

ナイルデルタの農地における蒸発散量の評価および  
蒸発抑制対策効果の検証：夏季のトウモロコシを対象とした例

福田 敬広

201021311

平成 24 年 1 月

筑波大学大学院  
生命環境科学研究科 環境科学専攻  
平成 23 年度 修士（環境科学）学位論文

## 要旨

ナイルデルタの農地における蒸発散量の評価および蒸発抑制対策効果の検証：夏季の  
トウモロコシを対象とした例

Estimation of evapotranspiration in agricultural land of the Nile Delta  
and verification of effect of evaporation control measures : A case of maize in  
summer

エジプトは典型的な乾燥気候であり、ナイル川の水を利用した灌漑によって農業が可能となっている。しかし近年、砂漠地域での農業地域の開発が各地で進められており、水の需要が大幅に上昇している。エジプトでの水利用のほとんどを農業用水が占めており、農地での節水対策の一案として、土壌面からの蒸発量の抑制が挙げられている。そこで問題となるのが、これらの蒸発抑制対策の効果がどれだけあるのかということである。この背景の下、夏の代表的な作物において、異なる条件下（蒸発抑制対策の有無）での蒸発散量を評価することにより、蒸発抑制対策効果の有効性を検証することを目的とした。

研究対象地域は、エジプト・ナイルデルタに位置する、Sakhaの南北2圃場（SakhaN, SakhaS）およびZankalonの圃場である。夏季における作物は、いずれの圃場でもトウモロコシとなっている。各圃場では異なる灌漑方法が行われており、SakhaNでは畝間灌漑、SakhaSでは点滴灌漑、Zankalonではマルチング（2010年）および細溝灌漑（2011年）が行われている。これらの圃場において自動気象観測装置による気象観測を行い、それらのデータを用いて、渦相関法および蒸発散量を蒸発と蒸散に分けるモデルによって蒸発散量の算出を行った。そして、それらの結果を元に蒸発抑制対策の効果の検証を行った。

気象観測およびフラックス算出の結果、各圃場における熱・放射収支や蒸発散量の年変化や圃場ごとの違いが見られた。SakhaNおよびZankalonの結果を比較すると、灌漑水量に対する蒸発散量の割合が2010年、2011年ともに大きく変わらないため、マルチングや細溝灌漑による蒸発抑制の効果は畝間灌漑の状況と大きく変わらないと考えられる。また、SakhaNおよびSakhaSの結果を比較すると、SakhaSでは蒸発散量が70%ほどに抑制されていた。しかし、2011年の作物の収量を比較すると、SakhaSでの収量がSakhaNの2/3以下であり、灌漑水量の改善の必要性も示唆された。また、モデルによって蒸発散量を蒸発量と蒸散量に分け、蒸発と蒸散の割合も算出することができた。

キーワード：蒸発散，フラックス，トウモロコシ，ナイルデルタ，渦相関法，強制復元法

# 目次

Abstract	.....	i
表目次	.....	iii
図目次	.....	iv
本文		
1 序論		
1.1 エジプトの農業と水資源	.....	1
1.2 灌漑方法と蒸発抑制について	.....	2
1.3 蒸発散量の研究	.....	2
1.4 研究目的	.....	3
2 研究方法		
2.1 観測地点	.....	5
2.2 観測方法	.....	22
2.3 データ処理	.....	32
2.4 渦相関法によるフラックスの算出	.....	33
2.5 計算モデル	.....	37
2.6 バルク係数の決定	.....	40
3 結果		
3.1 スペクトル解析	.....	48
3.2 気温・湿度	.....	49
3.3 熱収支・放射収支	.....	49
3.4 蒸発散量	.....	50
3.5 水収支	.....	51
3.6 放射温度計による表面温度	.....	74
3.7 キャノピーアナライザーによる LAI および遮蔽率の推定	.....	74
3.8 リーフポロメーターによる蒸散量・気孔抵抗	.....	74
3.9 バルク係数	.....	78
3.10 モデルによる計算結果	.....	92
4 考察		
4.1 渦相関法の結果から考察する蒸発抑制対策の効果	.....	98
5 結論	.....	104
謝辞	.....	105
参考文献	.....	106

## 表目次

表 1	育成する作物および 圃場管理方法におけるスケジュール . . . . .	8
表 2.1	植生の成長過程 (2010 年) . . . . .	16
表 2.2	植生の成長過程 (2011 年) . . . . .	17
表 3	観測項目 . . . . .	27
表 4.1	モデルにおける入力項目 . . . . .	43
表 4.2	モデルにおける出力項目 . . . . .	44
表 4.3	モデルにおける初期条件 . . . . .	45
表 4.4	モデルにおける定数・係数 . . . . .	46
表 5	チャンバー法による マルチングの有無での蒸散比の比較 . . . . .	100

## 図目次

図 1	エジプトでのナイル川における水利用の割合	4
図 2	観測地点	7
図 3	圃場に設置した観測タワー	9
図 4	畝間灌漑の様子	10
図 5	点滴灌漑の様子	11
図 6	藁によるマルチングの様子	12
図 7.1	細溝灌漑の概念図	13
図 7.2	細溝灌漑の様子	13
図 8	Sakha における水路図	14
図 9	Sakha における暗渠排水のパイプの分布図	15
図 10.1	2010 年夏季作物における草丈の成長過程	18
図 10.2	2010 年夏季作物における LAI の成長過程	18
図 10.3	2010 年夏季作物における乾物重の成長過程	18
図 11.1	2011 年夏季作物における草丈の成長過程	19
図 11.2	2011 年夏季作物における LAI の成長過程	19
図 11.2	2011 年夏季作物における LAI の成長過程	19
図 12	2010 年～2011 年冬作における収量	20
図 13	2011 年夏季作物における収量	21
図 14	AWS における各測器と設置状況	25
図 15	AWS の配線図	26
図 16	放射温度計 (MINOLTA-温度計 505) による観測の様子	28
図 17	圃場において放射温度計および キャノピーアナライザーによる観測を行った地点	29
図 18	放射温度計 (EVEREST-4000.4ZL) による観測の様子	30
図 19.1	キャノピーアナライザーによる 植生の上での測定の様子	31
図 19.2	キャノピーアナライザーによる 植生の下での測定の様子	31
図 20	風速鉛直方向への変換角度	35
図 21.1	風速鉛直方向の座標変換角度の時系列	36
図 21.2	補完後の風速鉛直方向の座標変換角度の時系列	36
図 22	本研究で用いたモデルの概念図	42

図 23	スペクトル解析結果 (2010年7月17日 11:00~11:30)	52
図 24.1	スペクトル解析結果 (SakhaN 2010年7月)	53
図 24.2	スペクトル解析結果 (SakhaN 2010年8月)	54
図 24.3	スペクトル解析結果 (SakhaS 2010年7月)	55
図 24.4	スペクトル解析結果 (SakhaS 2010年8月)	56
図 24.5	スペクトル解析結果 (Zankalon 2010年8月)	57
図 25	月平均気温の年変化	58
図 26	月平均相対湿度の年変化	59
図 27	各圃場における放射収支の年変化	60
図 28.1	SakhaN における熱収支の年変化	61
図 28.2	SakhaS における熱収支の年変化	62
図 28.3	Zankalon における熱収支の年変化	63
図 29	蒸発散量の月積算値の年変化	64
図 30	2010年夏季における蒸発散量の時系列と灌漑水量	65
図 31	蒸発散量と灌漑水量の積算値	66
図 32	2010年夏季における蒸発散量の時系列と灌漑水量	67
図 33	蒸発散量と灌漑水量の積算値	68
図 34.1	2010年夏作期間における水収支	69
図 34.2	2010年作物無し期間における水収支	70
図 34.3	2010~2011年冬作期間における水収支	71
図 34.4	2011年作物無し期間における水収支	72
図 34.5	2011年夏作期間における水収支	73
図 35.1	放射温度計のキャリブレーション結果	76
図 35.2	放射温度計のキャリブレーション結果	76
図 36.1	SakhaN における葉面温度の時系列 (2010年8月9日)	77
図 36.2	SakhaN における土壌面温度の時系列 (2010年8月9日)	77
図 36.3	SakhaS における葉面温度の時系列 (2010年8月7日)	78
図 36.4	SakhaS における葉面温度の時系列 (2010年8月7日)	78
図 36.5	Zankalon における葉面温度の時系列 (2010年8月4日)	79

図 36.6	Zankalon における葉面温度の時系列 (2010 年 8 月 4 日) . . . . .	79
図 37.1	各圃場での葉面温度の時系列 (2011 年夏季) . . . . .	80
図 37.2	各圃場での土壌面温度の時系列 (2011 年夏季) . . . . .	81
図 38.1	キャノピーアナライザーによる LAI の測定値結果 (2010 年夏季) . . . . .	82
図 38.2	キャノピーアナライザーによる LAI の測定値結果 (2011 年夏季) . . . . .	82
図 39	キャノピーアナライザーによる LAI と放射の遮蔽率の関係 . . . . .	83
図 40	LAI と遮蔽率の関係 . . . . .	84
図 41.1	リーフポロメーターによる蒸散量の観測結果 (2011 年 7 月 28 日_SakhaN) . . . . .	85
図 41.2	リーフポロメーターによる蒸散量の観測結果 (2011 年 7 月 28 日_SakhaS) . . . . .	85
図 42	2010 年夏季におけるゼロ面変位の時系列 (草丈データから推定) . . . . .	87
図 43.1	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 . . . . .	88
図 43.2	$u^*$ の観測値からの計算値と 相似則による推定値の比較図 . . . . .	88
図 44.1	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 . . . . .	89
図 44.2	$\overline{w'T}$ の観測値からの計算値と 対数則による推定値の比較 . . . . .	89
図 45	2010 年夏季における地表面粗度の時系列 . . . . .	90
図 46	2010 年夏季における顕熱粗度の時系列 . . . . .	91
図 47	2010 年夏における $\sigma_f$ の時系列変化 . . . . .	93
図 48.1	$C_1$ と土壌水分量の関係 . . . . .	94
図 48.2	$C_2$ と土壌水分量の関係 . . . . .	94
図 49	2010 年夏季 SakhaN における 蒸発散量のモデル推定値 . . . . .	95
図 50	2010 年夏季 SakhaS における 蒸発散量のモデル推定値 . . . . .	96
図 51	モデルによる蒸発散量の推定積算値 . . . . .	97

図 52	チャンバー法によるマルチングによる 蒸発抑制の効果の検証 . . . . .	99
図 53	2011 年の各圃場における水利用効率の結果 . . . . .	101
図 54	根長密度の分布 . . . . .	102
図 55	土壌水分の分布 . . . . .	103



## 1 . 序 論

### 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，特にトシユカ（ニューバレー）では約22.7億 $\text{m}^2$ ，シナイ半島北部では約16.8億 $\text{m}^2$ 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近い水が現状のナイル川から除かれ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，トシユ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）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．特に，農業地域の集中しているナイルデルタからの蒸発散量はかなりのものであると考えられる．そこで，節水対策の一案として，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，農地の土壌面からの蒸発量の抑制が必要なのである．蒸発抑制のための対策としては幾つかの案が挙げられるのだが，これをおこなうに当たり，エジプトの農地での蒸発散量がどれだけあるのか，そしてこの抑制対策というのがどれだけ効果的なものかということが重要な問題となってくる．

蒸発量の観測方法として，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 灌漑方法と蒸発抑制について

灌漑による農業を行うにあたって、圃場管理の方法には幾つか種類がある。畝間灌漑は、圃場に畝を立てて、その上に条播植え、畝の間を薄膜状に水を流し、流下中に土中へ浸透させ、作物の根群域へ浸透させる灌漑方法であり、地表灌漑の中では代表的なものとされている（緒形ほか，1978）。また畝間灌漑は、圃場に注ぐ流量や注水時間などの勘定を様々な条件から行わなければならない、このような多くの因子によって影響を受けるので、畝間灌漑で損失水量の少ない灌水を実施することは、散水灌漑などに比べると、一般的には困難であるとされている（緒形ほか，1978）。点滴灌漑は、作物の条間に沿って配置された地表定置のポリエチレン管に、一定間隔ごとに取り付けられた点滴ノズル（エミッター）、または滴下孔から、土壤に緩い強度で作物の根元のみ滴下する方式である（穴瀬ほか，1992）。この方法は、乾燥地帯での使用を目的として開発されたもので、各地で果樹園や野菜の集約栽培に顕著な成績をおさめ、急速に普及しつつある（緒形ほか，1978）。過剰な水を作物に与えることがないので消費水量は極めて少ないが、塩類集積を起こしやすいので、高度の水管理技術が要求される（穴瀬，1992）。マルチングは、植物の植えられている土壤面に藁などのマルチ材を敷くものであり、一般的に防草、乾燥防止（保水）、及び保温などの効果を期待して敷設される（三宅・増田，2004）。先行研究において、中国北部において冬作の小麦に対して藁によるマルチングを行った実験により、16～37%蒸発量が抑制できたという結果も得られたことが分かっている（Chen et al., 2007）。細溝灌漑は、畝間灌漑と同様の水の供給方法だが、作物の植え方を変えることで効率的な水利用を行うために講じられた方法である。実際にその方法を講じたものと、伝統的な畝間灌漑を行った方法を比較したところ、水利用の効率が大幅に向上したとされている（Yousry, 2006）。これらのような方法を試験的に適用し、異なる圃場管理の行われた圃場における蒸発散量を比較することができれば、それぞれの蒸発抑制対策のできると考えられる。

## 1.3 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な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、Keeling plot analysis (Moreira et al., 1997) という方法を用いて蒸発散の安定同位体比を求め、更に土壌や植物からの蒸発・蒸散における安定同位体比を得ることで、蒸発散に占める蒸散の割合を算出するという方法であり、現地での土壌や空気、植物水のサンプリングが必要となってくる。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。

福田 (2010) では、エジプトのナイルデルタの農地において気象観測をおこない、中川 (1978) の用いた方法を元に、蒸発散量を蒸発と蒸散に分けることができた。しかし、主に土壌関係のパラメータなど不確定なものがあったこと、圃場における灌漑水量の考慮がされていないことなどの問題点があった。

#### 1.4 研究目的

本研究では、異なる圃場管理状況における農地での蒸発散量を比較することによって、灌漑方法における蒸発抑制対策の有効性を検証することを目的とした。そのために、以下の二つの方法を用いた。まず一つに、渦相関法を用い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した。また、中川 (1978) で用いられた数値モデルを元に、更にそのモデルを改良して、蒸発散量を蒸発と蒸散に分けた。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。

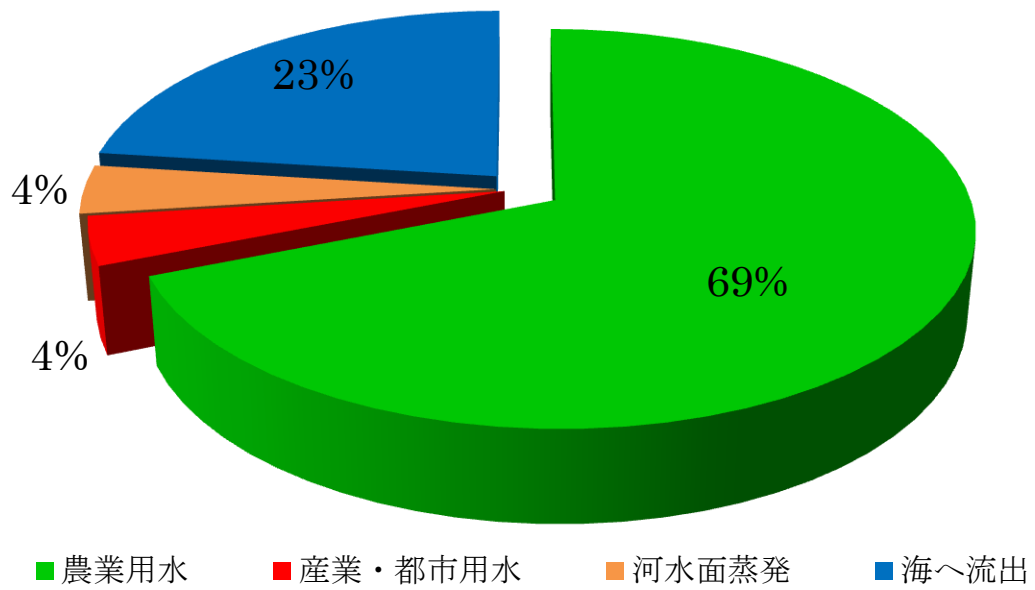


図1 エジプトでのナイル川の水利用の割合  
(National Water Resources Plan (2005) により作成)

## 2. 研究方法

### 2.1 観測地点

本研究の対象地域は、エジプト・ナイルデルタに位置する Sakha と Zankalon の圃場である（図 2）。この内、Sakha では南北二つの圃場があり、それぞれを SakhaN, SakhaS と呼ぶことにする。SakhaN, SakhaS, Zankalon それぞれの位置は、 $(31^{\circ} 05' 54.7'' \text{ N}, 30^{\circ} 55' 21'' \text{ E})$ ,  $(31^{\circ} 05' 54.6'' \text{ N}, 30^{\circ} 55' 21.2'' \text{ E})$ ,  $(30^{\circ} 34' 50.04'' \text{ N}, 31^{\circ} 25' 59.94'' \text{ E})$  となっている。各圃場は約  $100 \times 100\text{m}$  広さであり、全体に同じ植生（作物）が広がっている。それぞれの圃場では季節ごとに異なる作物を栽培し、異なる圃場管理方法が行われている。栽培する作物および圃場管理方法における計画は表 1 にまとめた。これら 3 つの圃場において気象データの観測タワーを設置した（図 3）。2010 年夏の夏のトウモロコシの品種は Cross10, 2011 年夏のトウモロコシの品種は Three Ways Cross324, テンサイの品種は TOP であった。各圃場の施肥量は窒素, リン酸, カリの順に、2010 年夏は 131, 78, 62.5kg/ha, 冬作は 140, 86, 124kg/ha, 2011 年夏は 274, 55, 57kg/ha を施用した。

本研究で対象とする観測期間は、タワーを立てた 2010 年 6 月から 2011 年 9 月にかけてである。この内、2010 年および 2011 年の 6 月～9 月が夏季作物の生育期間であり、この期間のデータを中心に考察を行う。

各灌漑方法・圃場管理の様子は、図 4～図 7 のようになっている。図 4 は畝間灌漑の様子であり、メスカと呼ばれる二次水路から水を流し、写真のように圃場が冠水するほど供給されている。畝と畝の間隔は約 40cm であり、畝の幅は約 20cm, 畝間の幅は約 20cm である。図 5 は点滴灌漑であり、土壌面に敷かれたチューブの穴から水を与えている。チューブとチューブの間隔は約 90cm, エミッター（チューブの穴）の間隔は約 40cm である。図 6 はマルチングの様子であり、土壌面の上にマルチ材と呼ばれる藁を敷いている。マルチ材として敷かれている藁は平均して約  $0.4\text{kg}/\text{m}^2$  の密度で敷かれている。図 7.1, 図 7.2 は細溝灌漑の様子であり、畝の中心に作物を植える畝間灌漑とは異なり、図 7.1 のように水が供給されている溝付近に植物を植え、なるべく必要な部分に限って水を供給するための仕組みとなっている。そして、図 7.2 は実際の圃場における細溝灌漑の様子である。

Sakha の対象圃場付近における水路は図 8 のようになっている。また、灌漑された水の排水は暗渠排水によって行われており、排水用のパイプが地下 1.35m の位置に埋められている。Sakha における排水パイプの分布図を図 9 に示す。

トウモロコシは、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と言え、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と言える。

サトウダイコンは、エジプトの冬季農作物として年々、作付面積が増加している。特に、

ナイルデルタ地域やカイロ北部等の土壌がやせ、他の作物の栽培に適さない地域で作付が増加しており、新たに開墾された土地でも生育が良い。生産量は、97/98年度の150万トンから2000/01年度には320万トンにまで増加しており、農業総生産額の5.2%を占めるまでになっている（農畜産業振興機構，2002）。

それぞれの圃場における作物の成長経過を次に示す。図10.1～10.3では、2010年夏季における草丈、LAI、乾物重の時系列の成長過程を示した。図11.1～11.2では、2011年夏季における草丈、LAI、乾物重の成長過程を示し、図12では、2011年夏季における作物の収量、図13では冬作における作物の収量を示した（丸山，2011，私信）。

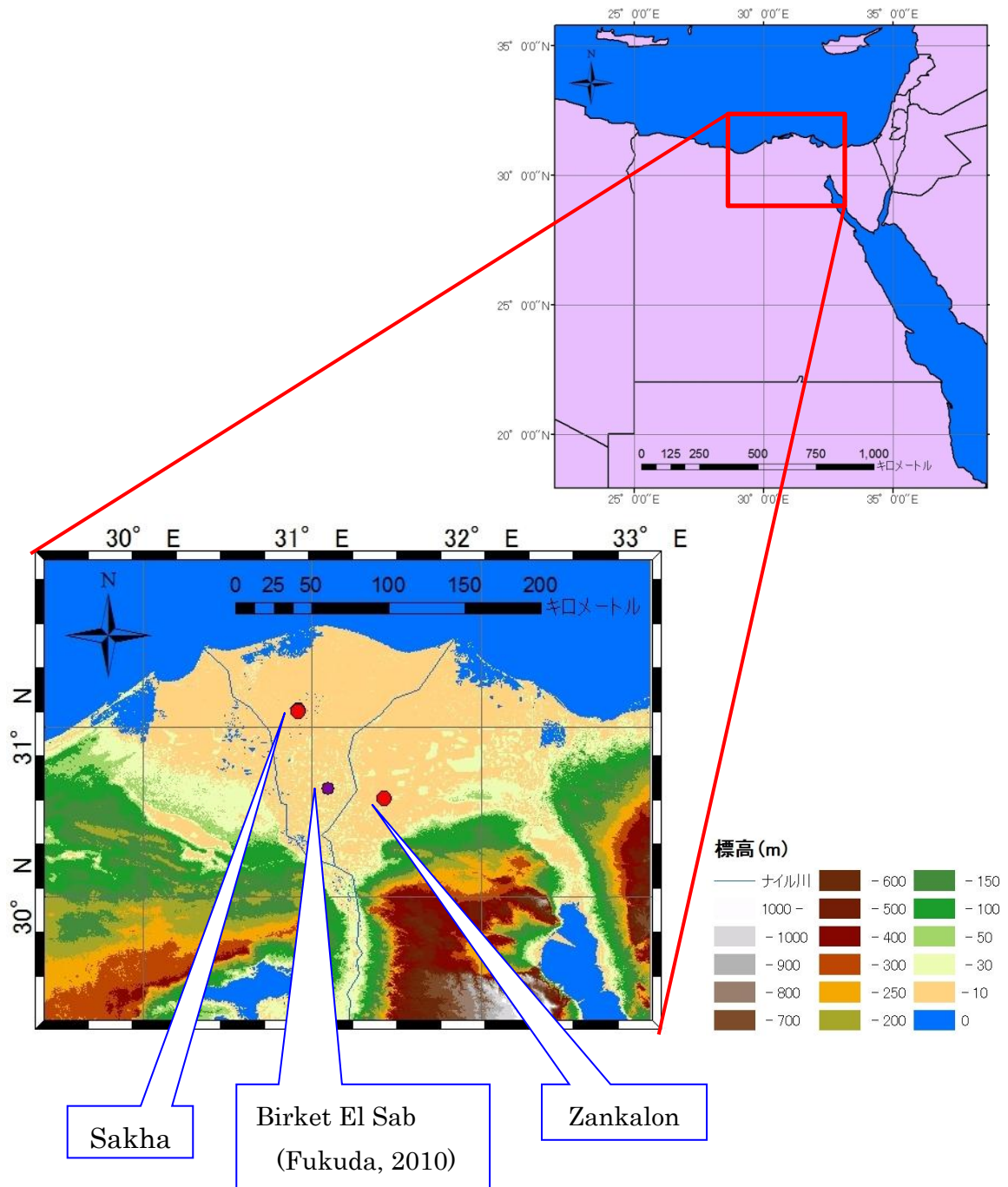


図 2. 観測地点 (衛星画像 : ASTER-GDEMデータより作成)

表 1 育成する作物および圃場管理方法におけるスケジュール

※トウモロコシの品種は、2010年夏は Cross 10, 2011年夏は Three Ways Cross324, テンサイの品種は TOP である

	2010年夏		2010～2011年冬		2011年夏	
	作物	圃場管理	作物	圃場管理	作物	圃場管理
Sakha N	トウモロ コシ	畝間灌漑	テンサイ	畝間灌漑	トウモロ コシ	畝間灌漑
Sakha S	トウモロ コシ	点滴灌漑	テンサイ	点滴灌漑	トウモロ コシ	点滴灌漑
Zankalon	トウモロ コシ	畝間灌漑 + マルチ ング	テンサイ	畝間灌漑 + マルチ ング	トウモロ コシ	畝間灌漑





図 3 圃場に設置した観測タワー（Zankalon にて 2010 年 8 月 3 日撮影）



図 4 畝間灌漑の様子 (SakhaN にて 2011 年 7 月 16 日撮影)  
畝と畝の間隔は約 40cm であり, 畝の幅は約 20cm, 畝間の幅は約 20cm である.



図 5 点滴灌漑の様子 (SakhaS にて 2010 年 8 月 6 日撮影)

チューブとチューブの間隔は約 90cm, エミッター (チューブの穴) の間隔は約 40cm である.





図 6 藁によるマルチングの様子 (Zankalon にて 2010 年 8 月 4 日撮影)  
マルチ材 (藁) は平均して約 $0.4\text{kg}/\text{m}^2$ の密度で敷かれている。

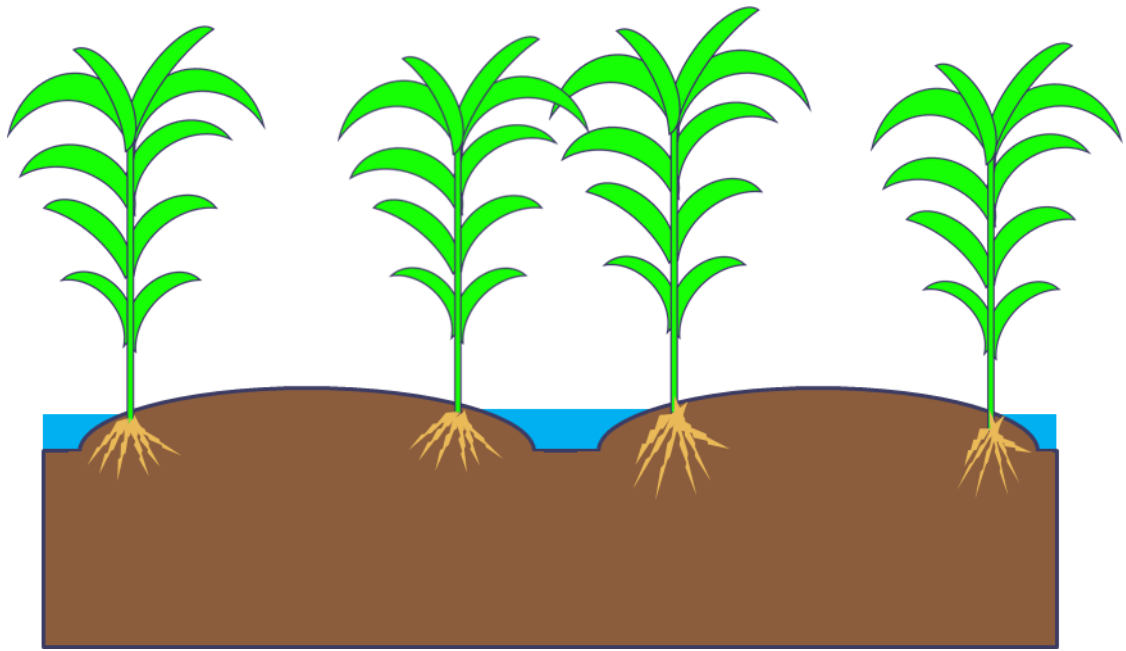


図 7.1 細溝灌漑の概念図

畝間灌漑とは異なり，溝の部分は約30cm, 溝と溝の間隔は約160cmとなっている．



図 7.2 細溝灌漑の様子

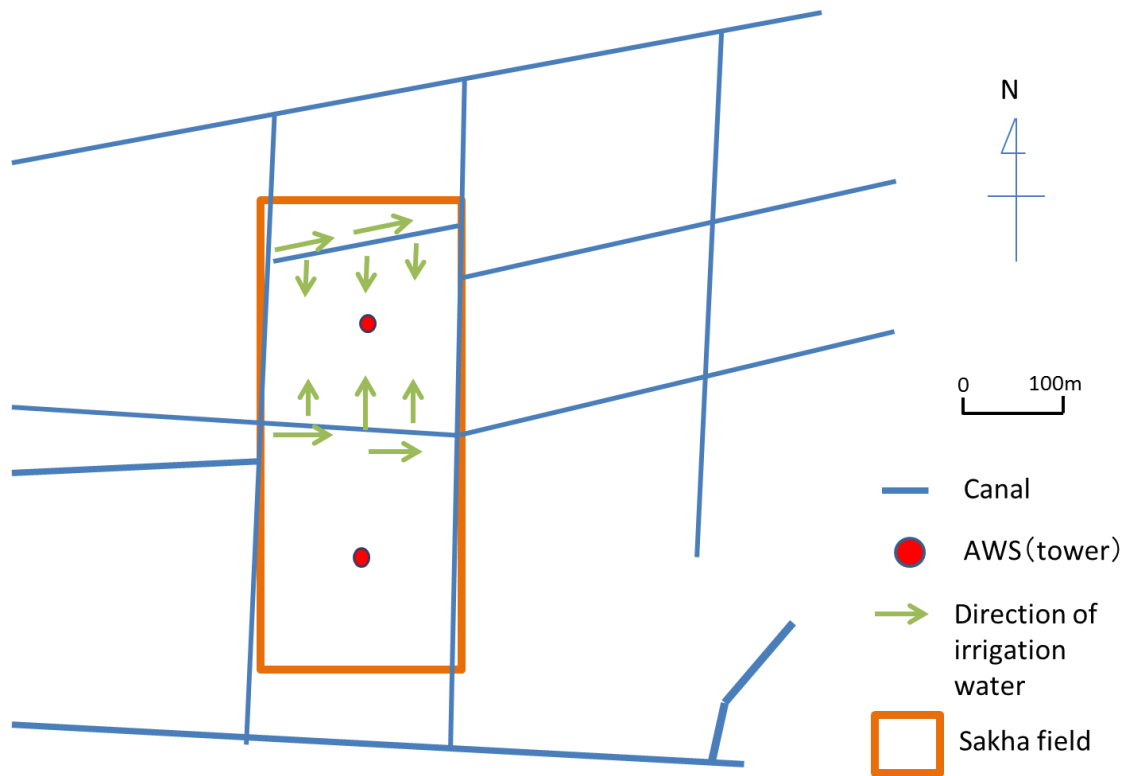


図 8 Sakha における水路図

青線が水路，赤点が AWS 観測タワー，緑の矢印が畝間灌漑時の灌漑水の流れ，  
 橙色の枠が対象となる Sakha の圃場を表す。

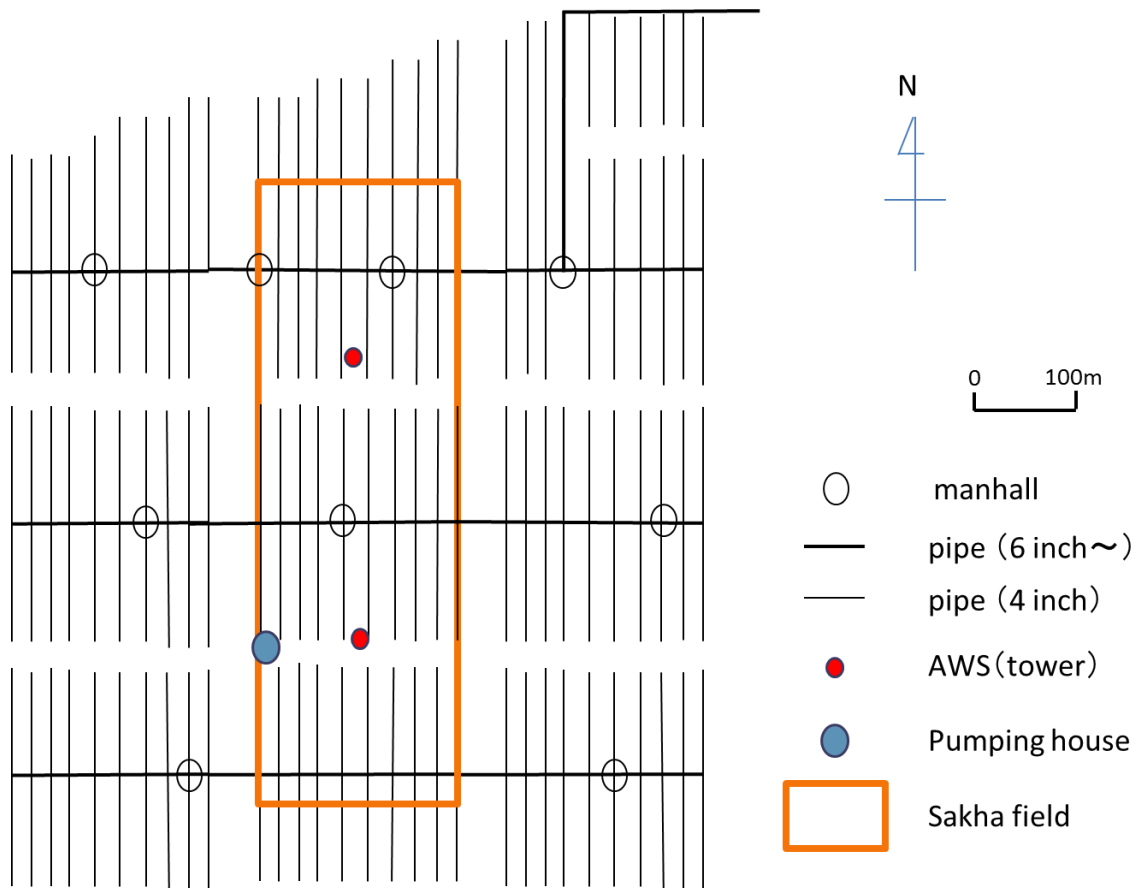


図9 Sakhaにおける暗渠排水のパイプの分布図

○がマンホール，赤点が AWS 観測タワー，青点がポンプ小屋，橙色の枠が対象となる Sakha の圃場を表す．黒線はパイプであり，深度135cmの深さに設置されている．

表 2.1 植生の成長過程 (2010年夏)

SakhaN

	6/25 (播種)	7/19	8/9	8/30	9/18 (収穫)
草丈 (cm)	0	50.0	182.3	285.7	293
LAI	0	0.1	1.9	3.2	
乾物重 (g/m <sup>2</sup> )	0	7.5	269.1	956.1	

SakhaS

	7/2 (播種)	7/19	8/9	8/30	9/18 (収穫)
草丈 (cm)	0	61.3	179.1	273.4	172
LAI	0	0.3	2.8	3.9	
乾物重 (g/m <sup>2</sup> )	0	20.9	381.9	1021.9	

Zankalon

	6/24 (播種)	7/19	8/9	8/30	9/18 (収穫)
草丈 (cm)	0	116.3	237.3	252.1	261.0
LAI	0	0.4	1.0	4.3	3.8
乾物重 (g/m <sup>2</sup> )	0	77.6	1197.1	1078.3	



表 2.2 植生の成長過程 (2011年夏)

SakhaN

	6/14 (播種)	7/5	7/26	8/16	9/17 (収穫)
草丈 (cm)	0	41.7	191.9	294.7	311.7
LAI	0	0.09	2.3	3.4	
乾物重 (g/m <sup>2</sup> )	0	7.5	269.1	956.1	

SakhaS

	6/9 (播種)	7/5	7/26	8/16	9/17	9/24 (収穫)
草丈 (cm)	0	46.6	167.3	249.6	208.9	
LAI	0	0.1	2.0	3.1		
乾物重 (g/m <sup>2</sup> )	0	20.9	381.9	1021.9		

Zankalon

	6/16 (播種)	7/7	7/27	8/17	9/7	9/22 (収穫)
草丈 (cm)	0	33.5	136.8	286.3	294.0	
LAI	0	0.1	1.1	2.1	1.7	
乾物重 (g/m <sup>2</sup> )	0	77.6	1197.1	1078.3		

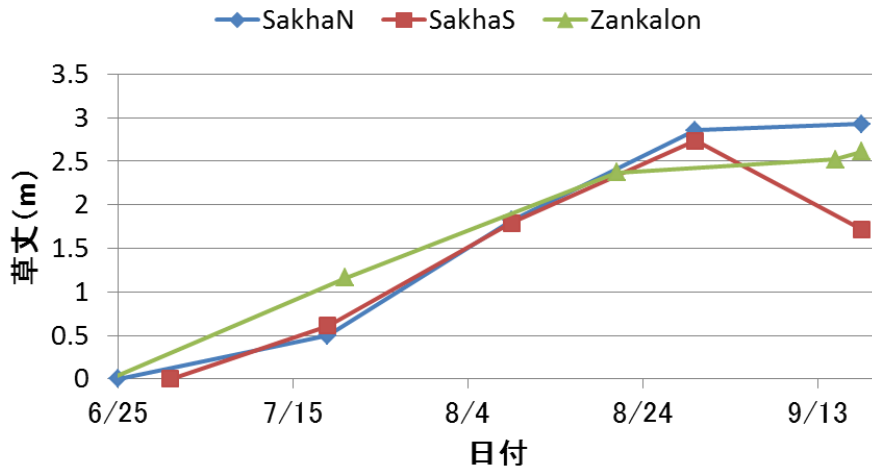


図 10.1 2010 年夏季作物における草丈の成長過程

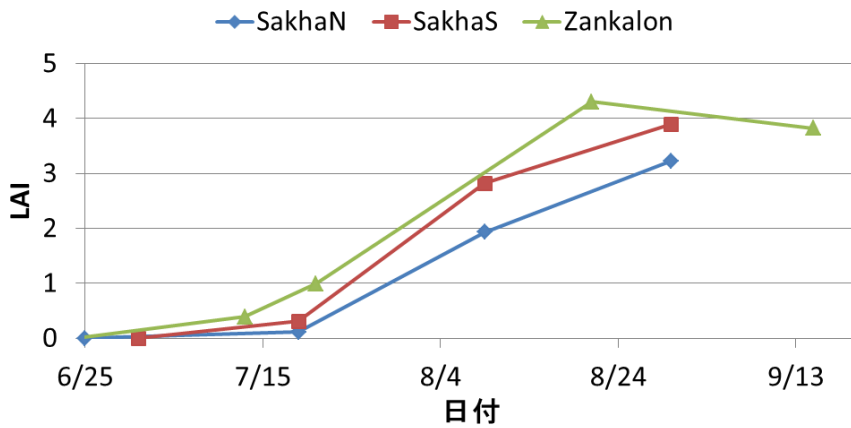


図 10.2 2010 年夏季作物における LAI の成長過程

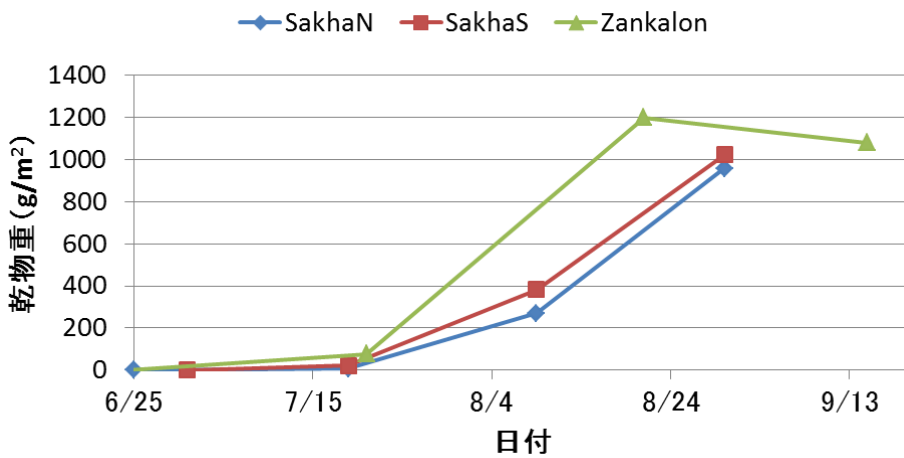


図 10.3 2010 年夏季作物における乾物重の成長過程

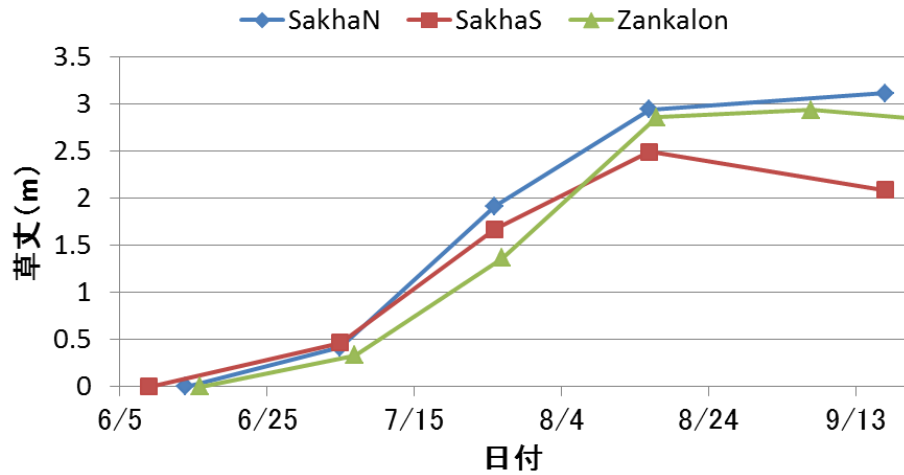


図11.1 2011年夏季作物における草丈の成長過程

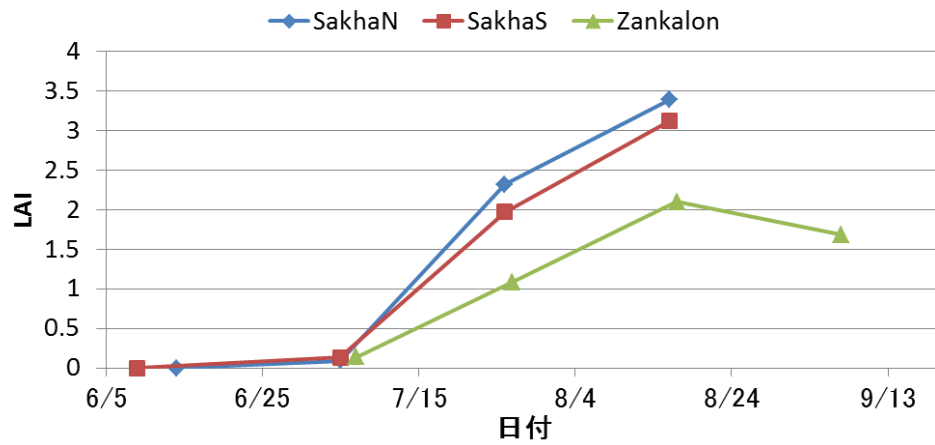


図11.2 2011年夏季作物におけるLAIの成長過程

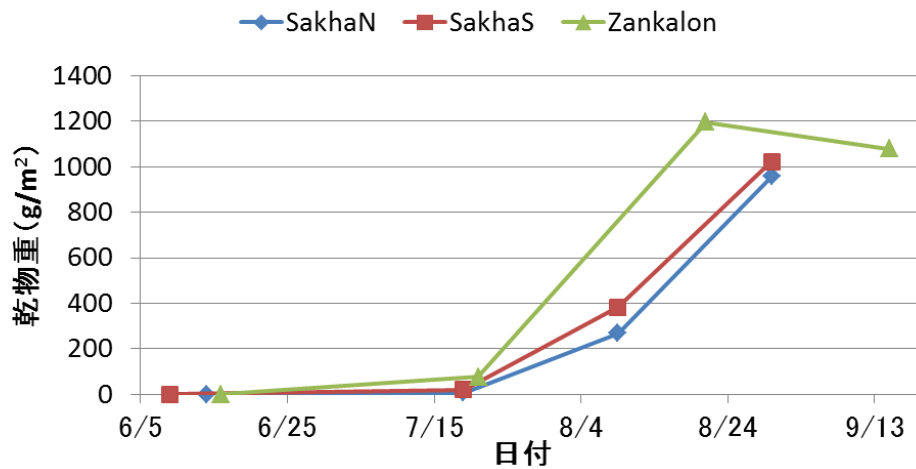


図11.3 2011年夏季作物における乾物重の成長過程

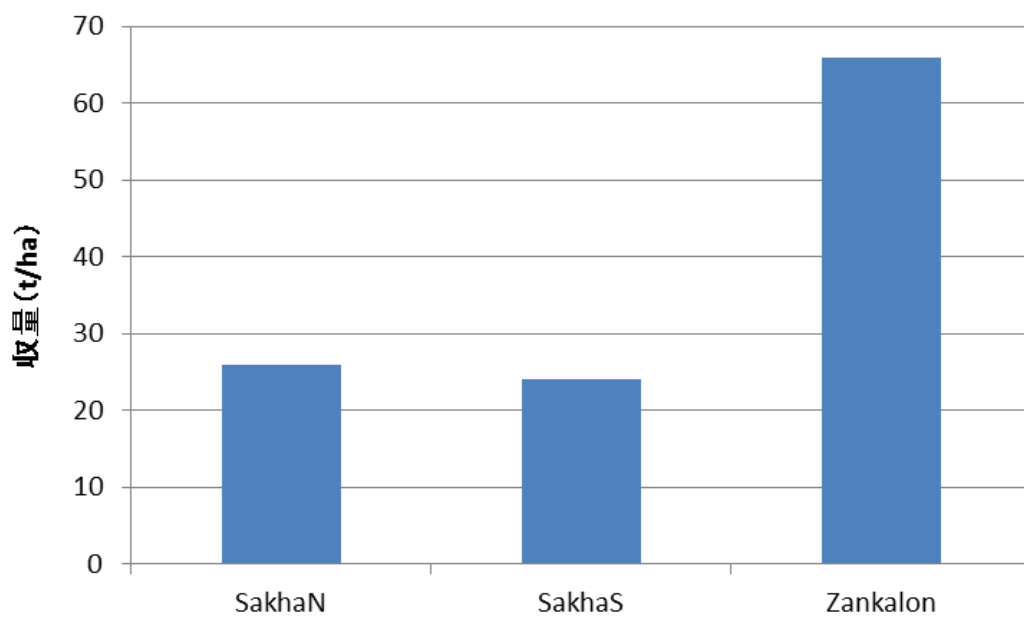


図 12 2010 年～ 2011 年冬作における収量（丸山（2011，私信）に基づき作成）

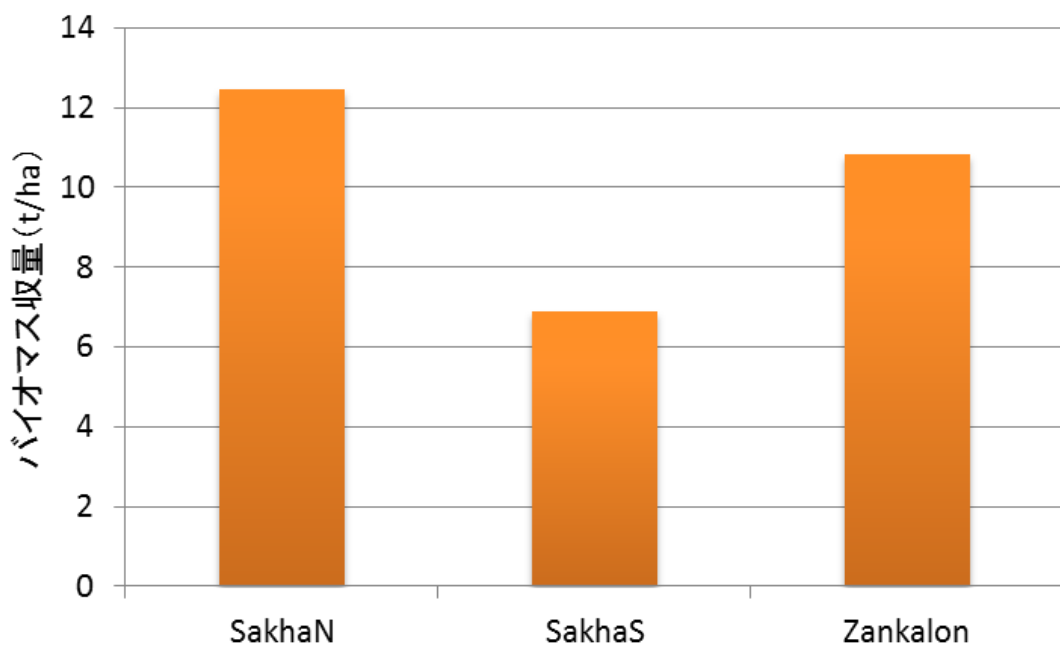


図 13 2011 年夏季作物における収量（丸山（2011，私信）に基づき作成）

## 2.2 観測方法

観測は、大きく分けて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， EVEREST 4000.4ZL）による表面温度の観測，③キャノピーアナライザー（LAI-2200）による観測，④リーフポロメーター（LI-1600）による観測の4つである。

### ① 自動気象観測装置（AWS）による気象観測

この観測は、2010年6月に観測タワーが立てられてから連続して行われている。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。各測器の取り付け位置を図14に示す。また、観測機器の配線状況を図15に示す。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2にまとめた。なお、風速3成分  $u, v, w$  [m/s]，気温  $T$  [°C]，水蒸気密度  $\rho_v$  [kg/m<sup>3</sup>]，二酸化炭素濃度  $\rho_c$  [mmol/m<sup>3</sup>] に関しては、

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

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

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

この観測の目的は、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データを得るためである。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ものであり、今回の観測では、ハンドホールドタイプの MINOLTA- 温度計 505 と、固定型の EVEREST 4000.4ZL の二つを用いて行った。

MINOLTA- 温度計 505 での観測は、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ものである（図16）。図11で示した、圃場中心部から50m離れた東西南北4地点（橙色の点）において観測を行い、各地点を15分ごとに回り、1時間で1周するサイクルで行う。一回の観測では、各地点で約15～20サンプルを測定した。観測ポイントは、図17で示すように、各地点の2×2mの範囲でランダムに選んだ。また観測前に、2010年、2011年ともに、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,・・・70(°C)と0°Cから70°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。

EVEREST 4000.4ZL は一点に固定して連続して観測するタイプの測器であり、葉面温度のみを観測した(図18)。

### ③ キャノピーアナライザーによる観測

この観測の目的は、植生情報である LAI(葉面積指数)およびモデルのパラメータ(放射の遮蔽率)を得るため、そして LAI と遮蔽率の関係性を調べるためである。

LAI の測定には、キャノピーアナライザー(LAI-2200)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、LAI を測定する上で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、日の入りの時刻(およそ 18:00 ~ 19:00)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、個体群落の地上数 cm の高さで透過光を測定する(図19.1, 19.2)。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)。以上の様に、この太陽光の遮蔽率から LAI を計算する仕組みになっている。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 ~ 6 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。これらの観測を、図 17 に示したような 2m × 2m のエリアにおいて行い、橙点の東西南北 4 地点だけでなく、北東・南東・南西・北西(黒点)も含めた 8 地点で測定した。

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。このときの観測は昼間の日が出ている時間帯を選んだ。キャノピーアナライザー本来の目的通りに LAI を求めるのではなく、植生上の放射量と植生下の放射量のサンプルを得ることで、得られたデータから入射光と透過光それぞれの平均値の比を求め、これを植生による放射の遮蔽率とした。測定する地点は、LAI を測定した所と同じ 8 地点において行い、放射量のサンプルは植生上で 1 ~ 2 回、植生下で 15 回前後とった。

### ④ リーフポロメーターによる観測

この観測の目的は、モデルにより算出された蒸散量と実際の作物からの蒸散量を比較するためである。リーフポロメーターは、対象の植物の葉を切り取ることなく蒸散量を

測定できるものであり、特に LI-1600 については、植物の蒸散に関する各要素を内蔵のマイクロコンピュータの演算処理によって 30 秒前後で測定・表示（記憶）することができ、しかも携帯用であるため試験圃場での使用も可能な計器である（小野，1985）。また、蒸散量だけでなく、気孔抵抗や温度，PAR，なども同時に測られている。

このポロメーターによって、2011 年 7 月のみ、昼前後の時間において蒸散量の観測も行った。今回の観測では、測定のために選択する葉は、成長の度合いが高いものと低いもの様々なものをランダムに選んだ。



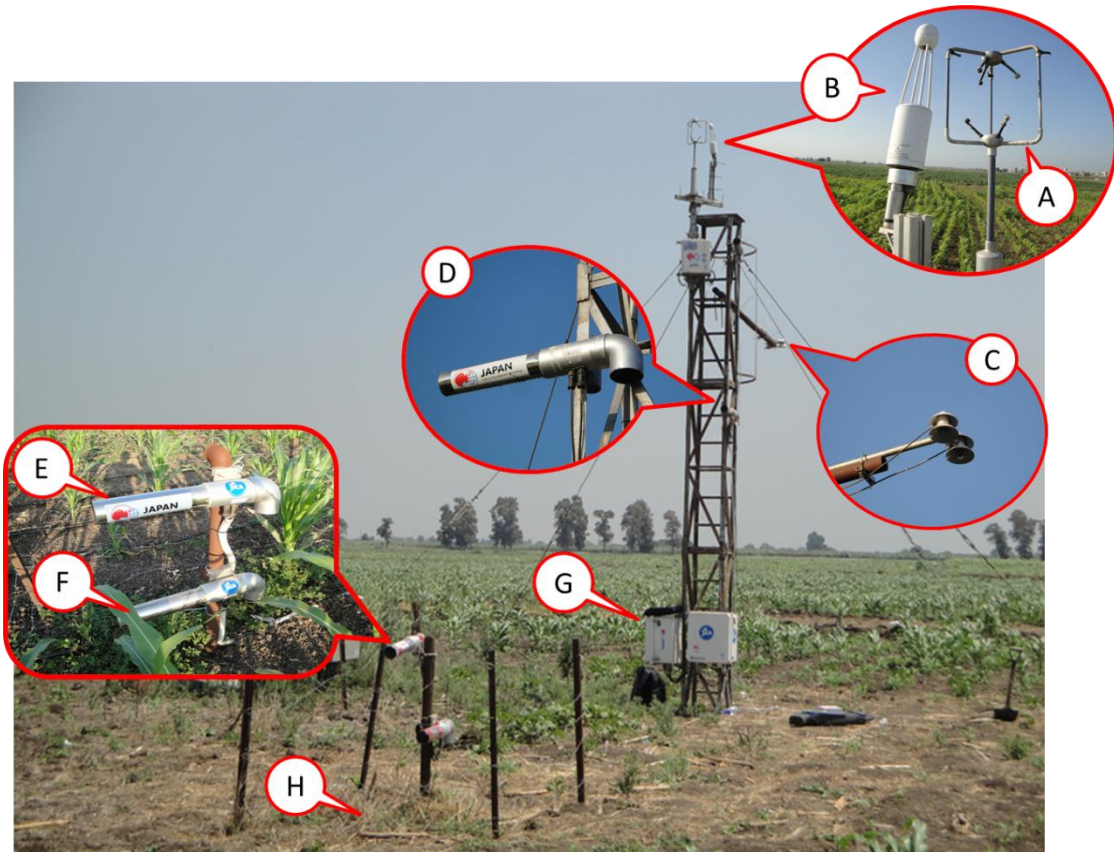


図 14 AWS における各測器と設置状況

(全体の写真は SakhaN にて 2011 年 7 月 15 日撮影)

各測器名は以下の通りとなっている。

- A) 超音波風速計, B) オープンパスガスアナライザー
- C) 4成分放射収支計, D), E), F) 温湿度計 (3 高度)
- G) 気圧計 (ロガー BOX 内), H) 地中熱流板 (地中に埋設)

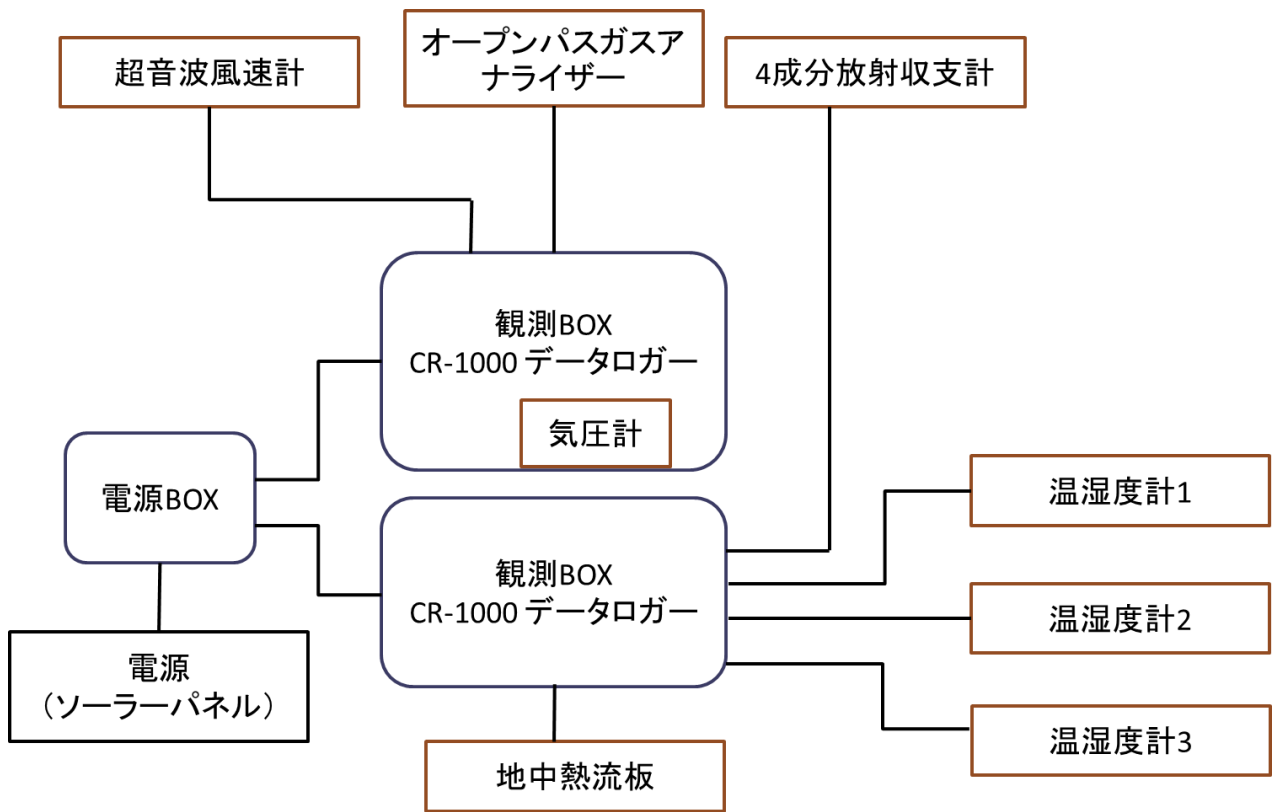


図 15 AWS の配線図

表 3 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/sec] 音仮気温 $T$ [°C]	超音波風速温度計 (GILL Instruments R3-50)	5.78 m	毎 0.1 秒	前 30 分	毎時 0 分, 30 分
水蒸気濃度 $\rho_v$ [mmol/m <sup>3</sup> ] 二酸化炭素濃度 $\rho_c$ [mmol/m <sup>3</sup> ]	オープンパスガスアナライザ ー (LI-COR, Inc., LI-7500)	5.78 m	毎 0.1 秒	前 30 分	毎時 0 分, 30 分
短波放射 $S_s, S_l$ [W/m <sup>2</sup> ] 長波放射 $L_s, L_l$ [W/m <sup>2</sup> ]	4 成分放射計 (Hukseflux NR01)	4.20 m	毎 10 秒	前 30 分	毎時 0 分, 30 分
気温 $T_a$ [°C] 湿度 $Rh$ [%]	温湿度計 (3 高度) (Vaisala MP155, with Climatec radiation shield )	3.00 m 1.00 m 0.50 m	毎 10 秒	前 30 分	毎時 0 分, 30 分
気圧 $P$ [hPa]	気圧計 (Vaisala PTB210)	0.80 m	毎 0.1 秒	前 30 分	毎時 0 分, 30 分
地中熱流量 $G$ [W/m <sup>2</sup> ]	地中熱流板 (Hukseflux HFP-01)	-0.03 m	毎 10 秒	前 30 分	毎時 0 分, 30 分



図16 放射温度計（MINOLTA-温度計 505）による観測の様子  
（Birket El Sabにて 2009 年 8 月 13 日撮影）

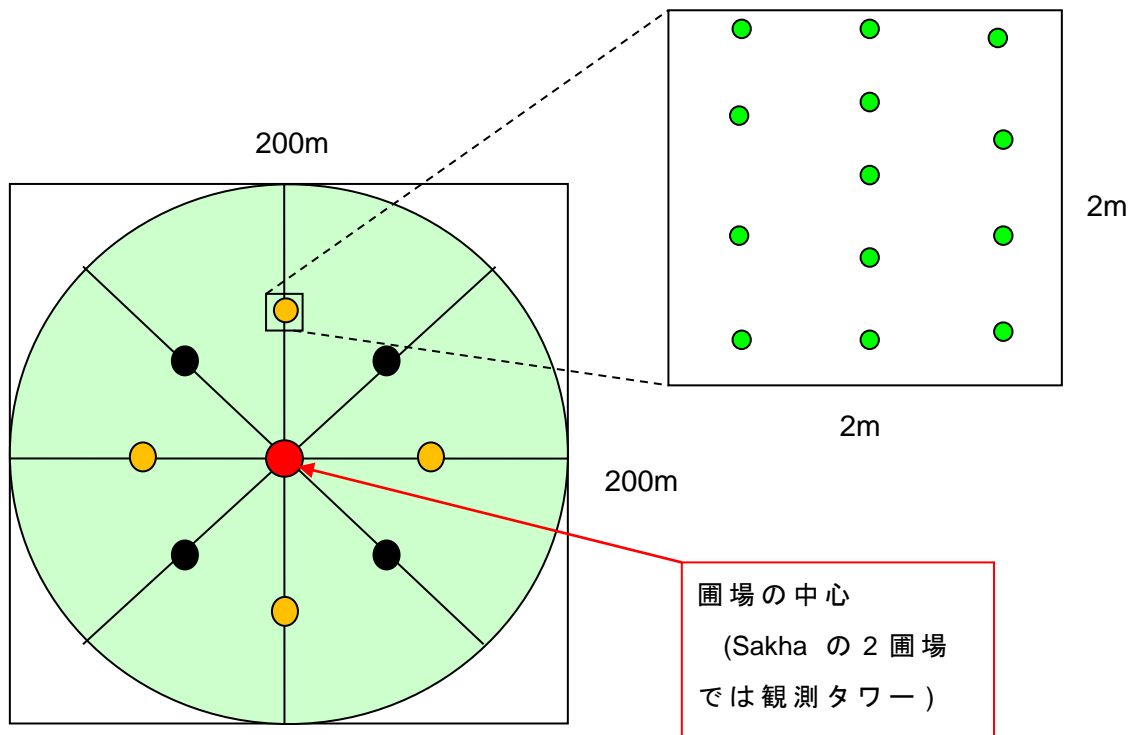


図 17 圃場において放射温度計およびキャノピーアナライザーによる観測を行った地点

放射温度計による観測は、黄色の4点を回り、キャノピーアナライザーによる観測は橙色と黒色を含む8点で観測を行った。その各点での2×2mの中でランダムにサンプルをとった。



図 18 放射温度計 (EVEREST 4000.4ZL) による観測の様子  
(Zankalon にて 2011 年 7 月 21 日撮影)





図19.1 キャノピーアナライザーによる植生の上での測定の様子



図 19.2 キャノピーアナライザーによる植生の下での測定の様子

## 2.3 データ処理

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（ii）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) 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に行った。

### ① 水平方向の主風向変換

計測された風速3成分を $X, Y, Z$ とし、主風向変換後の風速3成分を $U, V, W$ とすると、風向 $\theta$ に対する水平成分の変換は、

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

$$U = X \cos \theta + Y \sin \theta \quad (2)$$

$$V = -X \sin \theta + Y \cos \theta \quad (3)$$

となる。結果、平均操作に対しては次のようになる

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

### ② 鉛直方向の主風向変換

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

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{\overline{W}}{\overline{U}}\right) \quad (5)$$

$$U_c = U \cos \alpha + W \sin \alpha \quad (6)$$

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

とする。結果、平均操作に対しては次のようになる

$$\overline{W_c} = -\overline{U} \sin \alpha + \overline{W} \cos \alpha = (-\overline{U} \tan \alpha + \overline{W}) \cos \alpha =$$

(ii) 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。

$$\overline{w'\rho_v'} = \left(1 + \frac{e}{\rho_a}\right) \left(\overline{w'\rho_v'} + \frac{\rho_v}{T} \overline{w'T'}\right) \quad (9)$$

ここで、 $\rho_a$  [kg/m<sup>3</sup>] 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) .

$$e = \frac{\rho_v \cdot T}{0.2167} \quad (10)$$

$$\rho_a = 1.293 \cdot \frac{273.15}{273.15 + T} \cdot \frac{P - 0.378e}{1013.25} \quad (11)$$

(iii) 鉛直方向への座標変換に対する変換角度  $\theta$  の補正を行った. この  $\theta$  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 20). この変換角度  $\theta$  について, 大きく傑出した値をそのデータを内挿により補完した. そして補完し, 内挿後の鉛直方向の変換角度  $\theta$  を用いて再度座標変換を行った. 補完前と補完後の鉛直方向への変換角度  $\theta$  のデータ時系列の例を図 21.1, 図 21.2 に示す.

これら (i) ~ (iii) の過程により補正された分散および共分散を  $\sigma_x, \overline{x'y'}$  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, 2010 年夏において行った.

## 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  $H$  [ $\text{W/m}^2$ ], 潜熱フラックス  $IE$  [ $\text{W/m}^2$ ], 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.

$$H = C_p \rho_a \overline{w'T'} \quad (12)$$

$$IE = \overline{lw'\rho_v'} \quad (13)$$

$$u_* = \sqrt[4]{(\overline{u'w'})^2 + (\overline{v'w'})^2} \quad (14)$$

ここで、 $C_p$  [J/kg/K] は大気の変比熱、 $l$  [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。

$$C_p = 1005 \left( 1 + 0.84 \frac{\rho_v}{\rho_a} \right) \quad (15)$$

$$l = 3.15 \times 10^3 - 2.38(273.15 + T) \quad (16)$$

以上の方法でフラックスの算出を行ったが、フラックス観測において欠測期間も見られた。この期間のフラックスは、ボーエン比法を用いて、以下のような式で算出した。

$$Bo = \frac{H}{lE} = \frac{C_p}{l} \frac{T_1 - T_2}{q_1 - q_2} \quad (17)$$

$$H = (R_n - G) \frac{1}{1 + Bo} \quad (18)$$

$$lE = (R_n - G) \frac{Bo}{1 + Bo} \quad (19)$$

ここで、 $Bo$  はボーエン比である。 $T_1$ ,  $T_2$ ,  $q_1$ ,  $q_2$  は2つの高度における気温および比湿である。これらには、3.00 m および 1.00 m の温湿度計のデータを用いた。 $R_n$  は正味放射量であり、4成分放射収支計の値から求めた。 $G$  は地中熱流量であり、熱流板の測定値を用いた。

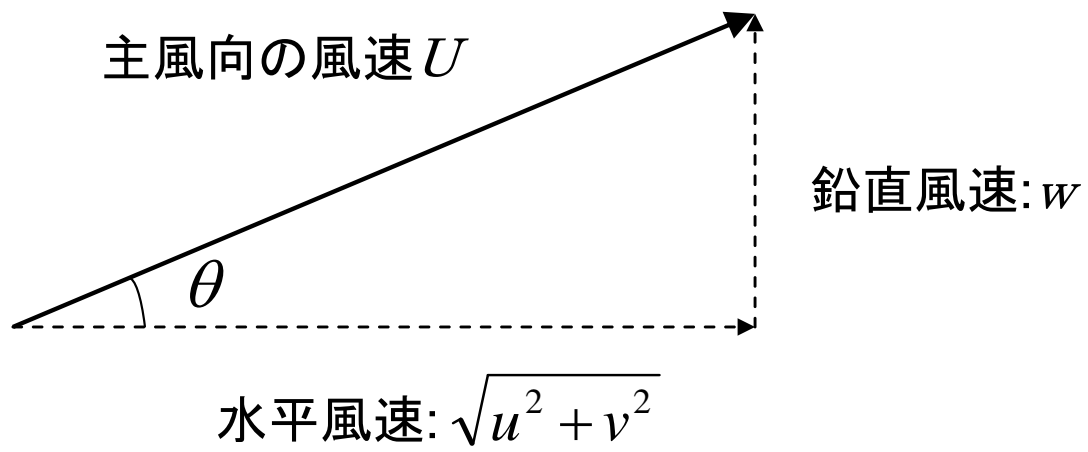


図 20 風速鉛直方向への変換角度

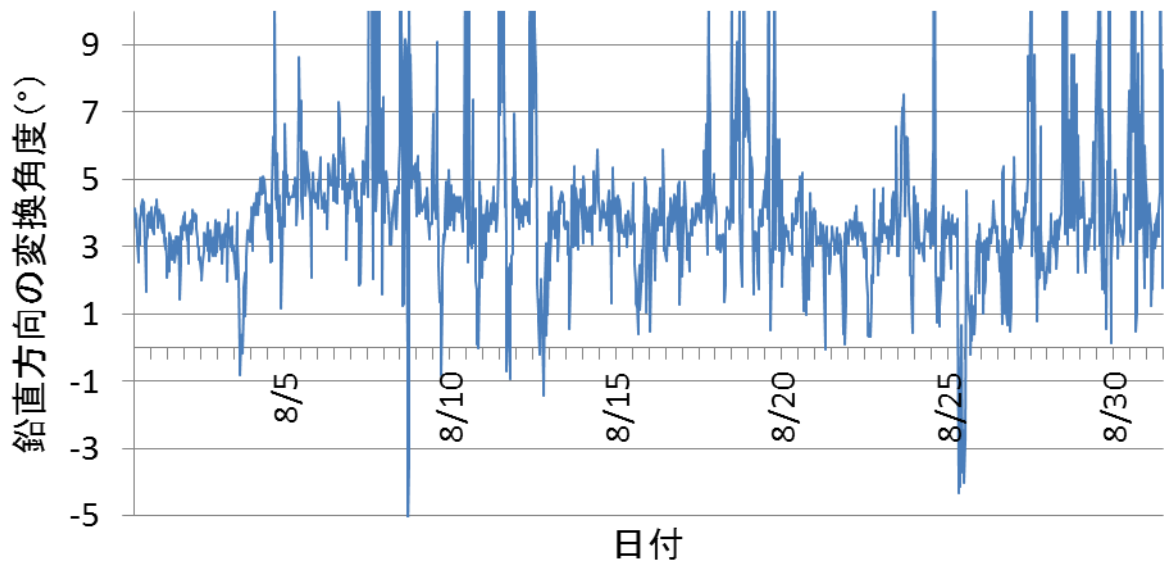


図21.1 風速鉛直方向の座標変換角度の時系列 (SakhaNでの2010年8月データの例)

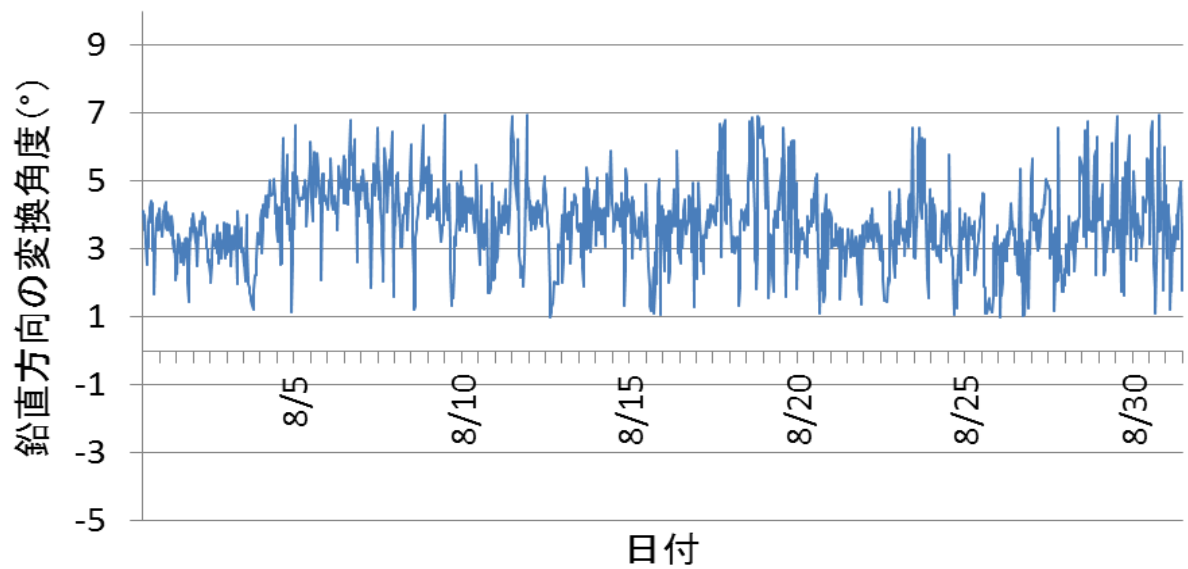


図21.2 補完後の風速鉛直方向の座標変換角度の時系列  
(SakhaNでの2010年8月データの例)

## 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  $\sigma_f$  を用いて計算を行った。 $\sigma_f$  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。 $\sigma_f$  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  $\sigma_f$  と LAI の関係を推定し、LAI の時系列変化から求めた。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

$$\begin{aligned} S_h^\downarrow - S_h^\uparrow + L_h^\downarrow - L_h^\uparrow - (S_g^\downarrow - S_g^\uparrow + L_g^\downarrow - L_g^\uparrow) \\ = H_h - H_g + l(E_h - E_g) \end{aligned} \quad (20)$$

- ・ 地表面

$$S_g^\downarrow - S_g^\uparrow + L_g^\downarrow - L_g^\uparrow - H_g - lE_g = G \quad (21)$$

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。

$$S_h^\uparrow = (1 - \sigma_f) \alpha_g S_h^\downarrow + \sigma_f \alpha_f S_h^\downarrow \quad (22)$$

$$L_h^\uparrow = (1 - \sigma_f) [\varepsilon_g \sigma T_g^4 + (1 - \varepsilon_g) L_h^\uparrow] + \sigma_f [\varepsilon_f \sigma T_f^4 + (1 - \varepsilon_f) L_h^\downarrow] \quad (23)$$

$$S_g^\downarrow = (1 - \sigma_f) S_h^\downarrow \quad (24)$$

$$S_g^\downarrow = \alpha_g (1 - \sigma_f) S_h^\downarrow \quad (25)$$

$$L_h^\downarrow = (1 - \sigma_f) L_h^\uparrow + \sigma_f [\varepsilon_f \sigma T_f^4 + (1 - \varepsilon_f) \varepsilon_g \sigma T_g^4] / (\varepsilon_f + \varepsilon_g - \varepsilon_f \cdot \varepsilon_g) \quad (26)$$

$$L_h^\downarrow = (1 - \sigma_f) \left[ \varepsilon_g \sigma T_g^4 + (1 - \varepsilon_f) L_h^\downarrow \right] + \sigma_f \left[ \varepsilon_g \sigma T_f^4 + (1 - \varepsilon_g) \varepsilon_f \sigma T_f^4 \right] / (\varepsilon_f + \varepsilon_g - \varepsilon_f \cdot \varepsilon_g) \quad (27)$$

〈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。

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = c_1 \frac{G}{\rho_s c_s d_1} - c_2 \frac{T_g - T_2}{\tau_1} \quad (28)$$

ここで、

$$c_1 = 2\pi^{1/2}, c_2 = 2\pi \quad (29)$$

$\rho_s c_s$  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、 $\tau_1$  は一日の時間 (時間ステップが 10 分なら  $\tau_1 = 144$ )、 $T_2$  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、(22) ~ (28) 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。

$$q_f = r'' q_{sat}(T_f) + (1 - r'') q_{af} \quad (30)$$

ただし、

$$r'' = 1 - \delta_c \left[ r_s / (r_s + r_a) \right] \left[ 1 - (W_{dew} / W_{dmax})^{2/3} \right] \quad (31)$$

$$q_{af} = (1 - \sigma_f) q_a + \sigma_f (0.3q_a + 0.6q_f + 0.1q_g) \quad (32)$$

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。 $\delta_c$  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。 $W_{dew}$  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、植生上におけるバルク係数と風速の積で求めた。 $r_s$  は気孔抵抗であり、次の式で求めた。

〈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。

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

(33)

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。  $\rho_w$  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。

ここで  $C_1, C_2$  は、無次元パラメータであり、振幅と位相を合わせるはたらきをしている。(戸矢, 1989)。戸矢 (1989) ではこれらのパラメータを土壌水分量と蒸発量の値から回帰分析によって算出している。今回はこの方法に従って、AWS によって測られている蒸発量及び他研究室により提供して頂いた。土壌水分量のデータを元に算出した。

〈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 22)。

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。

$$H_f = C_p \rho_a C_{Hf} u_a (T_f - T_a) \quad (34)$$

$$LE_f = l \rho_a C_{Hf} u_a (q_f - q_a) \quad (35)$$

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。

$$H_g = C_p \rho_a C_{Hg} u_a (T_g - T_a) \quad (36)$$

$$LE_g = l \rho_a (q_g - q_a) / (R_a + R_{soil}) \quad (37)$$

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。また、 $R_a$  は空気力学抵抗であり、 $1/CHg$  で求められる。 $R_{soil}$  は土壌抵抗であり、次の式で算出した (Kondo et al., 1990)。

$$r_s = 216 (w_{max} - w_g) / D_{atm} \quad (38)$$

ここで、 $w_{max}$  は土壌の間隙率、 $w_g$  は表層付近の土壌水分量、 $D_{atm}$  は以下の式で計算される。

$$D_{atm} = 0.299 \times 10^{-4} (T_g / 273.16)^{1.75} \quad (39)$$

ここで、 $T_g$  は土壌面温度 (K) 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 4.1， 4.2 にまとめた。ここで、出力項目（表4.2）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 4.3 にまとめた。そして、その他の定数・係数等を表 4.4 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。

〈土壌面におけるバルク係数〉

土壌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。

$$C_{Hg} = \frac{k^2}{\ln\left(\frac{z-d_0}{z_0}\right)\ln\left(\frac{z-d_0}{z_{0h}}\right)} \quad (40)$$

ここで、 $k$ はカルマン係数（=0.4）， $z$ は観測高度（5.78m）， $d_0$ 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。

〈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。

$$C_{Hf} = C_{Hh} - C_{Hg} \quad (41)$$

ここで、 $C_{Hh}$ は群落上における群落・土壌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。

$$C_{Hh} = \frac{k^2}{\left\{ \ln\left(\frac{z-d_0}{z_0}\right) - \Psi_m(\zeta) \right\} \left\{ \ln\left(\frac{z-d_0}{z_{0h}}\right) - \Psi_h(\zeta) \right\}} \quad (42)$$

ただし、 $k$ はカルマン係数（=0.4）， $z$ は観測高度（5.78m）， $\Psi(\zeta)$ は安定度補正関数であり、Brutsaert（2008）での関係式を用いた。ここで、群落上での大気安定度 $\zeta$ は次



の式で求めた。

$$\zeta = \frac{z - d_0}{L} \quad (43)$$

$L$  はモニン・オブコフ長であり，以下の式で求めた。

$$L = \frac{-Tu_*^3}{kg(\overline{w'T'} + 0.61\overline{w'q'})} \quad (44)$$

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。

$$d_0 = 1.04h^{0.88} \quad (45)$$

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。

〈粗度の計算〉

$z_0$  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。

$$U = \frac{u_*}{k} \left[ \ln \left( \frac{z - d_0}{z_0} \right) - \Psi_m(\zeta) \right] \quad (46)$$

$$\overline{w'T'} = \frac{T_s - T_a}{u_* k} \left[ \ln \left( \frac{z - d_0}{z_{0h}} \right) - \Psi_h(\zeta) \right] \quad (47)$$

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/ m<sup>2</sup>]，⑤温度差： $T_s - T_a > 3$  [°C]。⑤に関しては， $z_{0h}$  の決定時にのみ用いた。

これらの計算は，気象データの他，植生のデータなどが測られていないとできない。よって，植生のデータの測定日（丸山，2010，2011，私信）＋前後3日の全1週間の気象データをもとに求め，間の日の値は内挿によって推定した。土壌面での粗度は，播種の前，または播種直後の気象データから推定した。

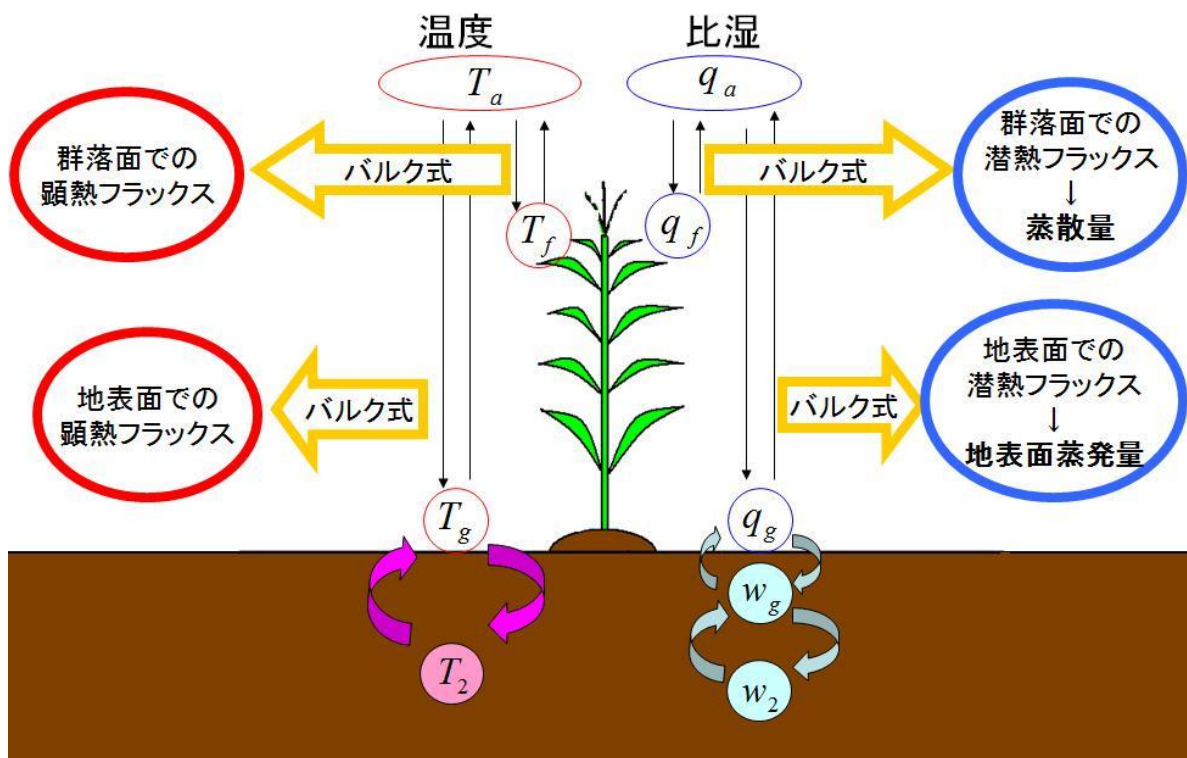


図 22 本研究で用いたモデルの概念図

Deardorff (1978) を元にした強制復元法および熱収支法を用いて各高度における温度・比湿を算出し、この 2 高度の値から、並列源モデル (近藤, 2000) の理論によりバルク式でフラックスを算出した。

表 4.1 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 <sup>2</sup>	測定値	10分
$S_h$	下向き短波放射 (測定高度)	W/ m <sup>2</sup>	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
$of$	遮蔽因子 (群落による放射の遮蔽率)		キャノピーアナライザーによる光量子量の測定値および LAI の時系列より推定	10分
$p_g$	地表面降水量 (灌漑水量)	mm	藤巻 (2010・2011, 私信)	10分

表 4.2 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 <sup>2</sup>	10分, 1時間
$H_f$	群落からの顕熱	W/ m <sup>2</sup>	10分, 1時間
$H_g$	地表面からの顕熱	W/ m <sup>2</sup>	10分, 1時間
$H_h$	顕熱フラックス総量	W/ m <sup>2</sup>	10分, 1時間
$L_f^{\uparrow}$	上向き長波放射 (群落上)	W/ m <sup>2</sup>	10分, 1時間
$L_g^{\downarrow}$	下向き長波放射 (地表面)	W/ m <sup>2</sup>	10分, 1時間
$L_g^{\uparrow}$	上向き長波放射 (地表面)	W/ m <sup>2</sup>	10分, 1時間
$S_f^{\uparrow}$	上向き短波放射 (群落上)	W/ m <sup>2</sup>	10分, 1時間
$S_g^{\downarrow}$	下向き短波放射 (地表面)	W/ m <sup>2</sup>	10分, 1時間
$S_g^{\uparrow}$	上向き短波放射 (地表面)	W/ m <sup>2</sup>	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 (0 ~ $d_2$ 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 (0 ~ $d_2$ 層での平均値)		10分
$\alpha_f$	群落面のアルベド		10分
$\alpha_g$	地表面のアルベド		10分

表 4.3 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	0.010
$q_f$	群落葉面比湿	kg/kg	0.010
$q_g$	地表面比湿	kg/kg	0.011
$T_{af}$	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 (0 ~ $d_2$ 層での平均 値)	K	300.0
$w_g$	地表水分量		0.15
$w_2$	地中水分量 (0 ~ $d_2$ 層での平均 値)		0.15

表 4.4 モデルにおける定数・係数

記号	意味	単位	値	Reference, 決定法
$g$	重力加速度	m/s <sup>2</sup>	9.8	
$k$	カルマン係数		0.4	
$\sigma$	ステファン・ボルツマン定数	W/m <sup>2</sup> · K <sup>4</sup>	$5.67 \times 10^{-8}$	近藤 (2000)
$\tau_1$	日周期	hr	24	Deardorff (1978)
$c_1$	定数		$2 \pi^{1/2}$	Deardorff (1978)
$c_2$	定数		$2 \pi$	Deardorff (1978)
$C_1$	係数			土壌水分データから推定, キャリブレーション
$C_2$	係数			土壌水分データから推定, キャリブレーション
$C_{H0}$	熱・水分輸送係数 (地表面)		0.0034~ 0.0038	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	地温データから推定, Deardorf (1978)
$d_2$	土壌深度 (気温の年変化に影響を受ける)	m	11.46	地温データから推定, Deardorff (1978)
$d_1'$	土壌深度 (湿度の日変化に影響を受ける)	m	0.3	土壌水分データから推定, キャリブレーション
$d_2'$	土壌深度 (湿度の年変化に影響を受ける)	m	1.5	土壌水分データから推定, キャリブレーション
$\varepsilon_f$	群落の射出率		0.96	Wittich (1997)
$\varepsilon_g$	地表面の射出率		0.97	近藤 (2000)

		W/ m <sup>2</sup>	$S_h'$ の最大観測値 を使用
$S_{max}$	最大日射量	1014	
$w_k$	圃場容水量	0.48	土壌特性試験データから推定
$w_{max}$	間隙率	0.6	土壌特性試験データから推定
$w_{dmax}$	$w_{dew}$ (群落単位面積当たりに残存する水分量の最大値)	$0.1\sigma_f$	Deardorff (1978)
$w_{wilt}$	シオレ点	0.25	土壌特性試験データから推定

※地温および土壌水分データは藤巻 (2010, 2011, 私信), 土壌特性試験データは藤巻・星野 (2011, 私信) によるもの

### 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、2010 年 7 月 17 日 11:00 ~ 11:30 の 30 分間のスペクトル解析結果を図 23 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 24.1 ~ 24.5 に示す。

まず、Sakha について (図 24.1 ~ 24.4) 見てみると、線形化して、更にはその中の平均を出しても、多く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あまり見られなかったため、比較的信頼性があるデータであることが確認できた。しかし、SakhaS の 7 月 12 日 18:00 ~ 18:30 の二酸化炭素濃度におけるスペクトル (図 33.3) などを見れば分かりやすいが、高周波域においてやや傾きが 1 に乗っている傾向の見られるデータもあり、ホワイトノイズによる原因の可能性が考えられる。

また Zankalon においてだが、風速 x 成分、二酸化炭素濃度、水蒸気濃度のスペクトルについては Sakha の圃場と同様の傾向が見られた。しかし、風速 y 成分、風速 z 成分、気温については、7 月 8 日 13:00 ~ 13:30、7 月 25 日 3:00 ~ 3:30 のスペクトルにおいて高周波域から低周波域にかけて傾きが 1 付近となっており、ホワイトノイズ、あるいはその他のノイズ等が表れている可能性が考えられる。実際 Zankalon の 30 分平均データにおいて、7 月 6 日 ~ 8 月 5 日付近にかけて顕熱フラックスや風速において異常値が多く見られた。

また全体的として、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。

データのクオリティチェックに関してまとめると、実測値においても異常値が見られた



Zankalon の一部期間以外においては、データのクォリティとして正常なものであるということが分かった。

### 3.2 気温・湿度

AWS による観測は 2010 年から行われているため、2011 年までのデータを用いて年変化を見ることができる。図 25，図 26 に示すのが、温湿度計 (3m) で観測された気温と相対湿度の年変化である。気温は全体として、夏季は平均 25 °C 以上であり、冬季は平均 15 °C を下回る結果であった。相対湿度は、年間通して 65 ~ 85% 程であり、作物の植えられている期間において高い傾向が見られた。これは、灌漑によって圃場に水が供給され蒸発散量が増えるからであると考えられる。どちらの観測結果においても、Sakha の 2 圃場では気温と相対湿度に大きな差が見られなかった。Zankalon では、夏季における気温が Sakha よりもやや高い傾向が見られた。また、夏季においては相対湿度が Zankalon の方が低い月が多かった。冬～春にかけては、Sakha と Zankalon は同じ程度の相対湿度もしくは Zankalon の方が高い月もあった。

### 3.3 放射収支・熱収支

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月平均を求め、それを年変化の時系列としたものを図 27 に示した。この時系列は、SakhaN, SakhaS, Zankalon の平均値であり、エラーバーは 3 の圃場の最大値と最小値を表している。全体としてエラーバーの幅は狭く、遠く離れた Sakha と Zankalon とでも日射の条件は大きく変わらないということがこのグラフから分かる。

次に、同様な年変化を、正味放射量  $Rn$ ，顕熱フラックス  $H$ ，潜熱フラックス  $IE$ ，地中熱流量  $G$ ，の熱収支において示したものが図 28.1 ~ 28.3 である。時系列を見ると、顕熱・潜熱フラックスは正味放射におおよそ比例して増減していることが分かる。2010 年の 10 月付近や、2011 年の 6 月付近にいずれの圃場でも顕熱フラックスが上昇しているのは、作物刈取り後の裸地期間であるためであると考えられる。こちらは放射収支とは異なり、圃場ごとによる違いも顕著に見られた。畝間灌漑を行っている SakhaN と、畝間灌漑 (+ マルチング) および細溝灌漑を行っている Zankalon の二圃場の熱収支は、似たようなフラックスの傾向を示していた。夏季には平均潜熱フラックスが 100W/m<sup>2</sup> を超えることもあり、作物が植えられていない期間を除くほとんどの期間で潜熱フラックスが顕熱フラックスの倍以上との結果となった。特に Zankalon では顕熱フラックスに対して潜熱フラックスが大きい傾向が強かった。しかし、点滴灌漑を行っている SakhaS においては、作物の植えられていない期間以外でも顕熱フラックスと潜熱フラックスが同程度の値となっている期間も多く年間通してみると顕熱フラックスの方がやや大きく、他の圃場とは異なる傾向が見られた。

### 3.4 蒸発散量

渦相関法によって算出された潜熱フラックスより、各圃場での蒸発散量を求め、月ごとの積算値を図 29 に示した。ただし、渦相関法によるフラックスの欠測部分はボーエン比法によって算出した。また、棒グラフとともに示した折れ線の正味放射量 (mm) は、正味放射量 = 潜熱フラックスと仮定した場合の mm 換算で表した蒸発散量である。季節ごとにみると、夏季は 100 (mm/月) 前後、冬季は 50 (mm/月) 前後の蒸発散量を記録している。フラックスの年変化で示した傾向と同様に、蒸発散量は正味放射量におおよそ比例して増減しており、全体として SakhaS の蒸発散量が比較的低いということが見られる。また、このグラフから分かる蒸発散量の年積算量は 649 ~ 983mm/year であり、特に夏季 (6 ~ 9 月) に関しては全体の 43 ~ 48% を占めており、年蒸発散量の大きな割合を占めていたことが分かる。

また、蒸発散量を季節ごとに分けて評価した。図 30 は、2010 年夏季における各圃場における蒸発散量の日積算値の時系列と、各圃場における灌漑水量 (藤巻, 2010, 私信) を表したグラフである。図 31 は播種後 80 日間における積算値である。SakhaN における灌漑水量は、2010 年においてはデータが無かったため、初回の灌漑水量は Zankalon のものから、2 回目以降の灌漑水量は 2011 年のものから推定した。SakhaS の灌漑水量は、灌漑の頻度が多い分一日の灌漑水量は SakhaN や Zankalon (100mm/day 前後) と比べて数 mm と少ないので、同じグラフで比較しやすいように実際の灌漑水量 × 10 で表している。つまり、SakhaS における実際の灌漑水量はグラフの灌漑水量の 1/10 である。また、細かい日ごとの灌漑水量の記録は 7 月 13 日からのみであるが、全体では図 31 のように 148mm であったとされている。図 30 の時系列グラフを見ると、点滴灌漑の SakhaS の蒸発散量の挙動に比べて、畝間灌漑を行っている SakhaN や Zankalon の方が、灌漑によって蒸発散量が急激に上昇するポイントがいくつかあることが分かる。SakhaS では、1 日の灌漑水量が少ないので、そのような傾向はあまり見られなかった。SakhaN と SakhaS とを比較すると、圃場が隣り合っていることもあり、時系列の挙動が似ているが、灌漑方法による違いがそのような点で見受けられた。図 31 の積算値を見ると、灌漑水量は SakhaS が SakhaN や Zankalon の 1/4 程度となっており、蒸発散量も比較的少ない結果となった。また、SakhaS における蒸発散量が、灌漑によって撒かれた水量を上回っていた。

図 32 は、2011 年夏季における各圃場における蒸発散量の日積算値の時系列と、各圃場における灌漑水量を表したグラフである。図 30 は播種後 90 日間における積算値である。灌漑水量は、SakhaN の初回のみデータが無かったため、2010 年と同様に Zankalon の値を用いて推定した。SakhaS での灌漑水量は 2010 年の結果と同様に、実際の灌漑水量の 10 倍の値で示した。図 32 の蒸発散量の時系列を見ると、2010 年の結果と同様に、SakhaS に比べて SakhaN や Zankalon による結果の方が灌漑水による反応が顕著に見られた。特に灌漑直後や、グラフ内の後半の期間において、SakhaN や

Zankalon の結果の方がやや高い傾向が見られた。蒸発散量は、SakhaN、Zankalon、SakhaS の順に高かった。また、2010 年と同様に、2011 年においても SakhaS における蒸発散量が灌漑水量を上回っていた。

### 3.5 水収支

図34.1～34.5は、降水量、灌漑水量、蒸発散量のデータを元に各期間における水収支を作成したものである。降水量は、エジプトの CLAC (Central Laboratory of AgriculturalClimate) からの提供データである。またこれらの3項目から水収支の残差(貯留量変化)も算出した。この値が正の時は土壌内に水が蓄積、または地下水浸透していることを示し、負の場合は、元の貯留量よりも減っているということである。

2010 年、2011 年ともに夏作は同じような傾向を示し、SakhaS を除き、200～400mm ほどの水量が地下浸透している。SakhaS ではどちらの年も貯留量がマイナスとなっている。作物の無い期間は、いずれも灌漑水量が無く、ほぼ蒸発散量しか無い。そのときの蒸発散量は、2011 年の夏作前以外は50mm 以上であった。したがって、ほぼその量だけ貯留量が減っている。冬作の期間では、Sakha では約 370mm、Zankalon では約 230mm の降水量があった。冬作は期間が長いため、夏作よりも多い蒸発散量であった。

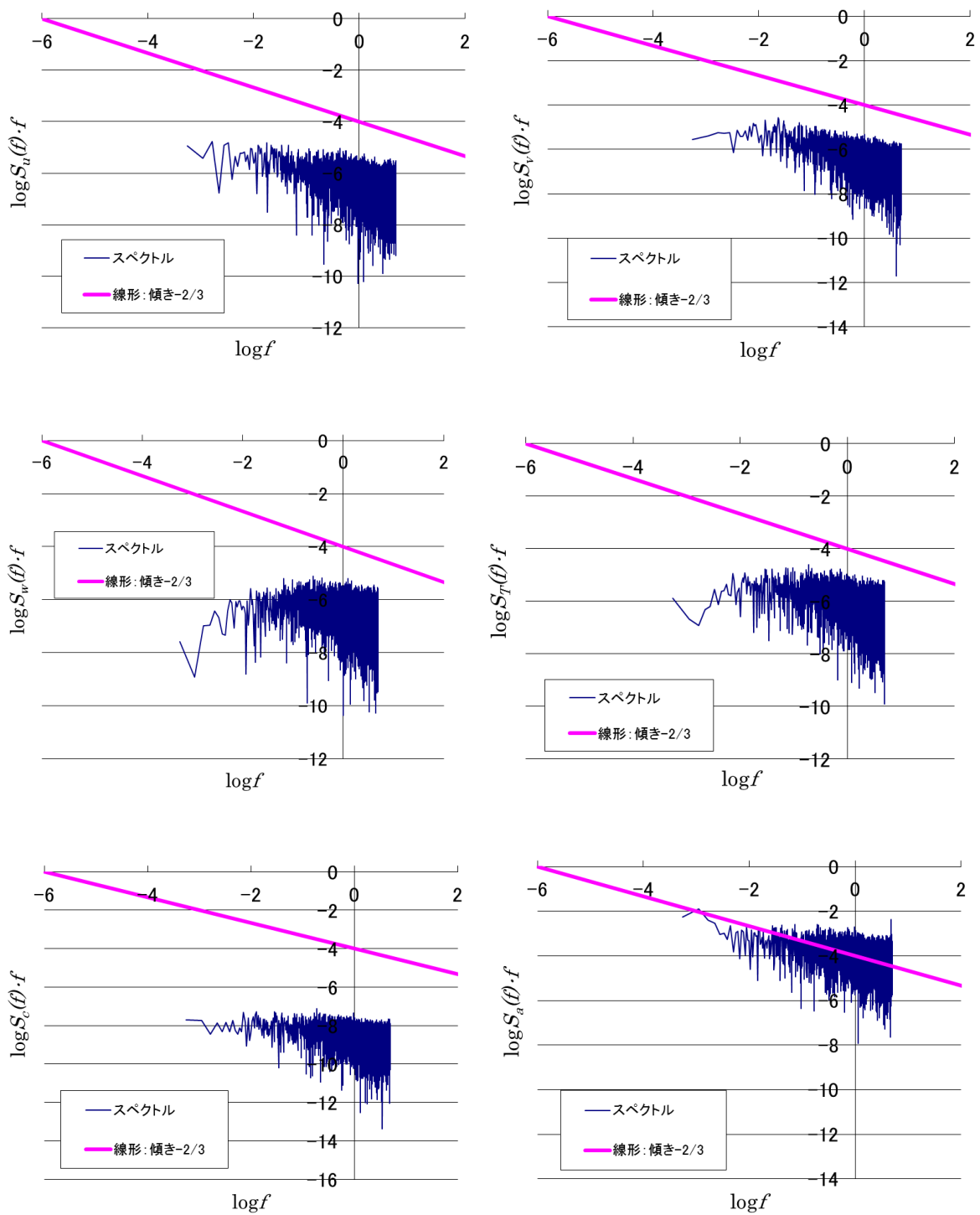


図 23 風速 x 成分  $u$ ，風速 y 成分  $v$ ，風速 z 成分  $w$ ，気温  $T$ ，二酸化炭素濃度  $c$ ，水蒸気濃度  $a$  に対するスペクトル解析結果 (2010年 7 月 17 日 11:00 ~ 11:30)

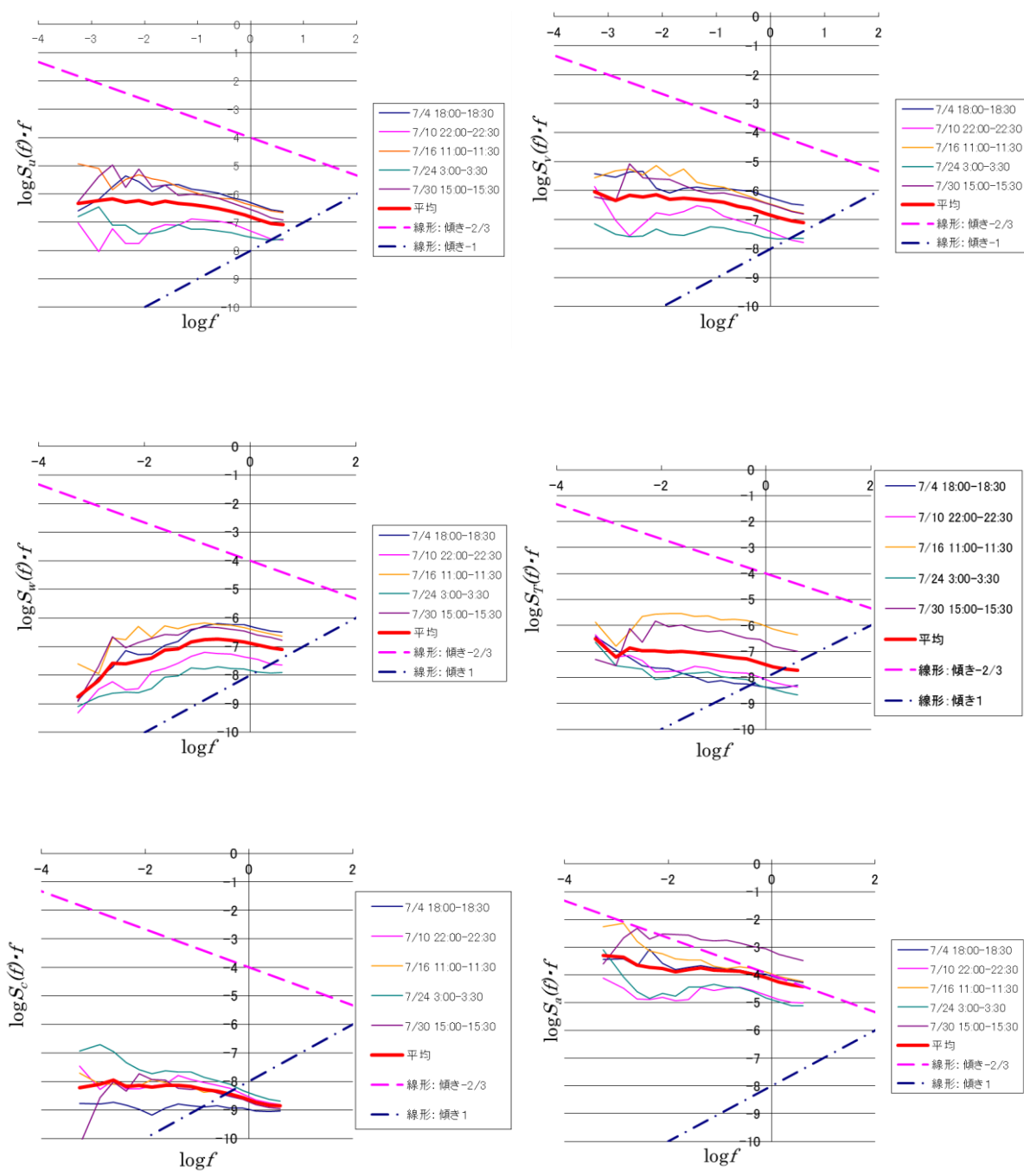


図24.1 風速 x 成分  $u$ ，風速 y 成分  $v$ ，風速 z 成分  $w$ ，気温  $T$ ，二酸化炭素濃度  $c$ ，水蒸気濃度  $a$  に対するスペクトル解析結果 (SakhaN 2010 年 7 月)

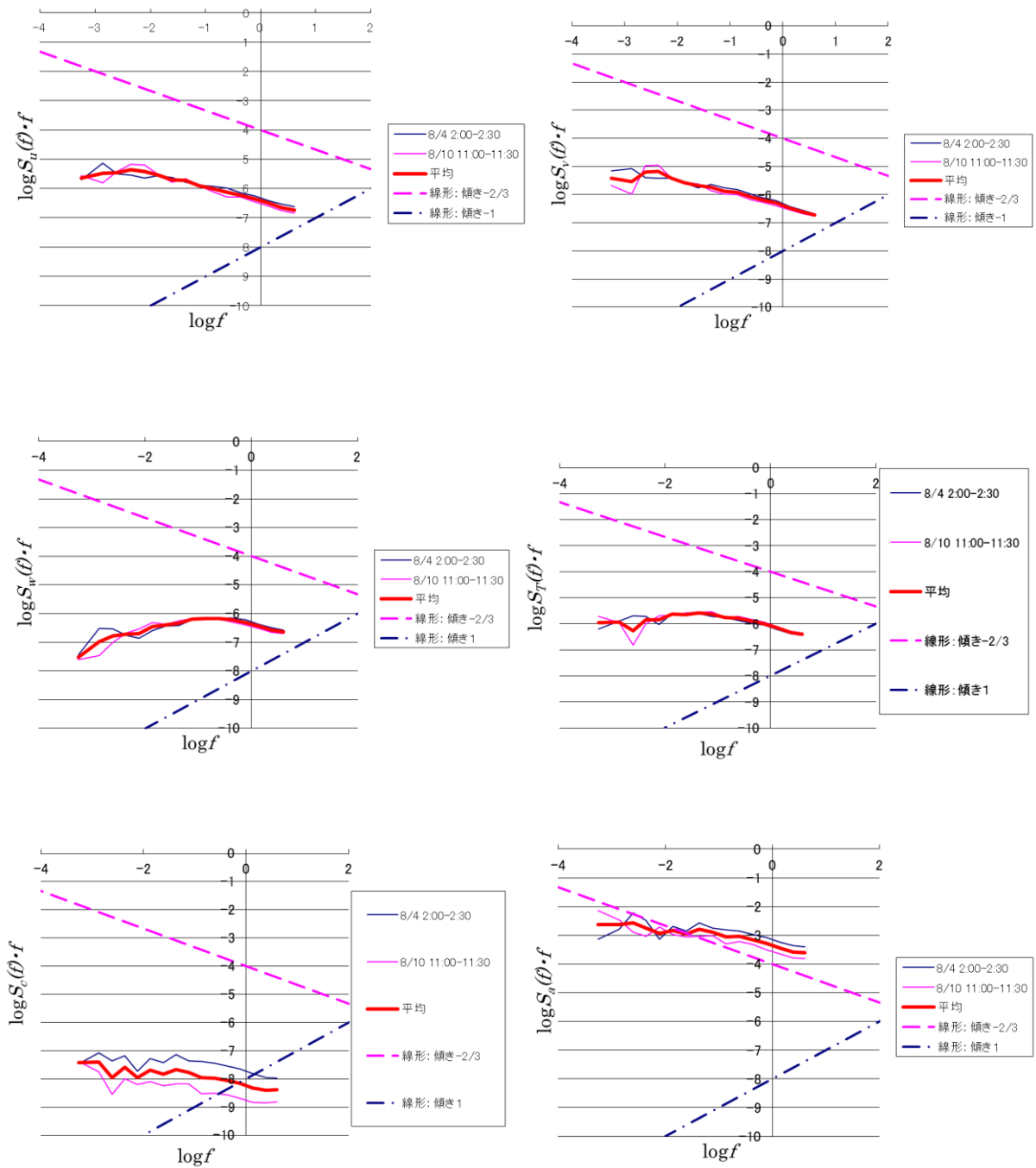


図24.2 風速  $x$  成分  $u$ ，風速  $y$  成分  $v$ ，風速  $z$  成分  $w$ ，気温  $T$ ，二酸化炭素濃度  $c$ ，水蒸気濃度  $a$  に対するスペクトル解析結果 (SakhaN 2010年8月)

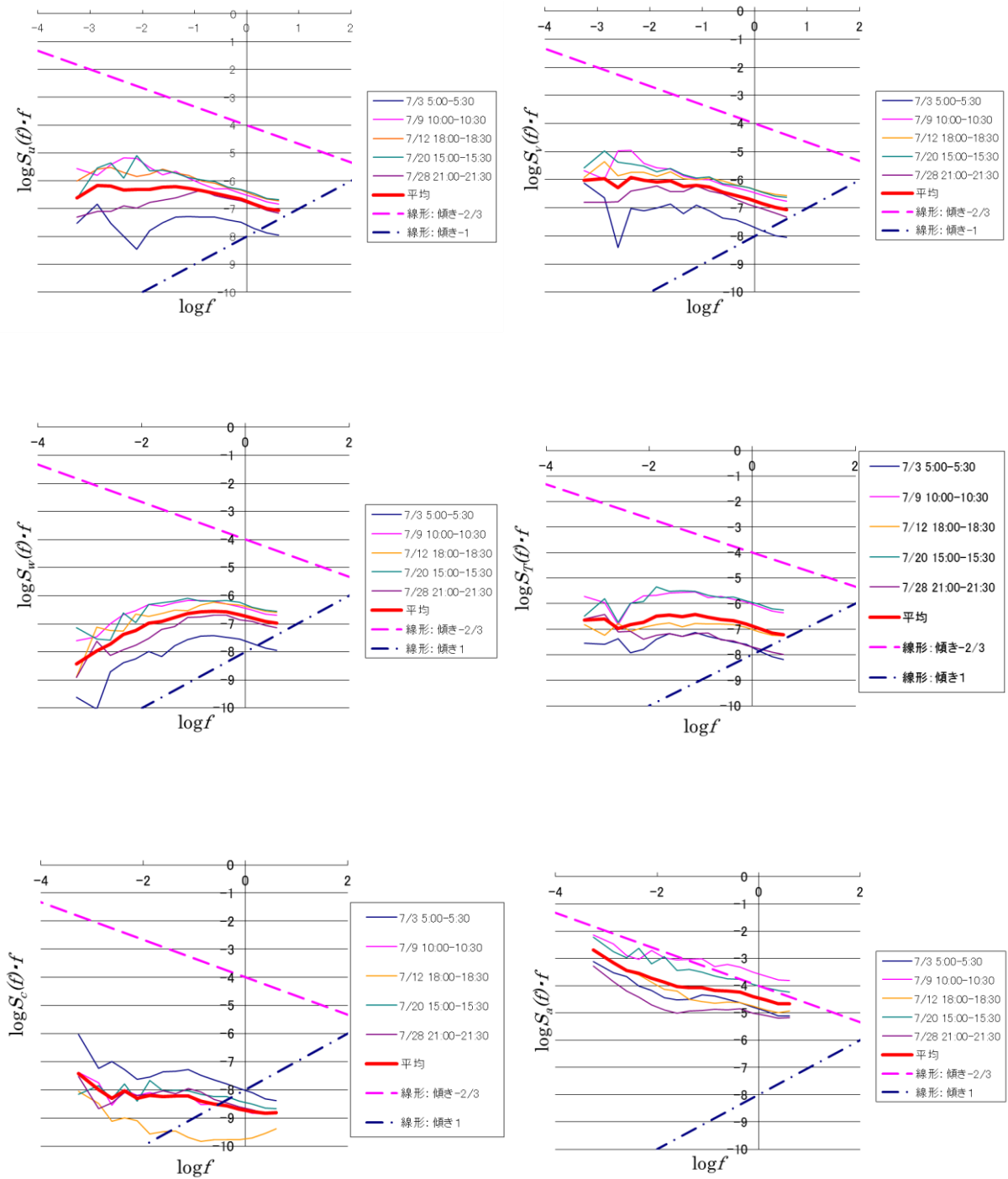


図24.3 風速 x 成分  $u$ ，風速 y 成分  $v$ ，風速 z 成分  $w$ ，気温  $T$ ，二酸化炭素濃度  $c$ ，水蒸気濃度  $a$  に対するスペクトル解析結果 (SakhaS 2010 年 7 月)

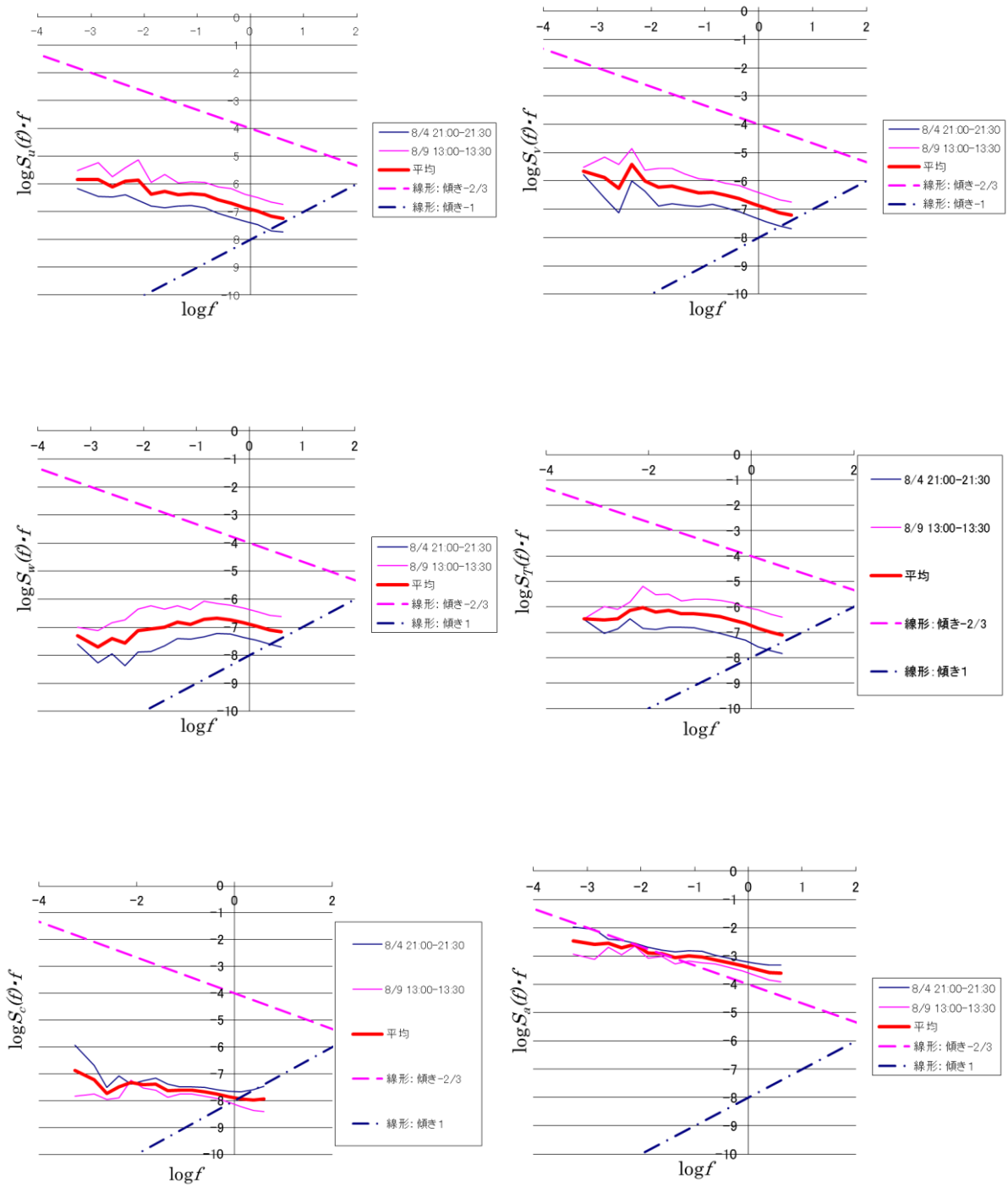


図24.4 風速 x 成分  $u$ ，風速 y 成分  $v$ ，風速 z 成分  $w$ ，気温  $T$ ，二酸化炭素濃度  $c$ ，水蒸気濃度  $a$  に対するスペクトル解析結果 (SakhaS 2010 年 8 月)



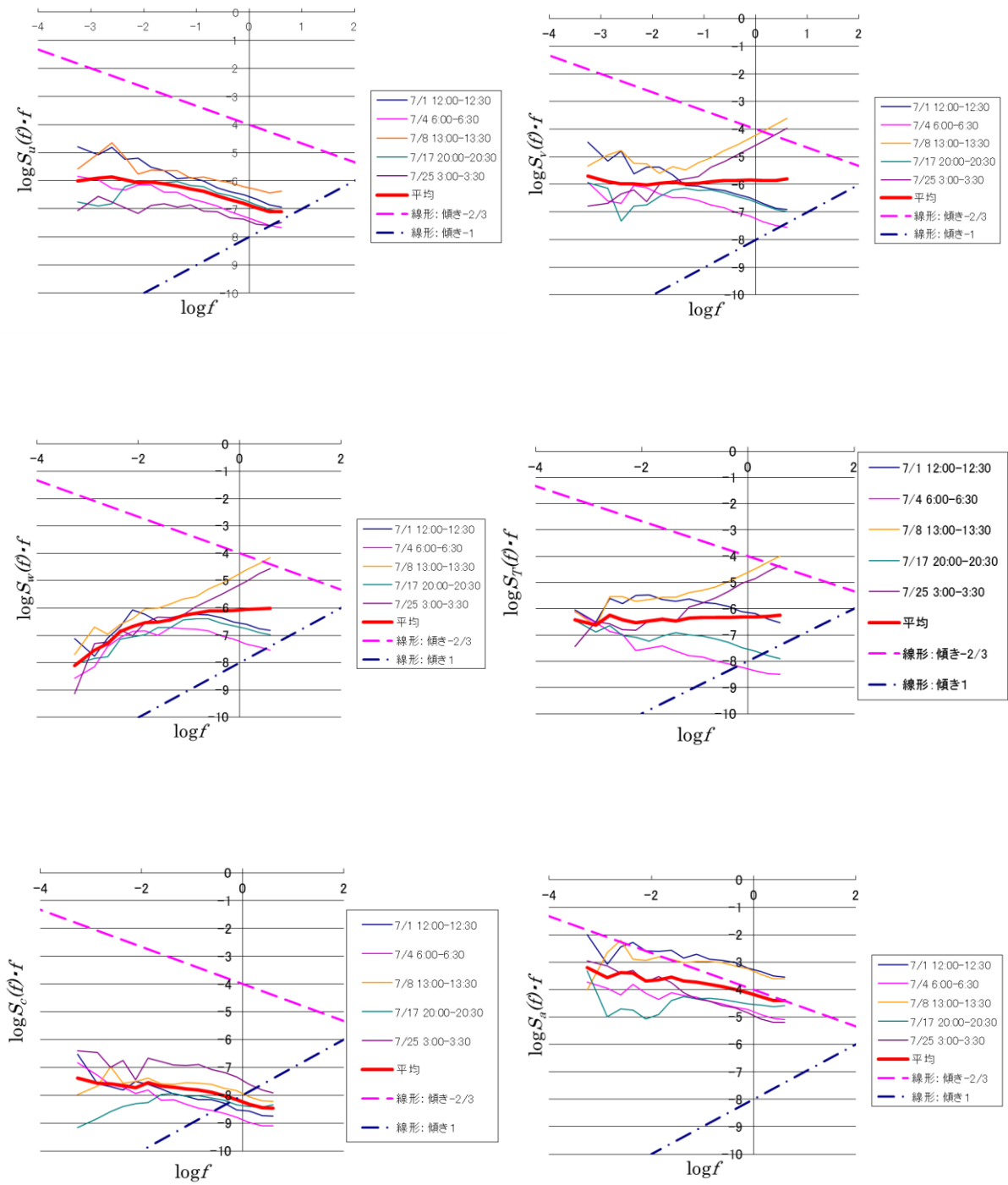


図24.5 風速 x 成分  $u$ ，風速 y 成分  $v$ ，風速 z 成分  $w$ ，気温  $T$ ，二酸化炭素濃度  $c$ ，水蒸気濃度  $a$  に対するスペクトル解析結果 (Zankalon 2010 年 8 月)

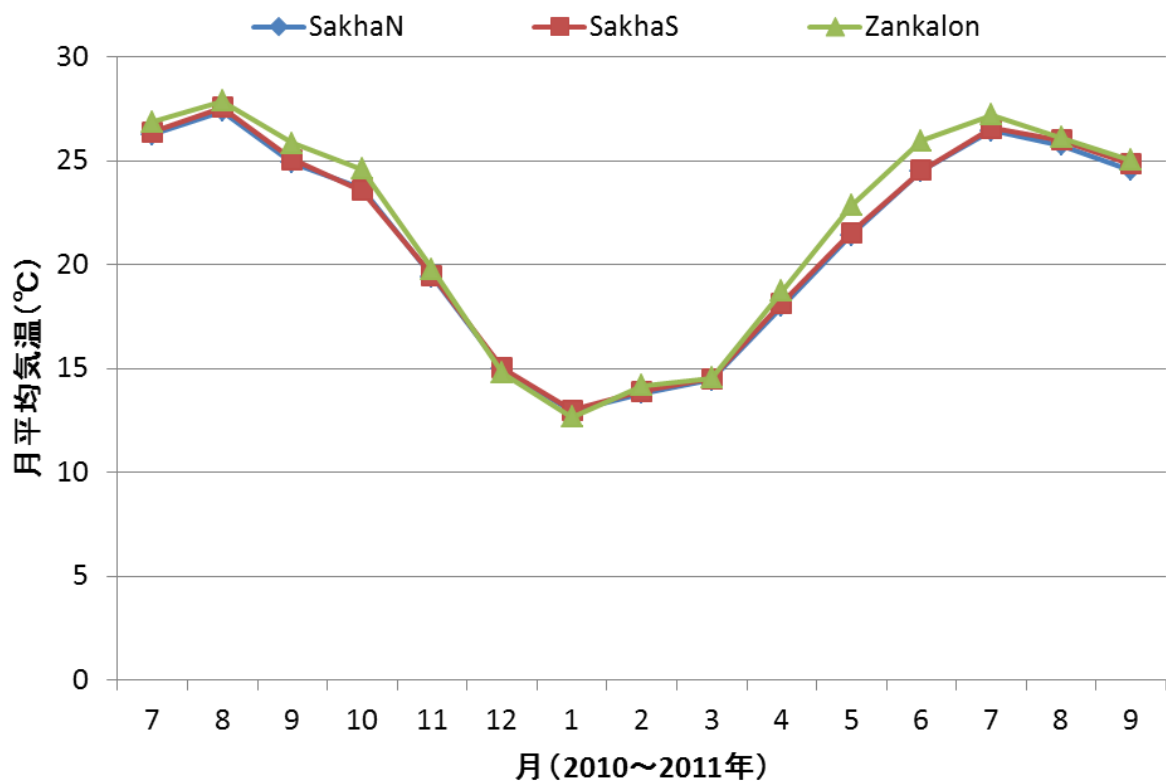


図 25 月平均気温の年変化

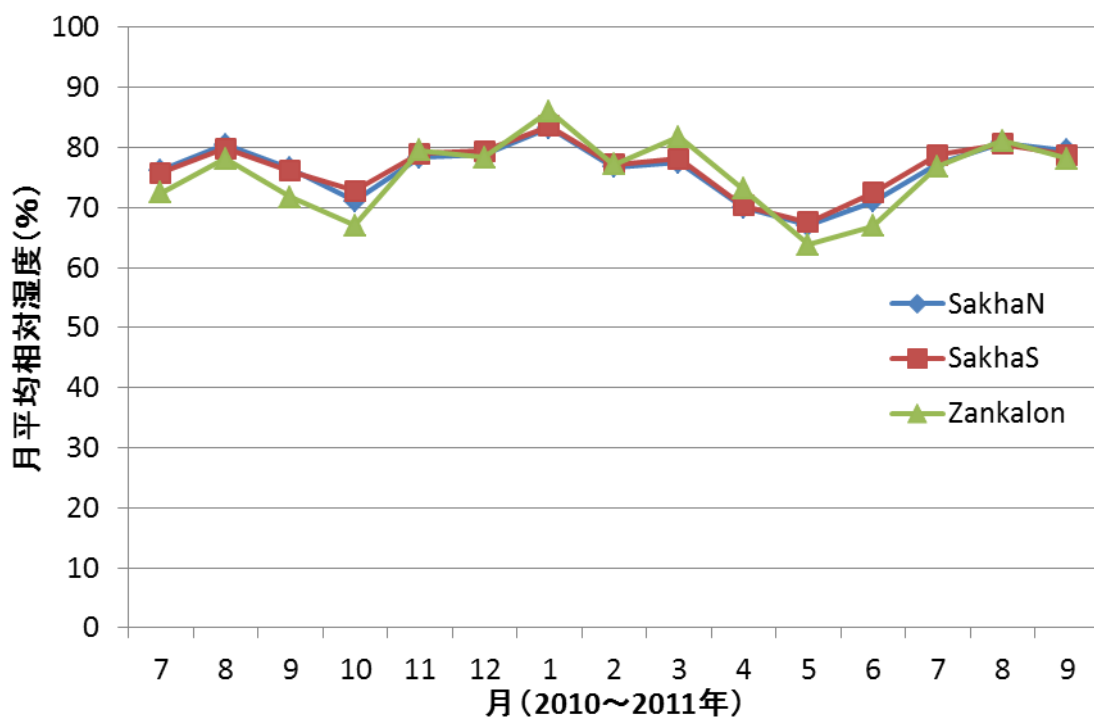


図26 月平均相対湿度の年変化

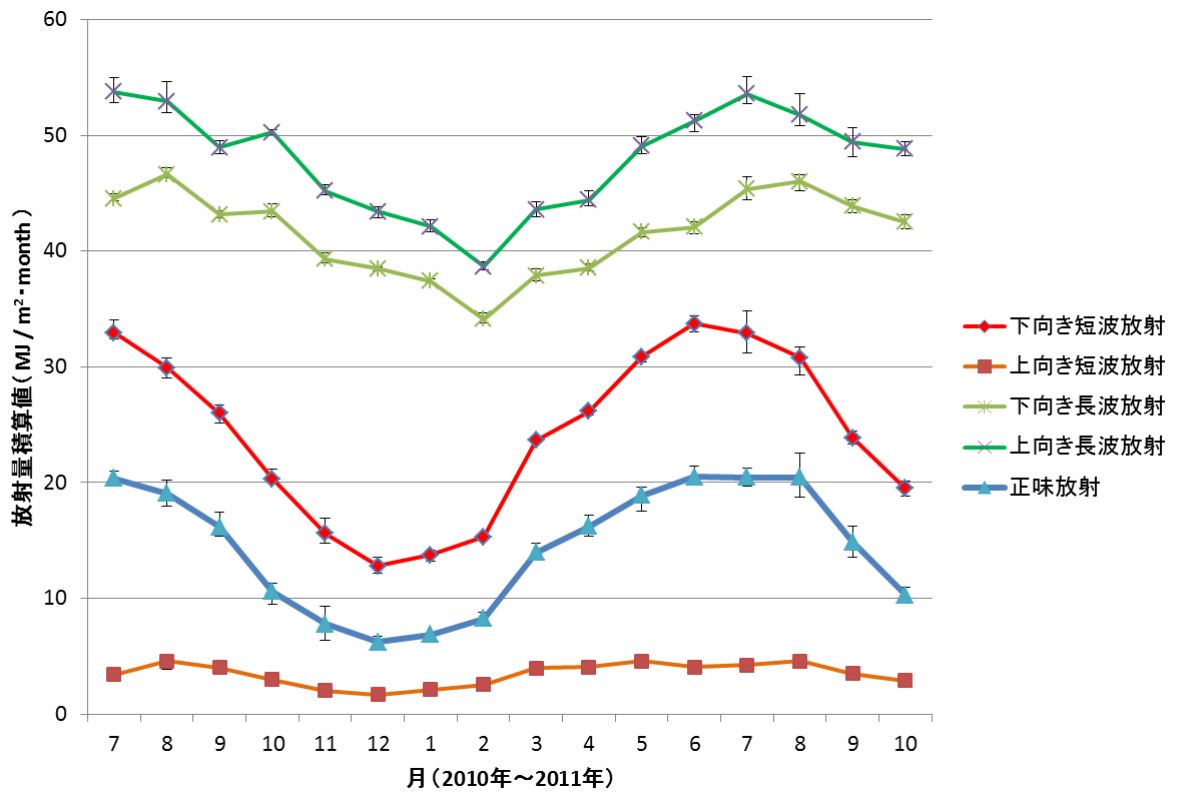


図 27 各圃場における放射収支の年変化

各点は3圃場における放射量の月積算値の平均を表し，エラーバーは3圃場の最大値・最小値を示す

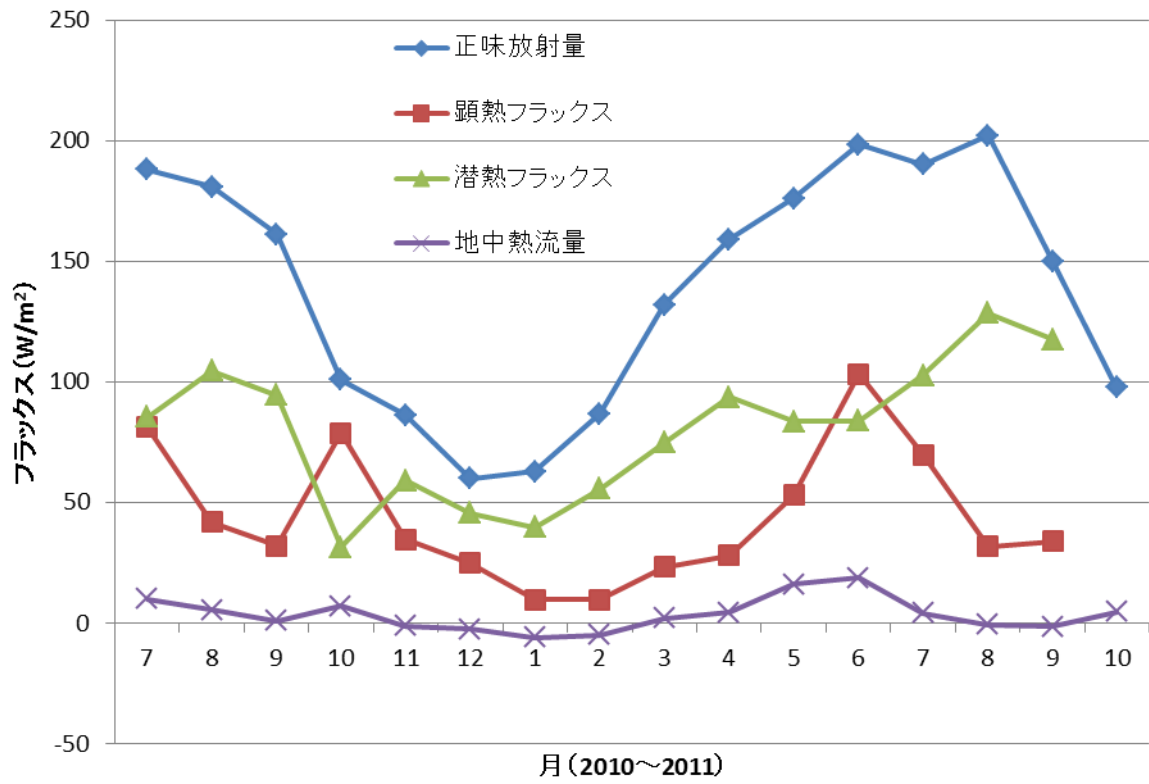


図28.1 SakhaNにおける熱収支の年変化（各点は月平均値を表す）

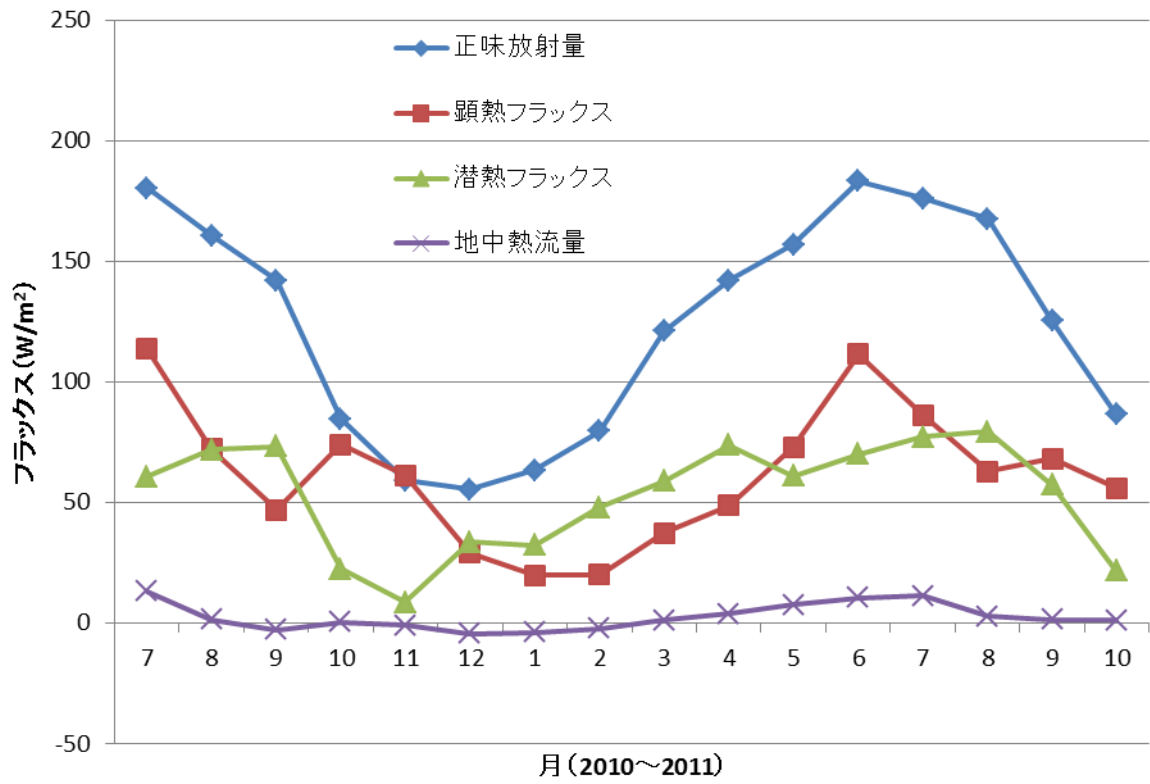


図28.2 SakhaS における熱収支の年変化（各点は月平均値を表す）

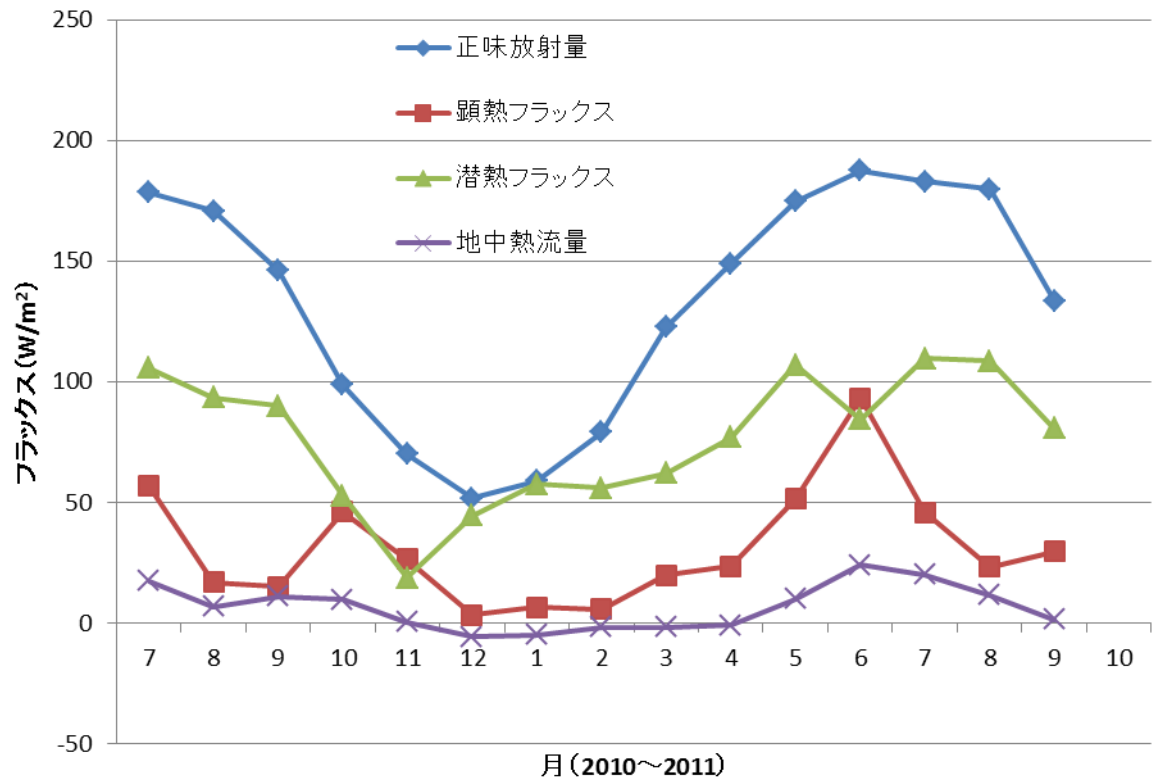


図28.3 Zankalon における熱収支の年変化（各点は月平均値を表す）

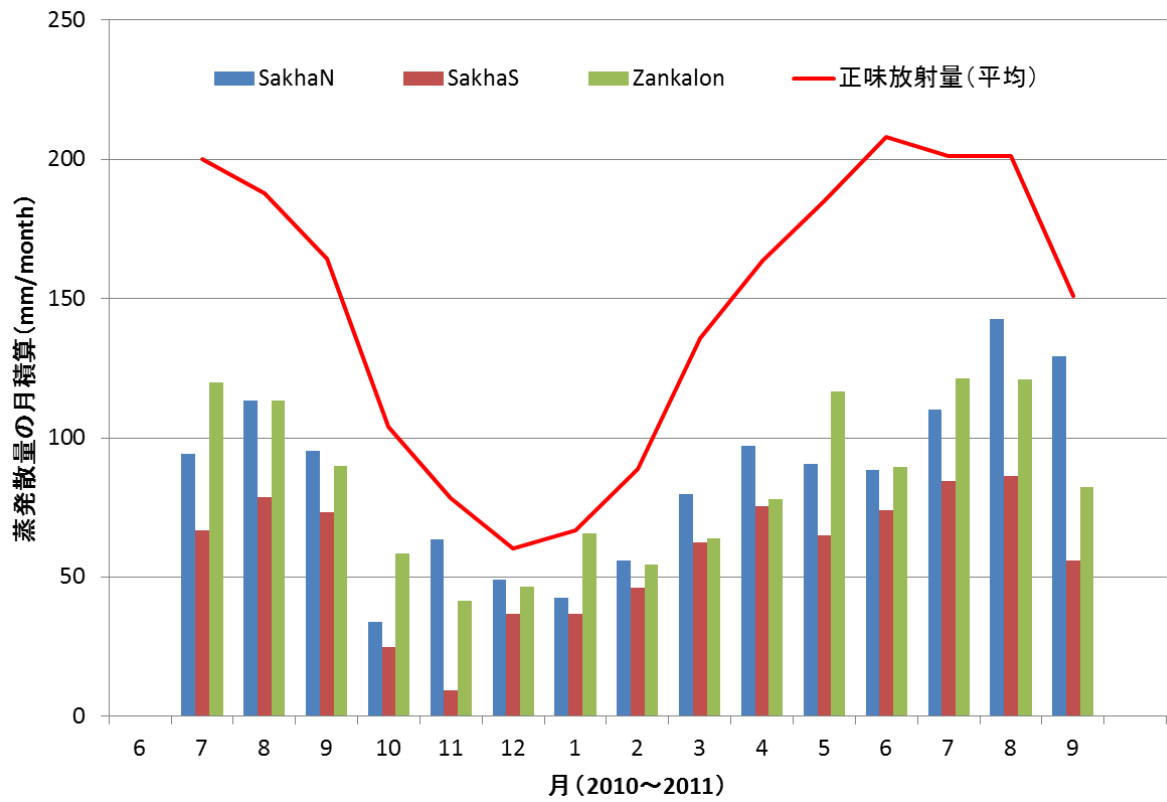


図29 蒸発散量の月積算値の年変化

正味放射は、正味放射 = 潜熱フラックスの値と仮定した場合の蒸発散量 (mm/month) の値である



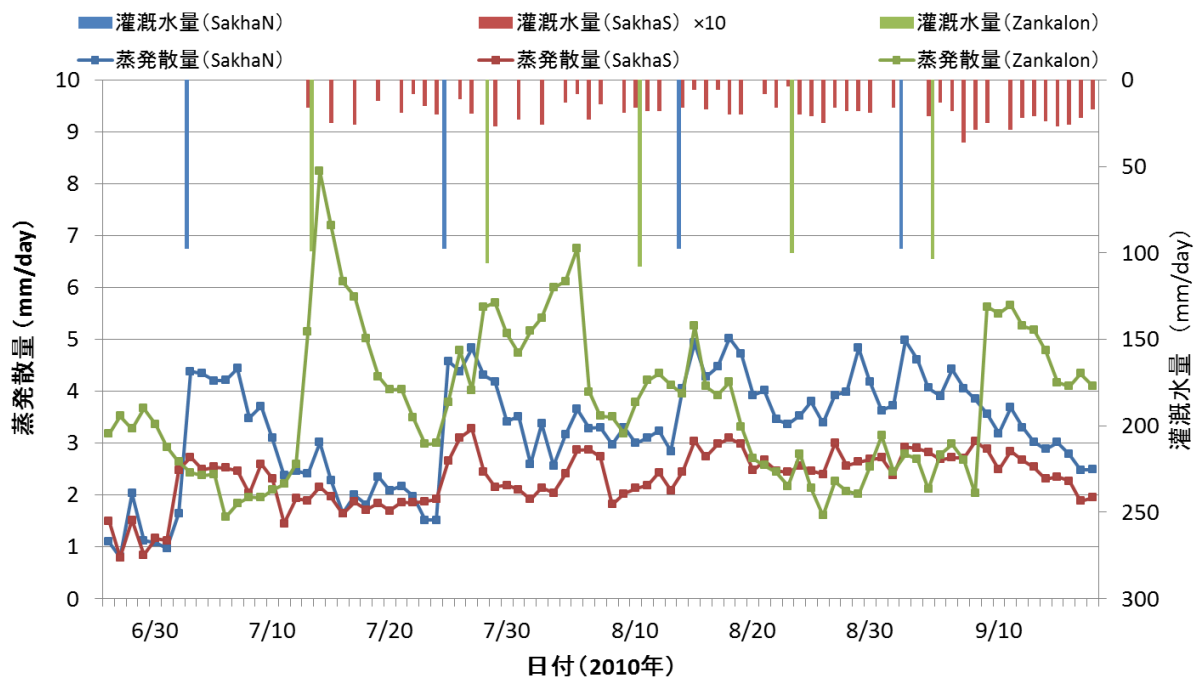


図 30 2010 年夏季における蒸発散量の時系列と灌漑水量  
 (SakhaN における一回の灌漑水量は、2011 年のものから推定)

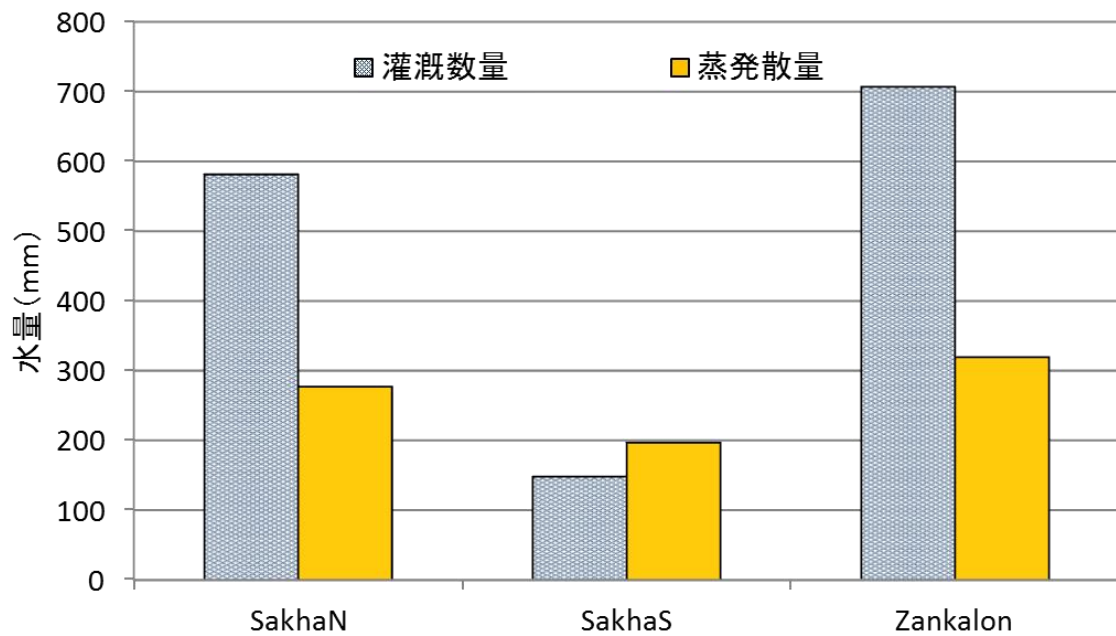


図 31 蒸発散量と灌漑水量の積算値

(蒸発散量はそれぞれの圃場において播種日から 80 日間の積算値である.  
SakhaNにおける灌漑水量は、2011 年のものから推定した.)

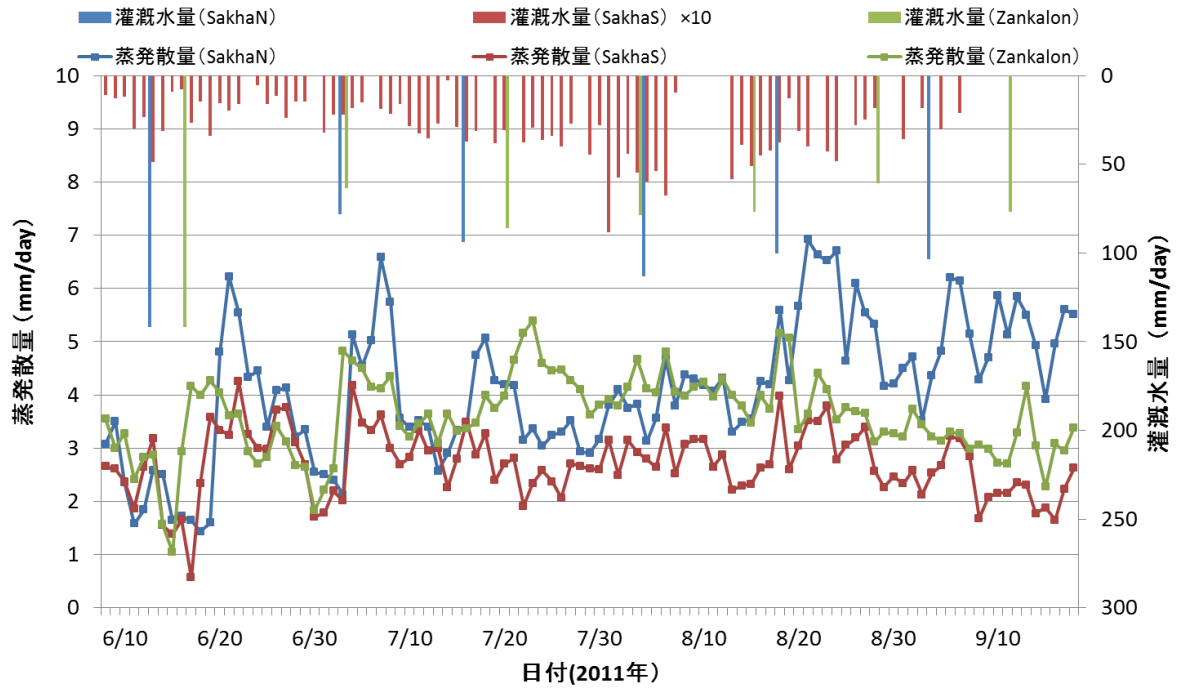


図 32 2011 年夏季における蒸発散量の時系列と灌漑水量  
(SakhaN における初回の灌漑は Zankalon のものから推定)

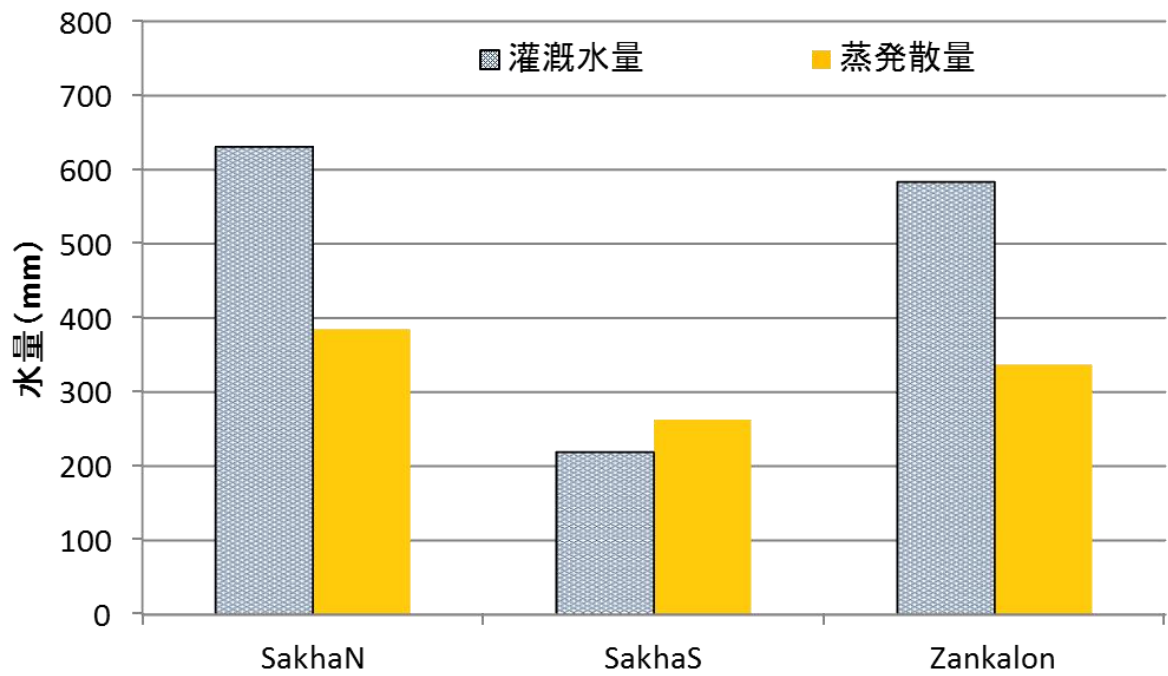


図 33 蒸発散量と灌漑水量の積算値

(蒸発散量はそれぞれの圃場において播種日から 90 日間の積算値である。)

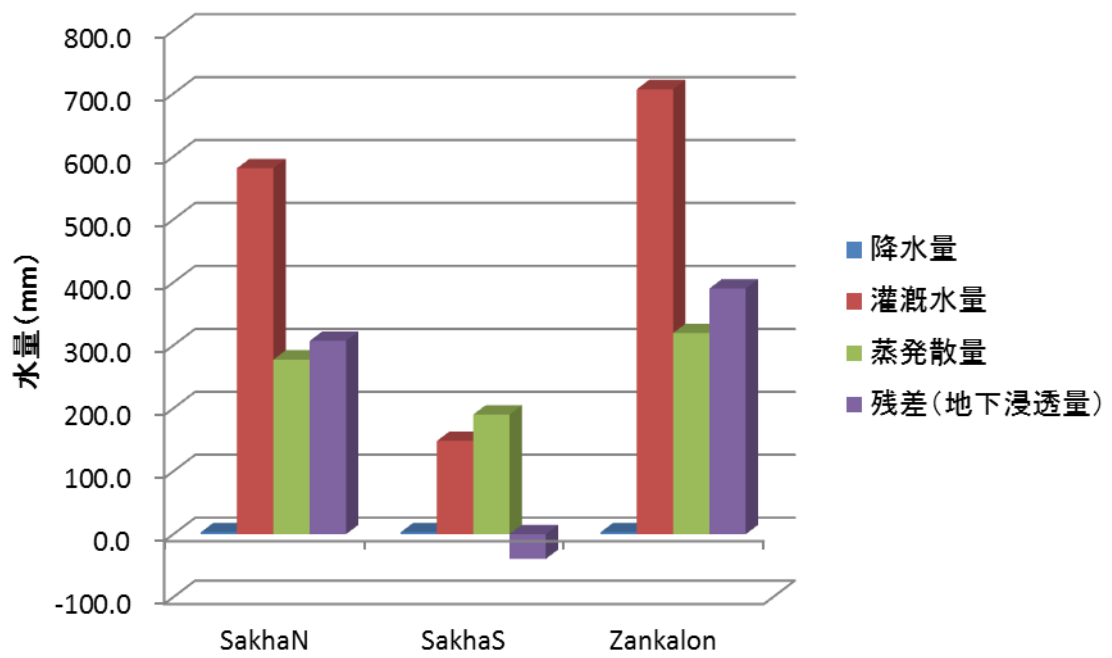


図 34.1 2010 年夏作期間における水収支

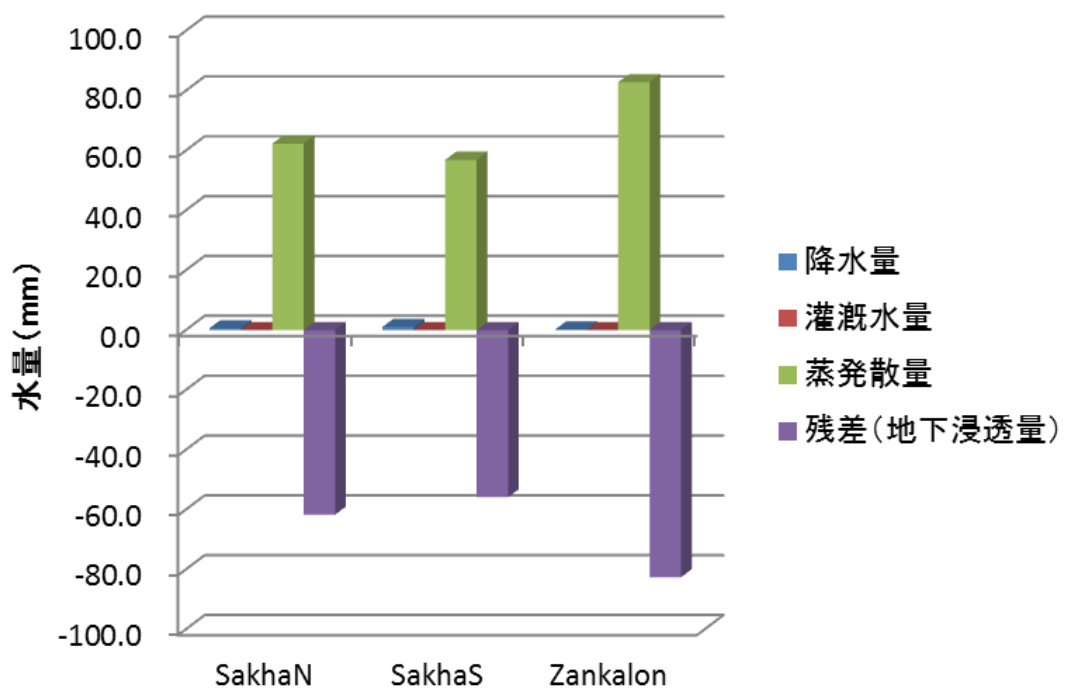


図 34.2 2010 年作物無し期間における水収支

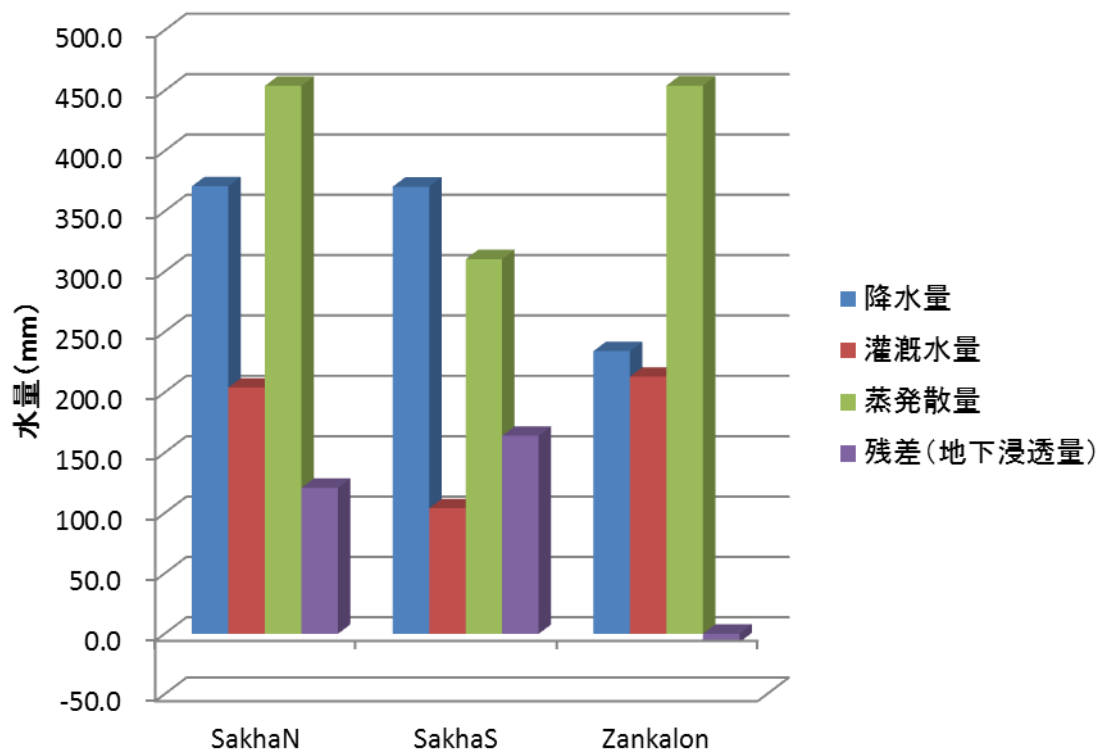


図 34.3 2010 年～ 2011 年冬作における水収支

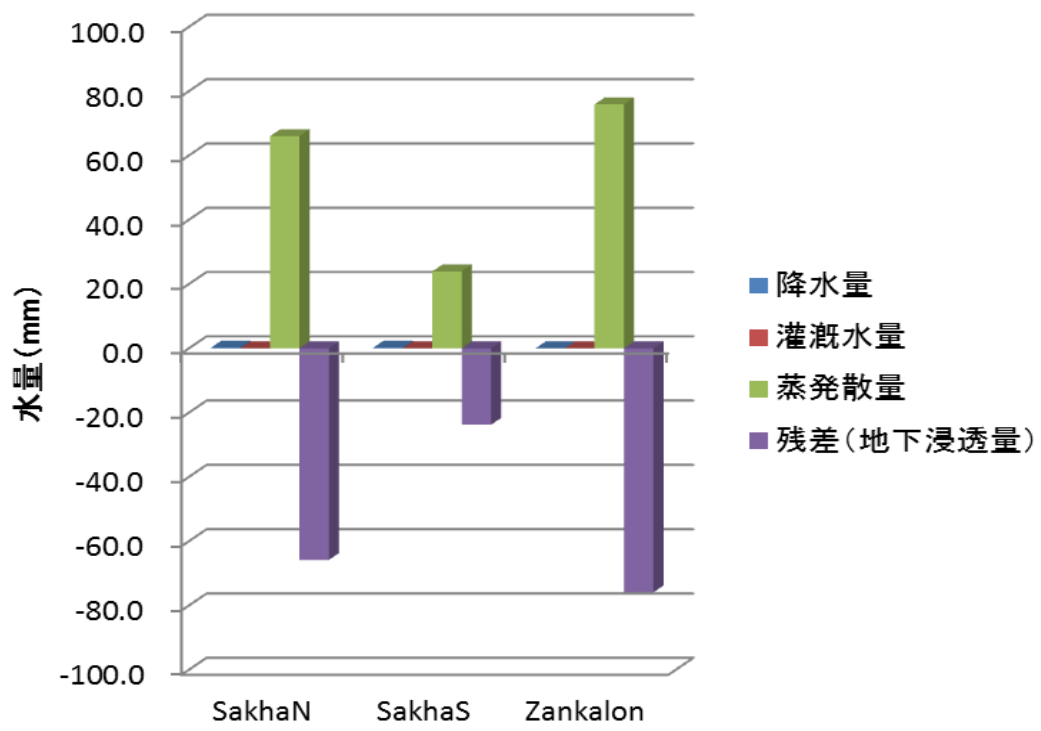


図34.4 2011年作物無し期間における水収支



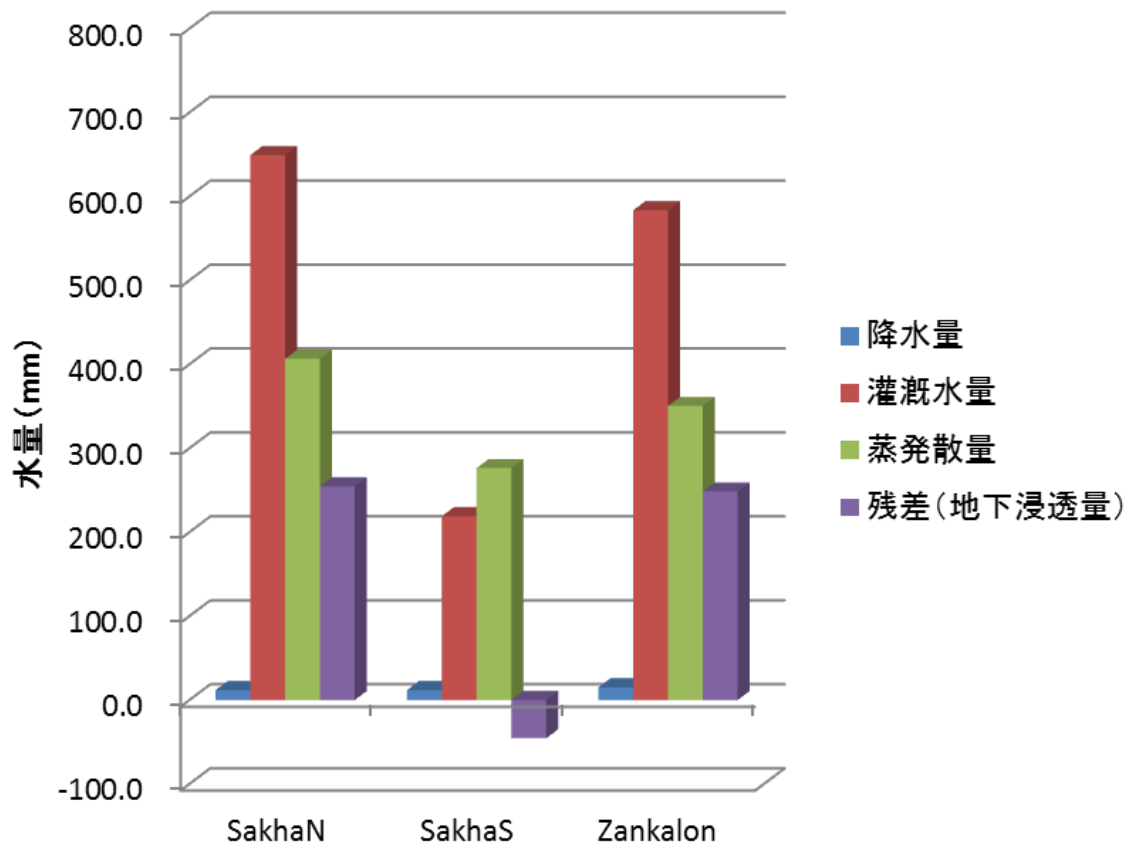


図34.5 2011年夏作における水収支

### 3.6 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35.1，図35.2）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を図36.1～36.6，図37.1，37.2に示す。図36.1～36.6は2010年に観測した時の結果である。青いプロットが測定結果の平均値であり、エラーバーは各時間における観測結果の変化幅を示している。赤いプロットは同時刻の気温を示す。図37.1，37.2は2011年の結果である。こちらにも同様に各プロットが測定値の平均であり、エラーバーが変化幅である。

まず、2010年の結果を全体として見てみると、気温と同様に山なりのグラフを示していることがみられる。土壌面温度の方が葉面温度よりも高い値を示し、低い値は30℃を下回り、最大値は60℃を超えることもあるように、サンプルによるばらつきが大きいことが分かる。反対に葉面温度は、ばらつきが小さく25℃～35℃付近で比較的安定している。また2011年においては、灌漑前後での表面温度を観測することができた。葉面温度については、おおよそ2010年時と同様の傾向を示していたが、灌漑後のデータである7月23日Zankalonでのものがやや低い値を示しているようにも見られる。また土壌面での結果を見ると、灌漑前後での結果の違いが顕著に見られた。灌漑後であった7月18日SakhaNおよび7月23日Zankalonでの値は、乾燥期間である他の時系列よりも一回り低い値を示しており、乾燥期間が日中50℃を超えてくるのに対し、灌漑後のデータは昼前後でも40℃付近の値となっている。これにより、灌漑直後において土壌面温度が抑制されているという結果が得られた。

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。

### 3.7 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の測定結果を図38.1，図38.2に示す。図のプロットは各圃場における8地点で測ったLAIの平均を示しており、エラーバーがその最大値・最小値を示す。

各圃場での平均LAIは、2010年はSakhaN：1.36，SakhaS：0.89，Zankalon：1.78，2011年においてはSakhaN：0.68，SakhaS：0.37，Zankalon：0.74であった。2010年における観測結果は、日付が近いので圃場ごとの成長具合を比較することができるが、SakhaNやZankalonではLAIの平均が1を超えているが、SakhaSでは0.89と低い結果となった。また、各平均値に対する変化幅は、最大値が+47%～163%，最小値が-42%～-77%ほどのばらつきがあった。

また、LAIと放射の遮蔽率の関係を図39に示した。これは、平均値ではなく、各圃場での8地点での観測値を全てプロットしたものである。圃場・年が異なるにも関わらず、全体として一様な関係性が見られた。そして、すべてのプロットに対する近似曲線を図40に示した。その時に得られた関係式は  $y = 1.015[1 - \exp(-0.633x)]$  であった。この

関係式は、モデルに用いる遮蔽率の計算に用いた。

### 3.8 リーフポロメーターによる観測結果

リーフポロメーターによる蒸散量の観測結果を図41.1および図41.2に示した。プロットが各時間における蒸散量の平均値であり、エラーバーが変化幅である。折れ線は、これらの時間に対応する渦相関法による蒸発散量の時系列である。

グラフを見ると、SakhaNにおいては、日中での蒸散量の値が0.4～0.6 (mm/h) と蒸発散量の値を大幅に超えており、蒸発散量の値の倍以上を示している。変化幅の下端と比べても上回っている値となった。また、SakhaSでは、日中での蒸発散量と蒸散量が0.2～0.4 (mm/h) と同じ程度の値となっているが、やや蒸散量の方が高い結果となった。

つまり、蒸散量が過大評価となっていると考えられる。この原因として、二つの可能性が挙げられる。一つが、葉の選択がランダムであったことと、葉面積指数を一つしか用いてないことである。厳密に評価する方法として、高度別に葉面積指数を測定し、その高度ごとにポロメーターによる観測を行う方法が考えられる。もう一つが、ポロメーターにおける校正がうまくいっていないという可能性である。

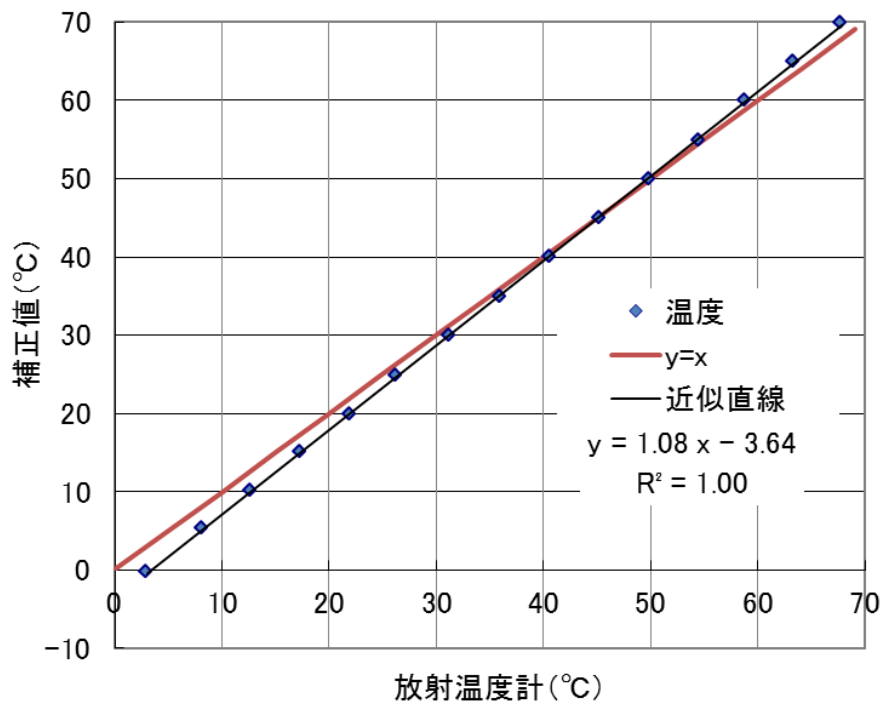


図 35.1 放射温度計のキャリブレーション結果 (2010年夏季観測のデータに適用)

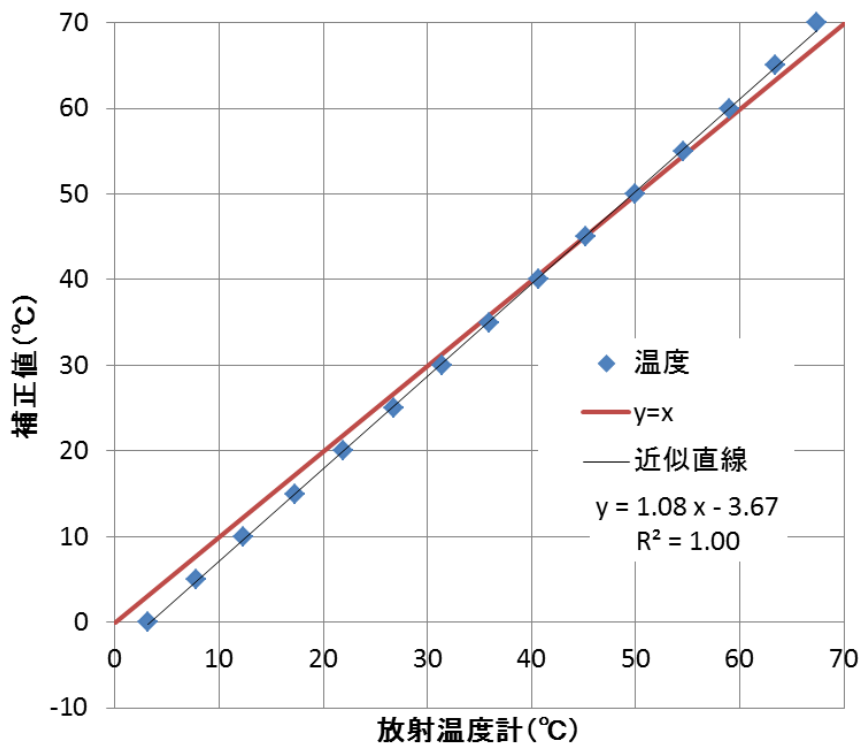


図 35.2 放射温度計のキャリブレーション結果 (2011年夏季観測のデータに適用)

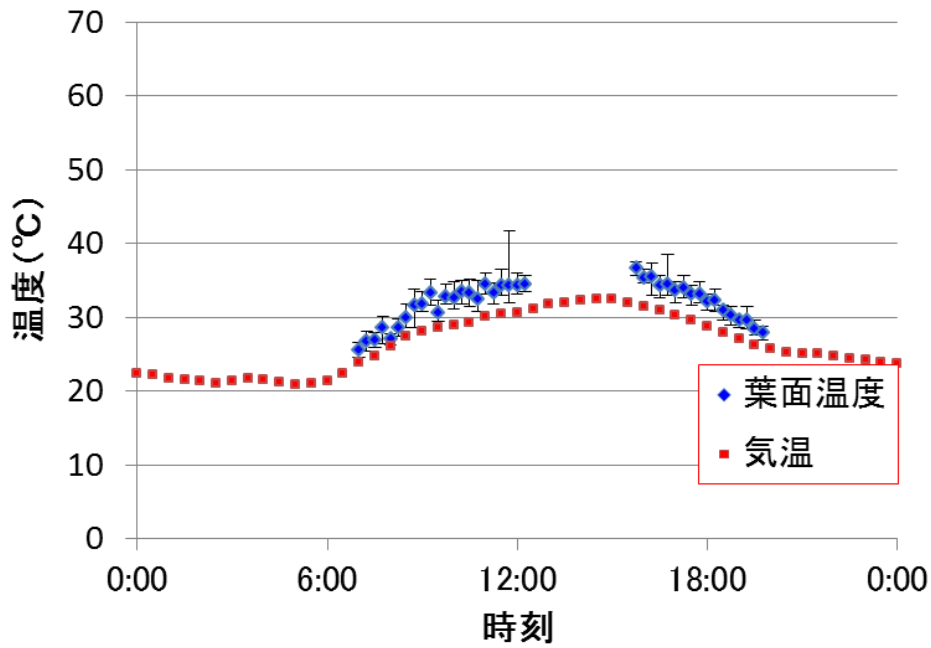


図36.1 SakhaNにおける葉面温度の時系列 (2010年8月9日)

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

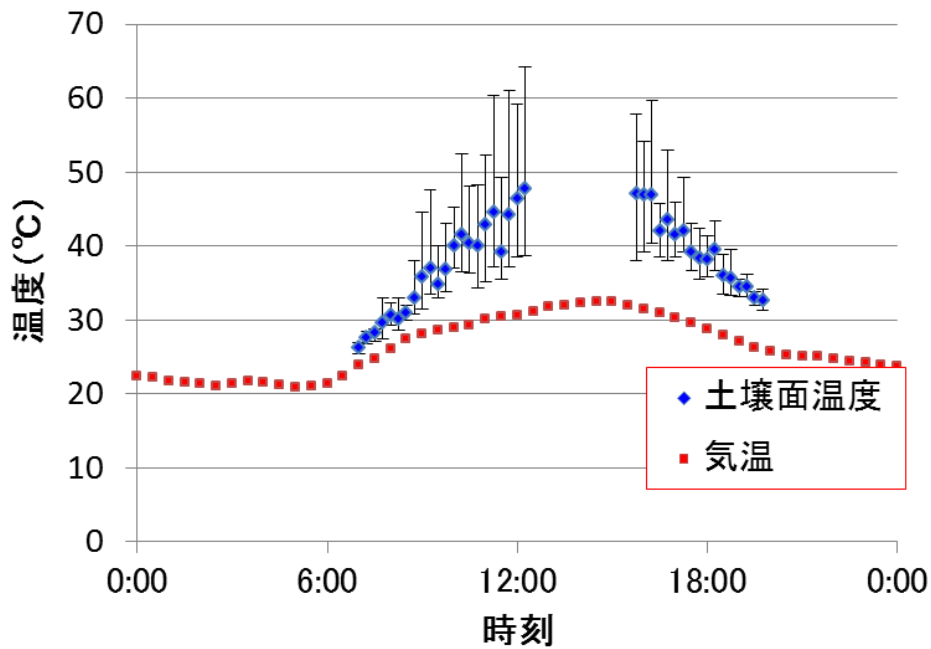


図36.2 SakhaNにおける土壌面温度の時系列 (2010年8月9日)

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

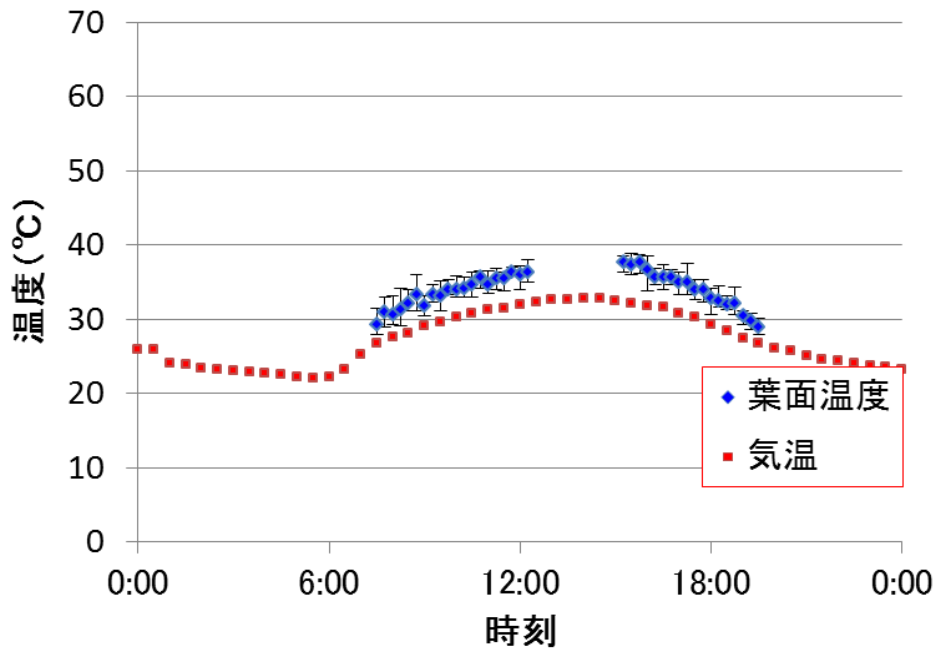


図36.3 SakhaSにおける葉面温度の時系列 (2010年8月7日)

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

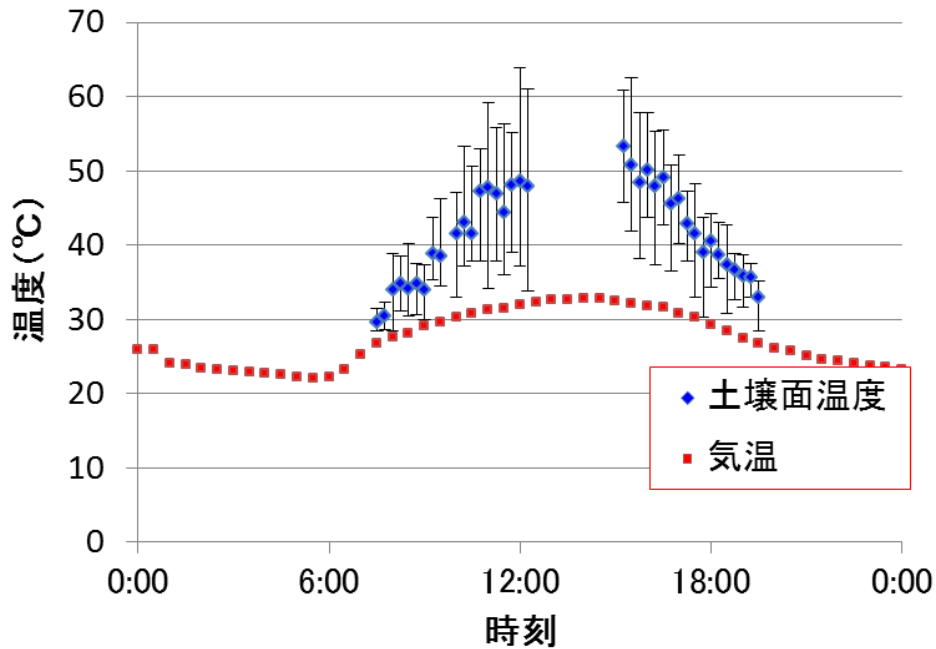


図36.4 SakhaSにおける土壌面温度の時系列 (2010年8月7日)

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

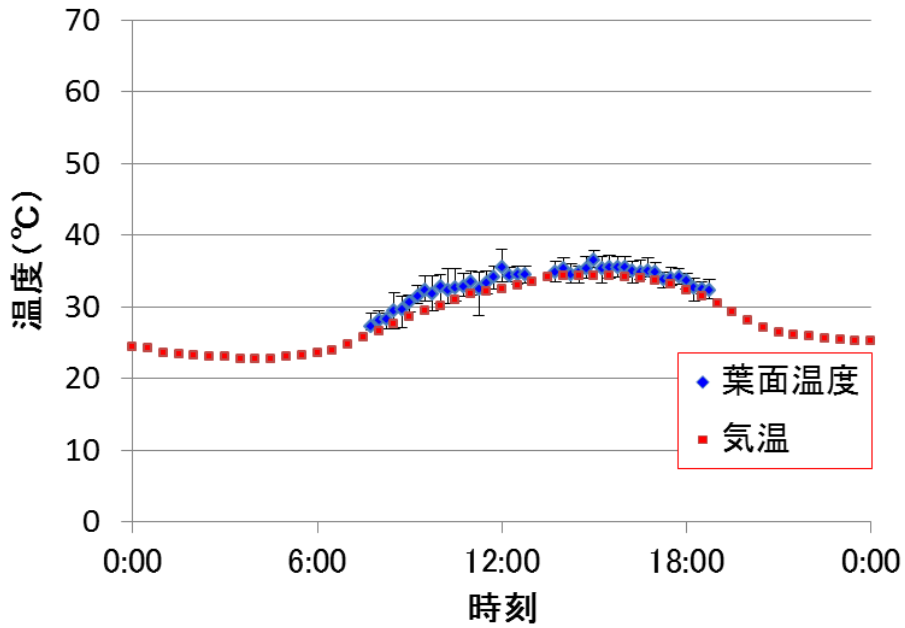


図36.5 Zankalon における葉面温度の時系列 (2010年 8 月 4 日)  
 プロットは測定時刻での平均，縦に伸びたマーカーは変化幅（最大値および最小値）を示す

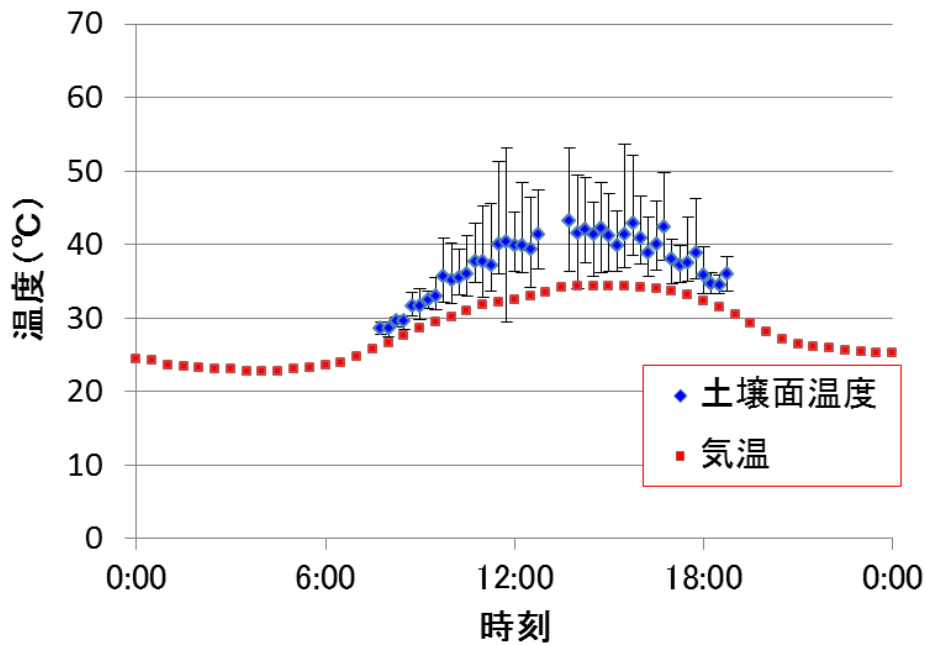


図36.6 Zankalon における土壌面温度の時系列 (2010年 8 月 4 日)  
 プロットは測定時刻での平均，縦に伸びたマーカーは変化幅（最大値および最小値）を示す

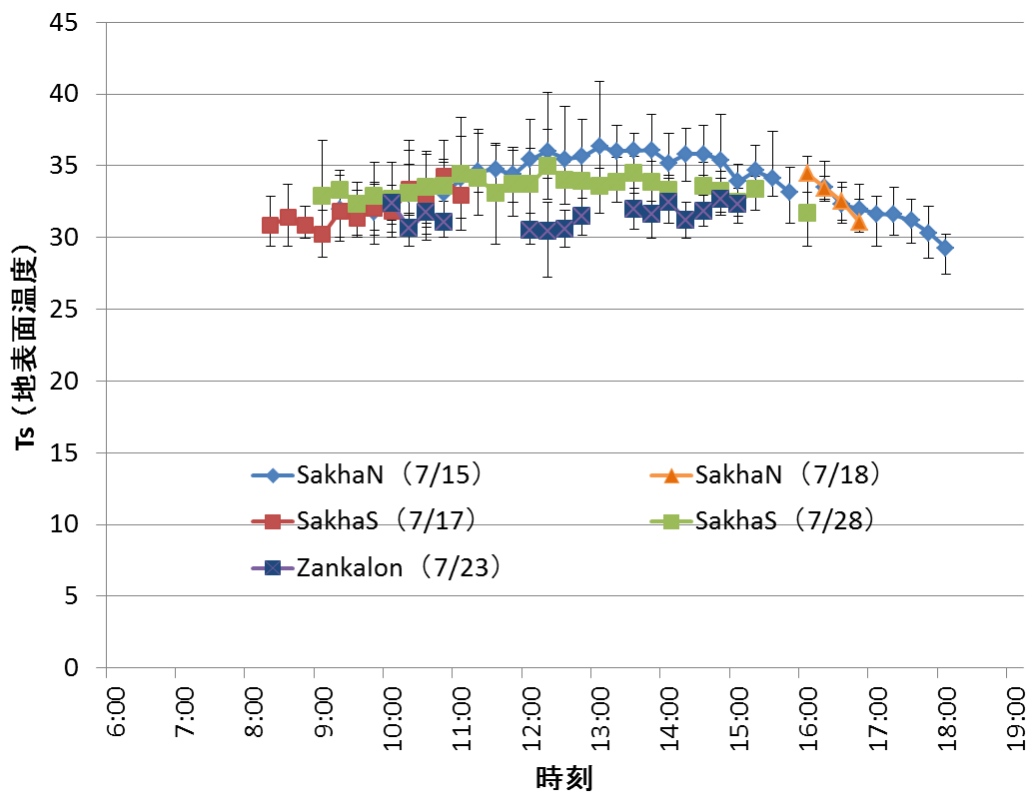


図37.1 各圃場での葉面温度の時系列 (2011年夏季)

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．凡例の括弧内は観測日を示す．



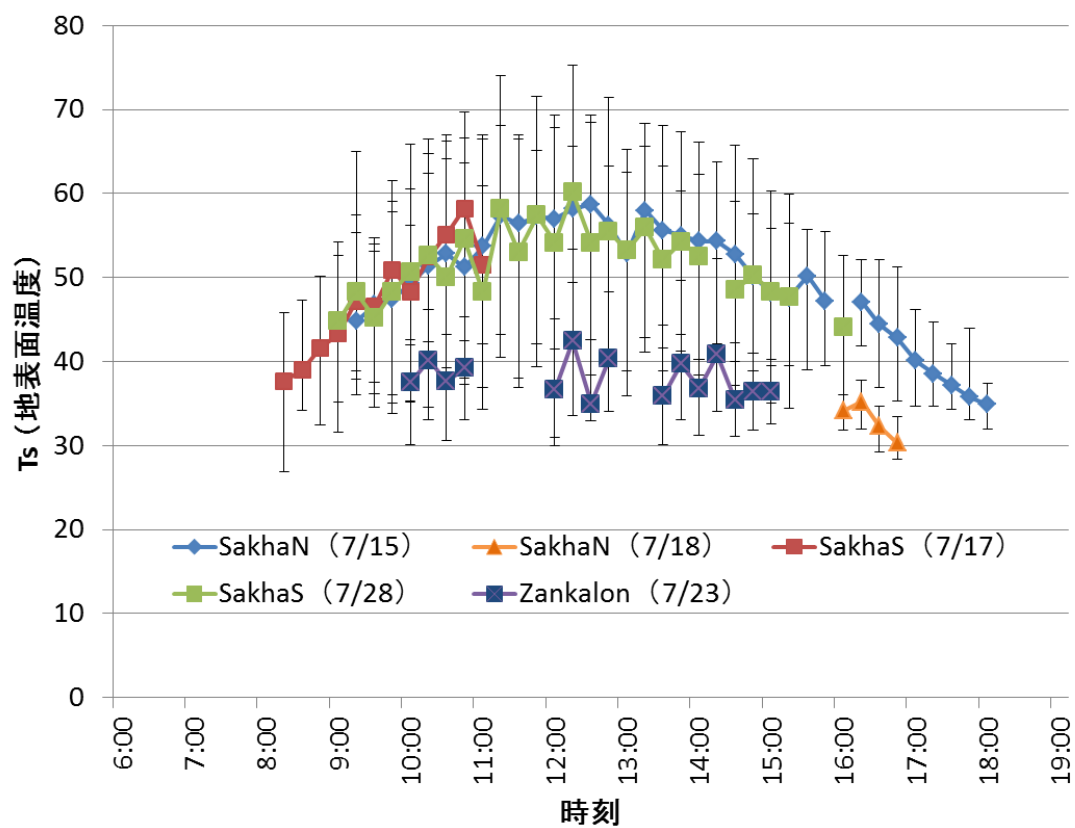


図 37.2 各圃場での土壌面温度の時系列 (2011年夏季)

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．凡例の括弧内は観測日を示す．

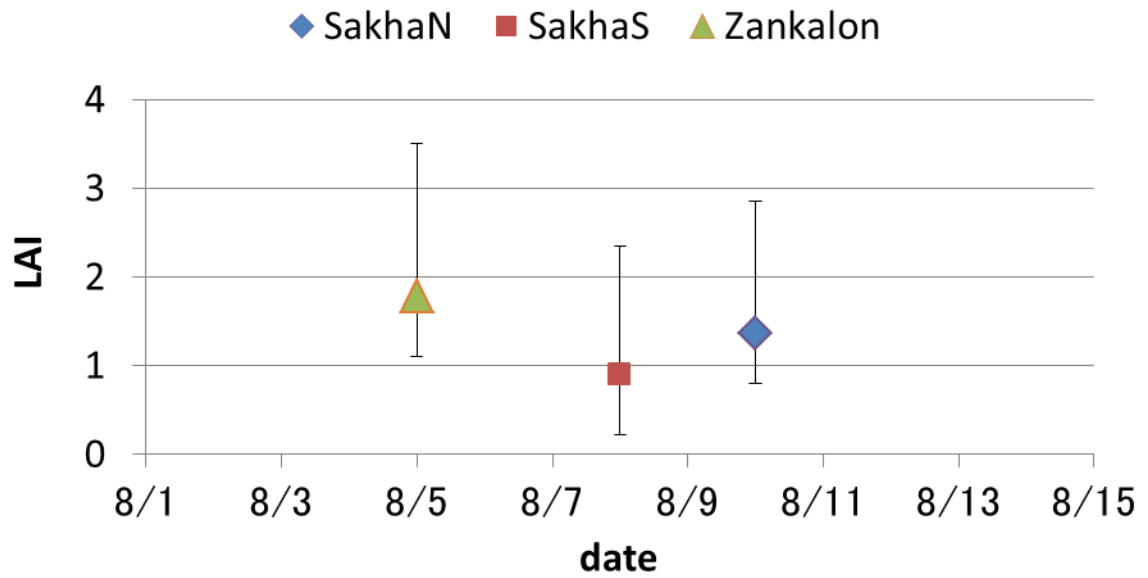


図 38.1 キャノピーアナライザーによる LAI の測定値結果 (2010 年夏季)  
 シンボルは 8 地点の平均値, エラーバーは 8 地点の最大値・最小値を示す.

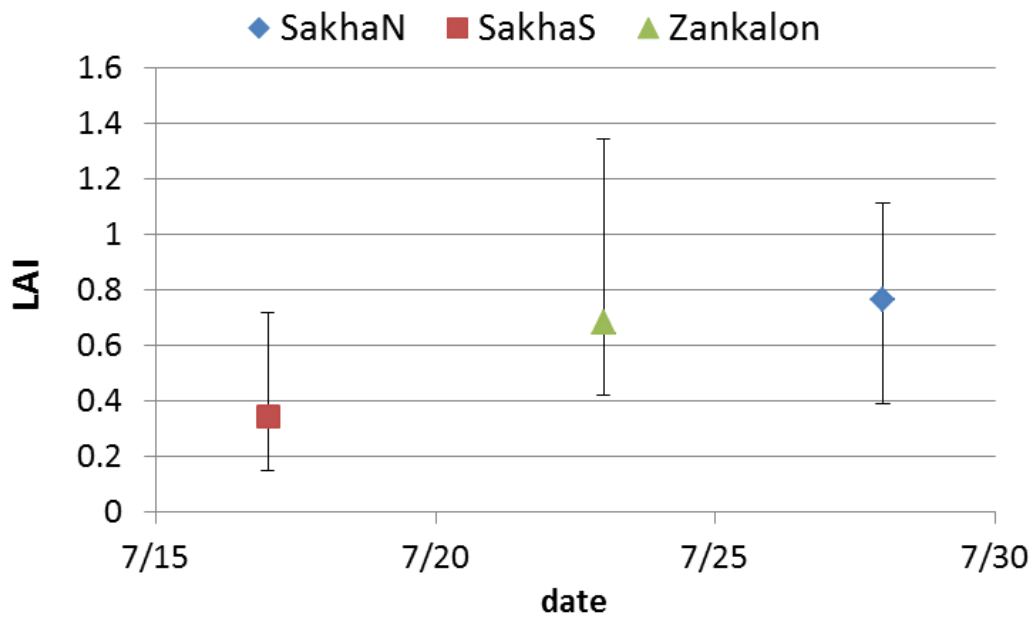


図 38.2 キャノピーアナライザーによる LAI の測定値結果 (2011 年夏季)  
 シンボルは 8 地点の平均値, エラーバーは 8 地点の最大値・最小値を示す.

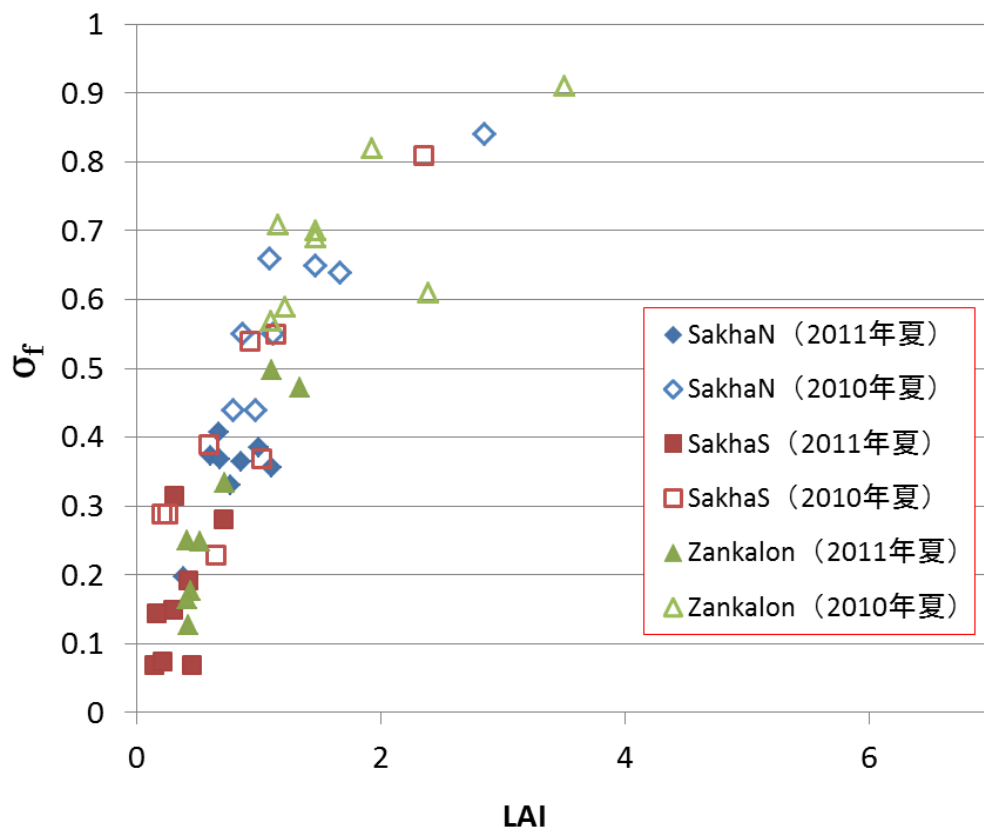


図 39 キャノピーアナライザーによる LAI と放射の遮蔽率の関係  
括弧内は観測した季節を示す。

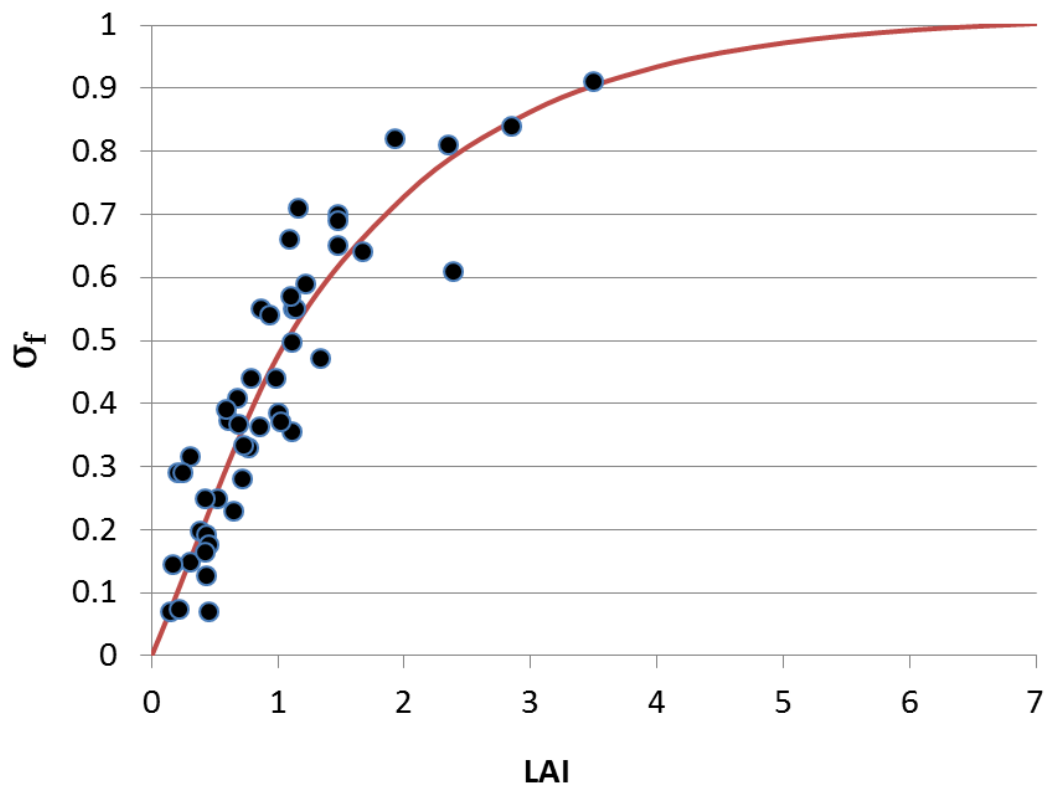


図40 LAIと遮蔽率の関係  
 図の曲線の関係式は、 $y = 1.015[1 - \exp(-0.633x)]$

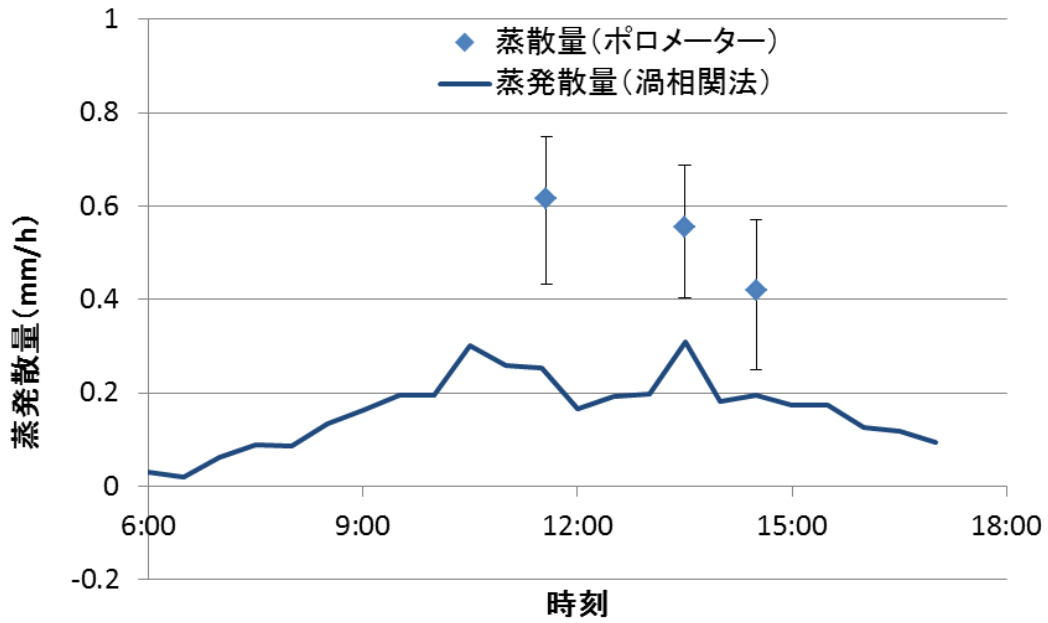


図 41.1 リーフポロメーターによる蒸散量の観測結果  
(SakhaN にて 2011 年 7 月 28 日)

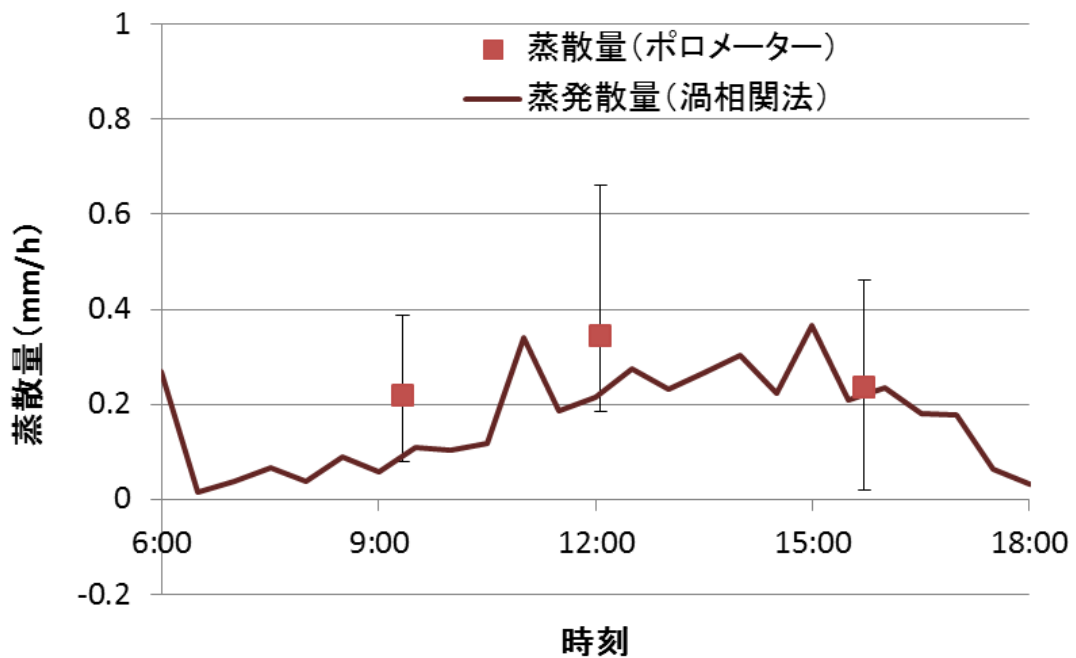


図 41.2 リーフポロメーターによる蒸散量の観測結果  
(SakhaS にて 2011 年 7 月 28 日)

### 3.9 バルク係数

#### 〈ゼロ面変位〉

図10.1の草丈のデータから、草丈が測られた日について、式 (45) の関係式を用いてゼロ面変位を算出した。そして、草丈が測られていない間のデータは内挿によって算出し、ゼロ面変位の時系列を図 42 に示した。

#### 〈粗度〉

ゼロ面変位のデータを用い、同様に草丈の測られた日における運動量粗度・顕熱粗度を算出した。図43.1は、運動量粗度の値を変動させ、 $u^*$  の実測値と式 (46) の相似則による推定値との RMSE (二乗平均平方根誤差) の最小値を求めた図の例である。また図43.2は、この時の粗度を用いて  $u^*$  の実測値と相似則による推定値の比較図でありほぼ 1:1 の直線上に乗っていることが分かる。また、式 (47) の  $\overline{w'T'}$  の対数則を用いた顕熱粗度の求め方も同様に行い、図44.1のようにRMSEを求めた。そして、同様に  $\overline{w'T'}$  の実測値と推定値の関係を図44.2のように示した。

そして、これによって求められた粗度を、ゼロ面変位と同様に間の値を内挿した。それによって得られた運動量粗度の時系列を図 45 , 顕熱粗度を図 46 示した。

#### 〈土壌面におけるバルク係数〉

土壌面でのバルク係数は土壌面での運動量粗度・顕熱粗度を用いて式 (40) によって算出した (このとき  $d_0=0$ )。値は、SakhaNでは0.0034, SakhaSでは0.0031, Zankalonでは0.0036であり、定数としてモデルに用いた。

#### 〈群落面におけるバルク係数〉

植生面でのバルク係数は式 (42) で表される土壌・植生面全体のバルク係数を用いて、式 (41) によって算出した。このとき式 (42) で用いた  $d_0$ ,  $z_0$ ,  $z_{oh}$  の値は図 42 , 図 45 , 図 46 で示した各値を用い、更に時間ごとにおける安定度補正関数を入力することで時間ステップごとのバルク係数を算出した。

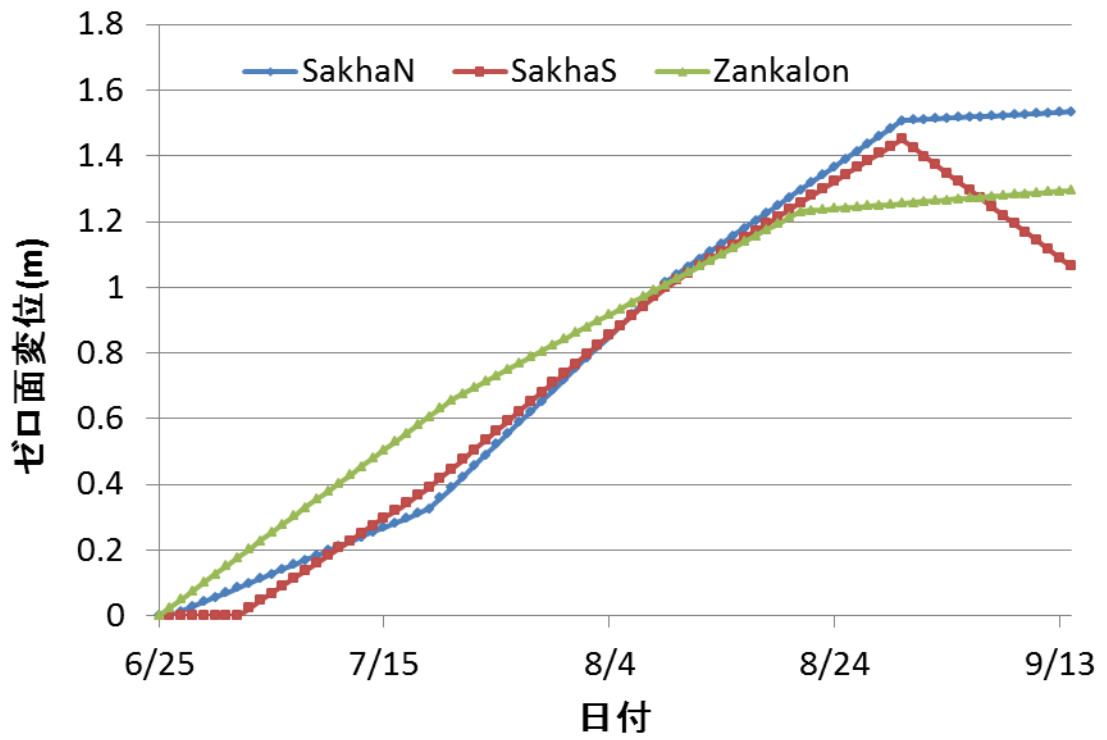


図 42 2010 年夏季におけるゼロ面変位の時系列（草丈のデータから推定）

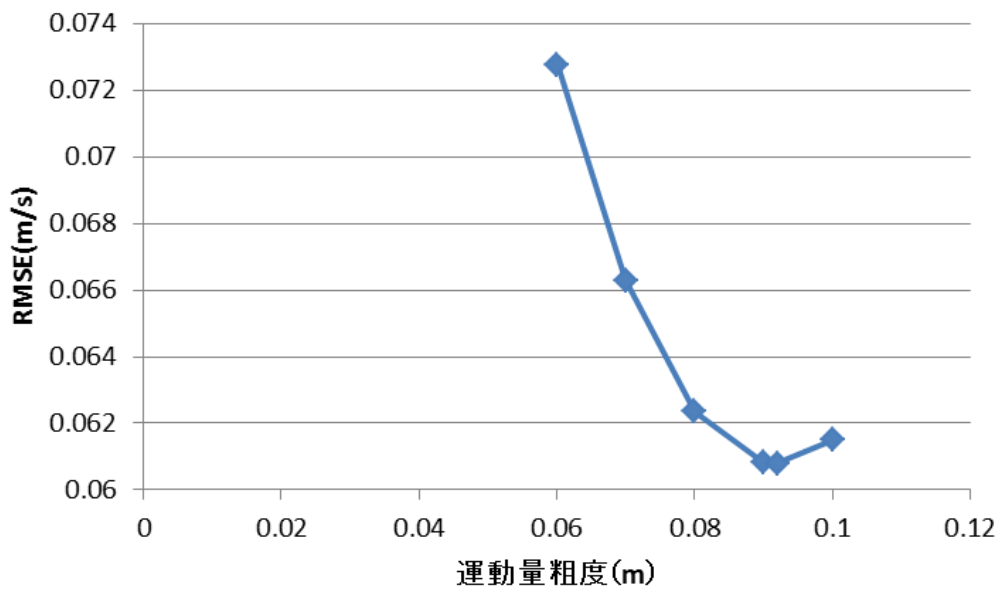


図 43.1 地表面粗度と  $u^*$  の観測値からの計算値と相似則による推定値の RMS 誤差の関係

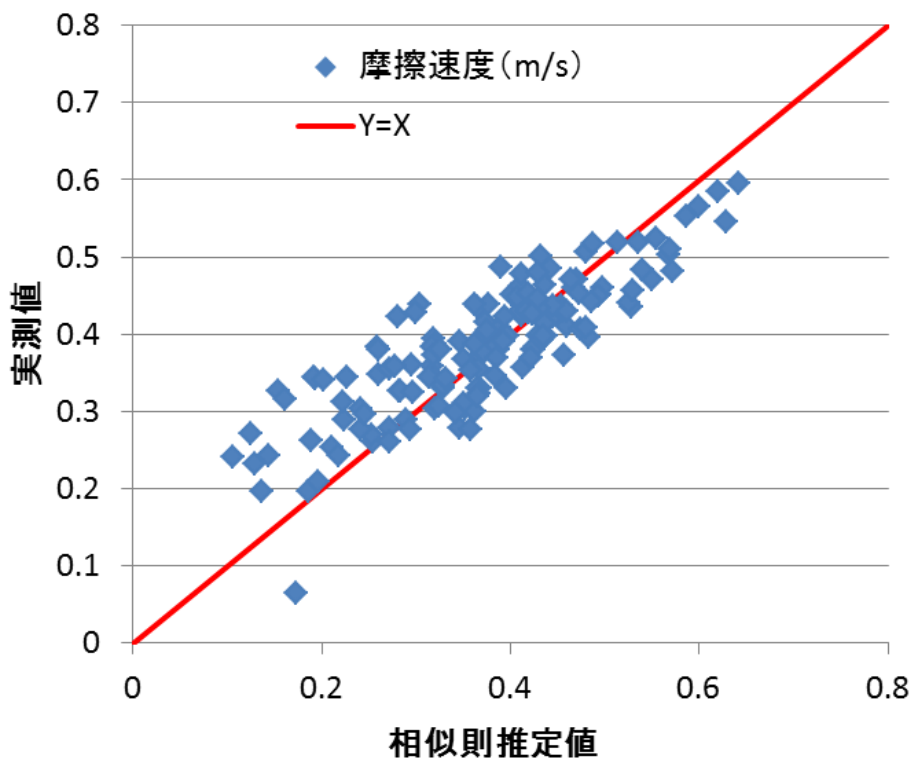


図 43.2  $u^*$  の観測値からの計算値と相似則による推定値の比較図



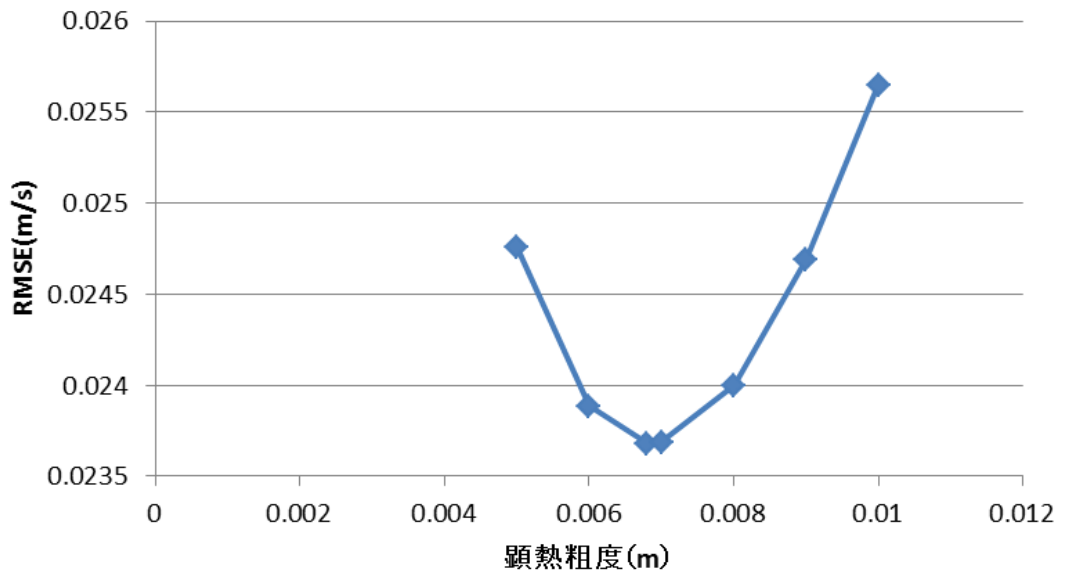


図 44.1 顕熱粗度と  $\overline{w'T'}$  の観測値からの計算値と対数則による推定値の RMS 誤差の関係

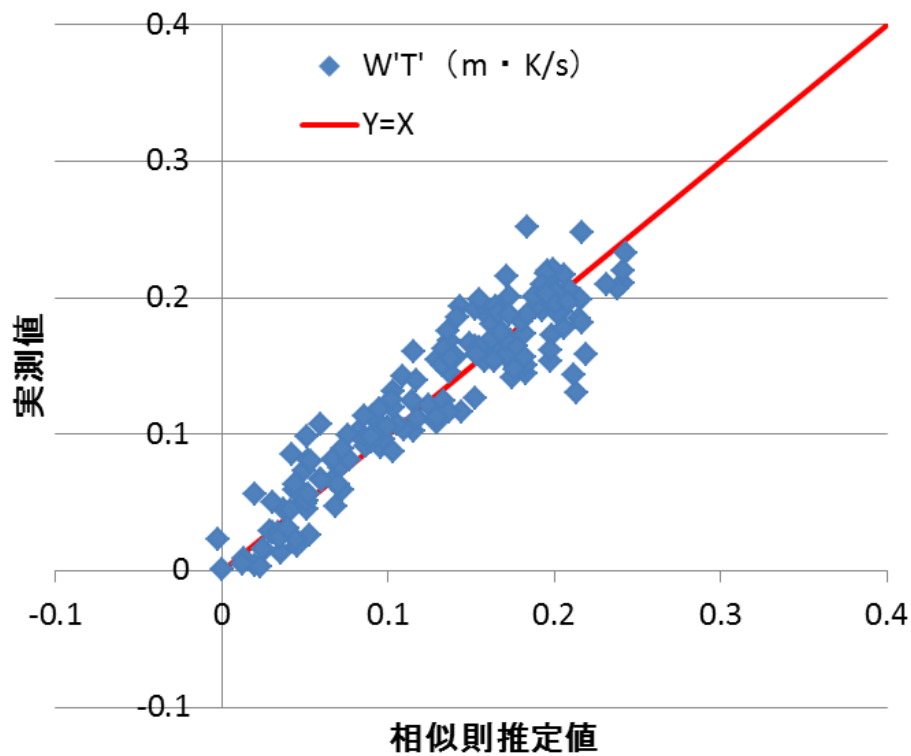


図 44.2  $\overline{w'T'}$  の観測値からの計算値と対数則による推定値の比較

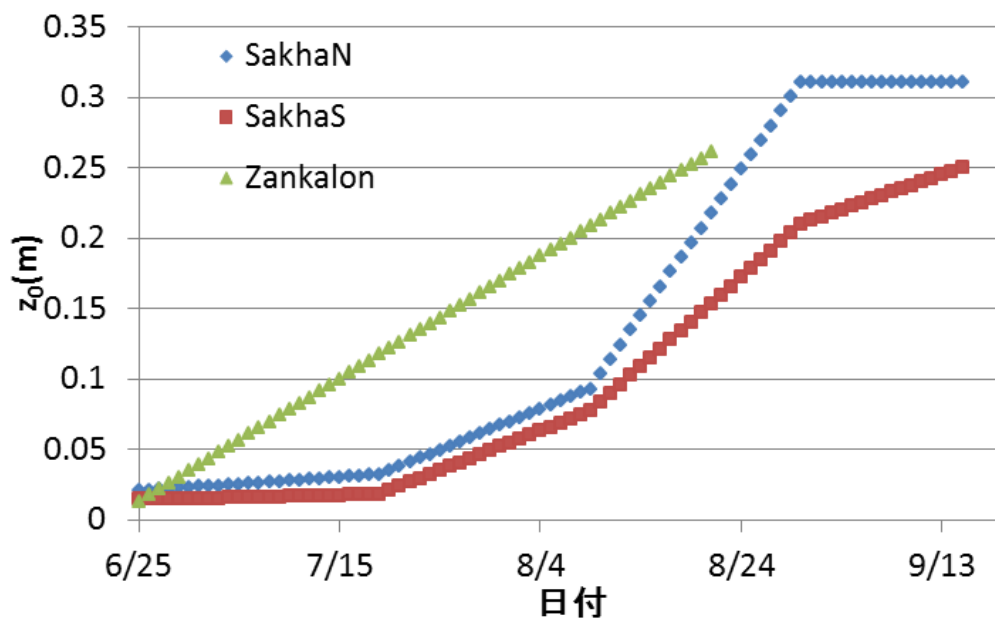


図 45 2010 年夏季における地表面粗度の時系列（草丈のデータから推定）

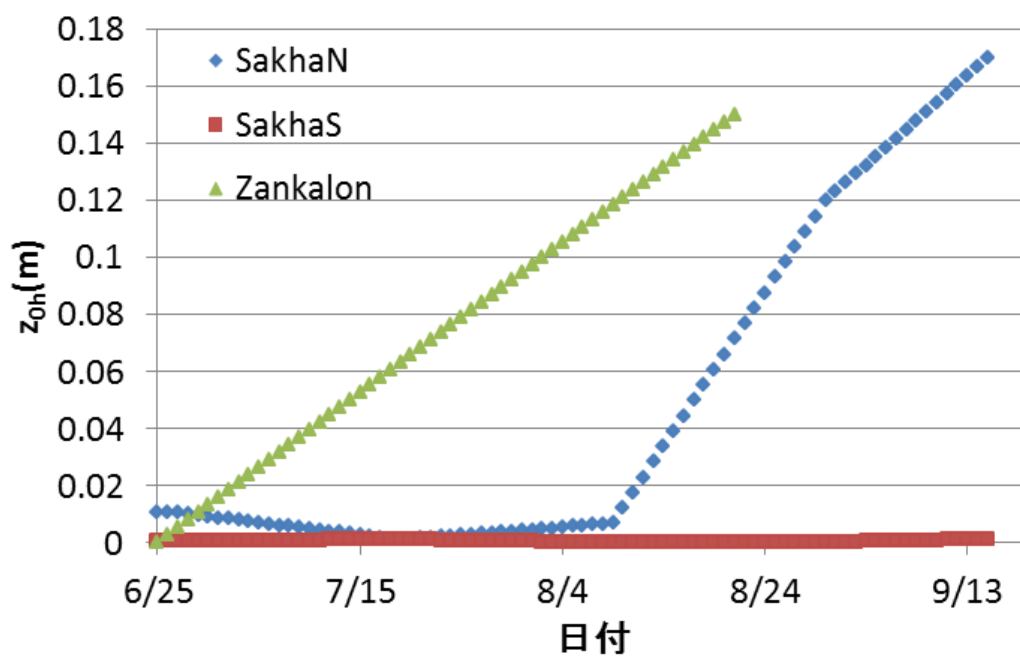


図 46 2010 年夏季における顕熱粗度の時系列（草丈のデータから推定）

### 3.10 モデルによる計算結果

今回、2010年のSakhaN、SakhaSの圃場でのモデルによるフラックス・蒸発散量の算出結果を示す。

〈主なモデルパラメータの決定〉

まず、図10.2のLAIの時系列データおよび図36の関係式を用いて植生の遮蔽因子 $\sigma_r$ の時系列グラフを図47に示す。

また、式(33)における係数 $C_1$ 、 $C_2$ は、土壌水分量を求めるのに重要なパラメータである。Deardorff(1978)では、 $C_1$ は土壌水分による変動値、 $C_2$ は定数として与えられているが、この既往研究における土壌と種類が異なるため、戸矢(1989)の方法を用いて $C_1$ 、 $C_2$ を推定した。式(33)について $E_{tr}$ と $P_g$ をゼロと仮定し、式変形すると次のようになる。

$$\frac{\partial w_g}{\partial t} = \left(-\frac{C_1}{\rho_w d_1}\right) E_g + \left(-\frac{C_1}{\tau}\right) w_g + \frac{C_2 w_2}{\tau} \quad (48)$$

この式を用いて、裸地面期間の蒸発散量( $E_g$ )と土壌水分量( $w_g$ )の時系列を入力して回帰分析を行うことで $C_1$ 、 $C_2$ を求めた。その時の $C_1$ 、 $C_2$ とその時の土壌水分量の関係を図48.1、図48.2に示した。これらのグラフで示された各係数の値を参考にし、係数をキャリブレーションしつつ $C_1$ 、 $C_2$ の値を決定した。

〈フラックス・蒸発散量〉

以上のデータを用いて求めた蒸発散量を算出した。SakhaNにおける蒸発散量の推定値を図49、SakhaSにおける蒸発散量の推定値を図50に示した。また、それぞれの圃場における蒸発量と蒸散量の積算値(播種日から80日間)を図51に示した。どちらのグラフについても、作物の成長に伴い蒸散量の割合が上昇していた。しかし、SakhaNにおいては、灌漑水量による急激な蒸発量の上昇がみられた。この影響から、積算値における蒸発散量に占める蒸発量の割合はSakhaNの方が大きかった。

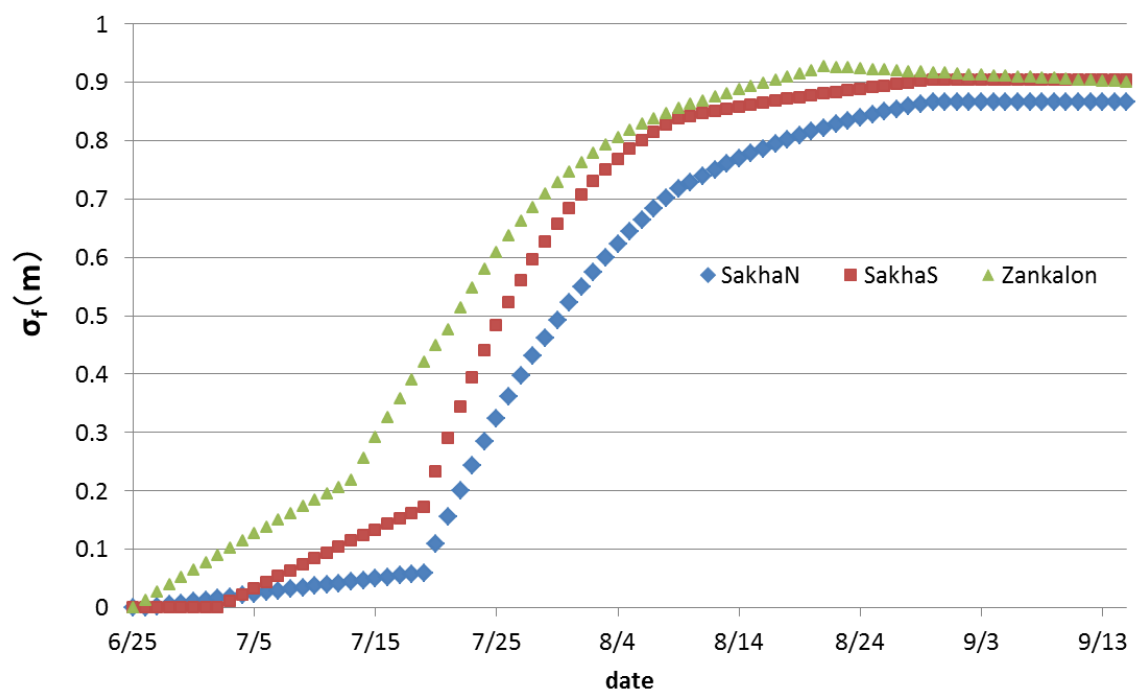


図 47 2010 年夏における  $\sigma_f$  の時系列変化

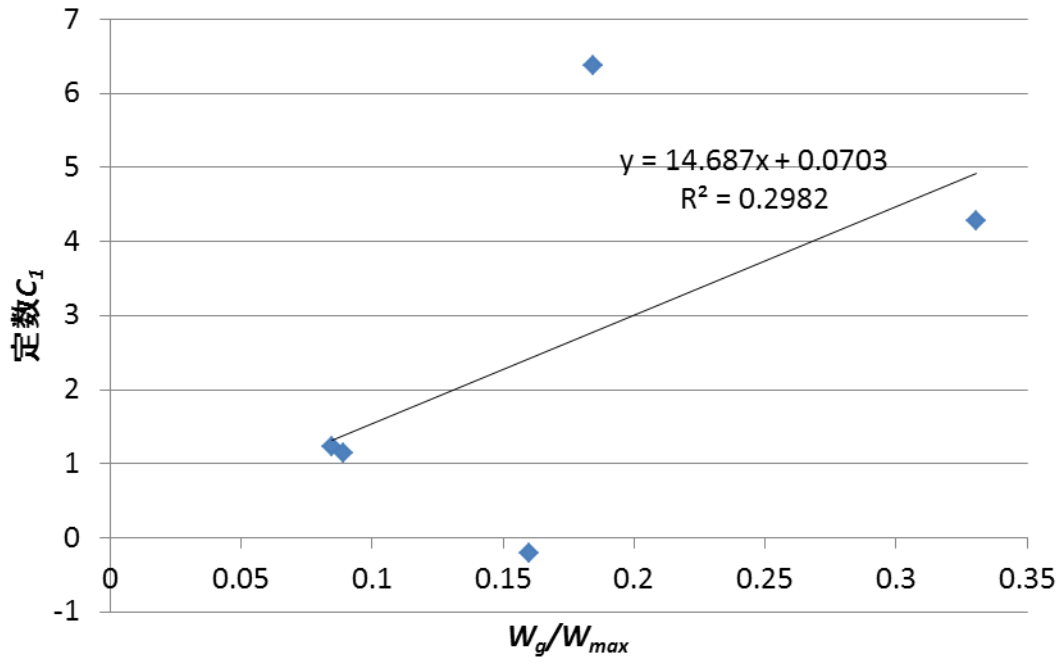


図 48.1  $C_1$  と土壌水分量の関係

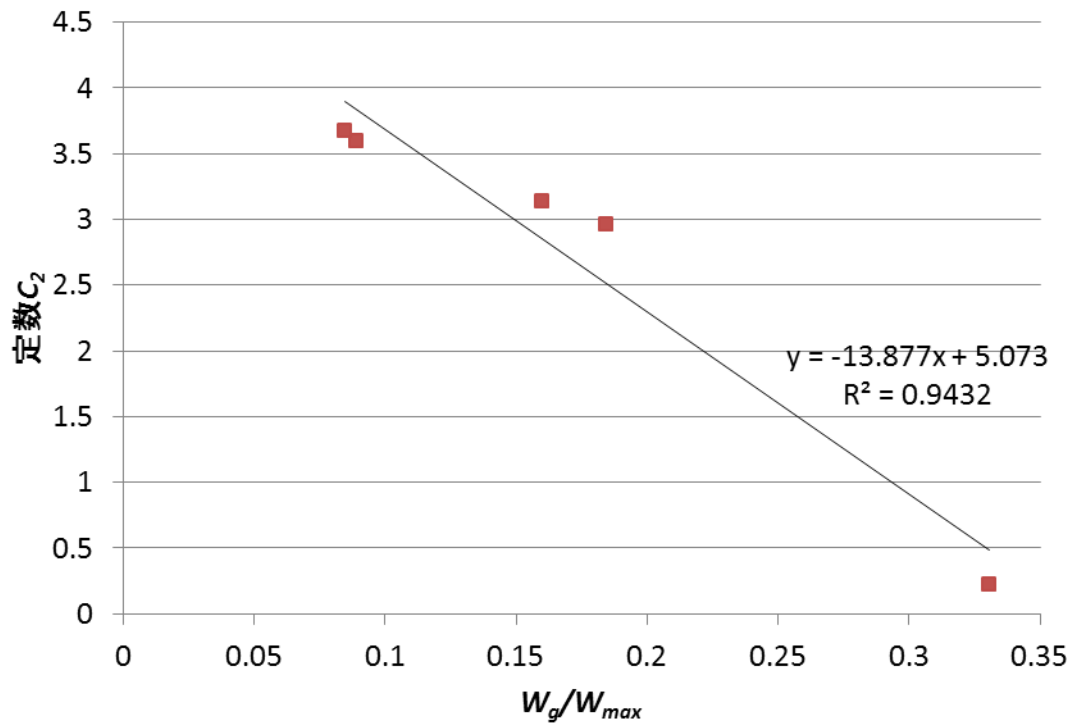


図 48.2  $C_2$  と土壌水分量の関係

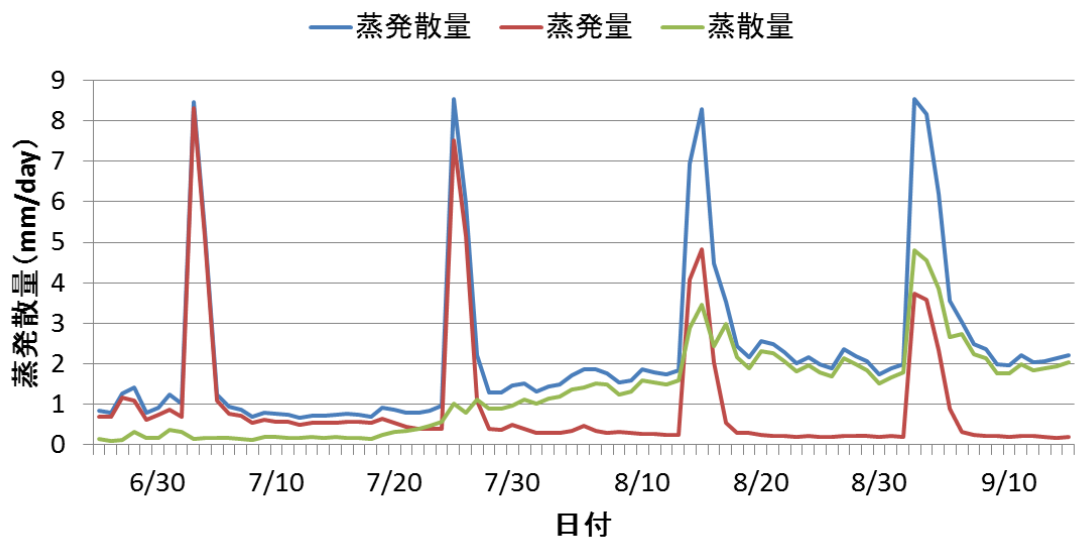


図 49 2010 年夏季 SakhaN における蒸発散量のモデル推定値

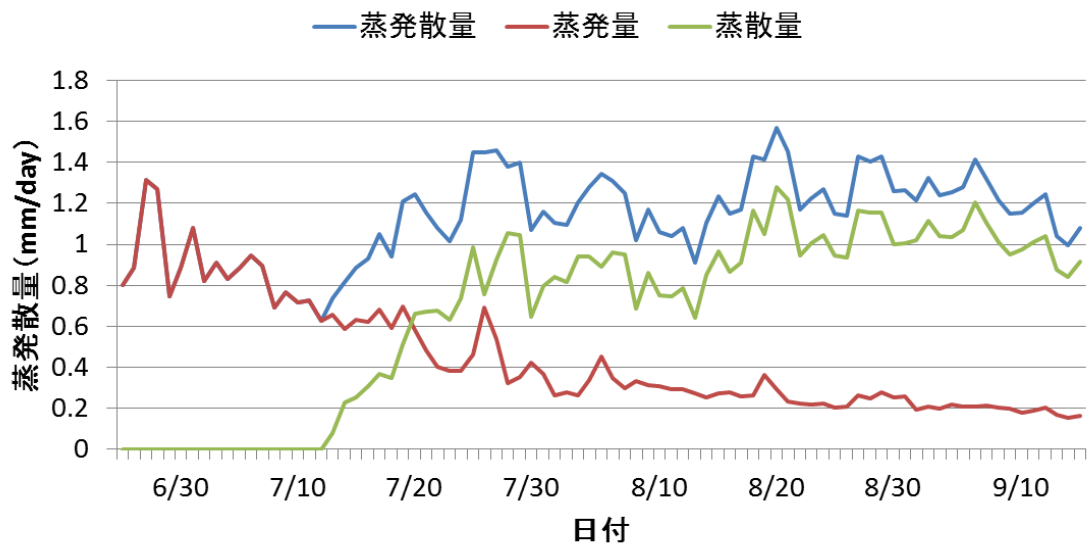


図 50 2010 年夏季 SakhaS における蒸発散量のモデル推定値



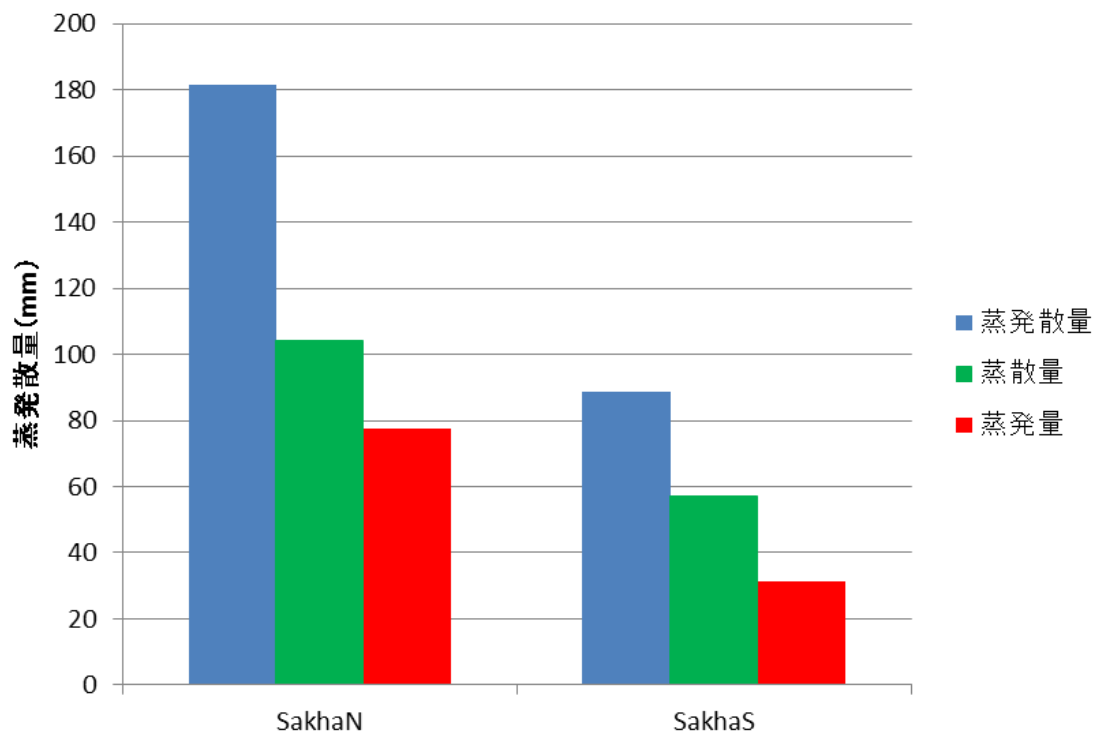


図 51 モデルによる蒸発散量の推定積算値（播種日から 80 日間）

## 4 . 考 察

### 4.1 蒸発抑制対策の効果

図 31 および図 33 に示した，渦相関法によって算出した蒸発散量の積算値と灌漑水量の積算値のグラフをベースとして，各蒸発抑制対策効果の検証をおこなう．

まず，マルチングの効果についてであるが，2010 年の SakhaN と Zankalon の結果を比較すると，蒸発散量は Zankalon の方が12%大きく，灌漑水量に対する蒸発散量の値が大きく変わらないので，圃場の位置は異なるものの，マルチングの効果は顕著なものではなかったと考えられる．松野（2011）では，マルチングの有るところと無いところにおけるチャンバー法による蒸発量の観測を行った（図 52）．これによって求められたマルチングの有無による蒸発比の違いを表 5 に示したが，大きな差はなかった．

次に，点滴灌漑による蒸発抑制対策の効果を検証する．点滴灌漑における SakhaS の圃場では，2010 年・2011 年の結果共に，畝間灌漑の SakhaN における灌漑水量を下回っており，蒸発散量は30%ほど削減されていた．さらに，図 51 のモデルによる蒸発散量の比率についても，SakhaN よりも蒸発量の比率が低かった．これによって，点滴灌漑によって蒸発散量は抑制されたと考えられる．しかし，2010 年のキャノピーアナライザーによる LAI の観測結果は，明らかに SakhaS の方が低かった．また，図 13 の収量のデータから，水利用効率を算出し，2011 年の各圃場における水利用効率（収量 / 蒸発散量）のデータを図 53 に示す．このデータを見ると，SakhaS における水利用効率は SakhaN よりも小さい結果となった．これにより，点滴灌漑によって蒸発散量を抑制できたが，植生の成長度にも影響してしまったと考えられる．また，SakhaS では蒸発散量が灌漑水量を超えている結果が 2010 年・2011 年ともに見られた．図 54 は，土平（2011）における 2010 年 Sakha における根長密度の観測結果である．また，図 55 は，2010 年の SakhaS におけるある時間の土壌水分分布である．これにより，SakhaS において灌漑水量からの不足分の蒸発散量は，浅い地下水表面からの供給の可能性が考えられる．

また，細溝灌漑では，蒸発散量が畝間灌漑のものよりも約12%少ない結果であったが，収量は細溝灌漑の方が少なく，水利用効率の値には差が見られなかったため，細溝灌漑の効果は大きくないと考えられるこれらのデータから判断すると，細溝灌漑による蒸発抑制効果はあまり大きくないと考えられる．

また，図31.2および図31.4の作物無し期間の蒸発散量も，蒸発量が50mm以上である期間もあった．そのため，この作物の無い期間における蒸発量を抑制するという事も，節水対策としては有効なものであると考えられる．

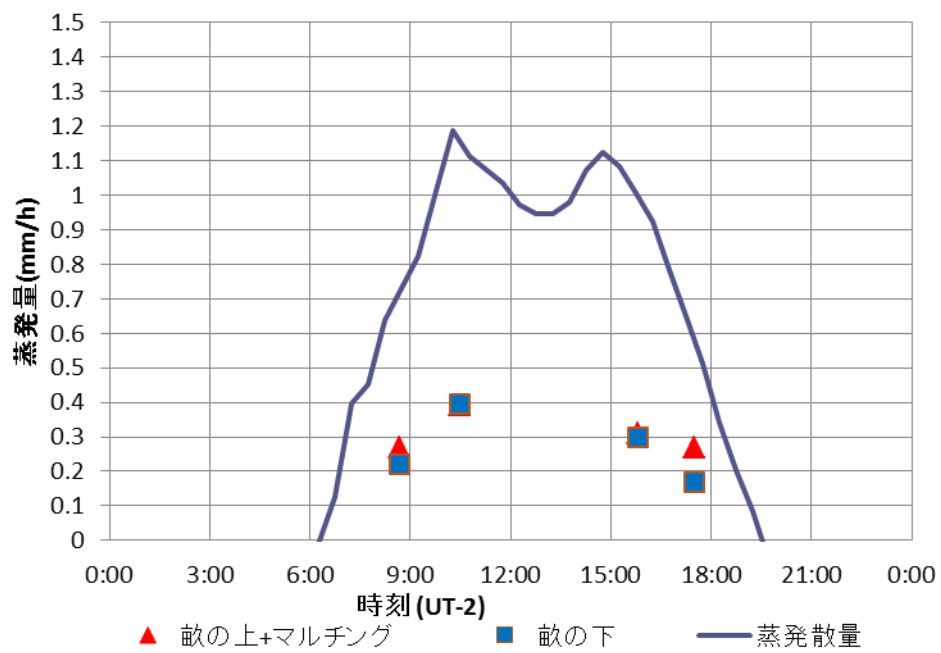


図 52 チャンバー法によるマルチングによる蒸発抑制の効果の検証  
 < 2010 年 8 月 4 日 Zankalon にて > (松野, 2011)

表 4 チャンバー法による，マルチングの有無での蒸散比の比較（松野，2010）

	蒸散比率（=蒸散 / 蒸発散）
マルチング有	0.64
マルチング無	0.69

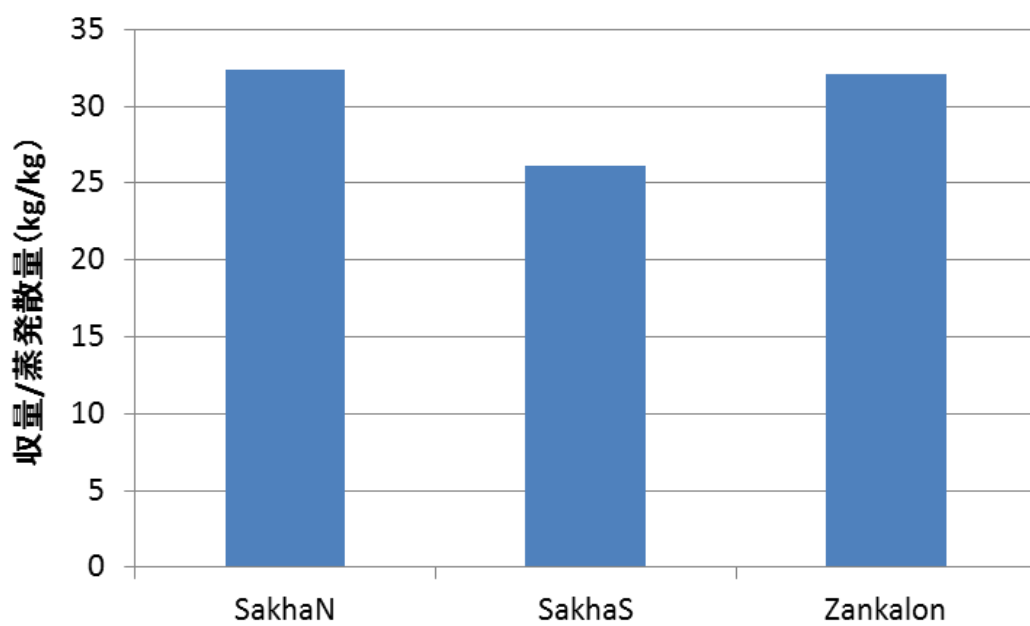


図 53 2011 年の各圃場における水利用効率の結果

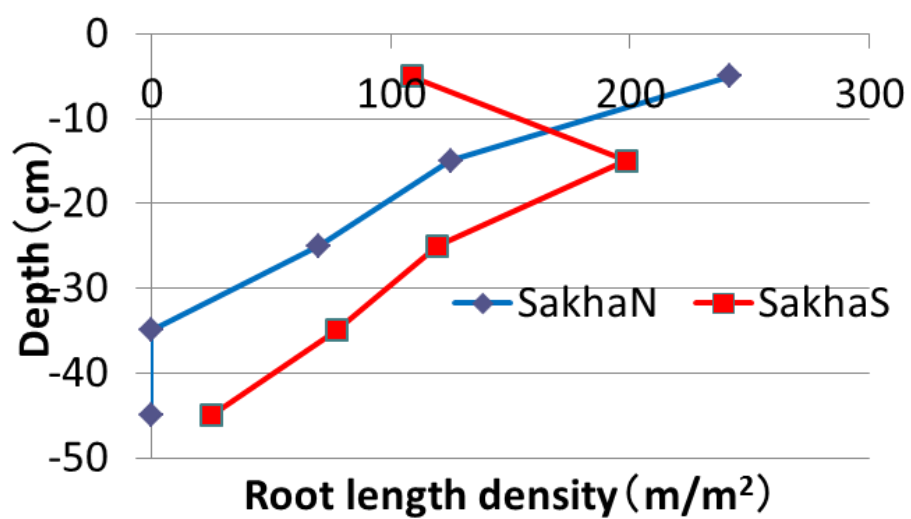


図54 根長密度の分布  
土平 (2011) のデータから作成

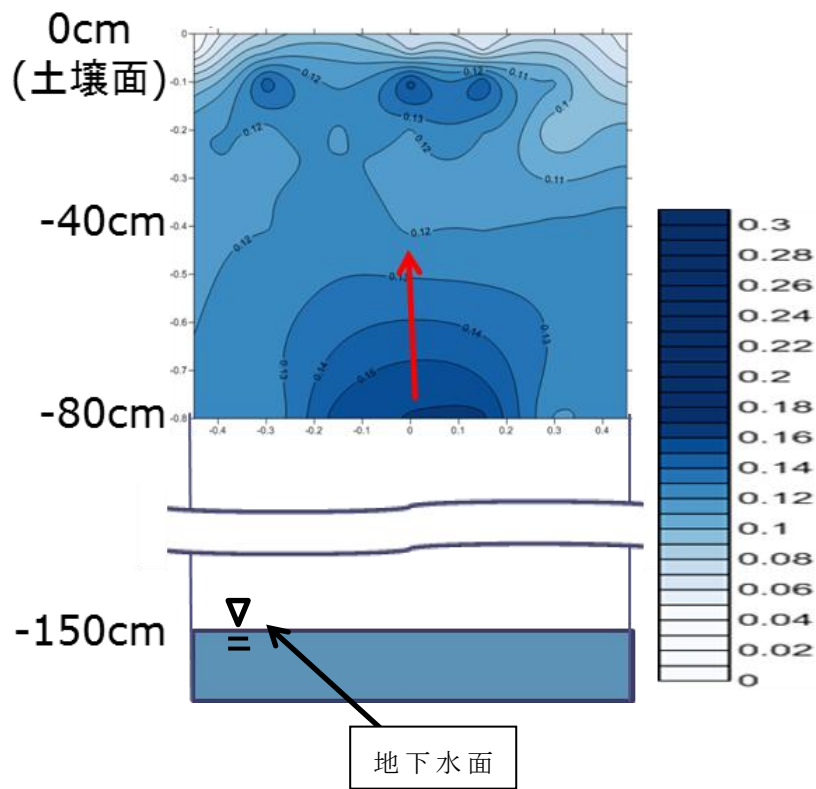


図 55 土壌水分の分布\_2010.7.28\_8:00 (松野, 2011)

## 5 . 結 論

SakhaN, SakhaS, Zankalon の 3 つの圃場について同じ作物条件の下、それぞれの圃場において蒸発散量の観測を行い、灌漑方法の違いによる蒸発散量の差異を比較することによって、蒸発抑制対策の効果を検証した。

気象観測およびフラックス算出の結果、各圃場における熱・放射収支や蒸発散量の年変化や圃場ごとの違いが見られた。各圃場における放射収支の結果、圃場ごとの放射収支の差は大きくないことが分かった。また、熱収支の結果により、顕熱フラックス、潜熱フラックスの圃場ごとの差が大きく、圃場管理方法によって熱収支の特徴が異なってくる様子が見て取れた。蒸発散量の年積算値は 649 ~ 983mm であり、夏季の蒸発散量はその内の 43 ~ 48% を占めていた。

異なる 3 つの圃場において、SakhaN の畝間灌漑をベースとして、点滴灌漑、マルチング、細溝灌漑の蒸発抑制対策の効果を考察した。

SakhaN および Zankalon の結果を比較すると、2010 年の蒸発散量が Zankalon の方が 12% 大きい結果となり、灌漑水量に対する蒸発散量の割合あまり変わらず、マルチングによる蒸発抑制の効果は大きくないと考えられる。また、SakhaN および SakhaS の結果を比較すると、SakhaS では蒸発散量が 70 % ほどに抑制されていた。しかし、2011 年の作物の収量を比較すると、SakhaS での収量が SakhaN の 2/3 以下であり、灌漑水量の改善の必要性も示唆された。また、SakhaS では蒸発散量が灌漑水量を上回っており、浅い地下水面からの水の供給の可能性も考えられた。また、2011 年の SakhaN と

Zankalon の蒸発散量の結果を比較したところ、蒸発散量は細溝灌漑の Zankalon の方が 12% 少なかったが、灌漑水量に対する蒸発散量の割合が大きく変わらなかった。また、水利用効率の値も比較してみたところ、こちらの結果もまた同様に同程度の値であった。これにより、細溝灌漑の蒸発抑制対策の効果も大きくないと考えられる。

2010 年の SakhaN および SakhaS において、モデルによって蒸発散量を蒸発量と蒸散量に分け、蒸発と蒸散の割合も算出することができた。モデルによる結果を比較すると、畝間灌漑である SakhaN の圃場における蒸発量の比率よりも、SakhaS における蒸発量の比率の方が小さい値であり、点滴灌漑によって蒸発量が減少している可能性を示す結果となった。

以上のように灌漑水量の違いによって蒸発抑制の各対策の評価を行ってきたが、更に様々な蒸発抑制対策を評価し、より効果的な方法を選定していけば、より良い持続的な水利用方法に近づいていけると考えられる。



## 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教授には、現地観測をはじめ、日頃の熱心なご指導、ゼミでの貴重なアドバイス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の田瀬則雄先生・辻村真貴諸先生・浅沼順先生・山中勤先生・遠藤崇浩先生には、主に流域環境研究ゼミにおいて貴重なご助言等をたくさん頂きました。また、杉田研究室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、土平功志氏・松野晃大氏・入柿ゆいま氏・清水達輝氏には、エジプトでの現地観測期間において観測を手伝っていただいたほか、データの提供など、様々な点でお世話になりました。

エジプトでの現地調査では、佐藤政良先生・神谷哲郎氏をはじめとする 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圃場関係者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。

田中久則氏をはじめとするクリマテック株式会社の方々には、観測機器の設置やトラブルへの対応、キャリブレーションなどの面で大い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、卒業論文執筆時に引き続き、研究方法の理解や、計算モデルの作成に大いに参考にさせていただきました。

また、流域環境研究室のメンバーには、研究生生活を送っていく上で様々な面でお世話になりました。特に、同期の木村健夫氏、藤原愛氏、松倉重雄氏は研究を行う上で大変励みになりました。

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った全ての方々に、この場を借りて心から御礼申し上げます。最後に大学院の修士まで進学させて頂き、長きに渡って見守って下さった両親にこの場を借りて感謝を申し上げたいと思います。

## 参 考 文 献

- 穴瀬真・田淵俊雄・安富六郎・多田敦・高橋強・高山昌照・山路永司・駒村正治・細山田健三・前田隆・江崎要・小出進・長田昇・高須俊行・矢野友久・難波直彦・河野洋・中山幹康 (1992) : 「農地工学」 . 文永堂出版, pp.333.
- 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.
- Chen, X.Y. Zhang, D. Pei, H.Y. Sun and S.L. Chen (2007) : Effects of straw mulching on soil temperature, evaporation and yield of winter wheat: field experiments on the North China Plain, *Ann Appl Biol* 150 , 261–268.
- 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.
- 福田敬広 (2010) : 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卒業論文 . pp.74.
- 畑明彦 (2008) : 砂漠の国エジプトと水資源 . *Civil Engineering Consultant*, 238, 62-65.
- Kaimal, J. C. and Finnigan, J.J. (1994) : *Atmospheric Boundary Layer Flows*. Oxford University Press. pp.289.
- 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.
- Kondo J., Saigusa N., and Sato T. (1990) : A parameterization of evaporation from bare soil surfaces. *J. Appl. Meteor.*, 29, 385-389.
- 松野晃大 (2011) : 灌漑方法が異なる耕作地における安定同位体比とチャンバー法を用いた蒸発散の地面蒸発と蒸散への分離 . 筑波大学大学院生命環境科学研究科・環境科学専攻修士論文 . pp.83+ 付録 .
- 三宅哲也・増田俊二 (2004) : マルチングの材質別性能試験 . *日緑工誌*, *J. Jpn. Soc. Reveget. Tech.*, 30 (1) , 305-306
- Monteith, J. L. (1976) : *Vegetation and the Atmosphere*. Academic Press, pp.298.

- Moreira, M.Z., Martinelli, L A., Victoria, R.L., Barbosa, E.M., Bonates, L.C.M. and Nepstad, D.C. (1997) Contribution of transpiration to forest ambient vapour based on isotopic measurements. *Global Change Biology*, 3, 439-450.
- 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.
- National Water Resource Plan (2005) : Water for the Future. Ministry of Water Resources and Irrigation, pp.268.
- 農畜産業振興機構ホームページ (2010): エジプトの砂糖産業の概要. (<http://sugar.alic.go.jp/world/lmc/0210egy.htm>).
- 緒形博之・片岡隆四・手島三二・田中宏平・田中弥寿男 (1978): 「農業水利学」. 文永堂, pp.266.
- Omar, M. H. and Mehanna, A. M (1984) : Measurement and estimates of potential evapo-transpiration over Egypt. *Agric. For. Meteorol.*, 31, 117-129.
- 小野貞芳・小松良行・木村悟 (1985): スーパーポロメーターによる蒸散測定時の留意点について. *Report of the Shikoku Branch, The Crop Science Society of Japan* (22), 1-4, 1985-12-25.
- 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.
- Toda, M. and Sugita, M. (2003) : Single level turbulence measurements to roughness parameters of complex terrain. *J. Geophys. Res.*, 108 (D12) , 4363, doi:10.1029/2002JD002573.
- 土平功志 (2011): エジプト・ナイルデルタの耕作地における水文モデルを用いた蒸発・蒸散量の評価. 筑波大学大学院生命環境科学研究科・環境科学専攻修士論文. pp.99+ 付録.
- 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.
- Yousry Atta (2006) : A new method for cultivating rice with high potential for water saving. *Grid (IPTRID network magazine)* , 25, 10-12.