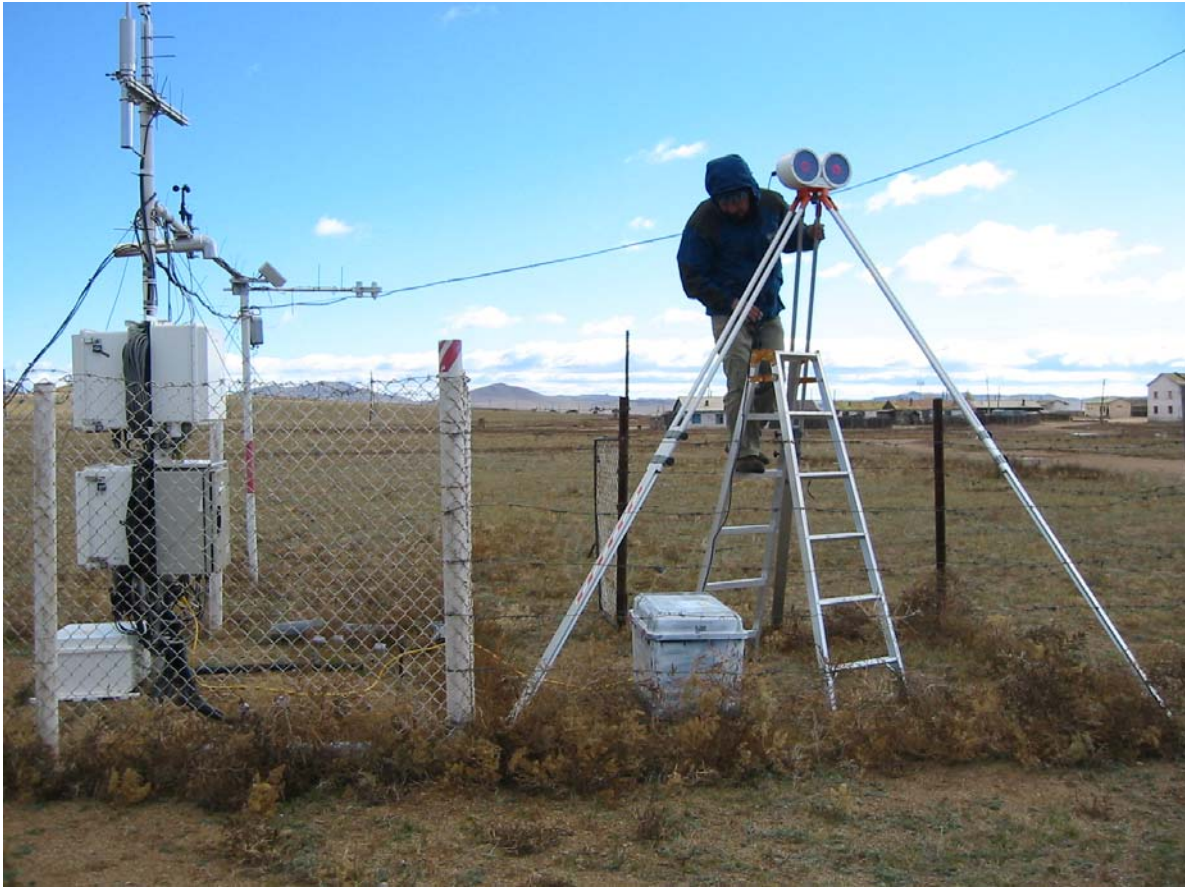


図 4 A1 サイト(左)とシンチロメーターの送信機(右). 右手奥の建物群は KBU 村.
(2003/9/30 撮影)

(a)



図 5(a) シンチロメーターの受信機付近の様子．ただし 2003/7/23 撮影．

(b)

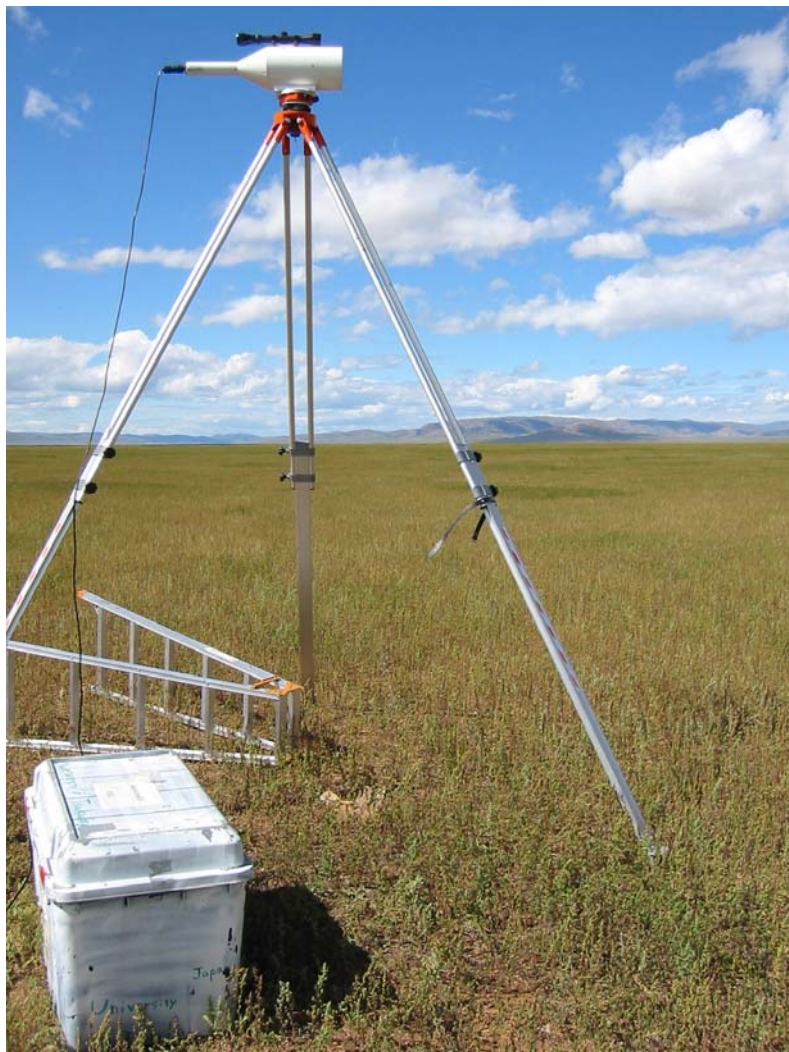


図 5(b) 図 5(a)に同じ. ただし 2003/8/23 撮影.

(c)



図 5(c) 図 5(a)に同じ. ただし 2003/10/1 撮影.

4 章 顕熱フラックスの算定に関する結果・考察

4. 1 3種の温度の無次元関数を用いた顕熱フラックスの比較

温度の構造パラメータ C_T^2 の無次元関数 Φ_{CT} (以下、温度の無次元化構造パラメータと呼ぶ) はこれまで複数提案されているが、よく用いられるものとして、主に次の3種類が挙げられる。

1) Wyngaard et al. (1971) によると

$$\Phi_{CT}(\zeta) = 4.9(1 - 6.1\zeta)^{-2/3} \quad (8.a)$$

2) Kader(1992)によると

$$\Phi_{CT}(\zeta) = 5.9\Phi_{\varepsilon\theta}\Phi_{\varepsilon}^{-1/3} \quad (8.b)$$

$$\text{ここで、}\Phi_{\varepsilon}(\xi) = \frac{4 - 3\xi + 2.5\xi^2}{4 - 2.5\xi}, \quad \Phi_{\varepsilon\theta}(\zeta) = 0.4 \left[\frac{10 - 7.5\zeta + 6.25\zeta^2}{1 + 125\zeta^2 - 78.125\zeta^3} \right]^{1/3}$$

3) Thiermann & Grassl (1992)によると

$$\Phi_{CT}(\zeta) = 6.3(1 - 7\zeta + 75\zeta^2)^{-1/3} \quad (8.c)$$

いずれも不安定条件 ($\zeta < 0$) に対するもので、これらの関数形は図 6 に示した。

(8.a)～(8.c)式の3種の温度の無次元化構造パラメータ Φ_{CT} を用いてそれぞれ顕熱フラックス H を算定し、相互に比較した(図 7(a), (b)). (8.a)～(8.c)式の3種の Φ_{CT} による H を、それぞれ $H_{scin}(W)$, $H_{scin}(K)$, $H_{scin}(T\&G)$ と表すと、ほぼ全日で $H_{scin}(T\&G) < H_{scin}(W) < H_{scin}(K)$ という傾向を示し、用いる Φ_{CT} の違いだけで最大で約 100W/m^2 の顕熱フラックスの違いが見られた。

3種の Φ_{CT} のうち、(8.a)式(Wyngaard et al., 1971) と(8.b)式(Kader, 1992)は渦相関法、(8.c)式(Thiermann & Grassl, 1992)はシンチロメーター法の観測データによって決定された Φ_{CT} なので、以後は本研究と同手法である Thiermann & Grassl (1992)の (8.c) 式による顕熱フラックス $H_{scin}(T\&G)$ をシンチロメーター法による顕熱フラックスとする。

$$H_{scin}(T\&G) = H_{scin} \quad (9)$$

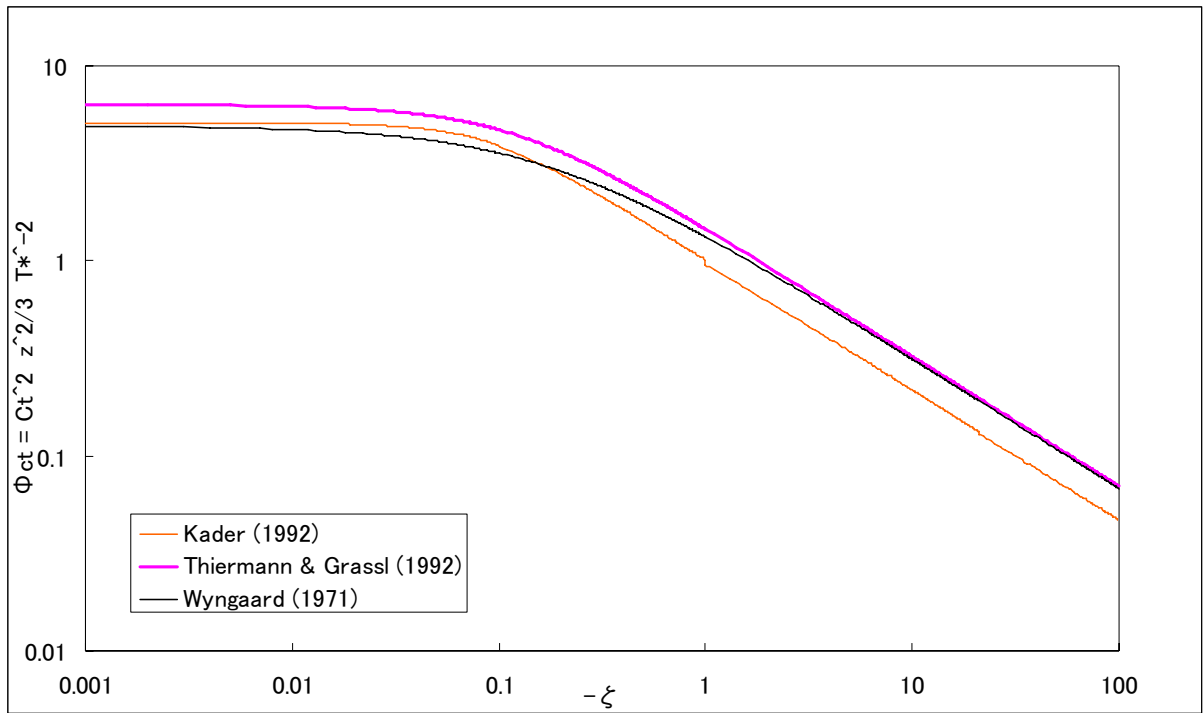


図 6 3種の温度の無次元化構造パラメータ Φ_{CT}

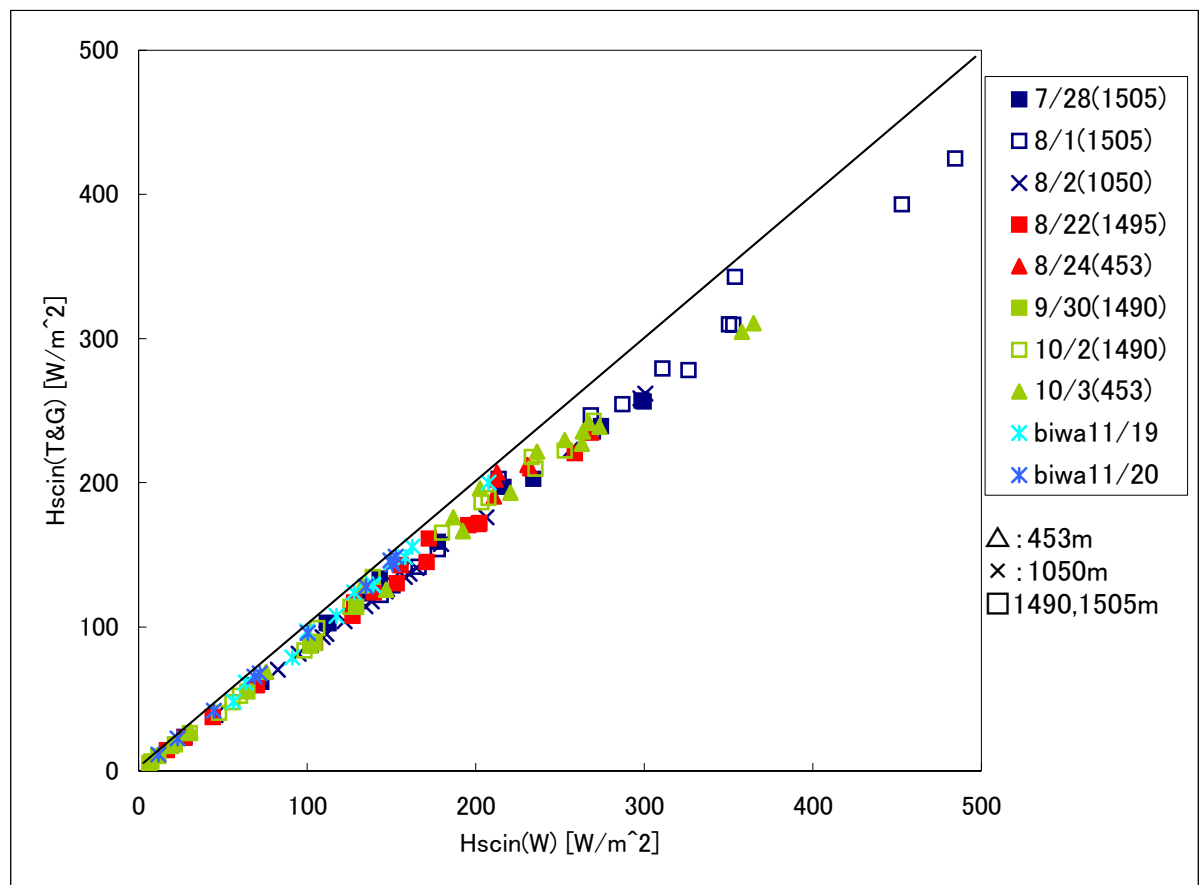


図 7(a) 使用した Φ_{CT} の違いによる顕熱フラックスの比較 ($H_{scin}(W)$ と $H_{scin}(T\&G)$)

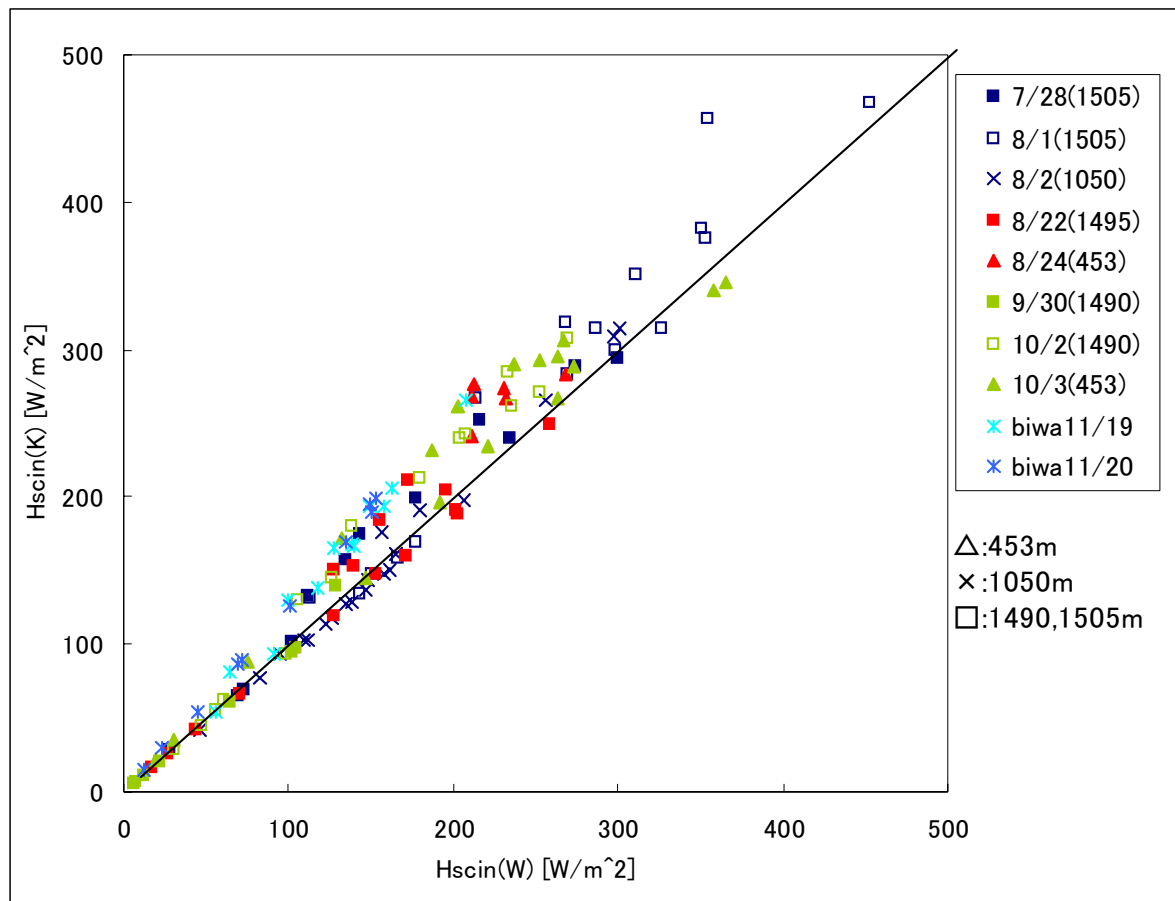


図 7(b) 図 7(a)に同じ。ただし、 $H_{scin}(W)$ と $H_{scin}(K)$ について。

4. 2 使用データに対する感度実験

シンチロメーターが直線上の観測であるのに対し、顕熱フラックスを算定する過程で用いられる各微気象観測は地点観測なので、データの観測誤差のみならず地点代表性の問題があるので、最終出力値である顕熱フラックスの値にどの程度の影響がでるかについて調べるために、気圧 P 、気温 T 、摩擦速度 u^* についてそれぞれ感度実験を行った。

その方法は、 P 、 T 、 u^* の観測値を $\pm 10\%$ (ただし気圧はあまり変化しないので $\pm 1\%$) 変化させてそれ以外の計算過程は共通にして顕熱フラックスを算定し、それらを、 $H(P+)$ 、 $H(P-)$ 、 $H(T+)$ 、 $H(T-)$ 、 $H(u^*+)$ 、 $H(u^*-)$ と表し、これらをもとの顕熱フラックス H_{scin} と比較した(表 3)。

P 、 T については各日とも $\pm 1.2 \sim 1.3\%$ (ただし琵琶湖の $H(P+)$ 11/19 のみ -9.5%) の影響であったが、 u^* はおよそ $\pm 5\%$ の影響が見られた。したがって、どの要素とも、使用する観測値について慎重な扱いや厳密な議論をする必要はなく、出力値である顕熱フラックスの値に対し大きな影響は与えないといえる。

表 3 P, T, u^* による顕熱フラックスHの感度実験結果. H_{scin} はもとの顕熱フラックス, $H()$ は, ()内の+は+10%, -は-10% (Pのみ $\pm 1\%$) 変化させたP, T, u^* を用いて算定した顕熱フラックスのことを示す.

date (path length)	H(P+)/ H_{scin}	H(T+)/ H_{scin}	H(u^* +)/ H_{scin}	H(P-)/ H_{scin}	H(T-)/ H_{scin}	H(u^*-)/ H_{scin}
2002 琵琶湖						
11/19(1232)	0.905	1.009	1.014	1.015	0.991	0.996
11/20(1232)	0.985	1.010	1.004	1.015	0.990	0.997
2003 モンゴル						
7/28(1505)	0.987	1.020	1.043	1.013	0.980	0.960
8/1(1505)	0.988	1.015	1.052	1.013	0.985	0.951
8/2(1050)	0.988	1.015	1.068	1.012	0.985	0.935
8/22(1495)	0.988	1.016	1.064	1.012	0.984	0.939
8/24(453)	0.986	1.016	1.027	1.014	0.984	0.975
9/30(1490)	0.989	1.005	1.082	1.011	0.995	0.920
10/2(1490)	0.987	1.005	1.047	1.013	0.995	0.956
10/3(453)	0.987	1.005	1.041	1.013	0.995	0.963
average	0.979	1.012	1.044	1.013	0.989	0.959

4. 3 平均化時間の影響

本研究では、1分観測値の Cn^2 を30分平均化し、この30分平均の Cn^2 を用いて顕熱フラックス H_{scin} を算定するが、顕熱フラックスは大気乱流という時間変動の激しい現象が元になっているので、顕熱の算定過程における平均化時間の違いが影響を及ぼす可能性がある。そこで、以下のチャートのように、 Cn^2 の平均時間を5分に変えて、これを用いて5分平均の顕熱フラックスを算定してから30分平均値($H(5,30)$)にして、もとの H_{scin} と比較した。

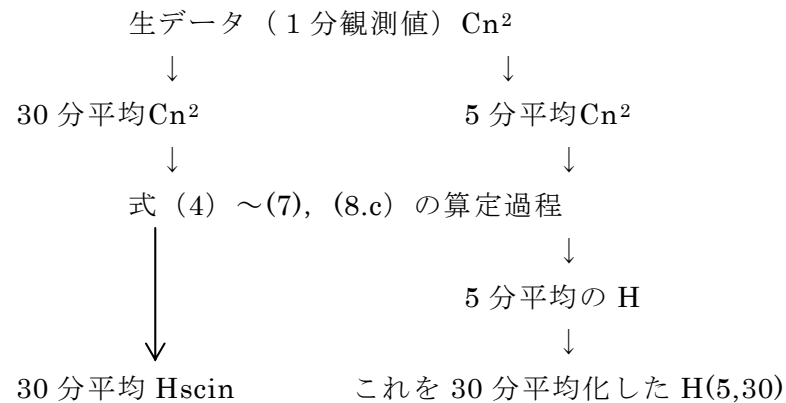


表4, 図8から、 $H(5,30)/H_{scin}$ は最大で3%, 平均1.1%となり、平均化時間の影響はほとんど見られなかった。したがって、5分毎の細かいデータを扱う必要はなく、30分平均値で十分であると判断した。

表 4 平均化時間の影響(観測日毎)

date (path length)	H(5,30)/Hscin
2002 琵琶湖	
11/19(1232)	0.9934
11/20(1232)	0.9920
2003 モンゴル	
7/28(1505)	0.9978
8/1(1505)	0.9948
8/2(1050)	0.9810
8/22(1495)	0.9927
8/24(453)	1.0017
9/30(1490)	0.9692
10/2(1490)	0.9766
10/3(453)	0.9949
average	0.9894

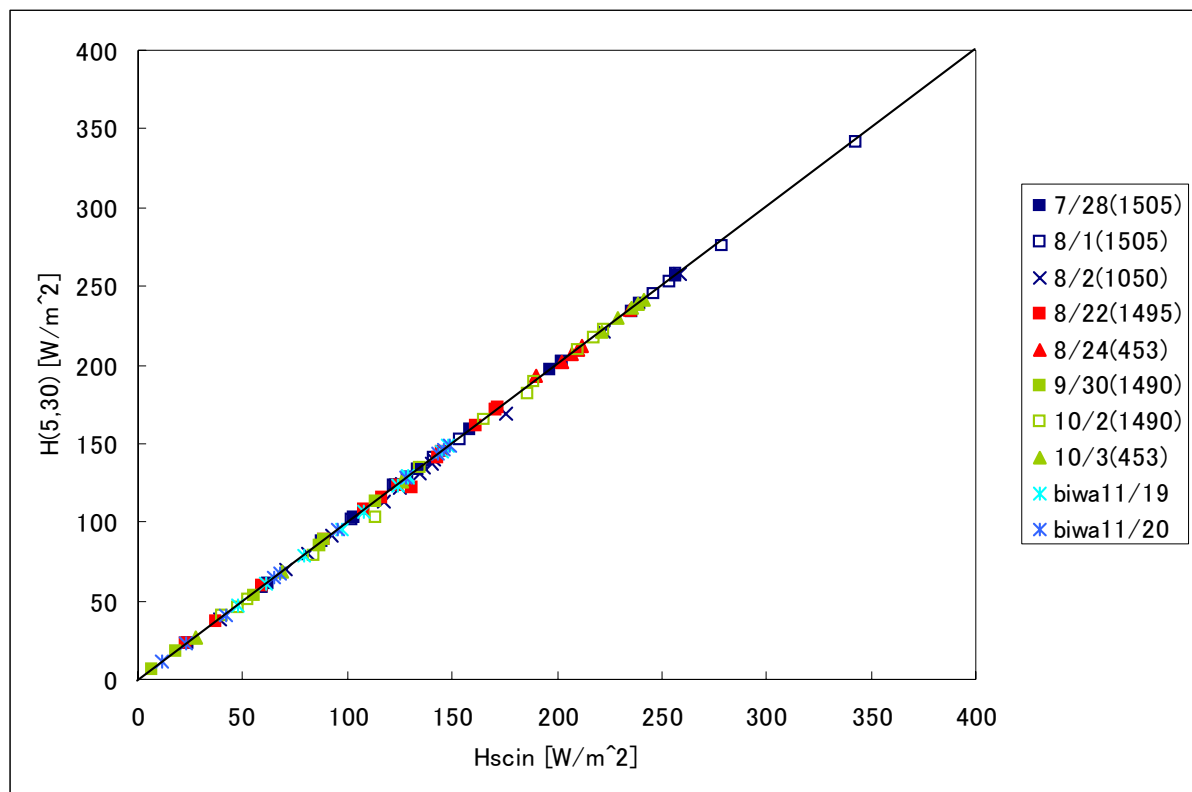


図 8 平均化時間の影響

4. 4 渦相関法との比較

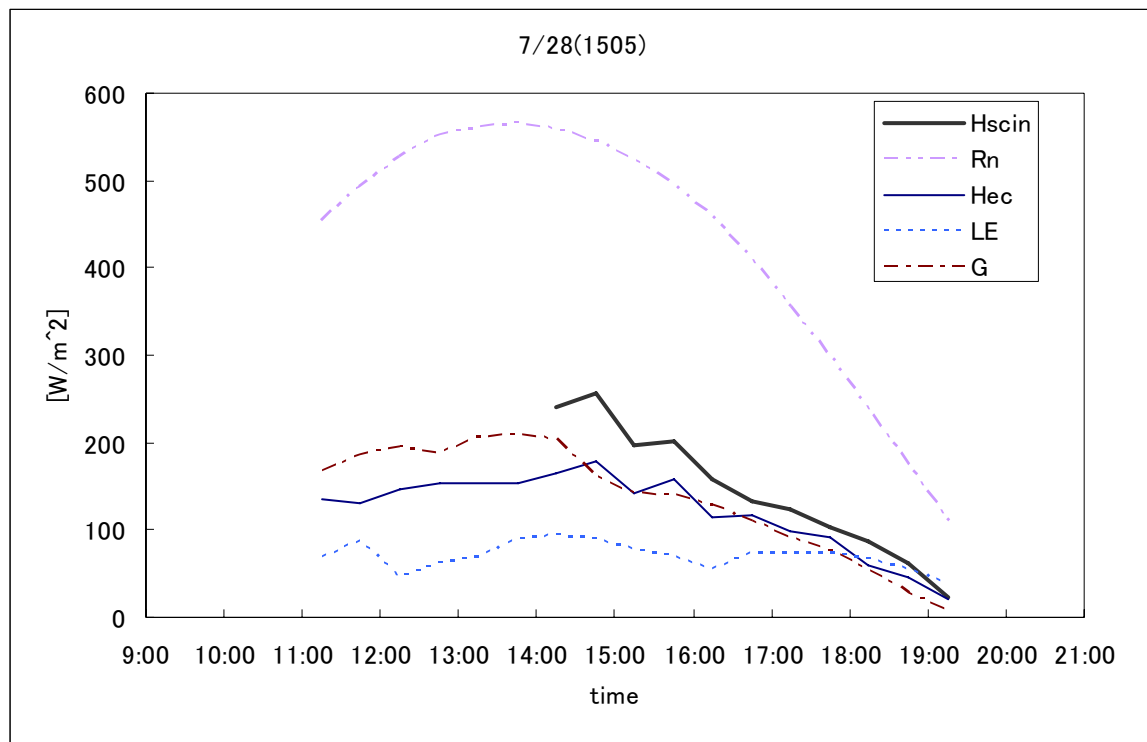
2003年モンゴル観測ではシンチロメーターの送信機とほぼ同地点のA1サイトにおいて渦相関法を中心とするタワーでの地表面フラックス観測も行われた(図9(a)~(h)). シンチロメーター法の結果 H_{scin} と渦相関法の結果 H_{ec} , R_n は時間変化の傾向がよく一致した.

また, シンチロメーター法と渦相関法ではフットプリントが異なり, その大きさ, 位置は主に風向と安定度に依存するため, H_{ec} と H_{scin} を風向 WD, 安定度と別にそれぞれ比較した(図 10, 11). 風向, 安定度ともに顕著な方向性や偏りは見られず, いずれの日も H_{scin}/H_{ec} は約 1.5 であったことから, H_{ec} と H_{scin} の値の違いは 2 手法のフットプリントの違いによるものではないことがわかった.

また, 観測パスが長いほど両者の比 H_{scin}/H_{ec} は小さくなる傾向がみられた(図 12). この原因は, 使用した大口径シンチロメーターの測器の問題でパスが短いと H_{scin} が過大評価となるのか, または今観測対象域は広範囲になるにしたがって相対的に顕熱フラックスが小さくなるという空間的な熱分布をしているためかのどちらかであると考えられるので, これについては 5 章で議論する.

シンチロメーターによる観測は 3004, 3006, 3008, 4570m でも計 9 日間行ったが, 前述の通り大気の揺らぎが大きすぎるためと思われる観測エラーが発生しており, 今回のモンゴル観測のような大気乱流の活発な観測条件下では 3000m 未満のパスが限界と推測され, より長距離のパスで計測するためには, 観測高度を高くして予想される顕熱フラックスの絶対値を低くするといった工夫が必要であるといえる.

(a)



(b)

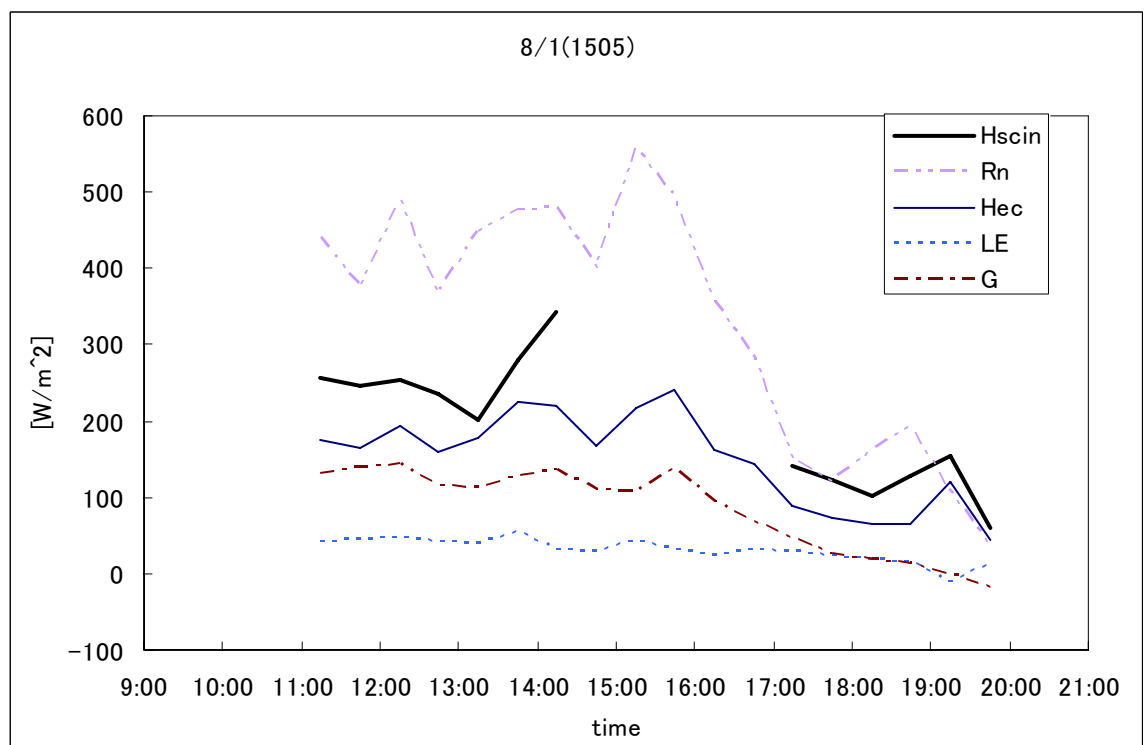
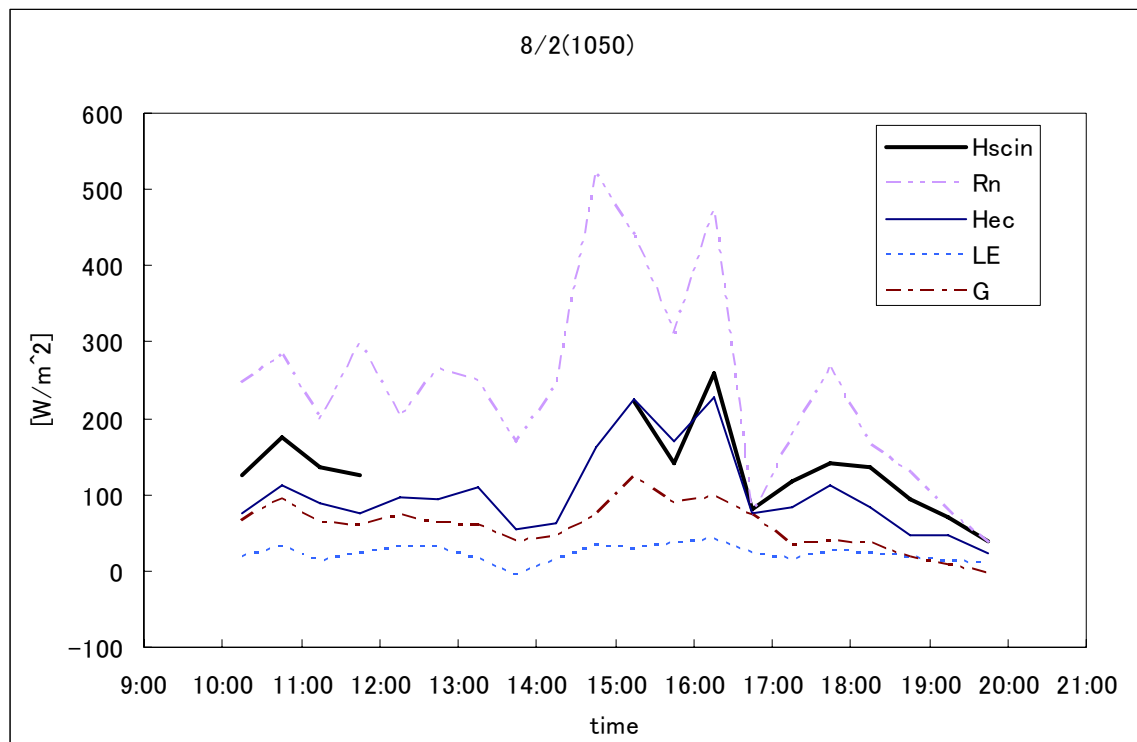


図 9(a), (b) 2003 年モンゴル観測における各日の地表面フラックス. 図中の Hscin : シンチロメーターによる顕熱フラックス, Rn : 正味放射量, Hec, LE : 渦相関法による顕熱, 潜熱フラックス, G : 地中熱流量.

(c)



(d)

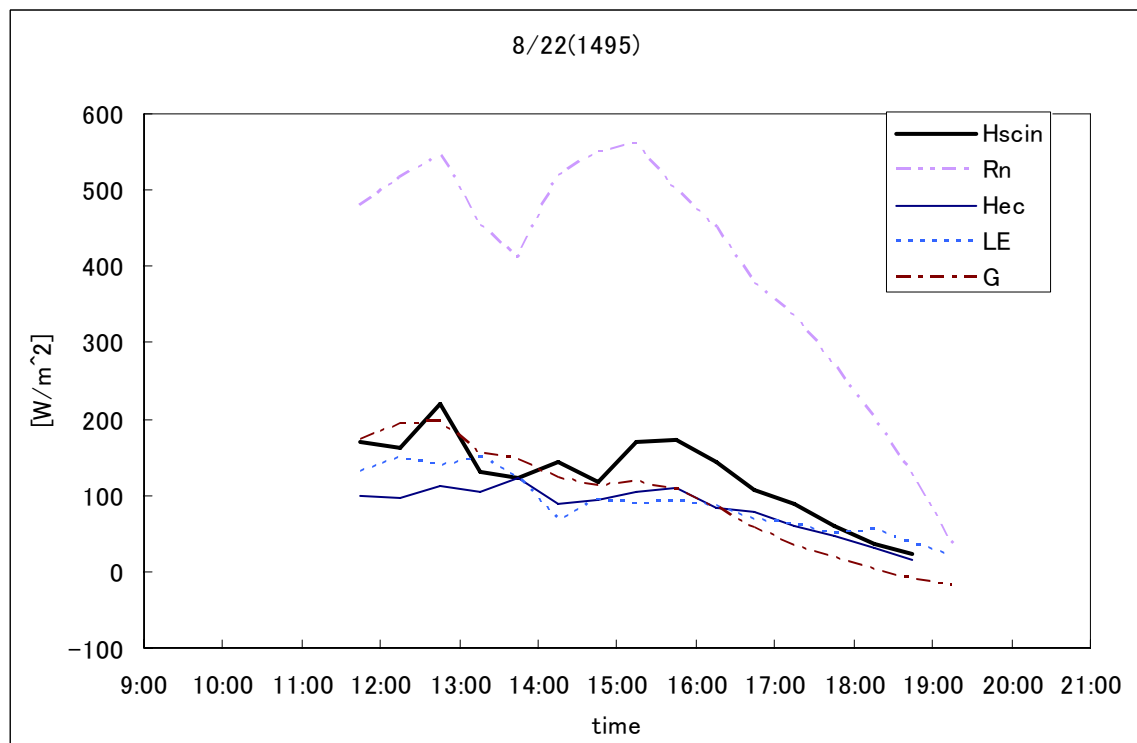
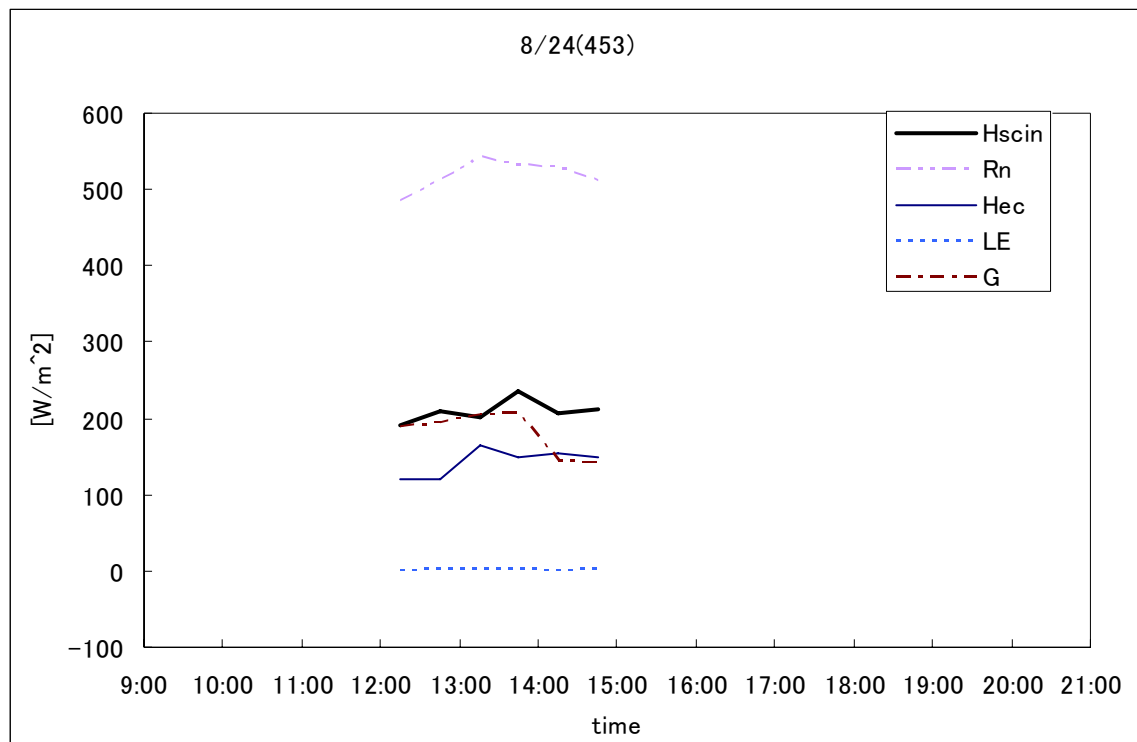


図 9(c), (d) 図 9(a), (b)に同じ. ただし 8/2, 8/22 について.

(e)



(f)

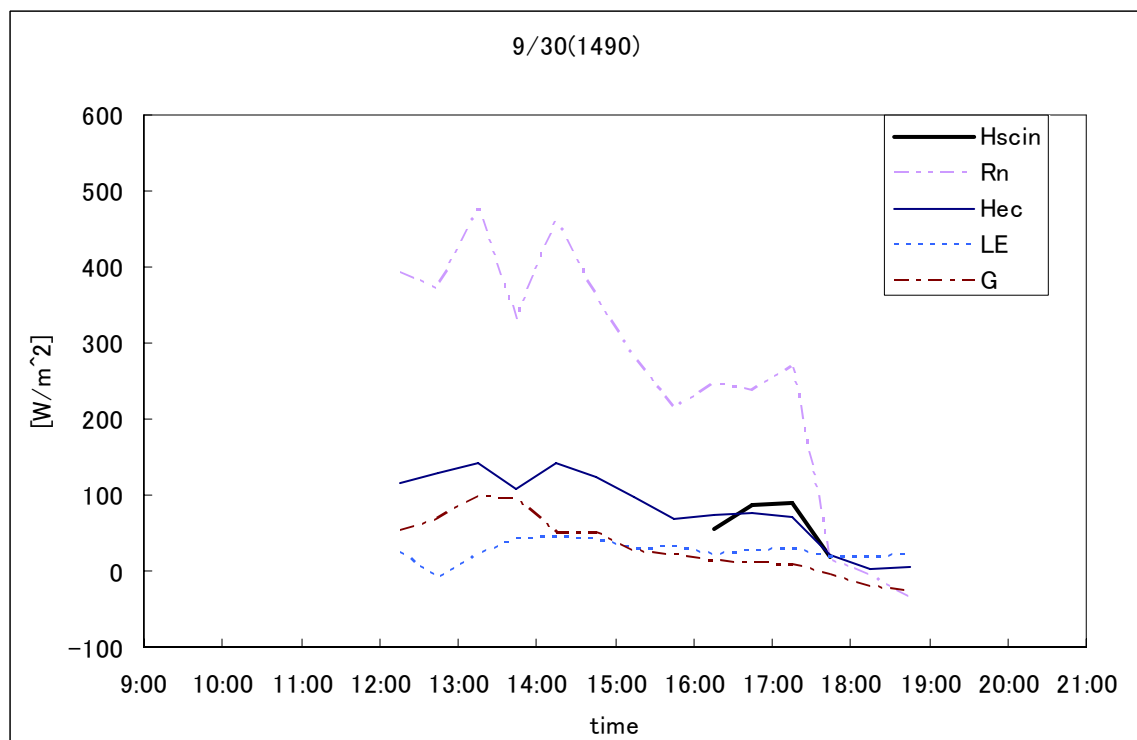
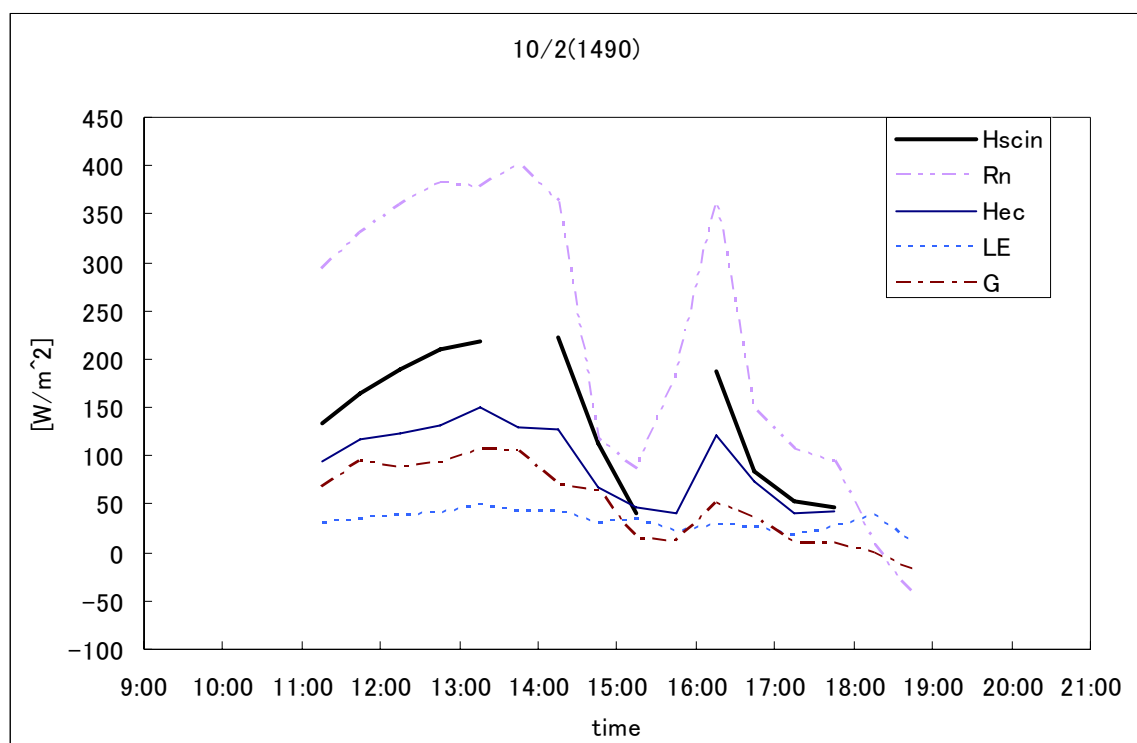


図 9(e), (f) 図 9(a), (b)に同じ。ただし 8/24, 9/30 について。

(g)



(h)

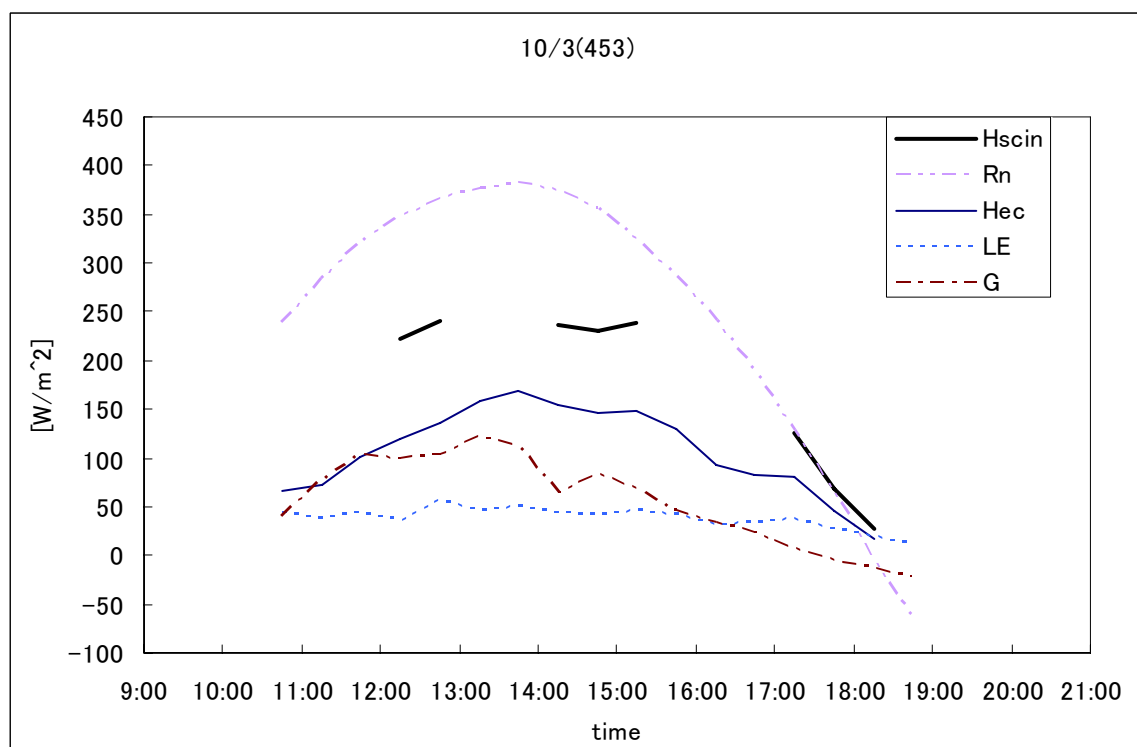


図 9(g), (h) 図 9(a), (b)に同じ. ただし 10/2, 10/3 について.

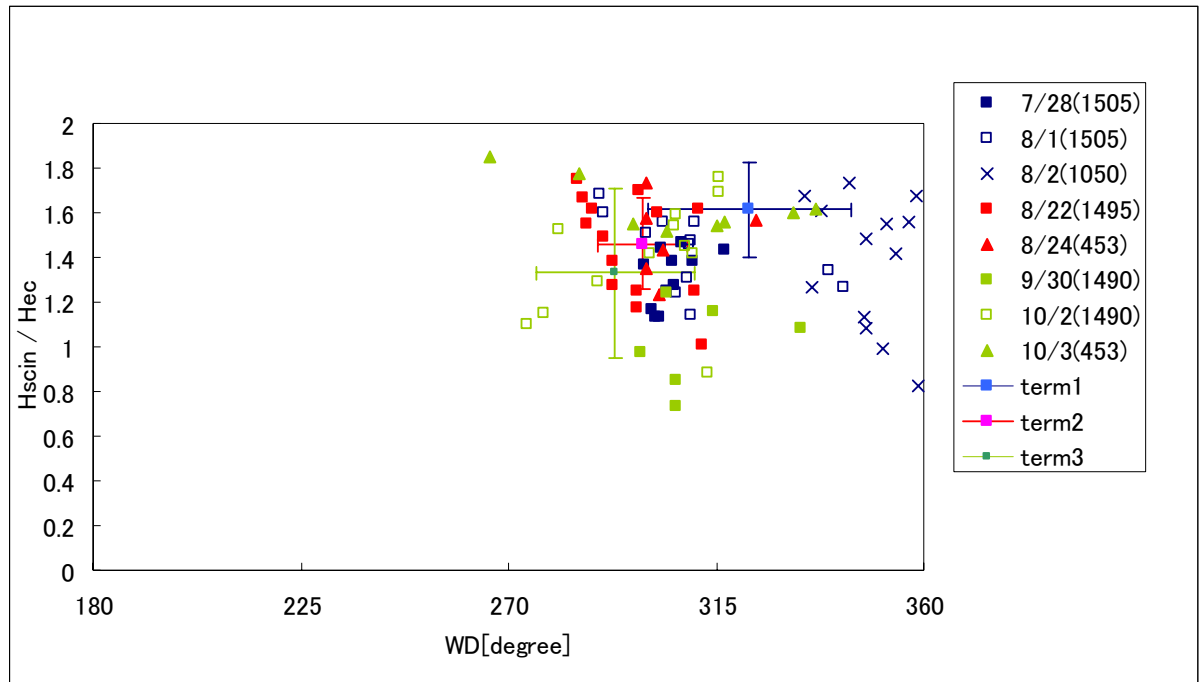


図 10 H_{scin}/H_{ec} の風向に対する依存関係 (2003 モンゴル観測分のみ). WD は風向, term 1 は 2003/7/28~8/2, term 2 は 2003/8/22~24, term 3 は 2003/9/30~10/3 で, バーは各期間中の平均値からの標準偏差を示す.

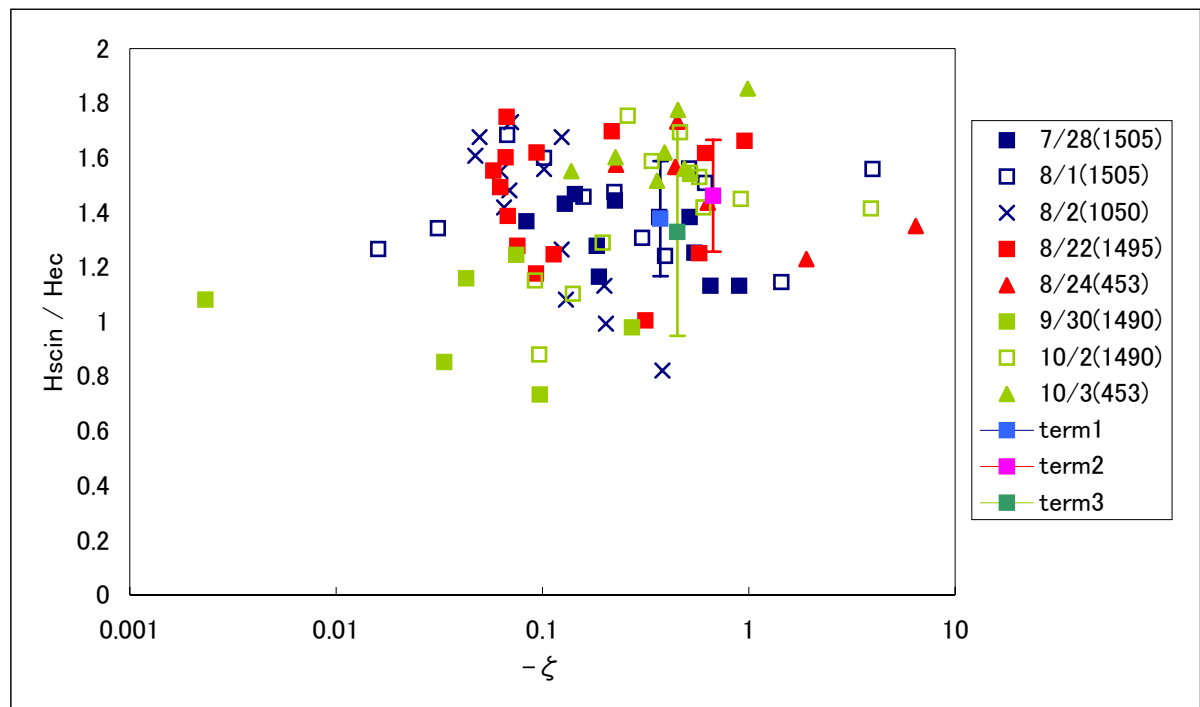


図 11 H_{scin}/H_{ec} の安定度に対する依存関係 (2003 モンゴル観測分のみ). term 1 は 2003/7/28~8/2, term 2 は 2003/8/22~24, term 3 は 2003/9/30~10/3 で, バーは各期間中の平均値からの標準偏差を示す.

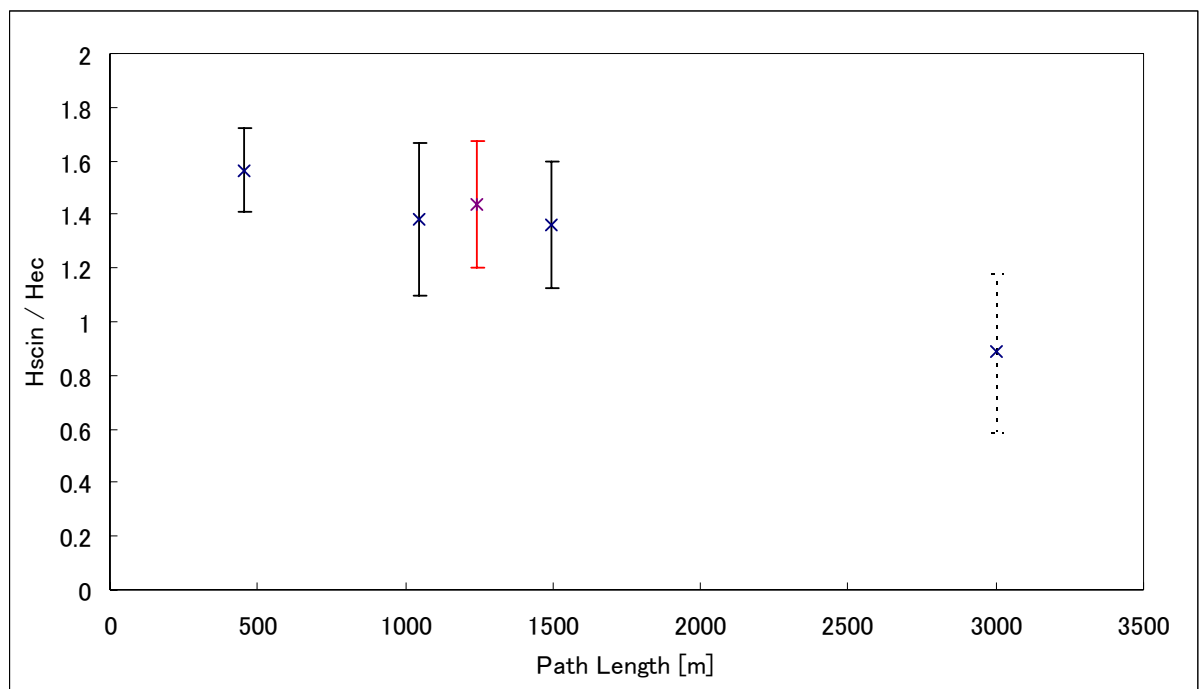


図 12 Hscin/Hec の観測パス長への依存関係．パス長は 2002 年琵琶湖観測では 1232m, 2003 年モンゴル観測では 453, 1050, 1490, 1505m (1490m と 1505m はあわせて表記), 3000m は参照値 (本文参照), バーは平均値からの標準偏差を示す．

4. 5 Energy Closure ratio について

渦相関法とシンチロメーター法による顕熱フラックスを，熱収支式が閉じるかという観点から議論するために，熱収支式の残差項 ε を以下のように定義し，渦相関法による残差項 ε_{ec} とシンチロメーター法による残差項 ε_{sc} で比較した(表 5, 図 13).

$$\varepsilon_{ec} = Rn - H_{ec} - LE - G \quad (10)$$

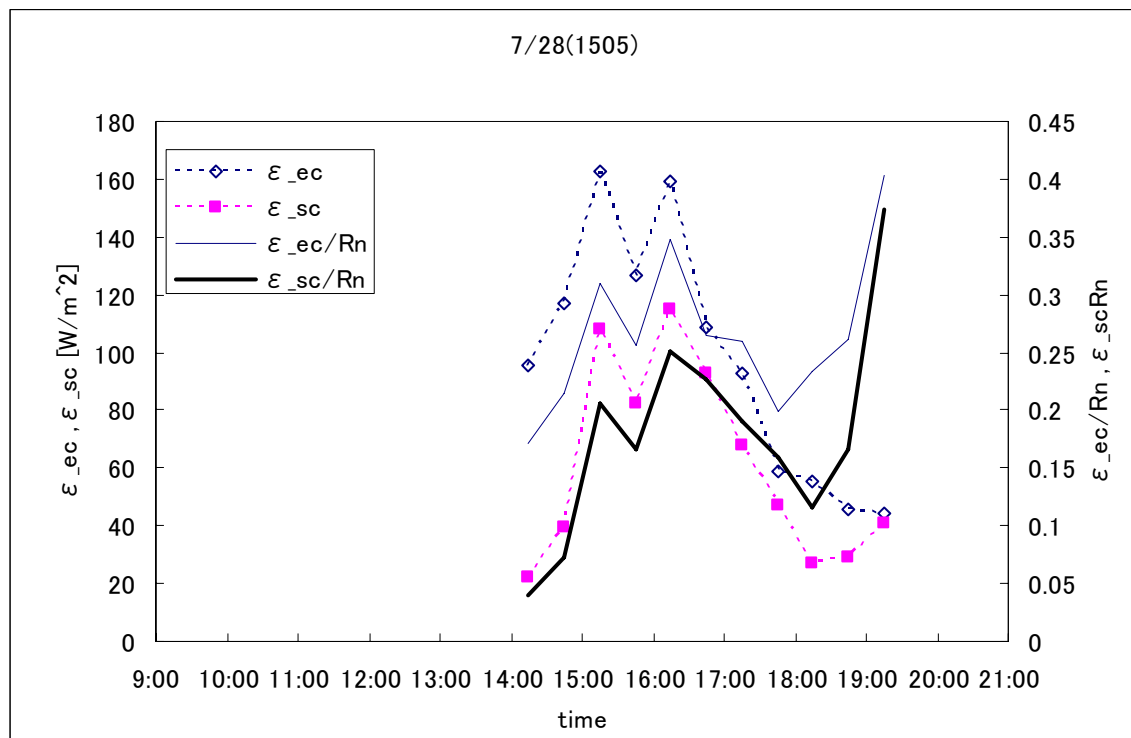
$$\varepsilon_{sc} = Rn - H_{sc} - LE - G \quad (11)$$

前節で述べた $H_{scin}/H_{ec} \simeq 1.5$ を反映して，ほぼ全日において $\varepsilon_{ec} > \varepsilon_{sc}$ となっており， H_{scin} が正確であれば渦相関法よりもシンチロメーター法のほうがより熱収支式が閉じやすい傾向があるといえる．

表 5 : 2003 年モンゴル観測における観測日毎の日平均 Energy Closure ratio

	ε_{ec} [W/m ²]	ε_{sc} [W/m ²]	ε_{ec}/R_n	ε_{sc}/R_n
7/28(1505)	96.9	61.1	0.2655	0.1787
8/1(1505)	49.1	-8.3	0.1165	-0.1214
8/2(1050)	43.7	15.1	0.0979	-0.0749
8/22(1495)	146.3	109.6	0.3886	0.3054
8/24(453)	195.0	128.4	0.3765	0.2475
9/30(1490)	94.2	93.5	0.2194	0.2585
10/2(1490)	65.8	21.7	0.1975	0.0426
10/3(453)	49.1	-18.3	0.7362	0.7132
average	87.7	45.7	0.2788	0.1593

(a)



(b)

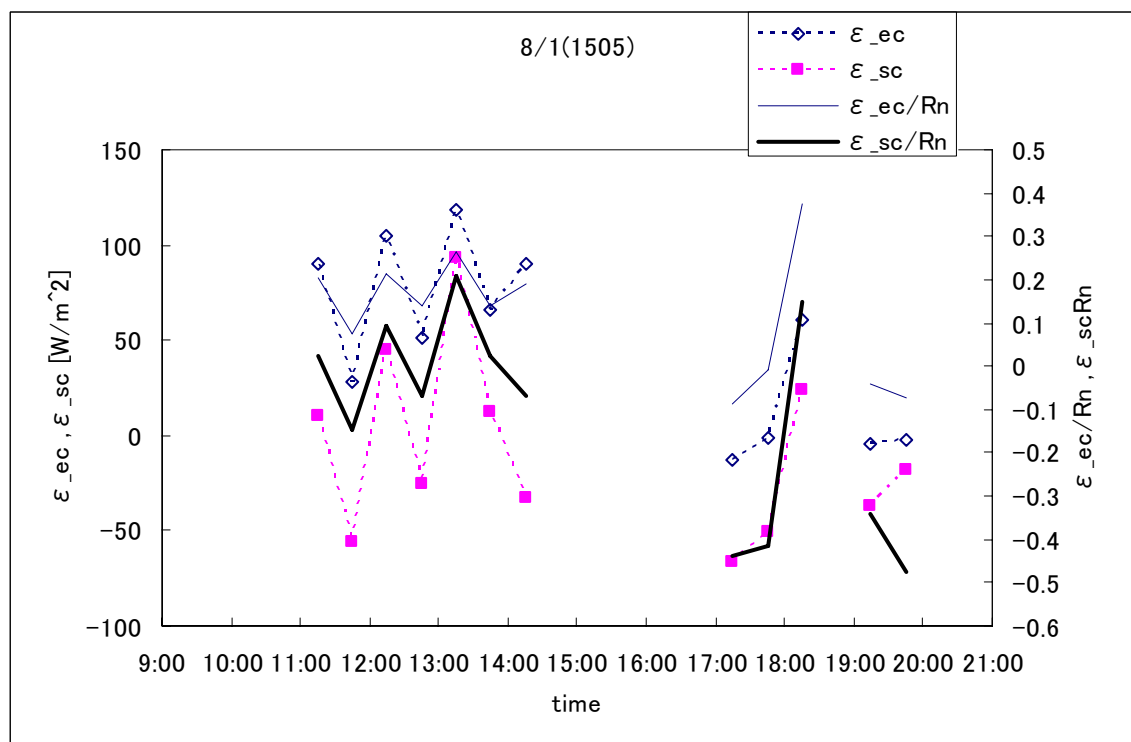
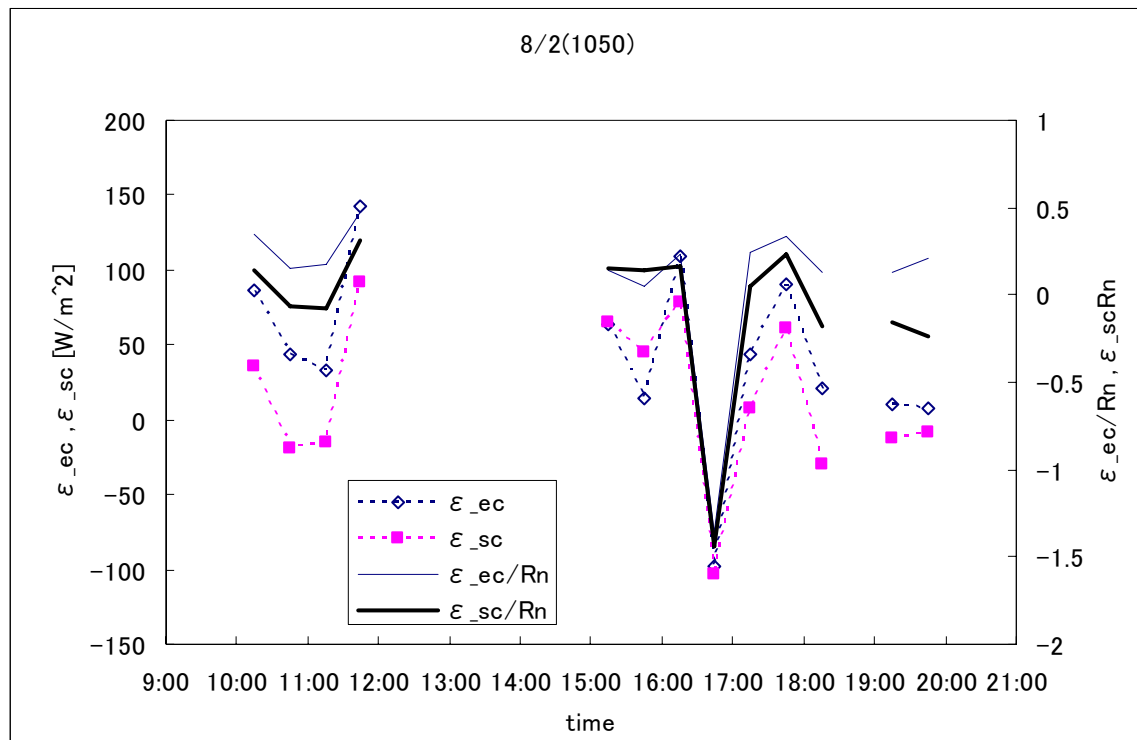


図 13(a), (b) 2003 モンゴル観測における Energy Closure ratio の時系列

(c)



(d)

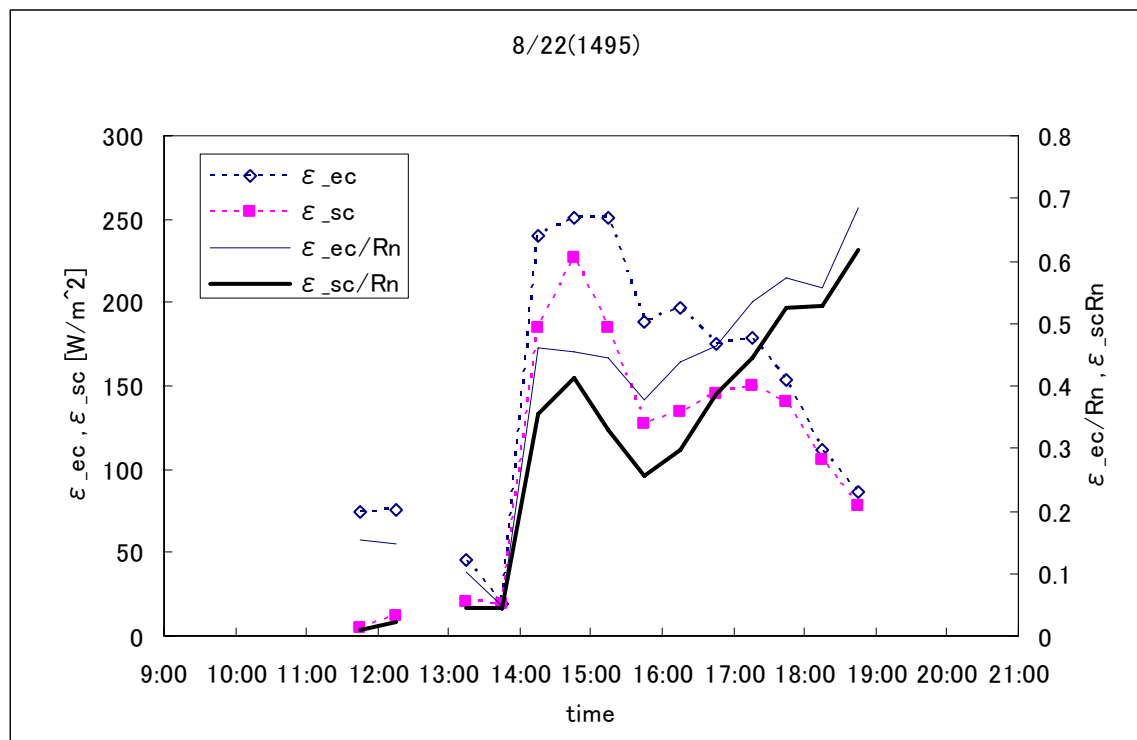
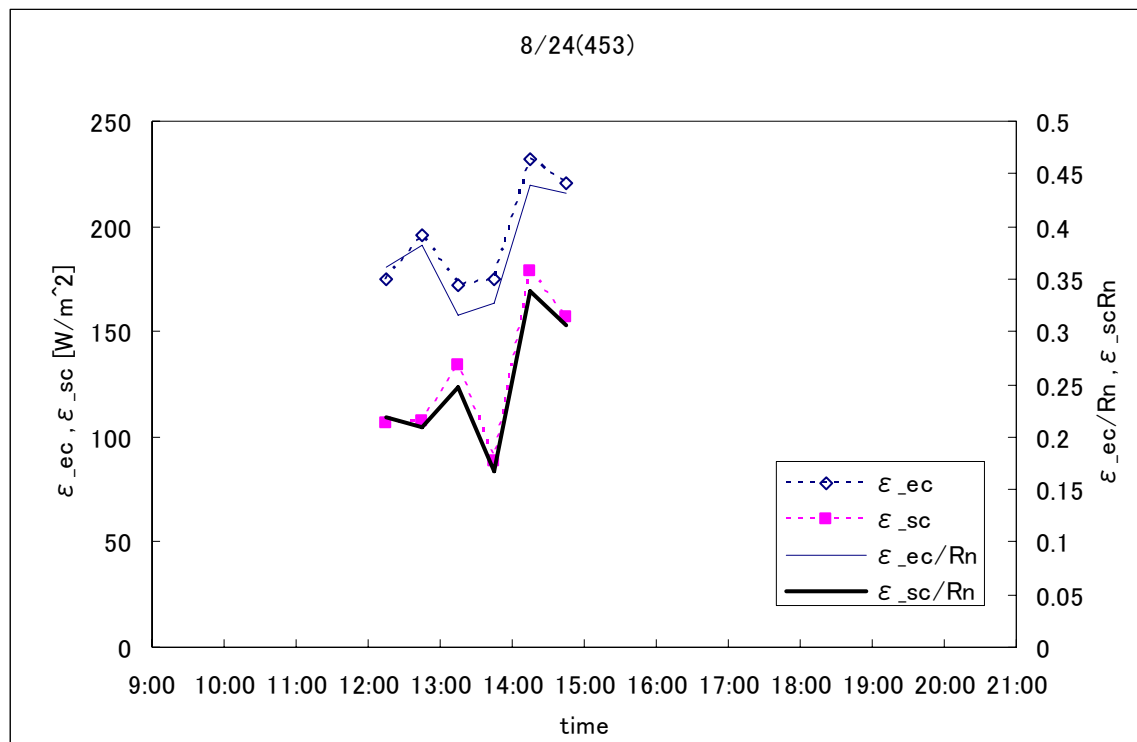


図 13(c), (d) 図 13(a), (b)に同じ. ただし 8/2, 8/22 について.

(e)



(f)

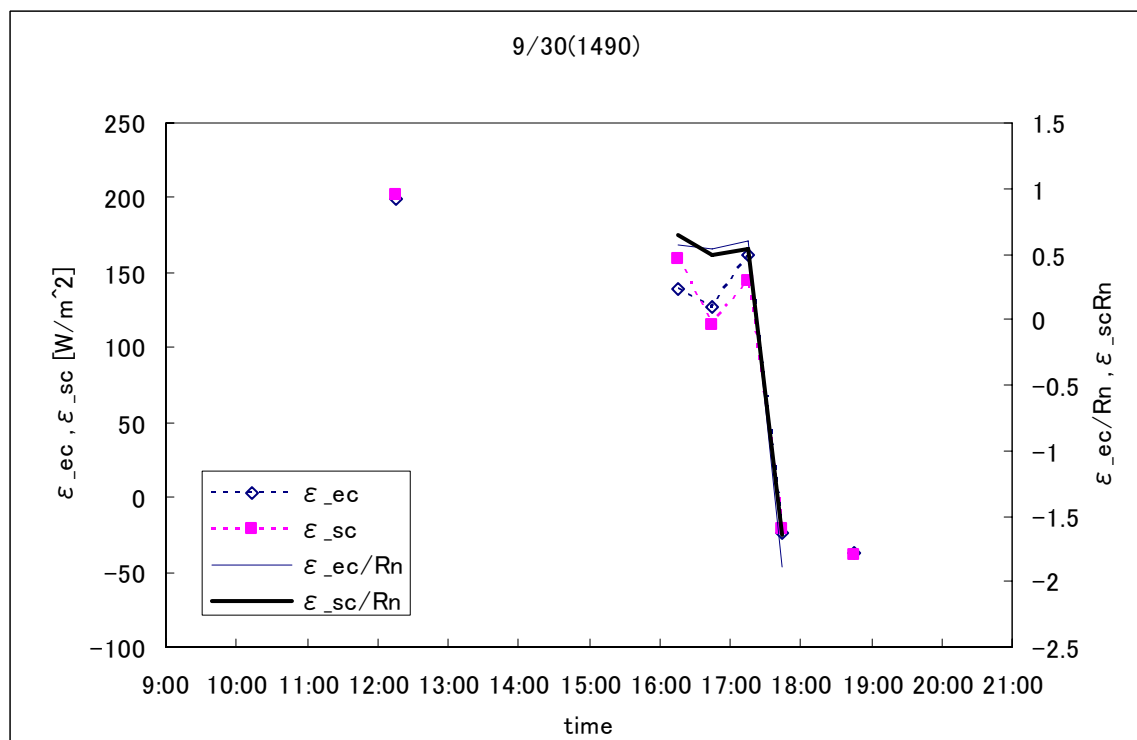
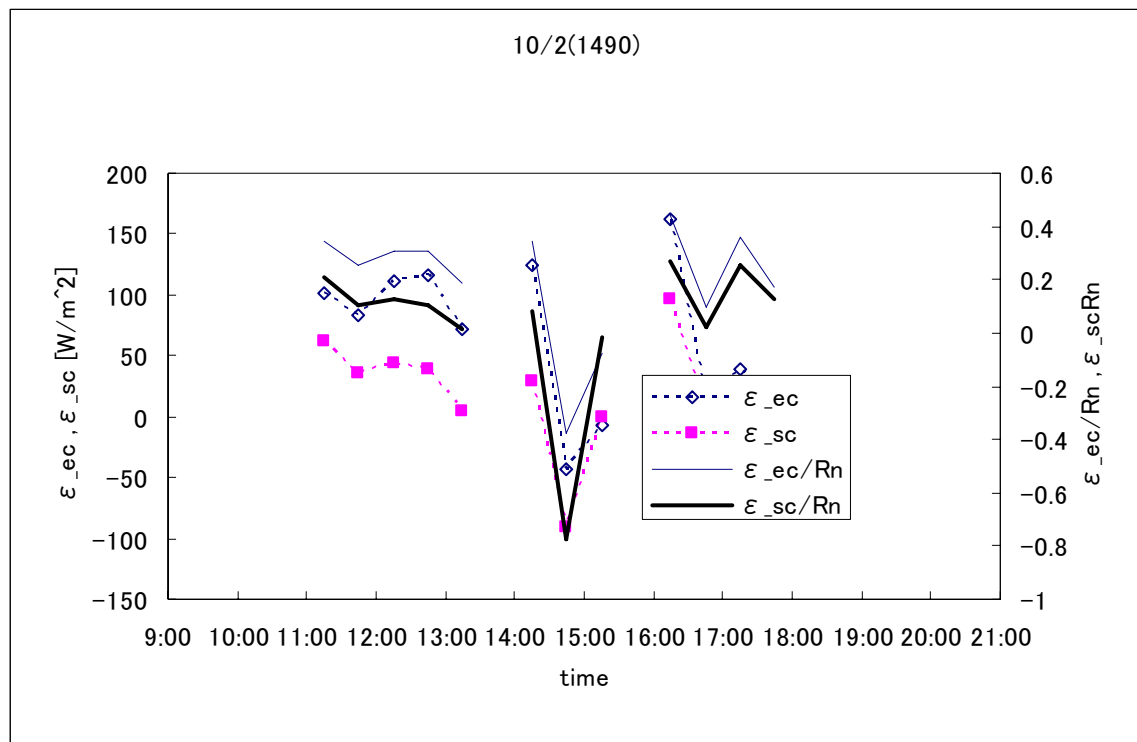


図 13(e), (f) 図 13(a), (b)に同じ。ただし 8/24, 9/30 について。

(g)



(h)

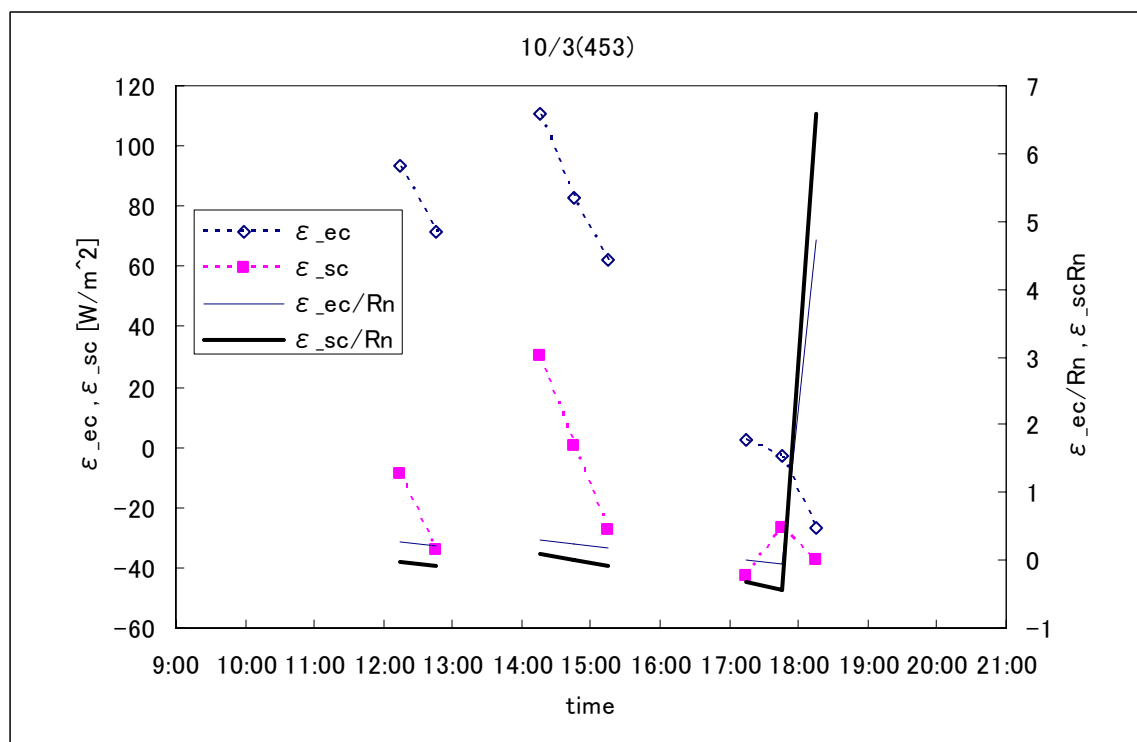


図 13(g), (h) 図 13(a), (b)に同じ. ただし 10/2, 10/3 について.

4. 6 まとめ

P, T, u^* における感度実験, 3種の Φ_{CT} による顕熱フラックスの相互比較より, シンチロメーターによる顕熱フラックスの算定は, 一般的に正確な観測が容易でない u^* の変動の影響はやや受けやすいものの無視できる範囲であるが, 使用する Φ_{CT} の関数形により顕熱フラックスは大きく値が変わる傾向が見られた.

また, シンチロメーター法による顕熱フラックスのほうが渦相関法のものよりも約 1.5 倍大きい値が得られ, シンチロメーターによる顕熱フラックスを渦相関法によるものと比較すると, 風向, 安定度には特に関係性が見られなかったので, 2 手法の顕熱フラックスの違いはフットプリントの違いによるものではないことが示された. また, シンチロメーター法のほうが渦相関法よりも熱収支式がより閉じやすい傾向が見られた.

シンチロメーターによる観測は最長パスで 4570mでも行なったが, 大気の揺らぎが大きすぎるためと思われる観測エラーが発生しており, 大気乱流が活発な今回のような観測条件下では 3000m 未満のパスが限界と推測された.

5 章 顕熱フラックスの空間分布に関する結果・考察

5.1 琵琶湖観測における検証

2002 年琵琶湖観測においてフットプリントの影響を調べるために、風向 WD について、シンチロメーターのパスに垂直な 2 方向と、平行な 2 方向に図 1 のように 4 分割して、風上側の SAT による顕熱フラックス Hec をシンチロメーターの顕熱フラックス Hscin と比較した。すなわち、図 1 において風向 WD が以下の 3 通りに分類できるので、Hscin と比較する Hec を、①のとき S3 サイト、②のとき S4 サイト、③のとき C4 サイトからそれぞれ取り出し、Hscin との比 $Hscin/Hec$ をとることで、2 手法の顕熱フラックスの違いと風向との関連性を調べた。

①西風よりのパスに垂直な風向； $199 < WD \leq 289$

②東風よりのパスに垂直な風向； $19 < WD \leq 109$

③北または南風よりのパスに平行な風向； $0 < WD \leq 19$ 、 $289 < WD \leq 360$ または $109 < WD \leq 199$

観測期間中はこの地方の卓越風である南南西の風向や北北西の風向が多く、したがってシンチロメーターのパスと平行に近い場合が多かったので、風向による $Hscin/Hec$ の違いはあまり見られず、シンチロメーター法と渦相関法のフットプリントの違いによる影響の有無は判断できなかった。

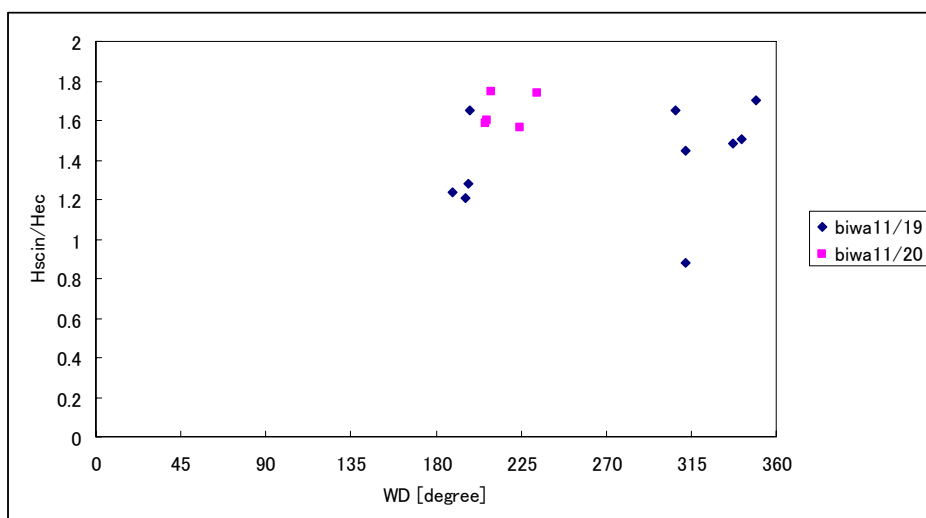


図 14 2002 年琵琶湖観測におけるフットプリントを考慮した Hscin/Hec

5.2 モンゴルにおける検証

4章ではシンチロメーター法による顕熱フラックス H_{scin} は観測パスが長いほど小さくなる傾向が見られたが、この理由が観測対象地特有の実際の顕熱フラックスの分布のためであるのか、それとも、シンチロメーターの測定上の問題であるのか、どちらであるか不明であるので、以下で 8/21, 8/22, 10/3, 10/4 に行なわれた航空機観測(航路は図 15 参照)の地表面温度と NDVI の結果と比較した。

航空機観測では地表面温度 T_s (図 16) を観測したので、これを用い以下のバルク式

$$H_{plane} = \rho C_p C_H U (T_s - T) \quad (12)$$

により航空機観測パス下の地表面における顕熱フラックス H_{plane} を算定した。その算定方法は、以下の通りである。

航空機の観測パスと微気象観測サイトの A1 サイトが最も近くなる時刻 t_a が各日に付き 1 回だけある。その時刻 t_a におけるバルク法による顕熱フラックス H_{plane} が A1 サイトの顕熱フラックス H_{ec} と等しいと仮定して、 T_s と A1 サイトの風向 U 、温度 T 、顕熱フラックス H_{ec} を用いてバルク係数 C_H を各日に付き 1 つずつ決定する。すなわち、時刻 t_a において

$$H_{plane}(t_a) = H_{ec}(t_a) = \rho C_p C_H U (T_s - T) \quad (13)$$

この C_H を各日ごとに用いてバルク式(12)より航空機観測パス下の地表面の顕熱フラックス H_{plane} を算定した(表 6, 図 17)。

また、2003 年 6 月～10 月に行なわれた地上 1.5m での三脚で固定した分光放射計を真下に向けた NDVI 観測結果と、同期間に行なわれた 50cm 四方の正方形区画内のすべての緑葉の面積をスキャナーで計測し緑葉面積の合計を対象区画の面積で割った LAI 観測の結果を、図 18 のように直線回帰した回帰係数(東北大学松島大氏より提供)を用いて、航空機観測の航路上の LAI を算定した(図 19(a), (b))。ここで、回帰係数は

$$LAI = 0.83NDVI - 0.07 \quad (14)$$

図 17 より 8 月、10 月ともに A1 サイトから(東から)西の方向に約 2000~3000m 付近で、バルク法による顕熱フラックス H_{plane} は低い傾向が見られた。また図 19(a)では同じ場所で NDVI, LAI が高い傾向が見られた。これは 2000~3000m に当る地帯が周囲の草原と異なり農地となっていたので、植生が多く、そのために同じ正味放射量に対し潜熱フラックスが上昇するかわりに顕熱フラックスが減少したものと考えられる。

4.4 節において観測パスが長いほど H_{scin}/H_{ec} は小さくなる傾向がみられた(図 12)が、図 17 から、より広範囲の顕熱フラックスの分布(=観測パスが A1 サイトから離れる方向)は相対的に顕熱フラックスが小さくなると読み取れるので、シンチロメーターはより広範囲の顕熱フラックスの空間分布をよく反映していると推測される。

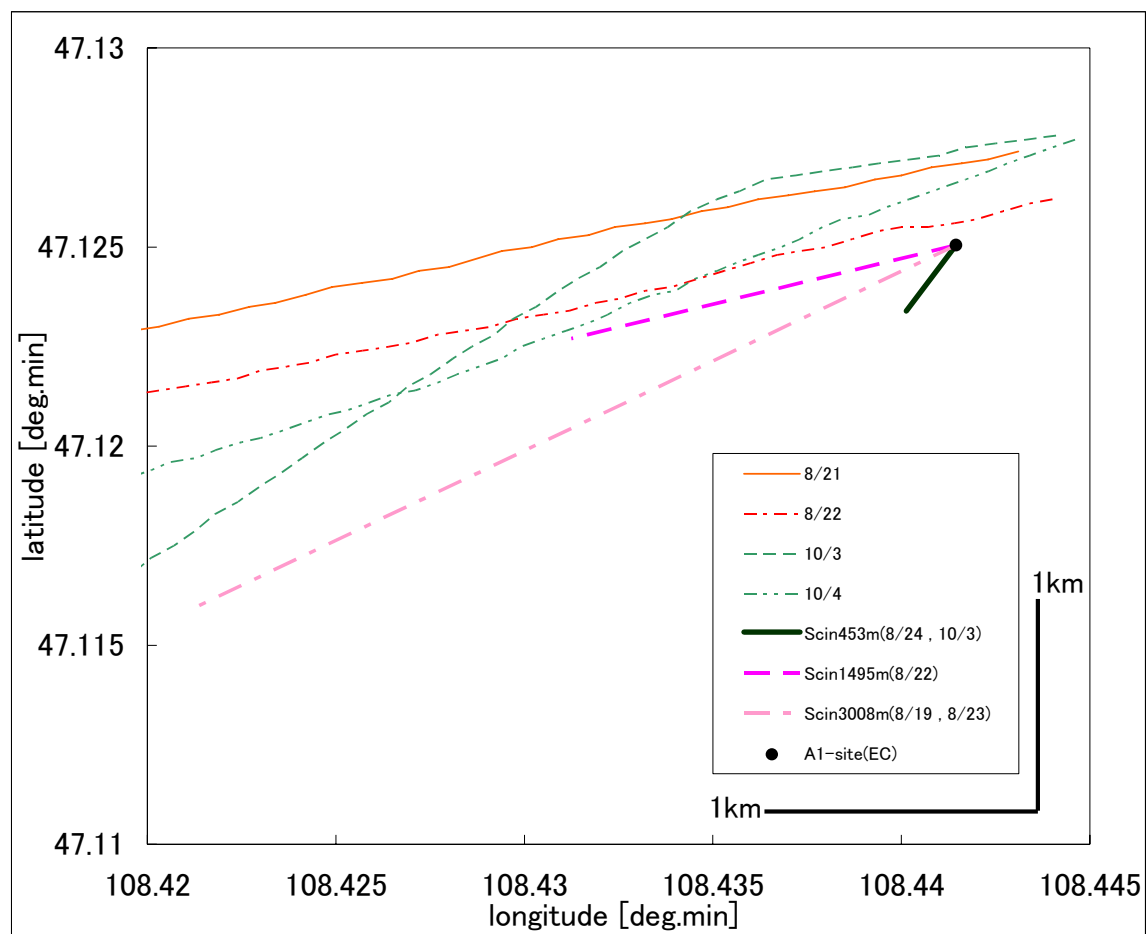


図 15 各日の航空機飛行経路とシンチロメーターのパス

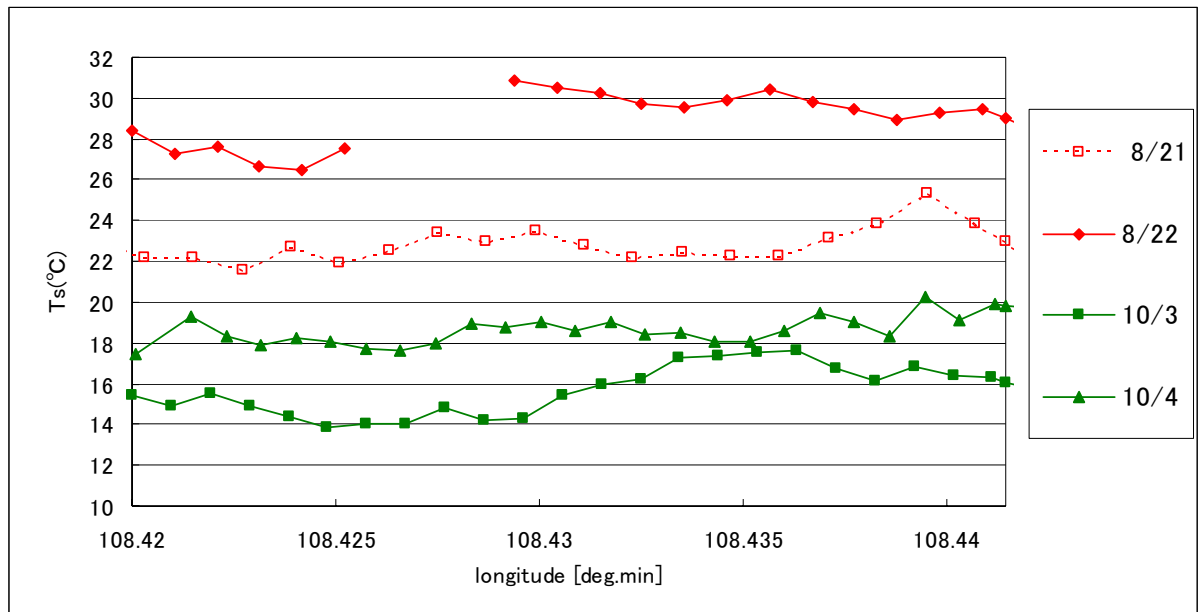
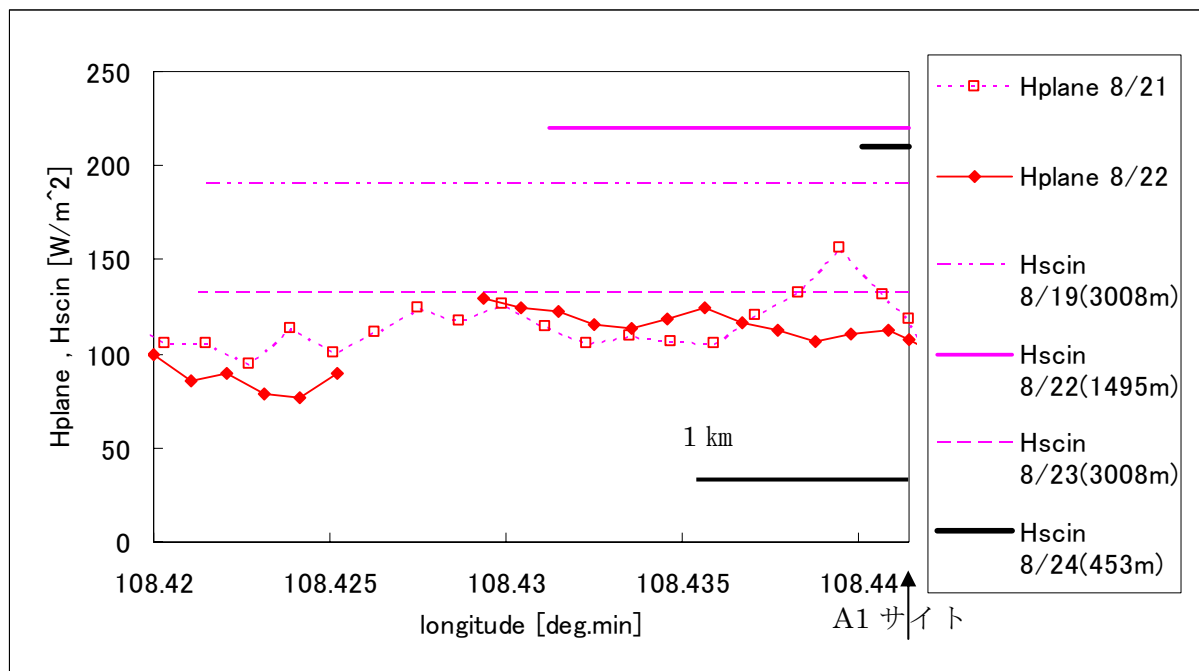


図 16 航空機観測による地表面温度 T_s (3 分平均値). 雲の存在により影響を受けている観測値は削除してある.

表 6 各日のバルク係数 C_H

date	C_H
8/21	5.25E-03
8/22	3.42E-03
10/3	4.33E-03
10/4	3.93E-03

(a)



(b)

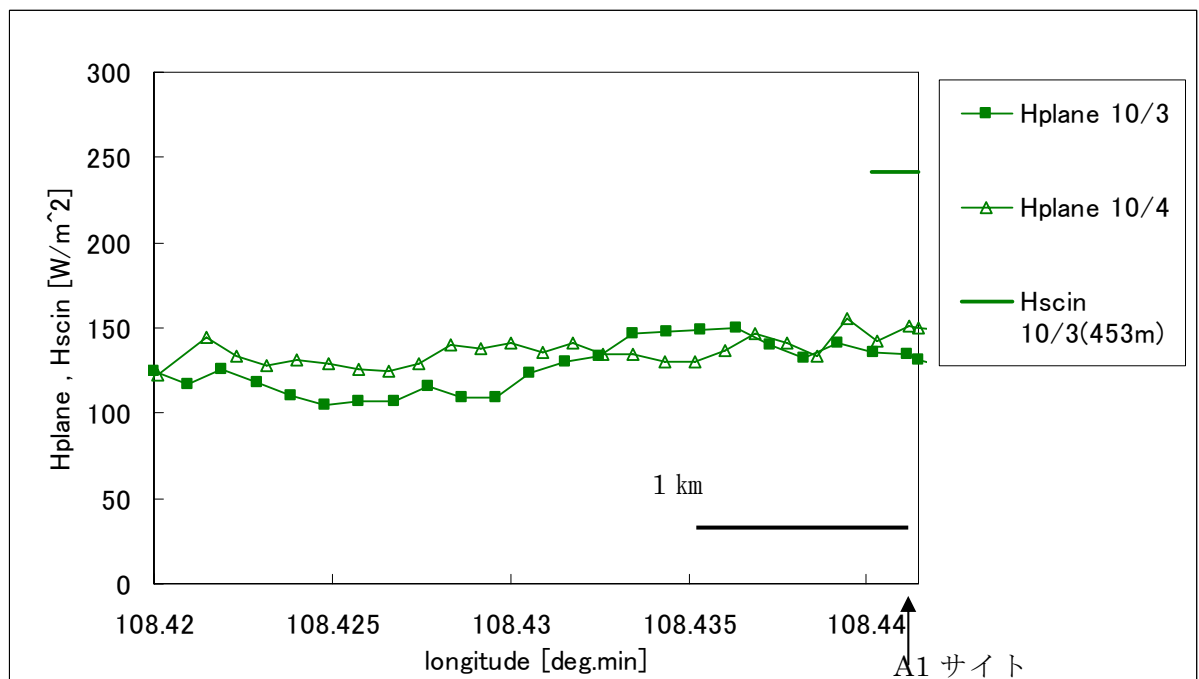


図 17(a), (b) T_s を用いたバルク法による顕熱フラックス H_{plane} と H_{scin} ((a): 8 月, (b): 10 月). 図中の右端(東端)はA1 サイト.

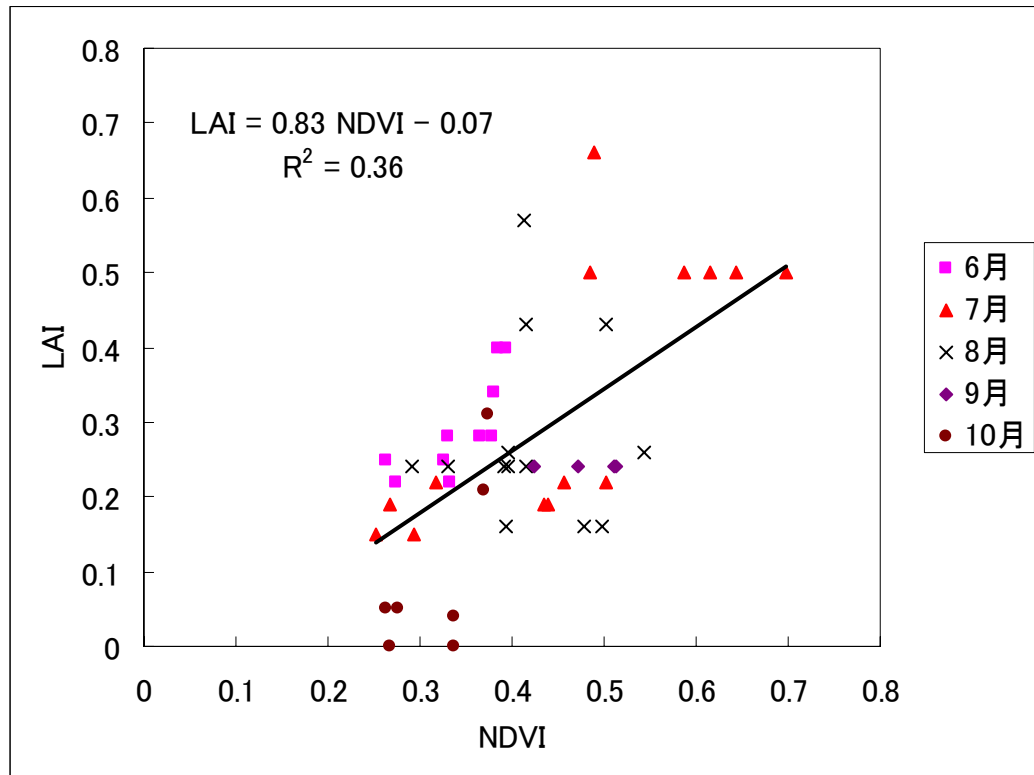
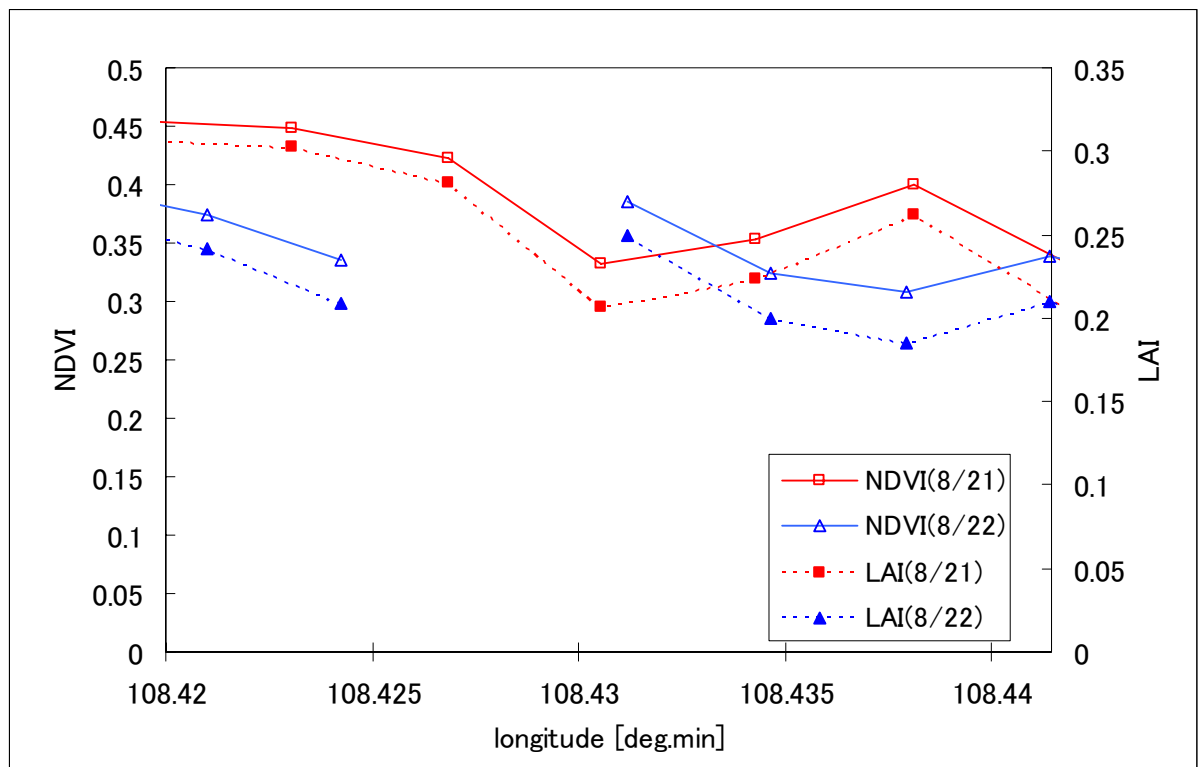


図 18 NDVI と LAI の関係．（東北大学松島大氏より提供）

(a)



(b)

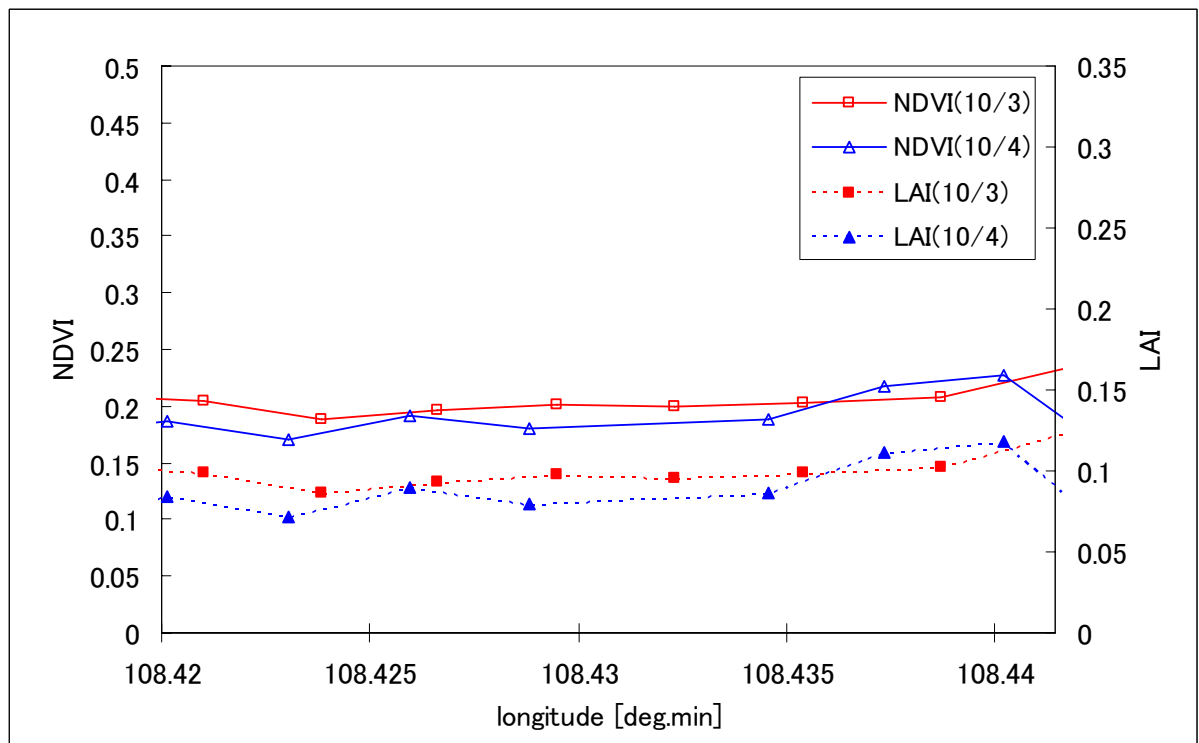


図 19(a), (b) 航空機観測による NVDI と LAI ((a) : 8 月, (b) : 10 月)

5. 3 顕熱フラックスの空間分布についてまとめ

琵琶湖観測では風向がシンチロメーターのパスと平行に近いときが多く、顕熱フラックスにおけるシンチロメーター法と渦相関法との違いは判別できなかった。

モンゴル観測において、バルク法で航空機パス下の顕熱フラックス H_{plane} を算定したところ、A1 サイトから西の方向に 2000～3000m 付近で低い顕熱フラックスの分布傾向が見られた。これは 4.4 節の観測パスが長いほど $H_{\text{scin}}/H_{\text{ec}}$ は小さくなる傾向を裏付けるものであり、植生の違いを反映したと推測されるので、シンチロメーターは渦相関法を用いたタワー観測よりも広範囲の顕熱フラックスの空間分布をよく反映していると推測される。

6 章 結 論

本研究ではシンチロメーターによる観測は最長パスで 4570m で行なったが、大気の揺らぎが大きすぎるためと思われる観測エラーが発生しており、大気乱流が活発な観測条件下では測定高度を高くするなどして、観測値の絶対値を抑制する必要がある。

気圧 P 、温度 T 、摩擦速度 u^* における感度実験、および、算定過程で用いる温度の無次元化構造パラメータ Φ_{CT} を 3 種類で相互比較した結果より、シンチロメーターによる顕熱フラックスの算定は、一般的に正確な観測が容易でない u^* の変動の影響はやや受けやすいものの P 、 T 、といった微気象観測値よりも、用いる Φ_{CT} により顕熱フラックスが大きく値が変わることに留意する必要がある。

シンチロメーター法による顕熱フラックスのほうが渦相関法のものよりも約 1.5 倍大きい値が得られ、シンチロメーターによる顕熱フラックスを渦相関法によるものと比較すると、風向、安定度には特に関係性が見られなかったので、2 手法の顕熱フラックスの違いはフットプリントの違いによるものではないことが示された。また、渦相関法よりも熱収支式がより閉じやすい傾向が見られた。

モンゴル観測において、バルク法で航空機パス下の顕熱フラックスを算定したところ、植生の違いを反映した顕熱フラックスの空間分布がシンチロメーター法の観測結果と矛盾しないことから、シンチロメーターは渦相関法を用いたタワー観測より広範囲の顕熱フラックスの空間分布をよく反映していると推測される。

以上のことから、大口径シンチロメーターは熱フラックス観測の新たな方法として利用する価値があるものであると判断する。

7 章 謝辞

本研究を進めるに当たり，筑波大学生命環境科学研究科講師浅沼順先生には琵琶湖，モンゴル両観測とも観測，解析全般に渡ってご指導，ご協力を頂きまして，深く感謝いたします．研究の進め方，方針等にご指導を頂きました筑波大学生命環境科学研究科教授田瀬則雄先生，同助教授杉田倫明先生，同講師辻村真貴先生に深く感謝いたします．

2002 年琵琶湖観測では CAPS2002 及び 2003, 琵琶湖プロジェクトに携わった多くの研究員，学生の方々から観測および解析の際にご指導，ご協力を頂きまして深く感謝いたします．

2003 年モンゴル観測では RAISE に携わった多くの研究員，学生の方々のご指導，ご協力に深く感謝いたします．東北大学大学院理学研究科助手松島大先生にはモンゴルにおける航空機観測と地上観測のデータの一部を快く提供していただき，深く感謝いたします．観測のため長く滞在した KBU 村の方々と村長一家の皆様には心地よいもてなしを受け，観測，作業のみならず生活全般でお世話になり，深く感謝いたします．

本研究における 2002 年琵琶湖観測は琵琶湖プロジェクト及び CAPS2002 の一環である．また 2003 年モンゴル観測は，科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業（CREST）における「北東アジア植生変遷域の水循環と生物・大気圏の相互作用の解明」（RAISE）の一環である．ここに記して謝意を表します．

引用文献

- Andreas, E. L. (1989) Two-Wavelength Method of Measuring Path-Averaged Turbulent Surface Heat Fluxes. *Am. Meteorol. Soc.* , 6, 280-292
- 浅沼順・工藤裕己 (2000) 消散法による地表面フラックスの算定とその水田上での応用. *水工学論文集*, 44, 181-186
- 浅沼順 (2001) 消散法による地表面フラックスの算定とその水田上での応用(2)－消散率算定に伴う諸問題. *水工学論文集*, 45, 247-252
- DeBruin , H. (2002) Introduction: Renaissance of Scintillometry. *Boundary.-Layer Meteorol.*, 105, 1-4
- Green, A. E. and Hayashi , Y. (1998) Use of the Scintillometer Technique over a Rice Paddy. *J.Agric.Meteorol.* , 54(3), 225-234
- Hill, R. J. , Ochs, G.R. , and Wilson,J.J. (1992) Measuring Surface-Layer Fluxes of Heat and Momentum Using Optical Scintillation. *Boundary-Layer Meteorol.* , 58, 391-408
- Kader, B. A. (1992) Determination of Turbulent Momentum and Heat Fluxes by Spectral Methods. *Boundary.-Layer Meteorol.* , 61, 323-347
- 杉田倫明 (2003) 北東アジア植生変遷域の水循環と生物・大気圏の相互作用の解明.RAISE Project の概要. 筑波大学陸域環境研究センター報告, No.3, 147-156.
- 玉川一郎・田中賢治・石田祐宣・樋口篤志・松島大・浅沼順・小野圭介・多田毅・林泰一・石川裕彦・田中広樹・檜山哲哉・岩田徹・田中健路・中北英一・CAPS 観測グループ (2004) 琵琶湖プロジェクト 2002 年フラックス面的集中観測(Catch A Plume by SATs : CAPS) : その概要. *水文・水資源学会誌*, Vol.17 , No.4 , 392-400
- Thiermann, V. , and Grassl , H.(1992) The Measurement of Turbulent Surface-Layer Fluxes by Use of Bichromatic Scintillation. *Boundary.-Layer Meteorol.*, 58, 367-389
- Wyngaard, J. C.(1973) On Surface-Layer Turbulence. *Workshop on Micrometeorology. Am. Meteorol. Soc.* , 101-149
- Wyngaard, J. C. , and Clifford , S. F. (1978) Estimating Momentum , Heat , and Moisture Fluxes from Structure Parameters. *J. Atm. Sci.* , 35, 1204-1211
- Wyngaard, J. C. , Izumi, Y. , and Collins,JR., S. A. (1971) Behavior of Refractive-Index-Structure Parameter near the Ground. *J.Opt. Soc. Am.* , 61, 1646-1650