

平成 21 年度 卒業論文

ナイルデルタの農地における蒸発散量の評価

筑波大学第一学群自然科学類

地球科学主専攻

200610410

福田敬広

2010 年 2 月

目次

Abstract	ii
表目次	iii
図目次	iv
本文	
1. はじめに	
1.1 エジプトの農業と水資源	1
1.2 蒸発散量の研究	1
2. 研究方法	
2.1 観測地点	2
2.2 観測方法	3
2.3 データ処理	4
2.4 フラックスの算出 (渦相関法)	6
2.5 計算モデル	6
2.5 バルク係数の決定	9
3. 結果	
3.1 スペクトル解析結果	11
3.2 熱収支・放射収支	11
3.3 放射温度計による表面温度	12
3.4 キャノピーアナライザーの結果	12
3.5 バルク係数	13
4. 考察	
4.1 モデル計算結果との比較	13
4.2 感度分析	14
5. 結論	15
謝辞	16
参考文献	17
付録 (モデルの Program)	18

Estimation of evapotranspiration in agricultural land of the Nile Delta

Takahiro FUKUDA

Abstract

Water consumption due to a large amount of agricultural activities in Egypt is one of the problems for the sustainable agriculture. Control of evaporation is suggested as one of the water-saving measures to solve the problems in agricultural lands. To assess current condition, estimation of evapotranspiration was carried out.

Evapotranspiration was evaluated by using eddy correlation method and it was partitioned into soil evaporation and transpiration by applying a model based on Deardorff algorithm. This model treats heat and radiation balance of foliage surface and ground surface separately by using of σ_f that is foliage shielding factor of ground for shortwave radiation, and calculates each surface temperature and humidity. Fluxes are then obtained from the estimated temperature and humidity values, by applying a two-component canopy model was applied.

Result of eddy correlation method showed that evapotranspiration was the major component in the heat budget. Model application showed that fraction of evaporation in evapotranspiration was about 30%. To access the accuracy of the result, estimated fluxes were compared with those of eddy correlation method. It was found that the two methods approximately agree with each other, but not perfectly. One of the main reasons for this result is that some parameters such as soil parameters in the model are not set up properly. Therefore, a sensitivity analysis was carried out to see the effect of changes in the parameters. Some parameters showed high sensitivities so that it is important to determine their parameters in this model.

key words: evapotranspiration, flux, heat budget, vegetation surface, maize

表目次

表 1.1	観測項目	33
表 2.1	データ異常値および補完項目	34
表 3.1	モデルにおける入力項目	35
表 3.2	モデルにおける出力項目	35
表 3.3	モデルにおける初期条件	36
表 3.4	モデルにおける定数・係数	36
表 4.1	LAI データ	38

図目次

図 1.1	ナイル川における水利用の割合	39
図 2.1	観測地点（広域図）	40
図 2.2	観測地点（周辺図）	41
図 3.1	とうもろこし畑（上から見た様子）	42
図 3.2	とうもろこし畑	42
図 4.1	ポンプによる灌漑水の揚水	43
図 4.2	メスカ（二次水路）を用いた灌漑の様子	43
図 5.1	自動気象観測装置における各測器と設置状況	44
図 6.1	観測機器の配線状況	45
図 7.1	放射温度計による観測の様子	46
図 8.1	水蒸気濃度の時系列の比較	47
図 9.1	風速鉛直方向の変換角度	48
図 10.1	風速鉛直方向の座標変換角度の時系列	49
図 10.2	風速鉛直方向の座標変換角度の時系列（補完後）	49
図 11.1	モデルの概念図	50
図 12.1	風速 x 成分 u に対するスペクトル解析結果 (8月9日 13:00~13:30)	51
図 12.2	風速 y 成分 v に対するスペクトル解析結果 (8月9日 13:00~13:30)	51
図 12.3	風速 z 成分 w に対するスペクトル解析結果 (8月9日 13:00~13:30)	52
図 12.4	気温 T に対するスペクトル解析結果 (8月9日 13:00~13:30)	52
図 12.5	二酸化炭素濃度 c に対するスペクトル解析結果 (8月9日 13:00~13:30)	53
図 12.6	気温 T に対するスペクトル解析結果 (8月9日 13:00~13:30)	53
図 13.1	風速 x 成分 u に対するスペクトル解析結果 (線形グラフおよび平均値)	54
図 13.2	風速 y 成分 v に対するスペクトル解析結果 (線形グラフおよび平均値)	54
図 13.3	風速 z 成分 w に対するスペクトル解析結果 (線形グラフおよび平均値)	55
図 13.4	気温 T に対するスペクトル解析結果 (線形グラフおよび平均値)	55
図 13.5	二酸化炭素濃度 c に対するスペクトル解析結果	

	(線形グラフおよび平均値)	.....	56
図 13.6	気温 T に対するスペクトル解析結果		
	(線形グラフおよび平均値)	.....	56
図 14.1	観測期間における放射収支の時系列		
	(2009年8月7日14:00~15日9:00)	.....	57
図 15.1	観測期間における熱収支の時系列		
	(2009年8月7日14:00~15日9:00)	.....	58
図 16.1	恒温水槽を用いた放射温度計のキャリブレーション結果	.....	59
図 17.1	地表面温度の測定値 (2009年8月11日)	.....	60
図 17.2	葉面温度の測定値 (2009年8月11日)	.....	60
図 17.3	地表面温度の測定値 (2009年8月13日)	.....	61
図 17.4	葉面温度の測定値 (2009年8月13日)	.....	61
図 18.1	地表面粗度と RMS 誤差の関係	.....	62
図 18.2	摩擦速度の推定値と測定値の比較	.....	62
図 18.3	顕熱粗度と RMS 誤差の関係	.....	63
図 18.4	$\overline{w'T}$ の推定値と測定値の比較	.....	63
図 19.1	顕熱フラックスにおける		
	モデル推定値と実測値 (渦相関法) の時系列	.....	64
図 19.2	潜熱フラックスにおける		
	モデル推定値と実測値 (渦相関法) の時系列	.....	64
図 20.1	モデルによる蒸発量および蒸散量の時系列	.....	65
図 21.1	顕熱フラックスにおける比較図	.....	66
図 21.2	潜熱フラックスにおける比較図	.....	67
図 22.1	土壌水分量の比較時系列	.....	68
図 23.1	地中熱流量における比較時系列	.....	69
図 24.1	群落葉面温度の比較(8月11日)	.....	70
図 24.2	地表面温度の比較(8月11日)	.....	70
図 24.3	群落葉面温度の比較(8月11日)	.....	71
図 24.4	地表面温度の比較(8月11日)	.....	71
図 25.1	σ_r における感度分析結果①	.....	72
図 25.2	σ_r における感度分析結果②	.....	72
図 25.3	w_k における感度分析結果①	.....	73
図 25.4	w_k における感度分析結果②	.....	73
図 25.5	C_2 における感度分析結果①	.....	74
図 25.6	C_2 における感度分析結果②	.....	74

1. はじめに

1.1 エジプトの農業開発と水資源

エジプトは典型的な乾燥気候下にあり、年平均降水量は地中海沿岸で約 200 mm、南部においては 2 mm (アスワン) に過ぎない。したがって、ナイル川の水を中心とした灌漑を抜きにしては、エジプトの農業は存在し得ない (北村ほか, 1994)。

そんな中エジプト政府は、ナイル渓谷とデルタ地帯の人口圧力の緩和と農業開発を目指して、1950年代から水平拡大政策と称する農業開発を進めており、特にトシュカ (ニューバレー) では約 22.7 億 m^2 、シナイ半島北部では約 16.8 億 m^2 の砂漠を農地に変えるという、とても大規模な計画となっている (National Water Resource Plan, 2005: 畑, 2008)。この開発によって、それぞれ年間約 40~50 億 t、約 44.5 億 t の水が使用され、少なくともこの 2 大開発だけで年間 100 億 t 近い水がナイル川から引き剥がされているということになる。そして 2017 年には、灌漑地域は 1997 年から約 30% 増加、灌漑による砂漠への導水は 30 億 t 増加することが予想されている (National Water Resource Plan, 2005)。このように、トシュカや北シナイといったメガプロジェクトが進行し、水需要の顕著な増大が予想される中、既耕地においてはいかに灌漑効率を高めて節水するかが国家としての大きな課題となっている (畑, 2008)。

1997 年現在のエジプトのナイルシステムにおける水収支 (National Water Resource Plan, 2005) から求めたナイル川における水利用の割合 (図 1.1) をみると、農業用水の割合が約 7 割を占めており、エジプトにおけるナイル川の水利用の大半は農業によって使われていることが分かる。つまり、農地における蒸発散によって多くの水が失われていることが予想される。そこで、エジプトにおける節水対策の一つとして、エジプトの農地、特にその多くを占めているナイルデルタの農地における蒸発散の抑制というものが提案できる。しかし、蒸散は生産に寄与しているので抑制することはできない。つまり、ナイルデルタ農地における地表面蒸発量の抑制が重要になってくる。この抑制対策にあたって、蒸発散量の現状が必要となってくるのだが、リモートセンシングによる東ナイルデルタにおける広域蒸発散量の推定 (Bastiaanssen et al., 1996) や、可能蒸発散量の推定 (Omar and Mehanna, 1984) を行った研究はあるが、エジプトにおいて蒸発散量を定量的に算出した研究はほとんどない。そこで本研究では、実際に農地に気象観測装置を設置し、そのデータから蒸発散量およびフラックスを定量的に算出していくことを目的として研究方法を検討した。また更に、蒸発散量の算出にあたって、蒸発散に占める蒸発量・蒸散量それぞれの割合を求める方法も求められる。

1.2 蒸発散量の測定方法

蒸発散は水収支を構成する要素の一つであるが、蒸発散に影響を与える因子が複雑であること、ルーチン観測を行えるような測器が必要なことなどにより、定量化が水収支・熱収支要素の中でも遅れている (中川, 1984) と言われている。

地表における蒸発量測定の直接的方法には主に渦相関法が利用されることが多い。渦相関法は仮定を必要としない観測法として、最も信頼できる手法であると考えられており (杉田・田中, 2009)、風速鉛直成分・水蒸気濃度などの実測が必要であること、また非常に短い測定間隔が求められるという特徴がある。そのため、水蒸気濃度を瞬間値で測れるような精度の高い測器が必要となってくる。

また、蒸発散量に占める蒸発量・蒸散量の割合を求める研究には、同位体のデータから蒸発量・蒸

散量の割合を推定する方法(佐々木, 2004 など), 現地パラメータから蒸発量・蒸散量をそれぞれ別々に計算する方法(中川, 1978 など)がある. 同位体を用いる方法は, 土壌水および空気中の水分の安定同位体比を用いた **keeling plot analysis** という方法が使われており, 現地での土壌や空気のサンプリングが必要である. また, 中川(1978)では, Deardorff(1978)の提案したモデルの計算方法に従って数値プログラムを開発し, 蒸発量を蒸散量と蒸発量に分離して計算する試みが行われた. Deardorff(1978)の方法は, 熱収支式を群落面・地表面において数値的に解くことで表面温度・表面湿度を推定するものであり, 放射を弱める遮蔽因子の導入によって, 2層でのフラックスを求めることができる. また, 入力パラメータや決定すべきパラメータが少ないことも特徴である.

本研究では, 渦相関法によって顕熱および潜熱フラックスを算出することでナイルデルタの農地における熱収支および蒸発散量を評価すること, また, 中川(1978)で用いられた数値モデルを元に蒸発散量を蒸散量・蒸発量に分離して計算する方法を行うことを目的として研究を行った. 加えて, このモデルによって得られたフラックスと, 渦相関法によって得られたフラックスを比較することにより, モデルの検証を行うことも目的とした. そのために, 自動気象観測装置(AWS)による観測を行い, 各気象パラメータを観測した. このとき, 渦相関法に必要な水蒸気濃度そのものを瞬間値で測定できる機材を用い観測も行った.

2. 研究方法

2.1 観測地点

本研象地は, カイロから北北西に約 65 kmの地点にあり, エジプト・ナイルデルタに位置する **Birket El Sab** という町(図 2.1)の圃場である. この圃場は, 北側に位置する集落の農家の方々の所有する農地であり, 観測の許可を得て, 図 2.2 の示す観測位置(30° 38' 056" N, 31° 05' 770" E)に観測タワーを立てた. ここで, 図 2.1(広域図)は杉田(2009)によって作成されたものを GIS map に表したものであり, 図 2.1(土地利用図)は Landsat-7 ETM+データを用いて土地分類を行ったものである. この土地利用図の解析方法にあたり, ナイルデルタ全体の土地分類を作成するには 1枚の衛星データのみでは画像範囲が小さいため, 異なる 4 期間の衛星データを元に解析を行った. 使用した画像は band1~5 を使用した. 解析には, Leica 社が開発した ERDAS IMAGINE ver9.0 を使用し, ERDAS IMAGINE ver9.0 における「教師なし分類」によって各々の衛星データを分類した. そして分類したデータを ESRI 社によって開発された Arc GIS ver 9.3 に取り込み, マップ化したものである.

対象地域の植生はとうもろこしであり, この農地の一区画においてとうもろこしがほぼ一様に広がっている(図 3.1). この農地におけるとうもろこしの草丈は, 低いものは 2 m 以下のものもあるが, ほとんどは約 3 m に達している(図 3.2). またとうもろこしは, 夏季における作付面積がエジプト農地の中で約 24%であり最も大きい割合を占めていることから(渡辺ほか, 1994), 夏に作られる主要作物の一つであることが言え, 本研究のナイルデルタの農地における評価を行うに当たって代表的な作物であるであると言える.

この農地における灌漑は, 川から引いてきた水をポンプで揚水(図 4.1)し, メスカ(二次水路)から各小区画単位に流し(図 4.2), これを 15 日周期ごとに行うようにしている. つまり, ある区画に水を流したら, しばらくは他の場所に導水されて, その地点に次に給水が行われるのは 15 日後に

なるというわけである。本観測期間中では、8月10日の昼間に観測タワー付近の区画において灌漑による導水がなされた。

2.2 観測方法

現地で行った観測は、①自動気象観測装置（AWS）による気象観測、②放射温度計（MINOLTA-温度計 505）による表面温度の観測、③キャノピーアナライザー（LAI-2000）による葉面積指数（LAI）の観測および遮蔽率の推定の3つである。

①自動気象観測装置（AWS）による観測は、図 2.2 の観測位置において 2009 年 8 月 7 日 14:00～2009 年 8 月 14 日 9:00 の期間で行われた。なお、ここで示した時刻はエジプト標準時であり、これ以降に示した時刻も全てエジプト時間とする。各観測機器を観測タワーに取り付け、それぞれの項目を測定した（図 5.1）。観測項目およびその観測測器・観測高度・サンプリング時間・平均化時間・ロガー出力時刻を、表 1 にまとめた。また、観測機器の配線状況を図 6.1 に示す。なお、風速 3 成分 u, v, w [m/s]、気温 T [°C]、水蒸気密度 ρ_v [kg/m³]、二酸化炭素濃度 ρ_c [mmol/m³] に関しては、

$$\text{分散: } \sigma_{xr} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (1.1)$$

$$\text{共分散: } x'y'_r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n} \quad (1.2)$$

も 30 分ごとに記録している。ここで添え字の r は生データからの値であることを意味し、 x_i, y_i は任意の物理量の瞬間値、 \bar{x}, \bar{y} はその 30 分平均値を示す。また、 n [=18000] は 30 分間のデータ数である。

②放射温度計による表面温度測定のための目的は、モデルによって計算される葉面温度、地表面温度との比較をするためである。放射温度計は、対象の物体（地表面・葉面）に向けることにより物体の赤外放射（長波放射）を測定し、その放射量から対象物の温度を測る測器である。現地における放射温度計の観測は、8月11日、8月13日に行い、30分～数時間ごとに測定した。

観測は、まず測定物体の放射率を設定し、ファインダーの視野中央を測定物体に合わせ、測定ボタンを押して瞬間値を測定する（図 7.1）。なお、放射率は 1 として観測した。計算の方法としては、各時間において瞬間値を 15～20 サンプル測定し、その平均値を求め、またその変化幅（最大値・最小値との差）も表した。また観測後に、恒温水槽を用いたキャリブレーションも行い、キャリブレーション結果をもとにした補正を行った。

キャリブレーションでは、恒温水槽で設定した水温と放射温度計で測定した水温とを記録し、比較した。これを、0,5,10,・・・50 (°C) と 0°C から 50°C まで 5°C 間隔で行った。このとき、放射温度計での測定値は 15 サンプル採り、その平均値を記録した。

③葉面積指数（LAI）の測定には、キャノピーアナライザー（LAI-2000）を用いた。キャノピーアナライザーによる LAI の観測の研究は、近年、山本ほか（1995）などで行われており、その測定精度が評価されている。山本ほか（1995）によると散乱光が卓越している曇天、又は晴天日の早朝か夕方の方の条件において行うと精度が高いとされており、今回の観測においても、8月12日の日の入

りの時刻（およそ 19:10～19:40）において観測を行った。

キャノピーアナライザーのセンサー部分には、魚眼レンズと 5 つの異なるシリコン検出器が内蔵されている。測定では、まず作物個体群の上部に配置して太陽の入射光を測定した後、個体群落の地上 2 cm の高さで透過光を測定する。そして両者の測定値から体内に内蔵されたコンピュータにより作物個体群による太陽光の遮蔽程度が計算される（山本ほか, 1995）。そしてこの太陽光の遮蔽率から LAI を計算するのである。太陽の入射光と透過光の測定回数は、まず 1 回入射光（群落の無い開けた位置でとった）を測定し、次に透過光（群落下）5 回測定、最後にもう 1 回入射光を測定することとし、これらのデータから 1 つの LAI を得る。これを 8 回行い、その平均値をこのとうもろこし畑の観測地における LAI とした。ちなみに、透過光は観測タワーの位置から約 3 m 以内の群落下において観測した。

また、観測における透過光と入射光の値から、群落による放射の遮蔽率を推定した。このとき用いたデータは、LAI を決定したときの観測値 8 回分ではなく、昼間にとった別の 2 回分である。遮蔽率は、得られたデータから、入射光と透過光の比を計算して推定した。

2.3 データ処理

まず、観測機材の不具合により欠損している項目、異常値を表している項目、又は重複している項目については、内挿した値を用いて補完した。補完項目およびそのデータを表 2.1 にまとめた。

30 分平均値の分散・共分散について、以下の手順によりデータ処理（補正）を行った。ただし、手順 (iii) は $\overline{w'\rho_v}$ （水蒸気濃度と風速鉛直成分の共分散）についてのみ適用する。

- (i) 現地データによるキャリブレーション補正を行った。オープンパスアナライザーによる水蒸気濃度 ρ_a [kg/m^3] と、温湿度計による相対湿度 Rh [%] から求めた水蒸気濃度比較した結果、図 8.1 のようになった。この図から分かるようにオープンパスアナライザーによって測定された水蒸気濃度の方が高くなっている。これは、温湿度計の値を真値とすると、オープンパスアナライザーのキャリブレーションが原因によるズレであると考えられる。この結果から、オープンパスアナライザーによる水蒸気濃度と温湿度計による相対湿度の割合の平均を算出し、その値をオープンパスアナライザーによる全水蒸気濃度に乗じた。
- (ii) データロガーに記録された値 $\overline{w'x}$ に対して、主風向に対する座標変換を水平方向と鉛直方向について行った。計算方法は Asia Flux 運営委員会 (2003) のものに従って以下の通りを行った。

① 水平方向の主風向変換

計測された風速 3 成分を X, Y, Z とすると、主風向 θ に対する水平成分の変換は、

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\overline{Y}}{\overline{X}}\right)$$

$$U = X \cos \theta + Y \sin \theta$$

$$V = -X \sin \theta + Y \cos \theta$$

となる。結果、平均操作に対しては次のようになる

$$\bar{V} = -\bar{X} \sin \theta + \bar{Y} \cos \theta = (-\bar{X} \tan \theta + \bar{Y}) \cos \theta = 0$$

② 鉛直方向の主風向変換

ここで、平均鉛直風速 $\bar{W} = 0$ とならない場合、更に吹き上げ角 α に対して、主風向成分の変換を

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\bar{W}}{\bar{U}} \right)$$

$$U_c = U \cos \alpha + W \sin \alpha$$

$$W_c = -U \sin \alpha + W \cos \alpha$$

とする。結果、平均操作に対しては次のようになる

$$\bar{W}_c = -\bar{U} \sin \alpha + \bar{W} \cos \alpha = (-\bar{U} \tan \alpha + \bar{W}) \cos \alpha = 0$$

(iii) 密度変動補正 (WPL 補正) を行った。計算方法は (Asia Flux 運営委員会, 2003) のものに従い、計算方法は以下の通りである。

$$\overline{w' \rho_v'} = \left(1 + \frac{e}{\rho_a} \right) \left(\overline{w' \rho_v'} + \frac{\rho_v}{T} \overline{w' T'} \right) \quad (2.1)$$

ここで、 ρ_a [kg/m³] は大気密度、 T [°C] は気温であり、水蒸気圧 e [hPa] および大気圧 P [hPa] とともに以下のようにして求められる (近藤, 2000)。

$$e = \frac{\rho_v \cdot T}{0.2167} \quad (2.2)$$

$$\rho_a = 1.293 \cdot \frac{273.15}{273.15 + T} \cdot \frac{P - 0.378e}{1013.25} \quad (2.3)$$

(iv) 鉛直方向への座標変換に対する変換角度 θ の補正を行った。この θ とは、主風向 U に対して、鉛直風速 $w=0$ とならない場合に起こる吹き上げ角である (図 9.1)。この変換角度 θ について、 $0 < \theta < 4$ 以外の値を一度除外し、そのデータを内挿により補完した。そして、補完し、 $0 < \theta < 4$ の範囲に収まった鉛直方向の変換角度 θ を用いて再度座標変換を行った。なお、一度除外し、補完したデータの数は 40 個 (全 375 データ中) であった。

補完前と補完後の鉛直方向への変換角度 θ のデータ時系列を図 10.1, 図 10.2 に示す。

これら (i)~(iv) の過程により補正された分散および共分散を σ_x , $\overline{x'y'}$ とし、これ以降の解析に使用した。

また、観測データの精度を確認するため、風速 3 成分 (u, v, w)、気温 T 、二酸化炭素濃度 c 、水蒸気濃度 a に関してスペクトル解析を行った。スペクトル解析は、ノイズの有無や長周期成分などの混入を判別するほか、サンプリング周波数や平均時間が適切であったかどうかを判断にも有効である (Asia Flux 運営委員会, 2003)。スペクトル解析は、以下の手順で行った。ただし、手順 (II) に関しては風速 3 成分にのみ適用した。

(I) 30 分間の 10 Hz の生データ (データ数: $n=18000$) を用意した

(II) 主風向変換を行った (n 個のデータの平均を 0 軸として値を変換する).

(III) 高速フーリエ変換をかけることで、各スペクトルデータ $S(f)$ および周波数 f を算出

(IV) $\log(f \cdot S(f))$ を縦軸, $\log(f)$ を横軸としてグラフにプロットした

(I) ~ (IV) の手順を各データにおいて行った. また, この 30 分間の解析を, 観測期間中の 10 回分選んで行った.

2.4 フラックス等の算出 (渦相関法)

2.3 で補正された共分散を用いて, 顕熱フラックス H [W/m^2], 潜熱フラックス lE [W/m^2], および摩擦速度 u_* を渦相関法によりそれぞれ求めた. ただし, いずれのフラックスも上向きを正とする.

$$H = C_p \rho_a \overline{w'T'} \quad (3.1)$$

$$lE = \overline{lw'\rho_v'} \quad (3.2)$$

$$u_* = \sqrt[4]{\overline{(u'w')^2} + \overline{(v'w')^2}} \quad (4.3)$$

ここで, C_p [$\text{J}/\text{kg}/\text{K}$] は大気 of 定圧比熱, l [J/kg] は蒸発潜熱であり, それぞれ以下の式によって算出している.

$$C_p = 1005 \left(1 + 0.84 \frac{\rho_v}{\rho_a} \right) \quad (4.4)$$

$$l = 3.15 \times 10^3 - 2.38(273.15 + T) \quad (4.5)$$

次に, 正味放射量 Rn [W/m^2] を式(4.3)から求めた. S^\downarrow , S^\uparrow , L^\downarrow , L^\uparrow [W/m^2] は観測された 4 成分の放射量である

$$Rn = S^\downarrow - S^\uparrow + L^\downarrow - L^\uparrow \quad (3.3)$$

2.5 計算モデル

フラックスおよび蒸発散量の計算モデルは, Deardorff (1978), 中川 (1978) の方法に基づいて行った. 計算方法は以下の通りである.

〈熱収支式〉

群落・地表面におけるフラックスを算出するためには, 群落・地表面における熱収支式を明らかにする必要がある. このとき, 植生層は単層とみなし, 放射を弱める遮蔽因子 σ_r を用いて計算を行った. σ_r とは, 植生が放射量を何%弱めるかを示すパラメータであり, このパラメータを用いることがこのモデルの大きな特徴の一つである. σ_r の値は, 2.2 で説明したとおり, キャノピーアナライザーの結果から推定した. 放射それぞれにおける熱収支式は以下の通りになる.

・ 群落面

$$\begin{aligned} & S_h^\downarrow - S_h^\uparrow + L_h^\downarrow - L_h^\uparrow - (S_g^\downarrow - S_g^\uparrow + L_g^\downarrow - L_g^\uparrow) \\ & = H_h - H_g + l(E_h - E_g) \end{aligned} \quad (5.1)$$

・ 地表面

$$S_g^\downarrow - S_g^\uparrow + L_g^\downarrow - L_g^\uparrow - H_g - lE_g = G \quad (5.2)$$

ここで、 G は地中熱流量であり、添字 h と g はそれぞれ、群落の上（地表+キャノピーの上）、地表面におけるパラメータを表すものである。また、これらの式において S_h^\downarrow 、 L_h^\downarrow はモデルの入力項目として与えるが、残りの放射量に関しては S_h^\downarrow 、 L_h^\downarrow を用いて以下のように算出した。

$$S_h^\uparrow = (1 - \sigma_f) \alpha_g S_h^\downarrow + \sigma_f \alpha_f S_h^\downarrow \quad (5.3)$$

$$L_h^\uparrow = (1 - \sigma_f) [\varepsilon_g \sigma T_g^4 + (1 - \varepsilon_g) L_h^\uparrow] + \sigma_f [\varepsilon_f \sigma T_f^4 + (1 - \varepsilon_f) L_h^\downarrow] \quad (5.4)$$

$$S_g^\downarrow = (1 - \sigma_f) S_h^\downarrow \quad (5.5)$$

$$S_g^\downarrow = \alpha_g (1 - \sigma_f) S_h^\downarrow \quad (5.6)$$

$$L_h^\downarrow = (1 - \sigma_f) L_h^\uparrow + \sigma_f [\varepsilon_f \sigma T_f^4 + (1 - \varepsilon_f) \varepsilon_g \sigma T_g^4] / (\varepsilon_f + \varepsilon_g - \varepsilon_f \cdot \varepsilon_g) \quad (5.7)$$

$$L_h^\downarrow = (1 - \sigma_f) [\varepsilon_g \sigma T_g^4 + (1 - \varepsilon_f) L_h^\downarrow] + \sigma_f [\varepsilon_f \sigma T_f^4 + (1 - \varepsilon_f) \varepsilon_g \sigma T_g^4] / (\varepsilon_f + \varepsilon_g - \varepsilon_f \cdot \varepsilon_g) \quad (5.8)$$

〈表面温度の計算〉

地表面温度は通常熱収支式から求められるが、Deardorff は従来までの地表面温度の算出方法を検討し、Bhumralkar (1975) が提案した方法が、計算が容易でかつ精度が高いと述べている（中川，1978）。これにより、地表面温度の算出方法を Bhumralkar (1975) の方法で以下のように示す。

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = c_1 \frac{G}{\rho_s c_s d_1} - c_2 \frac{T_g - T_2}{\tau_1} \quad (5.9)$$

ここで、

$$c_1 = 2\pi^{1/2}, c_2 = 2\pi \quad (5.10)$$

$\rho_s c_s$ は土壌面における比熱、 d_1 は一日の温度変化の及ぶ深さ、 τ_1 は一日の時間、 T_2 は地温の年変化が及ぶ深さ及ぶ層の中の平均温度である。

群落の表面温度は、(5.1)～(5.8)式により熱収支法で算出した。

〈表面比湿の計算〉

群落葉面比湿 q_f は以下の式により求めた。

$$q_f = r'' q_{sat}(T_f) + (1 - r'') q_{af} \quad (5.11)$$

ただし、

$$r'' = 1 - \delta_c [r_s / (r_s + r_a)] \left[1 - (W_{dew} / W_{dmax})^{2/3} \right] \quad (5.12)$$

$$q_{af} = (1 - \sigma_f) q_a + \sigma_f (0.3q_a + 0.6q_f + 0.1q_g) \quad (5.13)$$

ここで、 $q_{sat}(T_f)$ は温度 T_f での飽和比湿、 q_{af} は群落内の平均比湿である。 δ_c は、凝結が起こっている場合 0、その他の場合を 1 とするステップ関数である。 r_s は気孔抵抗であり、Deardorff の与えた関係式を用いた。 W_{dew} は群落の葉面上に保留されている単位面積当たりの水量、 W_{dmax} は W_{dew} の最大値である。 r_a は空気力学抵抗であり、中川（1978）で与えられた以下の式を用いた。

$$r_a = u_a / u_*^2 \quad (5.14)$$

ここで、 u_a は測定高度での水平風速、 u_* は摩擦速度である。

また、地表面比湿は以下の式により推定した。

$$q_g = \alpha' q_{sat}(T_g) + (1 - \alpha') q_{af} \quad (5.15)$$

ただし、

$$\alpha' = \min(1, w_g / w_k) \quad (5.16)$$

ここで、 $q_{sat}(T_g)$ は温度 T_g での飽和比湿、 w_g は地表面での土壌水分量、 w_k は圃場容水量である。
〈土壌水分量の計算〉

地表面における土壌水分量を求めるにあたり、Deardorff（1978）では、地表面温度を求めるのと同じ考えを利用して以下の式を用いて推定している。

$$\frac{\partial w_g}{\partial t} = -C_1 \frac{E_g - 0.1E_{tr} - P_g}{\rho_w d_1'} - C_2 \frac{w_g - w_2}{\tau_1} \quad (5.17)$$

ここで、 C_1, C_2 は定数であり、Deardorff（1978）で用いたものを使用した。 ρ_w は水の密度、 d_1' は土壌水分の日周期の及ぶ深さ、 E_{tr} は蒸散、 P_g は降水量である。

〈フラックスの算出〉

フラックスの算出に関しては、並列源モデル（近藤，2000）を用いた。これは、Deardorff（1978）や中川（1978）とは異なっている。つまり、本研究で用いたモデルは、Deardorff のモデルで表面温度・湿度を算出し、この値から並列減モデルを用いてフラックスを算出するというものである。並列源モデルは、熱の源が植生層と土壌表面の 2 つにあるとして扱うモデルであり、それぞれの熱源から群落上の空気への輸送を概念としたものである（図 11.1）。

まず、植生層におけるフラックスは以下の式によって算出する。

$$H_f = C_p \rho_a C_{Hf} u_a (T_f - T_a) \quad (5.18)$$

$$lE_f = l \rho_a C_{Hf} u_a (q_f - q_a) \quad (5.19)$$

次に、土壌表面におけるフラックスは以下の式によって算出する。

$$H_g = C_p \rho_a C_{Hg} u_a (T_g - T_a) \quad (5.20)$$

$$lE_g = l \rho_a C_{Hg} u_a (q_g - q_a) \quad (5.21)$$

ここで、 C_{Hf} 、 C_{Hg} はそれぞれ、群落および地表面におけるバルク係数であり、 T_a 、 q_a は観測高度における気温・比湿である。 C_{Hf} 、 C_{Hg} の決定方法に関しては次節で述べる。

そして、群落・地表面それぞれにおけるフラックスの和を、この観測地点における総フラックスとした。

このような段階を踏まえてモデルにおけるフラックスを算出し、地表面における潜熱フラックスから土壌面蒸発量、群落面における潜熱フラックスから蒸散量を求めた。

このモデルにおける入力項目・出力項目は表 3.1, 3.2 にまとめた。ここで、出力項目（表 3.2）における放射・顕熱・潜熱フラックス・地中熱流量は、10 分の時間ステップで出力した後、更に 1 時間平均値も求めた。また、このモデルは前の時間ステップの項目を利用して計算を行うので、初期条件が必要になってくる。それらの項目と値を表 3.3 にまとめた。そして、その他の定数・係数等を表 3.4 にまとめた。今回の観測では、これらの定数や係数全てを測定できたわけではない。よって、定数・係数について値を入れられないもの、特に土壌に関するパラメータなどについては、中川 (1978) や Deardorff (1978) で与えられたものをそのまま用いた。

2.6 バルク係数の決定

モデルでフラックスを求めるにあたって、地表面・群落面それぞれにおけるバルク係数を求める必要がある。そこで、以下の方法でそれぞれにおけるバルク係数を求めた。

〈地表面におけるバルク係数〉

地表面におけるバルク係数は、地表面を裸地と仮定して以下の式で算出した。

$$C_{Hg} = \frac{k^2}{\ln\left(\frac{z-d_0}{z_0}\right)\ln\left(\frac{z-d_0}{z_{0h}}\right)} \quad (6.1)$$

ここで、 k はカルマン係数 (=0.4)、 z は観測高度 (3.62m)、 d_0 は地面修正量である。植生の無い裸地面という仮定なので、 d_0 は 0 とした。 z_{0h} は、Brutsaert (1982) により次の式を与えて求めた。

$$z_0 = \frac{h_0}{8} \quad (6.2)$$

この式は、凹凸のある荒い地表面 (bluff rough surface) において適用された式である。 h_0 は凹凸の高さを示しており、ここではとうもろこし畑の畝の高さをを用いた。また、 z_{0h} の算出には Brutsaert (1982) より次式を与えた。

$$z_{0h}/z_0 = 7.4 \exp\left[-2.46\left(z_0^+\right)^{\frac{1}{4}}\right] \quad (6.3)$$

ただし、

$$z_0^+ = 0.018u_* / \nu \quad (6.4)$$

ここで、 ν は動粘性係数である。この式もまた bluff rough surface に適用された式である。

〈群落面におけるバルク係数〉

群落面におけるバルク係数を直接求める方法は困難であるため、Watanabe (1992) により以下の関係式で与えた。

$$C_{Hf} = C_{Hh} - C_{Hg} \quad (6.5)$$

ここで、 C_{Hh} は群落上における群落・地表面全体のバルク係数である。よって、 C_{Hh} を算出すれば群落におけるバルク係数を求められる。

C_{Hh} は、次の式で求めた。

$$C_{Hg} = \frac{k^2}{\left\{ \ln\left(\frac{z-d_0}{z_0}\right) - \Psi_m(\zeta) \right\} \left\{ \ln\left(\frac{z-d_0}{z_{0h}}\right) - \Psi_h(\zeta) \right\}} \quad (6.6)$$

ただし、 k はカルマン係数 (=0.4)、 z は観測高度 (3.62m)、 $\Psi(\zeta)$ は安定度補正関数である。ここで、群落上での大気安定度 ζ は次の式で求めた。

$$\zeta = \frac{z-d_0}{L}$$

L はモニン-オブコフ長であり、以下の式で求めた。

$$L = \frac{-Tu_*^3}{kg(\overline{w'T'} + 0.61\overline{w'q'})}$$

ここで、 T は観測高度での気温、 g は重力加速度である。 $\overline{w'T'}$ は測定値からの測定値を入れた。 $\overline{w'q'}$ は、鉛直風速と比湿の共分散であり、 $\overline{w'\rho_v'}$ からの換算値を入れた。 d_0 は地面修正量であり、Monteith (1976) より次の式で求めた。

$$d_0 = 1.04h^{0.88} \quad (6.7)$$

ここで、 h は植生高度であり、この式はとうもろこしの植生に関して与えられたものである。また、 z_0 の決定には Toda and Sugita (2003) の方法に基づいて次のように行った。

まず、式(6.8)に示す風速鉛直プロファイル相似則の式の右辺を u^* に変形し、この相似則により各時間における u^* を求める。ただし、未知数である z_0 は値を変動させて与える。そして、測定値から計算した u^* と相似則から求められる u^* の RMS 誤差の最も小さいときの z_0 を真値とした。また、 z_{0h} の決定に関しても同様の方法を用いて、式(6.9)に示す $\overline{w'T'}$ の対数則の式から、 z_0 と同じ様に z_{0h} を決定した。

$$U = \frac{u_*}{k} \left[\ln\left(\frac{z-d_0}{z_0}\right) - \Psi_m(\zeta) \right] \quad (6.8)$$

$$\overline{w'T'} = \frac{T_s - T_a}{u_*k} \left[\ln\left(\frac{z-d_0}{z_{0h}}\right) - \Psi_h(\zeta) \right] \quad (6.9)$$

ここで、 T_s 、 T_a は群落面および測定高度における気温である。 T_s は、長波放射の測定値から熱収支法により求めた。なお、Toda and Sugita (2003) による方法は、フラックスや風速の小さい条件で

は誤差が出やすいとされており、この解析については次のデータ選別を行った；①大気安定度： $\zeta < 0$ ，②主風向の風速： $U > 1$ [m/s]，③風向がオープンパスアナライザーの方向から吹いているもの以外を使用，④顕熱フラックス（渦相関法計算値）： $H > 10$ [W/m²]，⑤温度差： $T_s - T_a > 3$ [°C]。⑤に関しては、 z_{oh} の決定時にのみ用いた。

3. 結果

3.1 スペクトル解析結果

理想的な乱流データのスペクトルは、相似則と同様にベクトル量、スカラー量共に、スペクトルは互いに相似な形、つまり、低周波側で1乗則、高周波側-2/3乗則に沿った「への字」形になる（Asia Flux 運営委員会，2003）とされている。まず、8月9日7:00～7:30の30分間のスペクトル解析結果を図11.1～11.6に示す。それぞれのグラフを見ると、全体として高周波域において-2/3乗則（ここでは傾き-2/3）に乗っており、観測データが良く取れていると見られる。しかし、特に高周波域においてデータ数が多いため、横軸において0.25ごとに区切って、縦軸・横軸それぞれ平均することにより平均化したグラフを作った。そして、線形化した解析結果10回分とその平均をとったグラフを図12.1～12.6に示す。線形化して、更にもその中の平均を出しても、全てのスペクトルにおいて高周波域では傾きがほぼ-2/3に乗っており、またノイズ等を示す傾向も見られなかったため、データの信頼性があることが確認できた。しかし、低周波域においては、解析結果において形がバラバラになっているものが多く、平均化すると、理想である傾き1の形にならないものがほとんどである。Kaimal and Finnigan (1994)によると、大気安定度によって解析結果のピークが違い、低周波域でのスペクトルの形が異なり、特に不安定条件においては系統的でない形になることが示されている。実際、それぞれ一つ一つの線形を確認していくと、ピークは違うものの、そのほとんどはピーク後に傾き1を示していることが分かる。また、風速鉛直方向 w についてのスペクトルにおいては、低周波域でもそれぞれの値におけるばらつきが小さく、平均のグラフでも傾きが1を示している。Kaimal and Finnigan (1994)においても、風速鉛直成分に関しては、不安定時でも系統的な傾向を示しており、大気安定度による影響が小さい結果となっている。

3.2 熱収支・放射収支

まず、4成分放射収支計で測った各放射量および正味放射量を示す放射収支の時系列を図13.1に示した。この地点では、日射（下向き短波放射）が最大で1000 W/m²に達するなど大きく出ており、正味放射量も比較的大きいことが分かる。また、ほぼ毎日天気は変わらず、晴天が続いていたこともあり、放射量は毎日ほぼ同じような周期で変化していた。ただし、日中における短波放射の時系列で変動が激しい日があるのは、雲による影響であると考えられる。

次に、観測期間（2009年8月7日14:00～15日9:00）における正味放射量 R_n 、顕熱フラックス H 、潜熱フラックス LE 、地中熱流量 G の時系列変化を図14.1に示す。ここで、正味放射量および地中熱流量は、4成分放射計における10分平均データを30分平均に換算したものをグラフ化した。顕熱フラックスおよび潜熱フラックスは、30分平均データを用いて渦相関法で求めた。

各フラックスの時系列を見ると、潜熱フラックスが非常に大きいことが分かる。毎日400 W/m²を超えており、大きいときは最大値が600 W/m²を超えるときもある。エジプト自体は乾燥地域であ

るが、顕熱・潜熱フラックスの量などに注目すると、今回の観測地点に関しては蒸発散の多い熱帯や湿潤気候などの熱収支に近い傾向にあることが分かる。エジプトは降水が極めて少ない地域であるが、今回の対象地域のような農業地域では膨大なナイル川の水源によって灌漑が行われ、降水がほぼ無いにも関わらず地表面での水分量が豊富であるため、このような傾向が現れたと考えられる。

次に、時系列による傾向に注目してみる。地中熱流量に関しては、この観測期間中、毎日ほぼ同じ日変化を示していた。顕熱フラックスに関しても、日変化による大きな差はあまり見られないが、9日に多少小さくなっていることや、潜熱フラックスが小さくなったときに若干大きくなるなど、正味放射量および潜熱フラックスと相互関係にあることが確認できた。潜熱フラックスに関しては、10日において 600 W/m^2 を超える大きな値を示し、次の日から減少傾向にあることが分かる。10日には、観測タワー付近での灌漑が行われたので、これにより地表面での水分量が上昇し、蒸発が促進されたということが推測できる。

3.3 放射温度計による表面温度

まず、放射温度計の測定精度を確認するためのキャリブレーション結果（図 15.1）により、測定結果を補正した。補正後の地表面温度・葉面温度の測定結果およびその変化幅を図 16.1～16.4 に示す。

それぞれのグラフを見てみると、地表面温度も葉面温度も気温と同様に山なりのグラフを示しており、平均値は共にほぼ同じ程度の値を示していた。また、変化幅にも注目してみる。葉面温度に関しては変化幅が小さく、平均値付近ではほぼ安定した値をとっていた。しかし地表面温度に関しては、昼頃には 50°C に届くほどの温度も記録していたり、また反対に昼頃でも 30°C を割ることもあるなど変化幅が大きいう特徴があった。この理由について考えてみると、まず葉面に関しては、常に直接日射が当たっており、比較的一様に温度が分布しやすくなっているからであると考えられる。反対に地表面は、群落に覆われているため日射が届きにくい。そのため、日射がずっと当たらなければ表面温度は上がりにくくなるので、日射がほとんど当たらないポイントに対して測定したものは低い値を示していたと思われる。また地表面では、群落の間から日射が入り込む部分もあり、元々地表面は葉面よりも温まりやすいので、そのポイントでは葉面よりも高い表面温度を示す。

放射温度計によって測定したこれらの表面温度を地表面温度・葉面温度の実測値として、モデルによって算出される地表面温度・葉面温度の推定値との比較を行った。

3.4 キャノピーアナライザーの結果

キャノピーアナライザーによる LAI の実測結果を表 4.1 にまとめた。これらは、観測タワー付近の群落下においてランダムにポイントを選んで測定したが、2回目の 2.17 を除けば、2.3～2.45 の範囲で安定した結果が得られた。そして、これらを平均してこの地点における LAI を 2.35 とした。

また、この 8 回とは別に、植生の薄いポイント、密集したポイントでも試験的に LAI を測定してみた結果、薄いところでは 1.81、密集したポイントでは 2.81 という結果が得られた。よって、観測ポイントにおける LAI としては、このとうもろこし畑において中程度の値を示していることが推測できる。この LAI は、主にモデルで使用する遮蔽因子の推定における参考値として用いた。

3.5 バルク係数

〈地表面におけるバルク係数〉

まず、地表面における粗度 z_0 は、(6.2) に畝の高さ $h_0=0.15$ を用いて $z_0=0.01875$ と決定した。また、(6.3)、(6.4) 式に $v=1.5 \times 10^{-5}$ 、 u^* は時系列の中間値 0.3 [m/s] を入力し、 $z_{0h}=7.83 \times 10^{-6}$ が得られた。これらの値から、(6.1) 式により $C_{Hg}=2.33 \times 10^{-3}$ を決定した。

〈群落面におけるバルク係数〉

まず、地面修正量 d_0 は、(6.7) 式に群落高度 $h=3.0$ [m] を用いて、 $d_0=2.7$ とした。

次に、 z_0 、 z_{0h} の決定に関してデータ選別を行った結果、データ数は z_0 に関しては 104 個、 z_{0h} に関しては 97 個となり、これらのデータを用いて解析を行った。まず z_0 に関して、(6.8) 式を用いて z_0 を変動させつつ u^* の観測値からの計算値と相似則による推定値を比較した結果、 z_0 と RMS 誤差の関係は図 17.1 のようになった。この図から分かるように、最も小さい誤差を示すのは $z_0=0.17$ となり、この値を粗度 z_0 として決定した。また、この粗度 $z_0=0.17$ を全てのデータに適用したときの u^* の観測値からの計算値と相似則による推定値の比較した結果をプロットしたところ、図 16.2 のようになり、全体としては相関がよくとれていることが分かる。つまり、選別条件でないデータに関しても相似則により推定が可能であることが分かった。選別データ以外のデータにおいては誤差の表れるものもあり、図 17.2 にそれらも表した (a~d)。それぞれのデータを確認してみると、まず a、b に関しては特別な値が見られなかった。c は、顕熱や風速が小さく、それによる誤差の可能性も考えられる。d に関しては、主風向の風向がオープンパスアナライザーの設置位置の方向からのものであったため、その影響である可能性もある。このように、全体的には良い相関が取れていたものの、様々な条件によって誤差が生じてしまう場合もある。しかし、この z_0 の決定に関しては比較的精度よく求められたと思われる。

次に、同じように z_{0h} に関して、 z_{0h} と RMS 誤差の関係を図 17.3 に表した。この結果から、 $z_{0h}=0.0028$ のときに $\overline{w'T'}$ の観測値からの計算値と対数則による推定値の誤差が最も低いことが分かり、この値を z_{0h} として決定した。同じように、 $z_{0h}=0.0028$ であるときの $\overline{w'T'}$ の観測値からの計算値と対数則による推定値の比較を選別データについて取ったのが図 17.4 である。この図を見ると、誤差は小さいものの、時系列での傾きにズレが生じていることが分かる。この原因としては、粗度に対する放射による影響が考えられる。粗度は放射の影響で時系列変化する可能性があり (Kubota and Sugita, 1994)、これにより、バルク係数やフラックスにも影響が及びうる。しかし、本研究では、モデルの中で表面温度などを推定するのでこれを考慮しなくてよい。そのため、今回は計算値と推定値の誤差が平均的に最も小さいものを真値として求めた。

4. 考察

4.1 モデル計算結果との比較

モデルにおける目的は、蒸発散量を蒸発量と蒸散量に分けることであるが、その値の信頼性をはかるため、計算モデルで算出したフラックスの結果 (8月8日 0:00~8月14日 24:00) と、渦相関法によって計算したフラックス (実測値) を比較してみた。モデルによって計算した顕熱・潜熱フラックスと、渦相関法から計算した実測値の時系列を図 18.1、18.2 に示し、またこのときの蒸発散量の時系列を図 19.1 に示す。まず顕熱フラックスについては、推定値が若干過大評価しているものの、

実測値とほぼ重なった曲線となっており、顕熱フラックスのみに関しては精度よく算出されているように思われる。潜熱フラックスの方を見てみると、日周期のグラフの形状としては問題無いものの、モデルの計算値が過小評価している日がある。特に8月10日以降の数日の日中のフラックスの値が実測値と大きな差が表れてしまっているところもある。この原因としては、時系列グラフの形状から、モデルにおける灌漑導水による土壌の給水が考慮されていないことが挙げられる。顕熱フラックスと潜熱フラックスは、相互に関係してくる要素であるので、片方のみが精度が良くても、信頼できる値を算出しているとは言い難い。また、時系列ではなくそれぞれの値を縦軸・横軸にプロットしたのが図 20.1, 20.2 であるが、時系列グラフの結果がとても反映されている。顕熱フラックスの方は、回帰直線の傾きも 1 を若干上回っているが、潜熱フラックスは、傾きが約 0.7 強となっており、全体として、モデル計算値は実測値の 7 割ほどの値となっているということが分かる。また、蒸発散量の時系列グラフを見ると、蒸散が蒸発を上回っており、蒸散量は蒸発量の約 3 倍となっていることが分かる。

このように、モデルにおけるフラックスの算出にはある程度の誤差が生じている。この原因を確かめるため、モデルにおいて算出された値と比較できるものを挙げてみた。

まず、モデルで算出されている土壌水分量と、土壌水分センサーにより測定している土壌体積含水率を比較してみた。時系列グラフ（図 21.1）を見てみると、初期条件として与えたところは同値であったものの、実測値ではコンスタントな日周期を示しているが、モデルの計算値では徐々に下降していった。このような違いが生じてしまう可能性としては、土壌の定数パラメータに問題があることが挙げられる。

また、地中熱流量についても比較してみた。時系列グラフ（図 22.1）を見てみると、日中において全体的にモデル計算値が実測値を若干上回っていることがわかる。この理由として、モデルにおける地中熱流量の計算は熱収支式によって、正味放射量・顕熱フラックス・潜熱フラックスの収支として算出されるため、潜熱フラックスの過小評価による影響であると推定できる。

そして、8月11日および8月13日において放射温度計によって測定した地表面温度および群落表面温度の比較も行った。この結果を図 23.1～図 23.4 に示す。まず群落表面温度について見ていくと、全体的にモデル推定値が実測値を過大評価しており、最大で約 5℃以上の違いが見られる。顕熱フラックスが日中に大きく出ていることとも関連付けられる。また地表面温度においては、若干実測値の方が大きな値として出ている。ただし、変化幅の範囲を考慮すると、ほぼ許容の温度を表しているものがほとんどである。

4.2 モデルの感度分析

前節で土壌パラメータの値に影響が出ている可能性が示唆されるなど、モデルの計算を行うにあたり、未知数の値により結果が大きく変化してくる可能性がある。そこで幾つかの未知項についてのモデルの感度分析を行った。感度分析を行うパラメータは、遮蔽因子 σ_f 、圃場容水量 w_k および透水係数 C_2 である。この値を変化させることにより、①蒸発散量に占める蒸発量の割合、および② IE （潜熱フラックス）における‘モデル推定値/実測値’である。この感度分析の結果を図 24.1～24.6 に示す。この結果により、どのパラメータがどの値に対してどれだけ影響を与えているのかが分かった。まず σ_f においては、この値が大きくなるほど蒸発散に占める蒸発の割合が小さくなり、総蒸発散量も増加することが分かった。 σ_f は、蒸発散全体、特に蒸散量に大きく関わっていることが分かった。 w_k

においては、この値が大きくなるほど蒸発散量に占める蒸発の割合が小さくなり、総蒸発散量も減少することが分かった。また w_k の変化によって蒸散量がほとんど変化しなかったことから、主に蒸発量に対して影響を及ぼしていることが分かった。 C_2 においては、この値が大きくなるほど蒸発散に占める蒸発の割合も、総蒸発散量も増加することが分かったが、変動幅としては他のパラメータよりも小さいものだった。

感度分析により、各パラメータによるフラックスの変動具合が分かったとともに、土壌パラメータをはじめとする未知項の正確な決定が、フラックスを算出する上で重要であることが分かった。

5. 結論

まず、スペクトル解析の結果から、風速 3 成分・気温・二酸化炭素濃度・水蒸気濃度の観測においてノイズなどは見られず、サンプリング周波数や平均化時間が適切であったことが確認できた。つまり、データのサンプリングが適切に行われたことが分かった。

次に、渦相関法によるフラックスを示した熱収支時系列の結果から、この観測地点では熱収支全体として潜熱フラックスが大きいことが示されており、つまりこの農地における蒸発散量が多いということが分かった。また、観測地点において灌漑が行われた日、およびそれ以降 1、2 日は潜熱フラックスが大きくなっており、灌漑による影響も見られた。

また今回、群落のある地表面における計算モデルを用いてフラックスおよび蒸発散量を蒸発量と蒸散量に分けて算出した。このモデル推定値における蒸発量と蒸散量の比はおよそ 3:7 ほどであった。モデルの精度を確認するため、モデルによって推定されたフラックスおよびその他比較可能な出力項目を、渦相関法の計算値や実測値と比較したところ、顕熱フラックスなど良く一致しているものもあれば、潜熱フラックスや群落葉面温度などある程度の誤差のある項目も見られた。つまり、モデルの計算によって、各パラメータに対しておおよその推定はできたものの、精度に対し若干課題が残った。特に潜熱フラックスに関しては、改善する余地として、土壌における灌漑導水を考慮すること、および土壌関係のパラメータをはじめとする未知項の決定が重要となってくるだろう。そのための今後の課題として、土壌サンプルの採取・解析および灌漑導水を考慮したモデルの作成が求められる。

謝辞

本研究を行うにあたり、筑波大学大学院生命環境科学研究科の杉田倫明先生には、現地観測をはじめ、研究方法における丁寧なご指導など、たくさんの面で終始お世話になりました。大変感謝申し上げます。また、筑波大学大学院生命環境科学研究科水文学分野の諸先生方には、発表など機会のある度に貴重なご助言等いただきました。また、杉田研究室の院生の方々にはゼミでの貴重なご助言・ご意見のほか、本研究に対する励ましもいただきました。特に、宮野愛子氏には研究分野の細かい知識やプログラミングの方法など丁寧にご指導いただき、伊倉宏弥氏には GIS マップの作成にご協力いただきました。

本論文で用いた計算モデルの基本原理は、中川（1978）で用いた方法に基づいています。モデルの計算プログラムも、中川（1978）に掲載されたものを大いに参考にして作成しました。この論文は、研究方法の理解や、計算モデルの作成に大変役立つものでした。中川慎治氏には、貴重な論文を参考にさせて頂いたことを、この場を借りて感謝申し上げます。

エジプトでの現地調査では、JST-JICA 連携地球規模課題対応科学技術案件「ナイル流域における食糧・燃料の持続的生産」プロジェクトメンバーおよび、観測圃場を提供して下さった現地の農家の方々など多くの人の援助により観測が可能となり、様々な面で大変お世話になりました。また、筑波大学大学院生命環境科学研究科の藤巻晴行先生・志水勝好先生、カイロ大学の Dr.Rushdi には観測における協力・ご助言等いただきました。

田中久則氏・蓬田久俊氏をはじめとするクリマテック株式会社の方々には、観測機材の設置やトラブルへの対応、キャリブレーションなど様々な場面でご協力いただきました。

また、筑波大学第一学群自然学類水文分野の皆様の存在は、研究を続けるにあたって大きな励みになりました。

以上の方々をはじめとする、本研究に対して応援して下さいました全ての方々に、この場を借りて心から御礼申し上げます。

参考文献

- 北村義信・渡辺紹裕・新保義剛（1994）：エジプトの水資源と灌漑排水. 農工研技報, 189, 75-99.
- 近藤純正（2000）：「地表面に近い大気の科学 ー理解と応用ー」. 東京大学出版会, pp.324.
- 佐々木リサ（2004）：モンゴル・ヘルレン川流域における水循環に伴う安定同位体比変動プロセス.
筑波大学大学院環境科学研究科修士論文. pp.57.
- 杉田倫明・田中正（2009）：「水文科学」. 共立出版, pp.275.
- 中川慎治（1978）：地理学・水文学特別研究 植生のある地表面からの蒸発散に関する研究. 筑波大学大学院博士学位論文, pp.121.
- 中川慎治（1984）：蒸発散に占める土壌面蒸発量の評価.地理学評論. 57(Ser.A), 652-662.
- 畑明彦（2008）：砂漠の国エジプトと水資源. *Civil Engineering Consultant*, 238, 62-65
- 渡辺紹裕・新保義剛・丸山利輔（1994）：エジプト・ナイルデルタの水田稲作. 農業土木学会誌, 62, 109-114.
- 山本晴彦・鈴木義則・早川誠而（1995）：プラントキャノピーアナライザーを用いた作物個体群の葉面積指数の推定. 日本作物学紀事, 64, 333-335.
- Asia Flux 運営委員会（2003）：陸域生態系における二酸化炭素等のフラックス観測の実際. 国立環境研究所 地球環境研究センター, pp.117.
- Bastiaanssen, W. G. M., Van der Wal, T. and Visser, T. N. M. (1996) : Diagnosis of regional evaporation by remote sensing to support irrigation performance assessment. *Irrigation and Drainage Systems*, 10, 1-23.
- Bhumralkar, C. M. (1975) : Numerical experiments on the computation of ground surface temperature in an atmospheric general circulation model. *J. Appl. Meteorol.*, 14, 1246-1258.
- Brusaert, W. (1982) : Evaporation into the atmosphere. D. Reidel Pub. Co.,pp. 299.
- Deardorff, J.W. (1978) : Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. *J Geophys.Res.*, 83, 1889-1903.
- Kaimal, J. C., Finnigan, J.J. (1994) : Atmospheric Boundary Layer Flows. Oxford University Press. pp.289.
- Monteith, J. L. (1976) : Vegetation and the Atmosphere. Academic Press, pp.298.
- National Water Resource Plan (2005) : Water for the Future. Ministry of Water Resources and Irrigation, pp.268
- Omar, M. H., Mehanna, A. M (1984) : Measurement and estimates of potential evapo-transpiration over Egypt. *Agric. For. Meteorol.*, 31, 117-129.
- Toda, M., Sugita, M. (2003) : Single level turbulence measurements to roughness parameters of complex terrain. *J. Geophys. Res.*, 108(D12), 4363, doi:10.1029/2002JD002573.

付録

<計算プログラム>

付録として、今回用いたモデルの計算プログラムを掲載する。プログラミングには、**fortran77** を用いた。このプログラムは一日単位で作成したもので、これは 2009 年 8 月 8 日のものである。

```
C ***** CALCULATION OF SURFACE FLUXES *****
C
C ***** FILE NAME IS NASOS *****
C
dimension ALFAG(200),SDH(200),SUH(200),SGD(200)
dimension RLHU(200),RLGD(200),RLGU(200),HSF(200)
dimension SGU(200),RLHD(200),HSG(200),HSH(200)
dimension RS(200),RA(200)
dimension EF(200),ETR(200),EH(200),EG(200),RAWA(200)
dimension TA(200),TAF(200),TG(200),QA(200),UA(200)
dimension WLDEW(200),W2(200),WG(200)
dimension P(200),TF(200),QF(200),QG(200),QAF(200)
dimension ESG(200),T2(200),G(200)
dimension EFH(24),EGH(24),EHH(24)
dimension RNF(200),RNG(200),RNFH(24),RNGH(24)
dimension SDHH(24),SUHH(24),RLHDH(24),RLHUH(24)
dimension SGDH(24),SGUH(24),RLGDH(24),RLGUH(24)
dimension LEF(200),LEH(200),LEG(200)
dimension LEFH(24),LEHH(24),LEGH(24)
dimension GH(24)
dimension HSFH(24),HSHH(24),HSGH(24)
dimension TIME(144)
dimension AF(150),ZENITH(150)
dimension US(150),RAC(150),RSC(150)
dimension TAM(24),TGM(24),TFM(24),TAFM(24),T2M(24)
dimension UG(150),RG(150)
dimension ANTEIDO(48),ANTEI(150)
dimension RSS(150),CHGH(50),CHGE(50),CHG(150)
C
CHARACTER STABLEP(48)*10
INTEGER ANTEIDO,ANTEI
```

```
REAL N,L
REAL LEF,LEH,LEG,LEFH,LEGH,LEHH
C
C ***** INPUT PARAMETERS *****
C
```

```
SIGMAF=0.85
KRIKA=1
WWILT=0.1
WLDMAX=0.1*SIGMAF
WMAX=0.48
WK=WMAX/1.33
RAWW=1.
SMAX=87.19
CH0=0.0023
EPF=0.95
EPG=0.95
TAW1=24
CP=0.24
D1D=0.1
D2D=0.5
D1=0.6
D2=D1*19.1
SIGMA=4.8792E-9
PAI=3.1415926
C1=2.*SQRT(PAI)
C2=2.*PAI
DT=1./6.
CC2=0.9
```

```
C
C ***** INITIAL CONDITION *****
C
```

```
T2(1)=298.0
TF(1)=295.0
TG(1)=296.0
TAF(1)=295.0
QAF(1)=0.015
QF(1)=0.015
QG(1)=0.0151
```

```

N=7.*SIGMAF
KT=144
WG(1)=0.263
w2(1)=0.313
WLDEW(1)=0.0
OPEN (95,file='TIMEE.txt')
READ(95,*)(TIME(J),J=1,144)

DO 9999 KURI=1,KRIKA
OPEN(75,file='idm.txt')
READ(75,*)ID,M
1201 FORMAT(2I2)
5000 FORMAT(1H1)
4300 FORMAT('MONTH ; ',I2,3X,'DAY ; ',I3)
5300 FORMAT('SIGMAF = ',F5.2)
      close(75)
C
C      *****   BOUNDARY CONDITIONS   *****
C
      open(85,file='bulk_coe220_28.txt')
      READ(85,*)(rac(I),I=1,144)
      open(45,file='us_220.txt')
      read(45,*)(us(I),I=1,144)
      open(55,file='e220_boundary.txt',status='old')
      READ(55,*)( SDH(I),I=1,KT)
      READ(55,*)(RLHD(I),I=1,KT)
      READ(55,*)( UA(I),I=1,KT)
      READ(55,*)( QA(I),I=1,KT)
      READ(55,*)( P(I),I=1,KT)
      READ(55,*)(TA(I),I=1,KT)
c      close(5)
c 1100 FORMAT()
c 1299 FORMAT()
      close(55)
      close(85)
C
      DO 110 J=1,KT
      TA(J)=273.16+TA(J)
      RAWA(J)=1.293E-3*(1.-QA(J)*0.378/1013.25)*(273.16/TA(J))

```

```

110 QA(J)=622.*QA(J)/(1013.25-0.378*QA(J))/1000.
    TAF(1)=(1.-SIGMAF)*TA(1)+SIGMAF*(0.3*TA(1)
&+0.6*TF(1)+0.1*TG(1))
C
    DDD=16.2
    CCC=3.1415926535/180.
    FAI=30.63
    TO=11.93
    FAI=FAI*CCC
    DDD=DDD*CCC
    DO 555 IAB=1,144
    TTIME=(FLOAT(IAB)-0.5)/6.0
    TTT=(TO-TTIME)*15.*CCC
    ZZZ=ACOS( SIN(FAI)*SIN(DDD)+COS(FAI)*COS(DDD)
&    *COS(TTT))
    ZZZ=ZZZ/CCC
    ZENITH(IAB)=ZZZ
    AF(IAB)=0.133*10.**((0.0034*ZZZ)
    ALFAG(IAB)=0.1395243*10.**((0.0034*ZZZ)
555 CONTINUE
C
    DO 173 IT=1,144
    RS(IT)=22.306-0.515*FLOAT(IT)+0.003*FLOAT(IT)**2
    RS(IT)=RS(IT)*100.
    RSS(IT)=RS(IT)
173 CONTINUE
C
C
C ***** 2-ND STEP *****
C
C ***** DETERMINATION OF ALFAG *****
C
    KE=144
C
C ***** ETC. *****
C
    open(6,file='2ron6_e220_bhei_def_.txt')
    WRITE(6,5010)

```

```

5010 FORMAT(/)
      WRITE(6,5019)
5019 FORMAT(/)
C
      DO 100 KA=1,KE
      KK=KA+1
      ALFAF=AF(KA)
      ra(ka)=ua(ka)/us(ka)**2
C
C      ***** DETERMINATION OF UAF *****
C
      2 UAF=0.83*SIGMAF*SQRT(CHH)*UA(KA)+(1.-SIGMAF)*UA(KA)
C
C      ***** DETERMINATION OF CF *****
C
      CF=0.01*(1.+0.3/UAF)
C
C      ***** DETERMINATION OF RS *****
C
      WS=0.9*W2(KA)+0.1*WG(KA)
      RS(KA)=2.0*100.*(SMAX/(SDH(KA)+0.03*SMAX)
&+(WWILT/WS)**2)
C
C      ***** DETERMINATION OF RDD *****
C
      CALL HUMI(TF(KA),QSATTF)
      IF(QAF(KA) .GT. QSATTF) GO TO 3
      DELTA=1.
      GO TO 4
      3 DELTA=0.
      4 RDD=1.-DELTA*(RS(KA)/(RA(KA)+RS(KA)))*(1.
&-(WLDEW(KA)/WLDMAX))**(2./3.)
C
C      ***** 3-RD STEP *****
C
      QF(KK)=RDD*QSATTF+(1.-RDD)*QAF(KA)
C
C      ***** 4-TH STEP *****
C

```

C ***** DETERMINATION OF QAF & QG *****

C

```
6 AD=AMIN1(1.,WG(KA)/WK)
CALL HUMI(TG(KA),QSATTG)
QAF(KK)=((1.-SIGMAF)*QA(KA)+SIGMAF*(0.3*QA(KA)
&+0.6*QF(KA))
&+SIGMAF*0.1*AD*QSATTG)/(1.-SIGMAF*0.1*(1.-AD))
QG(KK)=AD*QSATTG+(1.-AD)*QAF(KA)
```

C

C ***** DETERMINATION OF TAF *****

C

```
TAF(KK)=(1.-SIGMAF)*TA(KA)+SIGMAF*(0.3*TA(KA)
&+0.6*TF(KA)+0.1*TG(KA))
```

C

C ***** 5-TH STEP *****

C

C ***** DETERMINATION OF TF *****

C

```
L=597.0-0.6*(TF(KA)-273.16)
CALL DQDT(TF(KA),DTF)
CALL HUMI (TF(KA),QTTT)
chh=RAC(KA)-CH0
IF(chh.LT. 0) chh=0
CHF=RAWA(KA)*CP*chh*ua(ka)*360000.
CEF=RAWA(KA)* chh*ua(ka) *360000.
CCC=CHF/SIGMAF
AAA=CEF/SIGMAF
B1=EPF*EPG/(EPF+EPG-EPF*EPG)
B2=(EPF+2.0*EPG-EPF*EPG)/(EPF+EPG-EPF*EPG)
HSF(KA)=CHF*(TF(KA)-TA(KA))
EF(KA)=CEF*(QF(KA)-QA(KA))
Z=(1.-ALFAF)*SDH(KA)+EPF*RLHD(KA)+B1*SIGMA*TG(KA)**4
&-B2*EPF*SIGMA* TF(KA)**4-(HSF(KA)+L*EF(KA))/SIGMAF
XX=CCC+L*AAA*RDD*DTF +B2*EPF*SIGMA*4.*TF(KA)**3
TF(KK)=TF(KA)+Z/XX
```

C

C ***** 6-TH STEP *****

C

C ***** DETERMINATION OF RSCSD1 *****

C

TAWW=TAW1*3600.
RCG=0.2+WG(KA)
RC2=0.2+W2(KA)
RAMDAG=0.0002+0.0035*WG(KA)
RAMDA2=0.0002+0.0035*W2(KA)
D1G=SQRT(TAWW*RAMDAG/RCG)
D2G=SQRT(TAWW*RAMDA2/RC2)
RD=0.30*0.05*WG(KA)/W2(KA)
RSCSD1=RD*RCG*D1G+(1.-RD)*RC2*D2G

C

C ***** CALCULATION OF G *****

C

L=597.0-0.6*(TG(KA)-273.16)
SGD(KA)=(1.-SIGMAF)*SDH(KA)
RLGD(KA)=(1.-SIGMAF)*RLHD(KA)+SIGMAF*(EPF*SIGMA*TF(KA)
& **4+(1.-EPF)*EPG*SIGMA*TG(KA)**4)/(EPF+EPG-EPF*EPG)
CHSG=RAWA(KA)*CP*CH0*UA(KA)*360.*1000.
CESG=RAWA(KA)*CH0*UA(KA)*100.*3600.
HSG(KA)=CHSG*(TG(KA)-TA(KA))
EG(KA)=CESG*(QG(KA)-QA(KA))
RLGU(KA)=(1.-SIGMAF)*(EPG*SIGMA*TG(KA)**4+(1.-EPG)*
& RLHD(KA))+SIGMAF*(EPG*SIGMA*TG(KA)**4+(1.-EPG)*EPF*SIGMA
& *TF(KA)**4)/(EPF+EPG-EPF*EPG)
G(KA)=(1.-ALFAG(KA))*SGD(KA)+RLGD(KA)-RLGU(KA)-HSG(KA)
& -L*EG(KA)

C

C ***** 7-TH STEP *****

C

C ***** DETERMINATION OF TG *****

C

CALL DQDT(TG(KA),DTG)
X1=C1*G(KA)/(RSCSD1)-C2*(TG(KA)-T2(KA))/TAW1
XX=C1*(4.*((1.-SIGMAF)+SIGMAF*EPF/(EPF+EPG-EPF*EPG))
& *EPG*SIGMA*TG(KA)**3+CHSG*(1.+AD*L/CP*DTG))/(RSCSD1)+C2/TAW1
TG(KK)=TG(KA)+X1/(1./DT+XX)

C

C ***** DETERMINATION OF T2 *****

C

```

T2(KK)=T2(KA)+DT*G(KA)/RSCSD1/19.1
C
C ***** 8-TH STEP *****
C
C ***** DETERMINATION OF ETR *****
C
IF(QAF(KA) .GT. QSATTF) GO TO 10
DELTA=1.
GO TO 11
10 DELTA=0.0
11 ETR(KA)=DELTA*N*RAWA(KA)*CF*UAF*(QSATTF-QAF(KA))*360.*
&(RA(KA)/(RA(KA)+RS(KA)))*(1.-(WLDEW(KA)/WLDMAX)
&**(.2/.3.))
C
C ***** DETERMINATION OF PG *****
C
IF(WLDEW(KA) .LT. WLDMAX) GO TO 12
PG=P(KA)
GO TO 13
12 PG=P(KA)*(1.-SIGMAF)
C
C ***** DETERMINATION OF WG *****
C
13 IF (WG(KA)/WMAX .GE. 0.75) GO TO 14
IF (WG(KA)/WMAX .GT. 0.15) GO TO 15
CC1=14.0
GO TO 16
14 CC1=0.5
GO TO 16
15 CC1=14.-22.5*((WG(KA)/WMAX)-0.15)
16 WG(KK)=WG(KA)+(-CC1*(EG(KA)+0.1*ETR(KA)-PG)/RAWW/D1D/
&100.
&-CC2*(WG(KA)-W2(KA))/TAW1)/(CC2/TAW1+1./DT)
C
C ***** DETERMINATION OF WG *****
C
W2(KK)=W2(KA)-DT*(EG(KA)+ETR(KA)-PG)/RAWW/D2D/100.
C
C ***** DETERMINATION OF WLDEW *****

```

```

C
  WLDEW(KK)=WLDEW(KA)+DT*(SIGMAF*P(KA)-EF(KA)
& +ETR(KA))/100.
  IF(WLDEW(KK) .GT. 0.0) GO TO 17
  WLDEW(KK)=0.0
C
C ***** 9-TH STEP *****
C
C ***** DETERMINATION OF FLUXES *****
C
17 HSH(KA)=HSG(KA)+HSF(KA)
  EH(KA)=EG(KA)+EF(KA)
  SUH(KA)=(1.-SIGMAF)*ALFAG(KA)*SDH(KA)+SIGMAF
& *ALFAF*SDH(KA)
  RLHU(KA)=(1.-SIGMAF)*(EPG*SIGMA*TF(KA)**4+(1.-EPG)
&*RLHD(KA))+SIGMAF*(EPF*SIGMA*TF(KA)**4+(1.-EPF)*RLHD(KA))
  SGU(KA)=ALFAG(KA)*(1.-SIGMAF)*SDH(KA)
  SGD(KA)=(1.-SIGMAF)*SDH(KA)
100 CONTINUE
C
  DO 200 I=1,144
  RNF(I)=SDH(I)-SUH(I)+RLHD(I)-RLHU(I)
  RNG(I)=SGD(I)-SGU(I)+RLGD(I)-RLGU(I)
  EH(I)=EH(I)*10.
  EF(I)=EF(I)*10.
  EG(I)=EG(I)*10.
  TA(I)=TA(I)-273.16
  TAF(I)=TAF(I)-273.16
  T2(I)=T2(I)-273.16
  TF(I)=TF(I)-273.16
200 TG(I)=TG(I)-273.16
  DO 351 J=1,144
  L=597.0-0.6*TF(J)
  LEF(J)=EF(J)*L/10.
  L=597.0-0.6*TG(J)
  LEG(J)=EG(J)*L/10.
  LEH(J)=LEF(J)+LEG(J)
351 CONTINUE
  CALL TOTALM(TA,TAM)

```

```

CALL TOTALM(TG,TGM)
CALL TOTALM(TF,TFM)
CALL TOTALM(TAF,TAFM)
CALL TOTALM(T2,T2M)
CALL TOTAL (EF,EFH,TEF)
CALL TOTAL (EG,EGH,TEG)
CALL TOTAL1(SGD,SGDH,TSGD)
CALL TOTAL1(SGU,SGUH,TSGU)
CALL TOTAL1(RLGD,RLGDH,TRLGD)
CALL TOTAL1(RLGU,RLGUH,TRLGU)
CALL TOTAL1(SDH,SDHH,TSDH)
CALL TOTAL1(SUH,SUHH,TSUH)
CALL TOTAL1(RLHD,RLHDH,TRLHD)
CALL TOTAL1(RLHU,RLHUH,TRLHU)
DO 210 J=1,24
RNFH(J)=SDHH(J)-SUHH(J)+RLHDH(J)-RLHUH(J)
RNGH(J)=SGDH(J)-SGUH(J)+RLGDH(J)-RLGUH(J)
210 EHH(J)=EFH(J)+EGH(J)
TEH=TEF+TEG
TRNF=TSDH-TSUH+TRLHD-TRLHU
TRNG=TSGD-TSGU+TRLGD-TRLGU
CALL TOTAL1(LEF,LEFH,TLEF)
CALL TOTAL1(LEH,LEHH,TLEH)
CALL TOTAL1(LEG,LEGH,TLEG)
CALL TOTAL1(HSF,HSFH,THSF)
CALL TOTAL1(HSH,HSHH,THSH)
CALL TOTAL1(HSG,HSGH,THSG)
CALL TOTAL1(G,GH,TGH)
C
C ***** PRINT *****
C
WRITE(6,5000)
WRITE(6,5019)
WRITE(6,4300)M,ID
WRITE(6,5010)
WRITE(6,5300)SIGMAF
write(6,*)'wk=',wk,'cc2=',cc2
WRITE(6,5010)
C

```

C ***** RADIATION *****

C

```
WRITE(6,5200)
5200 FORMAT(' TIME',9X,'SHD',9X,'SHU',8X,'RLHD',8X,'RLHU'
&,9X,'SGD',9X,'SGU',8X,'RLGD',8X,'RLGU',11X,'G',/)
WRITE(6,5100)(TIME(J),SDH(J),SUH(J),RLHD(J),RLHU(J),
&SGD(J),SGU(J),RLGU(J),RLGD(J),G(J),J=1,144)
5100 FORMAT(1H ,F5.2,9F12.3)
```

C

C ***** TEMPERATURE & SPECIFIC HUMIDITY *****

C

```
WRITE(6,5010)
WRITE(6,5220)
5220 FORMAT(' TIME',10X,'TA',9X,'TAF',10X,'TF',10X,'TG',
&10X,'T2',10X,'QA',9X,'QAF',10X,'QF',10X,'QG',/)
WRITE(6,5120)(TIME(J),TA(J),TAF(J),TF(J),TG(J),
&T2(J),QA(J),QAF(J),QF(J),QG(J),J=1,144)
5120 FORMAT(1H ,F5.2,9F12.3)
```

C

C ***** FLUXES *****

C

```
WRITE(6,5010)
WRITE(6,5210)
5210 FORMAT(' TIME',9X,'HSH',9X,'HSF',9X,'HSG',10X,'EH',
&10X,'EF',10X,'EG',9X,'ETR',9X,'ALG',10X,'RA',10X,'RS',/)
WRITE(6,5110)(TIME(J),HSH(J),HSF(J),HSG(J),EH(J)
&,EF(J),EG(J),ETR(J),ALFAG(J),RA(J),RS(J),J=1,144)
5110 FORMAT(1H ,F5.2,7F12.3,3F12.4)
```

C

C ***** ETC.-3 *****

C

```
WRITE(6,5010)
WRITE(6,5250)
5250 FORMAT(' TIME',8X,'RAWA',7X,'WLDEW',10X,'W2',10X
&,'WG',11X,'P',
&7X,'ALFAG',7X,'ALFAF',6X,'ZENITH',10X,'UA',9X,'ETR',/)
WRITE(6,5150)(TIME(J),RAWA(J),WLDEW(J),W2(J),WG(J),
&P(J),ALFAG(J),AF(J),ZENITH(J),UA(J),ETR(J),J=1,144)
5150 FORMAT(1H ,F5.2,10F12.5)
```

```

C
C ***** PRINT 30-MINUTE AVERAGE *****
C
4321 WRITE(6,5010)
      WRITE(6,5710)
5710 FORMAT(1H , ' TIME',9X,'TAM',9X,'TGM',9X,'TFM',8X,
      &'TAFM',9X,'T2M',5X,'STABILITY',/)
      WRITE(6,5720)(TIME(3*I),TAM(I),TGM(I),TFM(I),TAFM(I),
      & T2M(I),STABLEP(I),I=1,48)
5720 FORMAT(1H ,F5.2,5F12.3,5X,A10)
C
C ***** PRINT 1-HOUR AVERAGE *****
C
      WRITE(6,5000)
      WRITE(6,5010)
      WRITE(6,5800)
5800 FORMAT(' TIME',8X,'RNFH',8X,'SDHH',8X,'SUHH',7X,
      & 'RLHDH',7X,'RLHUH',9X,'RNGH',7X,'SGUH',
      &6X,'RLGDH',6X,'RLGUH', 9X,'GH',/)
      WRITE(6,5900)(I,RNFH(I),SDHH(I),SUHH(I),RLHDH(I),RLHUH(I),
      &RNGH(I),SGDH(I),SGUH(I),RLGDH(I),RLGUH(I),GH(I),I=1,24)
5900 FORMAT(I5,5F12.3,2X,6F11.3)
      WRITE(6,5901)TRNF,TSDH,TSUH,TRLHD,TRLHU,TRNG,TSGD,
      & TSGU,TRLGD,TRLGU,TGH
5901 FORMAT(/,'TOTAL',5F12.3,2X,6F11.3)
      WRITE(6,5010)
      WRITE(6,5810)
5810 FORMAT(' TIME',9X,'EHH',9X,'EFH',9X,'EGH',/)
      WRITE(6,5910)(I,EHH(I),EFH(I),EGH(I),I=1,24)
5910 FORMAT(I5,3F12.3)
      WRITE(6,5911)TEH,TEF,TEG
5911 FORMAT(/,'TOTAL',3F12.3)
      WRITE(6,5010)
      WRITE(6,5820)
5820 FORMAT(' TIME',8X,'LEHH',8X,'LEFH',8X,'LEGH',8X,'HSHH',
      &8X,'HSFH',8X,'HSGH',/)
      WRITE(6,5920)(I,LEHH(I),LEFH(I),LEGH(I),HSHH(I),HSFH(I),
      &HSGH(I),I=1,24)
5920 FORMAT(I5,6F12.3)

```

```

WRITE(6,5921)/TLEH,TLEF,TLEG,THSH,THSF,THSG
5921 FORMAT(/,'TOTAL',6F12.3)
8888 T2(1)=T2(145)
      TF(1)=TF(145)
      TG(1)=TG(145)
      TAF(1)=TAF(145)
      QAF(1)=QAF(145)
      QF(1)=QF(145)
      QG(1)=QG(145)
      WG(1)=WG(145)
      W2(1)=W2(145)
      WLDEW(1)=WLDEW(145)
9999 CONTINUE
      STOP
      END
C
C ***** SUB-PROGRAM 1 *****
C
      SUBROUTINE HUMI(T3,Q)
      T1=273.16
      SV=10.**(10.79574*(1.-T1/T3)-5.028*ALOG10(T3/T1)
&+1.50475*10.**(-4)*(1.-10.**(-8.2969*(T3/T1-1.)))
&+0.42873*10.**(-3)*(10.**(4.76955*(1.-T1/T3))-1.)
&+0.78614)
      Q=622.*SV/(1013.25-0.378*SV)
      Q=Q/1000.
      RETURN
      END
C
C ***** SUB-PROGRAM 2 *****
C
      SUBROUTINE DQDT(TD,DD)
      TX=273.16
      SE=10.**(10.79574*(1.-TX/TD)-5.028*ALOG10(TD/TX)
&+1.50475*10.**(-4)*(1.-10.**(-8.2969*(TD/TX-1.)))
&+0.42873*10.**(-3)*(10.**(4.76955*(1.-TX/TD))-1.)
&+0.78614)
      DO=.6139*SE/TD/TD*(6790.5-5.02808*TD+4916.8*10.**
&(-0.304*TD)*TD**2+174209.*10.**(-1302.88/TD))

```

```

DD=DD/1000.
RETURN
END
C
C ***** SUB-PROGRAM 3 *****
C
SUBROUTINE TOTAL (C,AVEH,TC)
DIMENSION C(200),AVEH(200)
SUM=0.0
DO 500 KJ=1,24
SUM1=0.0
KZ=(KJ-1)*6+1
DO 501 KX=KZ,KZ+5
501 SUM1=SUM1+C(KX)
SUM=SUM+SUM1
500 AVEH(KJ)=SUM1/6.*24.
TC=SUM/144.*24.
RETURN
END
C
C ***** SUB-PROGRAM 4 *****
C
SUBROUTINE TOTAL1 (D,AH,TD)
DIMENSION D(200),AH(200)
SM=0.0
DO 502 KI=1,24
SM1=0.0
KD=(KI-1)*6+1
DO 503 KY=KD,KD+5
503 SM1=SM1+D(KY)
SM=SM+SM1
502 AH(KI)=SM1/6.
TD=SM/144.*24.
RETURN
END
C
C ***** SUB-PROGRAM 5 *****
C
SUBROUTINE TOTALM(DA,DM)

```

```
DIMENSION DA(200),DM(48)
DO 510 J=1,48
  JJ=(J-1)*3+1
  SS=DA(JJ)+DA(JJ+1)+DA(JJ+2)
  DM(J)=SS/3.0
510 CONTINUE
RETURN
END
```

表 1 観測項目

項目	測器	高度※	サンプリング時刻	平均化時間	ロガー出力時刻
風速 3 成分 u, v, w [m/s] 気温 T [°C]	超音波風速温度計 (GILL R3-50)	3.62 m	毎 0.1 秒	前 30 分	毎時 0 分, 30 分
水蒸気濃度 ρ_v [g/m ³] 二酸化炭素濃度 ρ_c [mmol/m ³]	オープンパスガスアナライザー (LI-COR, Inc., LI-7500)	3.62 m	毎 0.1 秒	前 30 分	毎時 0 分, 30 分
短波放射 $S^{\downarrow}, S^{\uparrow}$ [W/m ²] 長波放射 $L^{\downarrow}, L^{\uparrow}$ [W/m ²]	4 成分放射計 (CHF-NR01)	2.89 m	毎 5 秒	前 10 分	毎時 0, 10, 20, 30, 40, 50 分
気温 T_a [°C] 湿度 Rh [%]	温湿度計 (HMP45C)	2.73 m	毎 10 秒	前 10 分	毎時 0, 10, 20, 30, 40, 50 分
地中熱流量 G [W/m ²]	地中熱流板 (CPR-PHF-02)	-0.02 m	毎 5 秒	前 10 分	毎時 0, 10, 20, 30, 40, 50 分
土壌体積含水率 S_w [%]	土壌水分センサー (STEVENS Hydra Probe)	0.065 m	毎 10 秒	前 10 分	毎時 0, 10, 20, 30, 40, 50 分

※観測高度はとうもろこし畑の畝の高さを 0m とする.

表 2.1 データ異常値および補完項目

項目	期間	問題点	補完方法および使用データ
気温 T_a [°C]			
湿度 Rh [%]	8月8日 12:00	項目が3つ重複している	3つの内, 初めに記録されたものを使用した
気圧[hPa]			
土壌体積含水率[%]			
	8月12日 3:20~3:40		
	8月12日 4:50~10:40		
気圧[hPa]	8月12日 23:00	データが明らかに低い	前後のデータから内挿
	~8月13日 13:30		
	8月14日 20:40~22:20		
	8月14日 13:50		
風速3成分 u, v, w [m/s]			
水蒸気濃度 ρ_v [g/m ³]	8月8日 12:00	データの欠損	前後のデータから内挿
二酸化炭素濃 ρ_c [mmol/m ³]			
気温 T [°C]			

表 3.1 モデルにおける入力パラメータ

記号	意味	単位	値	時間ステップ
e	水蒸気圧 (測定高度)	hPa	測定値(相対湿度)から計算	10分
T_a	気温 (測定高度)	°C	測定値	10分
P	降水 (測定高度)	mm	測定値	10分
$L_h^↓$	下向き長波放射(測定高度)	W/m ²	測定値	10分
$S_h^↓$	下向き短波放射 (測定高度)	W/m ²	測定値	10分
u_a	水平風速 (測定高度)	m/s	測定値 (風速 u, v) から計算	10分
u^*	摩擦速度	m/s	測定値 (風速 u, v, w) から計算	10分

表 3.2 モデルにおける出力パラメータ

記号	意味	単位	時間ステップ
E_f	群落からの蒸散量	mm/hr	10分, 1時間
E_g	地表面からの蒸発量	mm/hr	10分, 1時間
E_h	蒸発散総量	mm/hr	10分, 1時間
G	地中熱流量	W/m ²	10分, 1時間
H_f	群落からの顕熱	W/m ²	10分, 1時間
H_g	地表面からの顕熱	W/m ²	10分, 1時間
H_h	顕熱フラックス総量	W/m ²	10分, 1時間
$L_f^↑$	上向き長波放射 (群落上)	W/m ²	10分, 1時間
$L_g^↓$	下向き長波放射 (地表面)	W/m ²	10分, 1時間
$L_g^↑$	上向き長波放射 (地表面)	W/m ²	10分, 1時間
$S_f^↑$	上向き短波放射 (群落上)	W/m ²	10分, 1時間
$S_g^↓$	下向き短波放射 (地表面)	W/m ²	10分, 1時間
$S_g^↑$	上向き短波放射 (地表面)	W/m ²	10分, 1時間
q_a	比湿 (測定高度)	kg/kg	10分
q_{af}	群落内平均比湿	kg/kg	10分
q_f	群落葉面比湿	kg/kg	10分
q_g	地表面比湿	kg/kg	10分
T_{af}	群落内平均気温	°C	10分
T_f	群落葉面温度	°C	10分
T_g	地表面温度	°C	10分
T_2	地中温度 (~ d_2 層での平均値)	°C	10分
w_g	地表水分量		10分
w_2	地中水分量 (~ d_2 層での平均値)		10分
α_f	群落面のアルベド		10分
α_g	地表面のアルベド		10分

表 3.3 モデルにおける初期条件

記号	意味	単位	値
q_{af}	群落内平均比湿	kg/kg	0.015
q_f	群落葉面比湿	kg/kg	0.015
q_g	地表面比湿	kg/kg	0.0151
T_{af}	群落内平均気温	K	295.0
T_f	群落葉面温度	K	295.0
T_g	地表面温度	K	296.0
T_2	地中温度 (～ d_2 層での平均値)	K	298.0
w_g	地表水分量		0.263
w_2	地中水分量 (～ d_2 層での平均値)		0.313

表 3.4 モデルにおける定数・係数

記号	意味	単位	値	reference
g	重力加速度	m/s ²	9.8	
k	カルマン係数		0.4	
σ	ステファン・ボルツマン定数	W/m ² ・K ⁴	5.67×10^{-8}	近藤 (2000)
τ_1	日周期	hr	24	Deardorff (1978)
σ_f	遮蔽因子 (群落による放射の遮蔽率)		0.55	キャノピーアナライザーによる光量子量の測定値より推定
c_1	定数		$2\pi^{1/2}$	Deardorff (1978)
c_2	定数		2π	Deardorff (1978)
C_2	定数		0.9	Deardorff (1978)
CH_0	熱・水分輸送係数 (地表面)		0.0023	観測値から算出
C_p	空気の定圧比熱	kJ/kg・K	1.006	中川 (1978)
d_1	土壌深度 (気温の日変化に影響を受ける)	m	0.6	Deardorff (1978)
d_2	土壌深度 (気温の年変化に影響を受ける)	m	11.46	Deardorff (1978)
d_1'	土壌深度 (湿度の日変化に影響を受ける)	m	0.1	Deardorff (1978)
d_2'	土壌深度 (湿度の年変化に影響を受ける)	m	0.5	Deardorff (1978)
ϵ_f	群落の射出率		0.95	中川 (1978)
ϵ_g	地表面の射出率		0.95	中川 (1978)

S_{max}	最大日射量	W/m^2	1014	$S_{h'}$ の最大観測値を使用
w_k	圃場容水量		$w_{max} / 1.33$	中川 (1978)
w_{max}	間隙率		0.48	中川 (1978)
W_{dmax}	W_{dew} (群落単位面積あたりに 残存する水分量)の最大値		$0.1\sigma_f$	Deardorff (1978)
W_{wilt}	しおれ点		0.1	中川 (1978)

表 4.1 LAI 観測データ (2009 年 8 月 12 日 19:10~19:40 頃に観測)

	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	6 回目	7 回目	8 回目
LAI	2.31	2.17	2.41	2.35	2.44	2.36	2.42	2.36

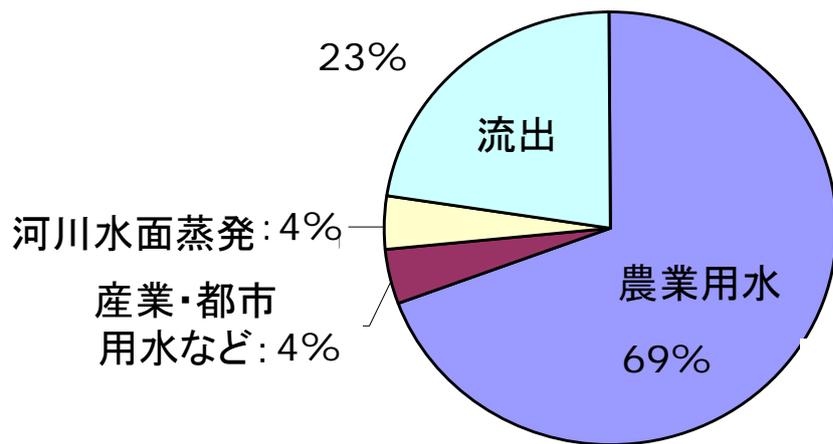


図 1.1 ナイル川流域全体における水利用の割合(National Water Resources Plan,2005)

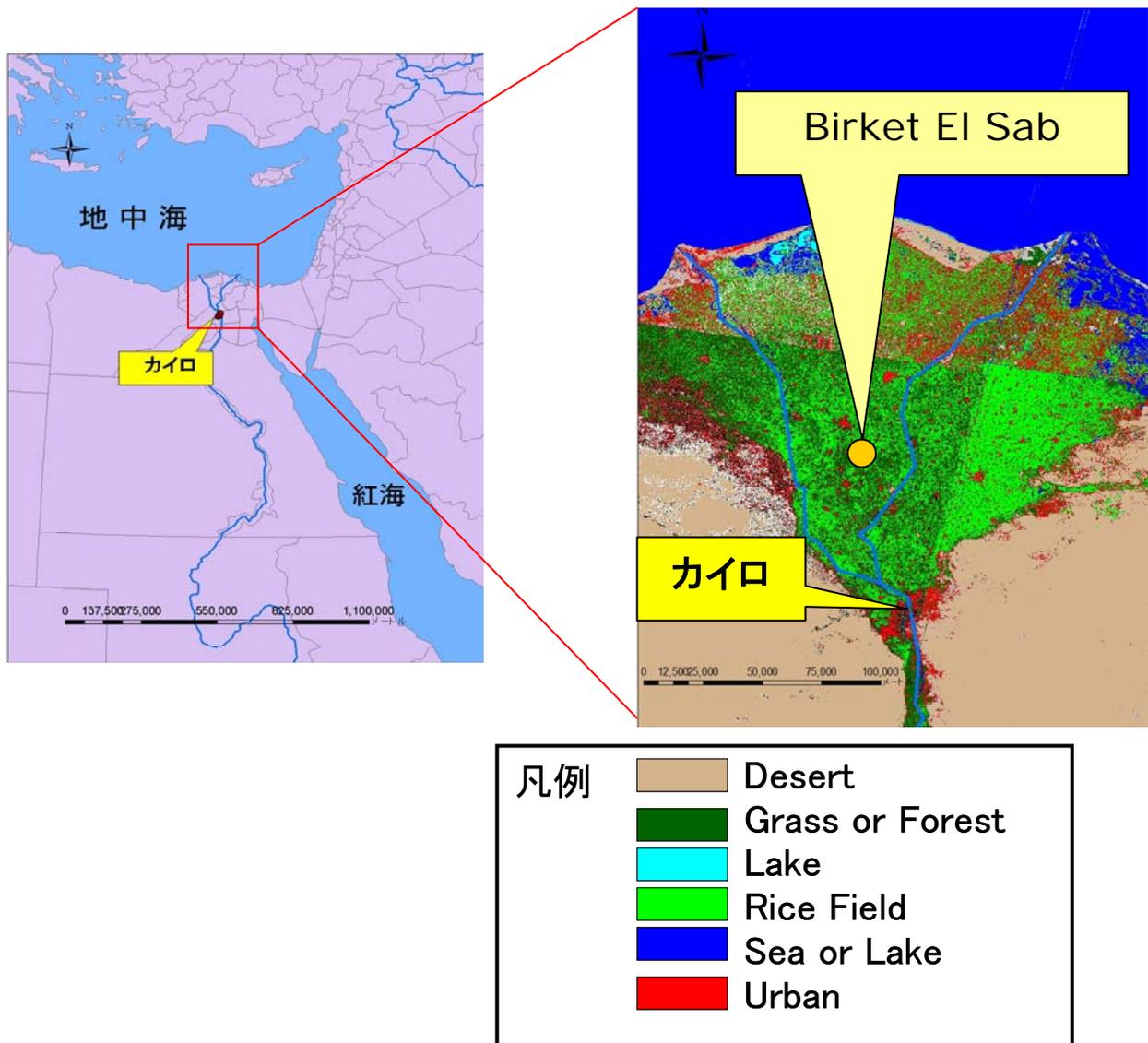


図 2.1 観測地点 (広域図)

左：エジプト全体とナイル川，右：ナイルデルタ（土地利用図）

左の図は，杉田（2009）によって作成されたものを GIS map に表したものである．右の図は Landsat-7 ETM+データを用いて土地分類を行ったデータを Arc GIS ver 9.3 に取り込み，マップ化したものである．



図 2.2 観測地点（周辺図）

■は観測圃場（圃場の外周は GPS データより）、■は集落・市街地、
■は道路、■はその他の農耕地、■は水路を示す
また、●と矢印は図 3.1 の撮影場所と撮影方向を示す



図 3.1 上から見たとうもろこし畑の様子（撮影日：2009年8月8日）



図 3.2 とうもろこし畑（撮影日：2009年8月8日）



図 4.1 ポンプによる灌漑水の揚水（撮影日：2009年8月10日）



図 4.2 メスカ（二次水路）を用いた灌漑の様子（撮影日：2009年8月8日）

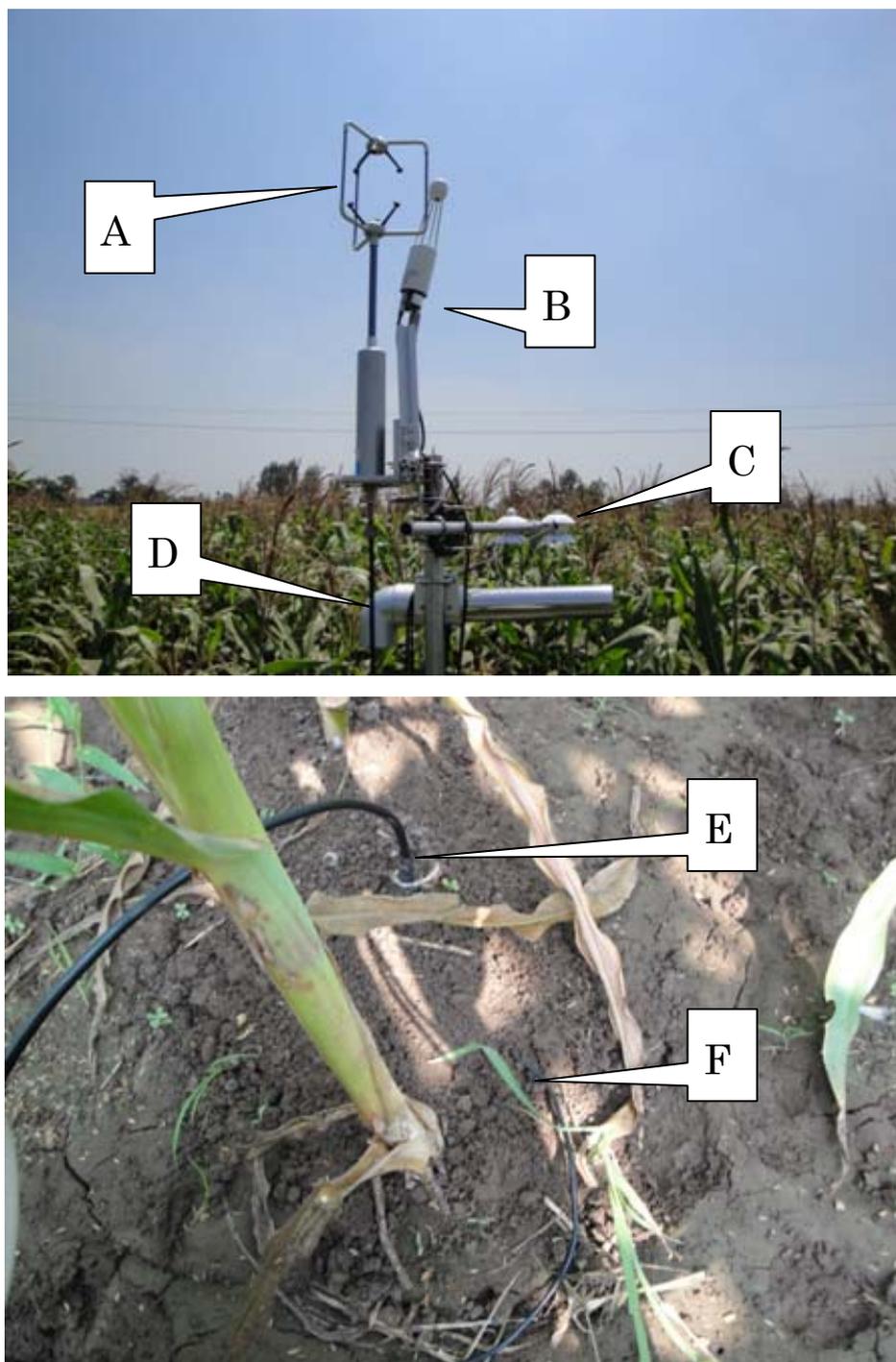


図 5.1 自動気象観測装置における各測器と設置状況
 (撮影日 上：2009年8月13日，下：2009年8月8日)

- A) 超音波風速計，B) オープンパスアナライザー
 C) 4成分放射収支計，D) 温湿度計
 E) 土壌水分センサー，F) 地中熱流板

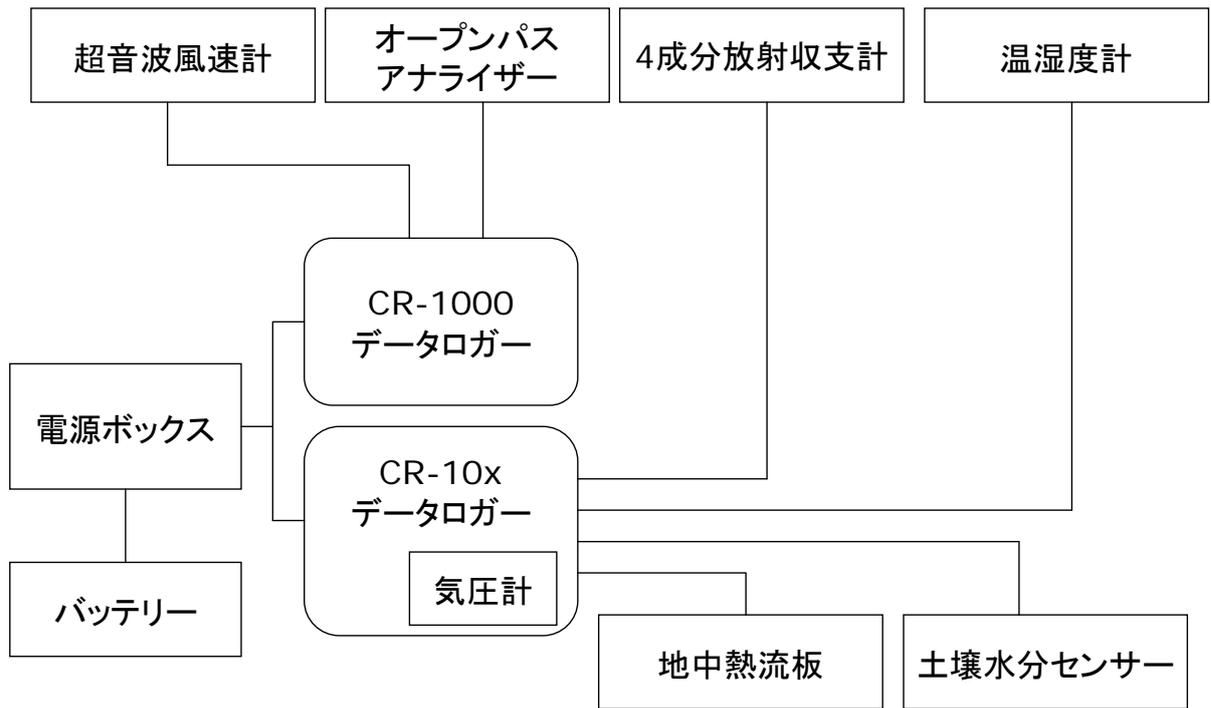


図 6.1 自動気象観測装置 (AWS) 配線状況



図 7.1 放射温度計による観測の様子（撮影日：2009年8月13日）

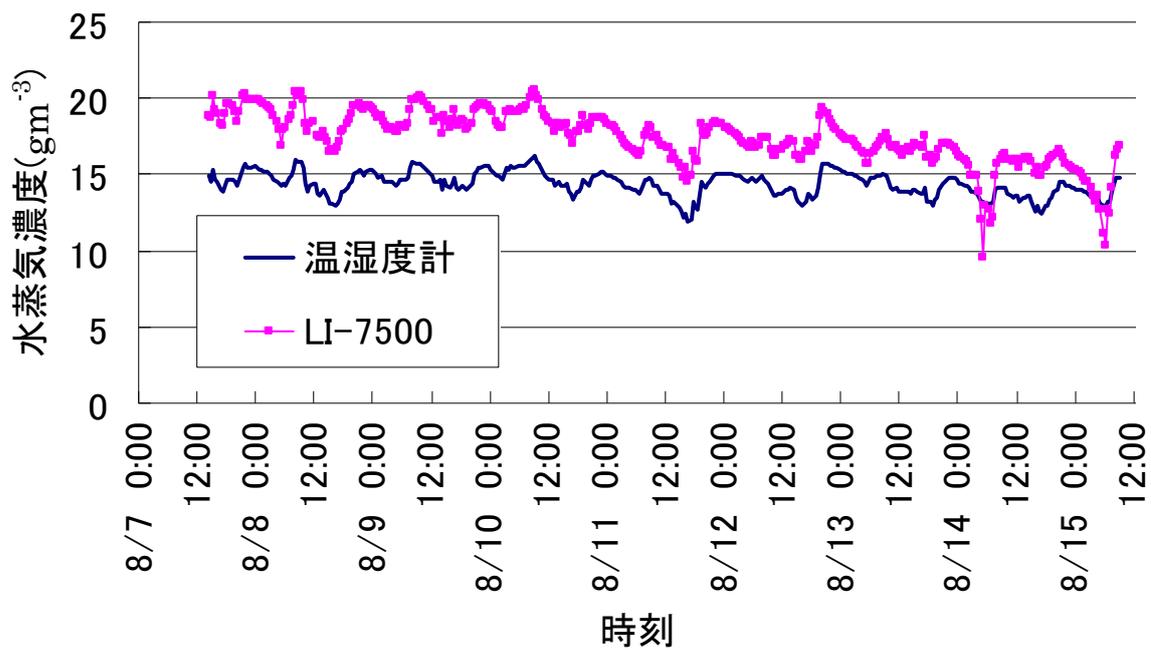


図 8.1 温湿度計およびオープンパスガスアナライザー (LI-7500) における水蒸気濃度の時系列
(2009年8月7日14:00~15日9:00)

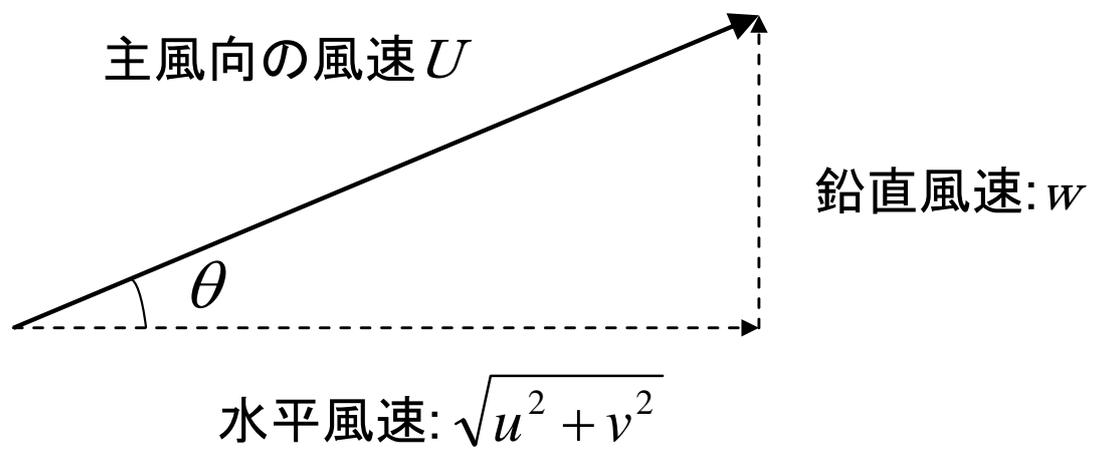


図 9.1 風速鉛直方向への変換角度

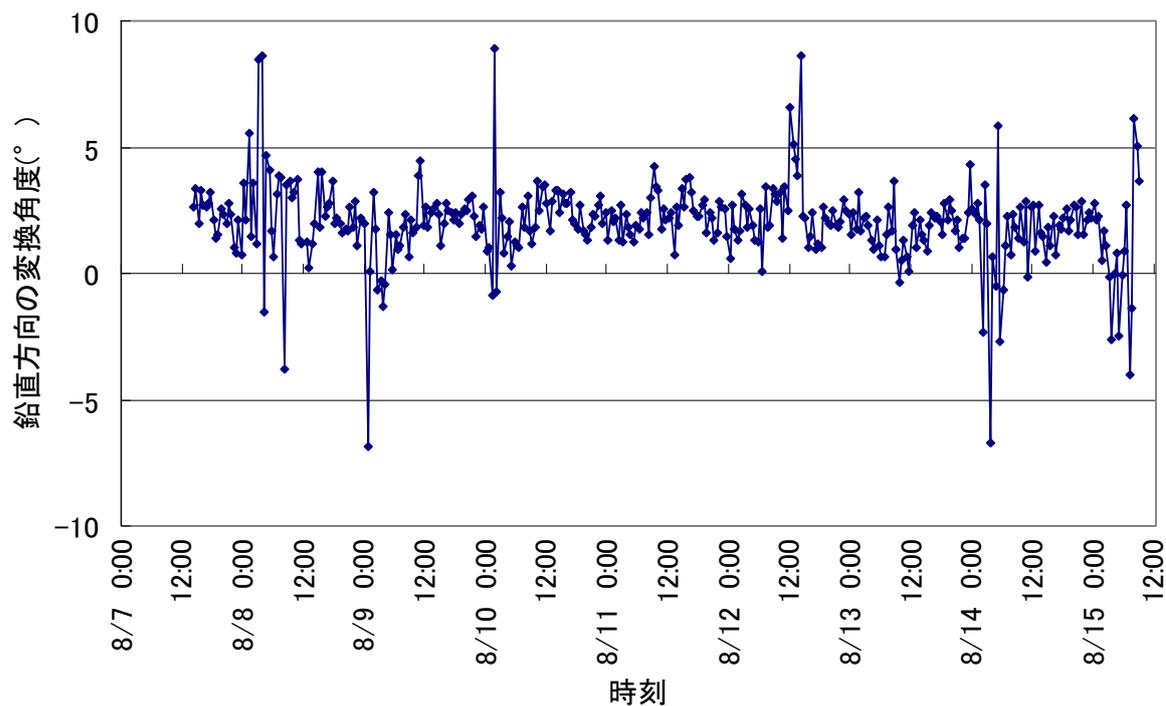


図 10.1 風速鉛直方向の座標変換角度の時系列 (8月7日 14:00~8月15日 9:00)

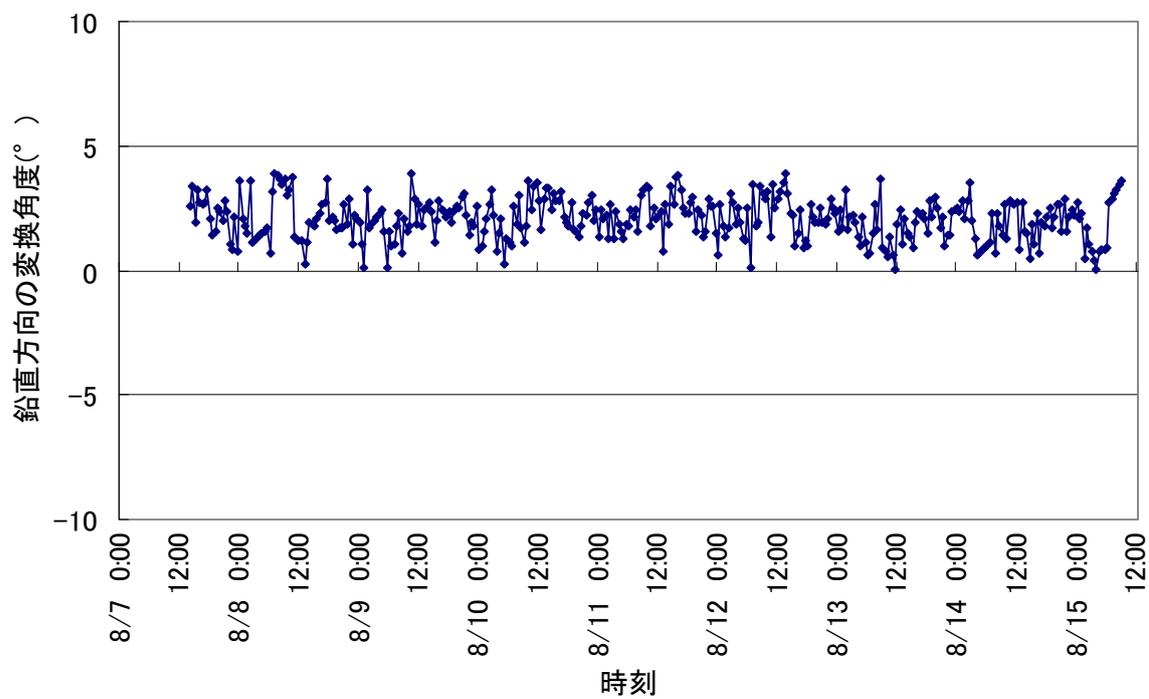


図 10.2 補完後の風速鉛直方向の座標変換角度の時系列 (8月7日 14:00~8月15日 9:00)

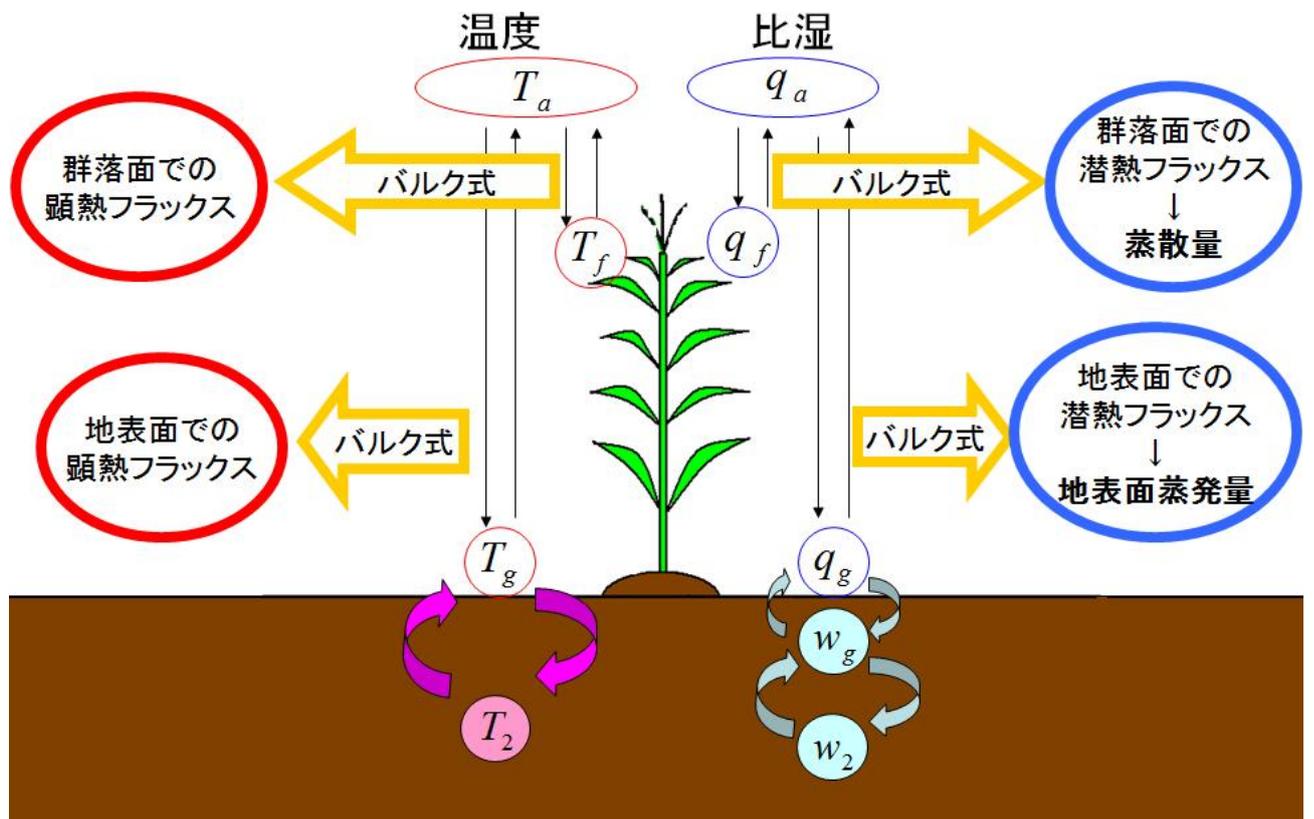


図 11.1 本研究で用いたモデルの概念図

Deardorff のモデル (Deardorff, 1978) を用いて各高度における温度・比湿を算出し、この値から、並列源モデル (近藤, 2000) の理論を用いてバルク式でフラックスを算出した。

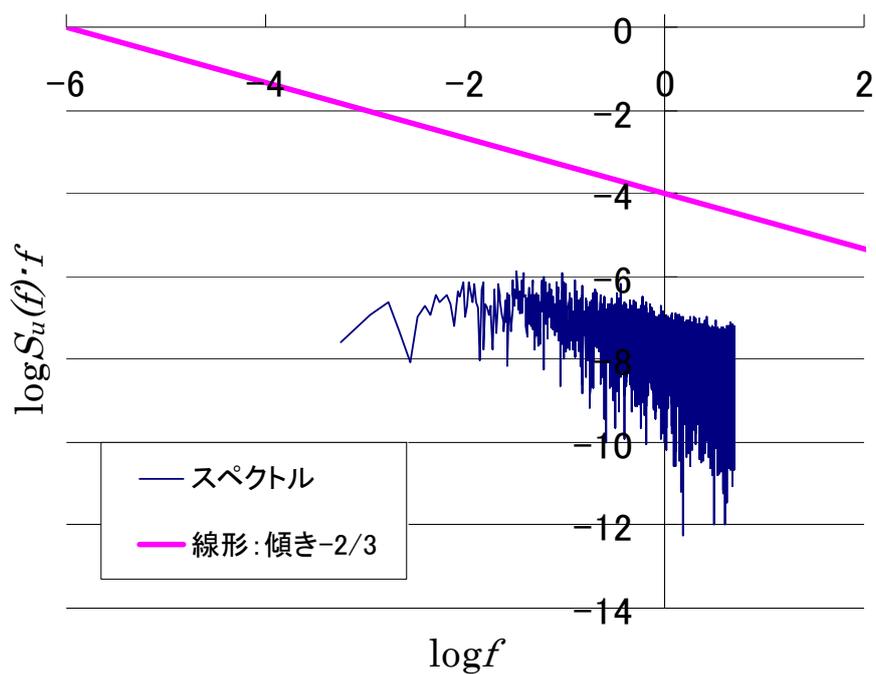


図 12.1 風速 x 成分 u に対するスペクトル解析結果 (8 月 9 日 13:00~13:30)

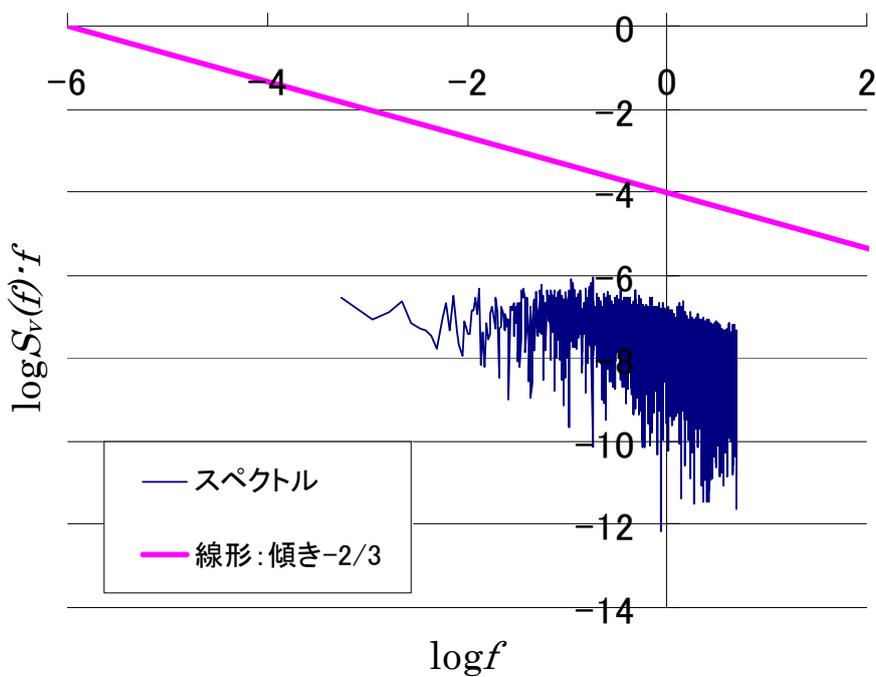


図 12.2 風速 y 成分 v に対するスペクトル解析結果 (8 月 9 日 13:00~13:30)

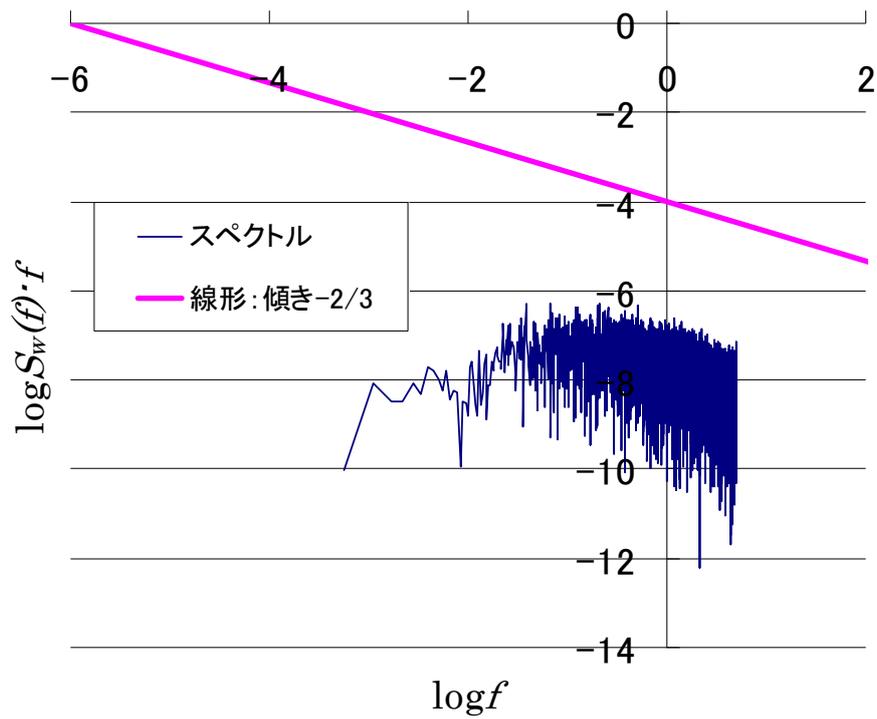


図 12.3 風速 z 成分 w に対するスペクトル解析結果 (8月9日 13:00~13:30)

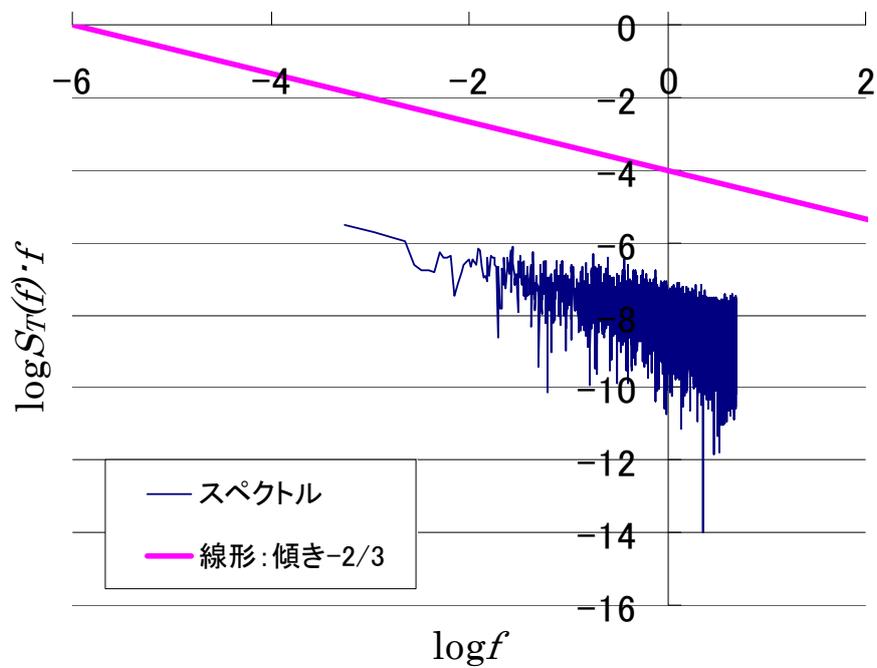


図 12.4 気温 T に対するスペクトル解析結果 (8月9日 13:00~13:30)

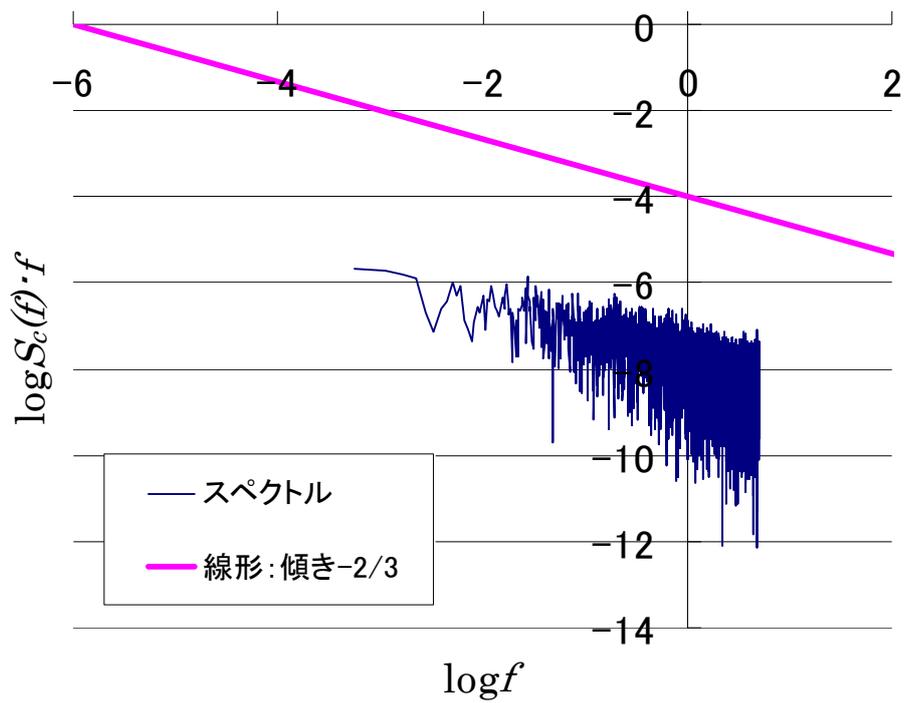


図 12.5 二酸化炭素濃度 c に対するスペクトル解析結果 (8月9日 13:00~13:30)

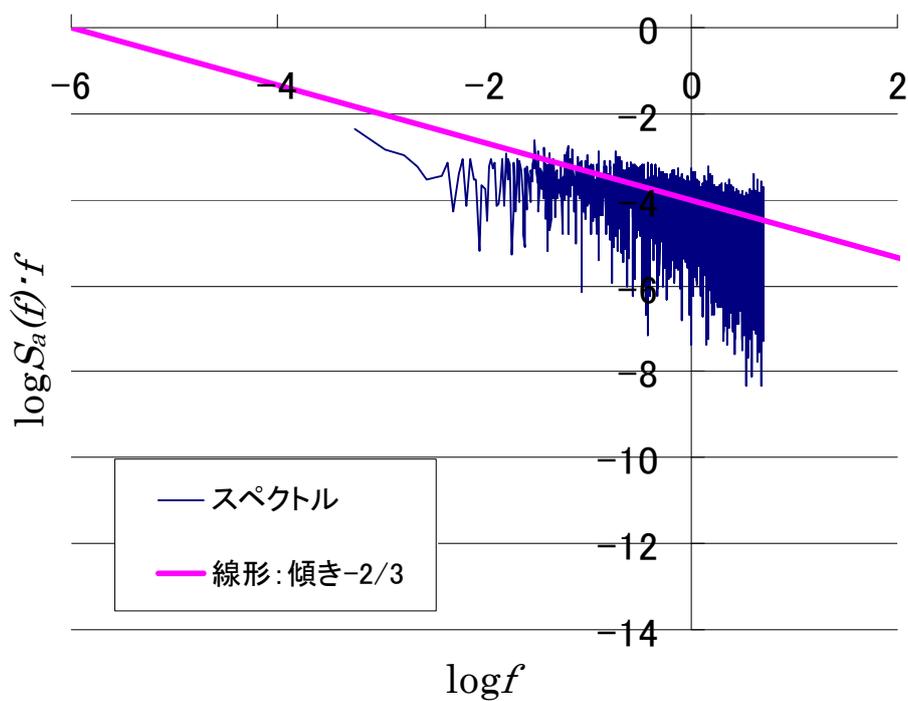


図 12.6 水蒸気濃度 a に対するスペクトル解析結果 (8月9日 13:00~13:30)

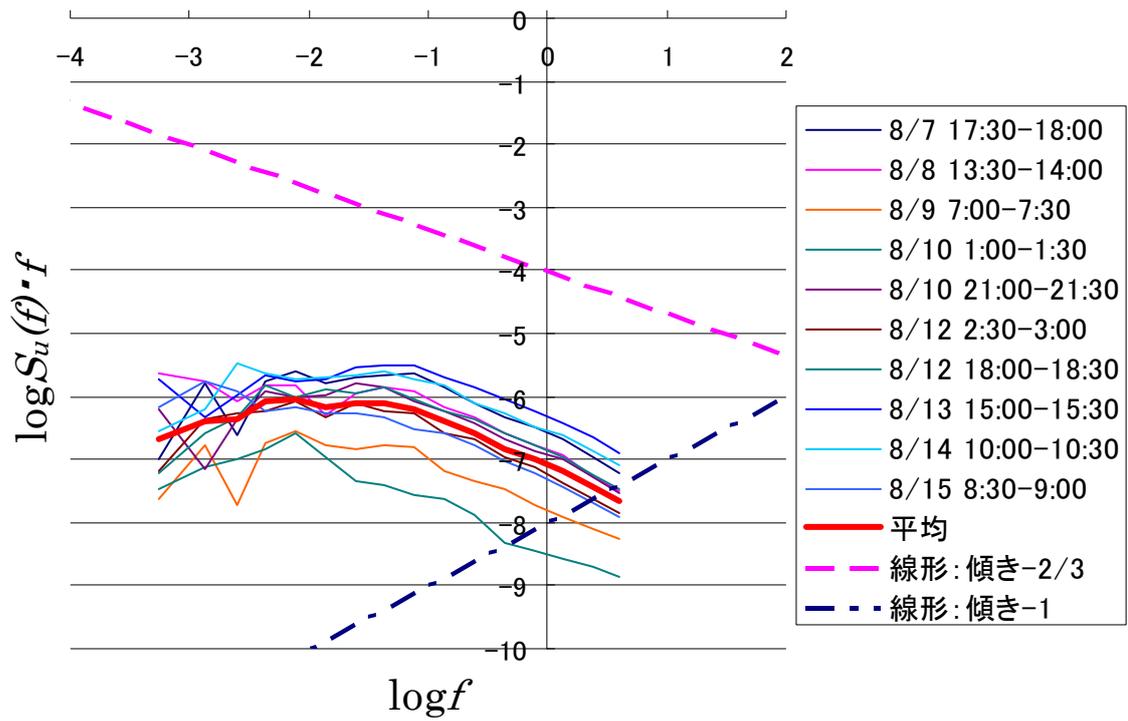


図 13.1 風速 x 成分 u に対するスペクトル解析結果

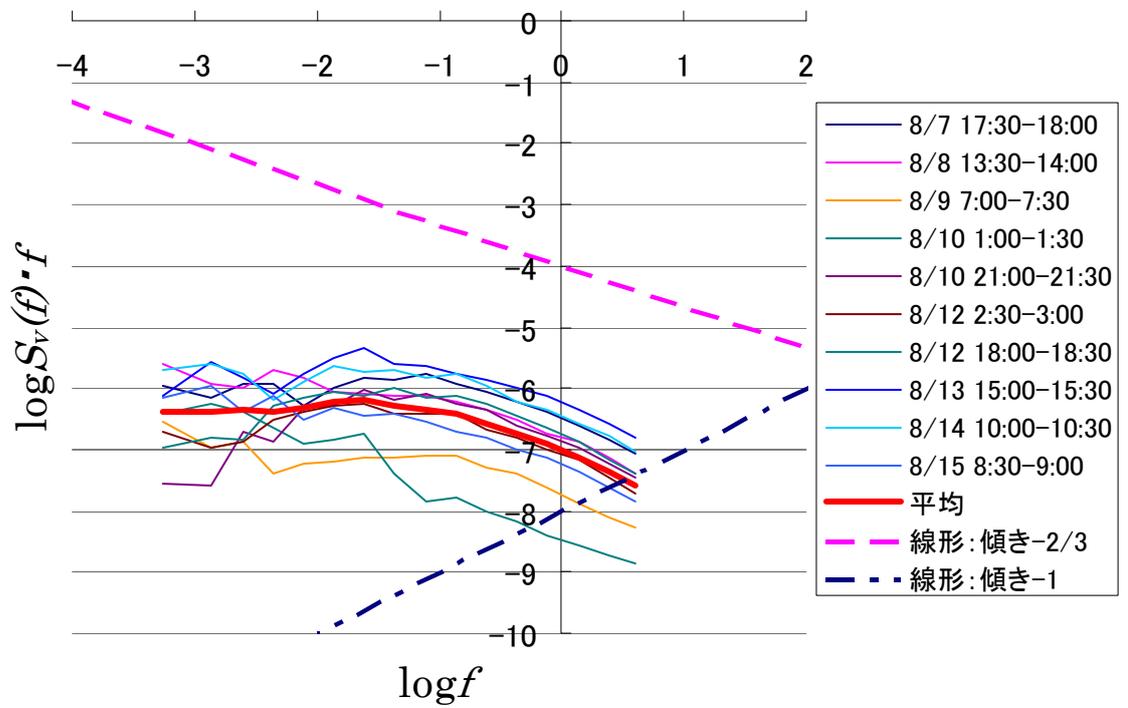


図 13.2 風速 y 成分 v に対するスペクトル解析結果

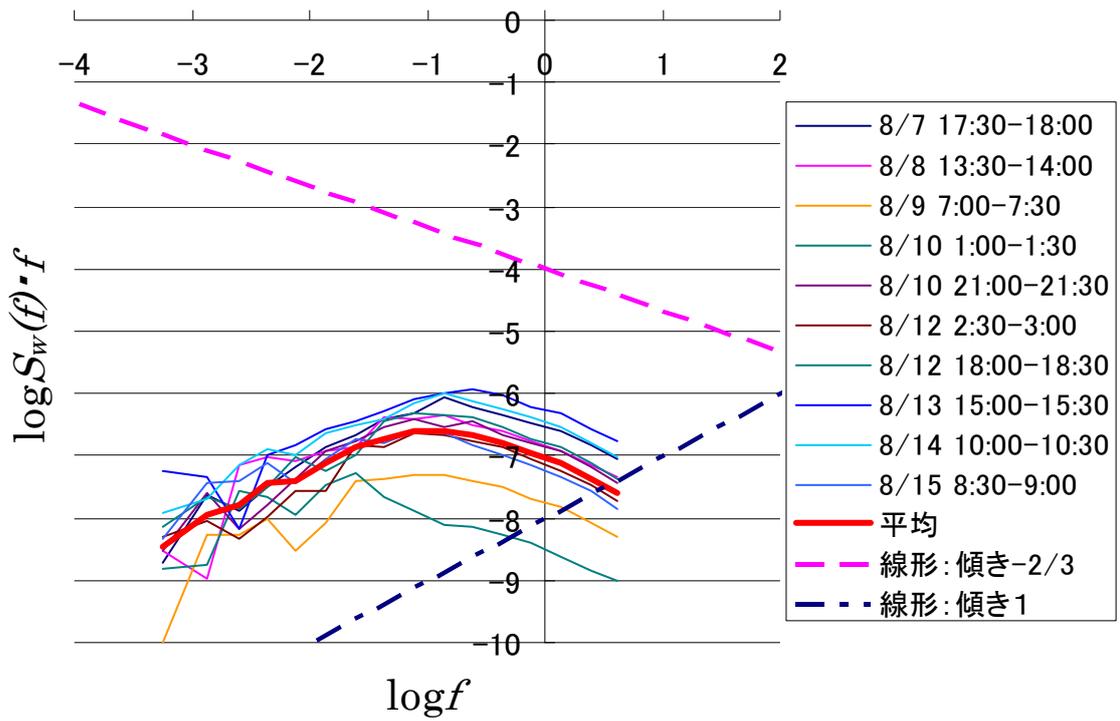


図 13.3 風速 z 成分 w に対するスペクトル解析結果

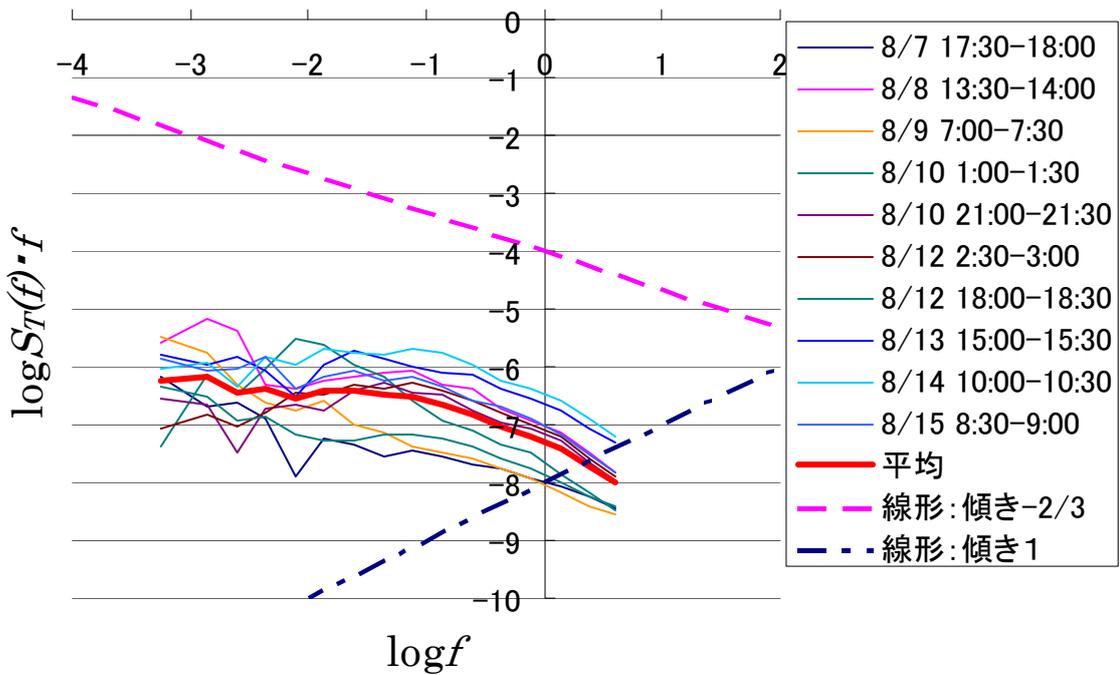


図 13.4 気温 T に対するスペクトル解析結果

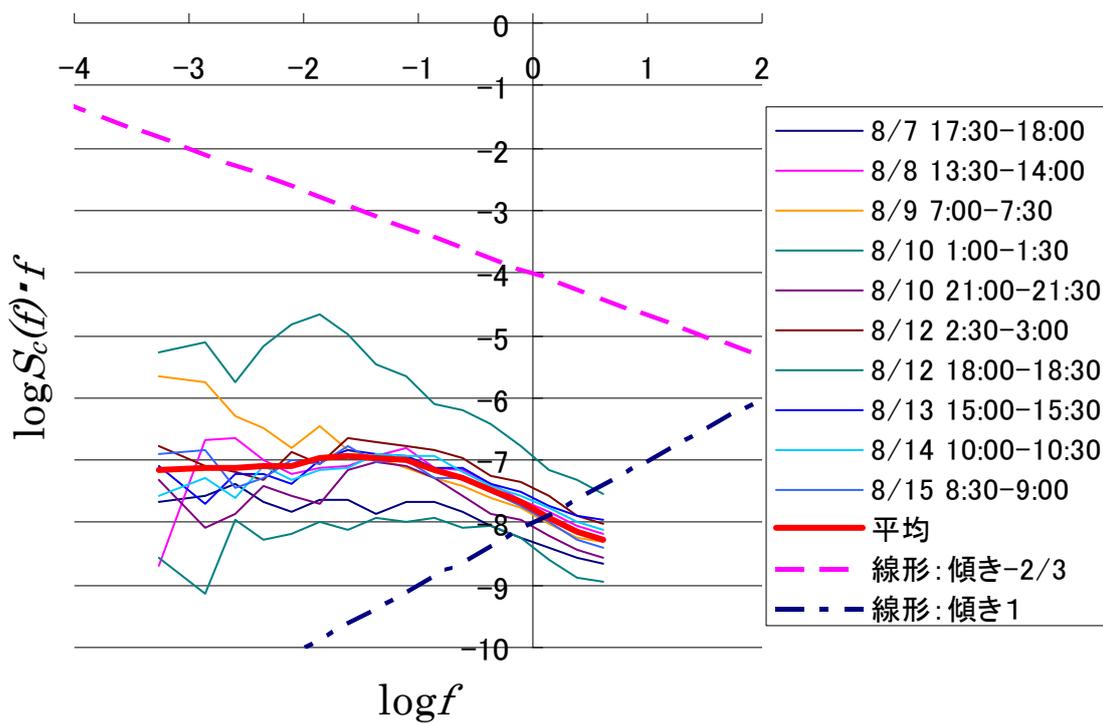


図 13.5 二酸化炭素濃度 c に対するスペクトル解析結果

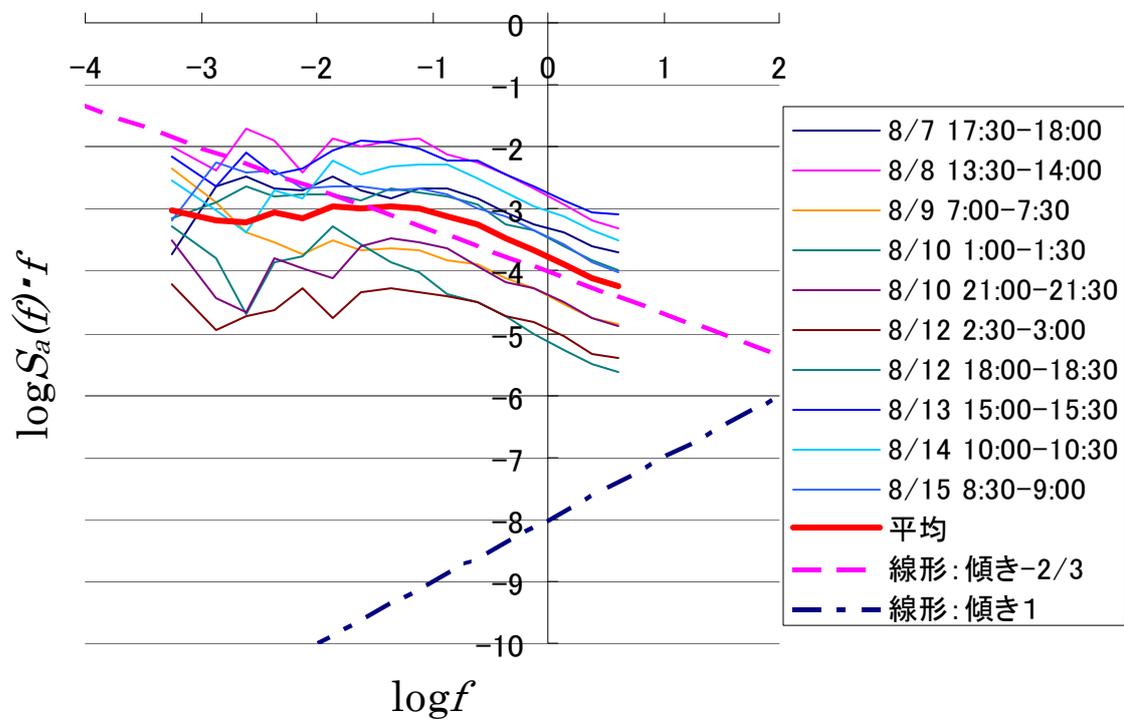


図 13.6 水蒸気濃度 a に対するスペクトル解析結果

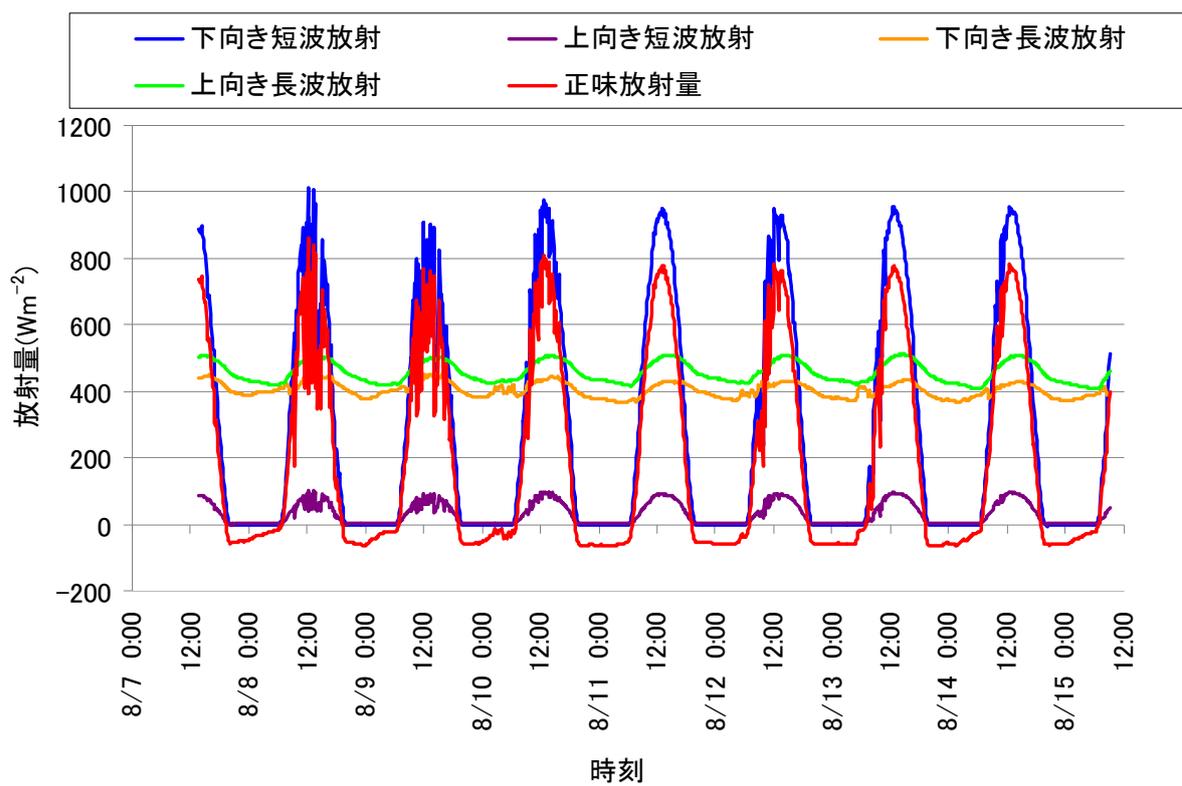


図 14.1 観測期間における放射収支の時系列 (2009年8月7日14:00~15日9:00)

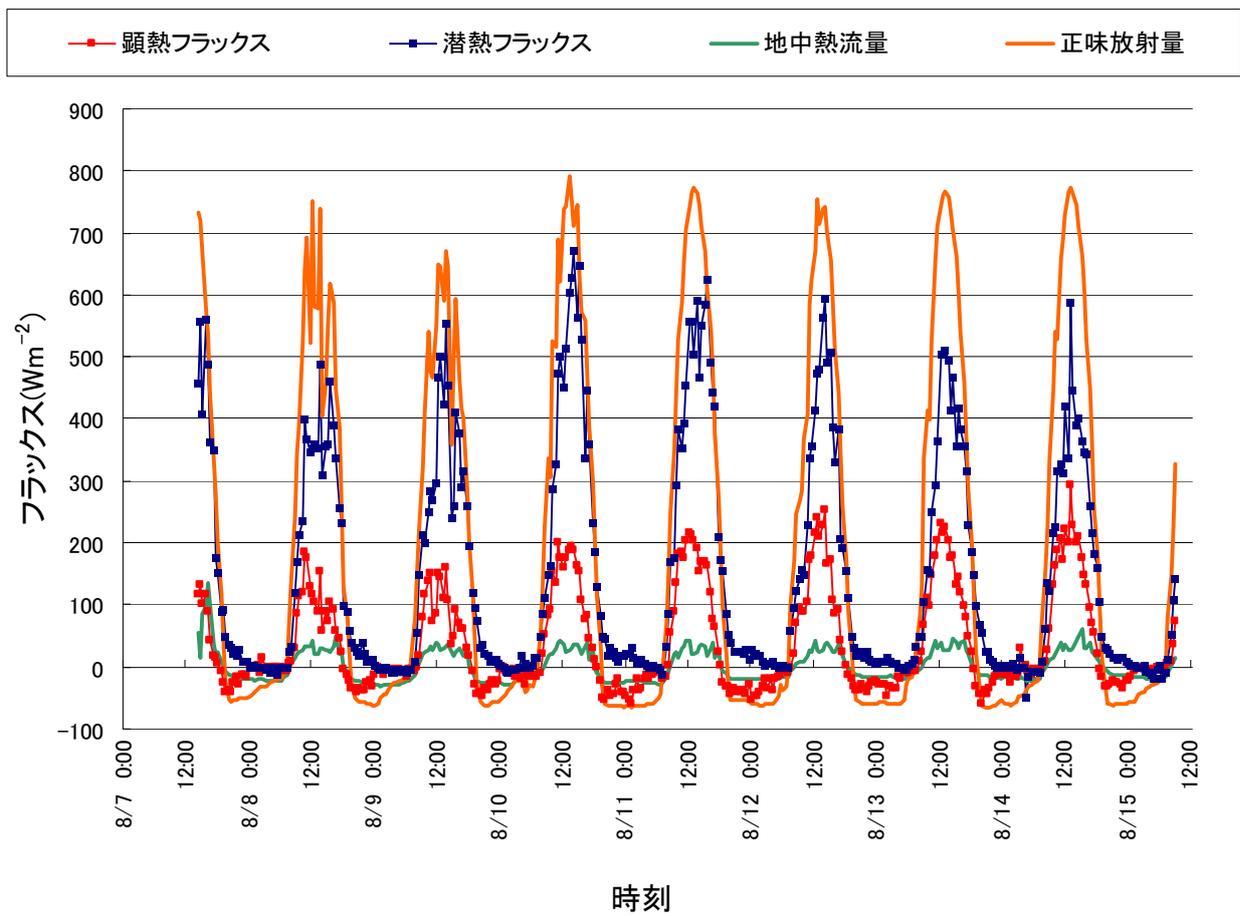


図 15.1 観測期間における熱収支の時系列 (2009年8月7日14:00~15日9:00)

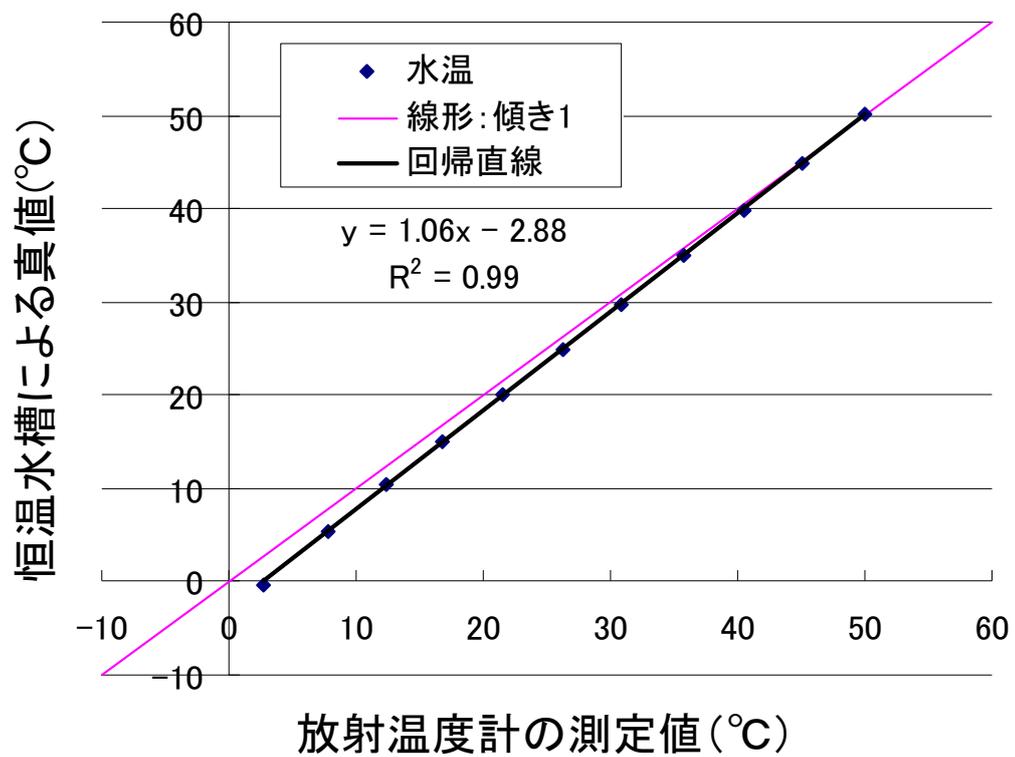


図 16.1 恒温水槽を用いた放射温度計のキャリブレーション結果

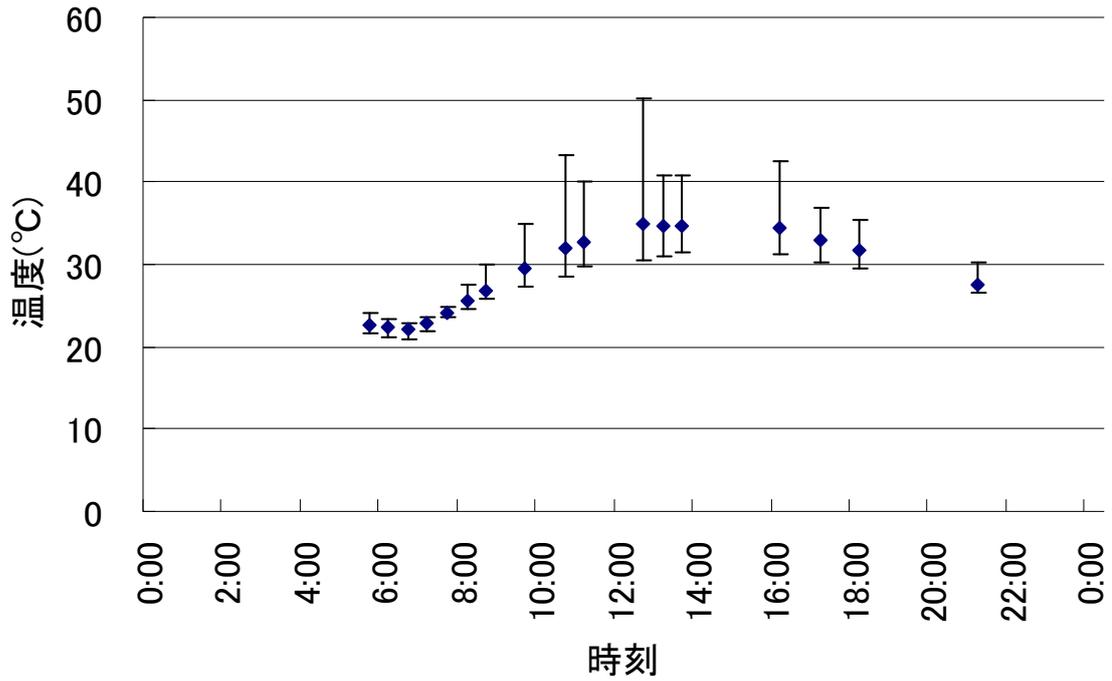


図 17.1 地表面温度の測定値 (2009 年 8 月 11 日)

青プロットは測定時刻での平均，縦に伸びたマーカーは変化幅（最大値および最小値）を示す

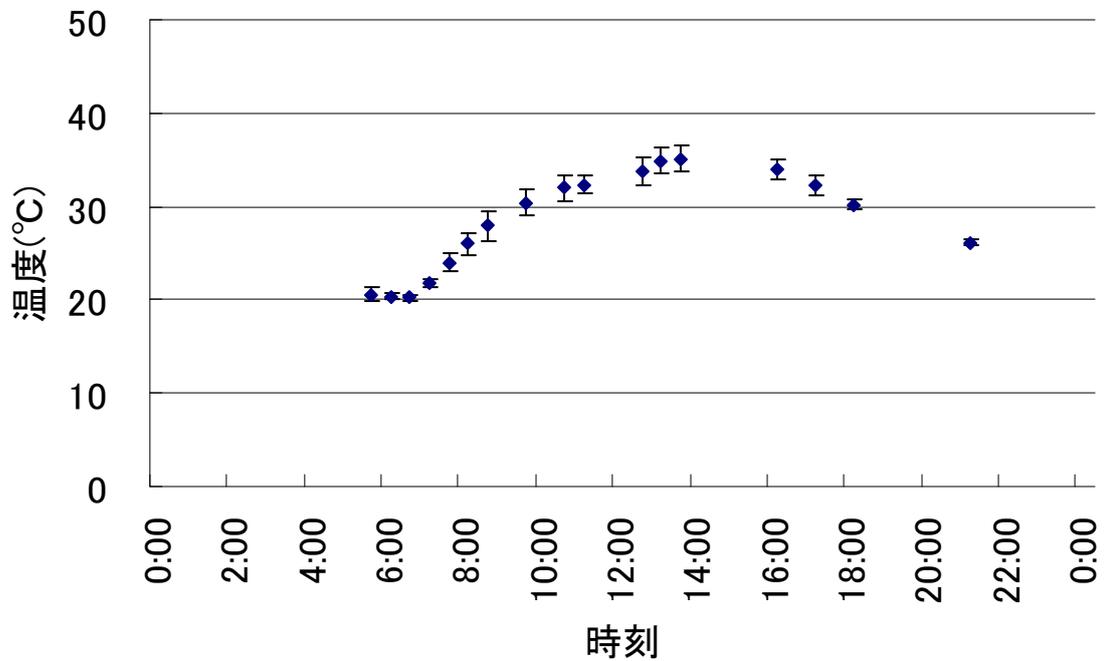


図 17.2 葉面温度の測定値 (2009 年 8 月 11 日)

青プロットは測定時刻での平均，縦に伸びたマーカーは変化幅（最大値および最小値）を示す

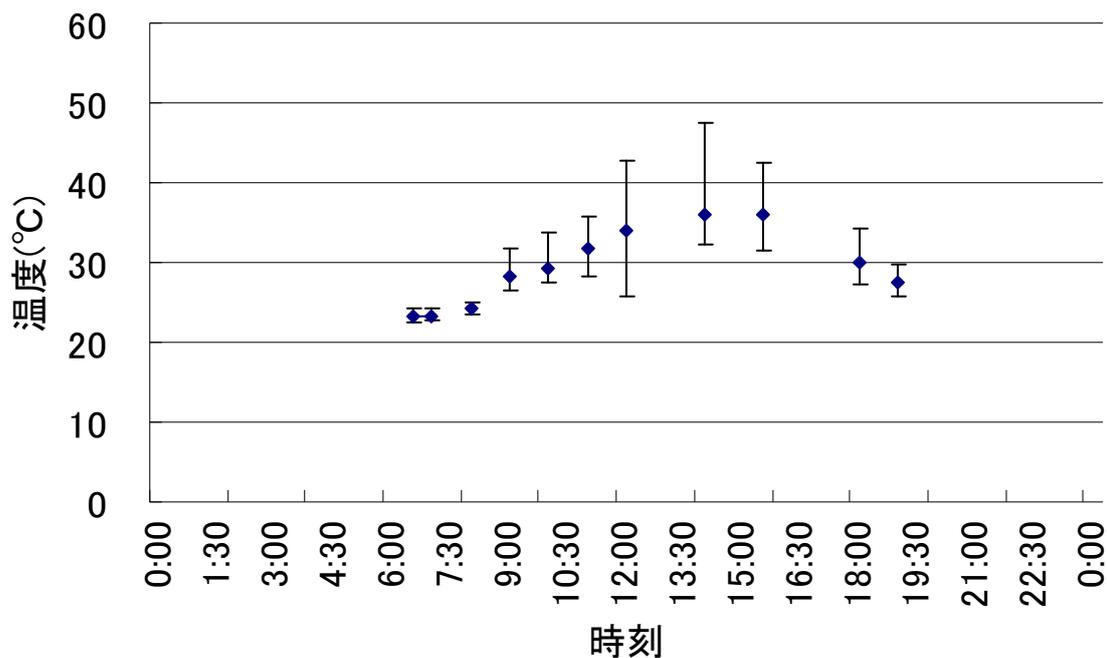


図 17.3 地表面温度の測定値 (2009 年 8 月 13 日)

青プロットは測定時刻での平均，縦に伸びたマーカーは変化幅（最大値および最小値）を示す

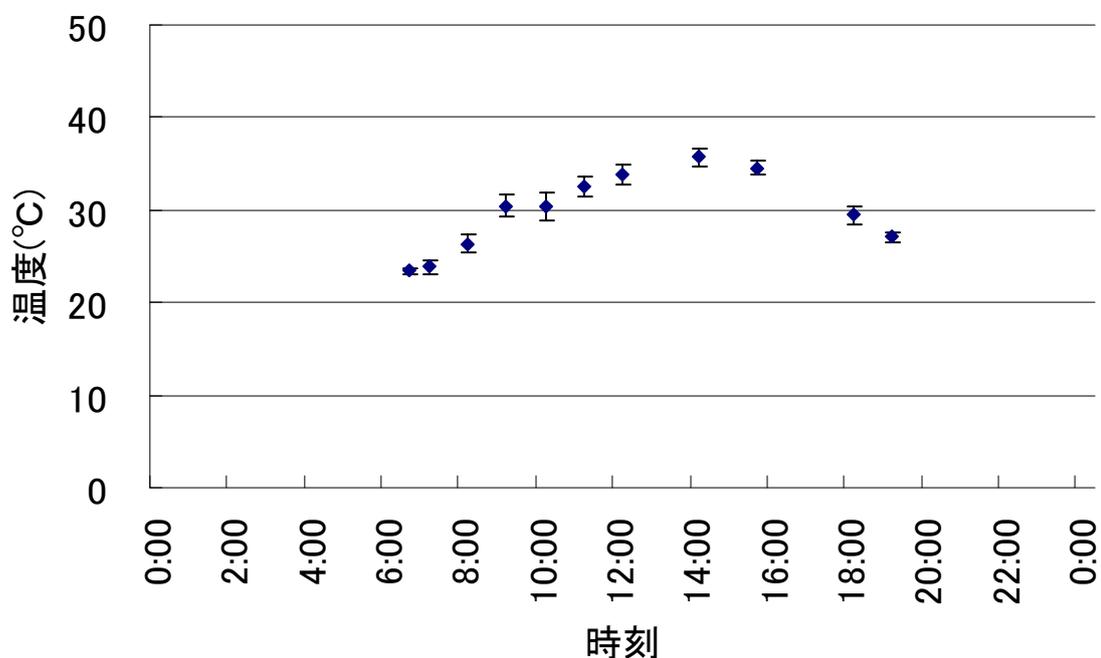


図 17.4 葉面温度の測定値 (2009 年 8 月 13 日)

青プロットは測定時刻での平均，縦に伸びたマーカーは変化幅（最大値および最小値）を示す

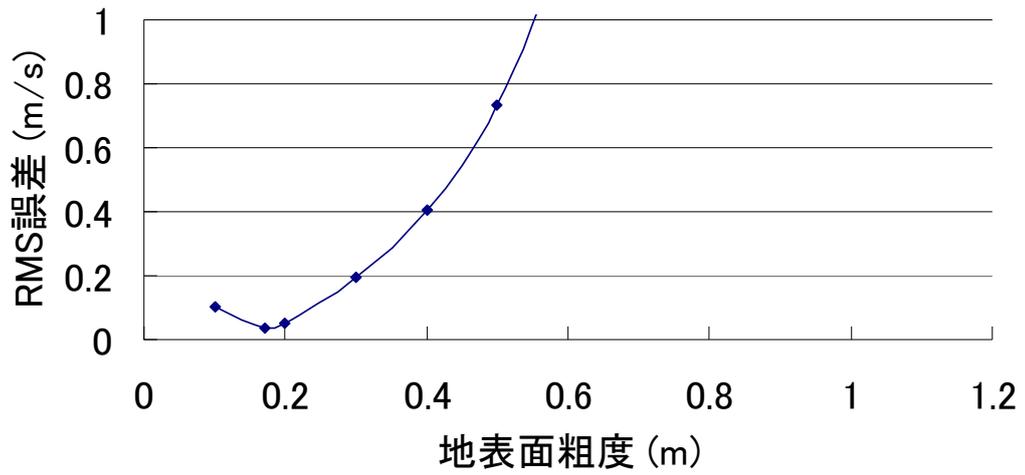


図 18.1 地表面粗度と、 u^* の観測値からの計算値と相似則による推定値の RMS 誤差の関係

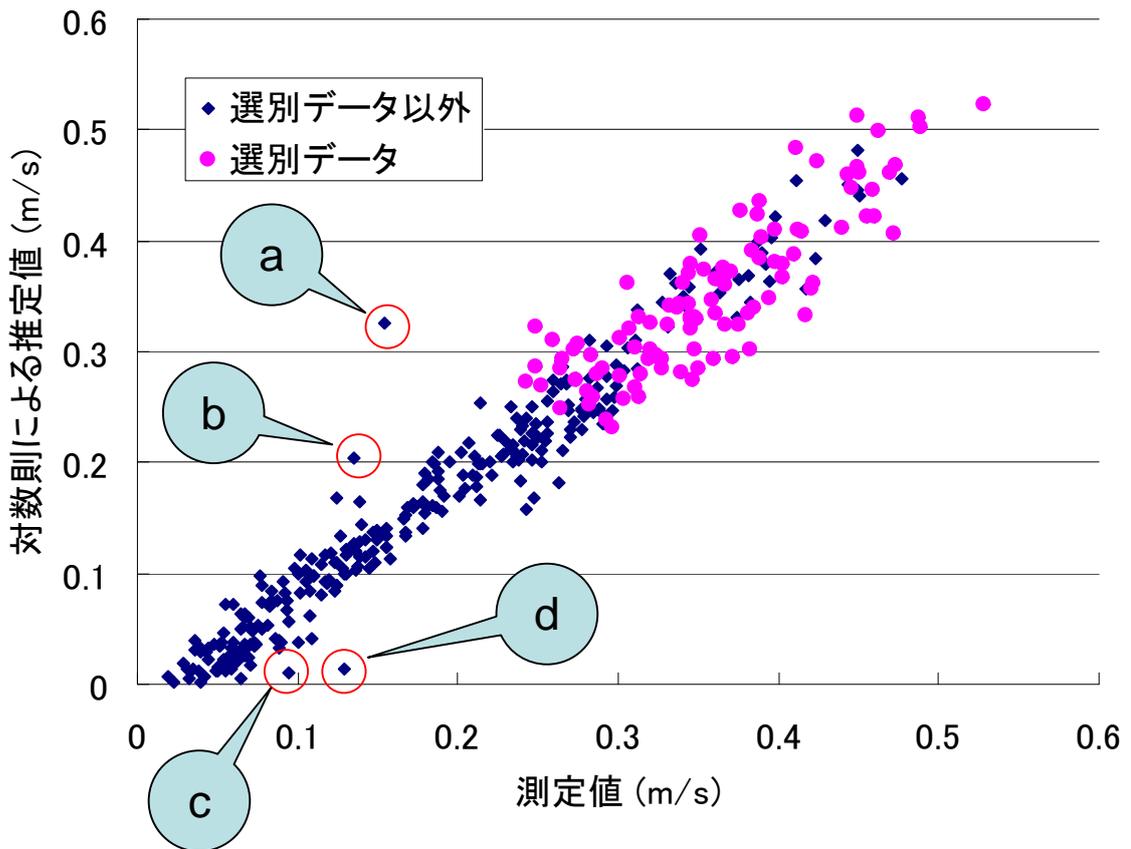


図 18.2 u^* の観測値からの計算値と相似則による推定値の比較図

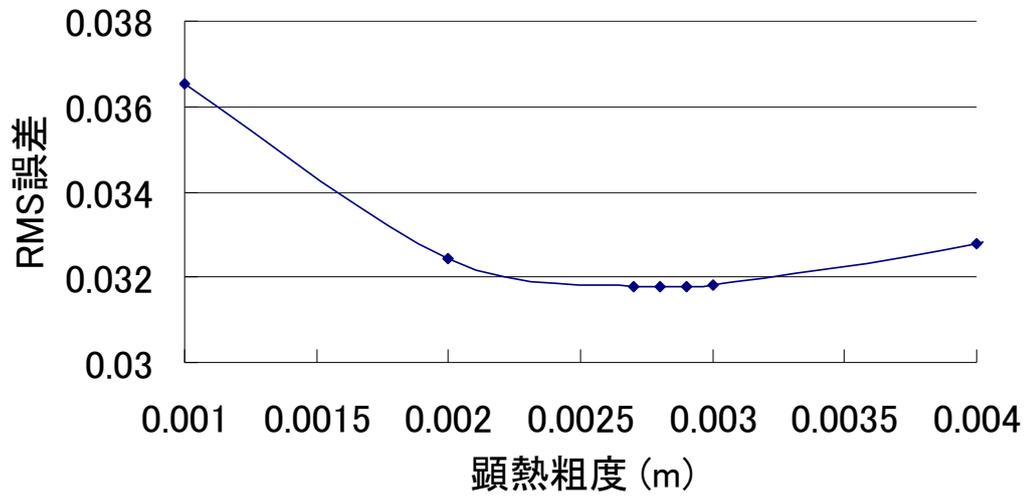


図 18.3 顕熱粗度と、 $\overline{w'T'}$ の観測値からの計算値と対数則による推定値の RMS 誤差の関係

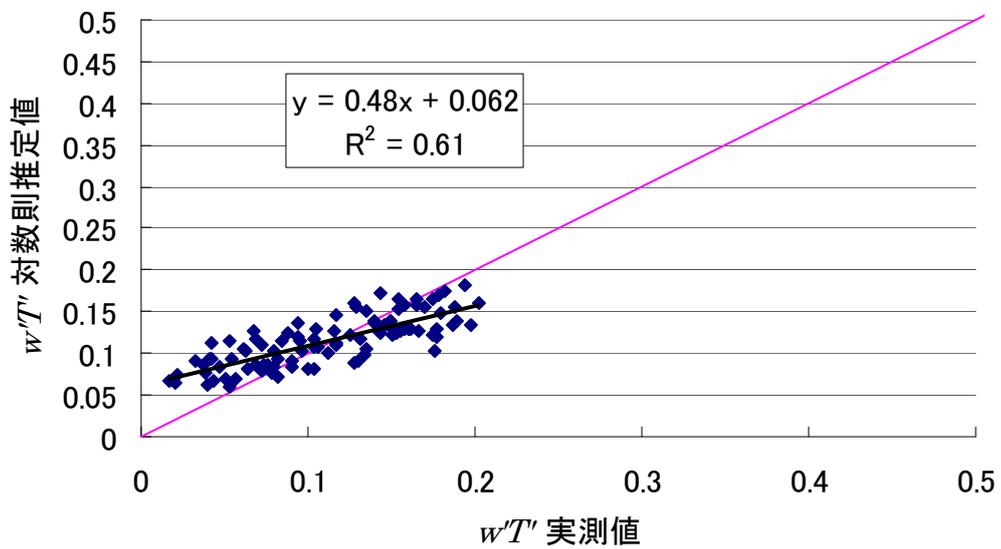


図 18.4 $\overline{w'T'}$ の観測値からの計算値と対数則による推定値の比較

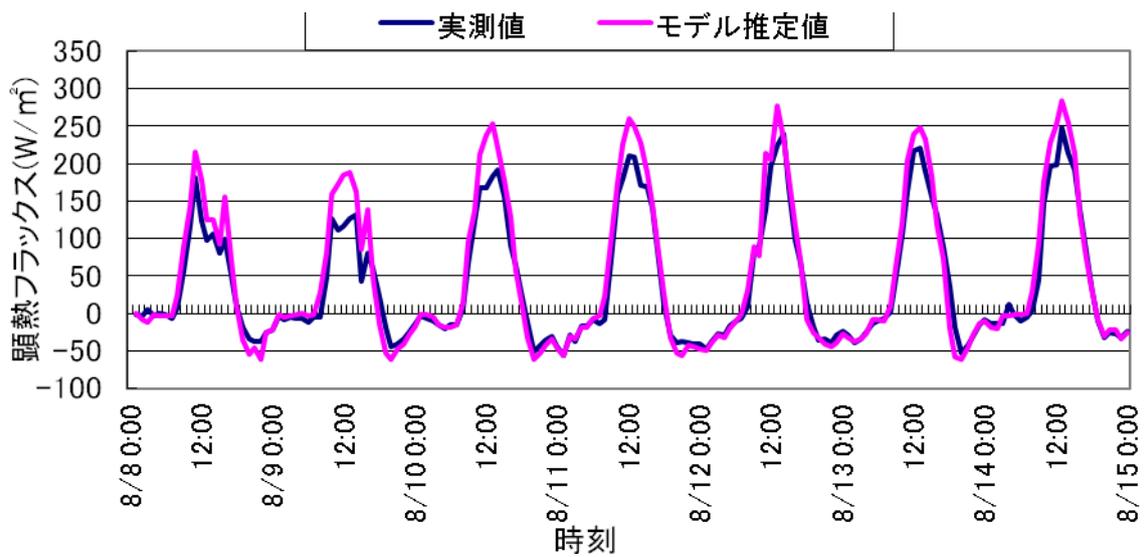


図 19.1 顕熱フラックスにおけるモデル推定値と実測値（渦相関法）の時系列
（8月8日～8月14日）

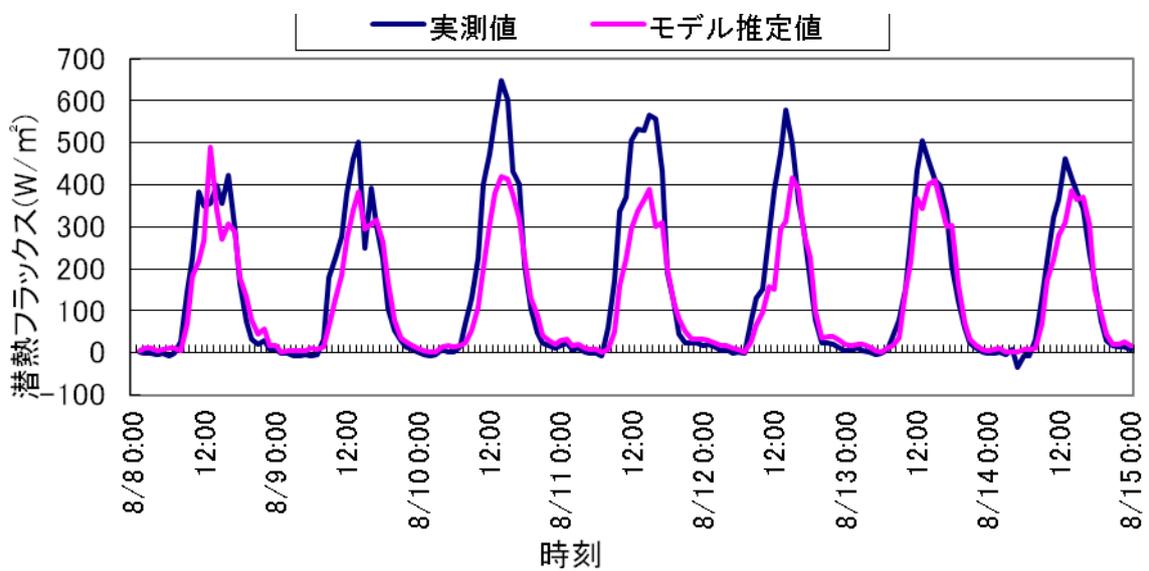


図 19.2 潜熱フラックスにおけるモデル推定値と実測値（渦相関法）の時系列
（8月8日～8月14日）

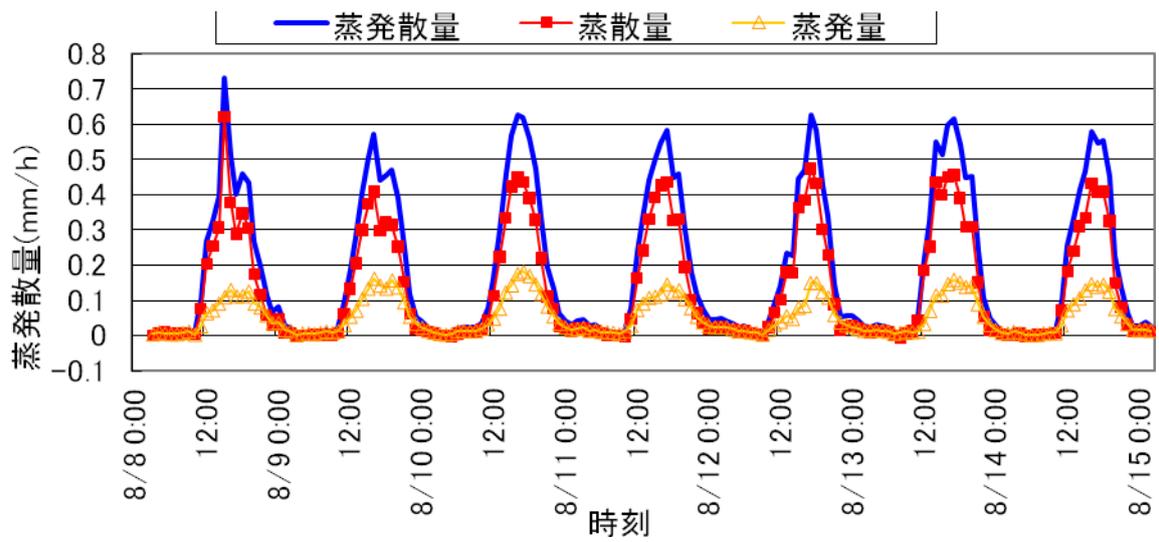


図 20.1 モデルによる蒸発量および蒸散量の時系列 (8月8日~8月14日)

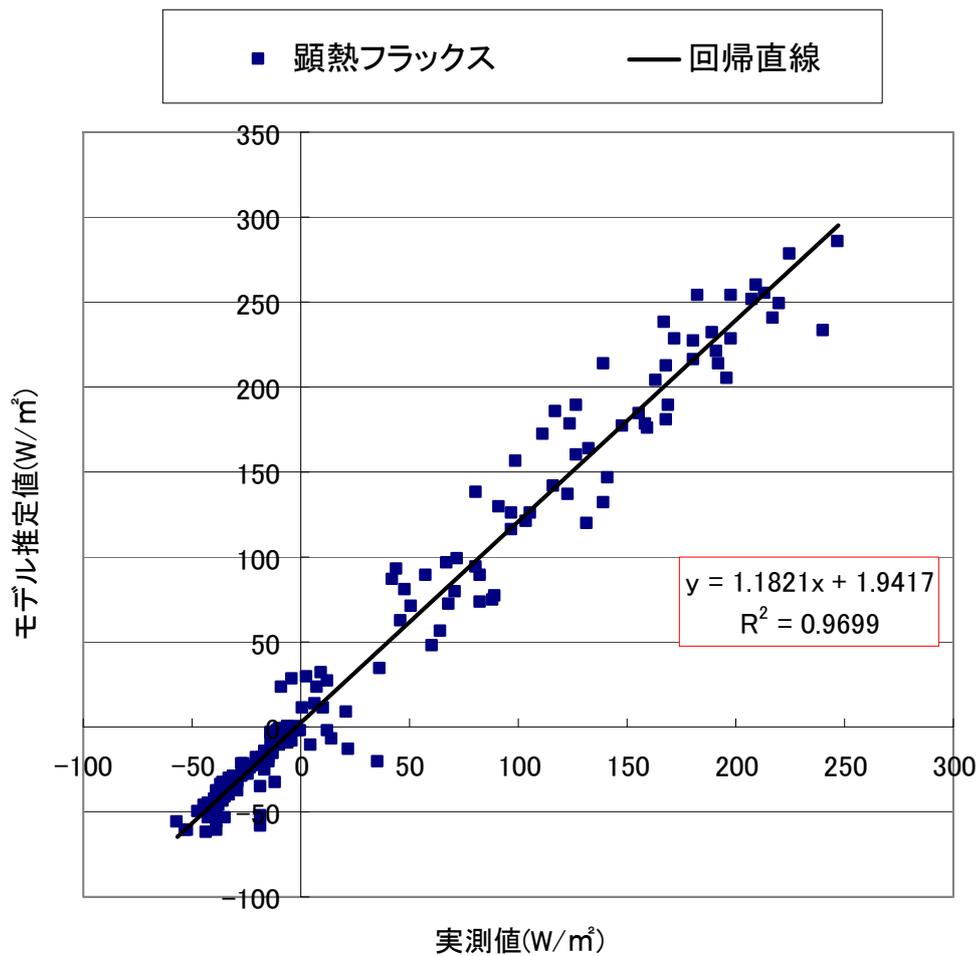


図 21.1 顕熱フラックスにおけるモデル推定値と実測値（渦相関法）の比較図

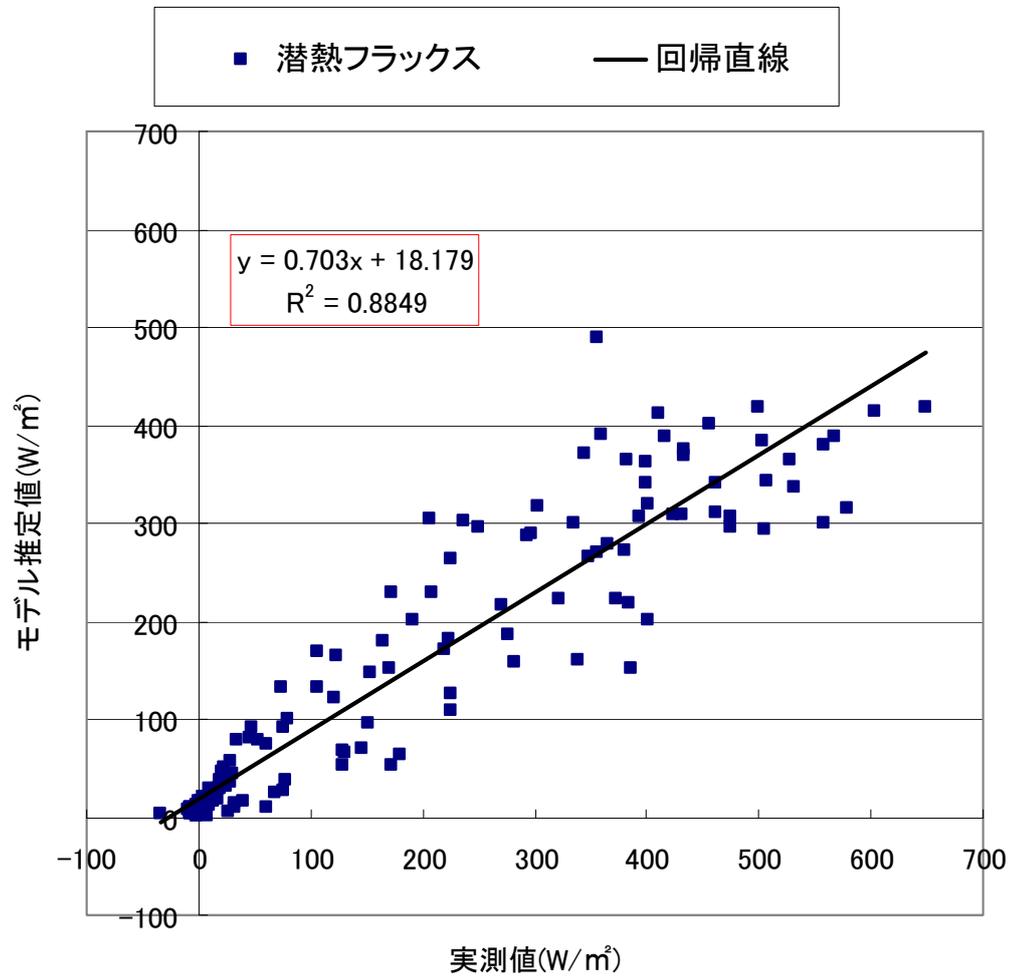


図 21.2 潜熱フラックスにおけるモデル推定値と実測値（渦相関法）の比較図

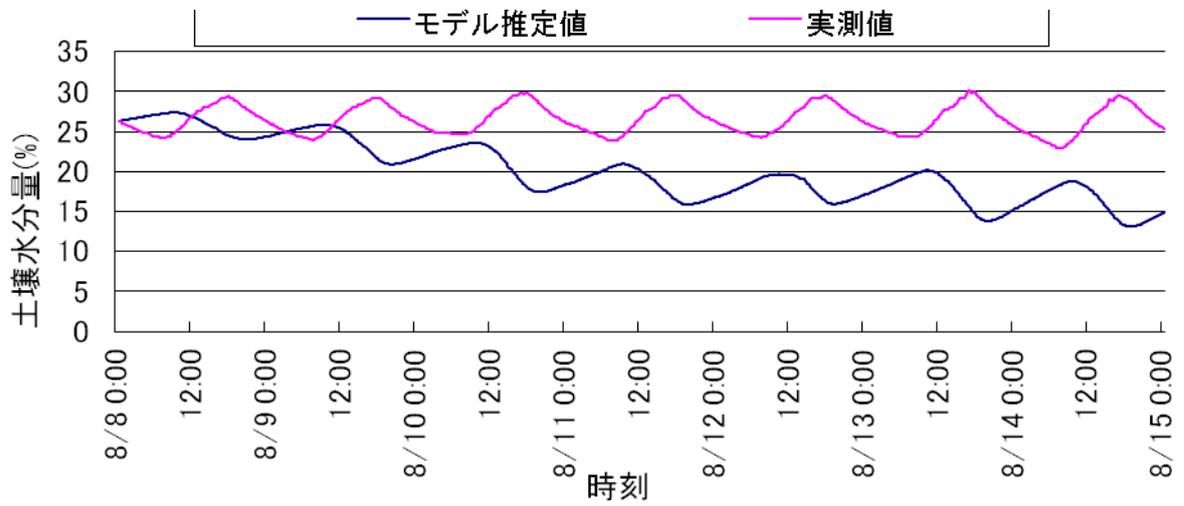


図 22.1 土壌水分量におけるモデル推定値と実測値（土壌水分センサー）の時系列
（8月8日～8月14日）

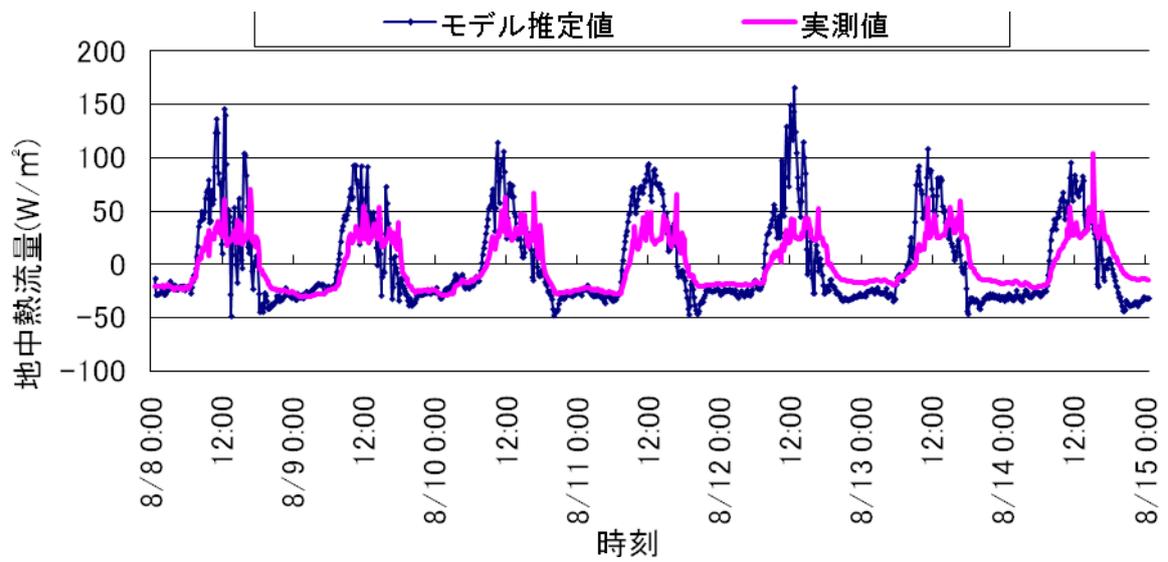


図 23.1 地中熱流量におけるモデル推定値と実測値（地中熱流板）の時系列（8月8日～8月14日）

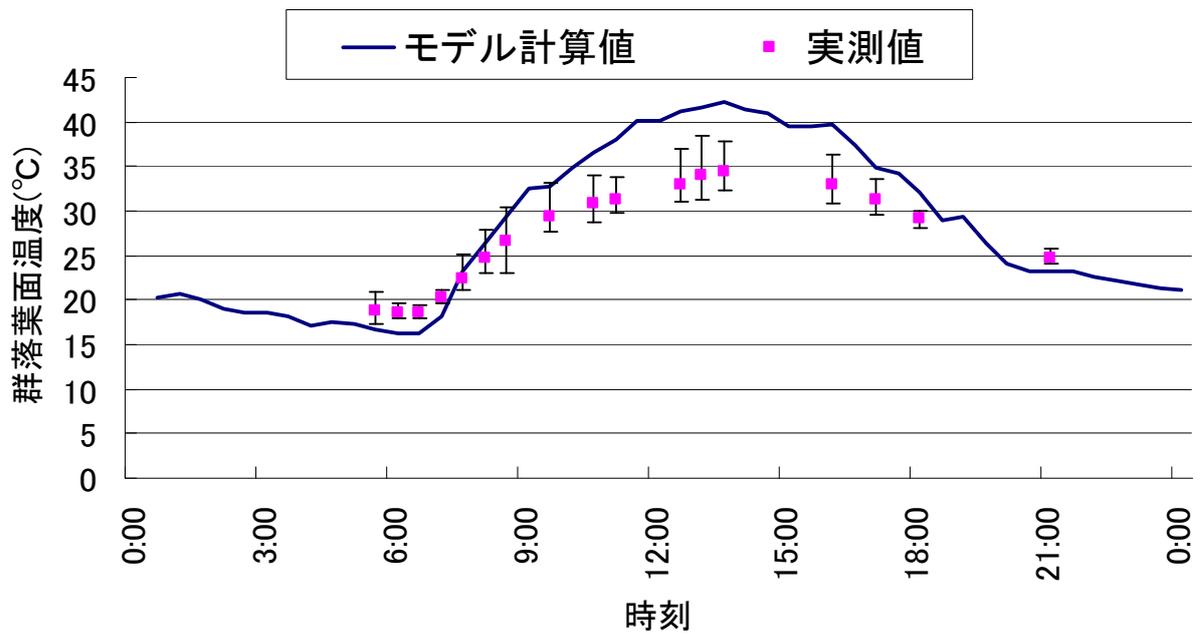


図 24.1 群落葉面温度におけるモデル推定値と実測値（放射温度計）の時系列（8月11日）

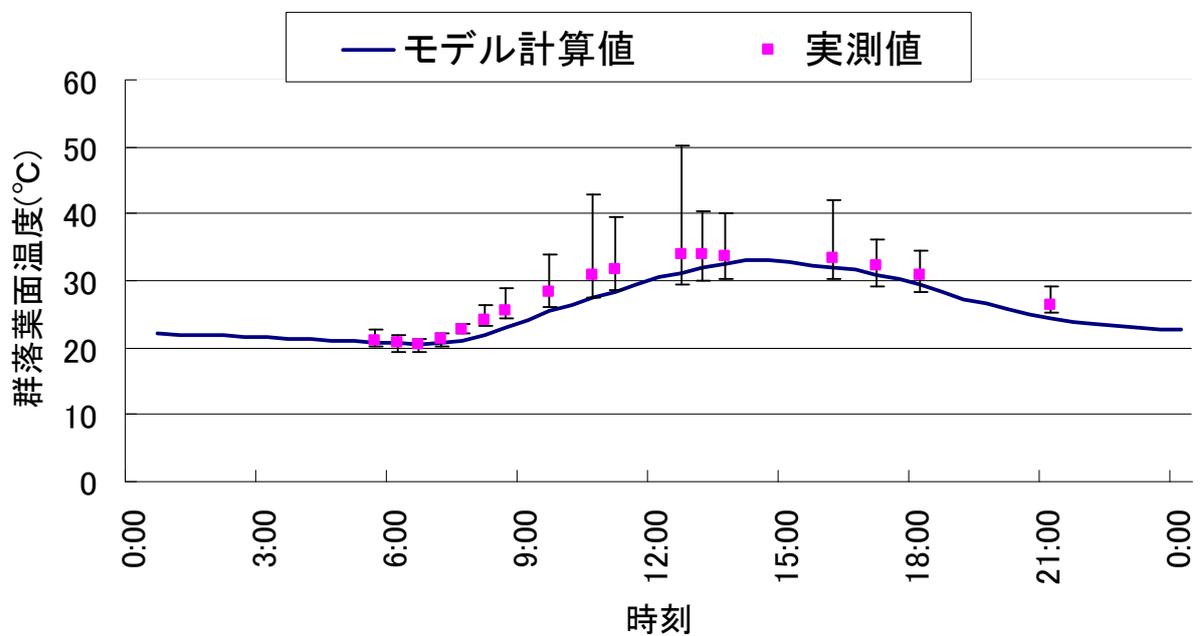


図 24.2 地表面温度におけるモデル推定値と実測値（放射温度計）の時系列（8月11日）

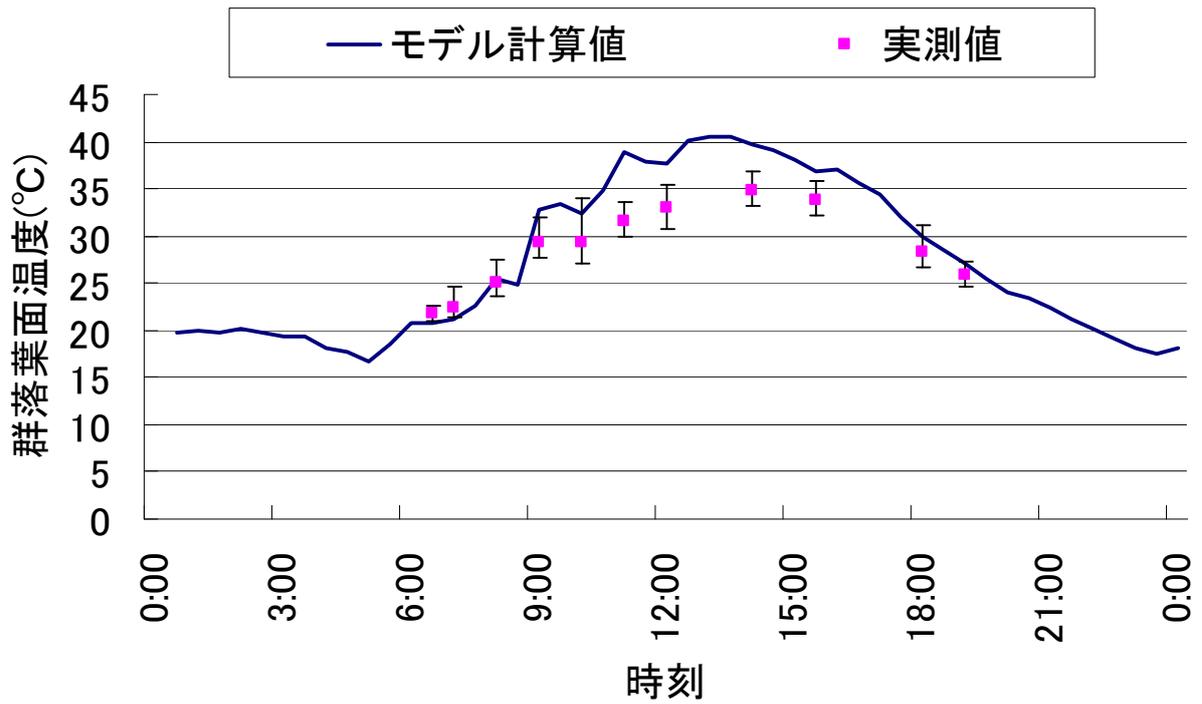


図 24.3 群落葉面温度におけるモデル推定値と実測値（放射温度計）の時系列（8月13日）

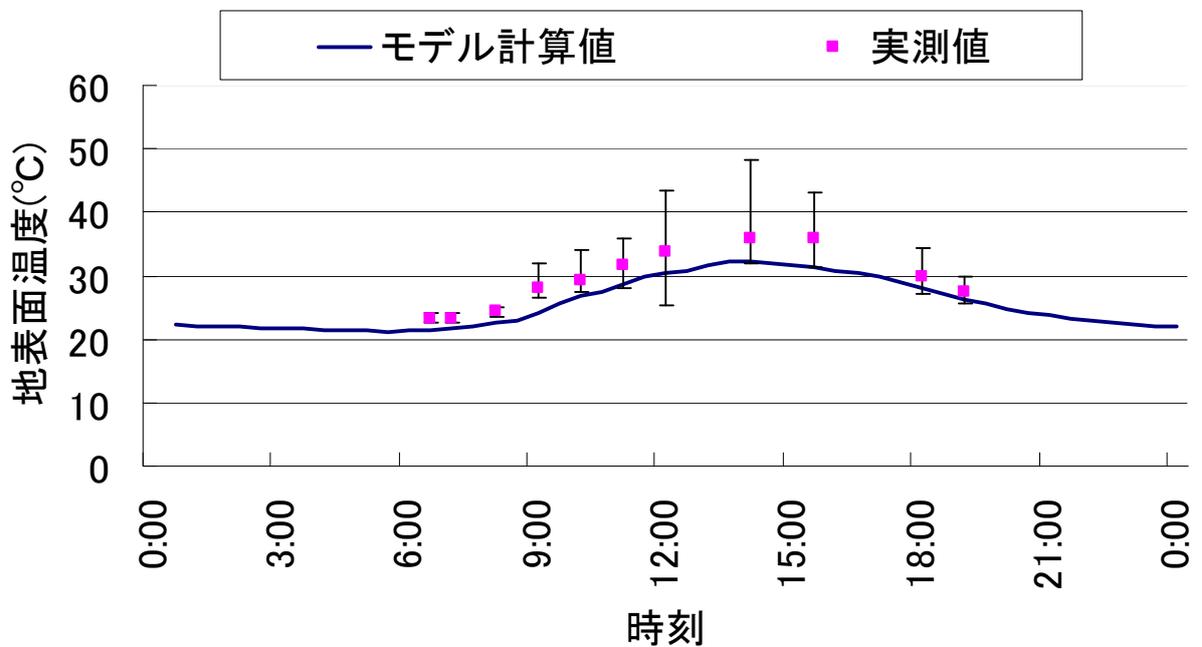


図 24.4 地表面温度におけるモデル推定値と実測値（放射温度計）の時系列（8月13日）

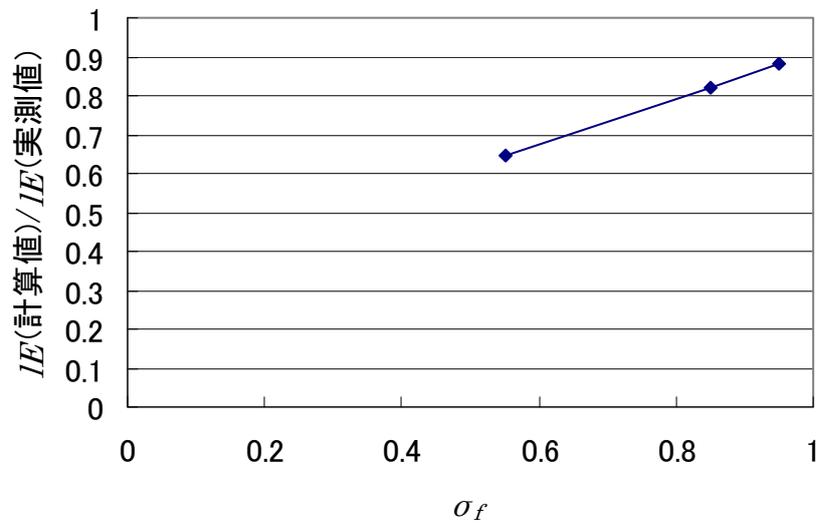


図 25.1 σ_f における感度分析結果①

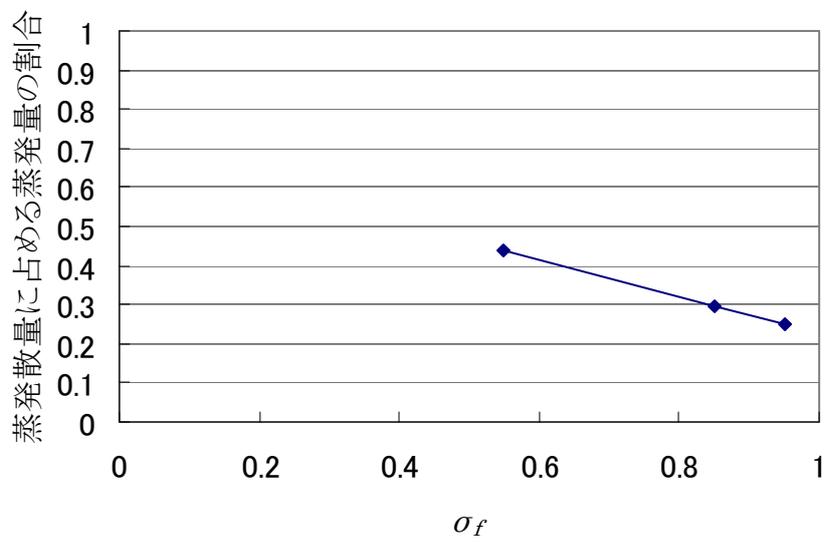


図 25.2 σ_f における感度分析結果②

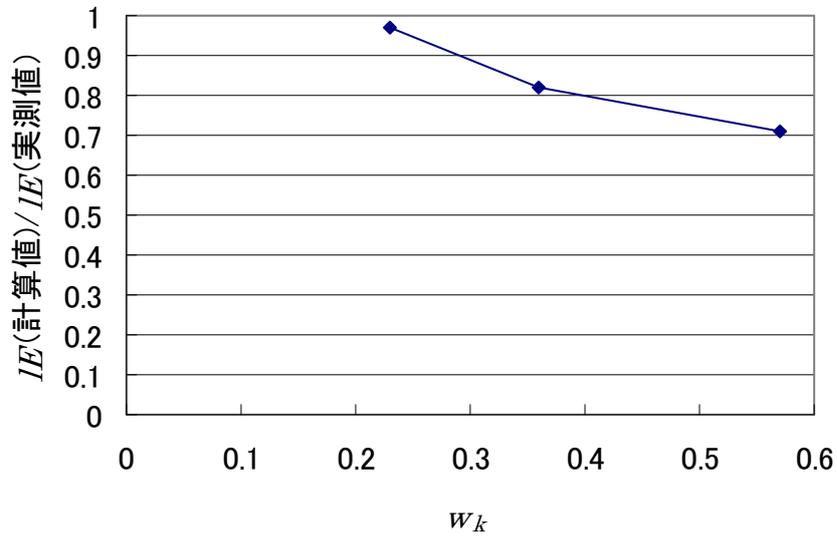


図 25.3 w_kにおける感度分析結果①

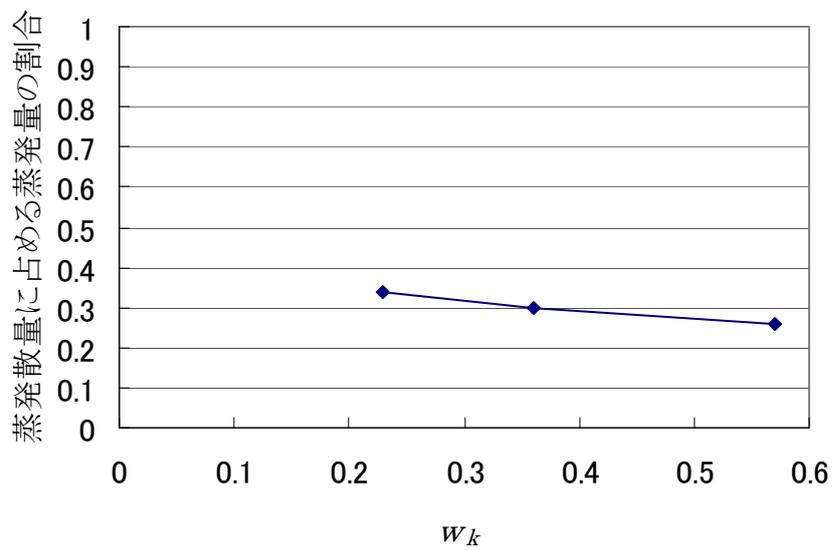


図 25.4 w_kにおける感度分析結果②

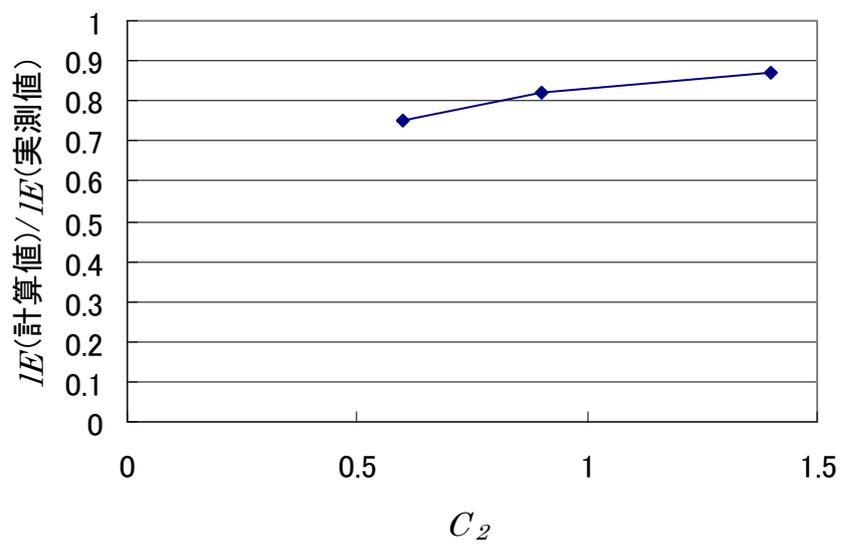


図 25.5 C₂における感度分析結果①

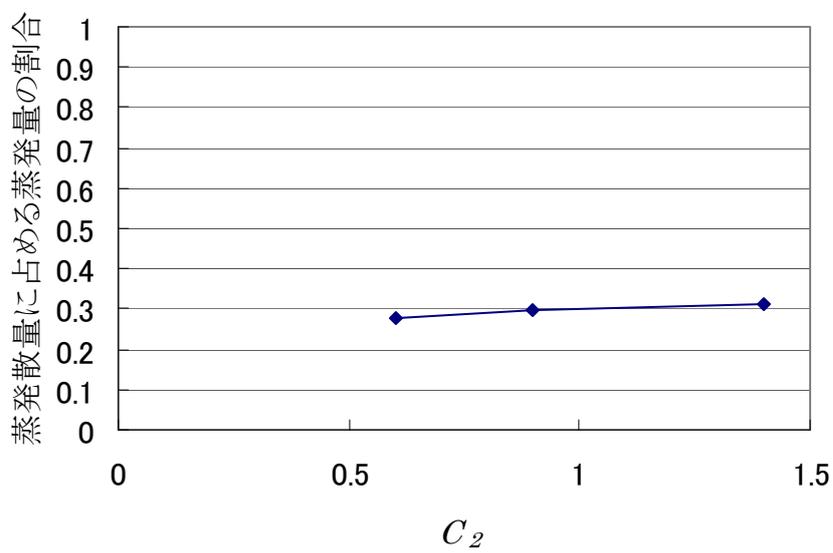


図 25.6 C₂における感度分析結果②