

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  
The estimation of evaporation and transpiration using hydrologic model in crop  
lands of Nile Delta of Egypt

要旨

エジプトの主要農業作物は、綿花、小麦、米、ベルシーム、トウモロコシ、野菜・果実類である。しかしエジプトでは、人口増加や農地開拓の影響等によって、多くの人々が住んでいるナイルデルタ地域での使用可能水量が減ることから、ナイルデルタ地域における農業の持続可能性が問われている。そして、蒸発散量を減らさなければならない予測となっているにも関わらず、その定量的評価は行われていない。また、蒸発散量を減らすためには蒸発抑制対策を行う必要があるが、どの程度の効果が見込めるか予測は立っていない。

そこで、一. エジプトの主要作物の内のトウモロコシに対しモデルを適用して地面蒸発量、蒸散量の評価を行うこと、二. 蒸発抑制対策を講じた場合のシミュレーションを行い、その効果の定量的評価をすることを研究目的とする。

研究対象地域は、エジプト・ナイルデルタ地域の Zankalon と Sakha という町の圃場である。圃場の植生は Zankalon, Sakha 共にトウモロコシである。この2つの圃場では灌漑が行われており、Zankalon, Sakha の北側（以下 SakhaN）では畝間灌漑、Sakha の南側（以下 SakhaS）では点滴灌漑が行われている。また Zankalon では畝の上にマルチ材として藁が  $0.4 \text{ kg/m}^2$  敷かれている。Zankalon は 2010 年 8 月 3 日から 5 日に、SakhaS は 2010 年 8 月 7 日から 8 日に、SakhaN は 2010 年 8 月 9 日から 10 日に現地観測を行った。観測項目は、I. 根系調査、II. 地下水位測定である。本研究では、TOPLATS (TOPMODEL-Based Land Surface-Atmosphere Transfer Scheme) モデルを用いている。気象データは Automatic Weather Station により、風速 3 成分、気温、水蒸気濃度、二酸化炭素濃度、放射 4 成分、気温、湿度、地中熱流量、土壌の体積含水率を観測し、モデルの入力データと真値（蒸発散量、顕熱、潜熱、正味放射量）の算出に使用した。

その結果、蒸発量、蒸散量の合計量は、SakhaN で蒸発量が 205 mm、蒸散量が 301 mm、SakhaS で蒸発量が 152 mm、蒸散量が 364 mm、Zankalon で蒸発量が 162 mm、蒸散量が 400 mm となった。また、蒸発量、蒸散量の合計量の比は、SakhaN で蒸発量が 40%、蒸散量が 60%、SakhaS で蒸発量が 29%、蒸散量が 71%、Zankalon で蒸発量が 29%、蒸散量が 71% となり、SakhaN に比べ、SakhaS, Zankalon の方が蒸発の割合は低くなった。これらのことから、慣行灌漑を行っている SakhaN に比べ SakhaS, Zankalon の方が蒸発が抑制されたことが分かったが、マルチ材（藁）の効果を考慮しなければ正確な把握はできない。

キーワード：蒸発散量、熱収支 1 次元モデル、トウモロコシ、エジプト

## 目次

1. はじめに.....	1
2. 方法.....	5
2.1 研究対象地域.....	5
2.2 現地観測.....	5
2.3 使用モデル.....	6
2.3.1 モデルの概要.....	6
2.3.2 使用データ.....	11
3. 結果および考察.....	32
3.1 現地観測結果.....	32
3.2 時間変化するパラメータ.....	32
3.3 モデル算出結果.....	33
4. 結論.....	96

## 表目次

表 1	観測項目 .....	25
表 2	パラメータ値 .....	26
表 2	パラメータ値 (続き).....	27
表 3	根の重量比測定結果.....	35
表 4	根の根長密度測定結果.....	36
表 5	植被率測定結果.....	37
表 6	植生の平均高さ, 株数の測定結果.....	38

## 図目次

図 1	エジプトの利用可能な水資源量.....	2
図 2	エジプトの水の用途.....	3
図 3	エジプトナイル川流域の水収支.....	4
図 4	観測地点 (左: エジプト全体, 右: ナイルデルタ).....	13
図 5	点滴灌漑の様子 (撮影: 2010/8/11 2 時).....	14
図 6	畝間灌漑の様子 (撮影: 2010/8/19 16 時).....	15
図 7	マルチ材(藁)の様子 (撮影: 2010/8/4 12 時).....	16
図 8	Sakha 圃場図 (松野, 私信).....	17
図 9	Zankalon 圃場図 (松野, 私信).....	18
図 10	土壌ブロックの大きさ (黄色の円はトウモロコシ).....	19
図 11	採取した土壌ブロックの大きさ (Zankalon).....	20
図 12	採取した土壌ブロックの大きさ (Sakha).....	21
図 13	被度測定位置 (青が中心, 赤円の半径は 50m, 赤円上の 8 か所で被度測定).....	22
図 14	植被率測定周辺図 (Zankalon).....	23
図 15	植被率測定周辺図 (Sakha).....	24
図 16	TOPLATS の水収支図.....	28
図 17	AWS (Zankalon) の写真.....	29
図 18	AWS (SakhaN) の写真.....	30
図 19	AWS (SakhaS) の写真.....	31
図 20	根の重量比測定結果.....	39
図 21	根の根長密度測定結果.....	40
図 22	植被率写真の例.....	41
図 23	植被率写真解析後の例.....	42
図 24	写真植被率と目視植被率の比較.....	43
図 25	植被率と LAI の関係.....	44
図 26	SakhaN の草丈の日変化.....	45
図 27	SakhaN の LAI の日変化.....	46
図 28	SakhaN の植被率の日変化.....	47
図 29	SakhaN の $z_0$ の日変化.....	48
図 30	SakhaN の $z_{oh}$ の日変化.....	49
図 31	SakhaN の風速の時間変化.....	50
図 32	SakhaN の正味放射量の時間変化.....	51
図 33	SakhaS の草丈の日変化.....	52

図 34	SakhaS の LAI の日変化	53
図 35	SakhaS の 植被率の日変化	54
図 36	SakhaS の $z_0$ の日変化	55
図 37	SakhaS の $z_{oh}$ の日変化	56
図 38	SakhaS の 風速の時間変化	57
図 39	SakhaS の 正味放射量の時間変化	58
図 40	Zankalon の 草丈の日変化	59
図 41	Zankalon の LAI の日変化	60
図 42	Zankalon の 植被率の日変化	61
図 43	Zankalon の $z_0$ の日変化	62
図 44	Zankalon の $z_{oh}$ の日変化	63
図 45	Zankalon の 風速の時間変化	64
図 46	Zankalon の 正味放射量の時間変化	65
図 47	SakhaN のモデルによる蒸発, 蒸散量推定結果	66
図 48	SakhaN の蒸発散量比較結果 (時系列)	67
図 49	SakhaN の蒸発散量比較結果 (散布図)	68
図 50	SakhaN のモデルによる体積含水率推定結果	69
図 51	SakhaN の体積含水率比較結果	70
図 52	SakhaN のモデルによる熱フラックス推定結果	71
図 53	SakhaN の正味放射量比較結果	72
図 54	SakhaN の潜熱比較結果	73
図 55	SakhaN の顕熱比較結果	74
図 56	SakhaN の地中熱流量比較結果	75
図 57	SakhaS のモデルによる蒸発, 蒸散量推定結果	76
図 58	SakhaS の蒸発散量比較結果 (時系列)	77
図 59	SakhaS の蒸発散量比較結果 (散布図)	78
図 60	SakhaS のモデルによる体積含水率推定結果	79
図 61	SakhaS の体積含水率比較結果	80
図 62	SakhaS のモデルによる熱フラックス推定結果	81
図 63	SakhaS の正味放射量比較結果	82
図 64	SakhaS の潜熱比較結果	83
図 65	SakhaS の顕熱比較結果	84
図 66	SakhaS の顕熱比較結果	85
図 67	Zankalon のモデルによる蒸発, 蒸散量推定結果	86
図 68	Zankalon の蒸発散量比較結果 (時系列)	87

図 69	Zankalon の蒸発散量比較結果 (散布図).....	88
図 70	Zankalon のモデルによる体積含水率推定結果.....	89
図 71	Zankalon の体積含水率比較結果.....	90
図 72	Zankalon のモデルによる熱フラックス推定結果.....	91
図 73	Zankalon の正味放射量比較結果.....	92
図 74	Zankalon の潜熱比較結果.....	93
図 75	Zankalon の顕熱比較結果.....	94
図 76	Zankalon の地中熱流量比較結果.....	95

## 1. はじめに

エジプトは、国土の約 96%が砂漠であり (畑, 2008), 降雨は多い地域でも 200 mm/年程度と非常に乾燥した地域である. そのため, この国の水資源はナイル川に頼っているという現状があり, 分配水量は 555 億  $m^3$ /年と協定で決められている (図 1). エジプトは農業を基幹産業とした国であり, この水の約 95%は農業用水に使用されている (図 2).

そして, エジプトでは近年砂漠を農地に変えるプロジェクトが多数進行している. この背景には, 居住可能地域が限られていることから人口過密が進んでおり, 居住可能地域を拡大させる必要があることが挙げられる. このプロジェクトの中で北シナイ地区, トシュカ地区のプロジェクトは特に大きなプロジェクトであり, それぞれ 44.5 億  $m^3$ /年, 40~50 億  $m^3$ /年の水量を必要としている.

また, ナイル川流域の水収支の現状と将来予測の関係より, 1997 年と比較して 2017 年には農業における蒸発散量を 32  $m^3$ /年減らさなければならない予測となっている (図 3).

エジプトでは, 人口増加や上記で述べたプロジェクトの影響等によって, 多くの人々が住んでいるナイルデルタ地域での使用可能水量が減ることから, ナイルデルタ地域における農業の持続可能性が問われている. そして, 蒸発散量を減らさなければならない予測となっているにも関わらず, その定量的評価は行われていない. また, 蒸発散量を減らすためには蒸発抑制対策を行う必要があるが, どの程度の効果が見込めるか予測は立っていない.

そこで, 一. エジプトの主要作物の内のトウモロコシに対しモデルを適用して地面蒸発量, 蒸散量の評価を行うこと, 二. 蒸発抑制対策を講じた場合のシミュレーションを行い, その効果の定量的評価をすることを研究目的とする.

蒸発抑制対策に関する先行研究として, 井上 (2007) ではマルチ材として再生紙, ウッドチップ, 松葉, 稲ワラを敷いた場合, そしてマルチ材なしの場合における土壌からの蒸発量を測定し, どのマルチ材においてもマルチ材のない場合よりも土壌からの蒸発が抑制されたと報告している. また, 村松ら (2005) ではマルチ材として多孔質シートを用いた場合と無被覆の場合で土壌面蒸発量を測定し, 多孔質シートを用いた場合, 土壌からの蒸発量は無被覆の 30%程度にまで減少したと報告している. また, Famiglietti et al. (1994) では King's Creek 流域において背丈の高い森林のある場所で TOPLATS (TOPMODEL-Based Land Surface-Atmosphere Transfer Scheme) モデルを適用して蒸発散量の時系列変化を推定していた. また, Bormann et al. (2003) では Terou 流域において TOPLATS モデルを適用して, 蒸発散量, 土壌体積含水率の分布を推定していた. また, 蒸発量, 蒸散量を分離して算出した研究例としては, Ritchie (1972) によれば蒸発散量に占める土壌面蒸発量の割合は LAI によって変化し, LAI が 1.04 の時 24%, LAI が 2.02 の時 12%という割合であった. また, 中川 (1978) によれば, ライグラスの群落において, 蒸発散量に占める土壌面蒸発量の割合は 25.9%を占めていた.

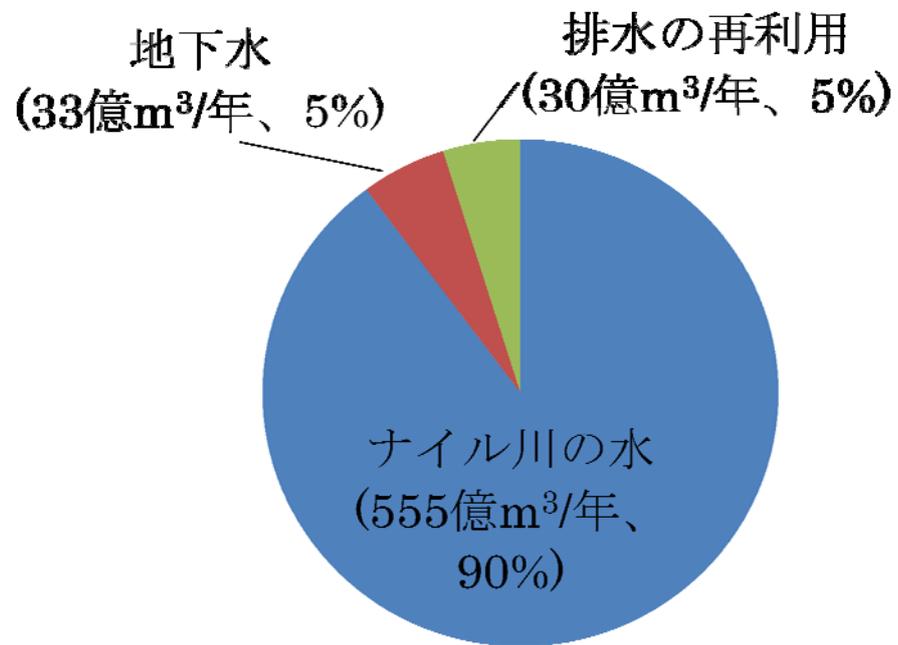


図 1 エジプトの利用可能な水資源量. (北村ほか, 1994) より作成.

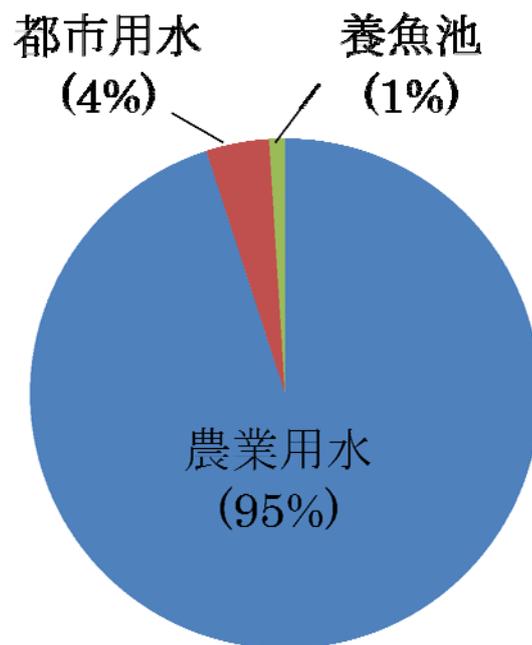


図 2 エジプトの水の用途. (Ministry of Water Resources and Irrigation of Arab Republic of Egypt, 2005) より作成.

図 3 エジプトナイル川流域の水収支 (Ministry of Water Resources and Irrigation of Arab Republic of Egypt, 2005). 農業での蒸発散は他の項目の差し引きにより算出されたもの.

## 2. 方法

### 2.1 研究対象地域

研究対象地域は、エジプト・ナイルデルタ地域の Zankalon と Sakha という町の圃場である (図 4). 圃場の植生は Zankalon, Sakha 共にトウモロコシ (Cross10) であり, Zankalon では 6 月 18~24 日に, Sakha では 6 月 20~25 日に播種された.

この 2 つの圃場では灌漑が行われており, Zankalon, Sakha の北側 (以下 SakhaN) では畝間灌漑, Sakha の南側 (以下 SakhaS) では点滴灌漑が行われている (図 5, 6). また Zankalon では畝の上にマルチ材として藁が  $0.4 \text{ kg/m}^2$  敷かれている (図 7). 各圃場の図を図 8, 9 に示す. 畝間灌漑は川から引いてきた水をポンプで揚水し, メスカ (二次水路) から各小区画単位の畝間に流している. 畝の間隔は 40 cm で, 畝の高さは 20 cm である. 点滴灌漑はチューブに水を通し, チューブに等間隔に空けられた穴から土壌に水を流している. 穴の間隔は 40 cm で, チューブ同士の間隔は 90 cm である.

### 2.2 現地観測

Zankalon は 2010 年 8 月 3 日から 5 日に, SakhaS は 2010 年 8 月 7 日から 8 日に, SakhaN は 2010 年 8 月 9 日から 10 日に現地観測を行った. 観測項目は, I. 根系調査, II. 地下水位測定である.

#### I. 根系調査

トウモロコシの根の分布割合および根長密度の測定は, 以下の手順で行った.

- ①とうもろこし一個体を中心とした土壌ブロックが採取できるよう, 土壌ブロックのすぐ横をシャベルで掘った. 対象とする土壌ブロックの体積は  $40 \text{ cm} \times 80 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$  である (図 10).
- ②Zankalon の圃場では  $20 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$  の面積の土壌ブロックに, Sakha の圃場では  $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$  の  $1/2$  の面積の土壌ブロックに範囲を絞り, 深度 10 cm ごとに区切り 50 cm まで土壌を採取し, 紙袋に入れた (図 11, 12).
- ③Zankalon の圃場では地下水を汲み上げているポンプを用い, Sakha の圃場では水路よりバットに水を入れた.
- ④バット上で 2 mm のふるいを使い, 土壌を洗い流した. ふるいに残った根を紙袋に入れた.
- ⑤バット内に残った水と土壌を攪拌して,  $500 \mu\text{m}$  のふるいで水から根を取り出し, 紙袋に入れた.
- ⑥乾燥機で根を乾燥させた ( $80^\circ\text{C}$ , 24 h).
- ⑦深度 10 cm ごとの根の合計重量を測定した.
- ⑧ 5 mm 方眼紙の上に根を置き, 方眼紙の線と交差する点の数を記録した. ライン交差点法より, その数  $\times 0.393$  が根長となる. 根長を土壌体積で割り, 根長密度を算出し

た.

トウモロコシの植被率の測定については、測定位置は、図 13 のように半径 50m の円周上の 8 か所で測定を行った (図 14, 15). 測定項目は目視による植被率, 写真撮影による植被率, 植生の平均高さ, 2 m×2 m 面積内の株数である. 目視による植被率は, 周辺の平均的な植被率を目視より記録した. 写真撮影による植被率は, 高さ 30 cm 程のボックスの上に乗し, 撮影者の体をそれぞれ東西南北に向けて一か所 4 枚, 真下にカメラレンズを向け撮影し, 画像解析ソフト (LIA32)を用いて植被率を算出した. 植生の平均高さは, 周辺の平均的な高さであるとうもろこしを選択し, メジャーで高さを測定した. 2 m×2 m 面積内の株数は, 2 m×2 m の枠を決め, その枠内にあるとうもろこしの株数を測定した.

## II. 地下水位測定

地下水位測定については, ミリオン水位計を用いて, 井戸で地下水位測定を行った. 水位計のスイッチを ON にして, ハンドルを使ってプローブを下げているとき, 音が鳴った時 (プローブが水に接触した時) のテープの長さより地下水位を測定した.

### 2.3 使用モデル

#### 2.3.1 モデルの概要

今回使用したモデルは, TOPLATS (TOPMODEL-Based Land Surface-Atmosphere Transfer Scheme) である. TOPLATS は Famiglietti et al. (1992) によって基本形が提案されたものであり, 本研究で使用するのは 2003 年に提案されたバージョン (Crow and Wood, 2003) である.

TOPLATS の構造の模式図を図 16 に示す. このモデルでは, 土壌を上から Root zone1, Root zone2, Root zone3, Transmission zone の 4 層に分けて解析を行っている. 今回の計算では Root zone1 : 地表面から 10 cm まで, Root zone2 : 10 cm から 30 cm まで, Root zone3 : 30 cm から 50 cm まで, Transmission zone : 50 cm から地下水面までと設定した.

また, TOPLATS モデルにおける蒸発量, 蒸散量の算出方法を以下に示す. 蒸発量  $e_{bs}$  は以下の式で求められる.

$$e_{bs} = \min[e_1, e_2] \quad (1)$$

ここで,  $e_1$  は Monteith and Unsworth (1990) より以下の式で計算される.

$$e_1 = \frac{v_p \times (R_n - G) + c_p \times r_o \times v_{pd} / r_{avd}}{(v_p + p_s) \times x_l} \quad (2)$$

ここで、 $v_p$ は気温に対する空気中の水蒸気圧の傾き、 $R_n$ は正味放射量、 $G$ は地中熱流量、 $c_p$ は空気比熱、 $r_o$ は空気密度、 $r_{avd}$ は空気力学的抵抗、 $p_s$ は土壌抵抗を考慮した乾湿計定数、 $x_l$ は気化潜熱であり、 $v_p$ は以下の式で計算される。

$$v_p = \frac{4098 \times v_{ps}}{(237.3 + t_c)^2} \quad (3)$$

ここで、 $v_{ps}$ は飽和水蒸気圧、 $t_c$ は気温(°C)であり、飽和水蒸気圧  $v_{ps}$ は Tetens (1930) より以下の式で計算される。

$$v_{ps} = 611 \times \exp\left(\frac{17.27 t_c}{237.3 + t_c}\right) \quad (4)$$

また、 $v_{pd}$ については

$$v_{pd} = v_{ps} - v_{ppa} \quad (5)$$

ここで、 $v_{ppa}$ は実水蒸気圧である。また、空気密度  $r_o$ は以下の式で計算される。

$$r_o = \frac{a_p}{r_a \times t_k} \quad (6)$$

ここで、 $a_p$ は気圧、 $r_a$ は空気定数、 $t_k$ は気温(K)である。また、空気定数  $r_a$ は以下の式で計算される。

$$r_a = 287 \times (1 + 0.608 q_v) \quad (7)$$

ここで、 $q_v$ は比湿であり、以下の式で計算される。

$$q_v = 0.622 \times (v_{ppa} \times a_p) \quad (8)$$

また、空気力学的抵抗  $r_{avd}$  は Brutsaert and Sticker (1979) より以下の式で計算される。

$$r_{avd} = \frac{1}{0.4^2 \times u} \log\left(\frac{z_a - z_{pd}}{z_{0h}}\right) \log\left(\frac{z_w - z_{pd}}{z_{0m}}\right) \quad (9)$$

ここで、 $u$  は水平風速、 $z_a$  は気象データの測定高さ、 $z_{pd}$  は地面修正量、 $z_{0h}$  は顕熱輸送における粗度長、 $z_w$  は風速データの測定高さ、 $z_{0m}$  は運動量輸送における粗度長である。また、土壌抵抗を考慮した乾湿計定数  $p_s$  は以下の式で計算される。

$$p_s = p_{sy} \left(1 + \frac{r_s}{r_{avd}}\right) \quad (10)$$

ここで、 $p_{sy}$  は乾湿計定数、 $r_s$  は土壌抵抗であり、乾湿計定数  $p_{sy}$  は以下の式で計算される。

$$p_{sy} = \frac{c_p \times a_p}{0.622 \times x_l} \quad (11)$$

また、土壌抵抗  $r_s$  の計算方法は選択となっており、以下の式で計算される。Sun (1982) によると

$$r_s = 3.5 \left(\frac{\theta_s}{\theta}\right)^{2.3} + 33.5 \quad (12)$$

Kondo et al. (1990) によると

$$r_s = 216(\theta_s - \theta)^{10} / D_{atm} \quad (13)$$

ここで、 $D_{atm}$  は以下の式で計算される。

$$D_{atm} = 0.229 \times 10^{-4} \left(\frac{T_s}{273.16}\right)^{1.75} \quad (14)$$

Camillo and Gurney (1986)によると

$$r_s = 4140(\theta_s - \theta) - 805 \quad (15)$$

Passerat (1986)によると

$$r_s = 3.8113 \times 10^4 \exp\left(-13.515 \frac{\theta}{\theta_{fc}}\right) \quad (16)$$

ここで、 $\theta_{fc}$ は圃場容水量である。また、気化潜熱  $x_l$ は以下の式で計算される。

$$x_l = 2.501 \times 10^6 - 2370 t_c \quad (17)$$

また、 $e_2$ は土壌抵抗  $r_s$ を0とした時の  $e_1$ に等しい。

次に、蒸散量  $e_{dc}$ は以下の式で求められる。

$$e_{dc} = \min[e_3, e_4] \quad (18)$$

ここで、 $e_3$ は Feyen et al. (1980) より以下の式で計算される。

$$e_3 = \frac{P_{soil} + P_{leaf}}{R_{soil} + R_{plant}} \quad (19)$$

ここで、 $P_{soil}$ は土壌水のポテンシャル、 $P_{leaf}$ は葉の臨界水ポテンシャル、 $R_{soil}$ は土壌からの抵抗、 $R_{plant}$ は植物からの抵抗であり、土壌水のポテンシャル  $P_{soil}$ は以下の式で計算される。

$$P_{soil} = -\frac{\Psi_b}{R_s^{\frac{1}{b}}} \quad (20)$$

ここで、 $\Psi_b$ は空気侵入値、 $R_s$ は有効飽和度、 $B$ はブルックス・コリー間隙径分布係数であり、有効飽和度  $R_s$ は以下の式で計算される。

$$R_s = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (21)$$

ここで、 $\theta$ は土壌体積含水率、 $\theta_r$ は残留土壌水分、 $\theta_s$ は飽和土壌水分である。また、土壌からの抵抗  $R_{soil}$ は Feyen et al. (1980) より以下の式で計算される。

$$R_{soil} = \frac{1}{A \times K \times D} \quad (22)$$

ここで、 $A$ は根活動要素、 $K$ は不飽和透水係数、 $D$ は根密度であり、不飽和透水係数  $K$ は Famiglietti et al. (1994) より以下の式で計算される。

$$K = K_z \times R_s^{\frac{2+3B}{B}} \quad (23)$$

ここで、 $K_z$ は飽和透水係数であり、以下の式で計算される。

$$K_z = K_s \times \exp(-ff \times z_{rz}) \quad (24)$$

ここで、 $K_s$ は地表面の飽和透水係数、 $ff$ は TOPMODEL パラメータ、 $z_{rz}$ は地表面からの深さである。また、植物からの抵抗  $R_{plant}$ は Feyen et al. (1980) より以下の式で計算される。

$$R_{plant} = \frac{r_t}{D} \quad (25)$$

ここで、 $r_t$ は根抵抗である。次に、 $e_4$ は以下の式で計算される。

$$e_4 = \frac{v_p \times (R_n - G) + c_p \times r_o \times v_{pd} / (f1f3f4r_e + r_{avd})}{(v_p + p_s) \times x_t} \quad (26)$$

ここで、 $f1$ は光合成有効放射による制限因子、 $f3$ は水蒸気圧による制限因子、 $f4$ は気温による制限因子、樹冠抵抗であり、樹冠抵抗  $r_e$ は Jacquemin and Noilhan (1990) より以下の式で計

算される.

$$r_e = \frac{r_{smin}}{LAI} \quad (27)$$

ここで,  $r_{smin}$ は最小気孔抵抗,  $LAI$ は葉面積指数である. また, 光合成有効放射による制限因子  $f1$ は Jacquemin and Noilhan (1990) より以下の式で計算される.

$$f1 = \frac{1+f}{f + \frac{r_{smin}}{r_{smax}}} \quad (28)$$

ここで,  $r_{smax}$ は最大気孔抵抗であり,  $f$ は

$$f = 0.55 \times \frac{R_g}{R_{gl}} \times \frac{2}{LAI} \quad (29)$$

ここで,  $R_{gl}$ は放射パラメータである. また, 水蒸気圧による制限因子  $f3$ は Jacquemin and Noilhan (1990) より以下の式で計算される.

$$f3 = \frac{1}{1 - f3par \times (v_{ps} - v_{ppa})} \quad (30)$$

ここで,  $f3par$ は樹冠抵抗による飽差の調整量パラメータである. また, 気温による制限因子  $f4$ は Jacquemin and Noilhan (1990) より以下の式で計算される.

$$f4 = \frac{1}{1 - f4par \times (t_{ref} - t_c)^2} \quad (31)$$

ここで,  $f4par$ は樹冠抵抗による気温の調整量パラメータ,  $t_{ref}$ は樹冠抵抗の調整に用いる基準気温である.

### 2.3.2 使用データ

気象データは AWS (Automatic Weather Station) により, 風速 3 成分, 気温, 水蒸気濃

度，二酸化炭素濃度，放射 4 成分，気温，湿度，地中熱流量，土壌の体積含水率を観測し（表 1，図 8，9），モデルの入力データと真値（蒸発散量，顕熱，潜熱，正味放射量）の算出に使用した（図 17～19）。

真値の算出について，蒸発散量  $E$  [mm/h]，顕熱  $H$  [W/m<sup>2</sup>]，潜熱  $L_e E$  [W/m<sup>2</sup>]は渦相関法により求めた。ただし，顕熱の実測値について，7月5日から8月6日のデータは信頼性が低いと考えられるため，その期間はボーエン比法を用いて算出された顕熱の値を実測値として用いた。ただし，いずれのフラックスも上向きを正とする。

$$L_e E = L_e \overline{\rho w' q'} \quad (32)$$

$$H = \rho c_p \overline{w' T'} \quad (33)$$

ここで， $c_p$  [J/kg/K]は大気の変比熱， $L_e$  [J/kg]は蒸発潜熱である。また，(34)式より正味放射量  $R_n$  [W/m<sup>2</sup>]を求めた。

$$R_n = S \downarrow - S \uparrow + L \downarrow - L \uparrow \quad (34)$$

ここで， $S \downarrow$  [W/m<sup>2</sup>]は下向き短波放射量， $S \uparrow$  [W/m<sup>2</sup>]は上向き短波放射量， $L \downarrow$  [W/m<sup>2</sup>]は下向き長波放射量， $L \uparrow$  [W/m<sup>2</sup>]は上向き長波放射量である。また，用いた植生，土壌，流域パラメータの値を表 2 に示す。

図 4 観測地点（左：エジプト全体，右：ナイルデルタ）



図 5 点滴灌漑の様子 (撮影 : 2010/8/11 2 時)



図 6 畝間灌漑の様子（撮影：2010/8/19 16 時）



図 7 マルチ材(藁)の様子 (撮影 : 2010/8/4 12 時)

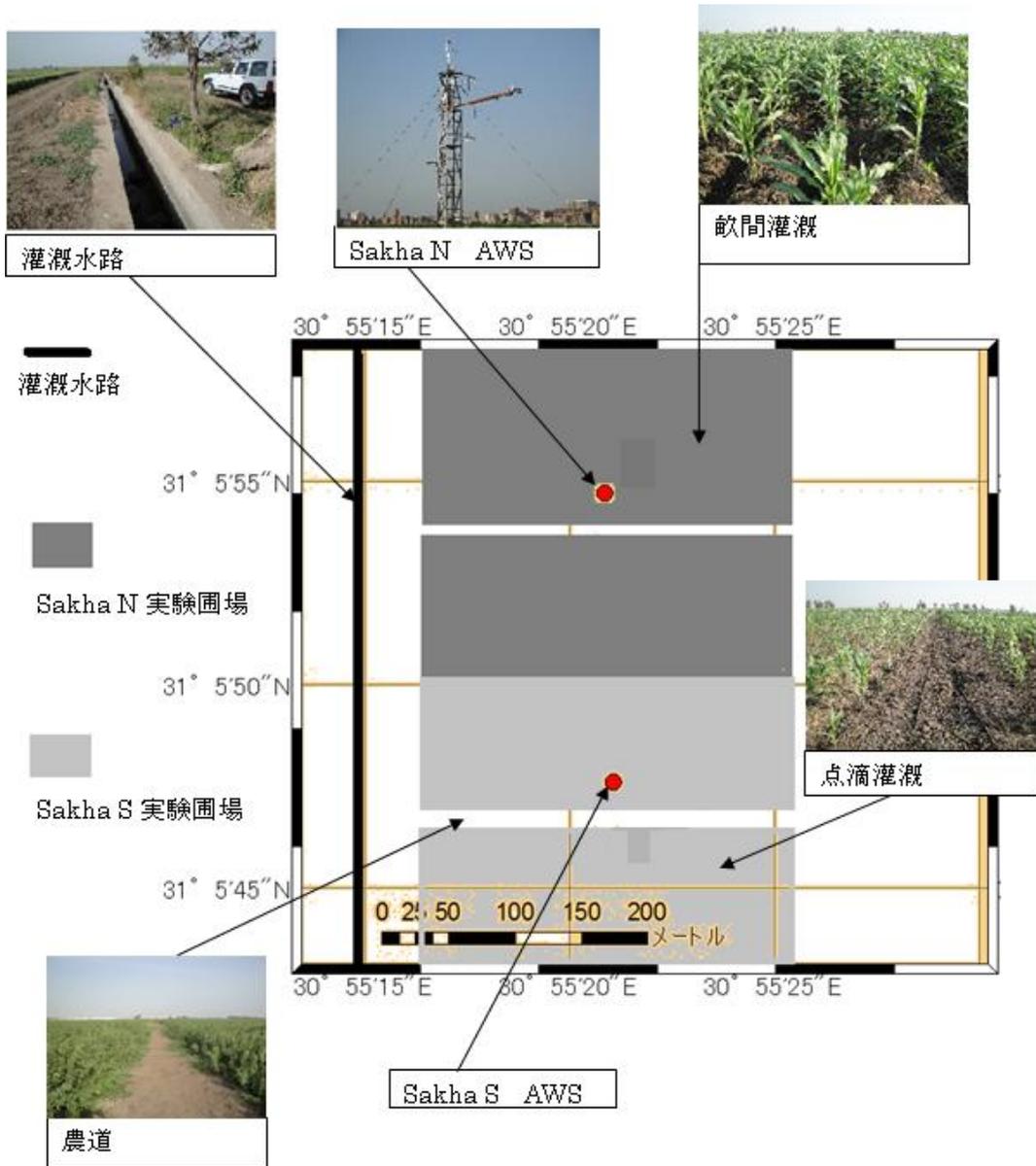


図 8 Sakha 圃場図 (松野, 2011)

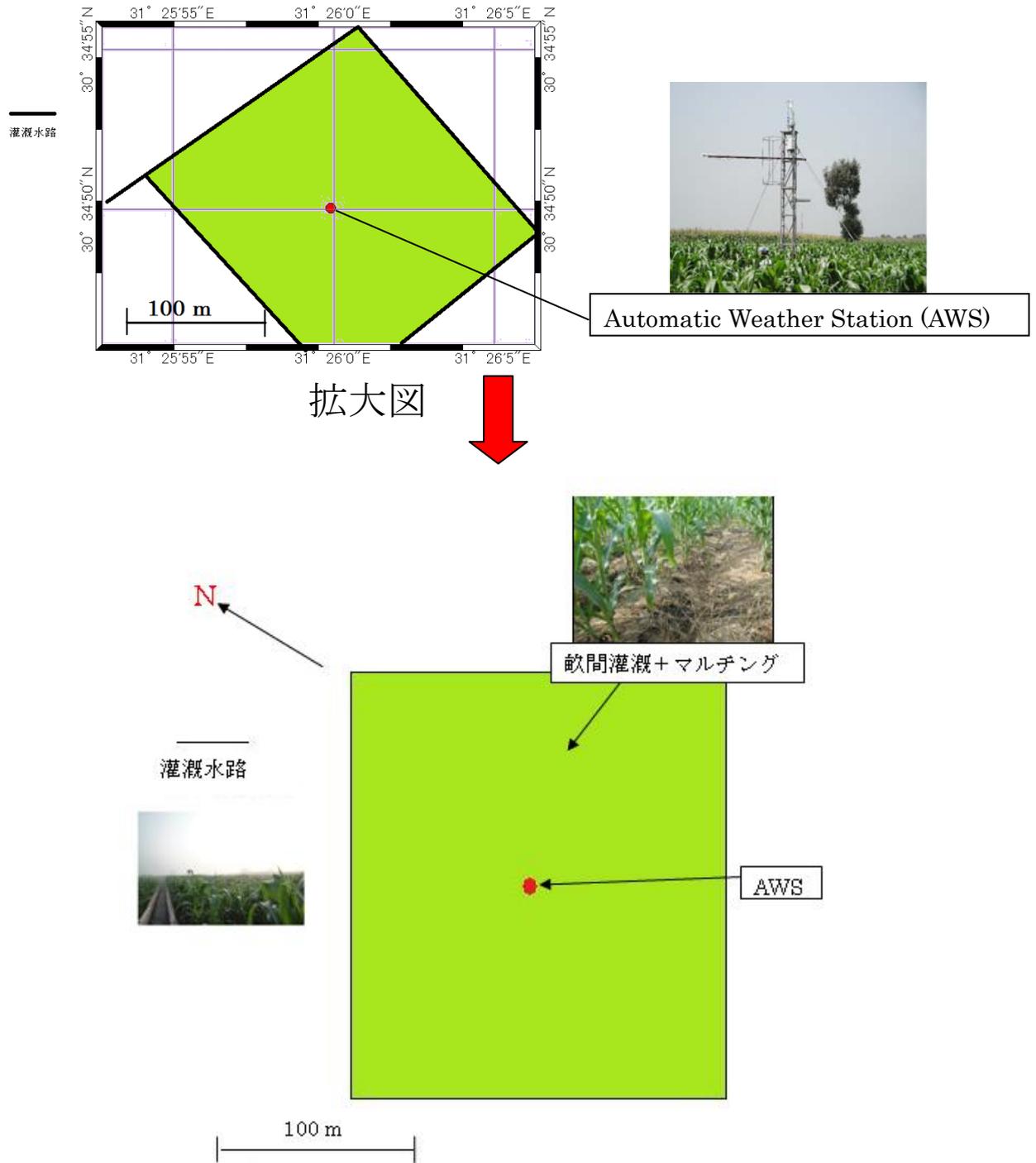


図 9 Zankalon 圃場図 (松野, 2011)

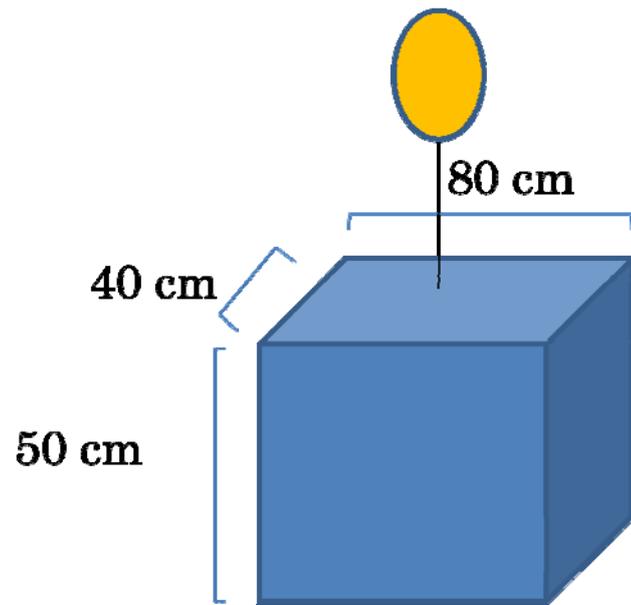


図 10 土壌ブロックの大きさ (黄色の円はトウモロコシ)

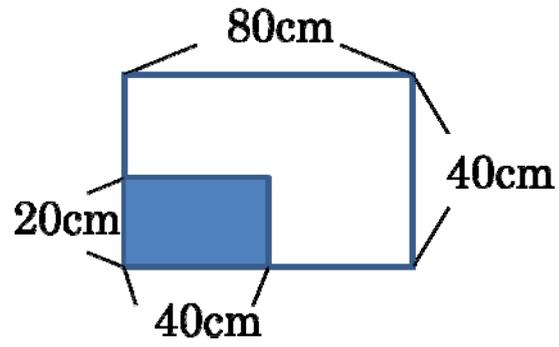


図 11 採取した土壌ブロックの大きさ (Zankalon). 地上より真下に見下ろした平面図 (青の範囲の土壌ブロックを採取).

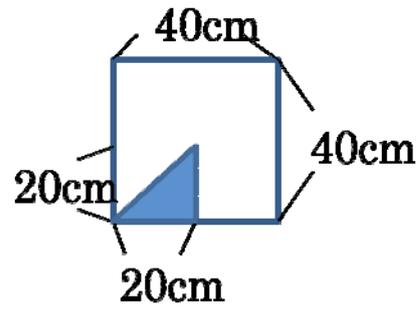


図 12 採取した土壌ブロックの大きさ (Sakha). 地上より真下に見下ろした平面図 (青の範囲の土壌ブロックを採取).

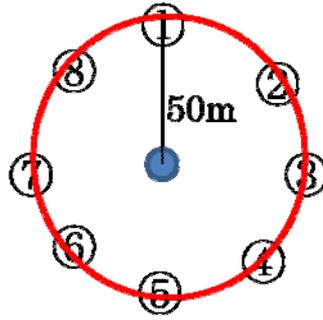


図 13 被度測定位置（青が中心，赤円の半径は 50m，赤円上の 8 か所で被度測定）

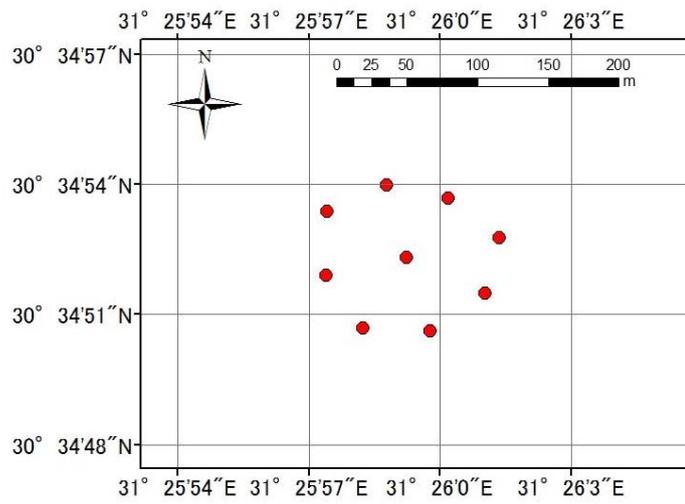


図 14 植被率測定周辺図 (Zankalon, 中央の赤丸が AWS で周辺の 8 か所が測定地点)

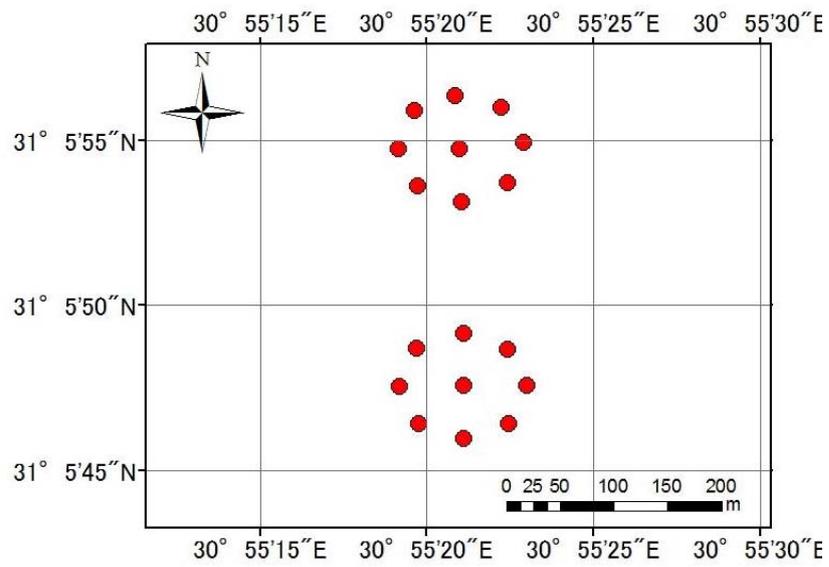


図 15 植被率測定周辺図 (Sakha, 中央の赤丸が AWS で周辺の 8 か所が測定地点)

表 1 観測項目

観測機器	観測項目
超音波風速計 (Gill Instruments R3-50)	風速 3 成分 [m/s]
オープンパスアナライザー (LI-COR LI-7500)	水蒸気濃度 [g/m <sup>3</sup> ], 二酸化炭素濃度 [mmol/m <sup>3</sup> ]
4 成分放射収支計 (Hukseflux NR01)	放射 4 成分 [W/m <sup>2</sup> ]
温湿度計 (Vaisala HMP155)	気温 [°C], 湿度 [%]
地中熱流板 (Hukseflux HFP-01)	地中熱流量 [W/m <sup>2</sup> ]
地温センサー (Campbell CS630-L25)	地温 [°C]
土壌水分センサー (Campbell CS630-L25)	土壌体積含水率 [%]

表 2 パラメータ値

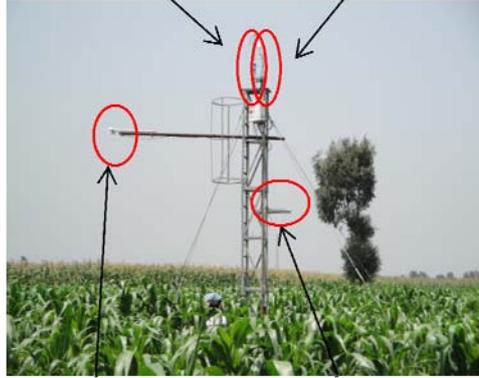
項目	値	出典
ブルックス・コリー間隙径分布指数	0.25	猪野 (2002)
空気侵入値 (m)	0.01	星野 (未発表)
飽和土壌水分	0.63	星野 (未発表)
残留土壌水分	0.35	杉田・古藤田 (1985)
地表の飽和透水係数 (m/s)	$1.66 \times 10^{-5}$	星野 (未発表)
恒温層深さ (m)	13	新井・西沢 (1972)
恒温層温度 (K)	288	新井・西沢 (1972)
土壌中層温度の値をとる深さ (m)	1	山本 (1983)
初期土壌中層温度 (K)	281	山本 (1983)
土壌成分の熱容量 (J/kg/m <sup>3</sup> )	$2.26 \times 10^{-6}$	谷 (1982)
石英率	0.35	日本工業規格 (2006)
各層における根の分布割合 (Zankalon)	0.15, 0.69, 0.17	現地観測に基づく (結果 3.1 参照)
各層における根の分布割合 (SakhaN)	0.53, 0.47, 0	現地観測に基づく (結果 3.1 参照)
各層における根の分布割合 (SakhaS)	0.36, 0.46, 0.17	現地観測に基づく (結果 3.1 参照)
エネルギー収支計算における LAI (Zankalon)	1.78	現地観測に基づく (結果 3.2 参照)
エネルギー収支計算における LAI (SakhaN)	1.35	現地観測に基づく (結果 3.2 参照)
エネルギー収支計算における LAI (SakhaS)	0.89	現地観測に基づく (結果 3.2 参照)
樹冠貯留計算における LAI	0	0 とした
乾燥地表面のアルベド	0.11	福田 (2009)
湿潤地表面のアルベド	0.11	福田 (2009)
射出率	0.95	日本農業気象学会
運動量輸送における粗度長 (m)	0.17	福田 (2009)

表 2 パラメータ値 (続き)

項目	値	出典
顕熱輸送における粗度長 (m)	0.0028	福田 (2009)
地面修正量 (m)	2.7	福田 (2009)
最小気孔抵抗 (s/m)	150	Rutter (1975)
最大気孔抵抗 (s/m)	5000	Chen and Dudhla (2001)
放射パラメータ	30	Jacquemin and Noilhan (1990)
樹冠抵抗による水蒸気欠損の調整量パラメータ	0.06	Jacquemin and Noilhan (1990)
樹冠抵抗による気温の調整量パラメータ	0.0016	Jacquemin and Noilhan (1990)
樹冠抵抗の調整に用いる基準気温	298	Jacquemin and Noilhan (1990)
植生下の地中熱流量計算のための蒸散パラメータ	0.4	Choudhury et al. (1987)
根活動要素	250	埴 (2007)
根密度 (1/m <sup>2</sup> ) (Zankalon)	92.4	現地観測に基づく (結果 3.1 参照)
根密度 (1/m <sup>2</sup> ) (SakhaN)	87.3	現地観測に基づく (結果 3.1 参照)
根密度 (1/m <sup>2</sup> ) (SakhaS)	105.8	現地観測に基づく (結果 3.1 参照)
根抵抗 (s/m)	6.00×10 <sup>8</sup>	埴 (2007)
葉の臨界水ポテンシャル (m)	-210	Famiglietti et al. (1994)
植被率 (Zankalon)	0.42	現地観測に基づく (結果 3.1 参照)
植被率 (SakhaN)	0.44	現地観測に基づく (結果 3.1 参照)
植被率 (SakhaS)	0.3	現地観測に基づく (結果 3.1 参照)
完全飽和時の地中流量 (m <sup>3</sup> /s)	2000	埴 (2007)
TOPMODEL パラメータ ff	3.8	埴 (2007)
初期平均地下水面までの深さ (m)	1.27	現地観測に基づく (結果 3.1 参照)

図 16 TOPLATS の水収支図

超音波風速計      オープンパスアナライザー



4成分放射収支計      温湿度計

図 17 AWS (Zankalon) の写真 (撮影 : 2010/8/3 15 時)

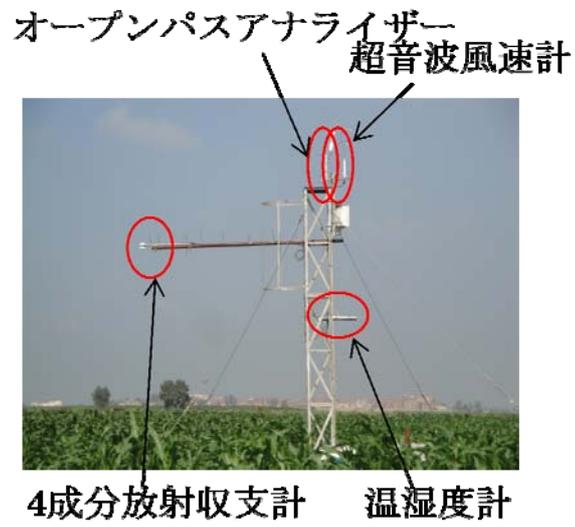
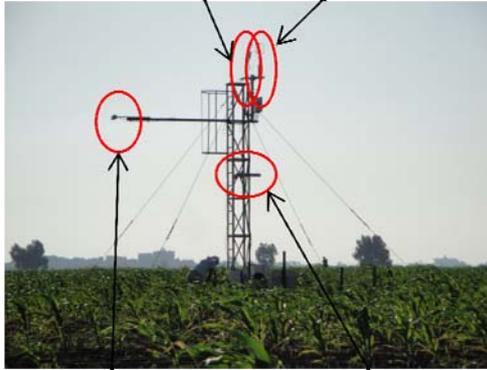


図 18 AWS (SakhaN) の写真 (撮影 : 2010/8/10 15 時)

オープンパスアナライザー  
超音波風速計



4成分放射収支計 温湿度計

図 19 AWS (SakhaS) の写真 (撮影 : 2010/8/10 11 時)

### 3. 結果および考察

#### 3.1 現地観測結果

トウモロコシの根の重量比の測定結果を図 20 と表 3 に、根長密度の測定結果を図 21 と表 4 に示す。根長密度について、Laboski ら (1998) によると、根の全長のおよそ 85%は上層 30 cm までに存在すると記述されており、上層 30 cm までの根長は Zankalon, SakhaS, SakhaN でそれぞれ 83%, 81%, 100%であり、おおよそ一致している。

また、トウモロコシの植被率の測定結果を表 5 に、植生の平均高さ、株数の測定結果を表 6 に、写真植被率解析の例を図 22, 23 に、写真植被率と目視植被率の比較を図 24 に、植被率と LAI の関係を図 25 に示す。植被率測定結果を見ると、場所にもよるが Zankalon, SakhaNの方が SakhaS に比べて植被率が高い傾向があることがわかる。写真植被率と目視植被率を比較すると、植被率が低い時には比較的近い値を取るが、高い時には目視植被率の方が値は高くなる傾向となった。これは、写真の場合は植物を上からの平面で捉えるが、目視の場合には立体的に捉えるため、葉と葉の重なりも考慮に入ってくるからだと推測される。また、これらの結果をモデルのパラメータとして用いる際には、平均値を用いた。

また、地下水位の測定結果は Zankalon 圃場では 1.142 m (測定日時 : 8/4 12:00), Sakha 圃場では 1.405 m (測定日時 : 8/8 10:00) となった。

#### 3.2 時間変化するパラメータの決定

草丈, LAI, 植被率は観測値を用いて、観測値のない日にちについては、線形補間により内挿, 外挿することにより、観測期間中のそれぞれの日にちの草丈, LAI, 植被率の値を算出した。その結果を図 26~30, 33~37, 40~44 に示す。

また、(35)式より運動量粗度  $z_0$  を、(36)式より顕熱粗度  $z_{0h}$  を算出した。(35)式、(36)式は、左辺が一定であることより、まず一定値を福田 (2010) の値を用いて決定し、草丈  $h$  (m) より  $z_0$  を、 $z_0$  より  $z_{0h}$  を算出した。その結果を図 29, 30, 36, 37, 43, 44 に示す。

$$\frac{z_0}{h} = \frac{0.17}{3} \quad (35)$$

$$\ln\left(\frac{z_0}{z_{0h}}\right) = \ln\left(\frac{0.17}{0.0028}\right) \quad (36)$$

また、Inoue and Uchijima (1979) より(37)式を用いて水平風速  $u$  を、Uchijima (1961) より(38)式を用いて正味放射量  $R_{np}$  を算出した。その結果を図 32, 33, 38, 39, 45, 46 に示す。

$$\bar{u} = \bar{u}(h_0) \exp \left[ -a_w \left( 1 - \frac{z}{h_0} \right) \right] \quad (37)$$

$$R_{np}(LAI) = R_n \exp(-0.55LAI) \quad (38)$$

### 3.3 モデル算出結果

SakhaN の蒸発、蒸散量推定結果を図 47 に、蒸発散量比較結果を図 48 に、体積含水率推定結果を図 50 に、体積含水率比較結果を図 51 に、熱フラックス推定結果を図 52 に、正味放射量比較結果を図 53 に、潜熱比較結果を図 54 に、顕熱比較結果を図 55 に、地中熱流量比較結果を図 56 に示す。

同様に、SakhaS の蒸発、蒸散量推定結果を図 57 に、蒸発散量比較結果を図 58 に、体積含水率推定結果を図 60 に、体積含水率比較結果を図 61 に、熱フラックス推定結果を図 62 に、正味放射量比較結果を図 63 に、潜熱比較結果を図 64 に、顕熱比較結果を図 65 に、地中熱流量比較結果を図 66 に示す。

同様に、Zankalon の蒸発、蒸散量推定結果を図 67 に、蒸発散量比較結果を図 68 に、体積含水率推定結果を図 70 に、体積含水率比較結果を図 71 に、熱フラックス推定結果を図 72 に、正味放射量比較結果を図 73 に、潜熱比較結果を図 74 に、顕熱比較結果を図 75 に、地中熱流量比較結果を図 76 に示す。ただし、顕熱の実測値について、7月5日から8月6日のデータは信頼性が低いと考えられるため、その期間はボーエン比法を用いて算出された顕熱の値を実測値として用いた。

SakhaN では、モデルの蒸発、蒸散量推定結果より、期間中の蒸発量合計量は 205 mm、蒸散量合計量は 301 mm となり、蒸発散量に占める蒸発量の割合は 40%となった。また、モデルの熱フラックス推定結果より、期間中の正味放射量合計量は  $4.41 \times 10^6$  MJ/(86 days)、潜熱合計量は  $2.38 \times 10^6$  MJ/(86 days)、顕熱合計量は  $1.87 \times 10^6$  MJ/(86 days)、地中熱流量合計量は  $1.59 \times 10^5$  MJ/(86 days) となり、正味放射量に占める割合は潜熱が 54%、顕熱が 42%、地中熱流量が 4%となった。

SakhaS では、モデルの蒸発、蒸散量推定結果より、期間中の蒸発量合計量は 152 mm、蒸散量合計量は 364 mm となり、蒸発散量に占める蒸発量の割合は 29%となった。また、モデルの熱フラックス推定結果より、期間中の正味放射量合計量は  $4.08 \times 10^6$  MJ/(86 days)、潜熱合計量は  $2.35 \times 10^6$  MJ/(86 days)、顕熱合計量は  $1.57 \times 10^6$  MJ/(86 days)、地中熱流量合計量は  $1.53 \times 10^5$  MJ/(86 days) となり、正味放射量に占める割合は潜熱が 58%、顕熱が 38%、地中熱流量が 4%となった。

Zankalon では、モデルの蒸発、蒸散量推定結果より、期間中の蒸発量合計量は 162 mm、

蒸散量合計量は 400 mm となり，蒸発散量に占める蒸発量の割合は 29% となった．また，モデルの熱フラックス推定結果より，期間中の正味放射量合計量は  $3.91 \times 10^6$  MJ/(84 days)，潜熱合計量は  $2.63 \times 10^6$  MJ/(84 days)，顕熱合計量は  $9.34 \times 10^5$  MJ/(84 days)，地中熱流量合計量は  $3.38 \times 10^5$  MJ/(84 days) となり，正味放射量に占める割合は潜熱が 67%，顕熱が 24%，地中熱流量が 9% となった．

また， $x$  軸に実蒸発散量を， $y$  軸にモデルからの蒸発散推定量を取ったプロットにおける近似直線の傾きを求めたところ，その傾きは SakhaN で 0.86，SakhaS で 1.24，Zankalon で 0.79 となり，モデルからの蒸発散量算出は SakhaN と Zankalon では過小評価傾向が，SakhaS では過大評価傾向があることが分かった．

表 3 根の重量比測定結果 (測定日 : 2010/8/23)

圃場	深度	根の重量 (g)	重量比 (%)
Zankalon	0-10 cm	0.30	15
	10-20 cm	0.72	36
	20-30 cm	0.66	33
	30-40 cm	0.24	12
	40-50 cm	0.10	5
SakhaS	0-10 cm	0.36	36
	10-20 cm	0.33	33
	20-30 cm	0.13	13
	30-40 cm	0.12	12
	40-50 cm	0.05	5
SakhaN	0-10 cm	0.50	53
	10-20 cm	0.25	26
	20-30 cm	0.20	21
	30-40 cm	0.00	0
	40-50 cm	0.00	0

表 4 根の根長密度測定結果（測定日：2010/8/23）

圃場	深度	根長密度 (m/m <sup>3</sup> )
Zankalon	0-10 cm	40.1
	10-20 cm	157.5
	20-30 cm	183.4
	30-40 cm	57.6
	40-50 cm	23.3
SakhaS	0-10 cm	108.9
	10-20 cm	198.5
	20-30 cm	119.5
	30-40 cm	77.4
	40-50 cm	24.8
SakhaN	0-10 cm	241.7
	10-20 cm	125.0
	20-30 cm	70.0
	30-40 cm	0
	40-50 cm	0

表 5 植被率測定結果（地点については，図 13～15 参照）

圃場	地点	目視による植被率 (%)	写真による植被率 (%)
Zankalon	①	25	32
	②	50	33
	③	30	28
	④	65	55
	⑤	40	41
	⑥	45	35
	⑦	60	53
	⑧	90	60
SakhaS	①	25	40
	②	10	12
	③	10	15
	④	30	33
	⑤	40	36
	⑥	80	59
	⑦	20	26
	⑧	25	26
SakhaN	①	70	54
	②	40	35
	③	40	30
	④	60	49
	⑤	80	61
	⑥	50	37
	⑦	40	34
	⑧	50	52

表 6 植生の平均高さ，株数の測定結果（地点については，図 13～15 参照）

圃場	地点	植生の平均高さ (m)	2 m×2 m 内の株数
Zankalon	①	1.2	12
	②	1.5	6
	③	1.4	17
	④	2.0	9
	⑤	1.6	14
	⑥	1.9	13
	⑦	2.0	13
	⑧	3.0	16
SakhaS	①	1.0	11
	②	0.8	8
	③	0.7	9
	④	1.1	16
	⑤	1.2	20
	⑥	1.5	18
	⑦	1.0	7
	⑧	0.9	7
SakhaN	①	1.3	15
	②	1.1	13
	③	1.0	10
	④	1.2	13
	⑤	1.5	17
	⑥	1.2	13
	⑦	1.1	12
	⑧	1.0	11

c

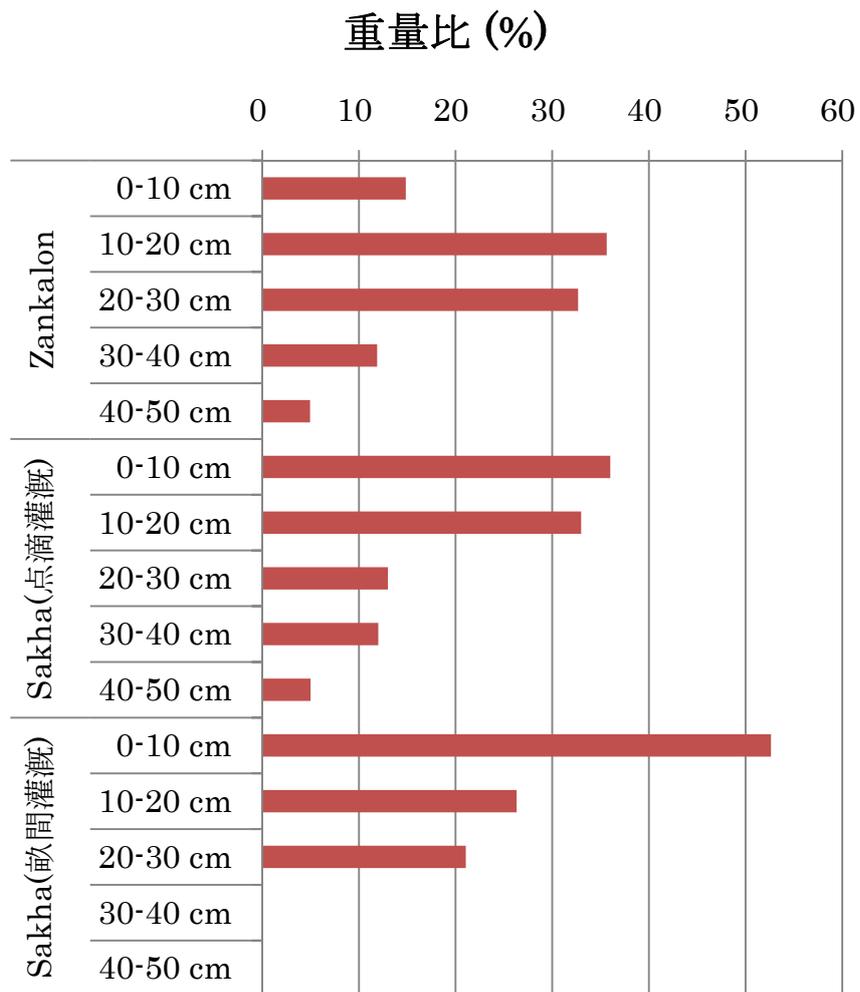


図 20 根の重量比測定結果 (測定日 : 2010/8/23)

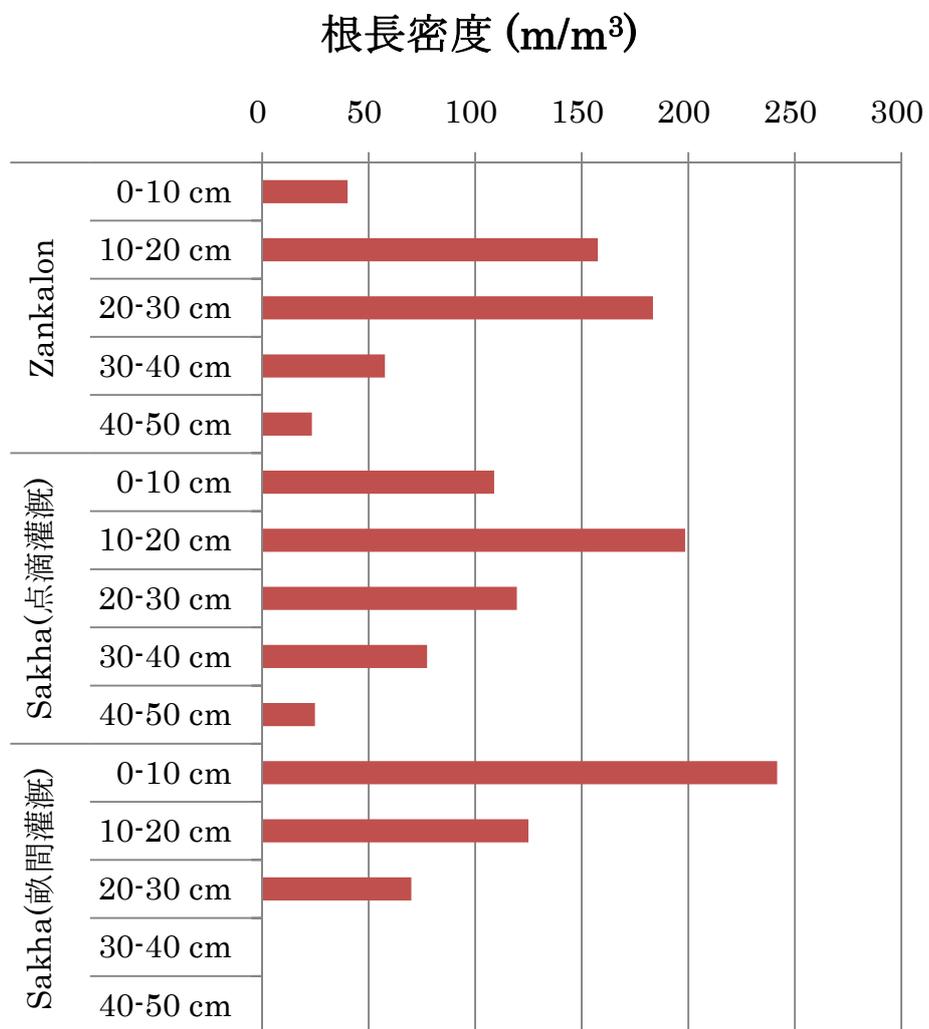


図 21 根の根長密度測定結果 (測定日 : 2010/8/23)



図 22 植被率写真の例



図 23 植被率写真解析後の例

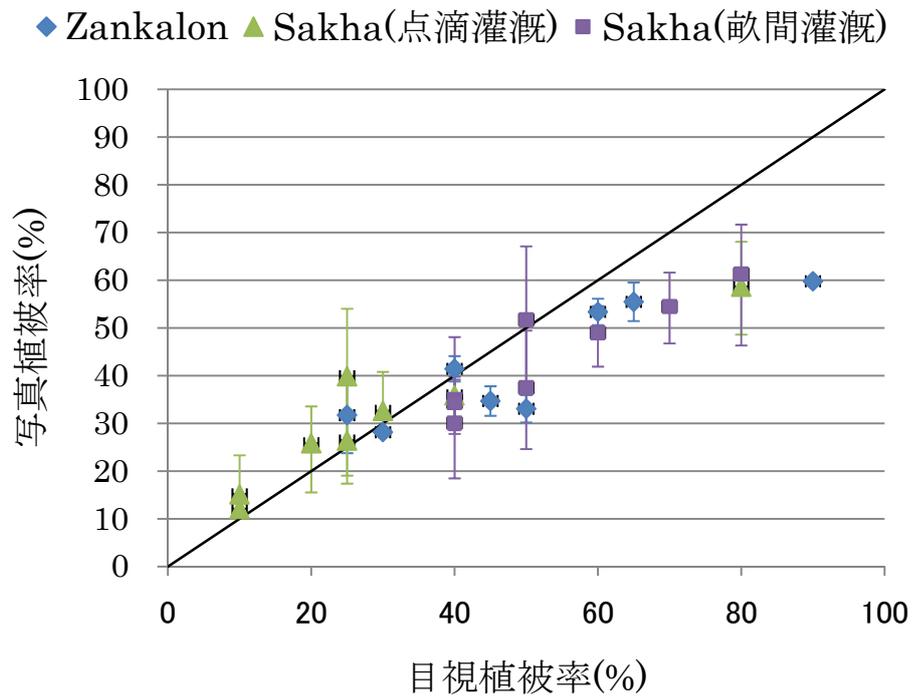


図 24 写真植被率と目視植被率の比較 (点は平均値, 垂直なバーは最大, 最小を表す)

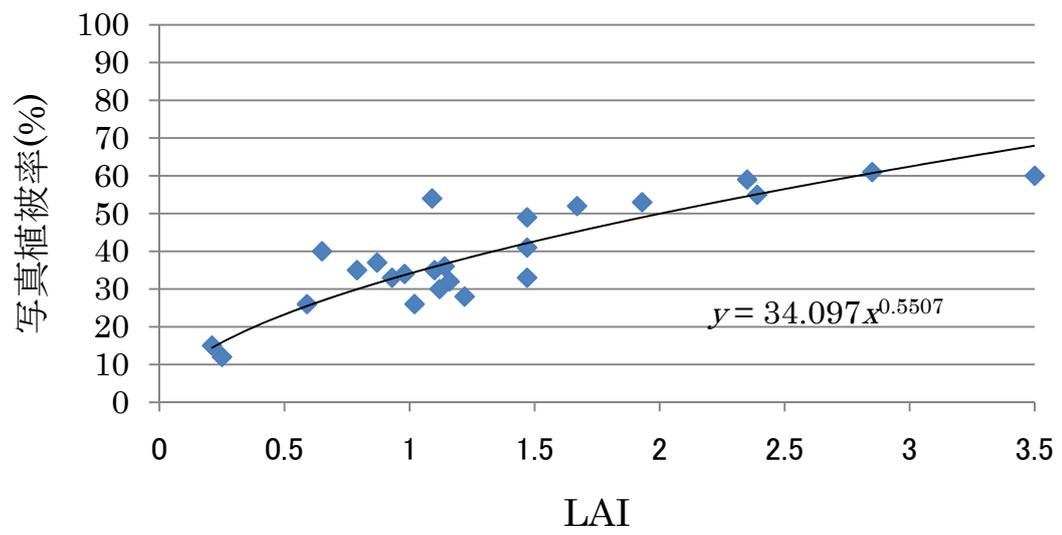


図 25 植被率と LAI の関係

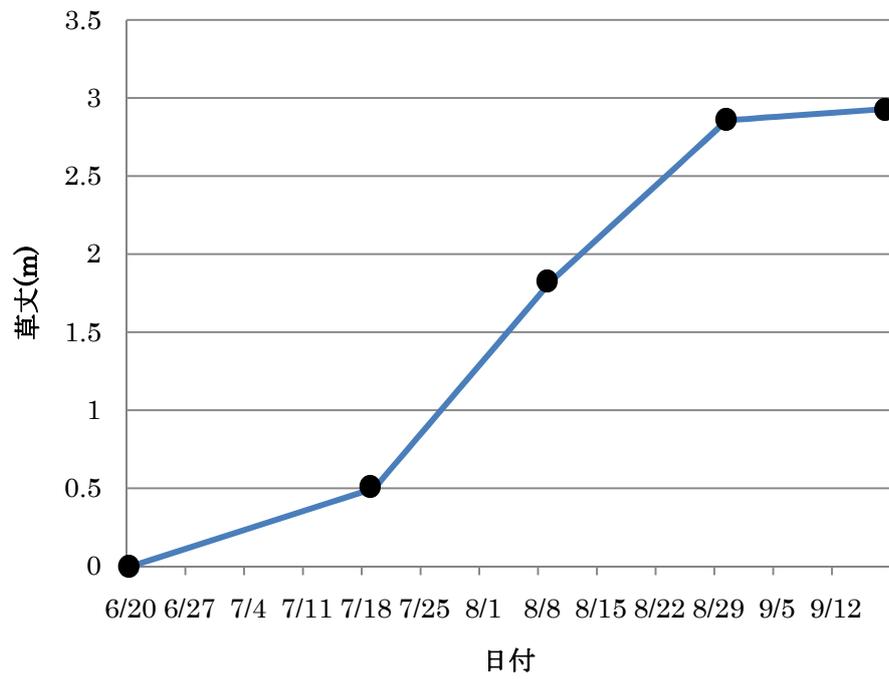


図 26 SakhaN の草丈の日変化 (黒丸は測定値)

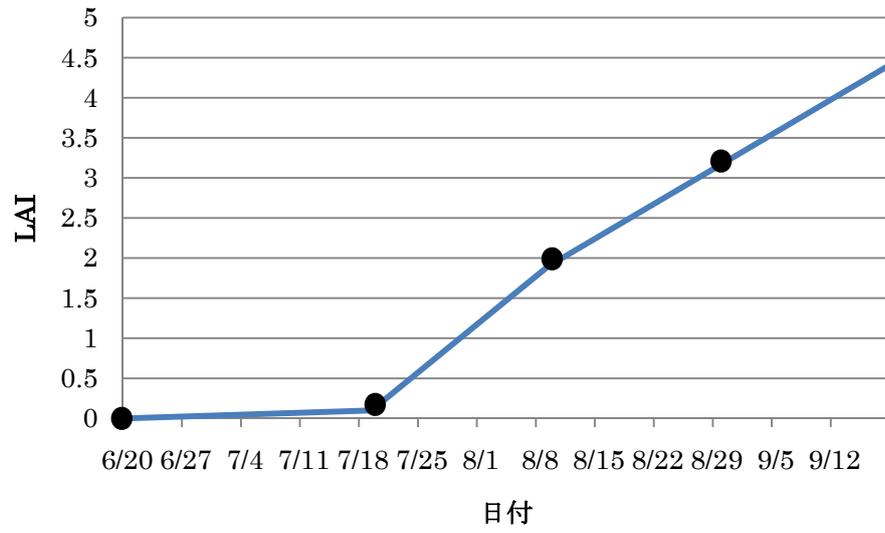


図 27 SakhaN の LAI の日変化 (黒丸は測定値)

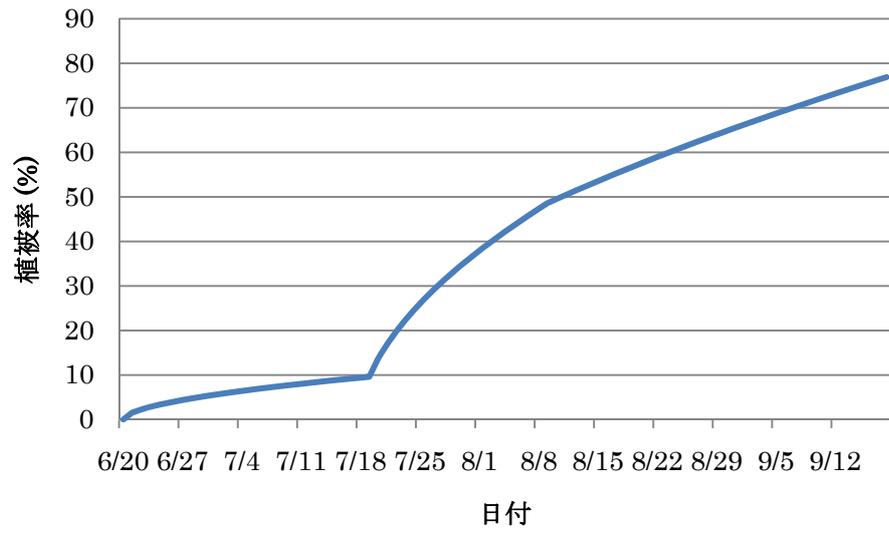


図 28 SakhaN の植被率の日変化

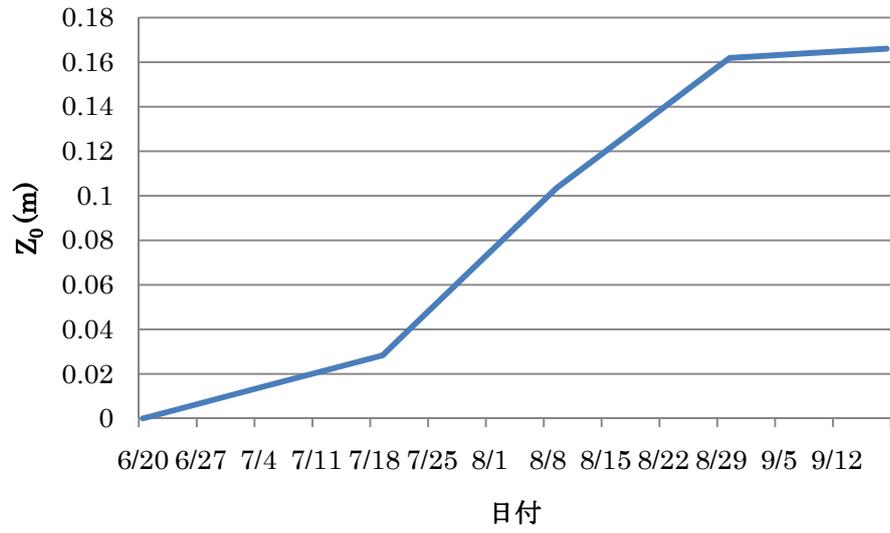


図 29 SakhaN の  $z_0$  の日変化

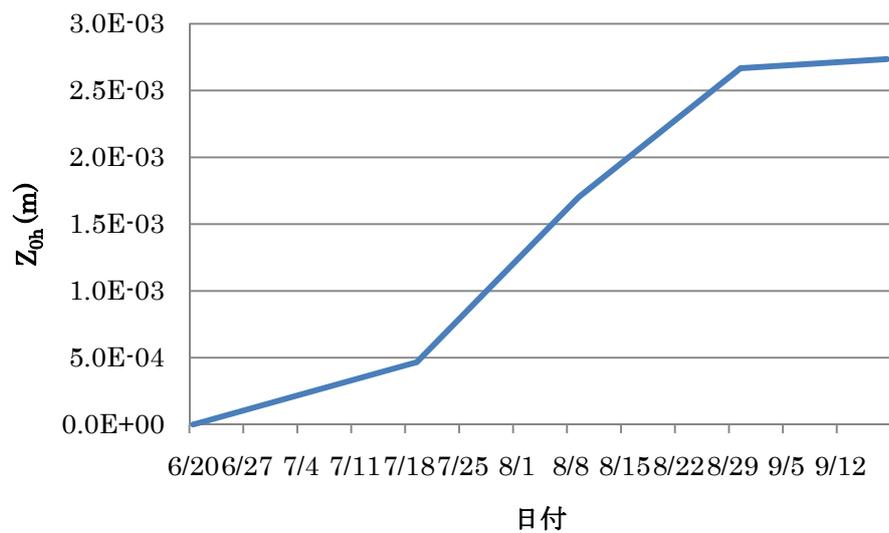


図 30 SakhaN の  $z_{oh}$  の日変化

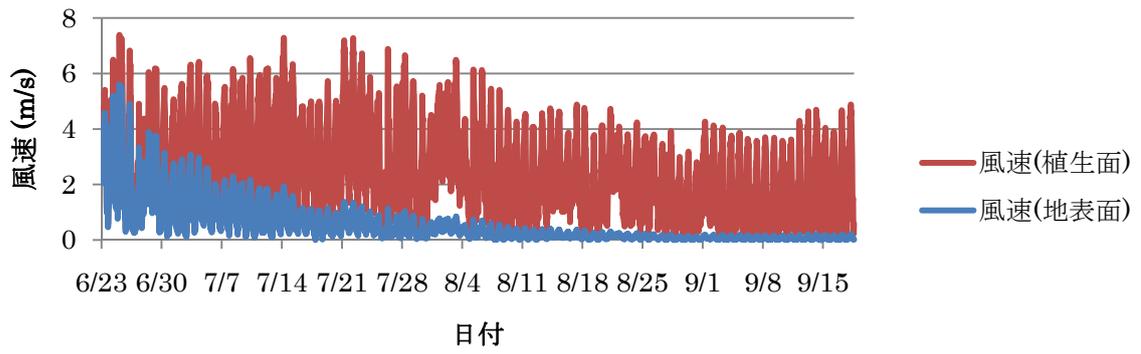


図 31 SakhaN の風速の時間変化

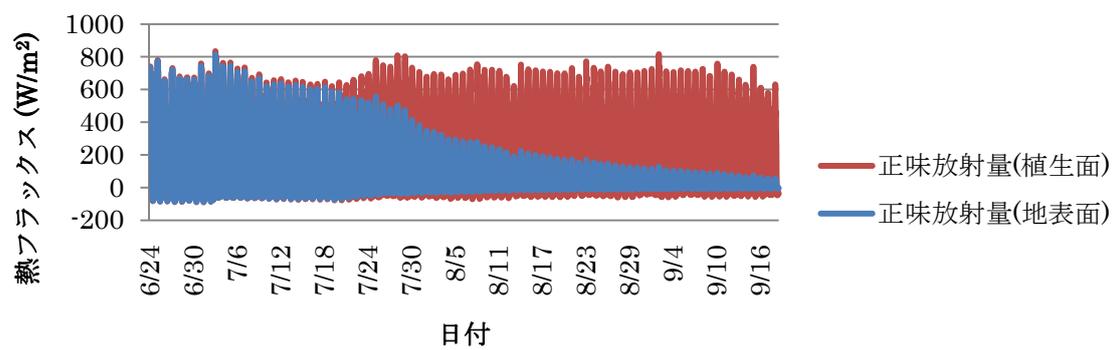


図 32 SakhaN の正味放射量の時間変化

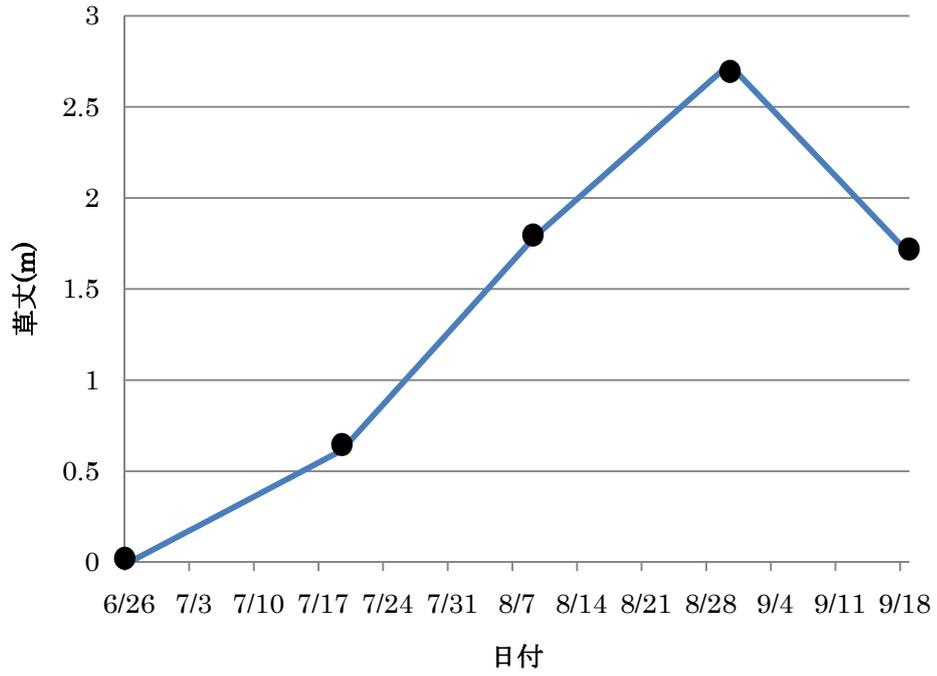


図 33 SakhaS の草丈の日変化 (黒丸は測定値)

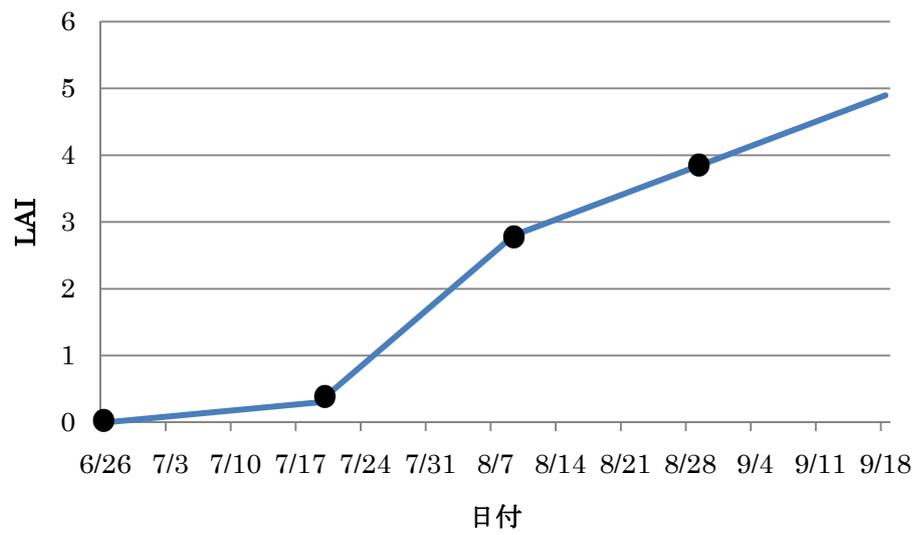


図 34 SakhaS の LAI の日変化 (黒丸は測定値)

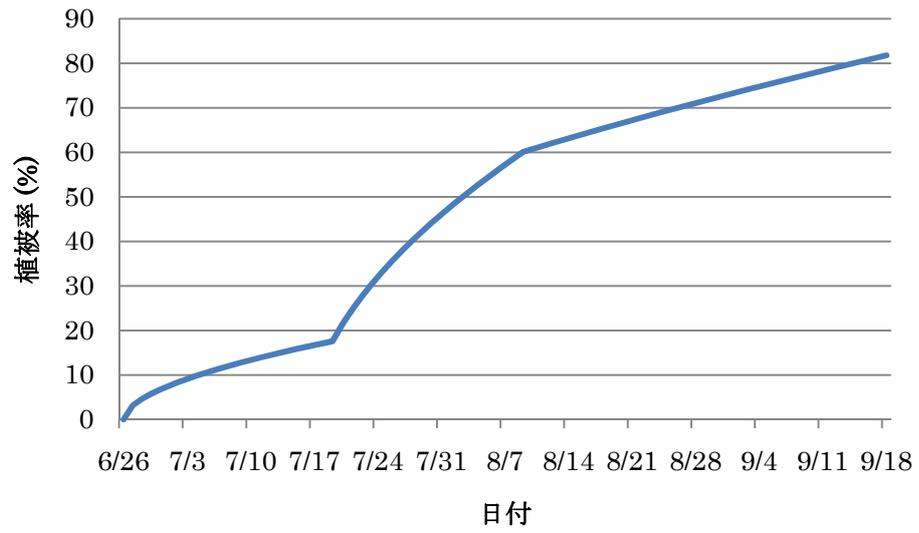


図 35 SakhaS の植被率の日変化

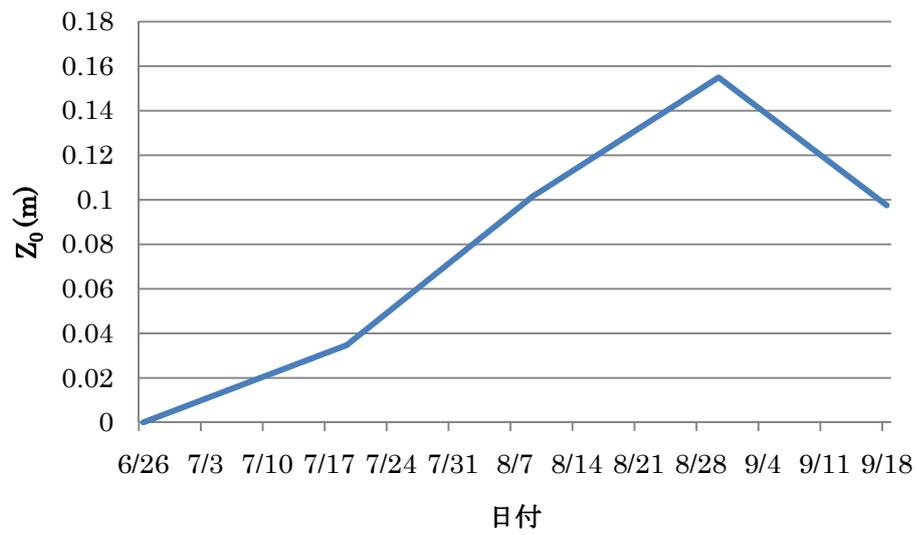


図 36 SakhaS の  $z_0$  の日変化

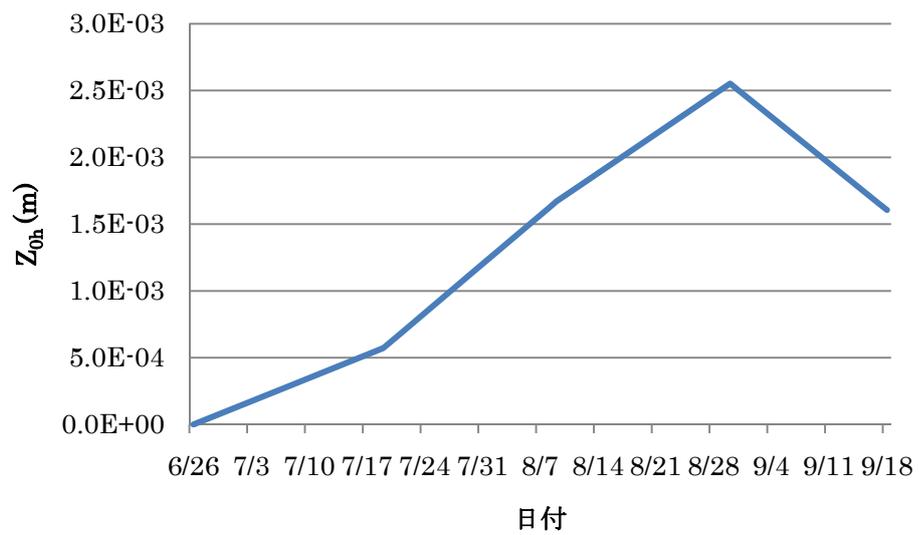


図 37 SakhaS の  $z_{oh}$  の日変化

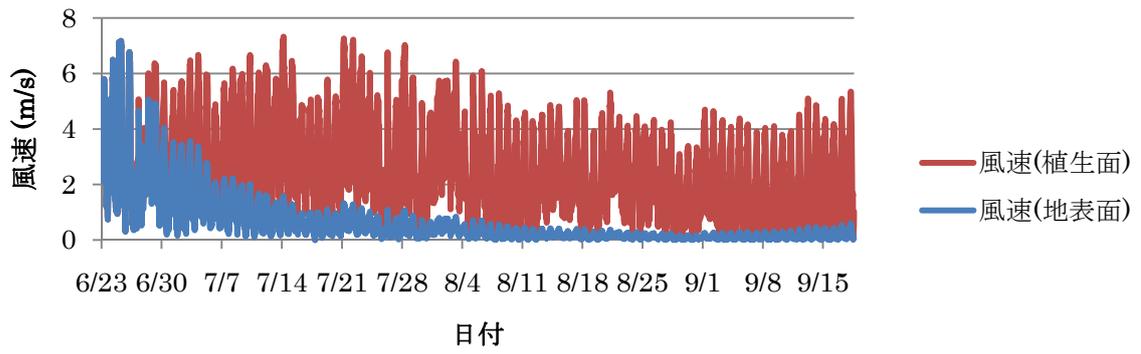


図 38 SakhaS の風速の時間変化

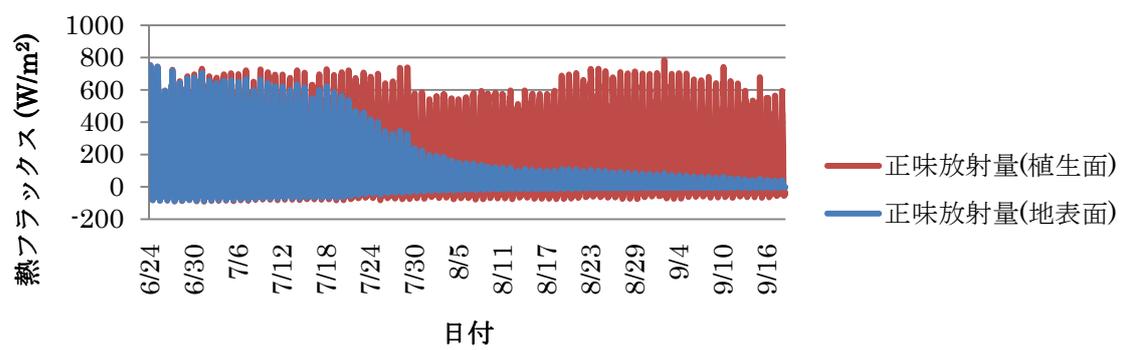


図 39 SakhaS の正味放射量の時間変化

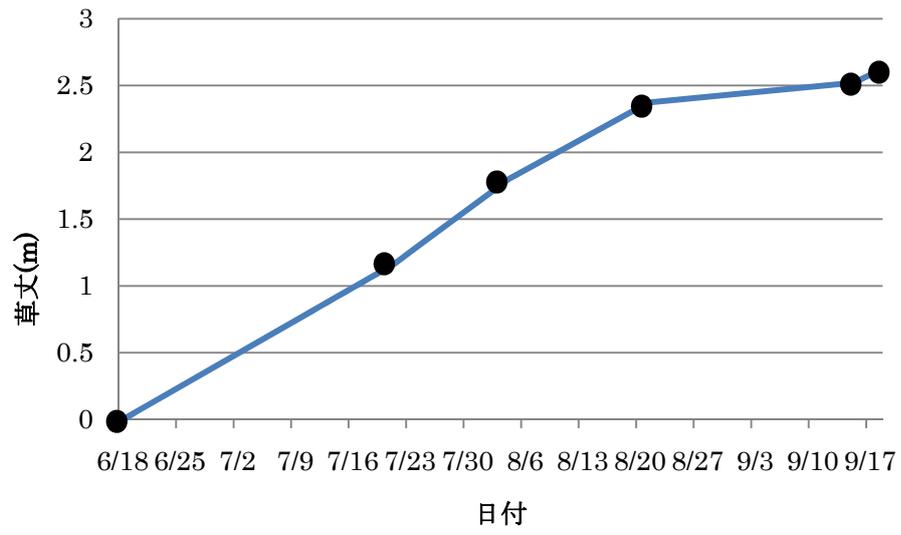


図 40 Zankalon の草丈の日変化（黒丸は測定値）

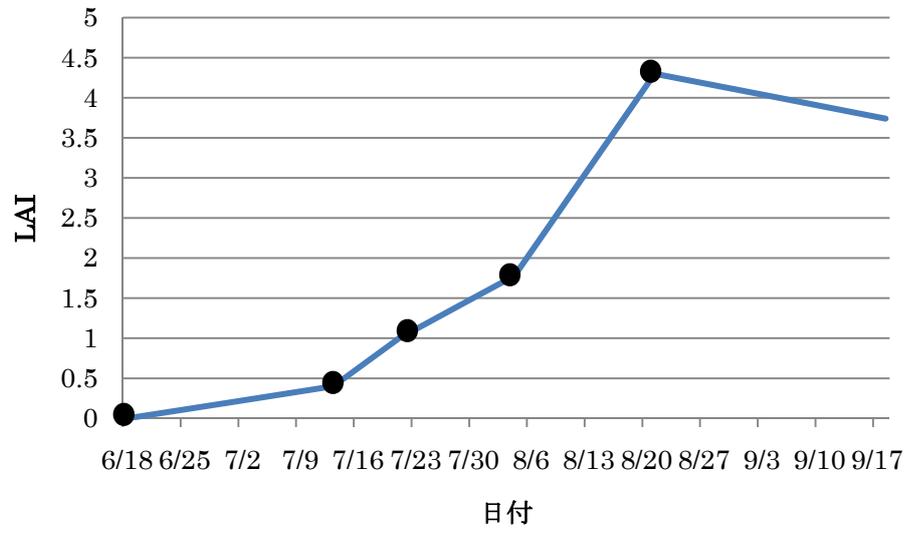


図 41 Zankalon の LAI の日変化 (黒丸は測定値)

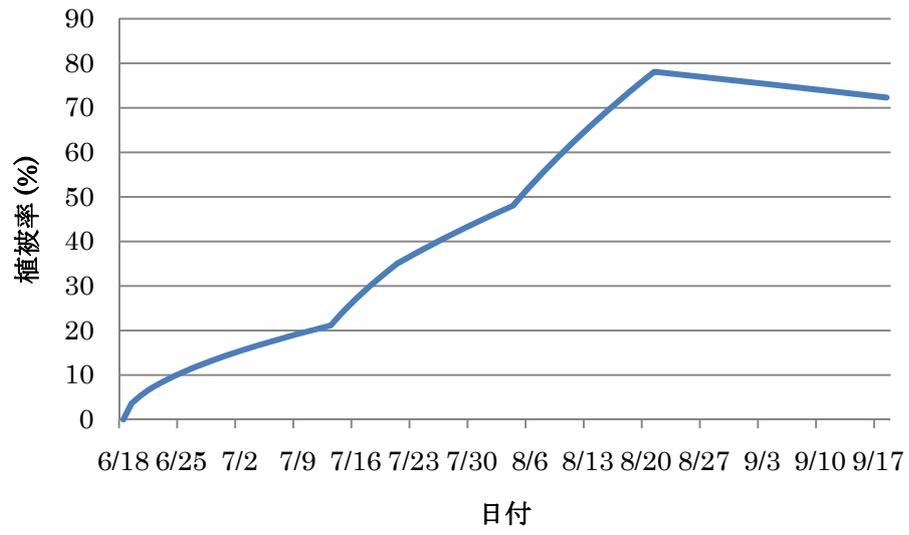


図 42 Zankalon の植被率の日変化

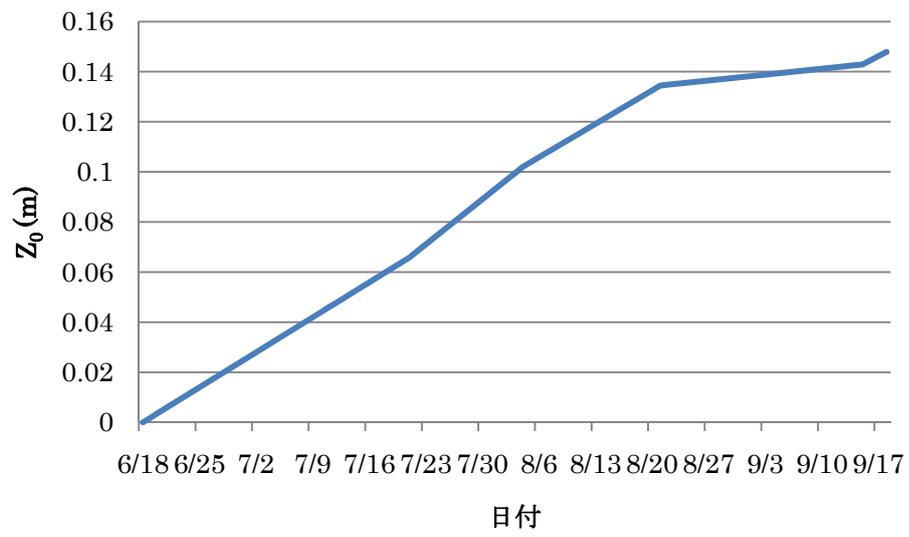


図 43 Zankalon の  $z_0$  の日変化

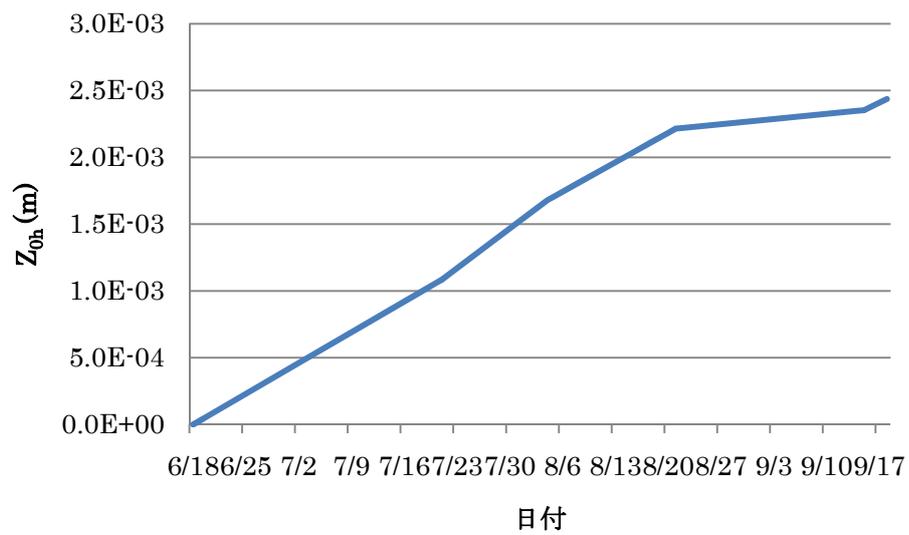


図 44 Zankalon の  $z_{oh}$  の日変化

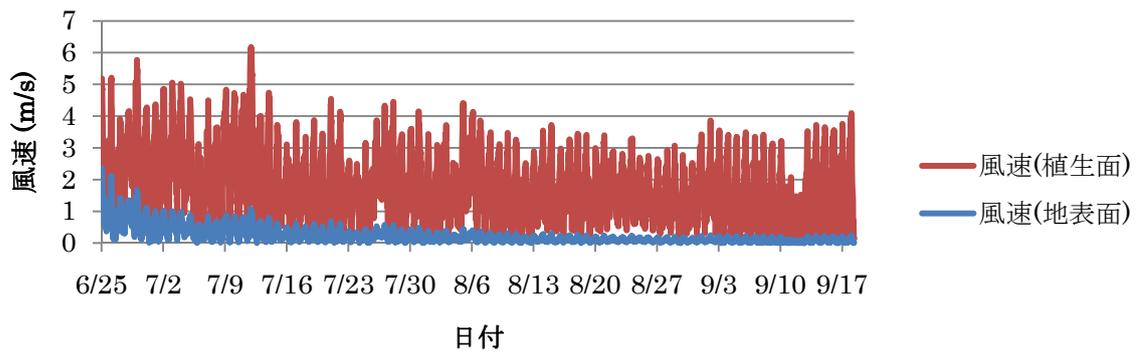


図 45 Zankalon の風速の時間変化

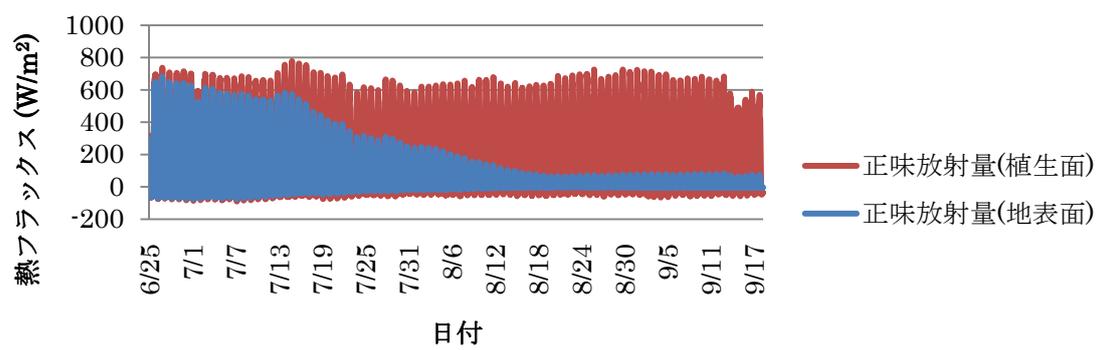


図 46 Zankalon の正味放射量の時間変化

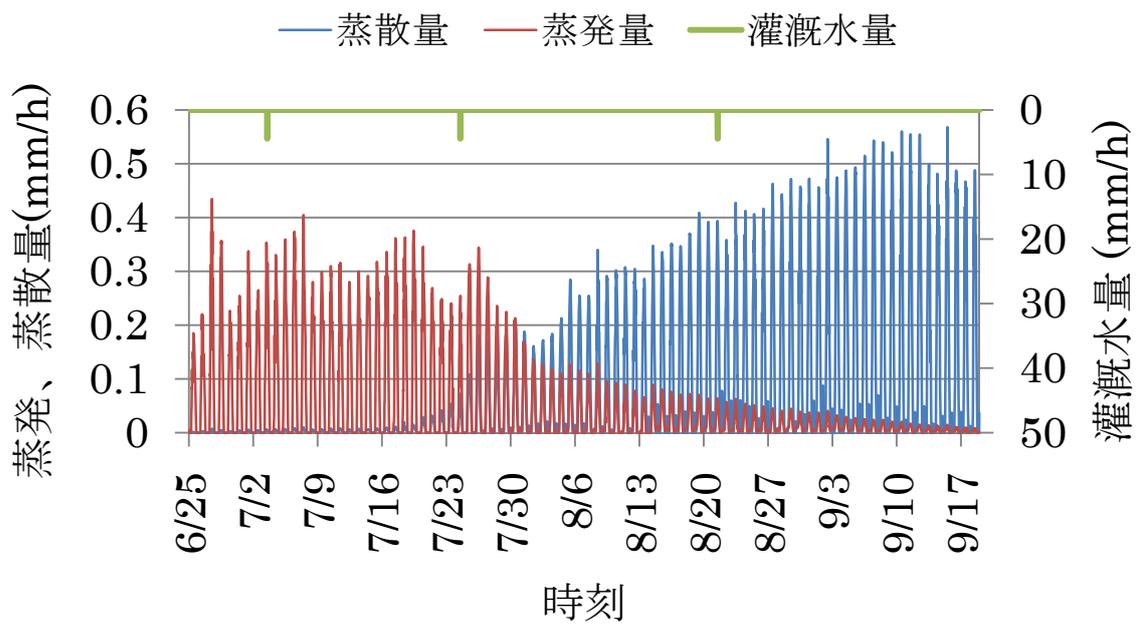


図 47 SakhaN のモデルによる蒸発，蒸散量推定結果

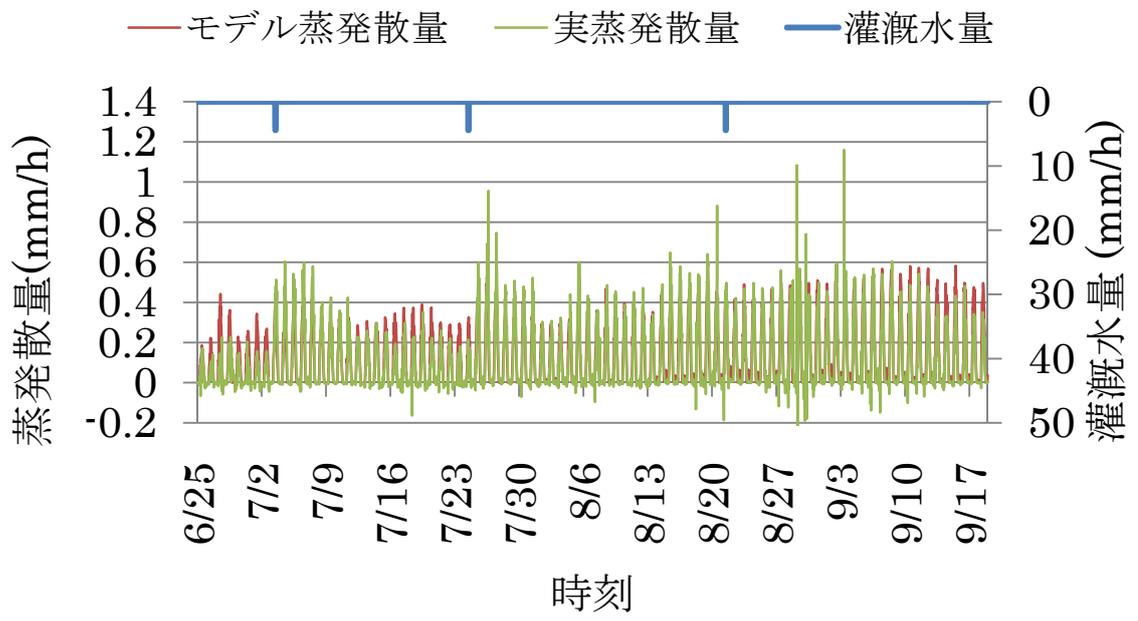


図 48 SakhaN の蒸発散量比較結果 (時系列)

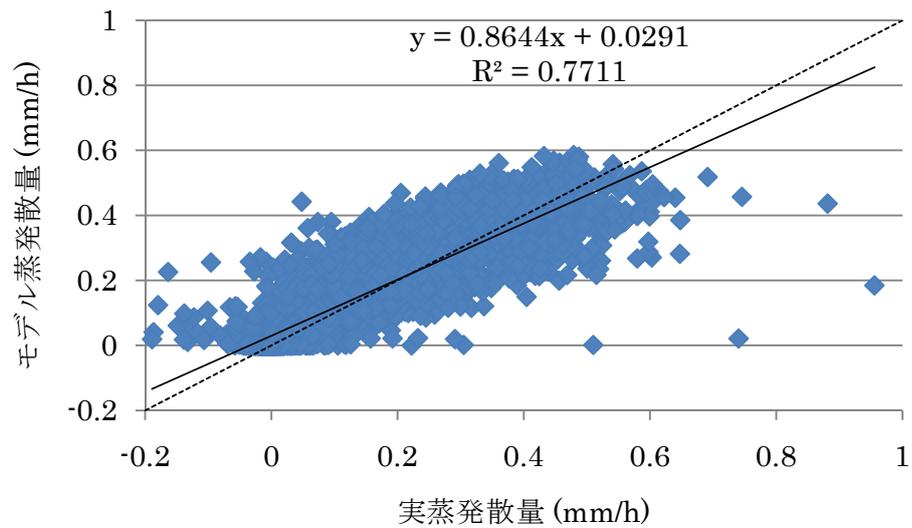


図 49 SakhaN の蒸発散量比較結果 (散布図)

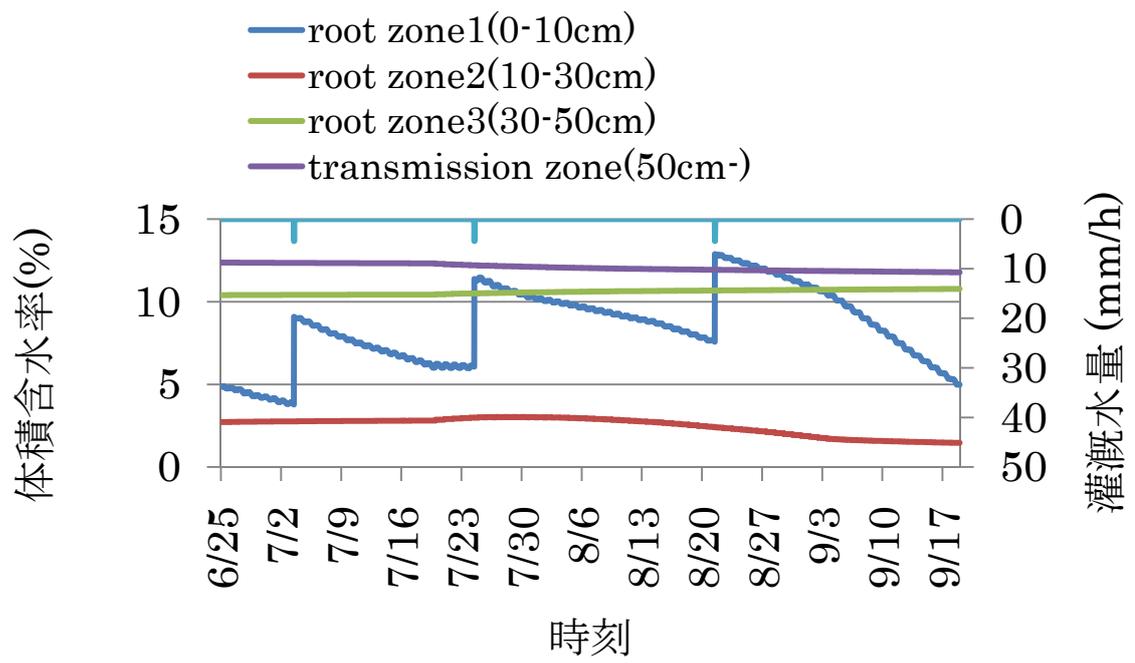


図 50 SakhaN のモデルによる体積含水率推定結果

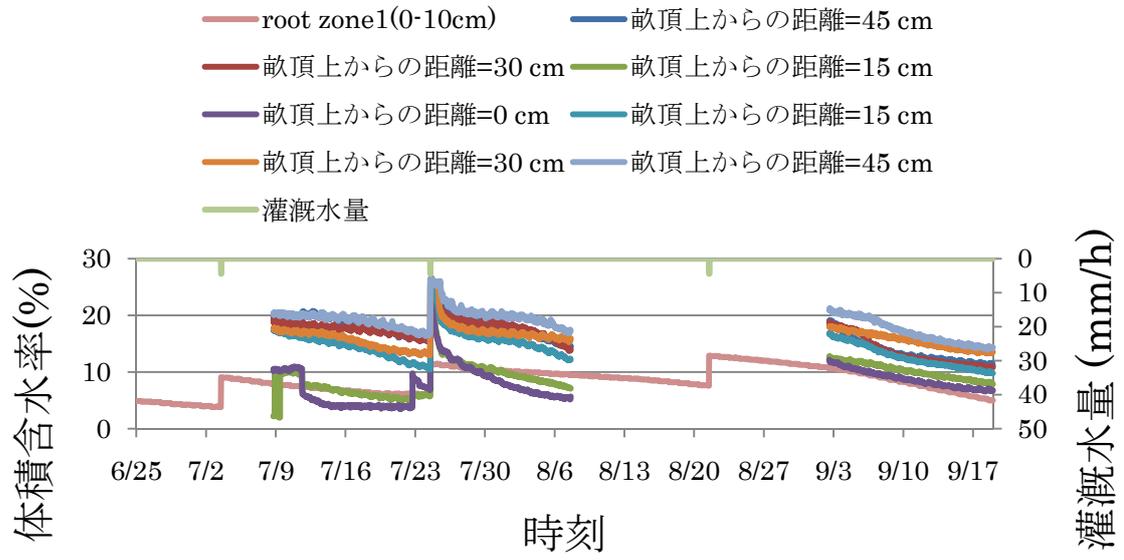


図 51 SakhaN の体積含水率比較結果

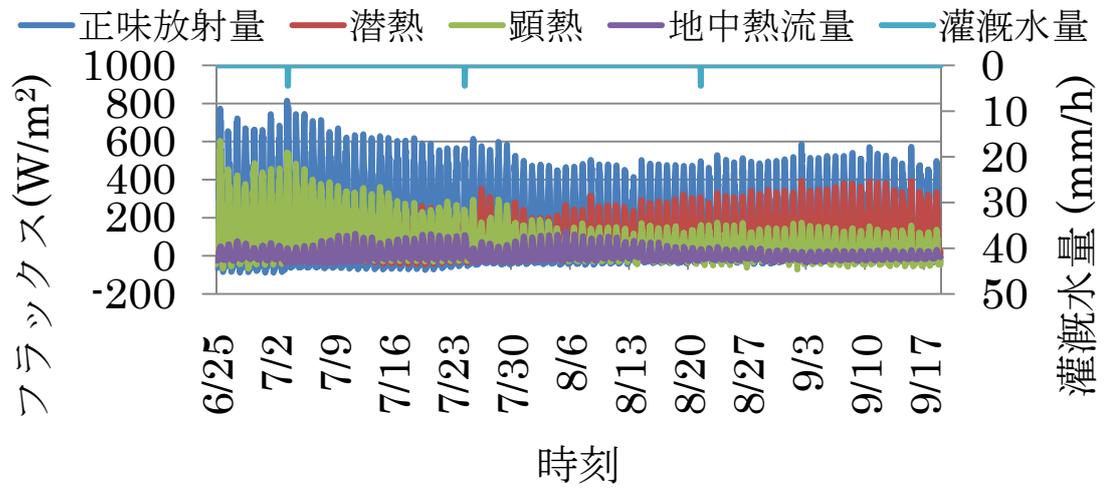


図 52 SakhaN のモデルによる熱フラックス推定結果

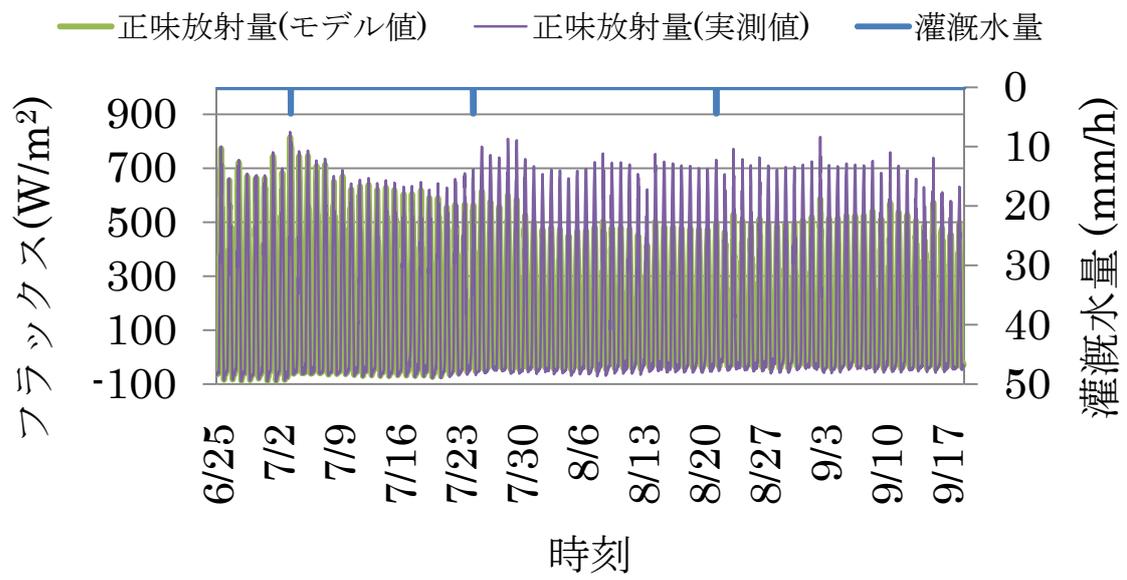


図 53 SakhaN の正味放射量比較結果

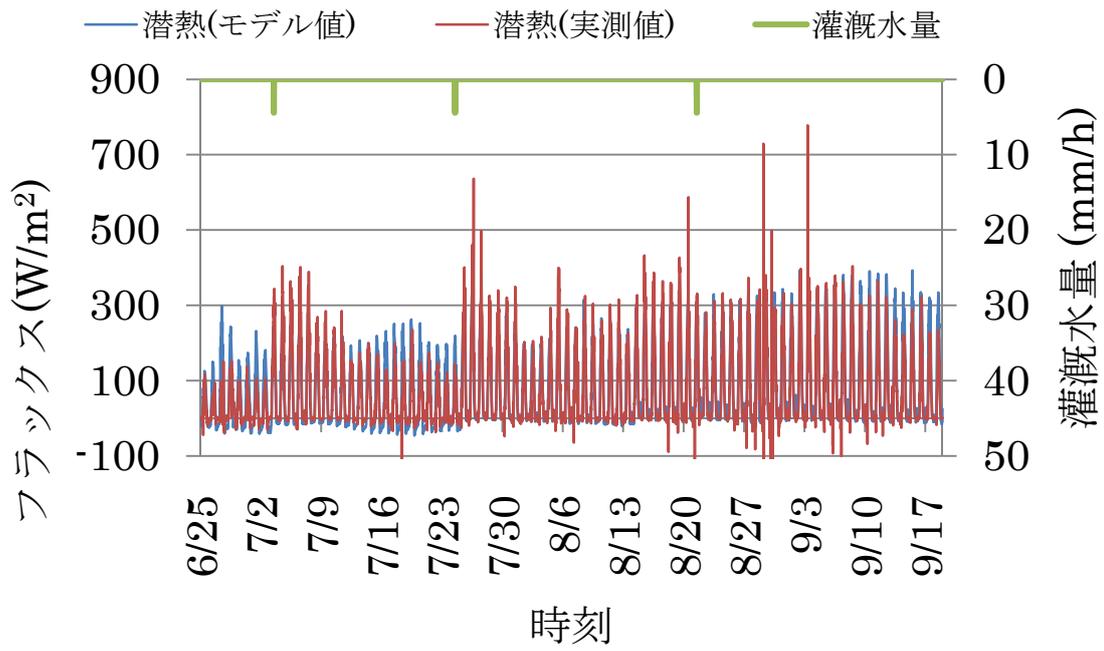


図 54 SakhaN の潜熱比較結果

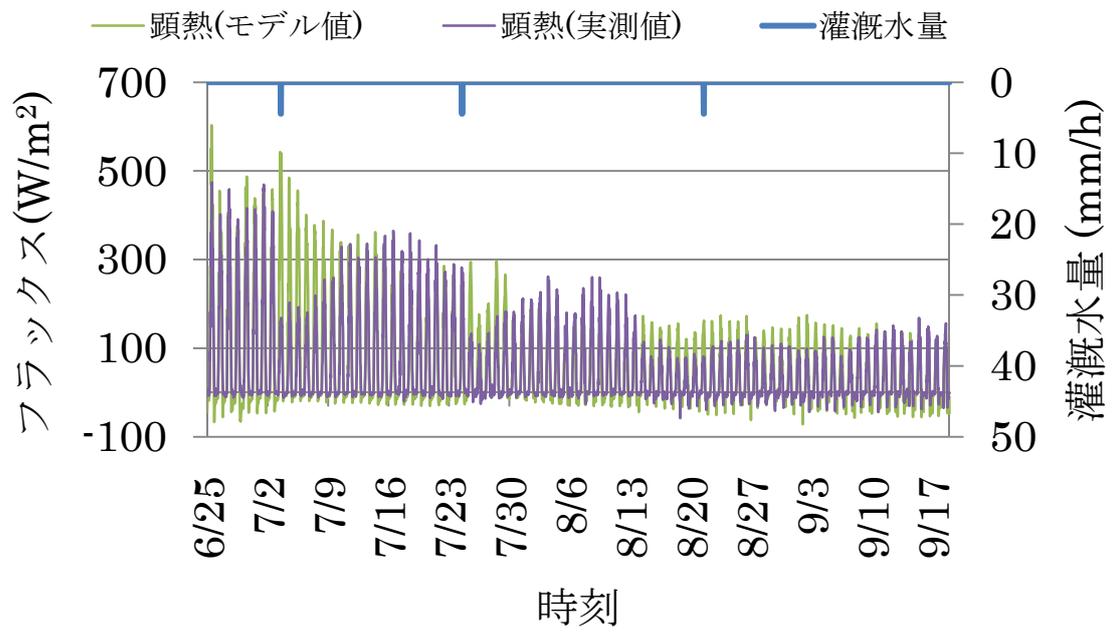


図 55 SakhaN の顕熱比較結果

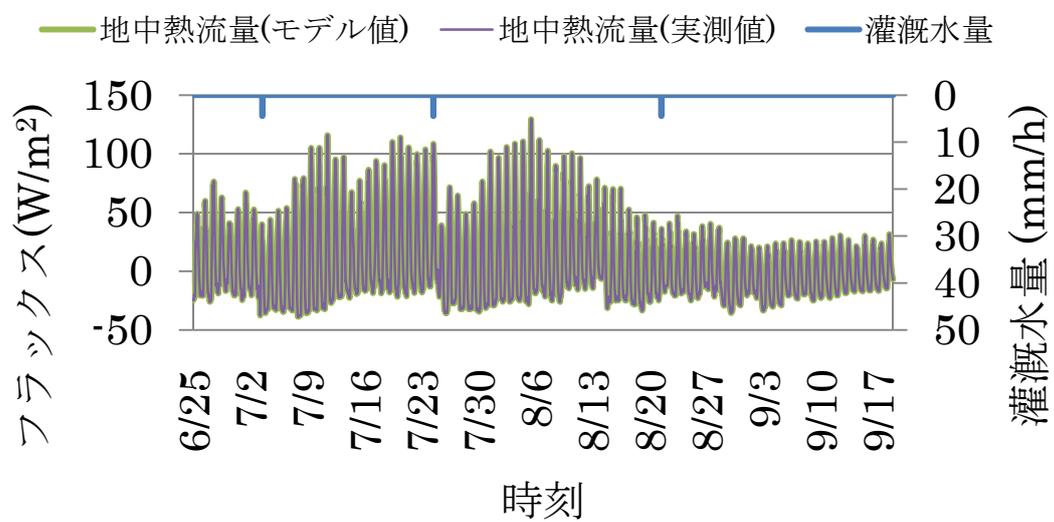


図 56 SakhaN の地中熱流量比較結果

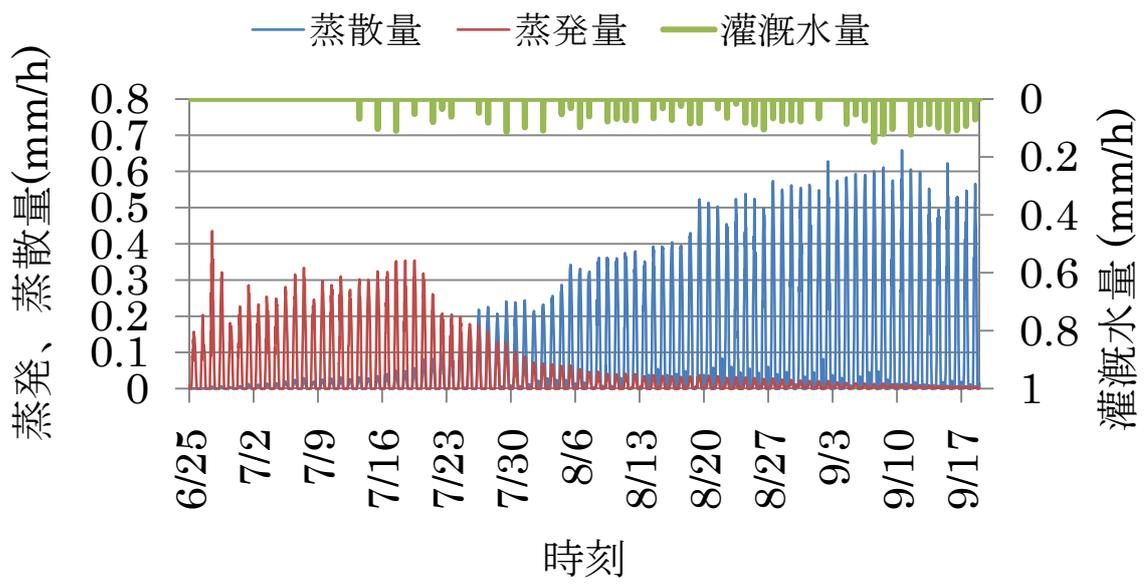


図 57 SakhaS のモデルによる蒸発，蒸散量推定結果

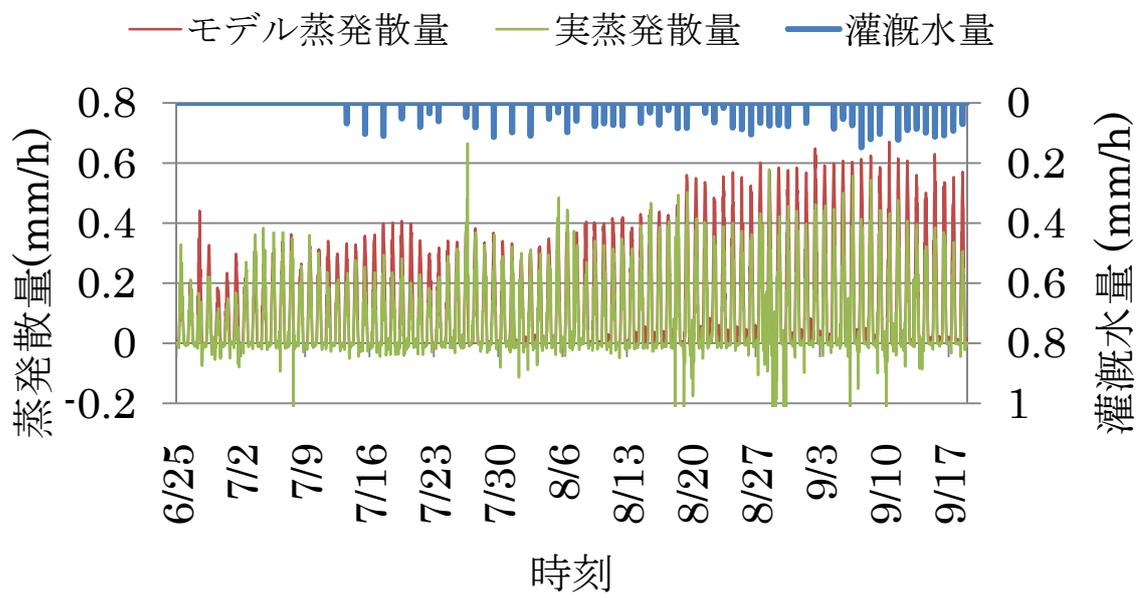


図 58 SakhaS の蒸発散量比較結果 (時系列)

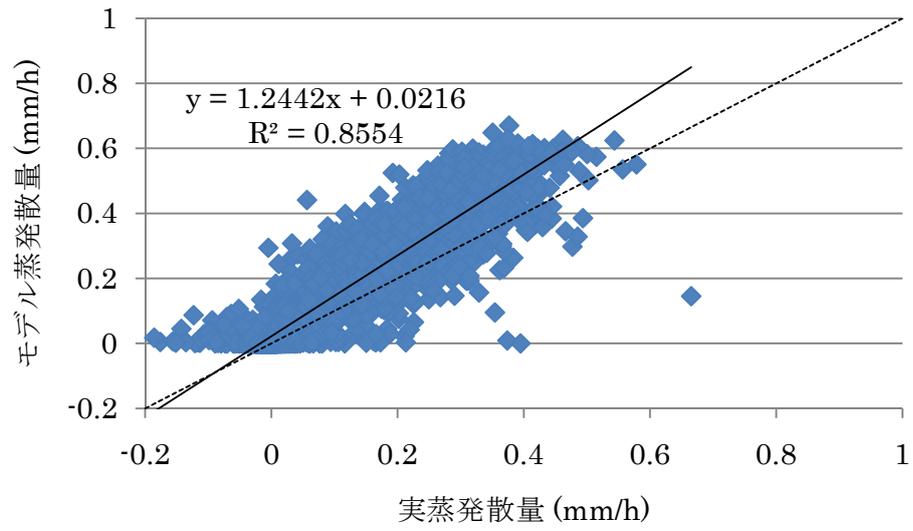


図 59 SakhaS の蒸発散量比較結果 (散布図)

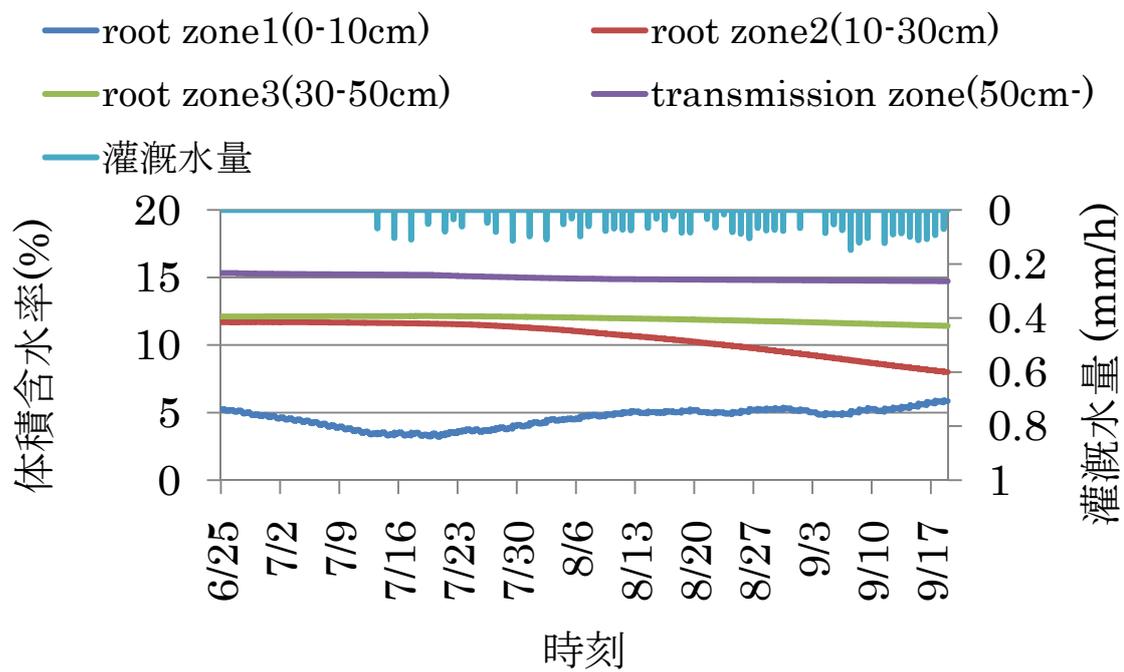


図 60 SakhaS のモデルによる体積含水率推定結果

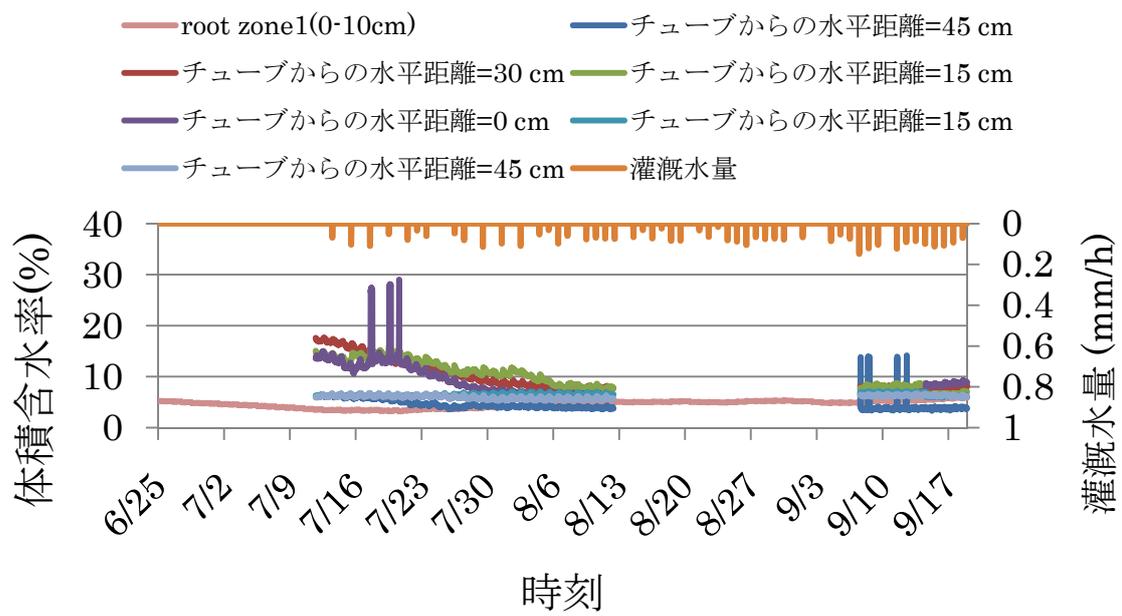


図 61 SakhaS の体積含水率比較結果

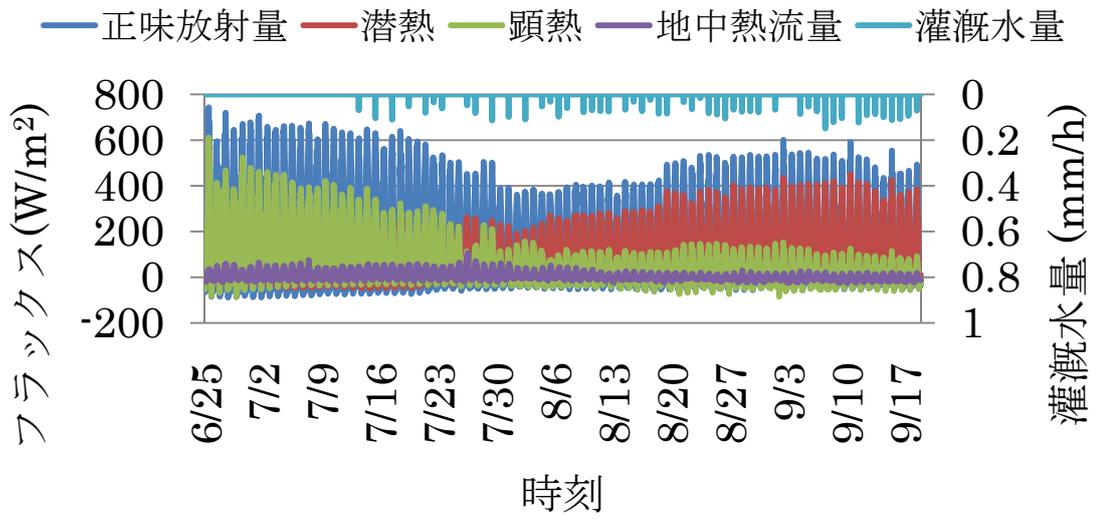


図 62 SakhaS のモデルによる熱フラックス推定結果

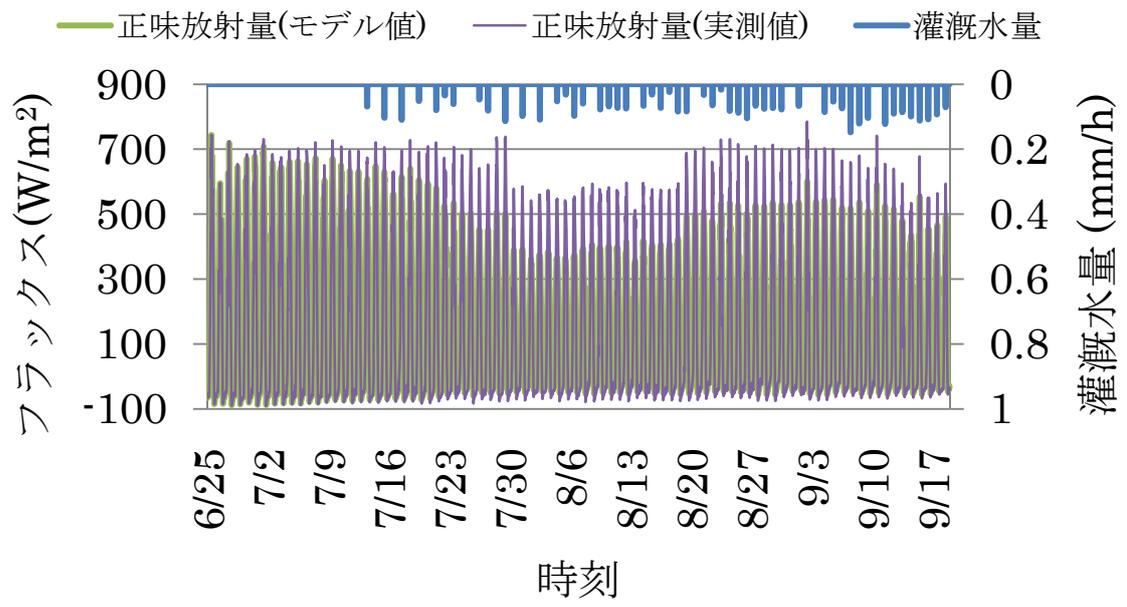


図 63 SakhaS の正味放射量比較結果

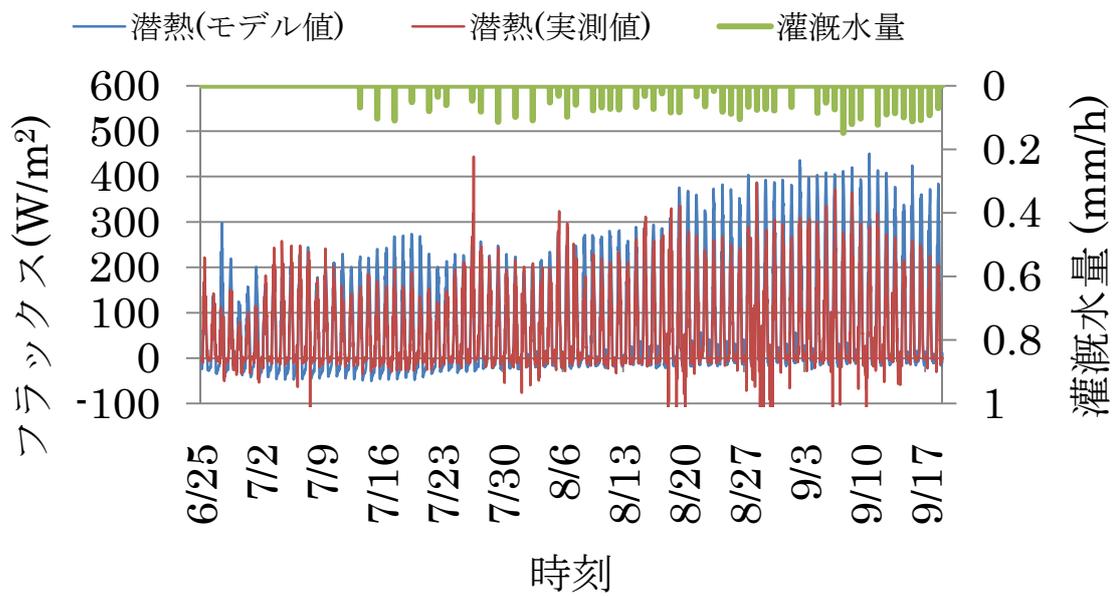


図 64 SakhaS の潜熱比較結果

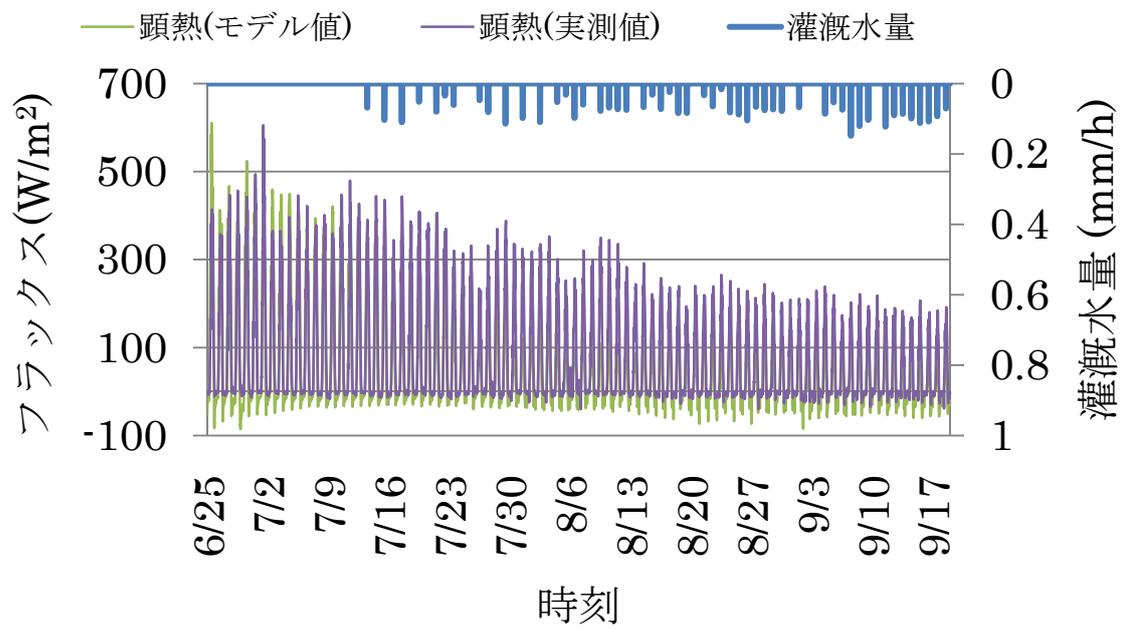


図 65 SakhaS の顕熱比較結果

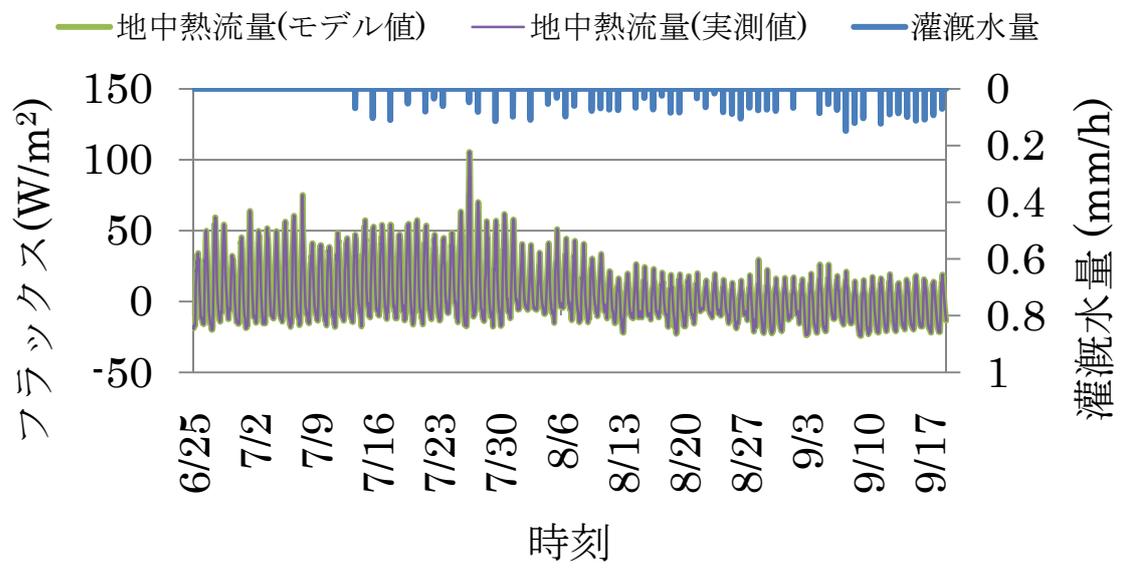


図 66 SakhaS の地中熱流量比較結果

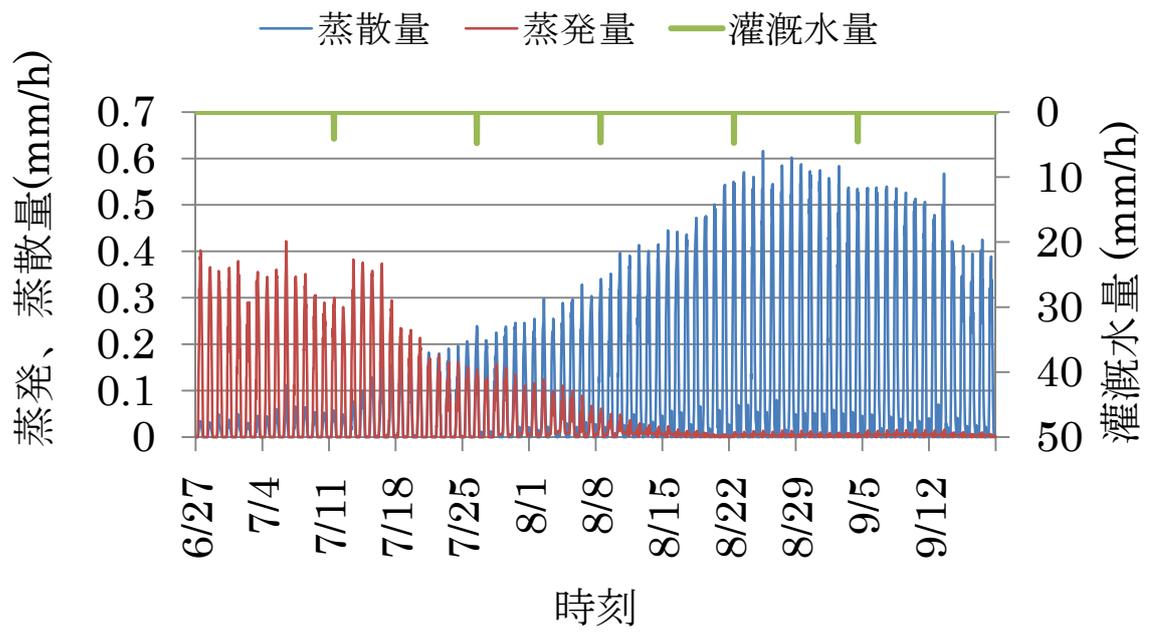


図 67 Zankalon のモデルによる蒸発，蒸散量推定結果

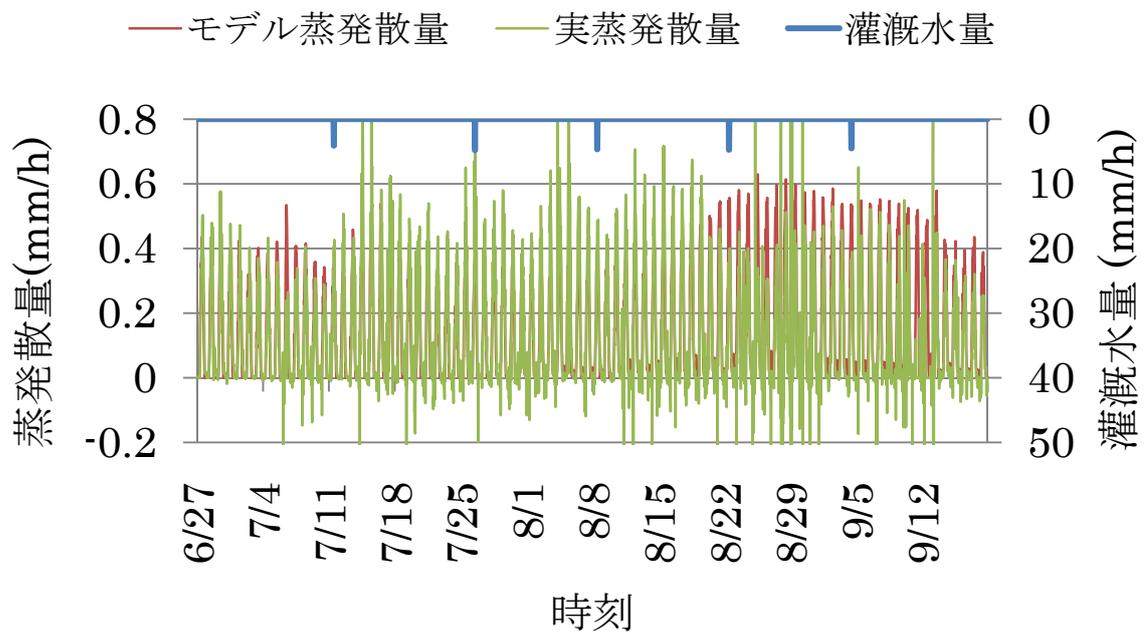


図 68 Zankalon の蒸発散量比較結果 (時系列)

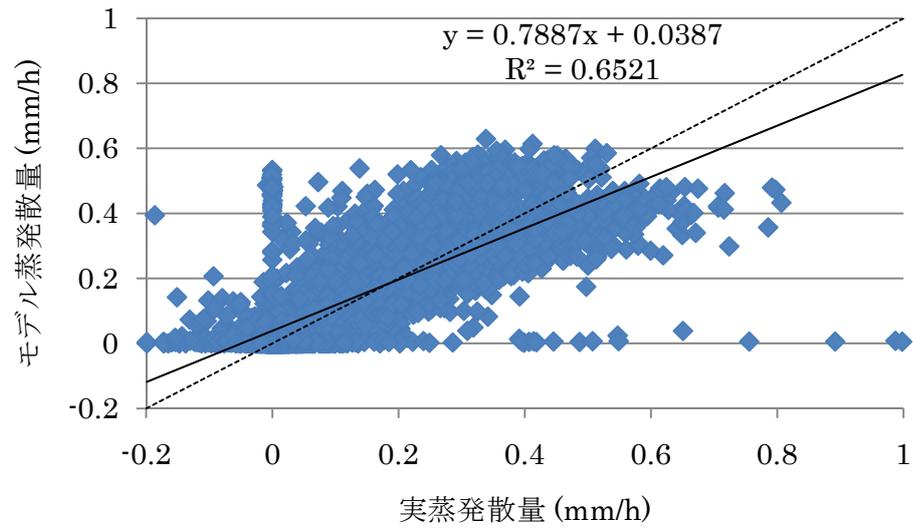


図 69 Zankalon の蒸発散量比較結果 (散布図)

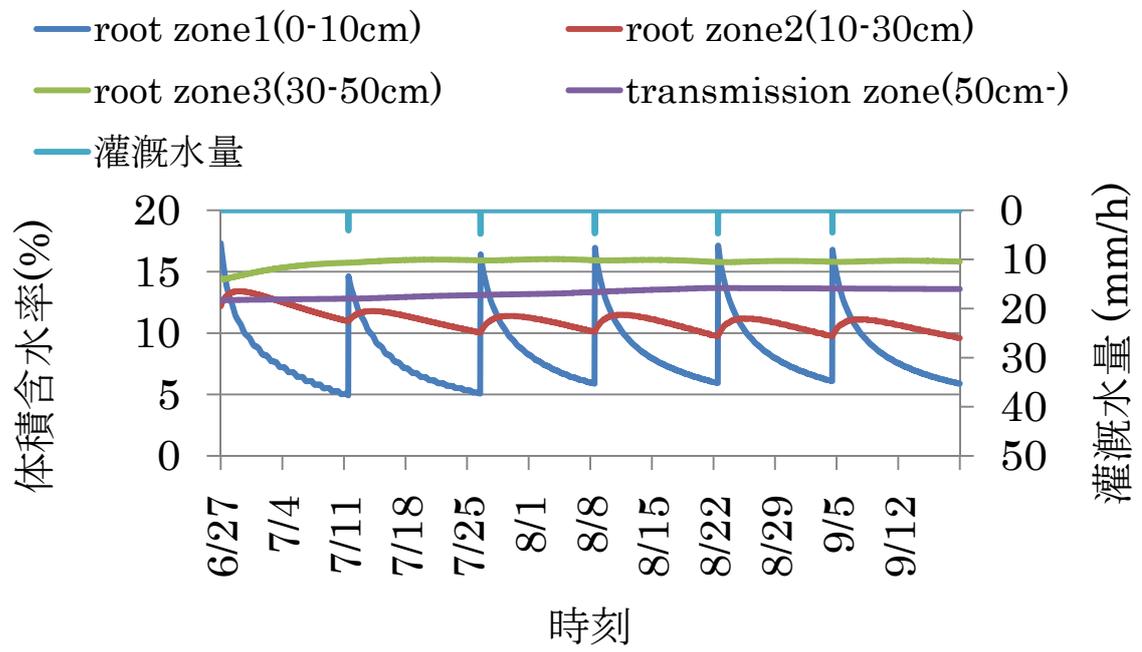


図 70 Zankalon のモデルによる体積含水率推定結果

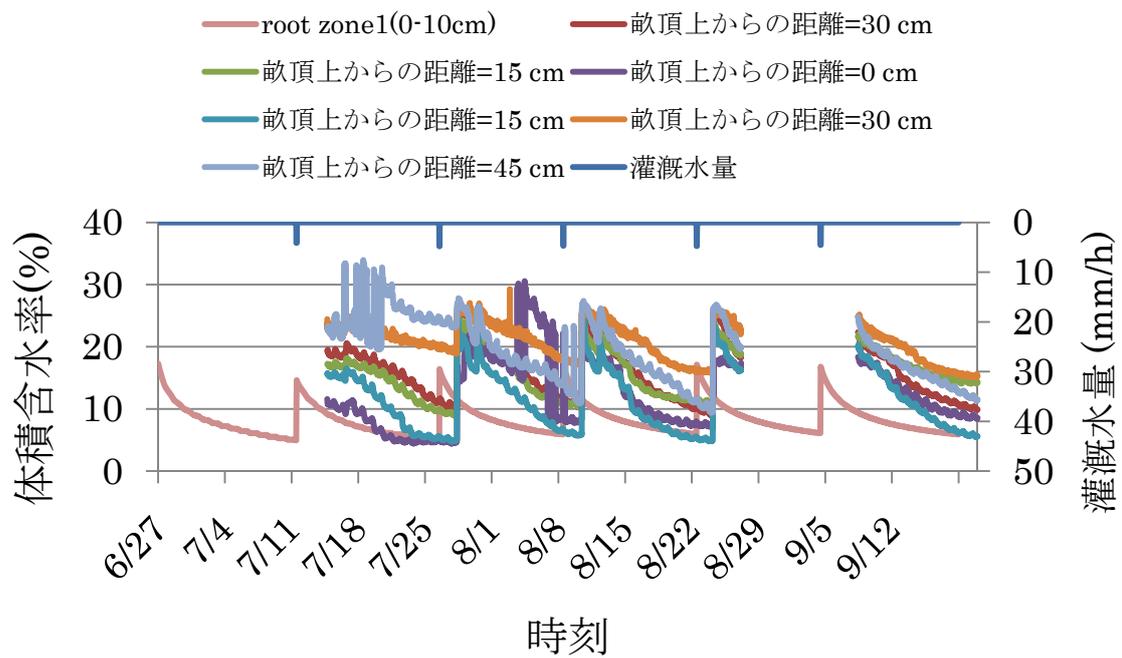


図 71 Zankalon の体積含水率比較結果

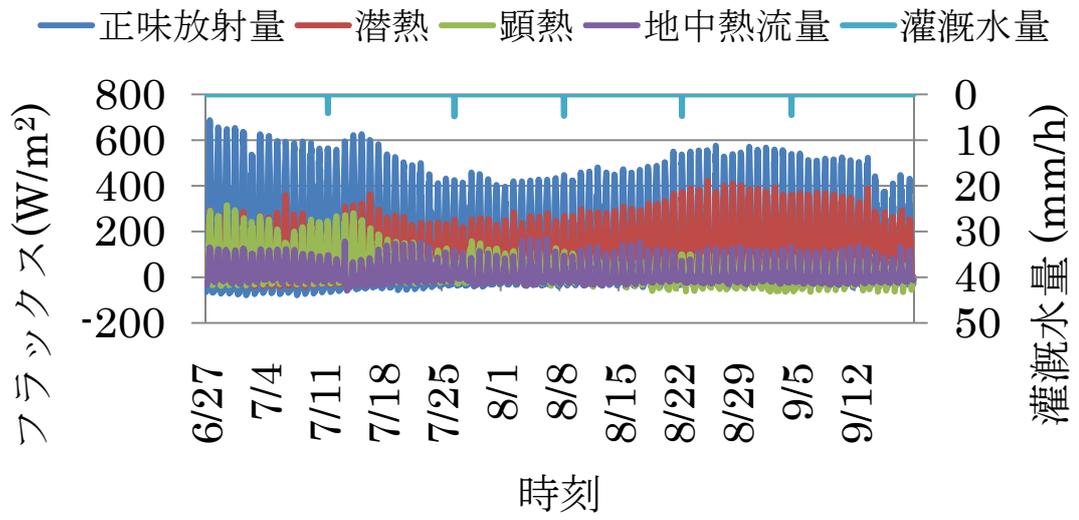


図 72 Zankalon のモデルによる熱フラックス推定結果

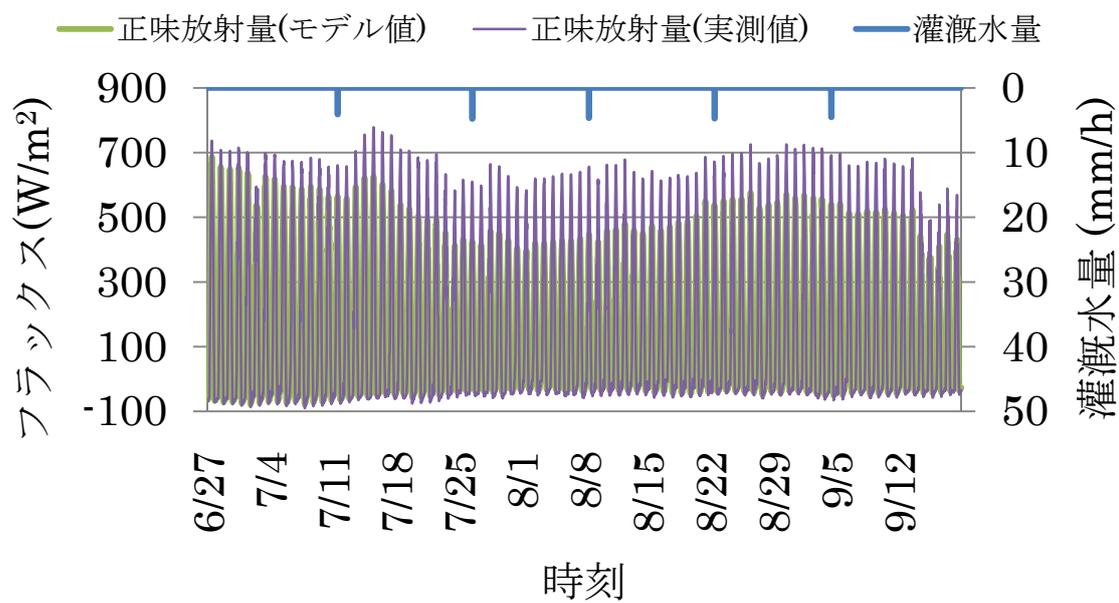


図 73 Zankalon の正味放射量比較結果

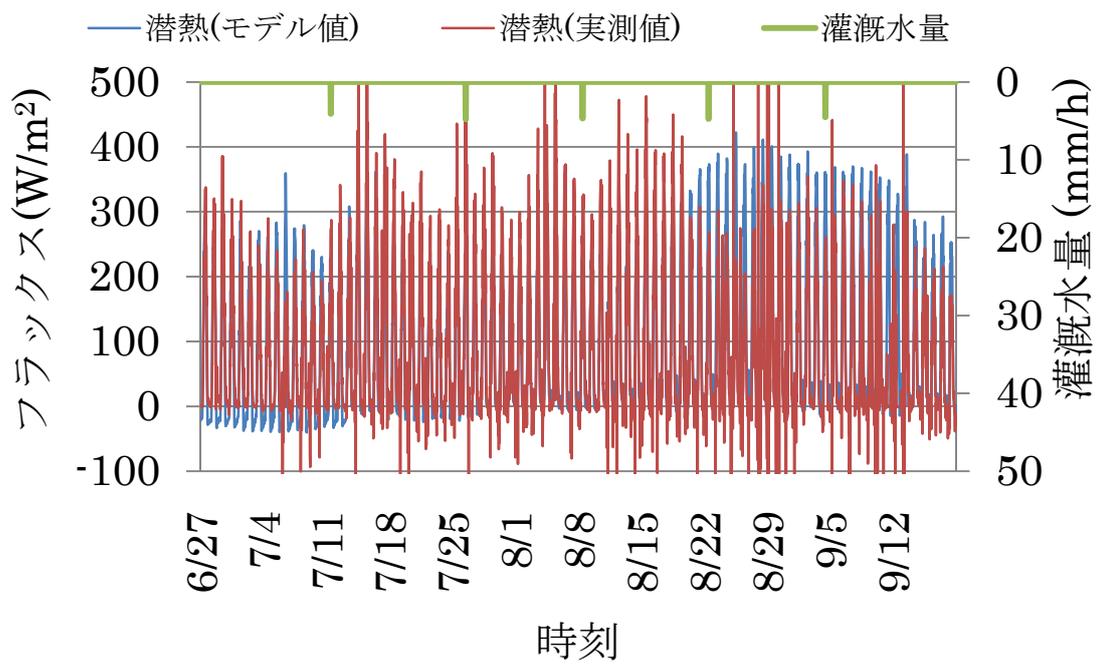


図 74 Zankalon の潜熱比較結果

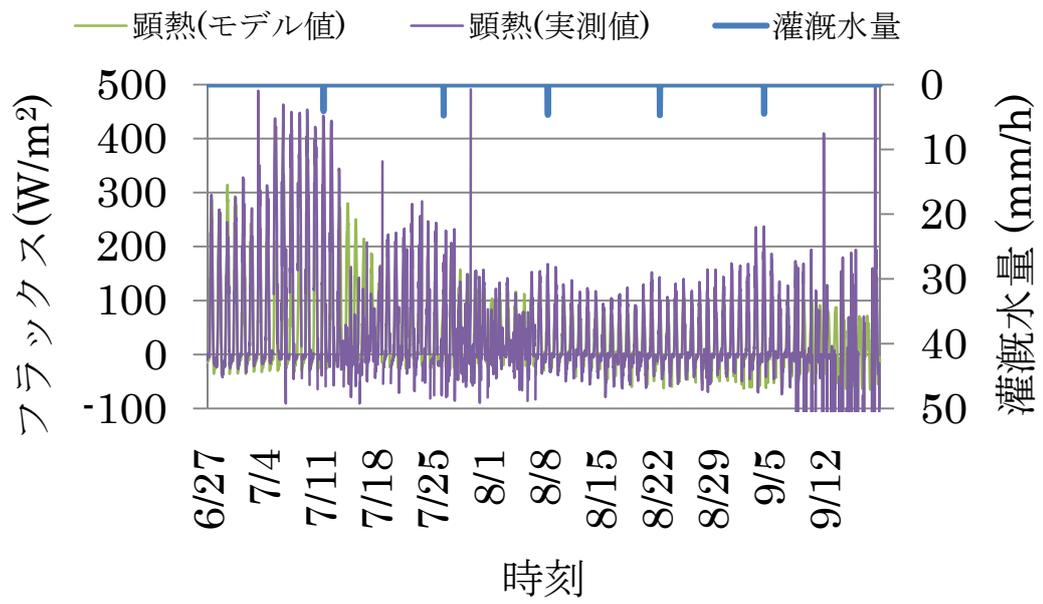


図 75 Zankalon の顕熱比較結果

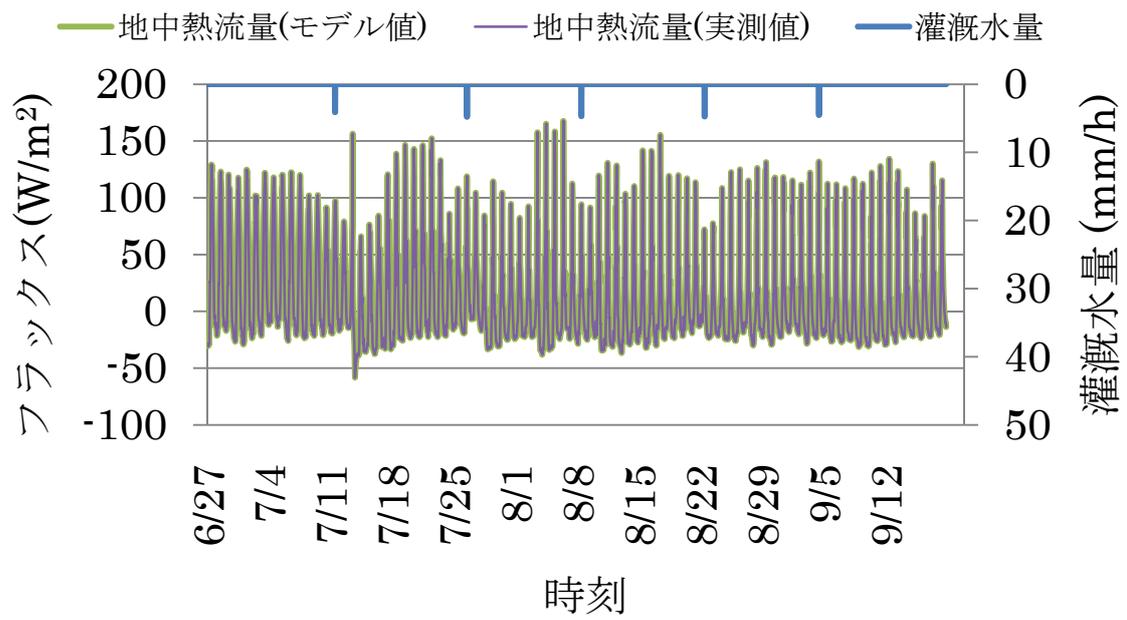


図 76 Zankalon の地中熱流量比較結果

#### 4. 結論

エジプトは、国土の約 96%が砂漠であり (畑, 2008), 降雨は多い地域でも 200 mm/年程度と非常に乾燥した地域である. そのため, この国の水資源はナイル川に頼っているという現状がある. そして, エジプトでは近年砂漠を農地に変えるプロジェクトが多数進行しており, 多くの人々が住んでいるナイルデルタ地域での使用可能水量が減ることから, ナイルデルタ地域における農業の持続可能性が問われている. また, ナイル川流域の水収支の現状と将来予測の関係より, 1997 年と比較して 2017 年には農業における蒸発散量を 32 m<sup>3</sup>/年減らさなければならない予測となっている. こういったことからエジプトの圃場における蒸発散量の評価の検討を行った.

この研究では, TOPLATS モデルを用いて蒸発量, 蒸散量の推定結果を算出した. その際, 草丈, LAI, 植被率, 運動量粗度, 顕熱粗度を日変化で算出した値を用いることで, 作物の成長に合わせた蒸発量, 蒸散量の算出をできるようにした. また, 2010 年の 8 月に Sakha と Zankalon の圃場に赴き, 根茎調査, 地下水位を測定し, パラメータとして用いることで, より現地に適応したモデルを構築できるようにした. 根茎調査の結果, 根長は Sakha でも Zankalon でも上層 30 cm にほとんど存在することがわかった. 蒸発量, 蒸散量の合計量は, SakhaN で蒸発量が 205 mm, 蒸散量が 301 mm, SakhaS で蒸発量が 152 mm, 蒸散量が 364 mm, Zankalon で蒸発量が 162 mm, 蒸散量が 400 mm となり, 蒸発量は SakhaN が, 蒸散量は Zankalon が最も多いことがわかった. 蒸発量, 蒸散量の合計量の比は, SakhaN で蒸発量が 40%, 蒸散量が 60%, SakhaS で蒸発量が 29%, 蒸散量が 71%, Zankalon で蒸発量が 29%, 蒸散量が 71%となり, SakhaN に比べ, SakhaS, Zankalon の方が蒸発の割合は低くなった. これらのことから, 慣行灌漑を行っている SakhaN に比べ SakhaS, Zankalon の方が蒸発が抑制されたことが分かったが, マルチ材 (藁) の効果を考慮しなければ正確な把握はできない. また,  $x$  軸に実蒸発散量を,  $y$  軸にモデルからの蒸発散推定量を取ったプロットにおける近似直線の傾きを求めたところ, その傾きは SakhaN で 0.86, SakhaS で 1.24, Zankalon で 0.79 となり, モデルからの蒸発散量算出は SakhaN と Zankalon では過小評価傾向が, SakhaS では過大評価傾向があることが分かった.

課題として挙げられるのは, Zankalon ではマルチ材 (藁) を敷いているが, その効果を考慮できていない. また, モデルの構造として, 一つの面で蒸発量および蒸散量を計算できるように構造を形成しなければならないが, 形成できていない. 具体的には, 元々の TOPLATS モデルでは上部の植生の下に下部植生を仮定したプログラムが存在するが, そのプログラムを書き換え, 下部植生ではなくそこから地面蒸発量を計算できるようにするという方法が考えられる. また, 蒸発量を算出するにあたって, TOPLATS モデルでは土壌抵抗が重要なパラメータの一つであるため, 土壌抵抗の算出のキャリブレーションを行い, 現地により適応した蒸発量の算出を可能にできるようにすることが課題である. また, モデルでのフラックス算出において, 各パラメータの値が現地に適応しているか判断をしっかりと行い, 現地観測値に合わせたキャリブレーションの

必要があると考えられる。

## 謝辞

本研究を進めるにあたって、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、研究方法に関する様々なご指導、また現地観測においても多くのご助言を頂き、2年間本当にお世話になりました。この場をお借りして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水文分野の先生方には、特にゼミでの発表の際に貴重なご助言を頂きました。

同期である筑波大学大学院生命環境科学研究科環境科学専攻の松野晃大氏、横山勇太氏には日常的に様々な研究に関するご助言を頂き、また辛い時も互いに励まし合い、そのおかげで有意義な大学院生活を送ることができました。

水文分野の学生の方々には研究に関するご指摘だけでなく、普段の生活におきましても様々なご援助を頂きました。

エジプトでの現地調査におきましては、JST-JICA 地球規模課題対応科学技術協力事業の関係者の皆様に多くのご支援を頂きました。JST-JICA 地球規模課題対応科学技術協力事業の関係者の方々のご支援があったからこそ、私の研究が進行できたこと、深く感謝申し上げます。

最後に、私を大学院にまで進学させてくださいました両親に深く感謝いたします。

## 引用文献

- 新井 正・西沢利英 (1974) : 「水文学講座 10 水温論」, 共立出版, pp297
- Brutsaert W and Sticker H. (1979) : An advective-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration. *Water Resour. Res.*, **15**, 443-450
- Camillo P. J. and Gurney R. J. (1986) : A resistance parameter for bare soil evaporation models. *Soil Science*, **141**, 95-105
- Chen F. and Dudhla J. (2001) : Coupling an advanced land surface-hydrology model with the pann state-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Review*, **129**, 569-585
- Choudhury B. J., Idso S. B.,and Reginato R. J. (1987) : Analysis of an empirical model for soil heat flux under a growing wheat crop for estimating evaporation by an infrared-temperature based energy balance equation. *Agricultural and Forest Meteorology*, **39**, 283-297
- Crow W. T. and Wood E. F. (2003) : The assimilation of remotely sensed soil brightness temperature imagery into a land surface model using Ensemble Kalman filtering: a case study based on ESTAR measurements during SGP97. *Advances in Water Resources*, **26**, 137-149
- Famiglietti J. S., Wood E. F., Sivapalan M.,and Thongs D. J. (1992) : A catchment scale water balance model for FIFE. *Journal of Geophysical Research*, **97**, 18997-19007
- Feyen J. C., Belmans C.,and Hillel D. (1980) : Comparison between measured and simulated plant water potential during soil water extraction by potted ryegrass. *Soil Sci.*, **129**, 180-185
- 猪野祐一 (2002) : 地下水の浸透解析と分布型水文モデル. 長岡技術科学大学環境・建設系環境システム工学専攻環境システム工学課程修士論文要旨, pp3
- Jacquemin B. and Noilhan O. (1990) : Sensitivity study and validation of a land surface parameterization using the HAPEX-MOBILHY data set. *Boundary-Layer Meteorology*. **52**, 93-134
- Kondo J., Saigusa N.,and Sato T. (1990) : A parameterization of evaporation from bare soil surfaces. *J. Appl. Meteor.*, **29**, 385-389.
- Monteith J. L and Unsworth M. (1990) : Principles of Environmental Physics. 2nd ed. London, U.K. : Edward Arnold.
- Rutter A. J. (1975) : The hydrological cycle in vegetation. table III. Monteith J. L. ed. : Vegetation and the Atmosphere vol. 1 principles, Academic Press, 137
- Sun Shu Fen (1982) : Moisture and heat transport in a soil layer forced by atmospheric

condition. M.S. thesis, University of Connecticut.

谷 信輝 (1982) : 土壤の熱容量. 土壤物理性測定法委員会編 : 「土壤物理測定法」 養賢堂,  
299-303

山本莊毅 (1983) : 「新版地下水調査法」 古今書院, pp490

## 付録 1 修士論文加筆

### 3.4 灌漑水が供給される時の土壌への水の広がり方

各圃場に設置されている土壌水分センサーの測定値を用いて、灌漑水が供給される時の水の広がり方を調べた。土壌体積含水率の測定結果の図を、**SakhaN** については図 77～80 に、**SakhaS** については図 81～83 に、**Zankalon** については図 84～87 に示す。図 77, 84 は灌漑水供給直前、図 78, 85 は灌漑水供給直後である。図 77～80, 84～87 より畝間灌漑の行われている **SakhaN**, **Zankalon** では灌漑水の供給後、畝間から含水率が上がっていくことが分かり、一時間前後で畝の頂上にも浸透していくことが分かった。また、図 81～83 より点滴灌漑の行われている **SakhaS** では含水率の変化はあまり見られない。これは点滴灌漑の灌漑水量が畝間灌漑に比べ少ないことが一因と考えられる。

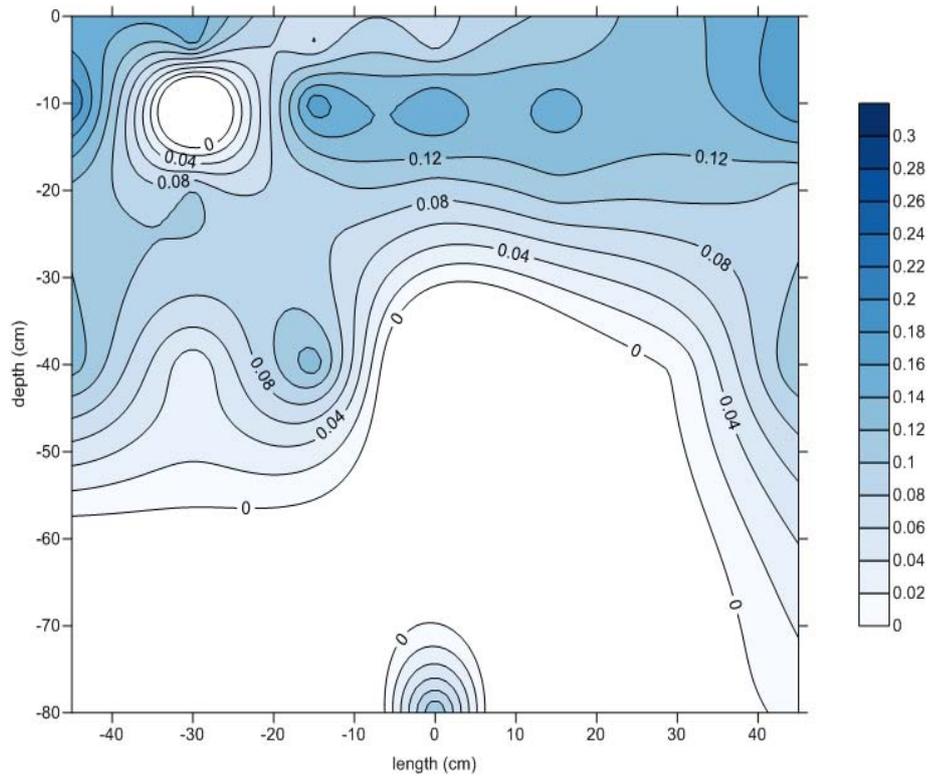


図 77 SakhaN の 7/24 11:30 の土壤体積含水率

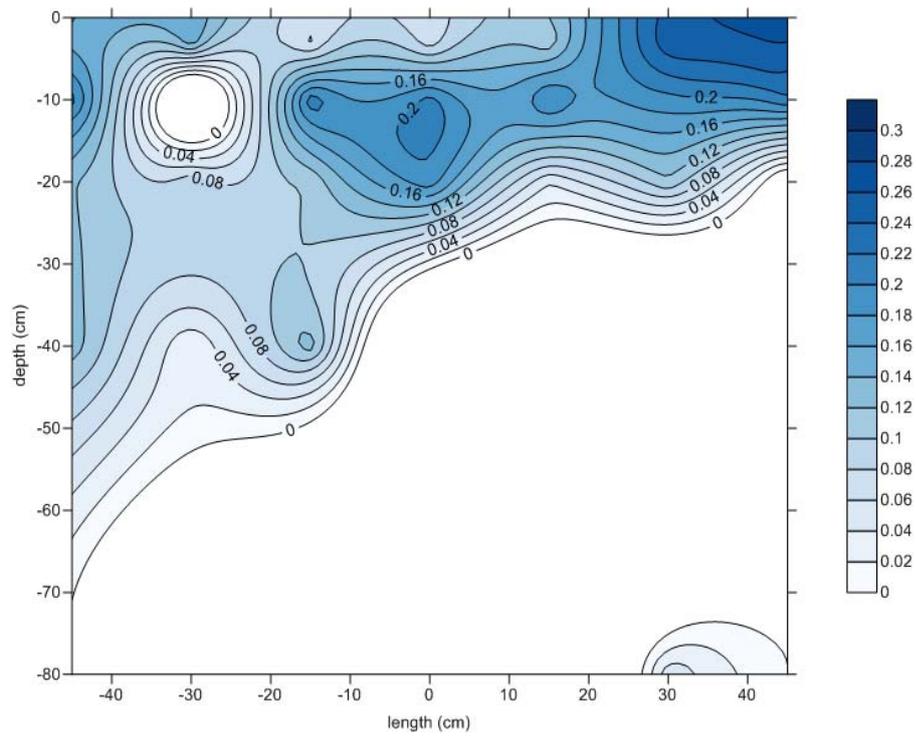


図 78 SakhaN の 7/24 12:00 の土壌体積含水率

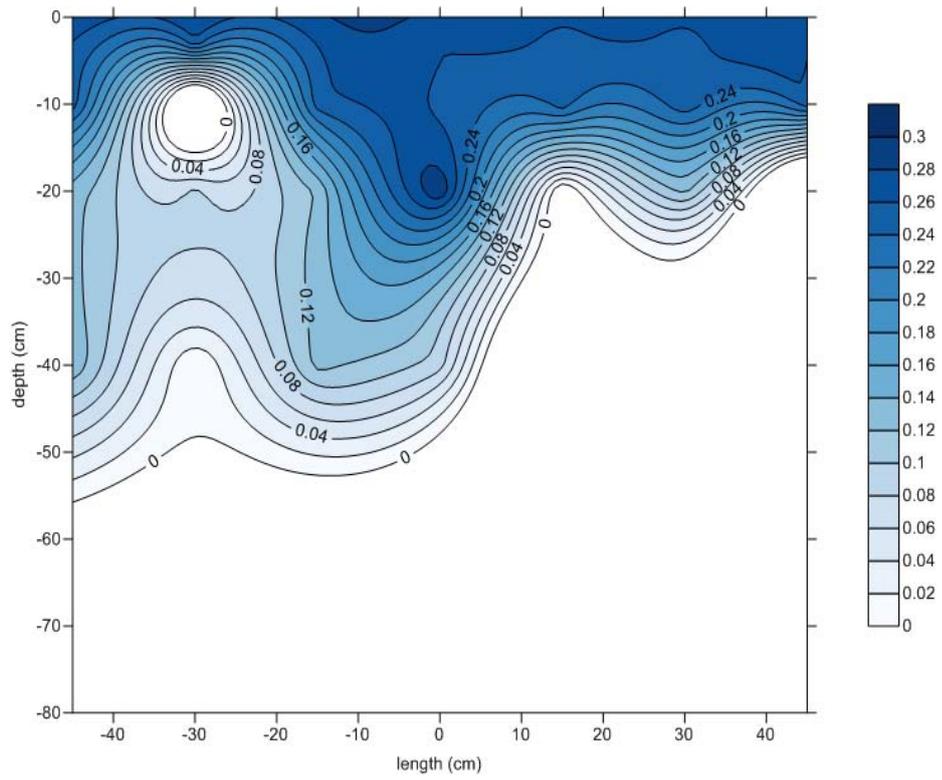


図 79 SakhaN の 7/24 12:30 の土壤体積含水率

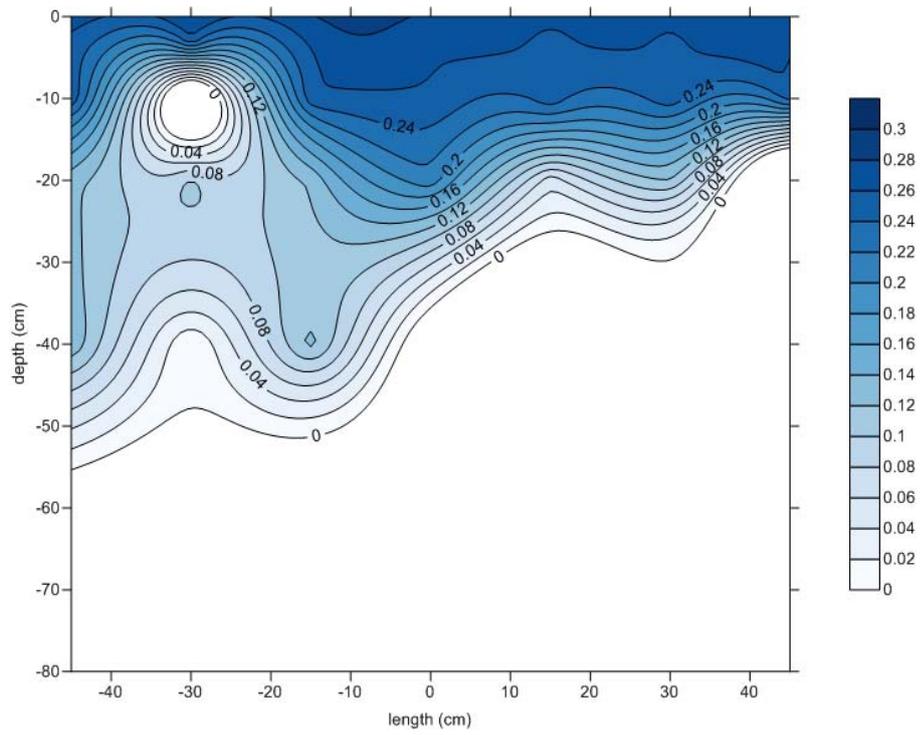


図 80 SakhaN の 7/24 13:00 の土壌体積含水率

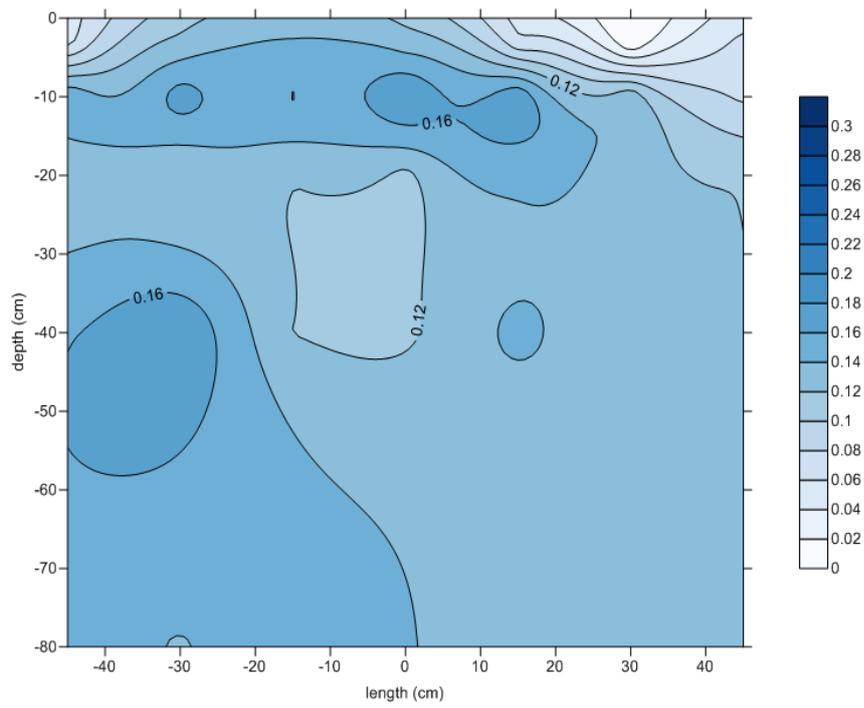


図 81 Sakhas の 7/21 9:00 の土壌体積含水率

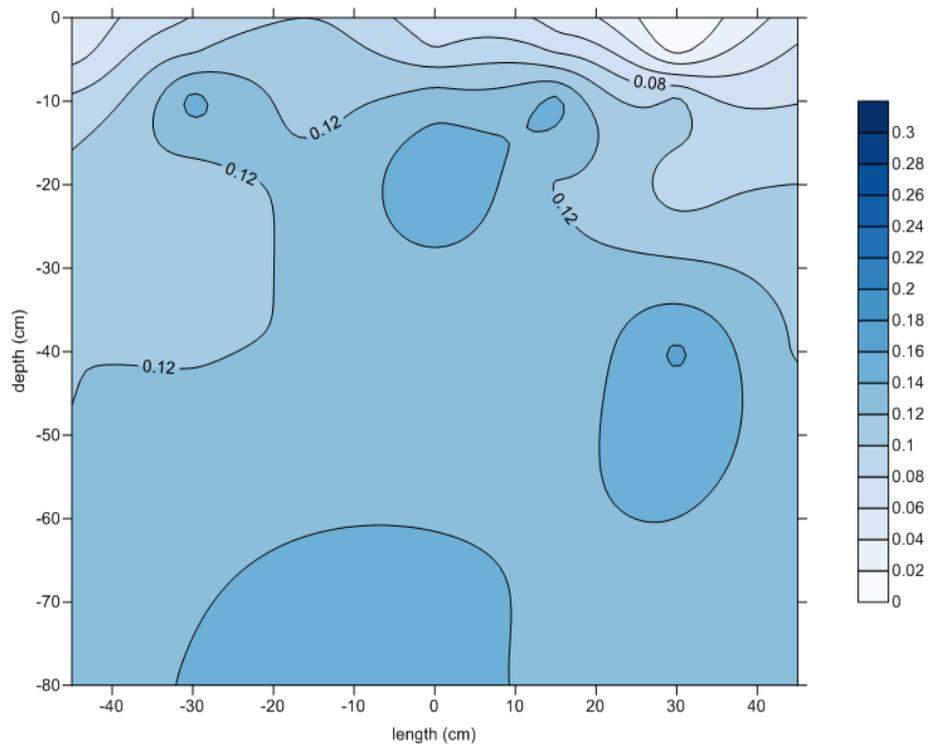


図 82 SakhaS の 7/31 12:00 の土壤体積含水率

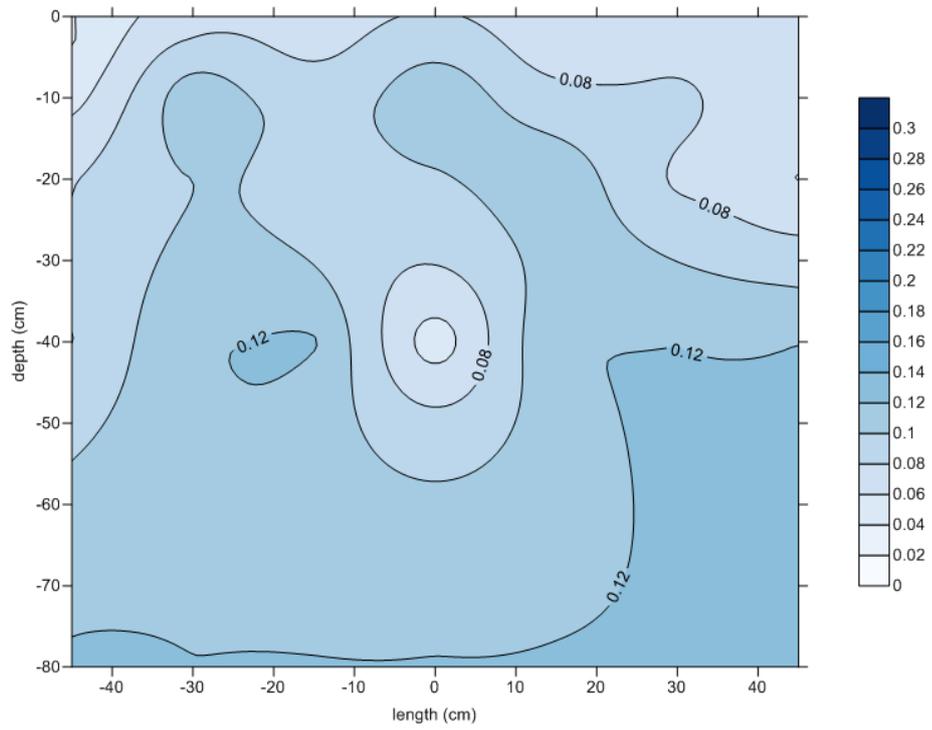


図 83 SakhaS の 9/17 15:00 の土壌体積含水率

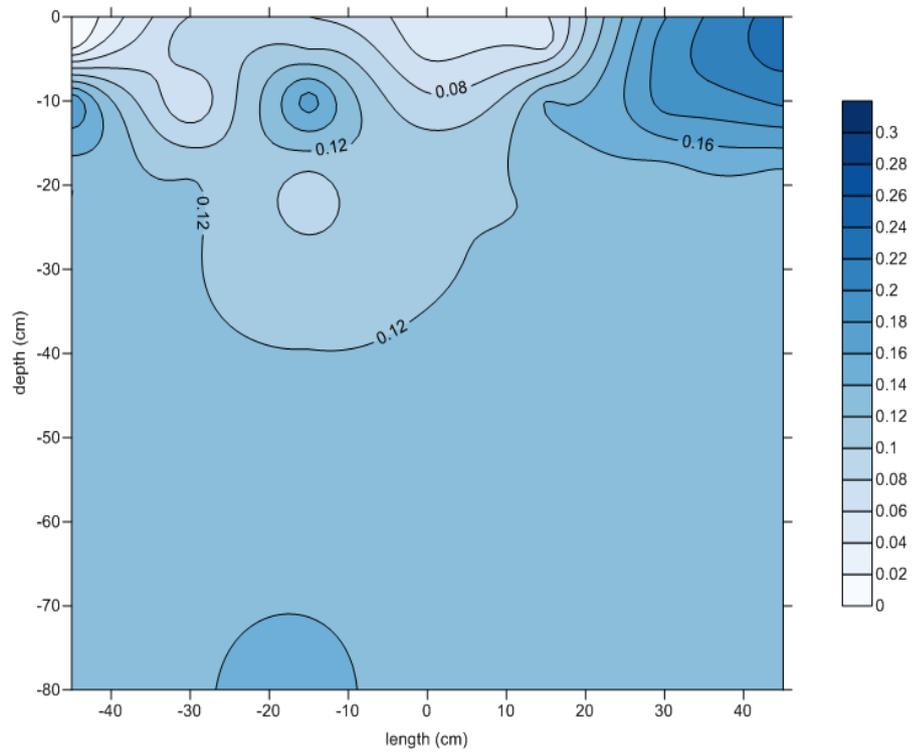


図 84 Zankalon の 7/26 7:30 の土壤体積含水率

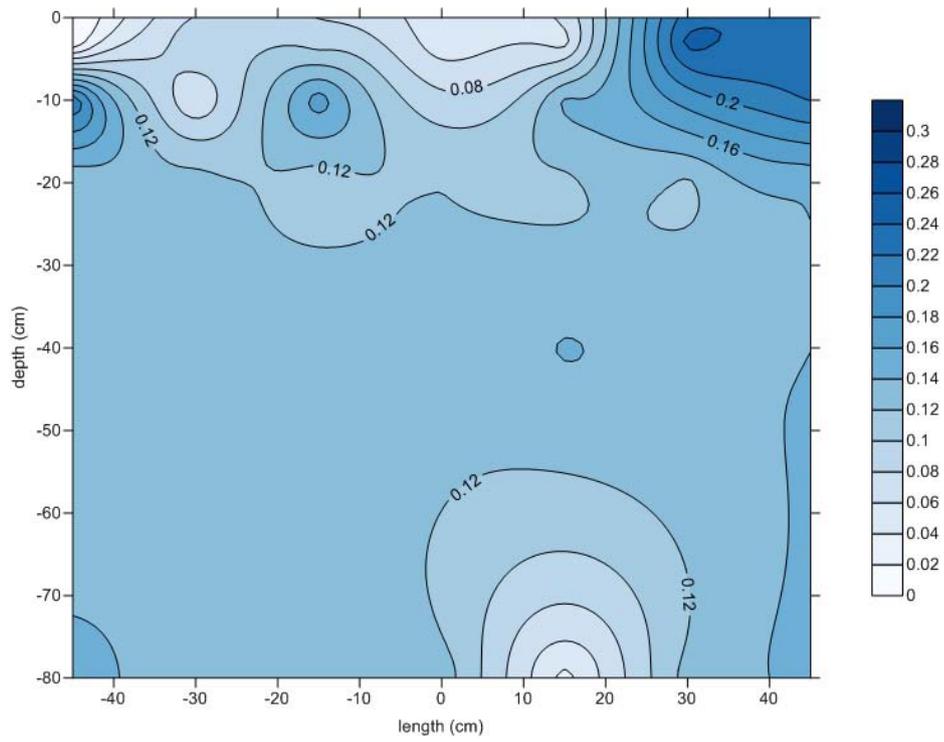


図 85 Zankalon の 7/26 8:00 の土壌体積含水率

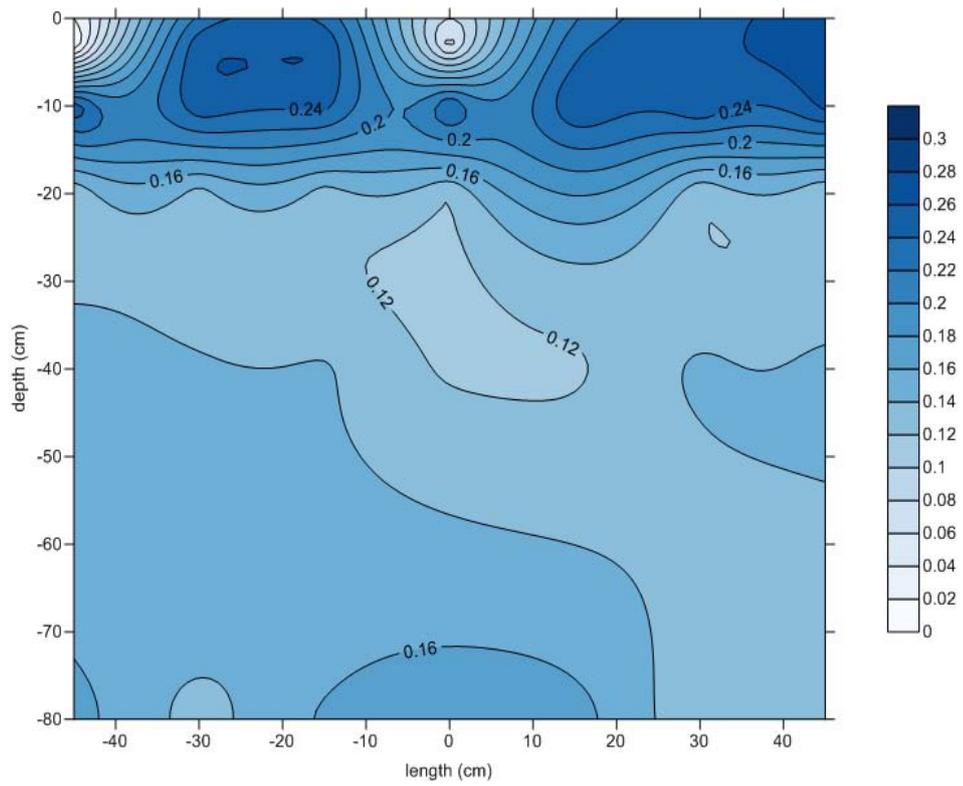


図 86 Zankalon の 7/26 8:30 の土壤体積含水率

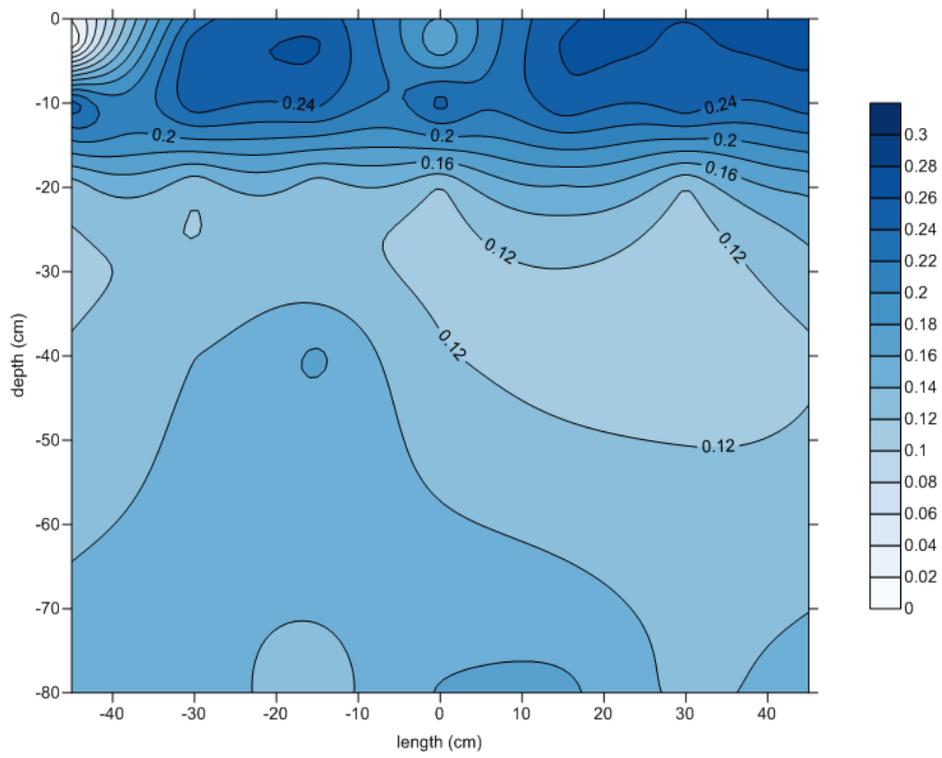


図 87 Zankalon の 7/26 9:00 の土壤体積含水率