

令和 2 年度

修士論文

ライシメータを用いたダイズ栽培実験における
水ストレス下の根の吸水特性について

Response of soybean root uptake
under water stress condition in a weighing lysimeter

三重大学大学院 生物資源学研究科

共生環境学専攻 地球環境学講座

土壌圏循環学教育研究分野

三口 貴久代

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	背景	1
1.2	根の吸水特性に関する実験環境について	2
1.3	根の吸水モデル	4
1.3.1	Feddes モデル	4
1.3.2	補填吸水モデル	10
1.3.3	Feddes モデルと補填吸水モデルの関係	15
1.4	目的	17
第 2 章	ダイズ栽培実験	18
2.1	実験方法	18
2.1.1	実験環境	18
2.1.2	実蒸発散速度 ET_a と土中水分の測定	21
2.1.3	気象センサによる各種測定	27
2.2	実験結果	29
2.2.1	解析対象期間の選定	29
2.2.2	実蒸発散速度 ET_a	31
2.2.3	土中水データ	34
2.2.4	生育データ	40
2.3	可能蒸発散速度 ET_p	43
2.3.1	算出方法	43
2.3.2	ペンマンの可能蒸発散量 ET_{pen} と可能蒸発散速度 ET_p	46
2.4	解析対象期間の生育状況	51
2.5	まとめ	52
第 3 章	水分移動モデルのパラメータの推定	53
3.1	根の吸水を含む土中水分移動モデル	54
3.2	段階的逆解析と推定パラメータ	56
3.2.1	段階的逆解析	56
3.2.2	水分特性曲線 θh と不飽和透水係数 K_h	59
3.2.3	水ストレス応答関数 $\alpha(h)$	62
3.2.4	吸水強度分布 $\beta(z)$	63
3.2.5	可能蒸発速度 E_p と可能蒸散速度 T_p の割合	64

3.2.6	補填吸水モデルの限界ストレス指数 ωc	66
3.3	パラメータ推定結果	67
3.4	パラメータ推定手順の検証	71
3.5	まとめ	78
第4章	水ストレス下の根の吸水特性	79
4.1.	根が伸長段階の吸水特性（2019 年）	79
4.2.	根が下端近傍にある吸水特性（2018 年）	84
4.3.	補填吸水モデルについて	92
4.4.	まとめ	93
第5章	おわりに	94
参考文献		96
付録		98
謝辞		136

第1章 はじめに

1.1 背景

多くの作物栽培は土壌環境で行われる。土壌水分は降雨・灌漑の浸潤および地下水の浸透によって増加し、土壌表面からの蒸発や下方への排水、植物による吸水で減少する。土壌水分は供給量が消費量より過剰になると、余剰水分とともに浸透する肥料成分が地下水へ流出する。とりわけ、植物にとって必要な硝酸窒素の流出は、水質汚染を引き起こす。したがって、土中水分の動向を調査解析することは農業分野ではもとより環境問題にも有用である。

植物は根より吸水して、光合成と蒸散で消費する。光合成で消費される水分量は蒸散量に比べてわずかであることは知られており、吸水量と蒸散量はほぼ等しいとみなすことができる。植物の吸水と蒸散は、主に植物生理の視点から研究が行われてきたが、土壌物理の分野においても、植物の根群域における土中水分の移動や、地表面における熱収支では重要な因子である。植生のある地表面では、地表面からの水分蒸発と植物の蒸散が同時に生じる(図 1.1)。土が湿潤な場合には、実蒸発速度 E_a は気象条件で決まる可能蒸発速度 E_p で起こり、実蒸散速度 T_a も気象条件に依存する可能蒸散速度 T_p で起こる。植物が生長すると被覆率が増加し、蒸発散に占める蒸散の割合が増加する。また、土が乾燥すると、地表面からの蒸発減少に加えて、水ストレスによる根の吸水減少により蒸散も減少する。一方、蒸散が低下すると、植物は水を求めて根を伸長させ、また吸水のストレス耐性を増加させる補填吸水の生起が知られている。しかし、土中のそれぞれの位置の根の吸水を測定することは困難であり、根の吸水特性、とりわけ水ストレス下の補填吸水の詳細は明らかでない。

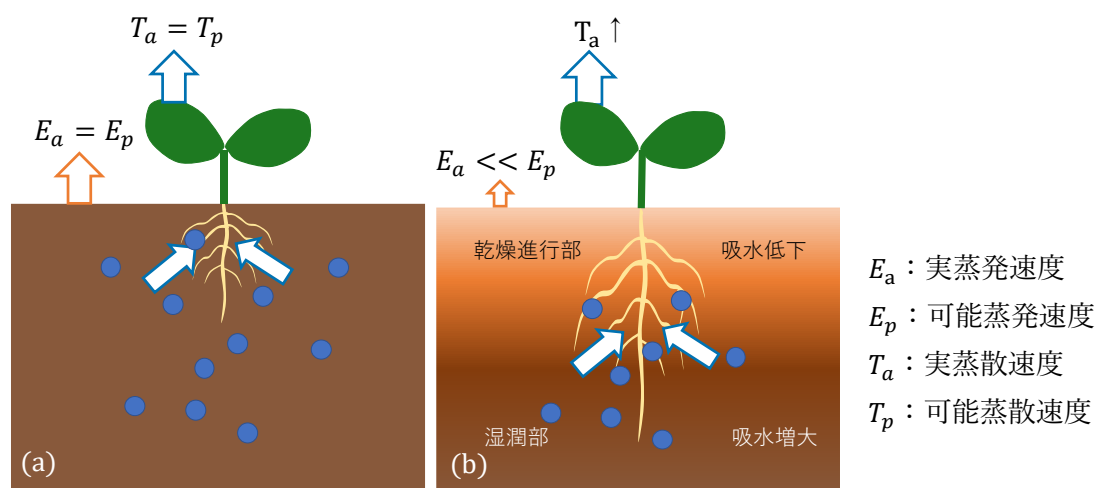


図 1.1 異なる土中水分条件下での蒸発と蒸散 (a)湿潤時 (b)乾燥時

1.2 根の吸水特性に関する実験環境について

土壌圏循環学研究室では、根の吸水特性を調べるために、圃場、圃場に設置した重量ライシメータ、ガラス室に設置したポットの3種類の環境において、実験を行ってきた。自然な生育環境下である圃場での根の吸水特性の解明には、それぞれの実験環境の特性を把握した上で得られた情報を補完しながら、総合的に知見を蓄積する必要がある。本研究では圃場に設置した重量ライシメータの栽培実験のデータの解析を行ったが、まず本研究で得られた結果の特徴と限界を明確にするために、3種類の実験環境の特徴を整理する。表 1.1 は、3種類の実験環境の実験条件、蒸発散速度の推定方法などの比較である。

圃場実験では、自然条件下の植物を観察することができる。しかし、解析を行う上で最も重要な実蒸発散速度 ET_a と可能蒸発散速度 ET_p を測定することが困難である。坂井ら(2020)は、圃場実験で、気象データに基づく熱収支より蒸発散速度を推定し、群落の透過率から熱収支より求めた蒸発散における蒸発の割合を推定した。一連の熱収支の計算には、詳細な気象データを必要とし、また、複雑な計算を要する上に、推定の精度の検証が必要である。

ガラス室内のポット実験は、ポットの重量変化を測定できることが特徴である。ポット表面をマルチで覆うことで蒸発をゼロにした蒸散のみの測定や、ポットを湿潤状態に保つことで可能蒸発散速度の測定が可能である。大西ら(2017)は、ガラス室内にてマルチで蒸発を抑えたポットを湿潤状態に保ち、ポットの重量変化より可能蒸散速度 T_p を測定した。また、かん水をせずに乾燥状態にしたポットの重量変化より実蒸散速度 T_a を測定した。そして、 T_a と T_p の比と乾燥ポットの土中水圧力の関係から、水ストレス応答関数 $\alpha(h)$ を推定した。さらに、推定した水ストレス応答関数を用いた水分移動式で ET_a を解析し、植物は乾燥の進行にともないストレス耐性を増加させることを示した。ポット実験は、下端条件が大気条件やゼロフラックスで自然状態とは異なることや、ポットの大きさが小さいために植物根が下端に到達すること、また水平方向の根の伸長も制限されることが短所である。一方、ガラス室内のため生育環境は自然でないが、空調設備による環境の制御が可能である。

ポット実験を野外圃場へ持ち出したものが、重量ライシメータである。そのため、圃場実験とポット実験の中間的な性質を持つ。本研究は、この重量ライシメータの栽培実験のデータを解析対象とした。圃場に設置した重量ライシメータは、圃場と同じ自然条件下でポット実験と同様に重量変化による蒸発散速度の測定が可能である。また、ライシメータは、圃場に比べて側面や上部からのセンサの設置が容易であるため、センサ密度の高い多岐にわたる項目の測定が可能である。しかし、ポットと同様に、ライシメータは、下端条件が圃場と異なることや、根の生長が下端や側面で制限されることが短所である。また、植物が生長すると、ライシメータの断面積よりも広く葉が拡がるため、 E_p と T_p の分離の簡易的方法に用いられる被覆率がライシメータでは定めにくい課題がある。なお、本研究で用いた重量ライシメータは、スマートフィールドライシメータ(旧 UMS 社)とよばれ、周囲の圃場の土中水圧力に下端圧力を調整する機能を持つ(図 2.4)。しかし、この圧力調整機能が実験期間の

多くで作動しなかったため、本研究では、基本、下端を閉じたゼロフラックスとしてライシメータを利用した。現在、この圧力調整機能については修理中であるが、周囲の圃場と水分・圧力条件を一致することができれば、圃場実験との組み合わせで、さらに根の吸水特性の詳細を明らかにすることができると考える。

表 1.1 根の吸水に関する 3 種類の実験環境の比較

	ポット (大西ら, 2017)	重量ライシメータ (30 cm)	圃場 (坂井ら, 2020)
気象条件	ガラス室	自然	自然
実蒸発散速度 ET_a	重量変化	重量変化	熱収支
可能蒸発散速度 ET_p	湿潤ポットの 重量変化	ペンマン式 ×作物係数	熱収支
E_p と T_p の分離	マルチで蒸発ゼロ	被覆率?	被覆率
下端条件	大気条件, ゼロフラックス	大気条件, ゼロフラックス 下端圧力調整により 自然	自然
根の伸長	側面・下端に到達	側面・下端に到達	自然
その他	条件設定や管理が容易	センサの設置が容易	気象データの取得と 複雑な計算

青字は長所, 赤字は短所を示す。

1.3 根の吸水モデル

本研究では、土中の水分移動式（リチャーズ式）の吸い込み項として根の吸水モデルを用いた解析を行った（式（3.1））。ここでは、用いた根の吸水モデルの Feddes モデルと、水ストレスに抵抗して吸水増加を表現する補填吸水モデルについて述べる。

1.3.1 Feddes モデル

Feddes et al.（1978）は、実吸水速度 S_a は可能吸水速度 S_p が水ストレスによって制限された吸水速度であるとし、根の吸水モデルとして実吸水速度 S_a と可能吸水速度 S_p の関係を式（1.1）で表した。

$$S_a(z, t) = \alpha(h)S_p(z, t) \quad (1.1)$$

ここで、 $S_a(z, t)$ は単位時間・単位体積あたりの植物根による実吸水速度（ day^{-1} ）、 $S_p(z, t)$ は単位時間・単位体積あたりの植物根による可能吸水速度（ day^{-1} ）、 $\alpha(h)$ は土中水圧力 h （ cm ）に依存する水ストレス応答関数（-）、 z は深さ（ cm ）であり、土中水圧力 h は深さ z に依存する。また、可能吸水速度 S_p は、気象条件や植物の生育段階によって決まる植物全体の可能蒸散速度 T_p （ cm day^{-1} ）を吸水強度分布 $\beta(z)$ （ cm^{-1} ）によって根群域へ分配した式（1.2）で表した。

$$S_p(z, t) = \beta(z)T_p(t) \quad (1.2)$$

ここで、 $\beta(z)$ は各深さ z （ cm ）における吸水強度分布（ cm^{-1} ）である。式（1.1）、式（1.2）より、実吸水速度 S_a は式（1.3）となる。

$$S_a(z, t) = \alpha(h)\beta(z)T_p(t) \quad (1.3)$$

植物体内貯留量の変化は無視できると仮定すると、実蒸散速度 $T_a(t)$ は根群域全域の実吸水速度 S_a の総和に等しい。式（1.3）の実吸水速度 S_a を根群域の深さ L （ cm ）から地表面まで積分すると、実蒸散速度 T_a （ cm day^{-1} ）の式（1.4）が得られる。

$$T_a(t) = \int_{-L}^0 S_a(z, t) dz = T_p(t) \int_{-L}^0 \alpha(h(z))\beta(z) dz \quad (1.4)$$

水ストレス応答関数 $\alpha(h)$

Feddes et al. (1986) は、水ストレス応答関数 $\alpha(h)$ を4つの土中水圧力の閾値で区分される線形の関数として式 (1.5) のように定義した (以下、Feddes モデルという)。4つの閾値の関係は $h_4 \leq h_3 \leq h_2 \leq h_1$ である。このモデルの水ストレス応答関数 $\alpha(h)$ を図 1.2 に示す。

$$\alpha(h) = \begin{cases} 0 & (h \leq h_4, h_1 \leq h) \\ \frac{h - h_1}{h_2 - h_1} & (h_2 \leq h \leq h_1) \\ 1 & (h_3 \leq h \leq h_2) \\ \frac{h - h_4}{h_3 - h_4} & (h_4 \leq h \leq h_3) \end{cases} \quad (1.5)$$

Feddes モデルは、 h_1 と h_2 、 h_2 と h_3 、 h_3 と h_4 からなる3つの領域からなる。 h_1 は嫌気点にあたり、これより湿潤な場合 ($h \geq h_1$)、植物根は酸素欠乏状態で吸水不能 ($\alpha(h) = 0$) となる。一方、 h_4 は永久しおれ点にあたり、土が乾燥して永久しおれ点を下回る ($h \leq h_4$) と、吸水不能 ($\alpha(h) = 0$) となる。なお、モデル上は一旦 $h \leq h_4$ となった後でも湿潤な状態 ($h \geq h_4$) に戻ると吸水は再開するため、実際の永久しおれ点とは振る舞いが異なることに注意する必要がある。 h が h_2 と h_3 (h_3 は初期しおれ点にあたる) の範囲にある場合は、可能吸水となり吸水量は最大 ($\alpha(h) = 1$) となる。 h が h_1 と h_2 の範囲にある場合、 $\alpha(h)$ は線形で増加し、 h_3 と h_4 の範囲にある場合、 $\alpha(h)$ は線形で減少する。また、Kroes and Darn (2003) が水ストレス応答関数 $\alpha(h)$ の初期しおれ点に対応する土中水圧力が可能蒸散速度の大きさに応じて変化すると示したように、 h_3 は可能蒸散速度 T_p の大きさによって変化し、可能蒸散速度 T_p が小さいと h_3 は小さくなり、可能蒸散速度 T_p が大きいと h_3 は大きくなるとした。HYDRUS-1D では、 h_3 の変化を式 (1.6) で与え、 h_3 を可能蒸散速度 T_p に応じて線形補間して与えている。

$$h_3 = \begin{cases} h_{3h} + \frac{h_{3l} - h_{3h}}{T_{ph} - T_{pl}}(T_{ph} - T_p) & (T_{pl} \leq T_p \leq T_{ph}) \\ h_{3l} & (T_p \leq T_{pl}) \\ h_{3h} & (T_p \geq T_{ph}) \end{cases} \quad (1.6)$$

ここで、 h_{3h} は可能蒸散速度 T_p が T_{ph} 以上のときの土中水圧力 h である。 h_{3l} は可能蒸散速度 T_p が T_{pl} 以下のときの土中水圧力 h であり、吸水が最大となる土中水圧力 h の下限値である。 T_{ph} は $h_3 = h_{3h}$ となる可能蒸散速度 T_p の下限値、 T_{pl} は $h_3 = h_{3l}$ となる可能蒸散速度 T_p の上限値である。なお、本研究では、大西ら (2017) と同様に、 h_3 の T_p 依存性は考慮せず、 $h_{3h} = h_{3l}$ の単純な水ストレス応答関数 $\alpha(h)$ を解析に用いた。

水ストレス応答関数 $\alpha(h)$ のパラメータには、収量と蒸散量の関係から推定した例はある。Hanks ら (1983) は、圃場で栽培した様々な作物の蒸発散量と収量の関係をまとめ、いずれの作物においても収量 γ と最大収量 γ_p の関係 (γ/γ_p) が実蒸散速度 T と可能蒸散速度 T_p の関係 (T/T_p) と等しくなることを示した。また、Tayler and Ashcroft (1972) は、様々な作物について土中水圧力と収量の関係を示した。

一方、大西ら (2017) は、ポットを用いたダイズ栽培実験で測定した蒸散速度の日変化と土中水圧力の関係から水ストレス応答関数 $\alpha(h)$ を推定した。マルチで蒸発を抑えたポットを湿潤状態に保った湿潤ポットより可能蒸散速度 T_p を測定し、かん水をしない乾燥ポットより実蒸散速度 T_a を測定した。そして、 T_a と T_p の比を α ($= T_a/T_p$) として、乾燥ポットの土中水圧力 h の関係から水ストレス応答関数 $\alpha(h)$ を推定した (図 1.3)。永久しおれ点が $h_4 = -15000$ cm のとき、最小二乗法で得られる初期しおれ点は $h_3 = -1700$ cm であった。さらに、大西ら (2017) は、乾燥が進行すると水ストレスへの抵抗性が上がり、初期しおれ点、永久しおれ点が低下するとした (図 1.4)。

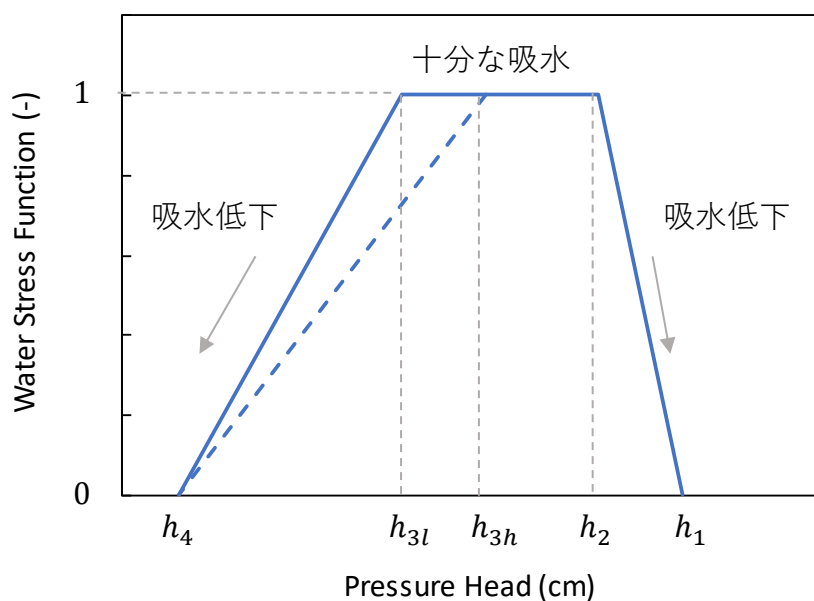


図 1.2 Feddes モデルにおける水ストレス応答関数

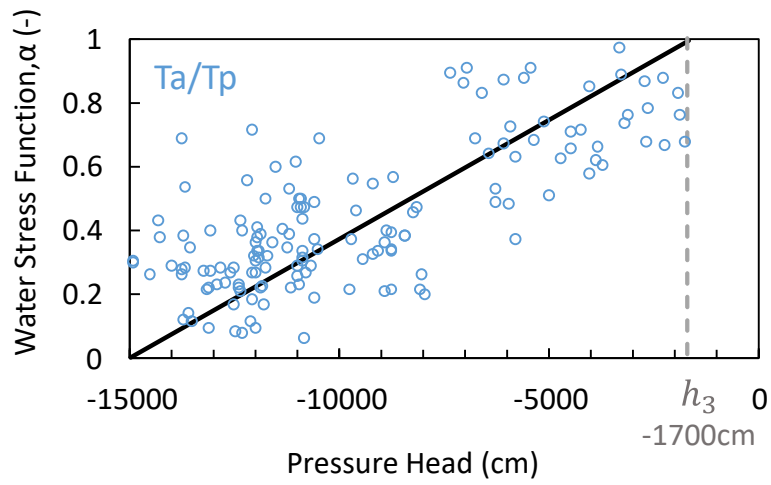


図 1.3 大西ら（2017）がポット試験で推定したダイズの水ストレス応答関数 α

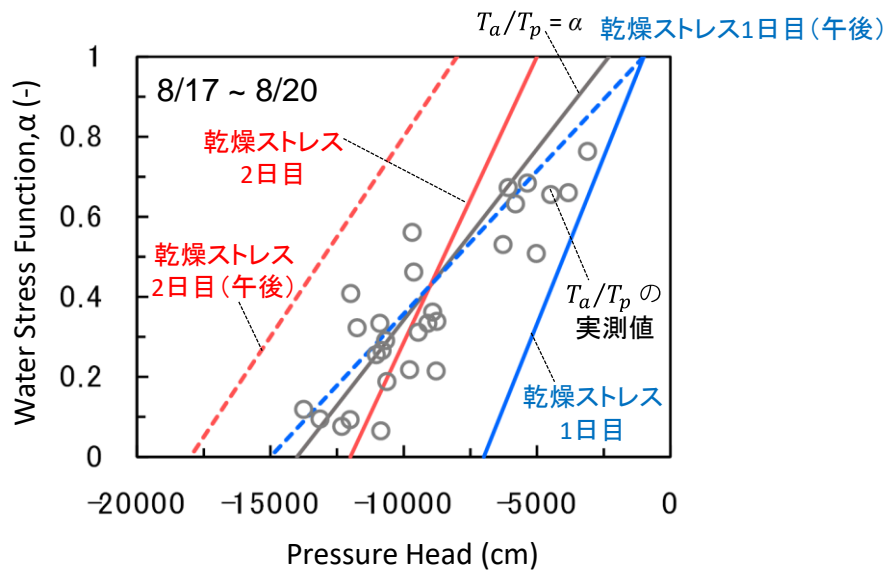


図 1.4 ポット試験の乾燥過程におけるダイズの水ストレス応答関数 α の変化
(大西ら，2017)

吸水強度分布 $\beta(z)$

吸水強度分布 $\beta(z)$ は、深さ方向に積分すると1になる関数であり、根密度分布を正規化したものが用いられてきた(石田, 1982). 岡橋ら(2015)は、本研究と同一圃場でのダイズ栽培でダイズ根の長さを測定し、播種後25日では20 cm, 播種後58日では30 cmに到達したことを確認した(図1.5). しかし、成毛ら(2013)はポット実験で、根の吸水は必ずしも根密度分布にはよらず、根密度が小さいポット下端での吸水が他の領域よりも多く起こることを明らかにした. なお、成毛らの根密度は、各深さにおける根の乾燥重量や表面積より評価したものである. また、成毛ら(2015)は、ダイズ生育後期の根はポット下端に到達した後に上方へ折り返しており、吸水強度分布 $\beta(z)$ はポット全体ではほぼ一定であることを示した. また、根の生長が横方向に制限されるポットやライシメータでは、深さ方向には一定とみなせると考える.

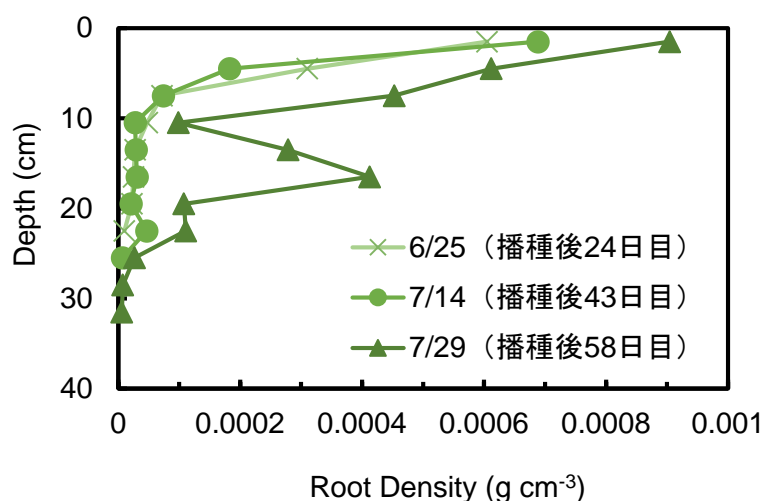


図1.5 ダイズの根密度分布(岡橋ら, 2015)

可能蒸発速度 E_p と可能蒸散速度 T_p の分離

植生下での土壌水分の消費は、地表面からの水分蒸発と植物の根の吸水による。植生のある地表面では、地表面からの水分蒸発と植物の蒸散が同時に生じる。そのため、湿潤状態のポットやライシメータの重量変化からは可能蒸発散速度 ET_p が推定される。ペンマン式から推定されるのも ET_p である（式（2.1））。一方、根の吸水を考慮したリチャーズ式では、可能蒸発速度 E_p は地表面境界条件（式（3.5））、可能蒸散速度 T_p は Feddes モデルに対して与える（式（3.2））。そのため、可能蒸発散速度 ET_p を可能蒸発速度 E_p と可能蒸散速度 T_p に分離する必要がある。

植物が生長すると、図 1.6 に示すように、蒸発散に占める蒸散の割合が増加する（FAO, 1998）。蒸発と蒸散の割合の決定方法として、放射透過率で分離する、葉面積指数（LAI）を用いて推定するベールの法則が式（1.7）で提案されている（Ritchie, 1972）。

$$\begin{aligned} T_p &= ET_p[1 - \exp(-a_i \times LAI)] \\ E_p &= ET_p[\exp(-a_i \times LAI)] \end{aligned} \quad (1.7)$$

a_i は定数で、0.389（Ritchie, 1972）がよく用いられる。しかし、 a_i は作物や栽培条件などに依存すると考えられるため、決定することが困難である。また、LAI の測定には刈り取り法で行われることが多く、植物体の破壊という短所がある。

岡橋ら（2015）は、蒸発散に占める蒸散の割合（ T_p/ET_p ）と被覆率に相関があると示し、上空から撮影した画像より求めた被覆率は、蒸発と蒸散の割合の決定に有効であるとした。坂井ら（2020）は、ダイズ栽培圃場の熱収支より蒸発散における蒸発の割合を、群落の放射透過率を測定が簡易な被覆率で近似して求める方法を提案した。

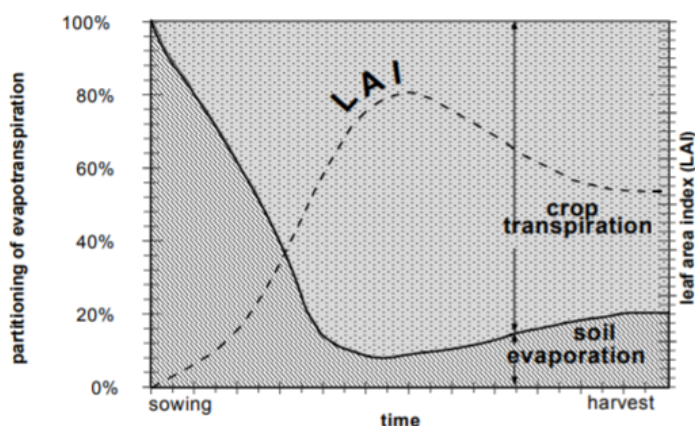


図 1.6 植物の生長期間における蒸発と蒸散の割合の変化

（引用 FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56）

1.3.2 補填吸水モデル

乾燥の進行によって水ストレスが生じると、図 1.7 の点線で示される実蒸散速度 T_a は減少する。しかし、植物は、蒸散低下を阻止するために、補填吸水機能が働き、蒸散速度が増加する。これは、補填吸水モデルによって、低下した点線の実蒸散速度 T_a を実線の補填実蒸散速度 T_{ac} まで引き上げることで現れる。補填吸水モデルは、土の乾燥によって各深さの吸水速度が低下したとき、根圏全体の吸水速度を増加させるモデルであり、Jarvis (1989, 1994) によって提案された。HYDRUS-1D には、以下に示す補填吸水モデルが用いられている。なお、図 1.7 は、補填吸水モデルを適用しない場合（点線）と限界ストレス指数 $\omega_c = 0.5$ の場合（実線）の計算値である。その計算条件は、50 cm 長のシルトで、初期圧力には上端圧力 -50 cm の圧力平衡、上端境界条件は大気条件、下端境界条件はゼロフラックス、水ストレス応答関数には HYDRUS-1D 内の Bean 値を、吸水強度分布には 25 cm 深一定の矩形分布を、可能蒸発速度 0.5 cm day^{-1} と可能蒸散速度 0.5 cm day^{-1} とした。

図 1.8 は、補填吸水モデルの概念図である。補填吸水が起こらないときの実蒸散速度 T_a と可能蒸散速度 T_p の比 T_a/T_p をストレス指数 ω として、式 (1.8) で定義する。

$$\frac{T_a(t)}{T_p(t)} = \int_L \alpha(h)\beta(z) dz = \omega(t) \quad (1.8)$$

なお、 T_a 、 T_p 、 ω は時間 t の関数でもよい。

補填吸水モデルでは、図 1.8 の点線で示される補填前の T_a/T_p を実線の T_{ac}/T_p で補正した補填実蒸散速度 T_{ac} を与える。図中の実線の折れ線部、すなわち補填実蒸散速度 T_{ac} が可能蒸散速度 T_p とは等しくなる($T_{ac} = T_p$)ときの ω の境界値は、限界ストレス指数 ω_c とよばれ、補填吸水モデルの強度を与えるパラメータである ($0 < \omega_c \leq 1$)。 ω_c が小さいほど T_p まで回復させる T_a/T_p の範囲は広がり、補填の強度は高まる。 $\omega_c = 1$ では点線と実線が等しくなり、補填吸水はなしである。

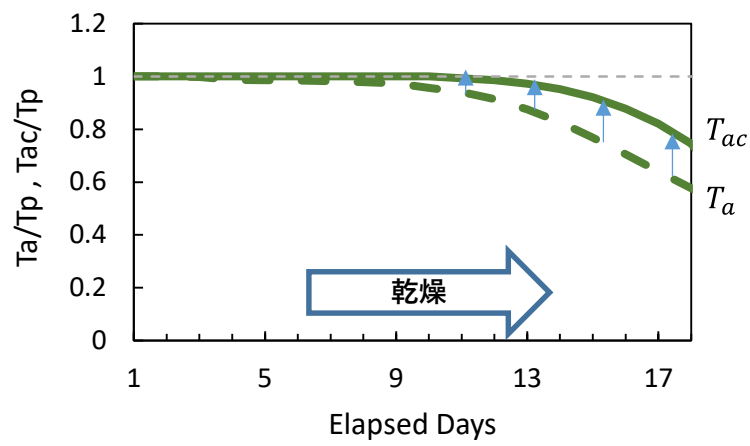


図 1.7 補填吸水モデルによる蒸散速度の増加

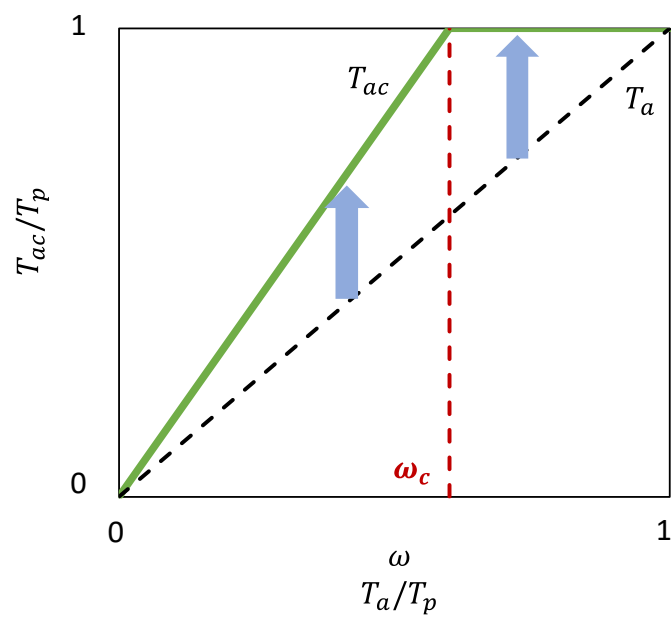


図 1.8 蒸散速度と可能蒸散速度の比とストレス指数 ω の関係

まず、 $\omega \geq \omega_c$ の補填実蒸散速度 T_{ac} を考える。このとき、 $T_{ac} = T_p$ であるため、 T_{ac}/T_p は式 (1.8) を用いて式 (1.9) で表される。

$$\frac{T_{ac}(t)}{T_p(t)} = \frac{T_a(t)}{T_p(t)\omega(t)} = \frac{1}{\omega(t)} \int_L \alpha(h)\beta(z) dz = \frac{\omega(t)}{\omega(t)} = 1 \quad (1.9)$$

また、式 (1.3) の実吸水速度 S_a は式 (1.10) となる。

$$S_{ac}(z, t) = \alpha(h, t)\beta(z, t) \frac{T_p(t)}{\omega(t)} \quad (1.10)$$

一方、 $\omega < \omega_c$ のときの補填実蒸散速度 T_{ac} は、実蒸散速度 T_a の $1/\omega_c$ 倍となる。そのため、 T_{ac}/T_p は式 (1.11)、補填後の実吸水速度 S_{ac} は式 (1.12) で表される。

$$\frac{T_{ac}(t)}{T_p(t)} = \frac{T_a(t)}{T_p(t)\omega_c} = \frac{1}{\omega_c} \int_L \alpha(h)\beta(z) dz = \frac{\omega(t)}{\omega_c} < 1 \quad (1.11)$$

$$S_{ac}(z, t) = \alpha(h)\beta(z, t) \frac{T_p(t)}{\omega_c} \quad (1.12)$$

以上の関係式をまとめると、 T_{ac}/T_p は式 (1.13)、 S_{ac} は式 (1.14) で表される。

$$\frac{T_{ac}(t)}{T_p(t)} = \frac{T_a(t)}{T_p(t)\max[\omega(t), \omega_c]} = \frac{\omega(t)}{\max[\omega(t), \omega_c]} < 1 \quad (1.13)$$

$$S_{ac}(z, t) = \alpha(h)\beta(z, t) \frac{T_p(t)}{\max[\omega(t), \omega_c]} \quad (1.14)$$

以上より、補填実蒸散速度 T_{ac} は式 (1.15) で表される。

$$\begin{aligned} T_{ac}(t) &= \int_L S_{ac}(z, t) dz \\ &= \frac{T_p(t)}{\max[\omega(t), \omega_c]} \int_L \alpha(h)\beta(z) dz \end{aligned} \quad (1.15)$$

補填吸水モデルを適用した場合の 2019/8/10 正午の吸水速度分布を図 1.9 に示す。水ストレスがない場合の吸水速度は、可能吸水速度 S_p であり、この図の例の場合、吸水強度分布 $\beta(z)$ は深さ方向に一定のため、 S_p も根が存在する深さまで一定である。実吸水速度 S_a は、そ

それぞれの深さの水ストレス応答関数 $\alpha(h)$ に応じて低下する．補填吸水モデルを適用すると，根圏全体の S_a が $1/\max[\omega(t), \omega_c]$ 倍に増加して補填実吸水速度 S_{ac} となる．湿潤で $S_a = S_p$ の下層部では $S_{ac} > S_p$ の吸水が生じるのが特徴である．

図 1.10 は，2019/8/10 正午の補填実吸水速度 S_{ac} における吸水減少分と補填増加分の関係である．上層部の吸水減少分が下層部の吸水増加で補填されるが， $\omega \geq \omega_c$ のときは $T_{ac} = T_p$ であるため，図の吸水減少分と補填増加分の面積は等しくなる．一方，補填前の実吸水速度 S_a と補填実吸水速度 S_{ac} の差が補填吸水モデルによる増加分である．図 1.11 は，図 1.10 同様に湿潤な下層部で $S_{ac} > S_p$ の吸水が生じるときの，2019/8/13 正午の S_a と S_{ac} の分布である．補填吸水モデルは根圏全体の S_a を一定倍率増加させて S_{ac} とするが，根の吸水増加はストレス耐性の増加と湿潤部からの補填吸水の両者が要因である．そこで，本研究では，補填吸水モデルによる吸水速度の増加分を可能吸水速度 S_p で 2 分して， S_p 以上を湿潤部の補填吸水分， S_p 以下をストレス耐性強化による増加分と定義した．なお， S_p は日内で変化するので，日蒸散量の評価には，図 1.11 の増加分の朝から夕方までの期間の積分が必要である．

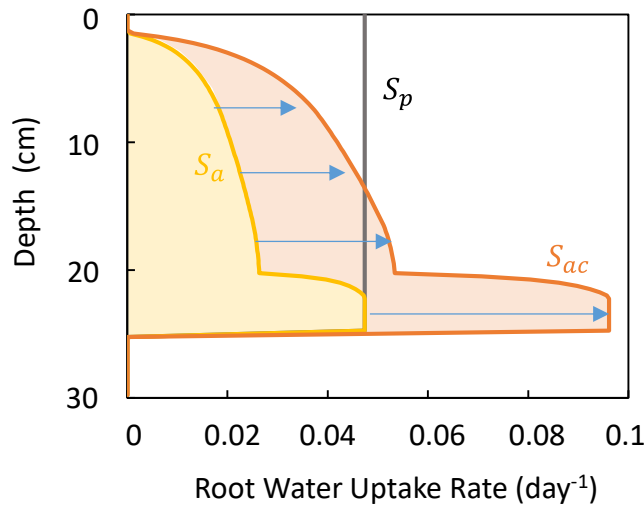


図 1.9 補填吸水モデルを適用したときの吸水速度（2019/8/10 正午の分布）

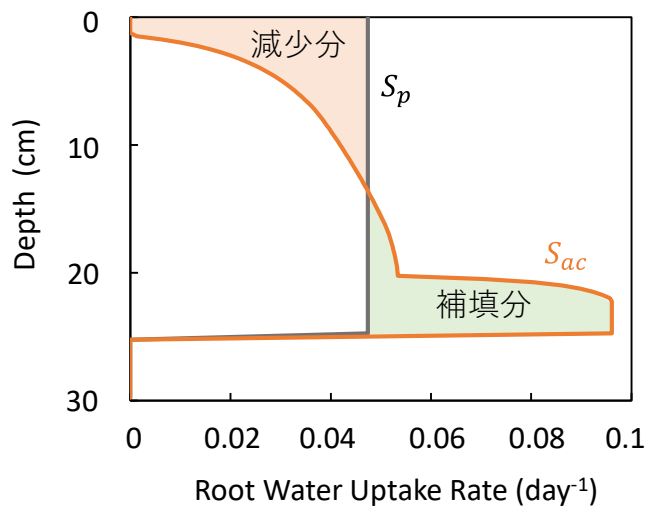


図 1.10 補填吸水モデルにおける減少分と補填分の関係(2019/8/10 正午の分布)

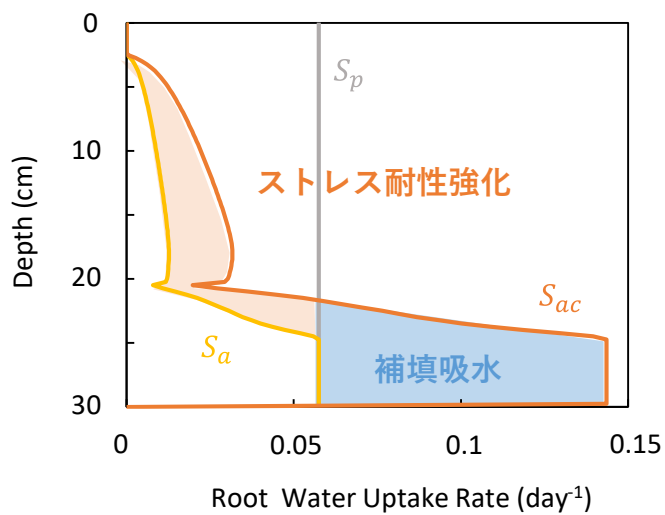


図 1.11 補填吸水モデルにおける吸水速度分布における増加量の定義 (2019/8/13 正午の分布)

1.3.3 Feddes モデルと補填吸水モデルの関係

補填吸水モデルは，式（1.14）に示すように，Feddes モデルの式（1.3）の S_a を $1/\max[\omega(t), \omega_c]$ 倍して補填実吸水速度 S_{ac} を与える．そこで，次式でみかけの水ストレス応答関数 α' を定義した．

$$S_{ac}(z, t) = \frac{S_a(z, t)}{\max[\omega(t), \omega_c]} = \frac{\alpha(h)S_p(z, t)}{\max[\omega(t), \omega_c]} = \alpha'(h)S_p(z, t) \quad (1.16)$$

$$\alpha'(h) = \frac{\alpha(h)}{\max[\omega(t), \omega_c]} = \frac{S_{ac}(z, t)}{S_p(z, t)} \quad (1.17)$$

みかけの水ストレス応答関数 α' を定義すると，補填吸水モデルの効果を Feddes モデルの水ストレス応答関数に含めた評価が可能となる．図 1.12 は，図 1.11 の例の S_p と S_{ac} の比から求めた α' の深さ分布である．このみかけの水ストレス応答関数 α' をそれぞれの位置の土中水圧力 h に対して示したのが図 1.13 である．灰色実線の Feddes モデルの水ストレス応答関数 α は，補填吸水モデルを適用するとオレンジ色実線のみかけの水ストレス応答関数 α' に増加する．このとき，図 1.11 と同様に， $\alpha' \geq 1$ の水色部分は補填吸水による増分， $\alpha' < 1$ のオレンジ部分はストレス耐性強化による増加分と定義できる．このときのストレス耐性は，初期しおれ点が h_3 から h_3' に低下したとみなすことができる． h_3' をみかけの初期しおれ点と呼ぶこととする．なお，このみかけの水ストレス応答関数 α' は，図 1.14 に示すように，土中の圧力分布に応じた存在範囲があることは注意点である．

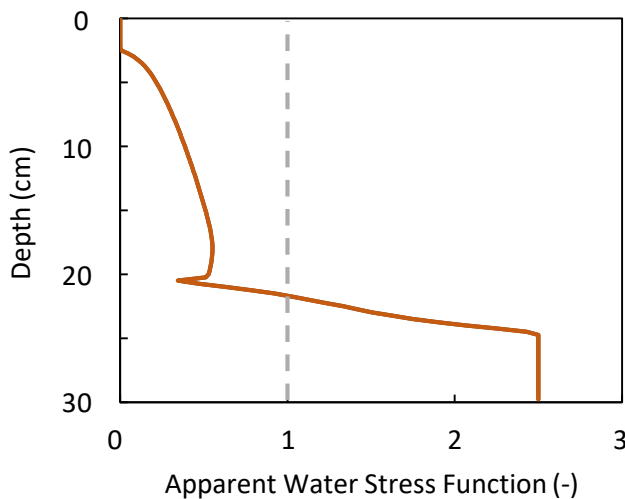


図 1.12 みかけの水ストレス応答関数 α' の土中分布（2019/8/13 正午の分布）

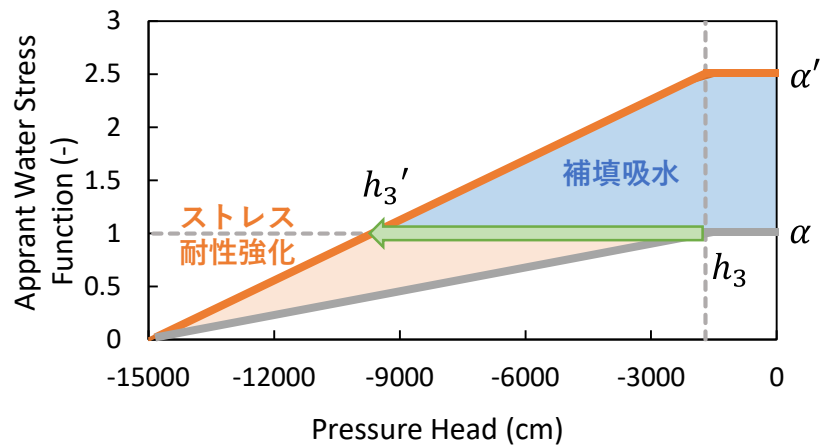


図 1.13 補填吸水モデルの効果を含めた Feddes モデルのみかけの水ストレス応答関数 α'
(2019/8/13 正午)

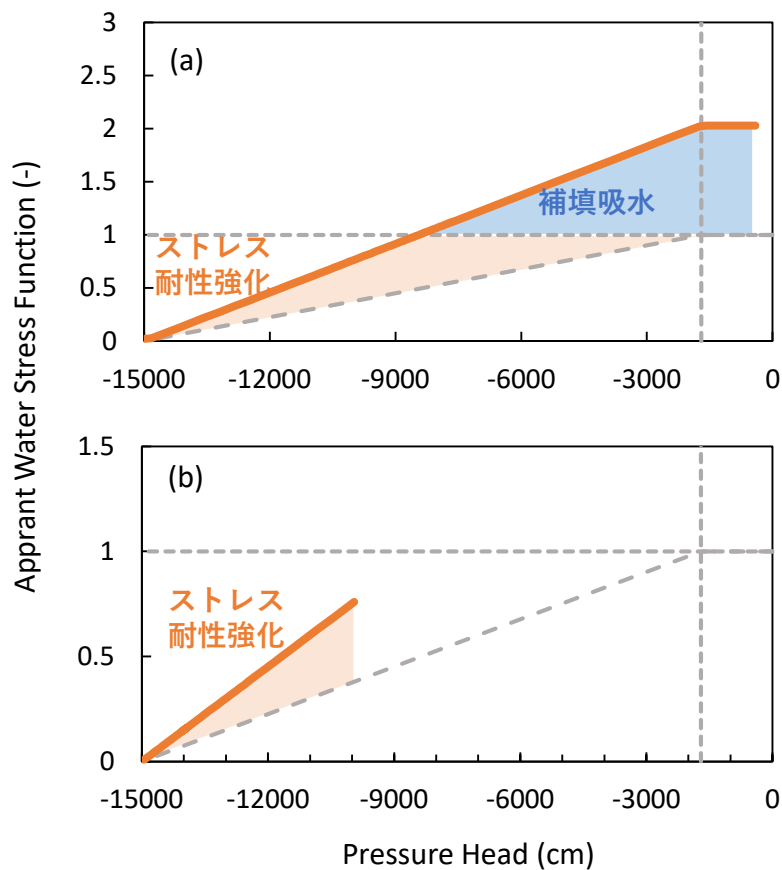


図 1.14 みかけの水ストレス応答関数 α' の存在範囲 (a)補填吸水とストレス耐性強化による増加に寄与する場合 (2019/8/10 正午) (b)ストレス耐性強化による増加にのみ寄与する場合 (2018/7/23 正午)

1.4 目的

本研究では、重量ライシメータを用いたダイズ栽培実験で、水ストレスを受けているダイズの根の吸水特性を明らかにすることを目的とした。水ストレス下の補填吸水を表現する補填吸水モデルの適用事例は少なく、また、根の吸水分布を定量的に評価した研究事例も少ない。そこで本研究では、補填吸水モデルを用いた水分移動モデルを用いて、ダイズが生育中の乾燥期間における土中の水分移動データを解析した。解析には、水分移動モデルに関わるパラメータとして、水ストレス応答関数 α 、吸水強度分布 β 、可能蒸発速度 T_p 、可能蒸発速度 E_p 、水分特性曲線、不飽和透水係数を決定する必要がある。また、可能蒸発速度 T_p と可能蒸発速度 E_p を決定するためには、気象データから求めた可能蒸発散速度 ET_p を分離するための、蒸発と蒸散の割合を決めなければならない。圃場のデータに対して、これらのパラメータを決定する手法は確立しておらず、その手法として、測定した蒸発散速度 ET_a と土中水圧力 h を目的関数にして、ダイズの生長を考慮して段階的に水分移動パラメータの推定をした。そして、推定したパラメータによる補填吸水モデルを適用した吸水速度分布より、水ストレスが生じたときの根の吸水特性を検討した。

第 2 章では、ダイズ栽培圃場において不攪乱土を充填した重量ライシメータを用いたダイズ栽培実験の実験方法、測定した実蒸発散速度 ET_a 、土中水圧力 h 、体積含水率 θ 、生育データ、気象データより求めた可能蒸発散速度 ET_p 等の結果と考察を示した。

第 3 章では、乾燥過程の実蒸発散速度 ET_a と土中水圧力 h の変化を再現する補填吸水モデルを用いた水分移動モデルのパラメータを段階的に推定する手順を示した。まず、根の生長が大きかった 2019 年のデータを用いてパラメータを推定し、そのうえで 2018 年の 2 期間のデータを解析して、提案した推定手順の検証を行った。

第 4 章では、根の生長過程の補填吸水モデルに基づく吸水速度分布の変化を求め、水ストレス下の根の吸水特性について考察した。そして、補填吸水モデルによる吸水増加量に対して、下方へ生長した根による湿潤な下層からの補填吸水と、乾燥が進行した上層でのストレス耐性強化による吸水増加に分離して、補填吸水量を定量的に把握することを試みた。そして、補填吸水モデルが表す水ストレス下の根の吸水特性について考察した。

第2章 ダイズ栽培実験

三重大学付属農場内ダイズ栽培圃場において、不攪乱土を充填した内径30 cm, 高さ30 cmの重量ライシメータを設置した。そして、ダイズ栽培実験期間のライシメータの重量変化より実蒸発散速度 ET_a , 土中水分データを測定した。また、気象データから可能蒸発速度 ET_p を求め、その日内の経時変化は日射量変化に比例すると仮定した。

本章では、実験環境、実験装置および実験方法を示し、測定した実蒸発散速度 ET_a , 土中水圧力 h , 体積含水率 θ , 生育データ、気象データより求めた可能蒸発散速度 ET_p 等の結果と考察を示す。

2.1 実験方法

重量ライシメータを用いたダイズ栽培実験は、2018年6月から10月および2019年6月から10月に同一圃場でそれぞれ行い、2期間の実験環境と測定項目はほぼ同じであった。詳細は次項以降に示す。

2.1.1 実験環境

三重大学付属農場内（図 2.1）の青色部に位置するダイズ栽培圃場において、ダイズの播種より刈り取りまでの期間を、2018年および2019年それぞれで測定を行った。重量ライシメータと気象センサを図 2.2 のように配置し、実蒸発散速度 ET_a と土中水圧力 h と体積含水率 θ を重量ライシメータで、気温や降水量等を気象センサで測定した。植生データは、被覆率は被覆率計測エリアの空中撮影画像より被覆率を算出、草高は重量ライシメータのサンプル測定と圃場全体における任意のサンプル測定、葉面積指数（LAI）の測定には圃場全体から1株を任意抽出して行った。使用したダイズ品種は“フクユタカ”で、圃場では条間70 cm, 株間20 cmとし、1株に3～5粒を、2018年は6月12日に、2019年は7月8日に播種した。重量ライシメータでは直径30 cm中に20 cm間隔で2株を播種した。基本的に灌漑は天水のみとしたが、2018年では7月中旬から8月中旬にかけて無降雨期間が長期であったため、7月24日と8月8日に灌漑を行った。

また、対象圃場は表層から20 cm深付近を境界とする0～20 cm深の上層と20 cm以深の下層からなっていることが確認された（図 2.3）。下層は、粘土成分が多く、透水性が悪いことが先行研究からも知られている。



図 2.1 三重大学附属農場

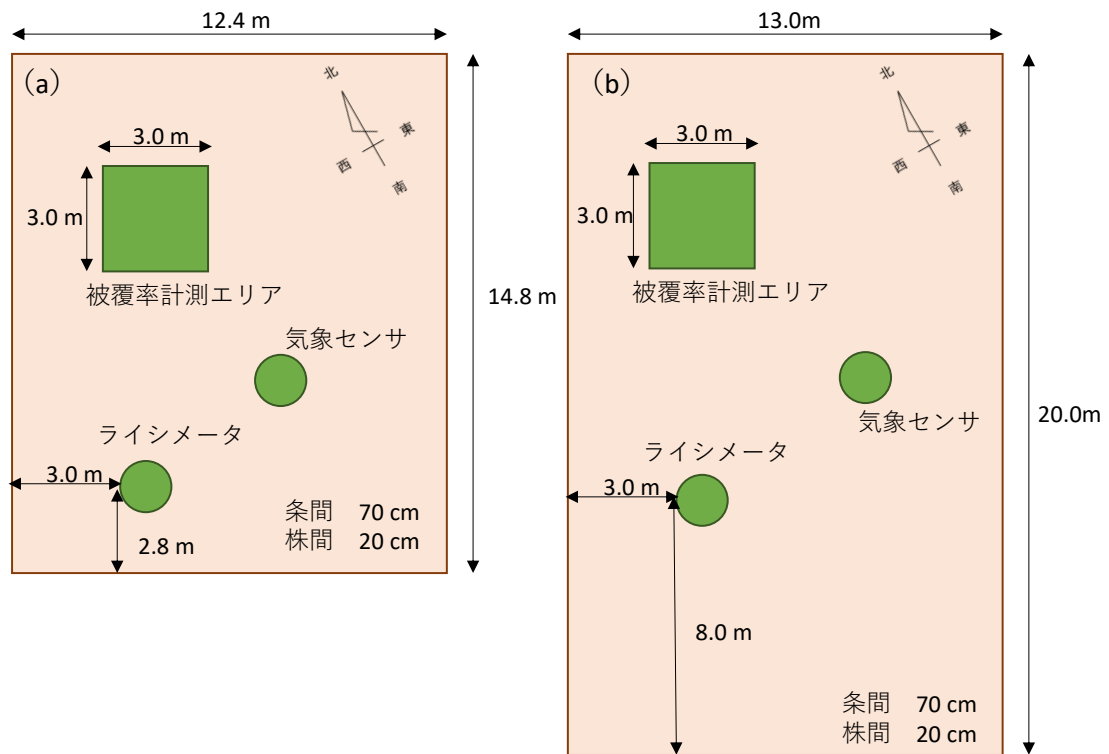


図 2.2 圃場配置図 (a)2018 年 (b)2019 年

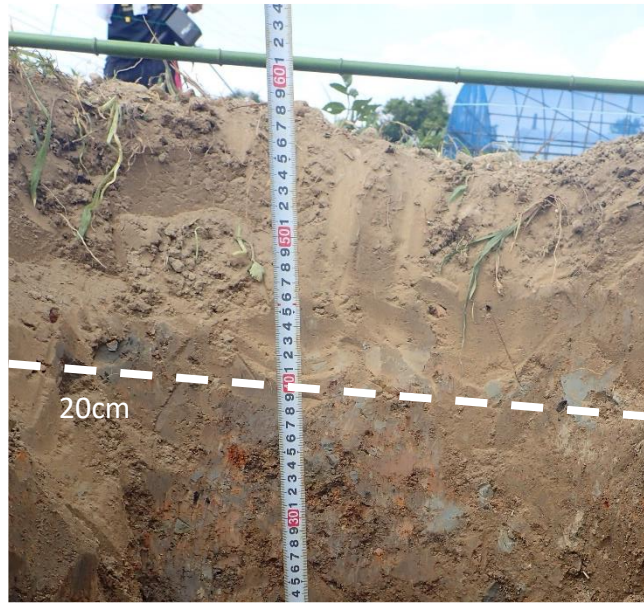


図 2.3 圃場の断面図

2.1.2 実蒸発散速度 ET_a と土中水分の測定

重量ライシメータの重量変化より蒸発散速度 ET_a を測定した。ライシメータを使用場の不攪乱土を充填し、電子天秤で重量変化を測定した、重量変化の測定と同時に、表層より5 cm 深、15 cm 深、25 cm 深に、それぞれ土中水圧力測定のために MPS-2 を、土壌水分量測定のために 5TE を埋設した。

使用機器

スマートフィールドライシメータ (旧 UMS 社)

スマートフィールドライシメータ (以下、ライシメータという) は、シリンダ内土壌の蒸発散による水分減少や降雨などによる水分増加を電子天秤で測定するものであり、シリンダ内土壌の水分がライシメータ周辺の土壌と同様となるように、給排水システムが備えられている。本研究では、シリンダの内径30 cm、高さ30 cmのライシメータを使用した。圃場への設置は図 2.3 のように行った。ライシメータの構造は図 2.5 のとおりで、シリンダには、5 cm 深、15 cm 深、25 cm 深にセンサが埋設できるように開口部が設けられている。給排水システムは、ライシメータ下端の土中水圧力と、ライシメータ下端と同深度の周辺土壌に設置したテンシオメータの圧力が一致するように、フィールドボックス内の給排水タンクを通じて給水と排水を行う。シリンダの底蓋 (名称を VTENS という) はシリカが充填され、その中にサクシオンカップがあり、土中水圧力を測定している。給排水量はタンク下設置の電子天秤で測定する。したがって、シリンダ内土壌の重量変化と給排水タンクの重量変化を加算した量がシリンダ内土壌水分の貯留量の変化量となる。

なお、ライシメータの給排水システムは、ポンプの制御に不具合が生じ、2018 年は 7 月 25 日より、2019 年は当初より停止した。そのため、本研究で用いた栽培実験は、2018 年は、7 月 25 日までは下端のフラックスは給排水システムによる変化量を与え、7 月 25 日以降はゼロフラックス条件、2019 年は当初よりライシメータの下端を閉じたフラックスゼロの条件で行った。

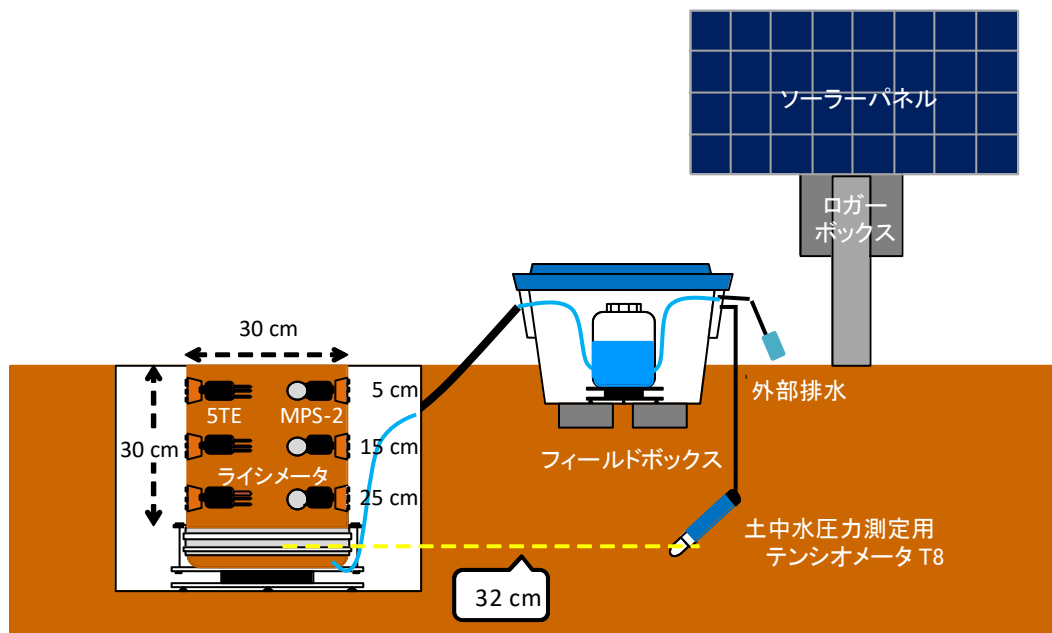


図 2.4 ライシメータ設置概要図

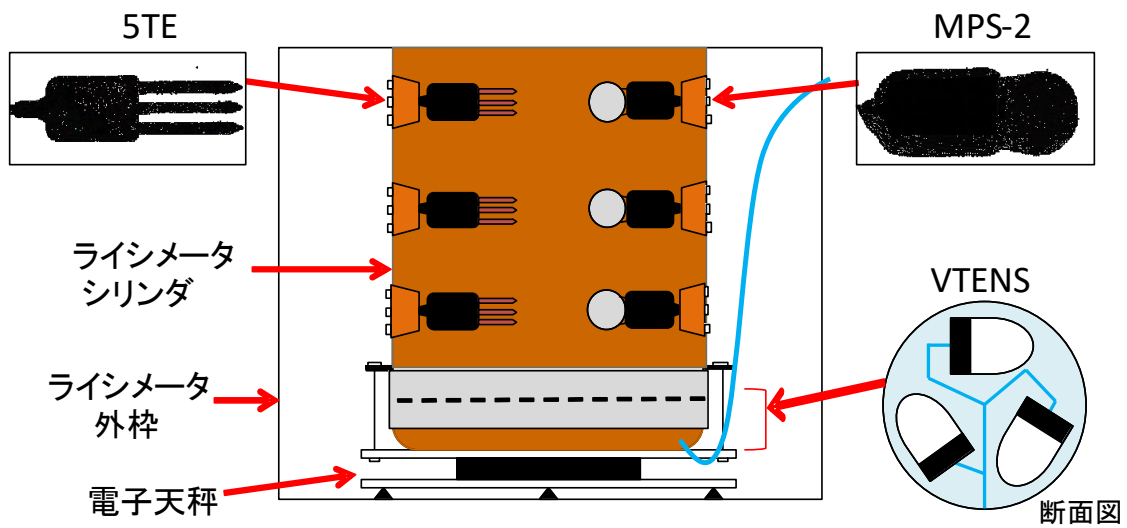


図 2.5 ライシメータの構造

水ポテンシャルセンサ MPS-2 (METER 社)

MPS-2 (図 2.6) は土中水圧力と温度を測定する誘電率式のセンサである。円形部にはステンレスカバーで挟まれた多孔質体の中にセンサがある。水ポテンシャルが周囲の土壌と平衡状態である多孔質体の誘電率をセンサで測定する。多孔質体の誘電率と水分量、および水ポテンシャルと水分量の関係が既知であることより、水ポテンシャルを測定するセンサである。測定範囲は $-100 \sim -10^6$ cm であるため、湿潤土壌より乾燥土壌の測定への適性が高い。しかし、経験的な下限値は -10^4 cm 程度である。また、センサ周囲の土壌と多孔質体が平衡状態になっていることを前提としたセンサであるため、急激な浸潤を捉えることは困難であり、緩やかに進行する乾燥を捉える場合に有用である。



図 2.6 MPS-2

土壌水分・温度・電気伝導度測定プローブ 5TE (METER 社)

5TE (図 2.7) は、誘電率から土壌水分を測定する誘電率土壌水分センサである。測定範囲は誘電率1～80であり、Topp (1980) らが経験的に得た式 (Topp 式) である式 (2.1) でその誘電率を変換して体積含水率を出力する。

$$\theta_{Topp} = -5.3 \cdot 10^{-2} + 2.92 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon - 5.5 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon^2 + 4.3 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon^3 \quad (2.1)$$

ここで、 θ_{Topp} は体積含水率 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)、 ε は誘電率 (–) である。

しかし、土性の違いにより誘電率 ε と体積含水率 θ_{Topp} の関係をセンサごとに補正する必要があるため、補正は武藤ら (2017) が提案したセンサ出力値の体積含水率 θ_{Topp} に補正係数 C を乗じる、式 (2.2) によって行った。

$$\theta = C \cdot \theta_{Topp} \quad (2.2)$$

補正係数 C はライシメータ解体時に採取したサンプルを炉乾法にて得た体積含水率 θ_{mes} とその時 5TE が出力した体積含水率 θ_{Topp} の比 ($\theta_{mes}/\theta_{Topp}$) とした。なお、サンプルの採取は5 cm深、15 cm深、25 cm深の3深度ごとに3反復行い、各深度の平均体積含水率より深度ごとに補正係数を決定した。

また、このセンサは土壌水分と温度と電気伝導度 (EC) の同時測定が可能である。



図 2.7 5TE

生育データの測定

生育データは、被覆率、草高、葉面積指数を測定した。

被覆率

圃場内に設定した被覆率計測エリア（3 m × 3 m）を空中撮影し、その画像解析により被覆率を算出した。空中撮影は、2018 年では長尺デジカメ棒の先端に取り付けたデジタルカメラ（図 2.8）で、2019 年ではデジタルカメラ搭載の小型ドローン Spark（図 2.9）で行った。

画像解析方法は付録 A-1 に示す。



図 2.8 長尺デジカメ棒による空中撮影風景



図 2.9 小型ドローン Spark（DJI 社製）

草高

草高の測定は、ライシメータと圃場でそれぞれ行い、それぞれの測定サンプルの平均値を草高とした。ライシメータは2株を、圃場では任意の15～20株程度をサンプルとした。草高は、地表面からダイズが自立した状態の頂点までを物差しで測定した（図 2.10）。



図 2.10 草高の測定

葉面積指数（LAI : Leaf Area Index）

葉面積指数（以下、LAI という）は、単位面積あたりの葉面積の割合であり、単位面積に存在する株数に1株あたりの葉面積を乗じて算出した。LAI の測定は、任意の1株を抽出した刈り取り法で行った。葉面積は1株に存在する葉をすべてスキャンした画像の画像解析によって求めた。

画像解析の方法は、付録 A-2 に示す。

2.1.3 気象センサによる各種測定

ウェザーステーションに設定された各種気象センサで気温、相対湿度、風速、降水量、放射量を測定した。温湿度計、雨量計、四成分放射収支計は地上1.5 mに、風向・風速計は地上2 mに設置した（図 2.11）。これら気象データは、可能蒸発散速度 ET_p 算出の基礎データとなるペンマンの蒸発散速度 ET_{pen} の算出に用いられた。

使用機器

温湿度計 HMP-155D ・ 横型強制通風筒 PVC-03-DC

温湿度計は、湿度計側には高分子薄膜フィルムセンサ、温度計側には厚膜抵抗センサ（Pt100）を用い、各センサはプローブ先端の焼結 PTFE フィルタによって保護されている。温度の測定可能範囲は $-80 \sim 60^{\circ}\text{C}$ である。湿度の測定可能範囲は $0 \sim 100\% \text{RH}$ である。

温湿度計を直射日光から守り正確な温湿度を測るために、強制通風筒を用いる。横型強制通風筒は地表面と水平に設置し、内蔵されたモーターファンで空気を強制的に通風させる。本実験では毎時15～30分と45～00分に通風を行った。通風筒はステンレスの二重管構造のため、放射の影響は小さい。

風向・風速計 Met One 034B

高さ24.4 cm、半径 10.7 cmで三杯式風速計と矢羽式風向計を統合させた風向・風速計で、地表面から高さ2 m以上に取り付ける必要がある。風速の測定可能範囲は $0 \sim 75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ である。

雨量計 TE525

転倒桁式の雨量計である。上部の受水器で降雨を集め、内部にある転倒桁が降水量0.1 mm相当の水量で満たされると、1転倒してパルスを発する。転倒回数（パルス数）を計測し、その回数に0.1を乗じた値を単位時間当たりの雨量とする。

四成分放射収支計 NR01

ドーム状の短波放射センサと円形平面状の長波放射センサがそれぞれ上下についており、センサは直径 11.2 cmの傘状の放射よけカバーで覆われている。太陽光による入射光および地表面におけるその反射光を短波放射、地球と大気からの赤外線放射光を長波放射として測定する。



図 2.11 ウェザーステーションの各気象センサ

2.2 実験結果

2018 年は 6 月 23 日より 10 月 31 日までを、2019 年は 6 月 25 日より 10 月 28 日までを計測した。2018 年栽培実験結果と 2019 年栽培実験結果を測定項目ごとに次項以降に示す。ただし、気象データは付録 A-3 に示す。

2.2.1 解析対象期間の選定

2018 年と 2019 年の現場観測において、それぞれの年で 7 日間を超える無降雨による乾燥期間が観測された。図 2.12 に 2018 年の生育データと深度別土中水圧力を、図 2.13 に 2019 年の生育データと深度別土中水圧力を示す。2018 年では、7 月 10 日～7 月 23 日と 7 月 30 日～8 月 7 日の 2 回の乾燥期間を、2019 年では、7 月 29 日～8 月 13 日の乾燥期間を観測した。その期間のダイズは、生長中であり、水ストレス下にあったため、この 3 期間を次章以降の水分移動モデルによる解析対象期間とした。以降、2018 年の 1 回目の乾燥期間を 2018 年 1 期乾燥期間、2018 年の 2 回目の乾燥期間を 2018 年 2 期乾燥期間、2019 年の乾燥期間を 2019 年乾燥期間とよぶ。

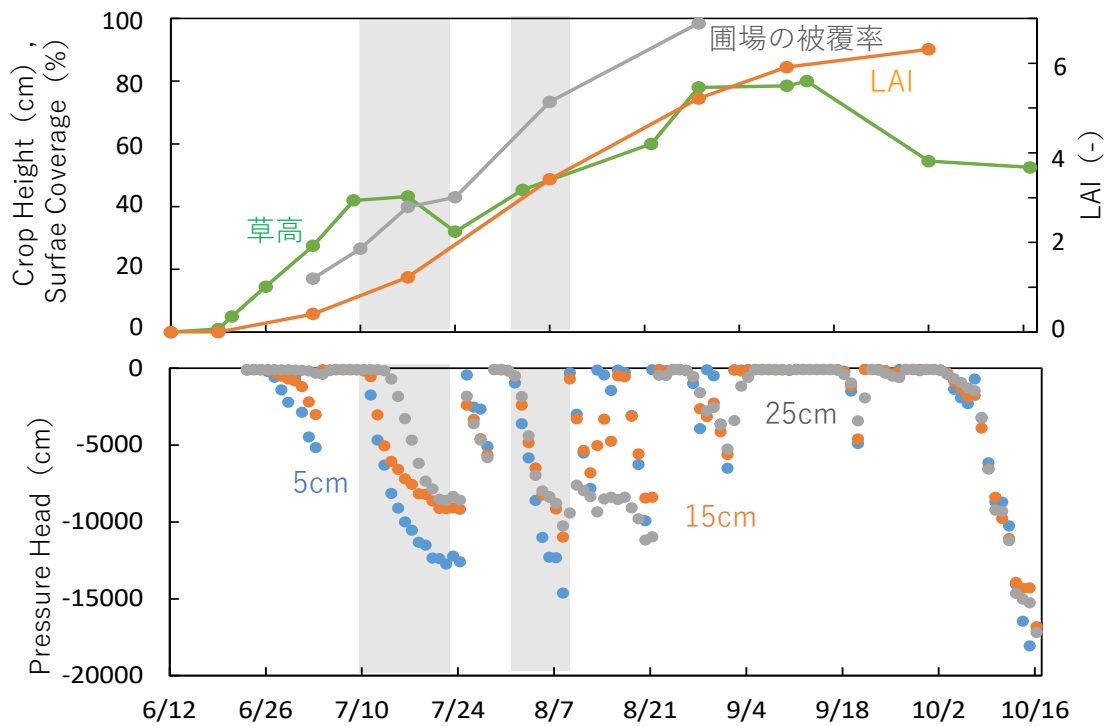


図 2.12 2018 年の生育データと深度別土中水圧力 ※網掛部分は長期乾燥期間を示す

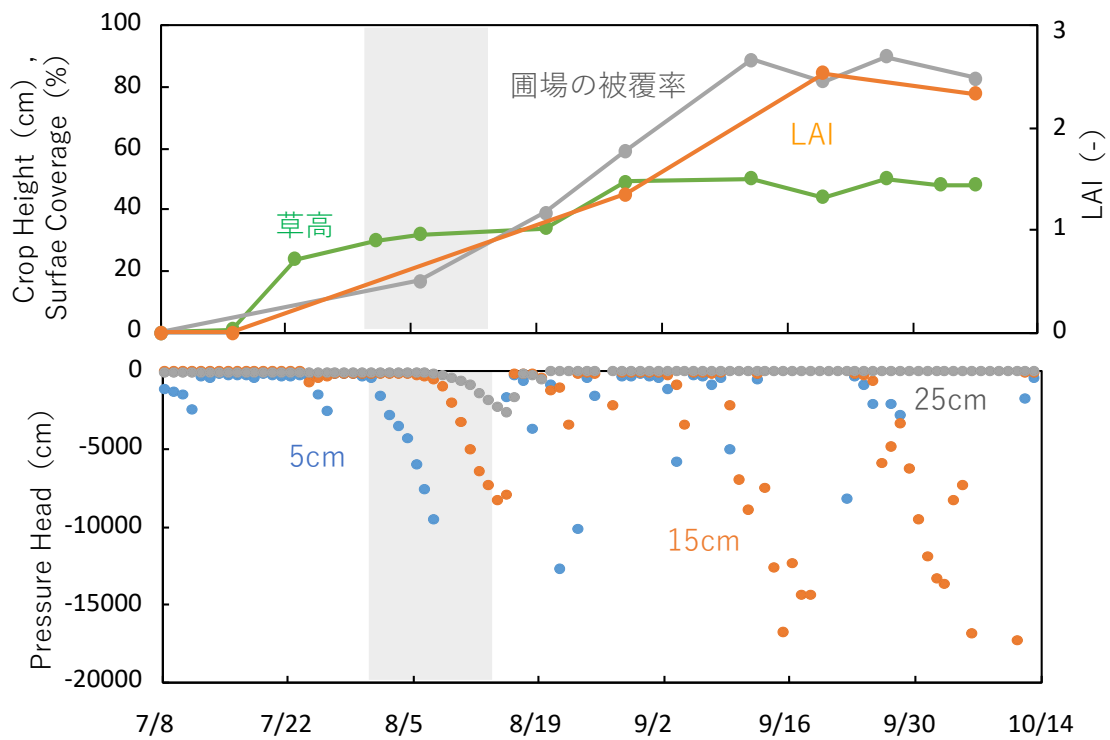


図 2.13 2019 年の生育データと深度別土中水圧力 ※網掛部分は長期乾燥期間を示す

2.2.2 実蒸発散速度 ET_a

ライシメータの重量変化より得られた実蒸発散速度 ET_a を 2018 年と 2019 年について図 2.14 へ示す。実蒸発散速度 ET_a は、0 時のライシメータ重量および排水ボトル重量と翌 0 時のそれぞれの重量の差を加算したものを本日の値とした。ただし、2019 年では当初より給排水システムが停止していたため、ライシメータ重量の差分のみとした。

前項で解析対象期間にした乾燥期間の実蒸発散速度 ET_a を図 2.15 に示す。そこからは、乾燥の進行にともなって実蒸発散速度 ET_a が徐々に減少したことが読み取れる。2018 年 1 期乾燥期間は図 2.15(a)に、2018 年 2 期乾燥期間は図 2.15(b)に示す。これらは、実蒸発散速度 ET_a は緩やかに減少した。2019 年乾燥期間は図 2.15(c)に示すとおり、実蒸発散速度 ET_a が徐々に減少した後に乾燥が進行しているにもかかわらず増加および維持した部分があり、ここは非常に特徴的である。湿潤時の実蒸発散速度 ET_a は、2018 年では $1.1 \sim 1.2 \text{ cm day}^{-1}$ 、2019 年では 0.7 cm day^{-1} で、2018 年より 2019 年のほうが小さく、後述の生育データでも触れるが、これはダイズが小さかったことに起因すると考えられる。

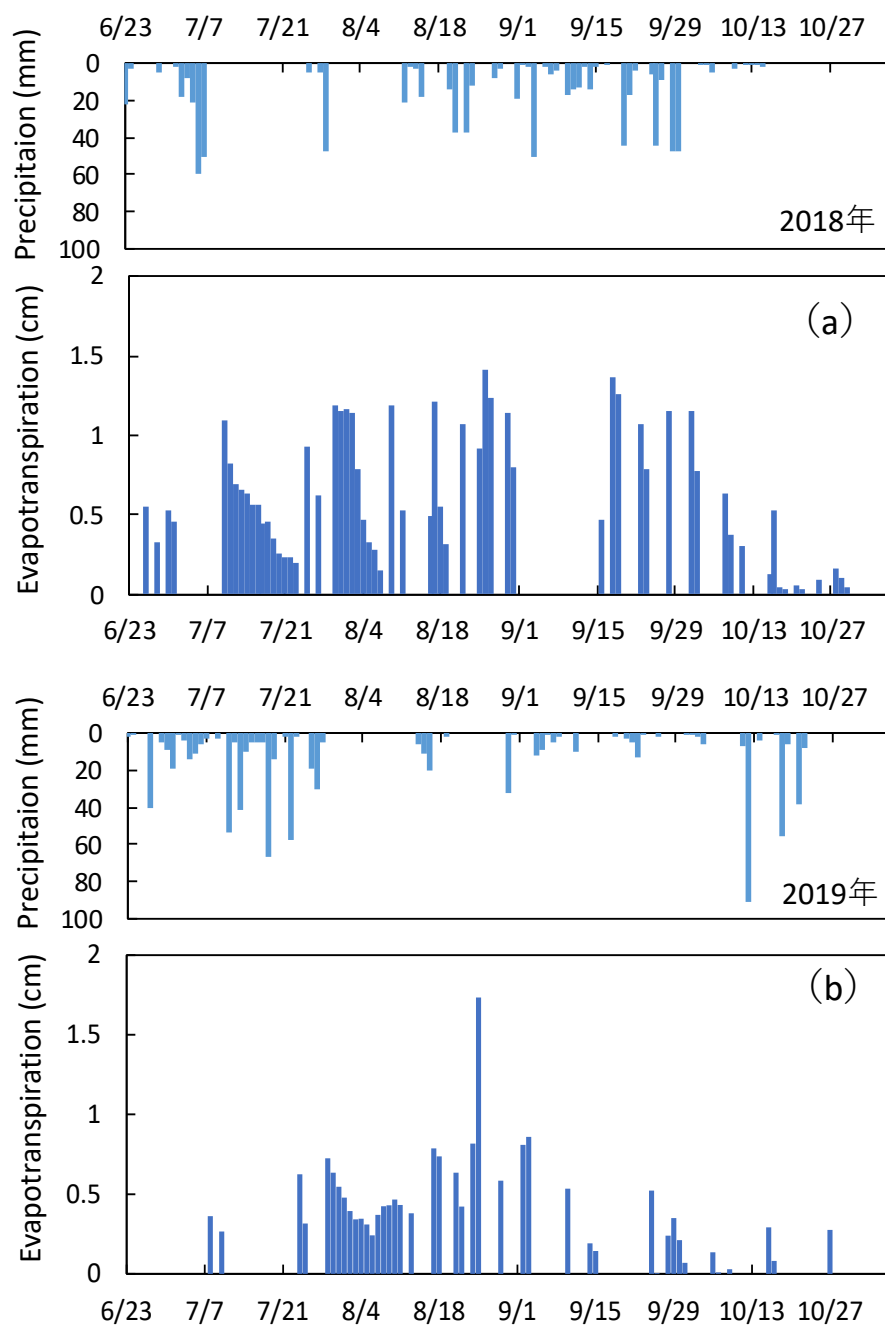


図 2.14 降水量と無降雨日の日蒸発散量の変化 (a)2018 年 (b)2019 年

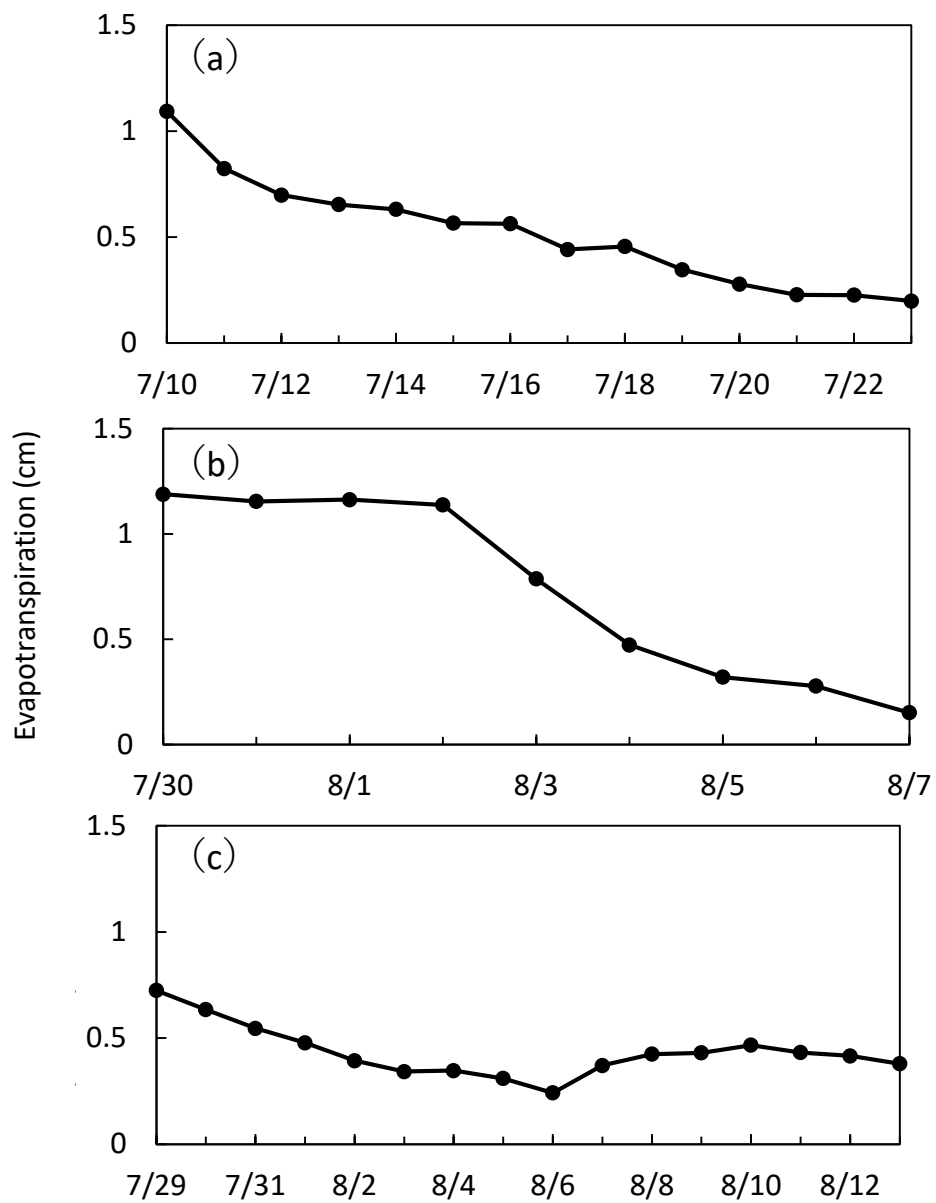


図 2.15 長期無降雨期間の日蒸発散量の経時変化 (a)2018 年 1 期乾燥期間
(b)2018 年 2 期乾燥期間 (c)2019 年乾燥期間

2.2.3 土中水データ

土中水圧力 h

水ポテンシャルセンサ MPS-2 で測定した5 cm深、15 cm深、25 cm深の土中水圧力 h の経時変化を、2018 年については図 2.16 に、2019 年については図 2.17 に示す。誘電率式センサの特徴により、土中水圧力は外温の影響で日変化が大きく、日中の測定値は実際の値よりも高い値を記録してしまう。そのため、外温の影響がより強く働く上層の土中水圧力は、図 2.16(a)と図 2.17(a)に見られるように 1 日の中で大きく振幅する。土中水圧力変化の傾向を捉えるために、三口（2018）が示した外温の影響が小さい時刻 7 時の測定値を図 2.16(b)と図 2.17(b)で変化傾向を示した。2018 年の測定値は、 $-100 \sim -15000$ cmの範囲だった。一方、2019 年 8 月 8 日以降の5 cm深の測定値は、MPS-2 の下限値と実データの振幅をした。これはセンサと土壌の密着が悪くなり、センサ周辺に空気の層ができたことによると考えられる。圧力変化の傾向をみるために、MPS-2 の下限値データを除いて図 2.17(b)を示した。なお、2019 年では15 cm深に埋設したセンサが稼働しなかったため、図 2.17 の測定値はライシメータシリンダ表面から15 cm深へ埋設したセンサの測定値であった。

解析対象期間の時刻 7 時の測定値をそれぞれ図 2.18 に示す。図 2.18(a)の 2018 年 1 期乾燥期間では、5 cm深および15 cm深が先行して減少し、25 cm深は遅れて減少した。図 2.18(b)の 2018 年 2 期乾燥期間では、すべての深さで同時に減少した。図 2.18(c)の 2019 年乾燥期間では、5 cm深が先行して減少し、15 cm深と25 cm深は遅れて減少し、25 cm深の減少幅は15 cm深と比較して小さかった。根の深さを考えると、2018 年 1 期乾燥期間は、期間初期の根は 25 cm 深まで伸長しており、その後 30 cm 深まで伸長したと推測する。2018 年 2 期データは、解析期間初期より 30 cm 深であった。2019 年乾燥期間は、期間初期には 15 cm 深まで伸長していたところ、徐々に伸長して 30 cm 深まで到達したと推測する。

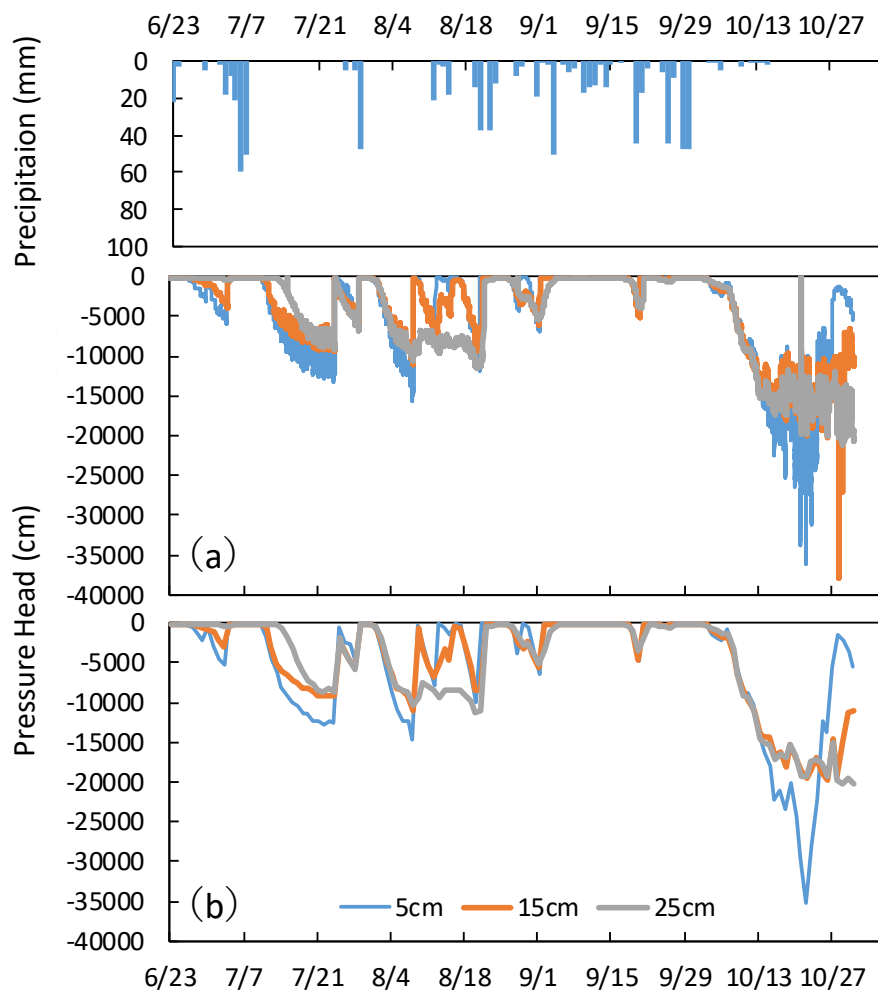


図 2.16 2018 年の降水量と土中水圧力の経時変化 (a)全データ (b)7 時データ

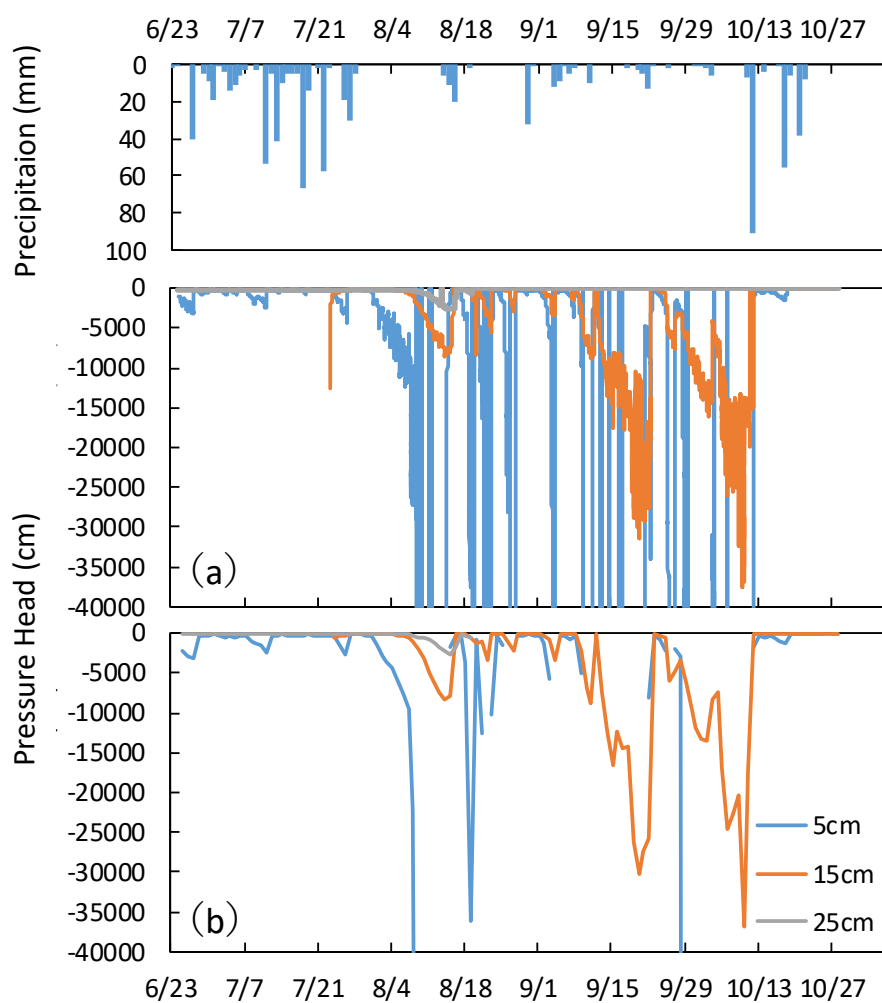


図 2.17 2019 年の降水量と土中水圧力の経時変化 (a)全データ (b)7 時データ

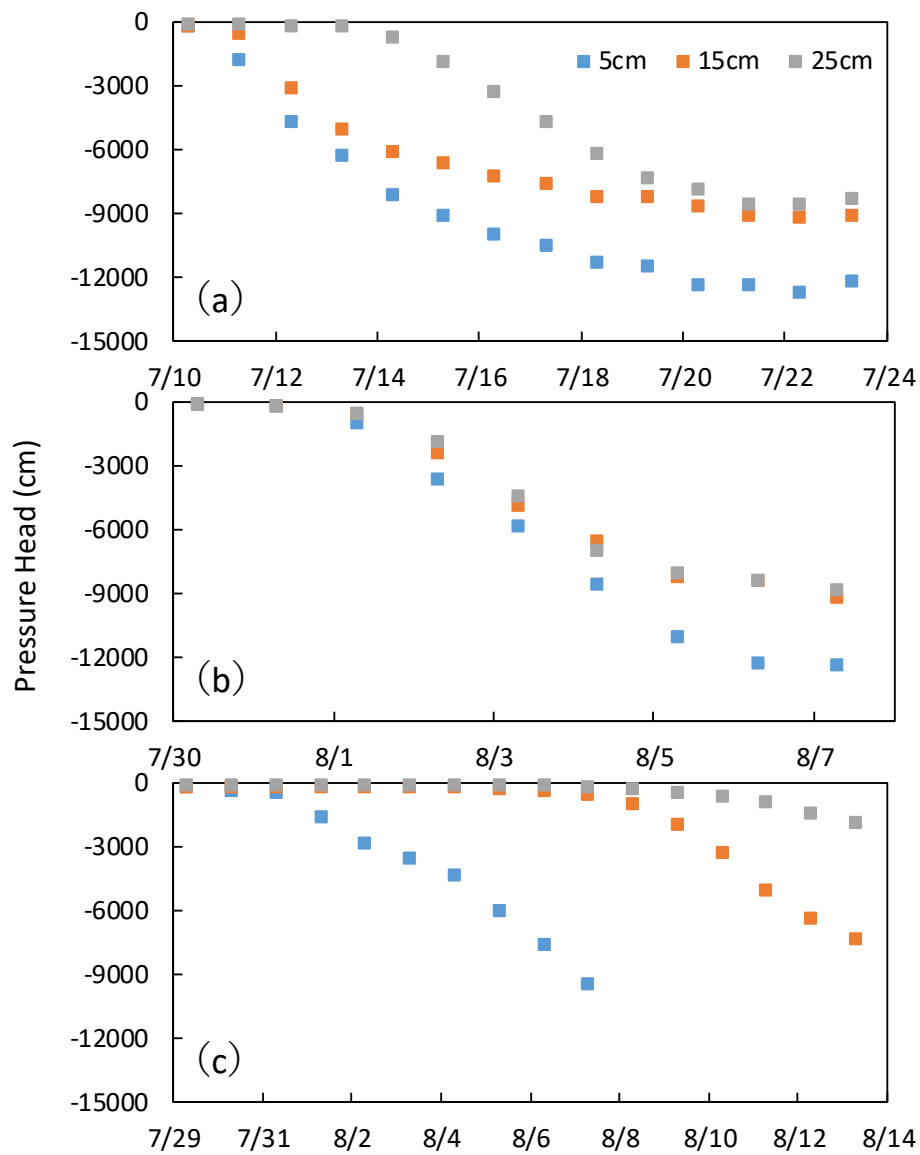


図 2.18 長期無降雨期間の土中水圧力 7 時データの経時変化 (a)2018 年 1 期乾燥期間 (b)2018 年 2 期乾燥期間 (c)2019 年乾燥期間

体積含水率 θ

土壌水分センサ 5 TE で測定した体積含水率 θ （補正後）の 2018 年データを図 2.19 に、2019 年データを図 2.20 に示す。水ポテンシャルセンサ MPS-2 と同様に、5TE は誘電率式センサのため、外温によって振幅する。体積含水率変化の傾向を捉えるために、土中水圧力と同様、三口（2018）が示した外温の影響が小さい時刻 7 時の測定値を図 2.19 (b)と図 2.20 (b)で変化傾向を示した。また、各年の深度別補正係数 C は表 2.2 に示す。

図 2.19 の 2018 年では、7 月 29 日のように体積含水率 $0.6 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ を超過する値が複数回存在した。これはセンサと土壌の密着が悪くなり浸潤した雨水でセンサ周辺に水たまりができたと考えられる。したがって、大きな降雨後のセンサの測定値の信頼性は低いといえる。図 2.20 の 2019 年では、15 cm 深と 25 cm 深の値がほぼ一致しており、25 cm 深のほうが高い値を示した。これは補正が適正に行われていないと考えられ、こちらも信頼性は低いと思われる。

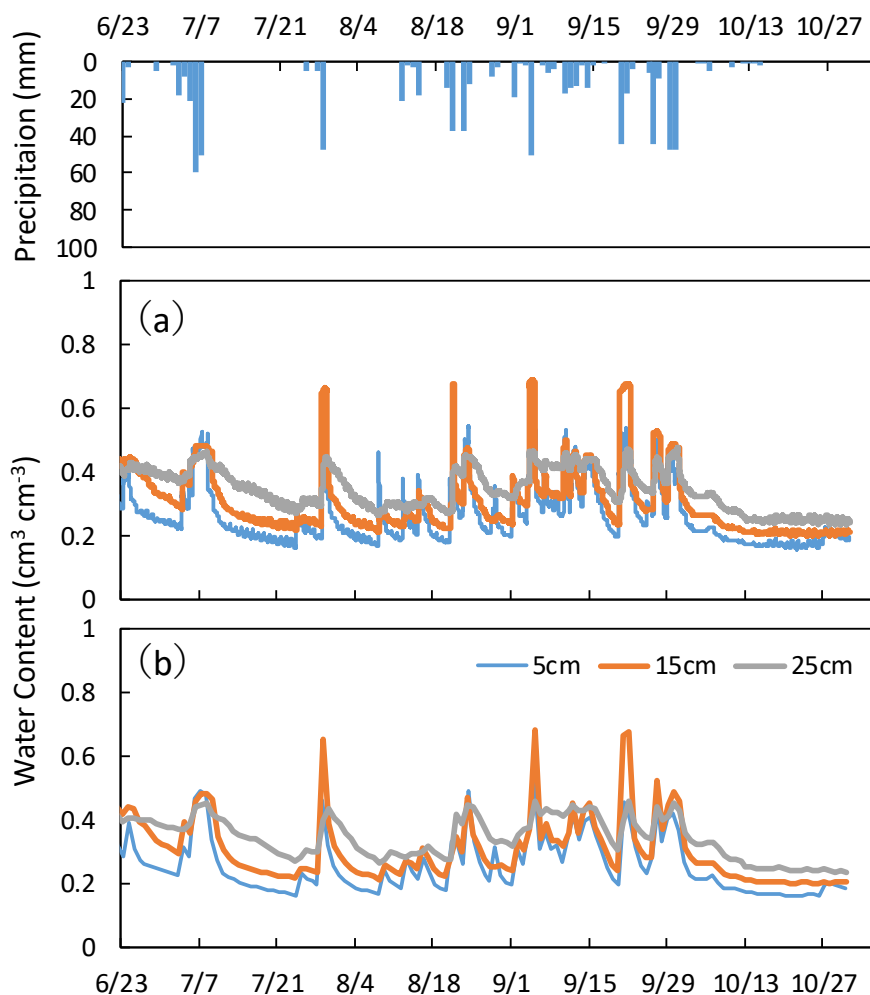


図 2.19 2018 年の降水量と体積含水率の経時変化 (a)全データ (b)7 時データ

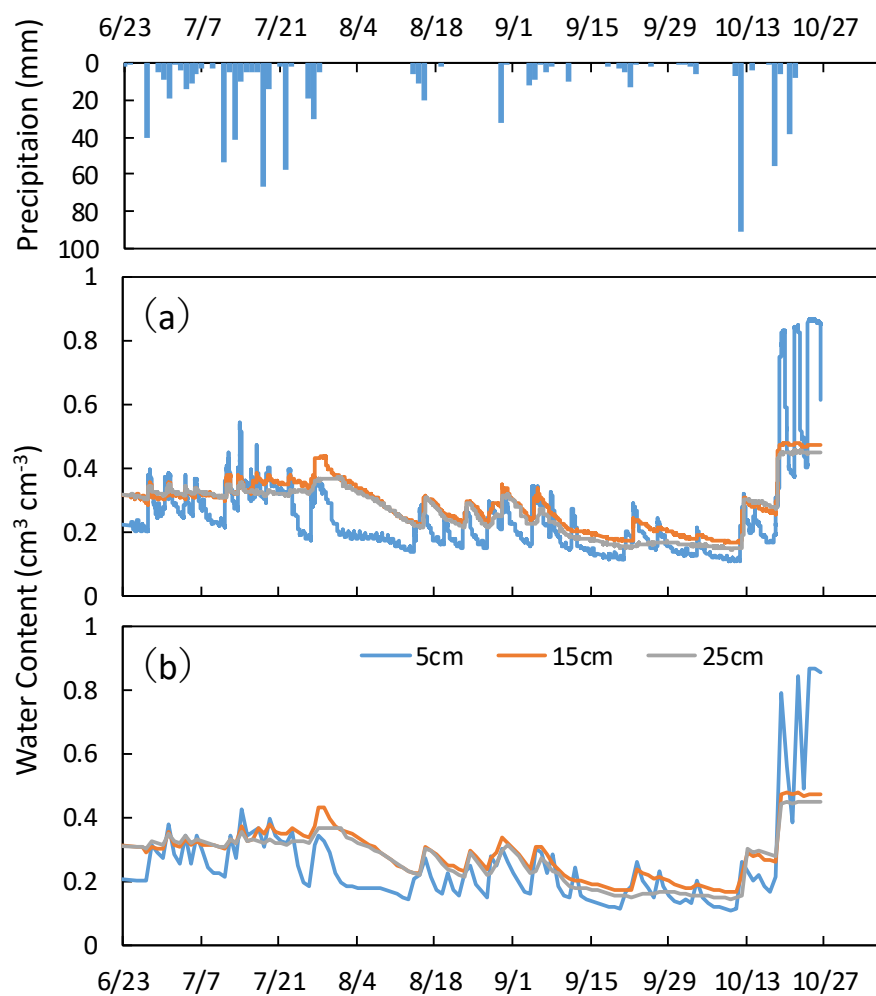


図 2.20 2019 年の降水量と体積含水率の経時変化 (a)全データ (b)7 時データ

表 2.2 各深度の補正係数 C

	補正係数 C		
	5cm 深	15cm 深	25cm 深
2018 年	1.58	1.89	3.48
2019 年	1.85	1.34	1.09

2.2.4 生育データ

ダイズの草高, 被覆率, LAI の測定結果を 2018 年は図 2.21 に, 2019 年は図 2.22 に示す. 2018 年は 6 月 12 日に播種し, 7 日後の 6 月 19 日に発芽, その後, 草高は伸長が, 7 月中旬からの長期無降雨期間で伸長率は低下し, 斜向し草高は減少に転じた. 9 月 26 日に到来した台風により倒伏し草高は減少した. 被覆率および LAI は同様な増加を示した. 2019 年は 7 月 8 日に播種し, 8 日後の 7 月 16 日に発芽, 草高の伸長率は 2018 年と比較すると低かった. 7 月下旬から 8 月中旬にかけての長期無降雨期間では, 草高の伸長の低下がみられた. LAI は草高と同様に低く, 生育が悪かったことがわかる. 被覆率の変化は, 2018 年と 2019 年は同様の傾向と示しているが, 2018 年 8 月 29 日 (播種後 78 日) の LAI 値 5.21, 2019 年 9 月 20 日 (播種後 74 日) の LAI 値 2.52, と 2019 年は低くかった. 圃場の被覆率の変化の様子を 2018 年 8 月 29 日 (図 2.24) と 2019 年 9 月 20 日 (図 2.25) を比較すると, 2018 年より 2019 年は葉が繁茂していなかったことがわかる. 図 2.24 および図 2.25 内の各写真の日付後ろのかっこ内は播種後経過日数を表す.

また, ライシメータの被覆率と圃場の被覆率の相違を図 2.23 に示す. 本研究の被覆率とは, 圃場の被覆率計測エリアの被覆率のことをいう. 圃場では 70 cm の条間が含まれた被覆率計測エリアの面積 (5 条植え) に対する被覆率であるが, ライシメータでは 1 条植えで条間がないため圃場の被覆率よりも大きくなる. 2018 年 7 月 3 日の圃場の被覆率は 17% であったが, ライシメータの断面積に対する被覆率は 17% より大きいことは図から明らかであり, ライシメータの被覆率を厳密に定めることは難しい. 次章で示すように, 水分移動モデルにおいては, 可能蒸発速度 E_p と可能蒸散速度 T_p を分離して与える必要があり, 圃場では被覆率で蒸発と蒸散の割合を近似することがある. しかし, ライシメータの場合, 根の伸長も水平方向には断面積以上に拡張することができないため, 断面積あたりの蒸散量は圃場とは異なると予測される. そのため, E_p と T_p の割合は, 単純に被覆率と関連づけることは難しいと予測される.

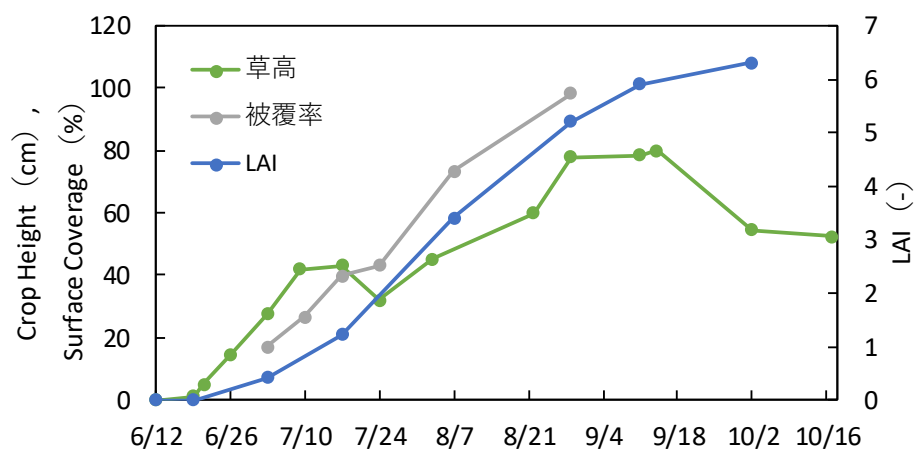


図 2.21 2018 年の生育データ

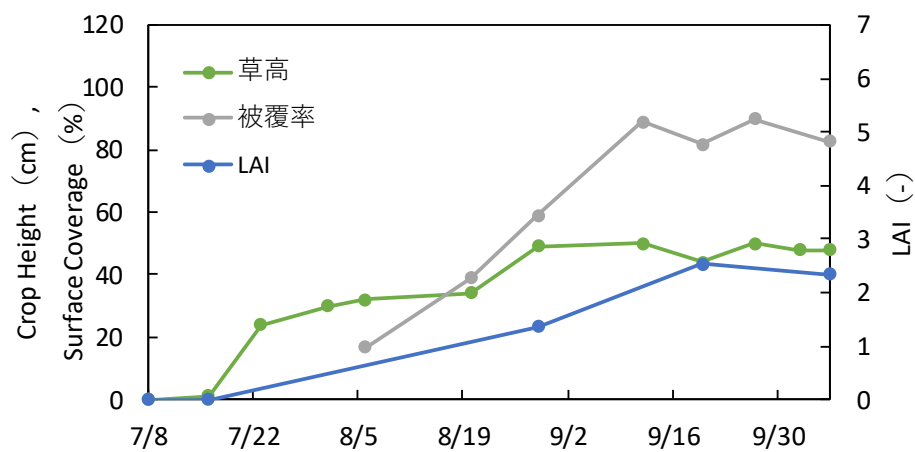


図 2.22 2019 年の生育データ

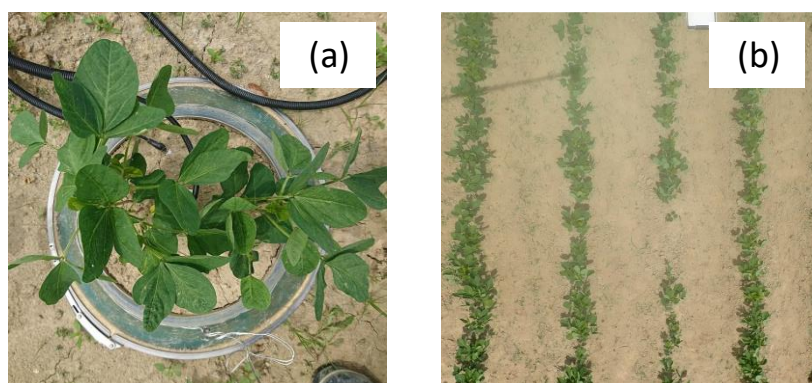


図 2.23 ライシメータと圃場の被覆率の相違 (2018 年 7 月 3 日) (a)ライシメータ
(b) 圃場

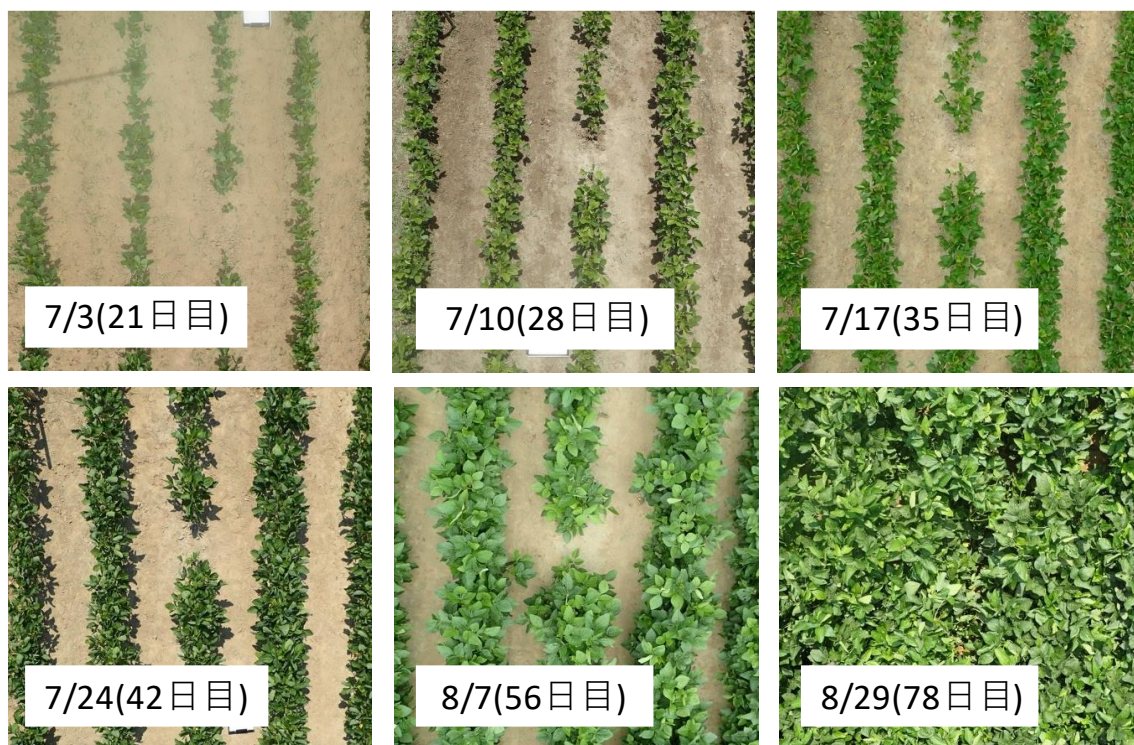


図 2.24 2018 年の被覆率の変化

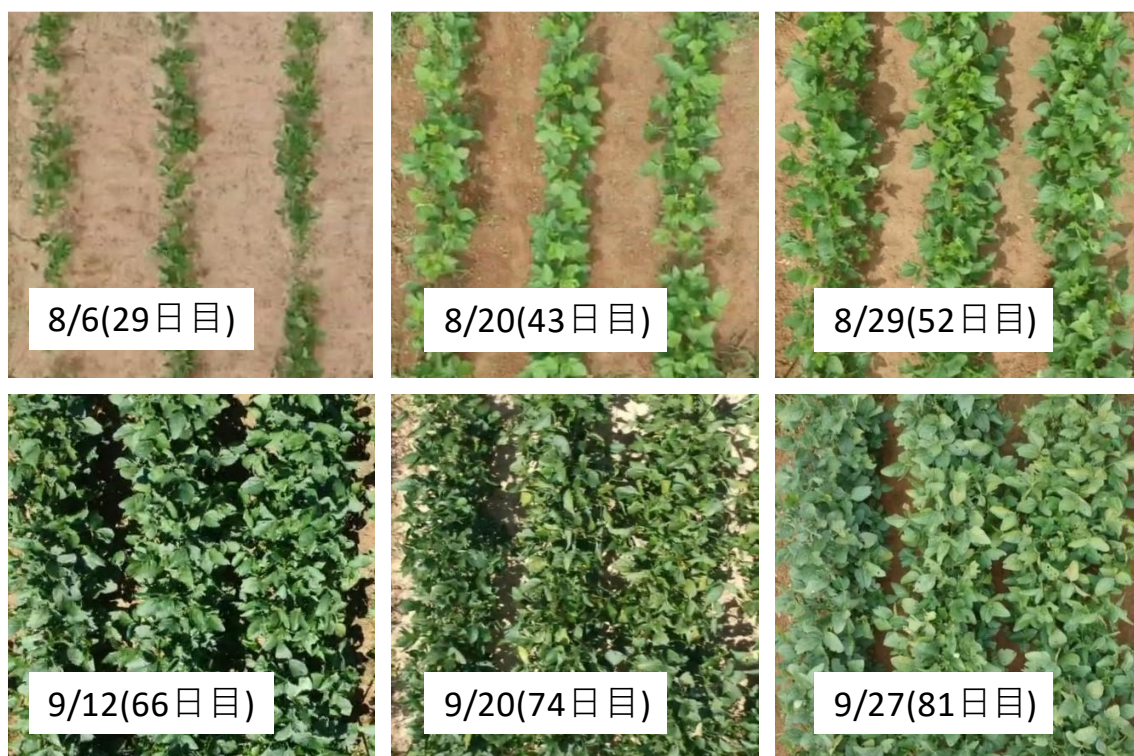


図 2.25 2019 年の被覆率の変化

2.3 可能蒸発散速度 ET_p

2.3.1 算出方法

圃場における可能蒸発散速度 ET_p は、気象データから推定される。本研究では、ペンマン式 (FAO, 1975) よりペンマンの蒸発散速度 ET_{pen} を求め (三浦ら, 1983), それに作物係数 K_c を乗じて可能蒸発散速度 ET_p を算出する方法を用いた。作物係数 K_c はダイズの生長にともない変化するものとし、可能蒸発散速度の日内の経時変化は日射量変化に比例すると仮定した。

ペンマンの蒸発散速度 ET_{pen}

ペンマンは、“水分不足が生じていなく、草丈が短く、完全に地表面を覆った草地からの蒸発散量を蒸発散位”と定義し、それを推定する式として、熱収支式と空力法の中のダルトン式を組み合わせて、ペンマン式を導いた。蒸発散位とは最大蒸発散量である。

式 (2.3) のペンマン式を用いて気象データよりペンマンの蒸発散速度 ET_{pen} を求めた。

$$ET_{pen} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{S}{l} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot f(u_2)(e_{sa} - e_a) \quad (2.3)$$

ここで、 ET_{pen} はペンマンの日蒸発散量 (mm)、 Δ は気温 t での温度飽和水蒸気圧曲線の勾配 ($\text{hPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)、 S は純放射量 (MJ m^{-2})、 γ は乾湿計定数 ($= 0.66 \text{ hPa}/^\circ\text{C}$)、 l は水の蒸発潜熱 (MJ kg^{-1})、 $f(u_2)(e_{sa} - e_a)$ はダルトン型蒸発量推定式 (mm d^{-1}) である。

温度飽和水蒸気曲線の勾配 Δ と水の蒸発潜熱 l は、温度 t ($^\circ\text{C}$) の関数であり、式 (2.4) および式 (2.5) で表される。

$$\begin{aligned} \Delta = & 0.4495 + 0.2721 \cdot 10^{-1} \cdot t + 0.9873 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 \\ & + 0.2907 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 + 0.2538 \cdot 10^{-6} \cdot t^4 \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$l = 2.5 - 0.0024 \cdot t \quad (2.5)$$

風速関数 $f(u_2)$ 、気温 t における飽和水蒸気圧 e_{sa} (hPa)、空気の水蒸気圧 e_a (hPa) はそれぞれ式 (2.6)、式 (2.7)、式 (2.8) で表される.

$$f(u_2) = 0.26 \cdot (1 + 0.54 \cdot u_2) \quad (2.6)$$

$$e_{sa} = 6.1078 \cdot \exp\left(\frac{17.2694 \cdot t}{t + 237.3}\right) \quad (2.7)$$

$$e_a = e_{sa} \cdot RH/100 \quad (2.8)$$

ここで、 u_2 は高度20 mの日平均風速 (m s^{-1})、 RH は相対湿度 (%) である.

可能蒸発散速度 ET_p の生長変化

可能蒸発散速度 ET_p は、気象データからペンマン式により計算された蒸発散速度 ET_{pen} に、主として作物の種類と生育ステージによって決まる作物係数 K_c (表 2.1) を乗じる、式(2.9)で求める.

$$ET_p = ET_{pen} \cdot K_c \quad (2.9)$$

表 2.1 ダイズのみかけの作物係数 K_c

生育ステージ	作物係数 K_c
播種・定植期	0.7
生育期	1.1
完熟期・収穫期	0.5

(引用 土地改良事業計画設計基準及び運用・解説)

しかし、作物係数 K_c は品種や栽培方法によって異なるため、本研究の解析対象期間において K_c の推定は難しい. そこで、本研究では、土が十分に湿潤状態にあるとみなせるときの実蒸発散速度 ET_a が可能蒸発散速度 ET_p であると仮定し、そのときの ET_{pen} との比から作物係数 K_c を求めた (式 (2.10)).

$$K_c = \frac{ET_p}{ET_{pen}} \approx \frac{\text{湿潤な日の} ET_a}{ET_{pen}} \quad (2.10)$$

ここでの「湿潤な日」とは、ダイズの初期しおれ点が -1700 cm 程度であることから、無降雨日かつ土層全体の土中水圧力が -1000 cm より湿潤な日のこととした. また、植物の生長により異なる生育ステージのみかけの作物係数 K_c は線形に変化するとして、推定した 2 点の作物係数 K_c を線形補間し、2 点間のそれぞれの可能蒸発散速度 ET_p を算出した.

可能蒸発散速度 ET_p の日内変化

可能蒸発散速度 ET_p は、1日の中で変化する。可能蒸発散速度 ET_p は、日射の大きい日中には大きく、日射が無くなる夜間には小さくなる。すなわち、日内の日射量（下向きの短波放射量）の変化と同様であると仮定した。1日の日射量中の2時間ごと日射量の割合より、可能蒸発散速度 ET_p の2時間ごとの変化を式（2.11）で求めた。

$$ET_p = K_c \cdot ET_{pen} \cdot \frac{12 \cdot SR_{2h}}{SR_{day}} \quad (2.11)$$

ここで、 SR_{day} は1日の日射量（ MJ m^{-2} ）、 SR_{2h} は2時間の日射量（ MJ m^{-2} ）である。

2.3.2 ペンマンの可能蒸発散量 ET_{pen} と可能蒸発散速度 ET_p

ウェザーステーションに設置された気象センサで測定された純放射量, 日平均気温, 日平均相対湿度, 高度 2 m の日平均風速より, ペンマン式 (式 (2.3)) にてペンマンの日蒸発散量 ET_{pen} を算出した. 求められたペンマンの日蒸発散量 ET_{pen} を図 2.26 に示す. 湿潤な日の実蒸発散量 ET_a を日可能蒸発散 ET_p と仮定して求めたみかけの作物係数 K_c のうち, 湿潤な日のみかけの作物係数 K_c の変化を図 2.27 に示す. 播種から生育期にかけてのみかけの作物係数 K_c はダイズの生長にともない大きくなるとして, 解析対象期間では湿潤状態の 2 点間を線形補間 (図中の点線) して作物係数 K_c の増加を表した. その勾配は 2018 年より 2019 年のほうが大きく, みかけの作物係数 K_c も 2018 年は 2019 年より大きな値となった. 解析対象期間においては, 2019 年は 2018 年より生長度が大きかったと推測する. ペンマンの日蒸発散量 ET_{pen} とみかけの作物係数 K_c より算出した解析対象期間の日可能蒸発散量 ET_p を図 2.28 に示す. 2018 年は 2019 年よりも日可能蒸発散量 ET_p が大きい値となった. また, 図 2.28(a)の 2018 年 1 期乾燥期間と図 2.28(b)の 2018 年 2 期乾燥期間を比較すると, 2018 年 2 期乾燥期間のほうが日可能蒸発散量 ET_p は大きかった. これはみかけの作物係数 K_c が大きくなったことと, 気象データから算出されるペンマンの日蒸発散量 ET_{pen} が大きかったことに起因する.

日射量の時間変化と日可能蒸発散量 ET_p の時間変化は比例すると仮定して求めた可能蒸発散速度 ET_p の日内変化を図 2.30 に示す. また, その基礎とした日射量の日内変化を図 2.29 に示す. 日射量の日内のピーク値は, 2018 年, 2019 年ともに $800 \sim 1000 \text{ W m}^{-2}$ であり, 日射量はほぼ同じ傾向だった. 可能蒸発散速度 ET_p の日内のピーク値は, 2018 年は $4 \sim 4.5 \text{ cm d}^{-1}$ だったが, 2019 年は $2 \sim 2.5 \text{ cm d}^{-1}$ と小さかった. これは, 2019 年の日可能蒸発散量が 2018 年に比べて小さかったためである.

ペンマン式より求めた可能蒸発散速度 ET_p が正しいものとして今後の解析の基礎データとして使用するが, 可能蒸発散速度 ET_p がいかに現実に近い値であるかということが, 解析結果の信頼性に影響する.

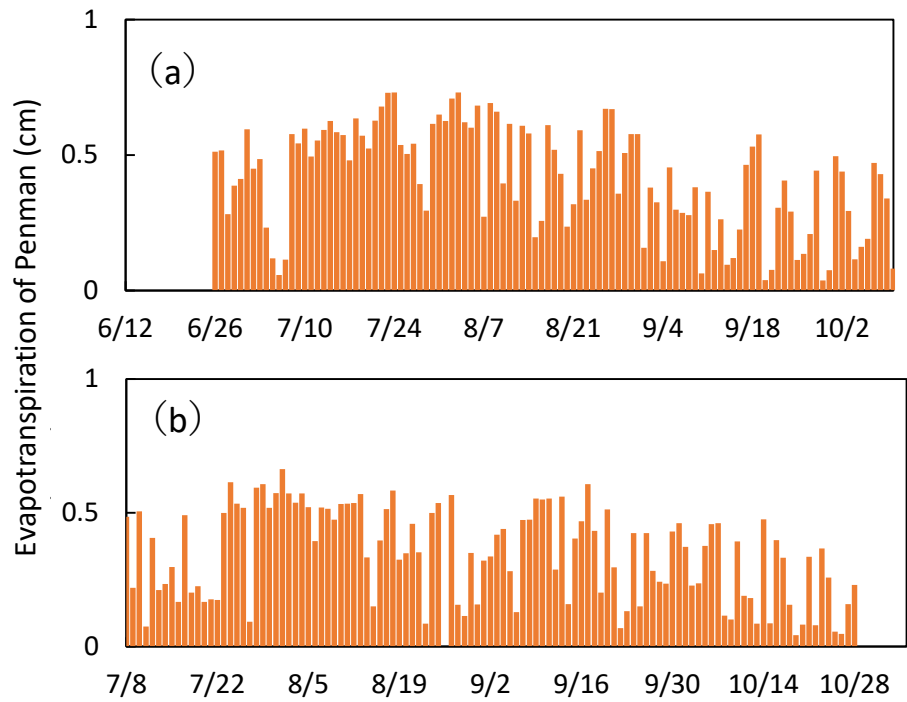


図 2.26 ペンマンの日蒸発散量の変化 (a)2018 年 (b)2019 年

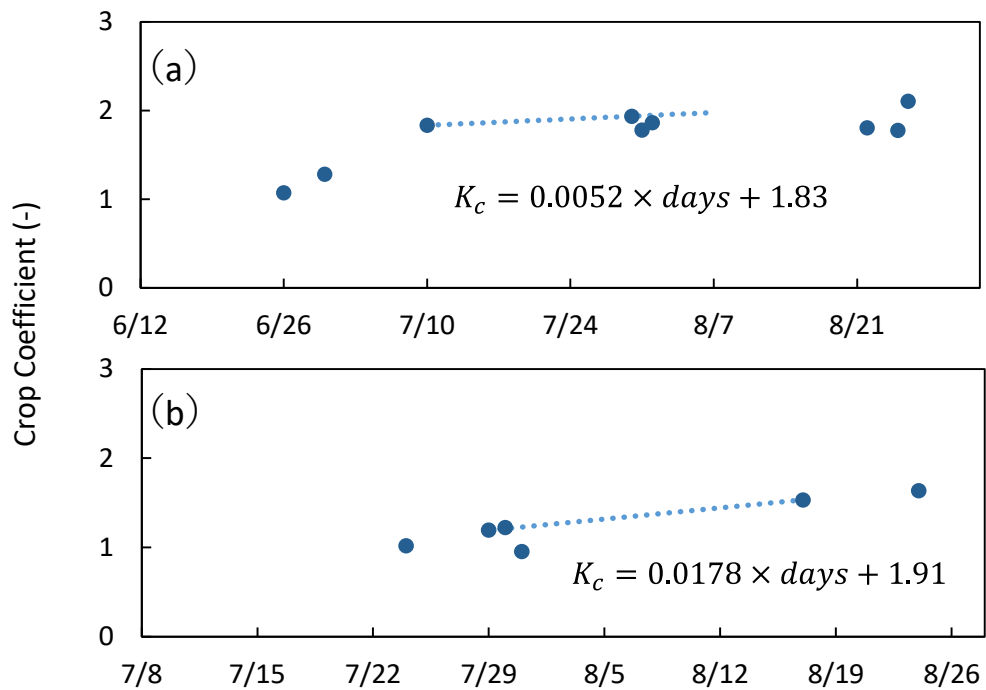


図 2.27 みかけの作物係数 K_c の変化 (a)2018 年 (b)2019 年

(注) 図中の点線は線形補間した直線 (式中の days は解析開始日からの経過日数)

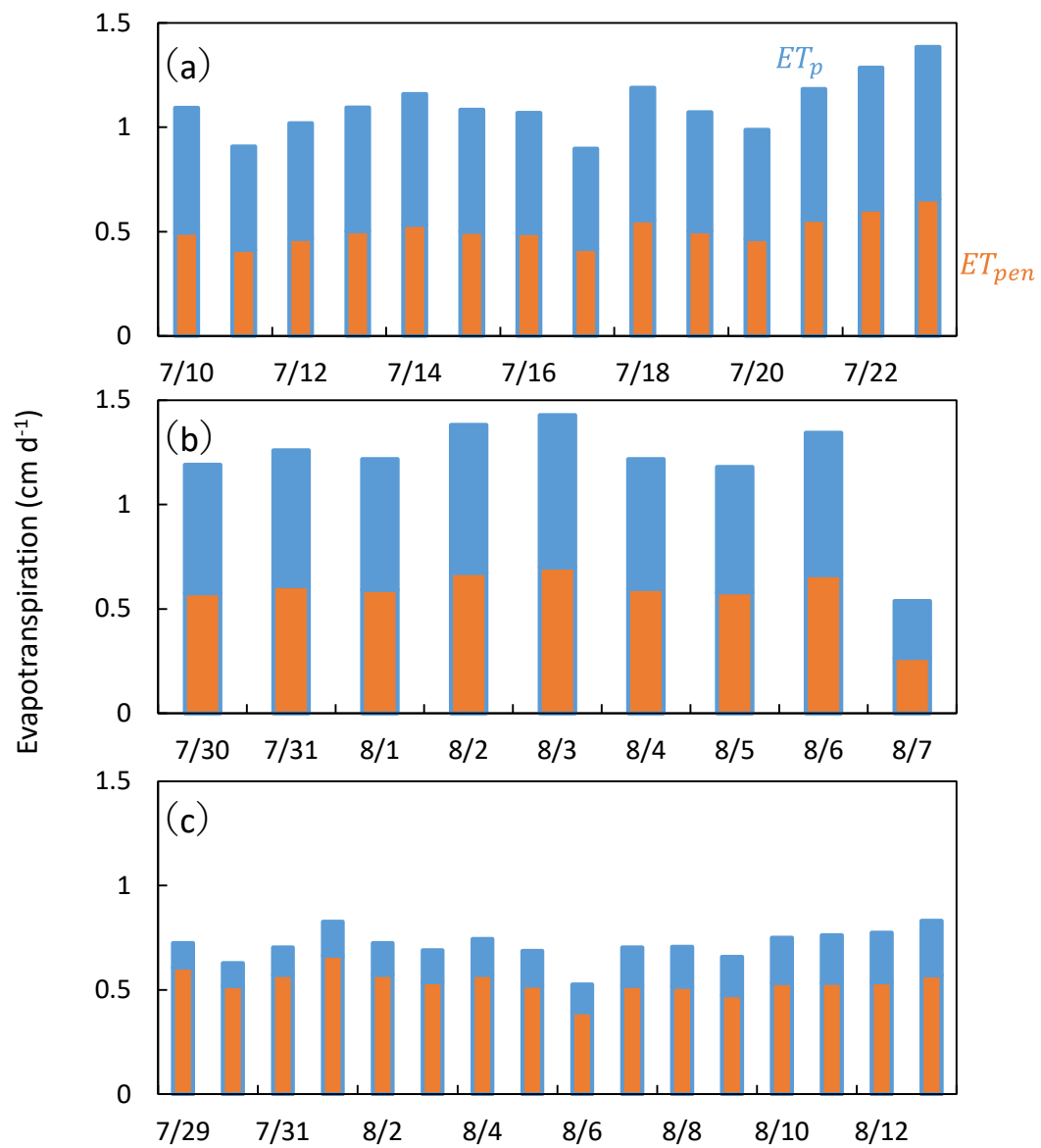


図 2.28 可能蒸発散速度の経時変化 (a)2018 年 1 期乾燥期間 (b)2018 年 2 期乾燥期間
(c)2019 年乾燥期間

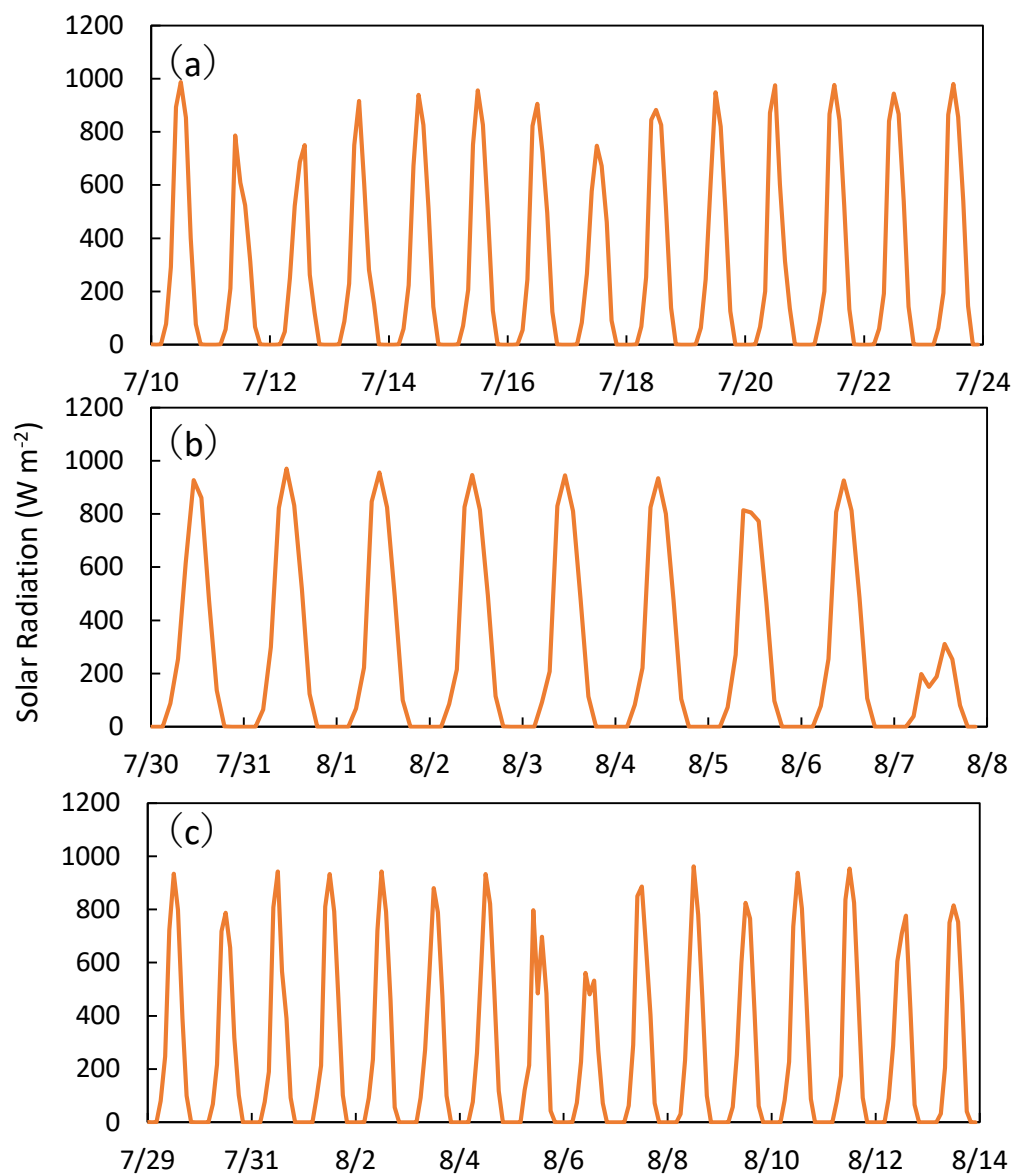


図 2.29 日射量の日内変化 (a)2018 年 1 期乾燥期間 (b)2018 年 2 期乾燥期間
(c)2019 年乾燥期間

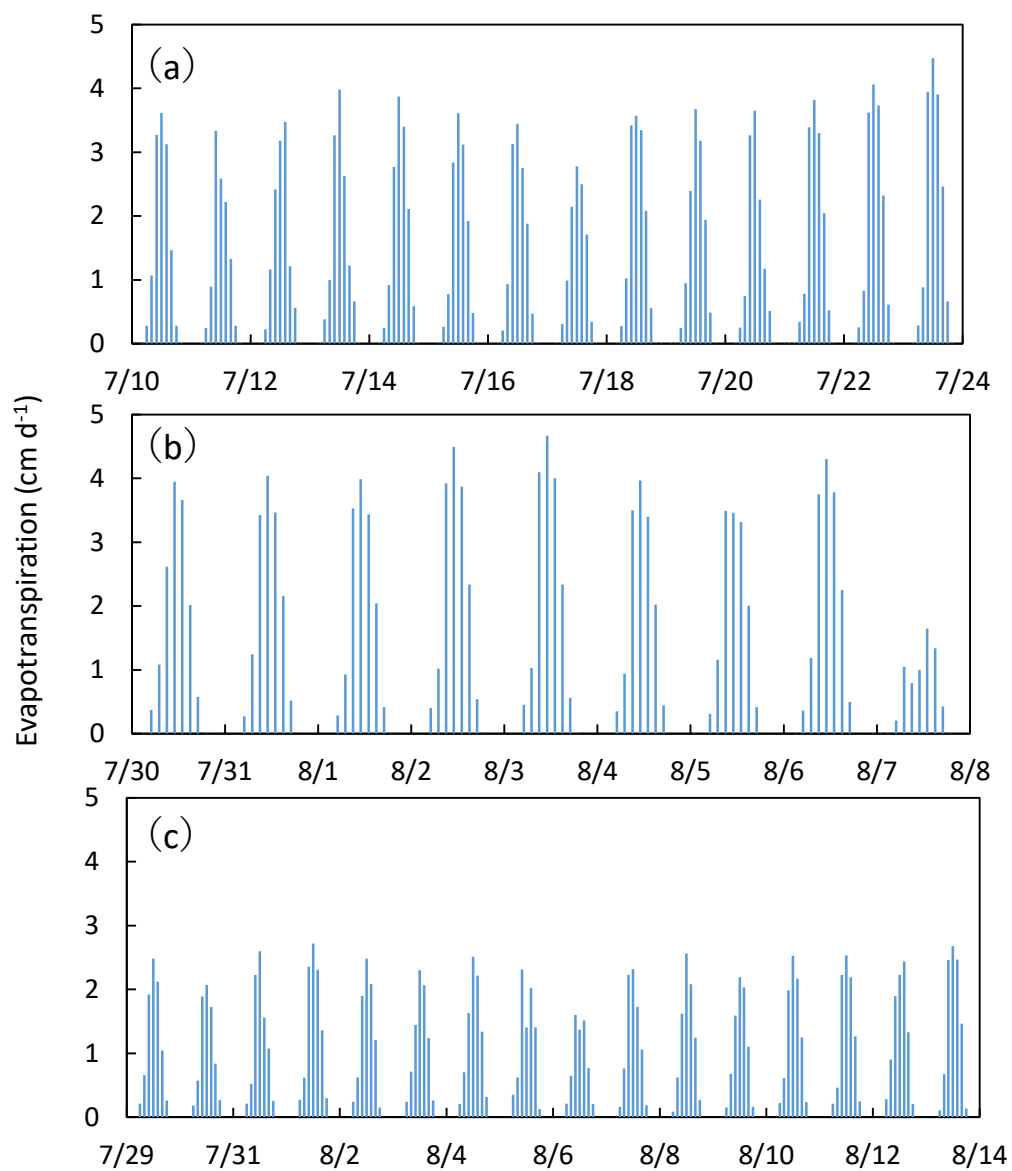


図 2.30 可能蒸発散速度の日内変化 (a)2018 年 1 期乾燥期間
(b)2018 年 2 期乾燥期間 (c)2019 年乾燥期間

2.4 解析対象期間の生育状況

2018 年の生育データと土中水圧力は図 2.12 に、2019 年の生育データと土中水圧力は図 2.13 に示す。それら図中の無降雨期間を網掛で示した。両年ともに、無降雨期間は、夏季でダイズが生長する期間だった。その期間を 2.2.1 項で解析対象期間に選定した。その期間のダイズの生長データを表 2.3 に示す。2018 年 1 期と 2019 年を比較すると、播種後の経過日数では 2019 年乾燥期間は 1 週間早く、草高、被覆率、LAI のすべてが 2019 年では小さかった。図 2.15 によると、2019 年乾燥期間の蒸発散速度は小さく、緩やかに低下した後増加して維持をした。2018 年 1 期乾燥期間の蒸発散速度は大きく、緩やかに低下を続けた。また、図 2.18 によると、2019 年乾燥期間の土中水圧力は 5 cm 深のみが初期より低下したが、それ以外は期間の中期以降から低下していて、初期は上層からのみ吸水された。2018 年 1 期乾燥期間の土中水圧力は、25 cm 深のみが他の深さに遅れて低下していて、下層の吸水が上層よりも遅れて開始した。これらより、2019 年乾燥期間は、生育段階の生育期前半に位置し、根の伸長と地上部の生長が起こった。2018 年 1 期乾燥期間は、生育段階の生育期後半に位置し、根はライシメータの下端付近まで伸長していて、わずかな根の伸長と地上部の生長が起こった。2018 年 2 期乾燥期間は、2018 年 1 期乾燥期間より生長が進んだ。これらの 3 つの乾燥期間のダイズの生長は異なっており、根の伸長も異なっていることより、根の吸水特性も異なっていると判断し、生長段階が異なる、2018 年 1 期乾燥期間、2018 年 2 期乾燥期間および 2019 年乾燥期間の 3 つの乾燥期間のうち、2019 年乾燥期間の解析を中心に次章以降で行った。

表 2.3 解析対象期間のダイズの生育状況

期間	2018 年 1 期	2018 年 2 期	2019 年
	2018/7/10 ~ 7/23	2018/7/30 ~ 8/7	2019/7/29 ~ 8/13
(播種後経過日)	(28 ~ 41 日目)	(48 ~ 56 日目)	(21 ~ 36 日目)
草高	42 cm ~ 32 cm	41 cm ~ 46 cm	28 cm ~ 33 cm
被覆率	27 % ~ 43 %	58 % ~ 73 %	10 % ~ 28 %
LAI	0.5 ~ 1.8	2.7 ~ 3.5	0.4 ~ 0.9
根の長さ	25 cm から伸長して 30 cm に到達	30 cm 期間一定	15 cm から徐々に伸 長して 30 cm に到達

2.5 まとめ

2018 年と 2019 年で同一圃場に 30 cm ライシメータを設置して、ダイズ栽培実験をした。ライシメータでは、重量変化による実蒸発散速度と 3 つの深さの土中水圧力を測定した。ライシメータが十分に湿潤状態であるときの実蒸発散量を可能蒸発散量とみなして、気象データよりペンマン式で求めた日蒸発散量で日可能蒸発散量を除してみかけの作物係数を決定した。みかけの作物係数もダイズの生長によって増加するとして、解析期間に前後する湿潤状態のときのみかけの作物係数 2 点より線形補間して、解析期間の日可能蒸発散量を求めた。さらに、日可能蒸発散量の日内の時間変化は、日射量によって変化すると仮定した。

解析対象期間とした夏季の無降雨期間では、播種後経過日数で比較すると 2019 年のほうが早期であり、2019 年乾燥期間のダイズは小さかった。2019 年乾燥期間では、生育段階での生育期前半に、2018 年 1 期乾燥期間では生育期後半にあった。また、解析期間のペンマンの蒸発散量は、2018 年、2019 年ともに同程度であったにもかかわらず、可能蒸発散速度 ET_p は、生長度が内包されるみかけの作物係数が 2018 年より 2019 年のほうが小さいため、2019 年のほうが小さかった。

夏季のダイズが生長する時期に、2018 年は 2 回、2019 年は 1 回の 7 日間を超える無降雨期間があり、その期間のダイズは、水ストレス下にあった。この期間では、水ストレス下の根の吸水の解析が可能になるため、解析対象期間に選択した。2018 年乾燥期間のダイズは、生育期後半、2019 年乾燥期間のダイズは、生育期前半と、生育ステージが異なっていて、2019 年乾燥期間では、期間初旬から終盤にかけて、根は伸長をして、地上部も生長した。そのため、2018 年の 1 期と 2 期の乾燥期間と 2019 年乾燥期間の根の吸水は異なり、次章以降の解析では、主に、生育期前半だった 2019 年乾燥期間のデータについて行い、生育期後半だった 2018 年の乾燥期間のデータを比較対象とした。

第3章 水分移動モデルのパラメータの推定

本研究では、重量ライシメータを用いたダイズ栽培実験の乾燥過程において、測定した蒸発散速度 ET_a と土中水圧力 h に対して、補填吸水モデルを用いた水分移動モデルで解析し、水ストレスを受けているダイズの根の吸水特性を推定することを目的としている。その際、水分移動モデルに対して、水分移動特性として水分特性曲線 $\theta(h)$ と不飽和透水係数 $K(h)$ を与える必要がある。現場圃場の水分移動特性は、室内実験で測定した試料とは異なることが多く、また、湿潤と乾燥が繰り返される圃場ではヒステリシスも無視できない。そのため、解析の際の $\theta(h)$ と $K(h)$ は、解析期間のデータに対しての検討が必要である。また、ペンマン式で推定した可能蒸発散速度 ET_p は、可能蒸発速度 E_p と可能蒸散速度 T_p に分離し、 E_p は地表境界条件、 T_p は根の吸水条件として与える。この E_p と T_p の割合と根の吸水を与える Feddes モデルの吸水強度分布 β にはダイズの生長による変化を、また、補填吸水モデルの限界ストレス指数 ω_c には乾燥の進行による変化を考慮する必要がある。

解析に用いた HYDRUS-1D には、測定した土中水圧力などのデータに適合するように水分移動特性のパラメータを逆解析する機能がある。しかし、本研究における解析区間においてはダイズが生長するため、 E_p と T_p の割合と根の吸水モデルは変化する。また、土中水分はすべてのパラメータに依存して変化するため、それぞれを独立に決めることはできない。そのため、HYDRUS-1D の逆解析機能を利用することができず、解析期間を生育段階に基づき分割し、試行錯誤によりパラメータを段階的に決定する逆解析手法を用いた。

本章では、前章で示した重量ライシメータで得られた実蒸発散速度 ET_a と土中水圧力の変化を再現する水分移動モデルのパラメータを推定する手順を作成して、それにしたがって推定を行った。 E_p と T_p の割合と根の吸水モデルが植物の生長によって変化するため、それらの変化に合わせて解析期間を分割して段階的に試行錯誤による推定を行った。解析は、前章で示した3期間に対して行った。まず、根の生長が大きかった2019年乾燥期間のデータを用いてパラメータを推定し、その上で2018年1期および2期乾燥期間のデータを解析して、段階的にパラメータを推定する手順の検証を行った。

3.1 根の吸水を含む土中水分移動モデル

根の吸水を考慮した土中水分移動モデルは、土中の水分移動式（リチャーズ式）の吸い込み項へ根の吸水モデルを取り入れることで表現できる。本研究の根の吸水モデルに採用した Feddes モデルを再掲する。また、根の吸水を含む土中水分移動モデルを解析するための、初期条件と上下端の境界条件を示す。

土中の水分移動式（リチャーズ式）

解析では、リチャーズ式の吸い込み項に吸水項を適用した式（3.1）を解く必要がある。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S_a(z, t) \quad (3.1)$$

ここで、 $S_a(z, t)$ は植物根による吸水などを示す吸い込み項（day⁻¹）である。

吸い込み項へは、Feddes モデル、式（3.2）を適用した。

$$S_a(z, t) = \alpha(h)\beta(z)T_p(t) \quad (3.2)$$

水ストレス応答関数 $\alpha(h)$ は 3.2.3 項に、吸水強度分布 $\beta(z)$ は 3.2.4 項に示す。上端境界条件の可能蒸発速度 $E_p(t)$ と Feddes モデルの可能蒸散速度 $T_p(t)$ は、本研究では、ペンマン式に基づく可能蒸発散速度 ET_p の日変化を、3.2.5 項で示す蒸発と蒸散の割合によって分割して与えた。

初期条件と境界条件

初期条件には，初期土中水圧力を式（3.3）で与えた．下端を閉じたライシメータでは，下端境界条件は，ゼロフラックス，式（3.4）で与えた．上端境界条件は，地表面蒸発モデル（Rassam et al., 2004；斎藤ら，2006）を用い，式（3.5）で与えた．

$$h(z, 0) = h_i(z) \quad (3.3)$$

$$-K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \Big|_{z=-L} = 0 \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} -K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \Big|_{z=0} &= E_p(t) & (h(0, t) > h_A) \\ h(0, t) &= h_A & (h(0, t) \leq h_A) \end{aligned} \quad (3.5)$$

ここで， $h_i(z)$ は各深さの初期土中水圧力 h であり，それぞれの期間の実測値を与えた（図3.1）．また， $E_p(t)$ は可能蒸発速度 E_p の時間変動， h_A は許容最小圧力である．地表面圧力 $h(0, t)$ が許容最小圧力 h_A より大きいときは可能蒸発速度 E_p の時間変化を与える．乾燥が進行して，地表面圧力 $h(0, t)$ が許容最小圧力 h_A まで低下した段階で，地表面圧力 $h(0, t)$ は許容最小圧力 h_A 一定条件に切り替わる．地表面蒸発が恒率蒸発から減率蒸発へ変化することを表現するモデルである．許容最小圧力 h_A には -10^5 cm を設定した．厳密な地表面蒸発は，液状水，水蒸気，熱移動式を連立させた地表面熱収支モデル（Saito et al., 2006）であるが，ここで用いた地表面蒸発モデルは，液状水のみ移動モデルで蒸発過程を簡便に表現するモデルである．

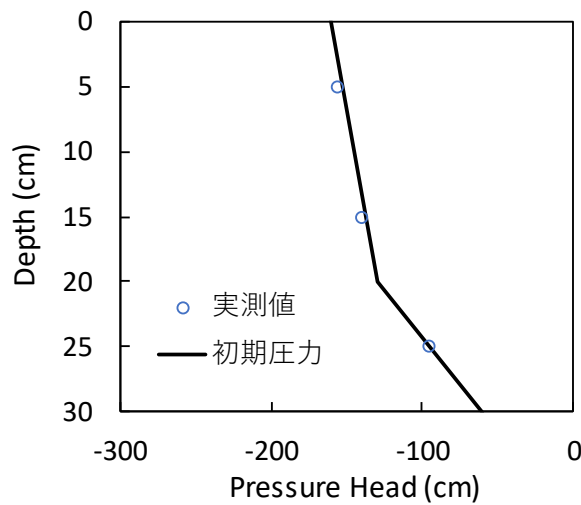


図 3.1 2019 年データの初期土中水圧力（2019/7/29 の実測値）

3.2 段階的逆解析と推定パラメータ

式 (3.1) ～式 (3.5) の土中水分移動モデルの計算には HYDRUS-1D を用いた。表 3.1 は推定したパラメータを示す。ここでは、2019 年 7 月 29 日から 8 月 13 日までの無降雨期間のデータ（以降、2019 年データという）を対象に解析手順を示す。

表 3.1 吸水をともなう土中水分移動モデルで推定するパラメータ

パラメータ	設定値
$\theta(h)$: 水分特性曲線	Durner モデル (3.2.2)
$K(h)$: 不飽和透水係数	
$\alpha(h)$: 水ストレス応答関数 (-)	ポット試験 (3.2.3)
$\beta(z)$: 吸水強度分布 (cm^{-1})	土中水圧力の変化より設定 (3.2.4)
T_p : 可能蒸散速度 (cm day^{-1})	可能蒸発散速度 ET_p を分割 (3.2.5)
E_p : 実蒸散速度 (cm day^{-1})	
ω_c : 補填吸水モデルの限界ストレス指数	$0 < \omega_c \leq 1$ で設定 (3.2.6) (1 は補填吸水モデルなし)

3.2.1 段階的逆解析

逆解析の目的関数である 2019 年の実蒸発散速度 ET_a と土中水圧力 h を図 3.2 に示す。可能蒸発散速度 ET_p と実蒸発散速度 ET_a の変化 (図 3.2 a) と土中水圧力の低下のはじまる時期 (図 3.2 b) に基づき、解析期間を 7/29～8/2 の乾燥Ⅰ期、8/3～8/7 の乾燥Ⅱ期、8/8～8/11 の乾燥Ⅲ期、8/12～13 の乾燥Ⅳ期に分割した。乾燥Ⅰ期より実蒸発散速度 ET_a は低下し、乾燥Ⅲ期より増加して維持をした。土中水圧力は、5 cm 深は先行して低下し、15 cm 深と 25 cm 深は乾燥Ⅲ期以降に低下した。この圧力低下は、根が徐々に伸長したことを示す。乾燥Ⅲ期の実蒸発散速度 ET_a の増加は、15 cm より深く根が伸長した時期と一致している。

それぞれの時期において、影響の大きいパラメータに注目して、段階的逆解析のフローチャートを作成した (図 3.3)。段階的推定は、植物の生長に依存する可能蒸発速度 E_p と可能蒸散速度 T_p の割合と吸水強度分布 $\beta(z)$ の概略をまず推定した上で、実蒸発散速度 ET_a を実現できるように水収支の視点から水分移動特性、さらに水分が不足した場合は補填吸水モデルを検討する手順を基本とした。ただし、水分移動特性の微調整はすべての計算値に影響を及ぼすため、乾燥初期に戻りパラメータの再確認をする必要があった。この試行錯誤を繰り返して、最終的なパラメータを決定した。

乾燥初期である乾燥Ⅰ期では、蒸発散速度の急減する特徴より可能蒸発速度 E_p と可能蒸散速度 T_p の割合（以降、 $E_p : T_p$ という）および上層への水分供給の飽和透水係数 K_s を推定し

た。

乾燥中期以降では、段階的に $E_p : T_p$ の蒸散割合を増加させ、吸水強度分布 $\beta(z)$ を下方へと広げた。そして、水分特性曲線 $\theta(h)$ と不飽和透水係数 $K(h)$ を調整して実蒸発散速度 ET_a を再現するか確認した。乾燥Ⅲ期では蒸発速度 E_a がほぼゼロになることに注目して $E_p : T_p$ を定め、下層からの吸水の視点から下層土の $\theta(h)$ と $K(h)$ を調整した。乾燥Ⅱ期以降で実蒸発散速度 ET_a に満たない場合は、補填吸水モデルの限界ストレス指数 ω_c を徐々に小さくして吸水強度を高めた。乾燥Ⅳ期では、さらに $E_p : T_p$ の蒸散割合を高め、 $\beta(z)$ は下端までの吸水とした。目的関数として土中水圧力 h を用いているため、水分特性曲線の勾配である比水分容量 $d\theta/dh$ が ET_a の計算結果に影響するが、同時に不飽和透水係数の関数形も変化させるため、試行錯誤による繰り返し計算を行った。乾燥期間が長く、土層内の水分をすべて消費する状況であったため、飽和体積含水率 θ_s が水収支の視点から重要なパラメータであった。

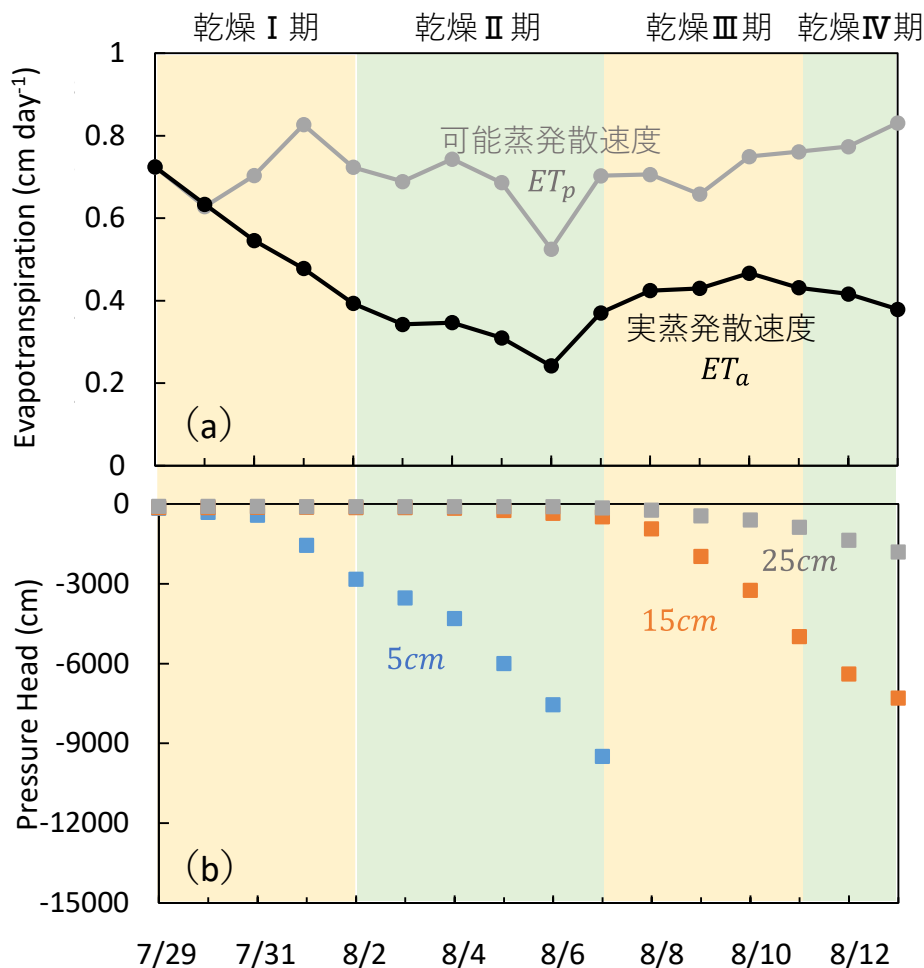


図 3.2 2019 年データの (a) 実蒸発散速度 ET_a と可能蒸発散速度 ET_p (b) 深度別土中水圧力 h の経時変化

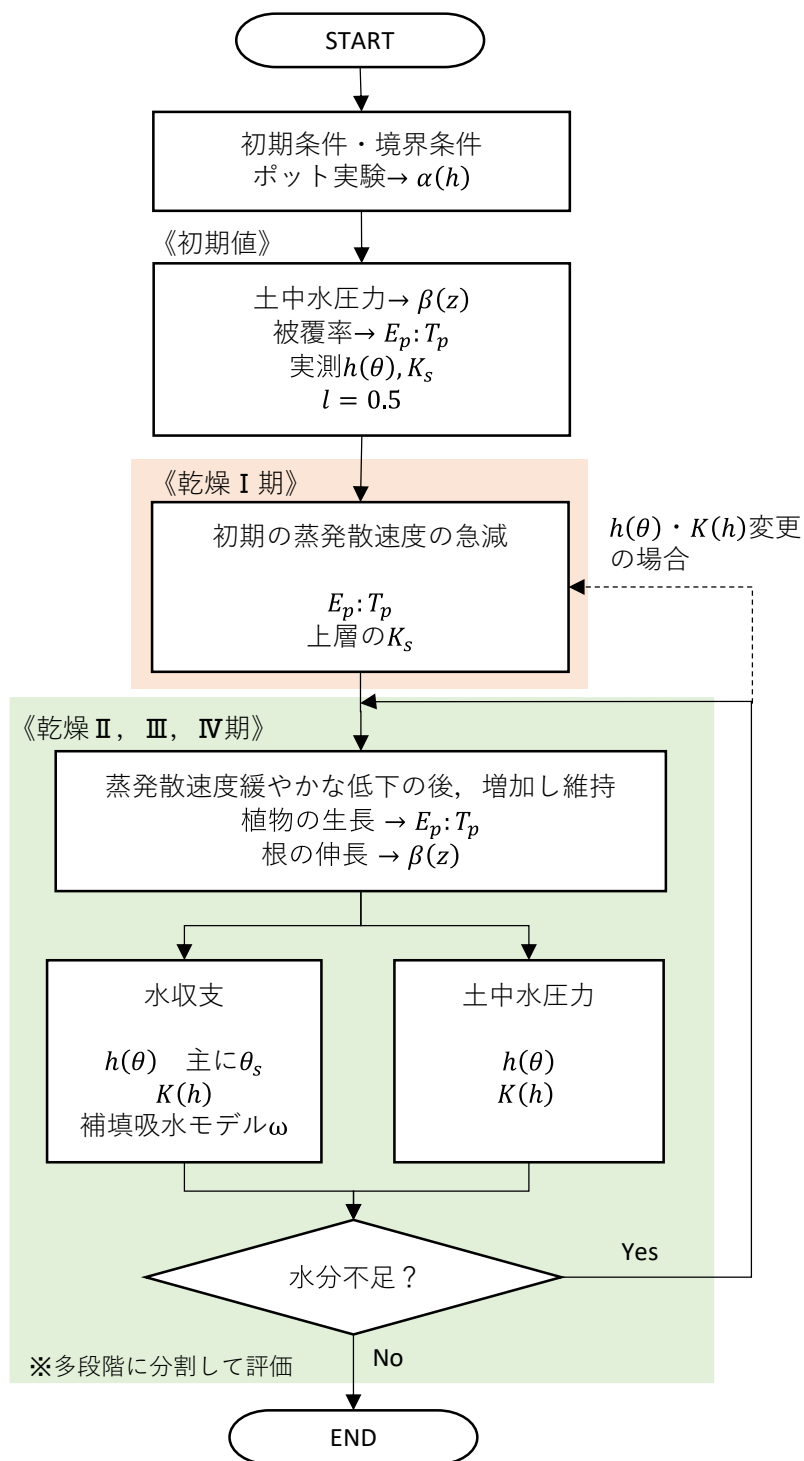


図 3.2 水分移動モデルの逆解析フローチャート

3.2.2 水分特性曲線 $\theta(h)$ と不飽和透水係数 $K(h)$

現場の不攪乱土の水分移動特性は、室内実験で測定した特性とは一致しないことが予測されるが、パラメータを推定する際の初期値として室内実験の測定値を用いた。本研究では、ライシメータ解体時に 100cc コアサンプラーで採取したサンプルを用いて、吸引法と露点法（鏡面冷却式湿度計：WP4-T）より水分特性曲線 $\theta(h)$ を決定した。

不飽和水分移動特性関数には、van Genuchten（1980）が提案した van Genuchten モデル（以降、VG モデルという）を 2 つ組み合わせた Durner モデル（Durner（1994））を用いた。Durner モデルの水分特性曲線は式（3.6）、不飽和透水係数は式（3.7）で表される。

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = S_e = w_1[1 + |\alpha h|^n]^{-m} + w_2[1 + |\alpha_2 h|^{n_2}]^{-m_2} \quad (3.6)$$

$$K(S_e) \quad (3.7)$$

$$= K_s \frac{(w_1 S_{e1} + w_2 S_{e2})^l \left(w_1 \alpha \left[1 - (1 - S_{e1}^{1/m})^m \right] + w_2 \alpha_2 \left[1 - (1 - S_{e2}^{1/m_2})^{m_2} \right] \right)^2}{(w_1 \alpha + w_2 \alpha_2)^2}$$

ここで、 θ は体積含水率、 θ_r は残留体積含水率、 θ_s は飽和体積含水率、 S_e は有効飽和度であり、 α 、 α_2 、 n 、 n_2 、 $m (= 1 - 1/n)$ 、 $m_2 (= 1 - 1/n_2)$ は水分特性曲線の形状を与えるパラメータである。 w_1 、 w_2 は重み係数で $w_1 + w_2 = 1$ の関係にある。 K は不飽和透水係数、 K_s は飽和透水係数、 l は間隙結合係数、 h は土中水圧力である。

測定した水分特性曲線 $\theta(h)$ に式（3.6）を適合させてパラメータを決定した。また、不飽和透水係数 $K(h)$ は、飽和透水係数 K_s には変水位透水試験の測定値を、間隙結合係数 l には、Mualem（1976）の推奨値である 0.5 を用い、式（3.7）で与えた。なお、土層の構成は、観察より 0～20 cm を上層、20～30 cm を下層、の 2 層とした。

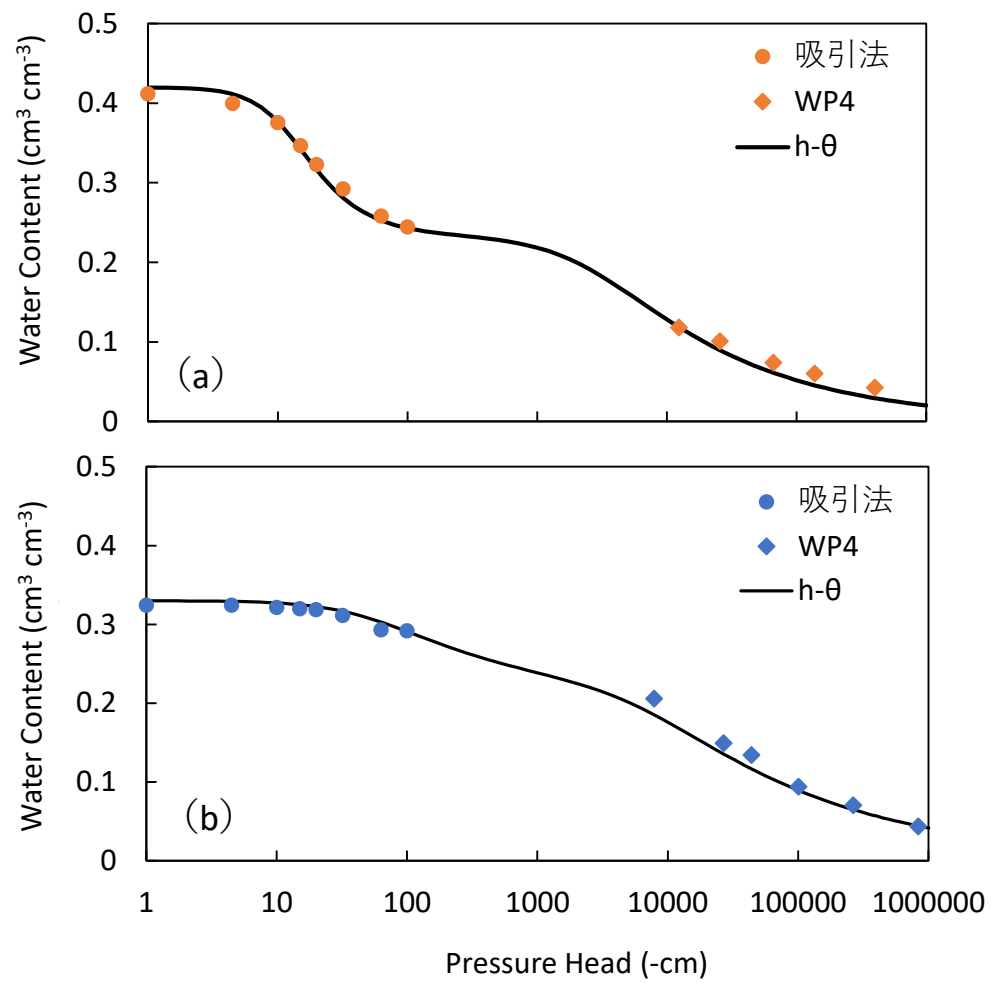


図 3.3 初期値に設定した水分特性曲線 $\theta(h)$ (a)上層 (b)下層

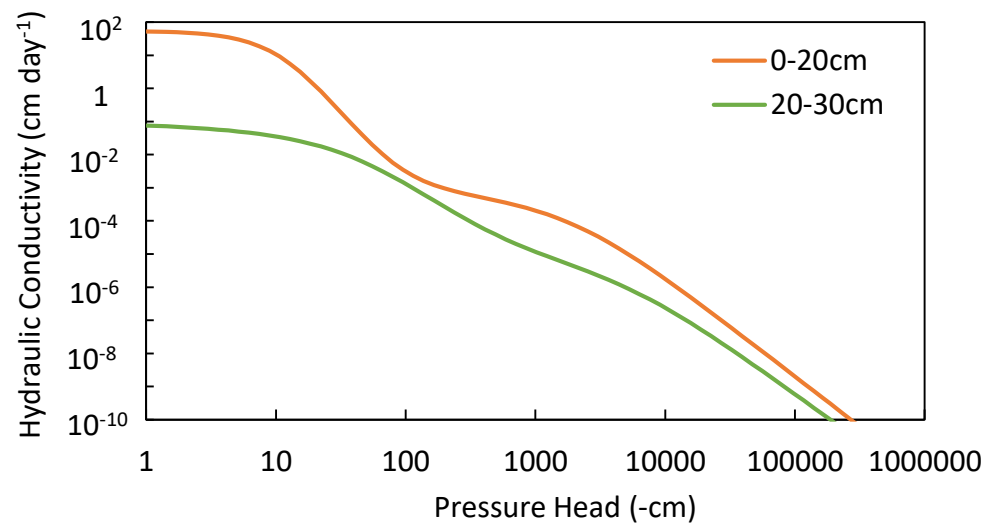


図 3.4 初期値に設定した不飽和透水係数 $K(h)$

表 3.2 初期値に設定した Durner モデルのパラメータ

	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n (-)	K_s (cm day ⁻¹)	l (-)	w_2 (-)	α_2 (cm ⁻¹)	n_2 (-)
0~20 cm	0	0.42	0.0793	2.4	56	0.5	0.556	0.000391	1.41
20~30 cm	0	0.33	0.0183	1.51	0.1	0.5	0.659	0.000157	1.33

3.2.3 水ストレス応答関数 $\alpha(h)$

本研究では、大西らがポットを用いたダイズ栽培実験（2017）で求めた Feddes モデルの水ストレス応答関数 $\alpha(h)$ ，初期しおれ点に対応する h_3 には -1700 cm を，永久しおれ点に対応する h_4 には -15000 cm となる関数（図 3.6）を与えた．なお，飽和近傍の吸水制限は考慮せず，水ストレスがかかり始める土中水圧力は可能蒸散速度 T_p にはよらず， $h_{3h} = h_{3l}$ とした．

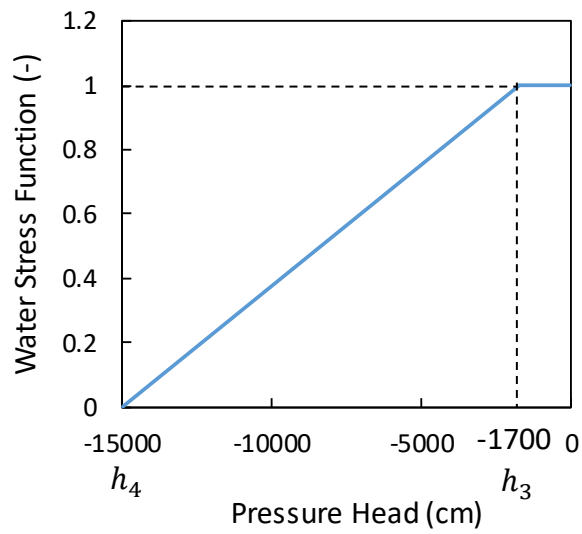


図 3.6 水ストレス応答関数

3.2.4 吸水強度分布 $\beta(z)$

本研究の実験と同一圃場でのダイズ栽培実験では、播種後 25 日目には 20 cm 深まで伸長、播種後 58 日目には 30 cm 以深に到達した（岡橋ら，2015）ことを示した．2019/7/29 は播種後 21 日目，2019/8/13 は播種後 36 日目にあたる．これらと，図 3.2(b)の 15 cm 深と 25 cm 深の土中水圧力の経時変化の圧力の変化点より，根の長さは，7/29 は 0 cm より 15 cm 深まで（乾燥Ⅰ期），8/3 は 20 cm 深まで（乾燥Ⅱ期），8/8 は 25 cm 深まで（乾燥Ⅲ期），8/12 は 30 cm 深まで（乾燥Ⅳ期）伸長したと推定した（図 3.7）．また，吸水強度分布 $\beta(z)$ は，ライシメータ内の横方向の根の生長が壁面で制限されていたことを考慮して，深さ方向に一定の矩形の分布とした．このとき，根の深さ L とすると， $\beta = 1/L$ である．

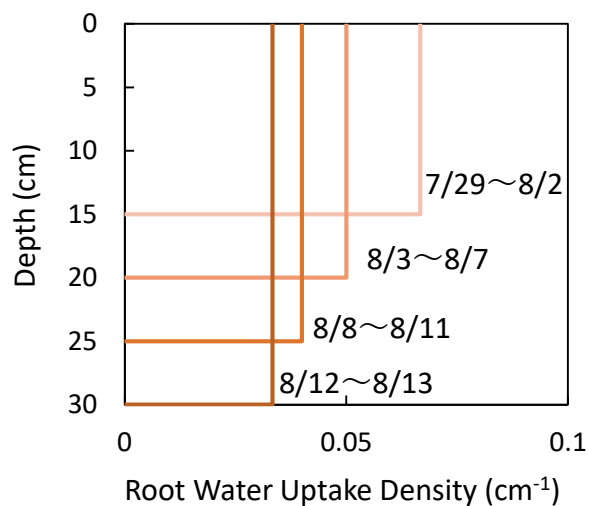


図 3.7 根の生長を考慮した矩形型の吸水強度分布 β

3.2.5 可能蒸発速度 E_p と可能蒸散速度 T_p の割合

乾燥Ⅰ期の実蒸発散速度 ET_a の減少は、実蒸発速度 E_a の可能蒸発速度 E_p からの低下によるものであり、この段階では実蒸散速度 T_a は可能蒸散速度 T_p を維持している。この性質から、初期の可能蒸発速度 E_p と可能蒸散速度 T_p の割合（以降、 $E_p : T_p$ という）は7:3に決定できた（図3.8）。

乾燥Ⅲ期は、実蒸発速度 E_a がゼロに収束する（ $E_a \approx 0$ ）時期であり、実蒸発散速度 ET_a は実蒸散速度 T_a と一致するとみなせる（ $ET_a \approx T_a$ ）。このとき、実蒸発散速度 ET_a と可能蒸発散速度 ET_p の比（ ET_a/ET_p ）は、 T_a/ET_p とみなせ、 $T_a/ET_p \leq T_p/ET_p$ であるため、 ET_a/ET_p はおおむね T_p/ET_p を表している。8/8の ET_a/ET_p は0.6であったため、 $E_p : T_p$ は4:6に決定した（図3.9）。

乾燥Ⅱ期の $E_p : T_p$ は、7:3と4:6の間の割合を、段階的に変化させた。図3.9の $E_a + T_p$ （青色破線）は、実蒸発速度 E_a に可能蒸散速度 T_p を積み上げた値で、実蒸発する条件下での蒸発散速度の最大値を表す。そのため、設定した $E_p : T_p$ での $E_a + T_p$ （青破線）は、実蒸発散速度（黒実線）を下回ることはない。すなわち、 $E_a + T_p$ （青破線）が実蒸発散速度 ET_a （黒実線）を下回るような $E_p : T_p$ は適当ではない。この判断基準にしたがって、 $E_p : T_p$ を変化させる。この $E_a + T_p$ （青色破線）は、乾燥Ⅲ期の半ばまで、実蒸発散速度（黒実線）と一致して、その後、実蒸発散速度（黒実線）より上方に現れるようになった。これは、乾燥Ⅲ期半ば以降、実蒸散速度 T_a が低下したことを表している。乾燥Ⅳ期は、乾燥の進行により実蒸散速度 T_a が低下する時期であるため、 $E_p : T_p$ は6:4より変化して3:7以上になると推定できる。以上の考察に基づき、解析期間の $E_p : T_p$ は、段階的に T_p の割合を増加する関数として与えることができた。

なお、解析期間初期の圃場の被覆率（図3.10）は、発芽時の7/16を0%として測定値を線形補間して求めたところ7/29は10.5%だった。乾燥Ⅰ期の $E_p : T_p$ は7:3に決定したが、圃場の被覆率と比べて大きい。これは、ライシメータの断面積が小さいことに起因して、地上部の断面積を超える葉の広がり、根群域の広がりが断面積で抑制されたことで、断面積あたりの蒸散量は圃場の被覆率より大きくなることが影響していると考えられる。ライシメータの $E_p : T_p$ はダイズの生長により T_p の割合は増加するが、圃場の被覆率の増加と単純に関連付けることは難しい。

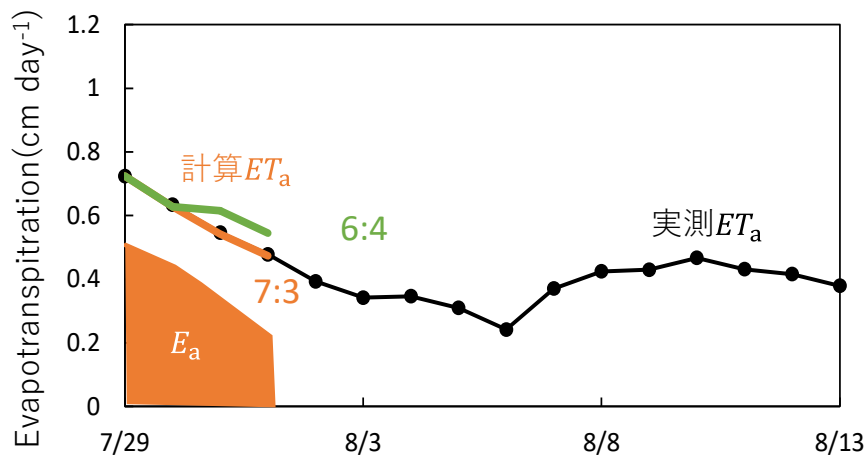


図 3.8 乾燥Ⅰ期の異なる $E_p : T_p$ の計算値

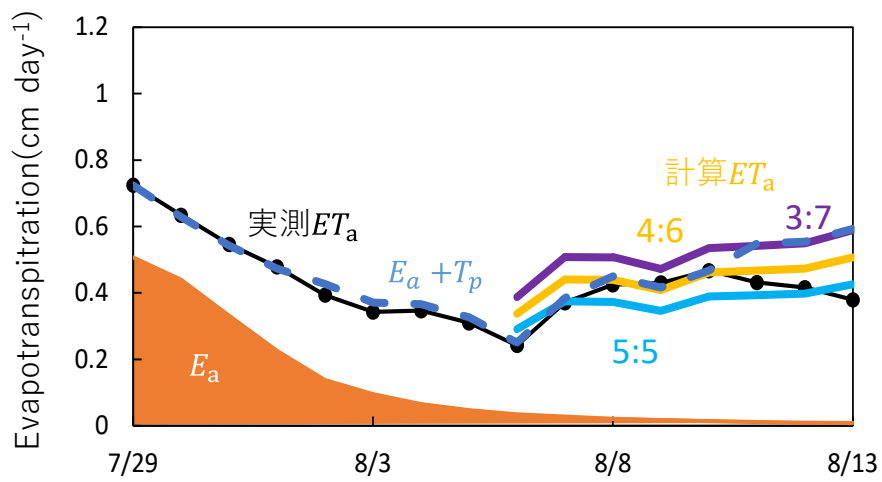


図 3.9 乾燥Ⅲ期の異なる $E_p : T_p$ の計算値

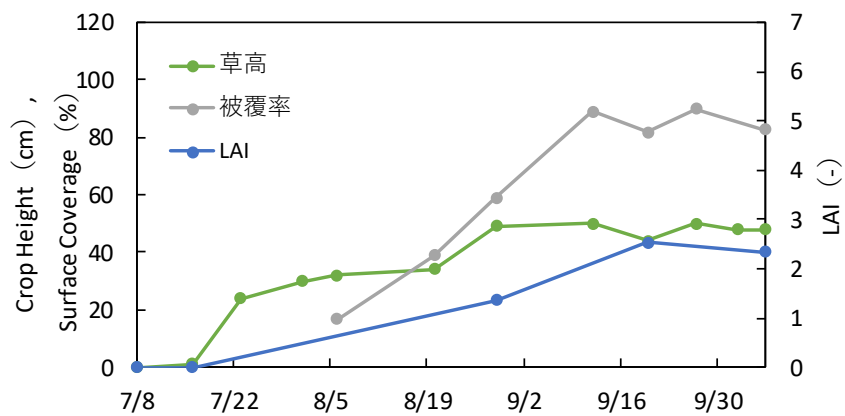


図 3.10 生育データ

3.2.6 補填吸水モデルの限界ストレス指数 ω_c

補填吸水モデルでは、補填吸水モデルの限界ストレス指数 ω_c の設定で補填吸水の強度を決める。乾燥初期では、補填吸水モデルは適用しなかった ($\omega_c = 1$)。植物の生長によって蒸散は徐々に増加するが、乾燥の進行にともない蒸散は低下する。その蒸散の低下を補填吸水モデルで増加させる、試行錯誤して決定した水分保持曲線 $\theta(h)$ と不飽和透水係数 $K(h)$ 、植物の生長によって変化する $E_p : T_p$ を用いて実蒸発散速度 ET_a の計算値を求める。しかし、乾燥が進行すると、蒸散の低下により計算値が実測値を満たせなくなる。そして、補填吸水モデルで蒸散を増加させて補う必要が生じる。この補填のために、補填吸水モデルの限界ストレス指数 ω_c を 1 から 0.7, 0.4 と小さくして補填吸水の強度を強めて、実蒸発散速度 ET_a の計算値を実測値に近づけた。

3.3 パラメータ推定結果

本節では、根が伸長段階にある 2019 年データをパラメータ推定手順にしたがって段階的に逆解析した結果を示す。なお、解析の途中経過等の詳細は、付録 A-5 に記載する。

逆解析フローチャート（図 3.2）にしたがって推定した Durner モデルのパラメータを表 3.3、水分特性曲線 $\theta(h)$ と不飽和透水係数 $K(h)$ を図 3.11 に示す。これらは解析期間（16 日間）で不変とした。吸水にかかわるパラメータの吸水強度分布 β と $E_p : T_p$ と補填吸水モデルの限界ストレス指数 ω_c は、植物の生長と乾燥の進行によって変化した（表 3.4）。推定したパラメータによって計算した蒸発散速度と土中水圧力を図 3.12 に示す。計算 ET_a は実測 ET_a をよく再現した。土中水圧力は、5 cm 深と 25 cm 深の計算値は実測値を再現したが、15 cm 深の計算値は実測値を過小評価した。これは、土層が不均一であったことと、吸水強度分布 β を矩形で与えたことなどが影響したと推測する。圧力分布と水分分布を図 3.13 に示す。表層付近は蒸発により早期より水分減少し、上層の水分は解析期間終盤には永久しおれ点に対応する h_4 付近まで消費された。一方、下層の水分は、下層まで根が到達していない乾燥Ⅱ期（8/3～8/7）には消費されず、根が到達した乾燥Ⅲ期（8/8～8/11）以降に消費された。乾燥Ⅲ期以降に消費した水分は、ほとんどが下層から調達された水分であったと考えられる。

表 3.3 2019 年データより推定した Durner モデルのパラメータ

	θ_r	θ_s	α	n	K_s	l	w_2	α_2	n_2
	($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	(cm^{-1})	(-)	(cm day^{-1})	(-)	(-)	(cm^{-1})	(-)
0~20 cm	0	0.44	0.017	1.27	10	0.5	0.494	0.000240	1.95
20~30 cm	0	0.38	0.018	1.25	0.1	0.5	0.5	0.000793	1.29

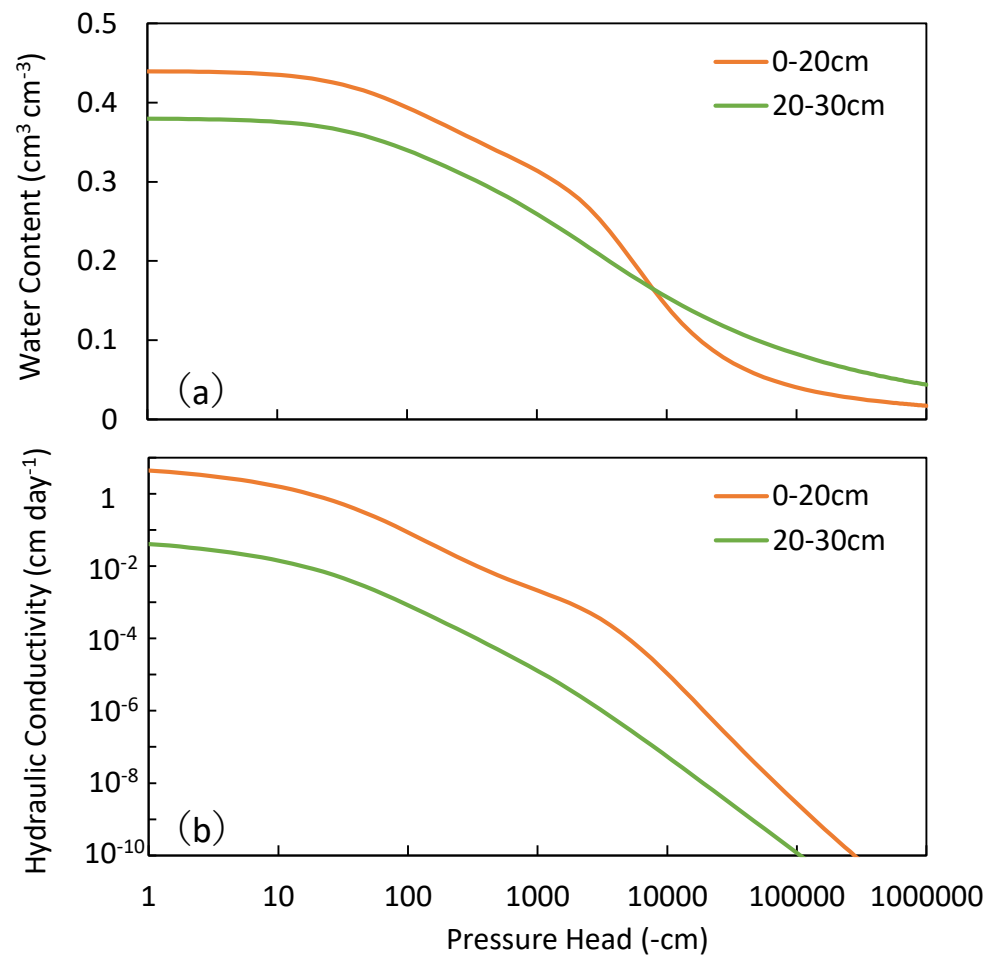


図 3.11 2019 年データより推定した水分特性 (a) 水分特性曲線 $\theta(h)$
(b)不飽和透水係数 $K(h)$

表 3.4 2019 年データより推定した根の吸水に関するパラメータ

		吸水強度分布 β	$E_p : T_p$	ω_c
7/29	乾燥Ⅰ期	0-15 cm	7:3	1
7/30				
7/31				
8/1				
8/2			6:4	
8/3	乾燥Ⅱ期	0-20 cm	6:4	0.7
8/4				
8/5				
8/6				
8/7			5:5	
8/8	乾燥Ⅲ期	0-25 cm	4:6	0.4
8/9				
8/10				
8/11			3:7	
8/12	乾燥Ⅳ期	0-30 cm	3:7	0.4
8/13				

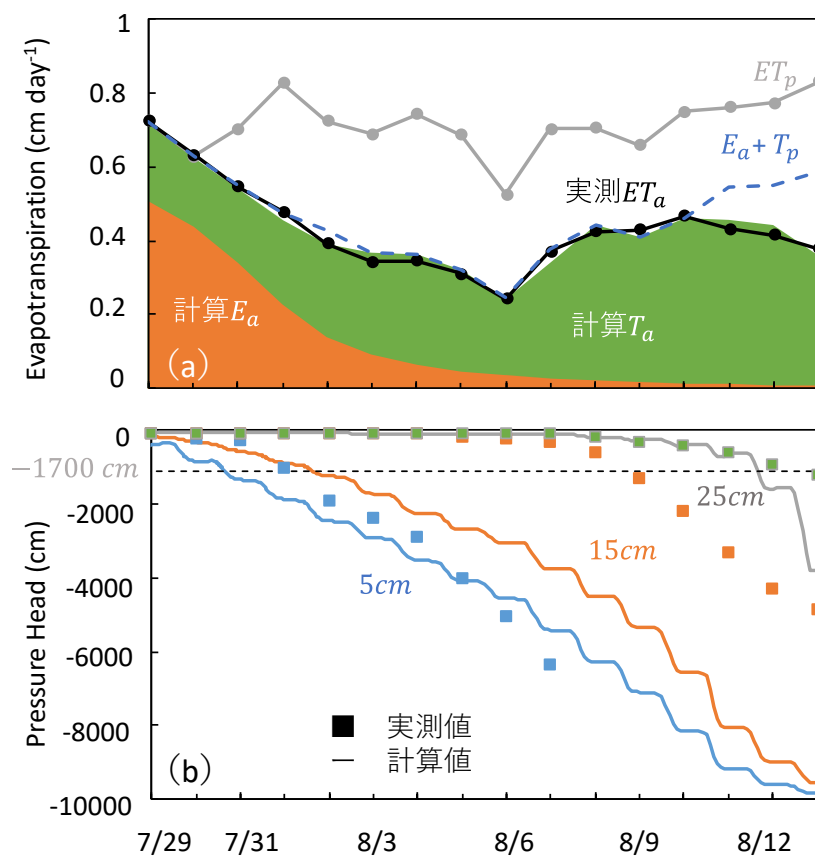


図 3.12 2019 年データによる計算結果 (a)蒸発散速度 (b)深度別土中水圧力

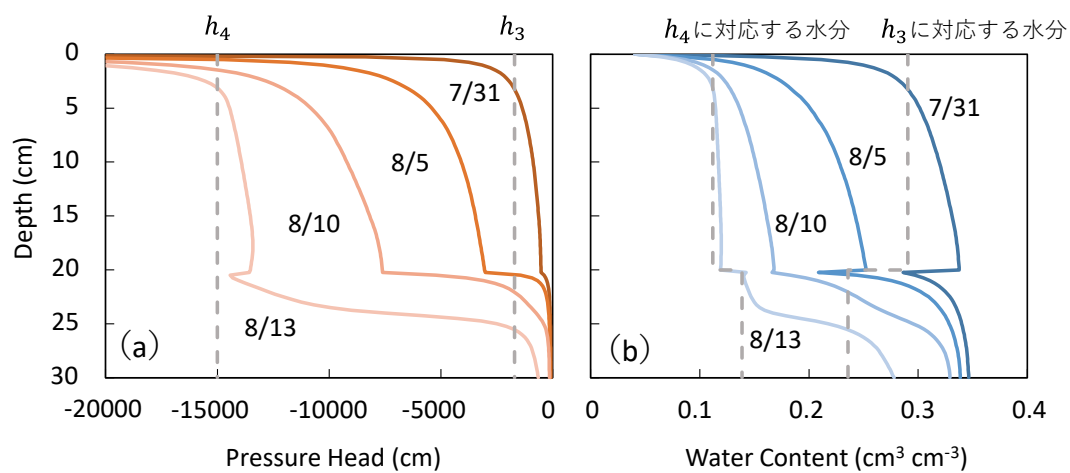


図 3.13 2019 年データの (a)圧力分布 (b)水分分布

3.4 パラメータ推定手順の検証

根が伸長段階にある 2019 年データと同様に，解析手順にしたがって，根が下端近傍にある 2018 年 7 月 10 日から 7 月 23 日まで（以降，2018 年 1 期という）と根が下端に到達した 2018 年 7 月 30 日から 8 月 7 日まで（以降，2018 年 2 期という）の期間についてパラメータを推定した．水ストレス応答関数 α は，2019 年データの解析と同様とした．なお，水分特性曲線 $\theta(h)$ と不飽和透水係数 $K(h)$ は，2018 年 1 期で推定し，2018 年 2 期では 2018 年 1 期と同一のパラメータを用いた（図 3.14，表 3.5）．

2018 年 1 期

初期条件は，図 3.15 (a)の初期圧力で与え，上下端の境界条件は，2019 年データと同様に式(3.4)，式(3.5)で与えた．吸水にかかわるパラメータを表 3.6 に示す．ここでは，根の伸長，蒸発散量の減少傾向に基づき，乾燥Ⅰ期からⅤ期に分割して解析を行った．図 3.15 (b)の吸水強度分布 β は，乾燥Ⅰ期の根は 25 cm 深まで存在し，乾燥Ⅱ期には 30 cm 深に到達したと推測した． $E_p : T_p$ は，乾燥Ⅰ期で 5:5 としたが，蒸発速度がゼロに収束する乾燥Ⅲ期の実測蒸発散速度 ET_a と可能蒸発散速度 ET_p の比が 0.5 だったため，乾燥Ⅰ期から乾燥Ⅴ期まで $E_p : T_p$ は 5:5 一定とした．乾燥の進行にともない，補填吸水モデルの強度は徐々に強まり，限界ストレス指数 ω_c は，1 から 0.8, 0.7, 0.6, 0.5 と減少した．推定したパラメータによって計算した蒸発散速度と土中水圧力を図 3.16 に示す．水分移動モデルの計算値は，実測蒸発散速度 ET_a と土中水圧力 h の実測値をよく再現した．このときの圧力分布と水分分布を図 3.17 に示す．表層付近は蒸発により早期より水分減少し，乾燥Ⅲ期には全層で水ストレスが生じ，解析期間終盤には全層で永久しおれ点 h_4 付近まで水分を消費した．

表 3.5 2018 年データより推定した Durner モデルのパラメータ

	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n (-)	K_s (cm day ⁻¹)	l (-)	w_2 (-)	α_2 (cm ⁻¹)	n_2 (-)
0~20 cm	0	0.42	0.017	1.27	12	0.5	0.494	0.000240	1.9
20~30 cm	0	0.35	0.01	1.20	0.1	0.5	0.38	0.000140	2.35

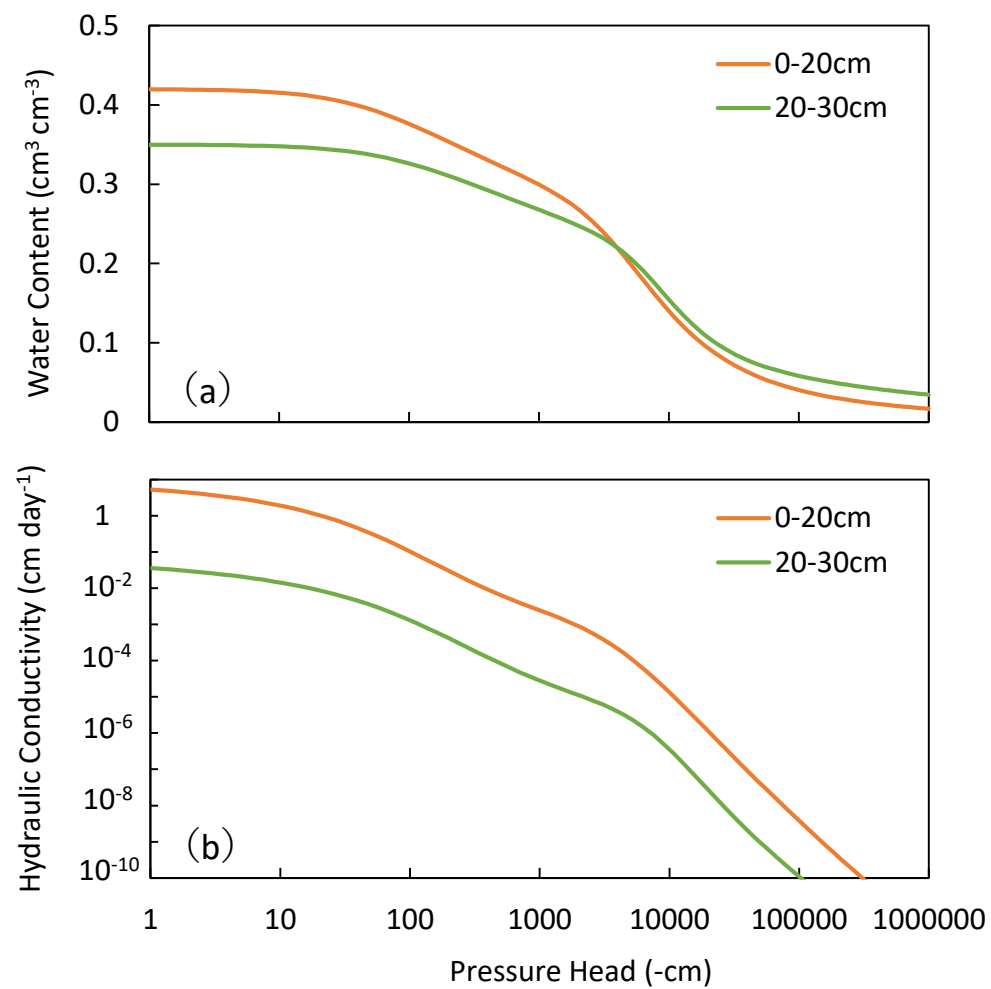


図 3.14 2018 年データより推定した水分特性 (a) 水分特性曲線 $\theta(h)$
(b)不飽和透水係数 $K(h)$

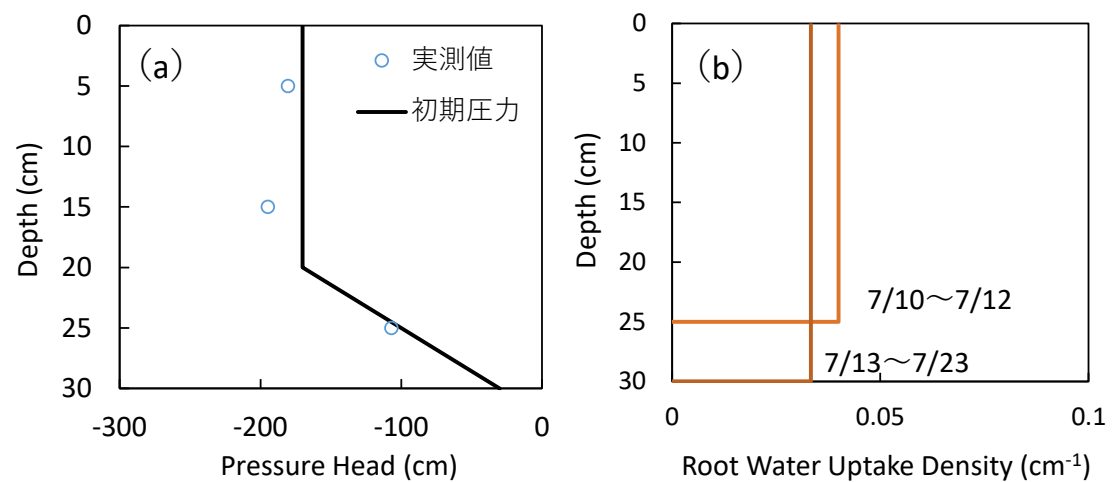


図 3.15 2018 年 1 期の (a) 初期条件 (b)吸水強度分布 β

表 3.6 2018 年 1 期データより推定した根の吸水に関するパラメータ

		吸水強度分布 β	$E_p : T_p$	ω_c
7/10	乾燥Ⅰ期	0-25 cm	5:5	1
7/11				
7/12				
7/13	乾燥Ⅱ期	0-30 cm	5:5	0.8
7/14				
7/15				
7/16	乾燥Ⅲ期	0-30 cm	5:5	0.7
7/17				
7/18				
7/19	乾燥Ⅳ期	0-30 cm	5:5	0.6
7/20				
7/21				
7/22	乾燥Ⅴ期	0-30 cm	5:5	0.5
7/23				

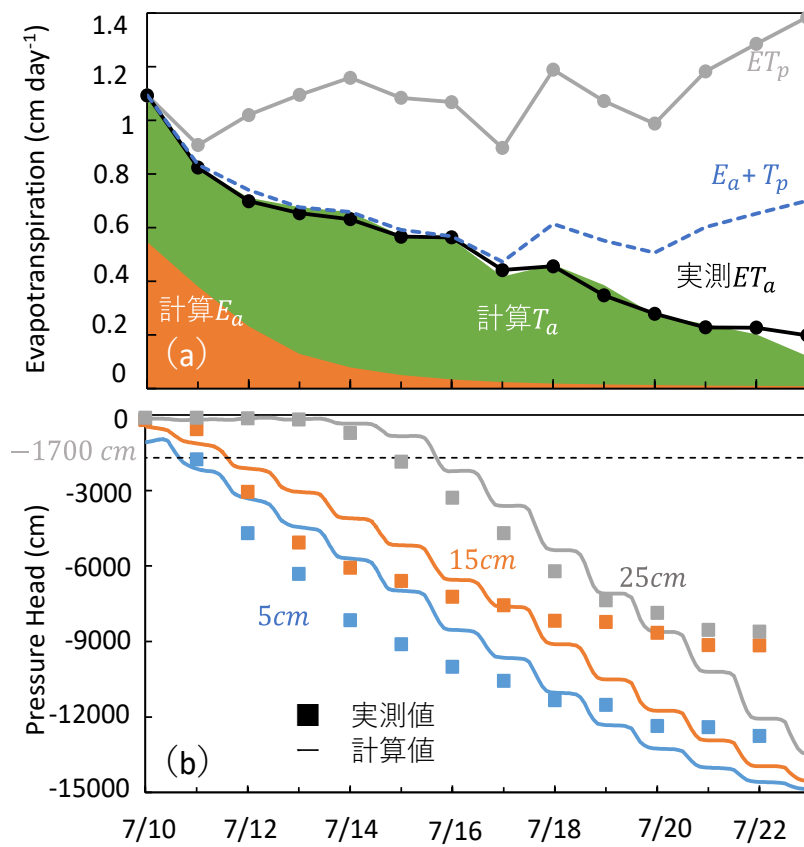


図 3.16 2018 年 1 期データによる計算結果 (a)蒸発散速度 (b)深度別土中水圧力

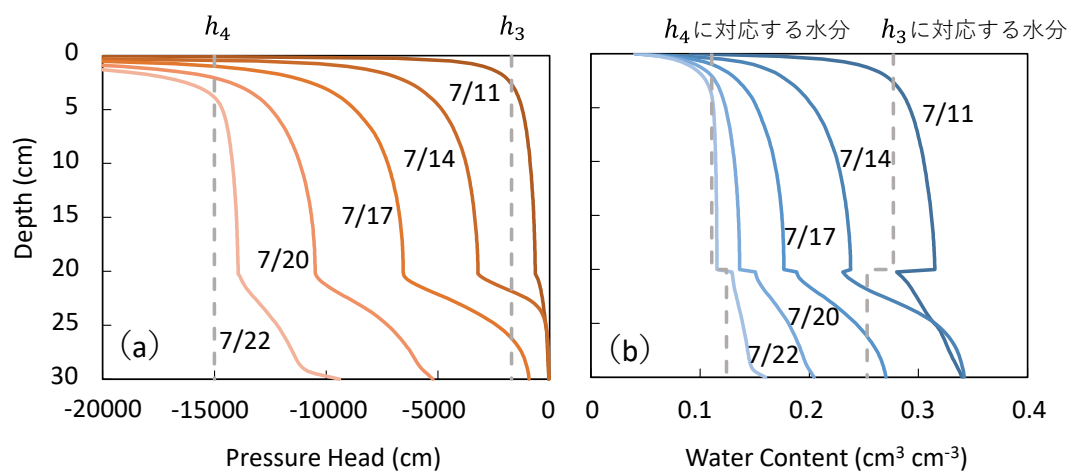


図 3.17 2018 年 1 期データの (a)圧力分布 (b)水分分布

2018 年 2 期

初期条件は図 3.18 (a) で与え、上下端の境界条件は、2018 年 1 期データと同様にした。また、水分特性曲線 $\theta(h)$ と不飽和透水係数 $K(h)$ は、2018 年 1 期と同じである。2018 年 2 期の吸水にかかわるパラメータを表 3.7 に示す。ここでは、蒸発散量の減少傾向から乾燥Ⅰ期からⅢ期に分割した。2018 年 1 期の最終期の根は 30 cm 深に到達したため、図 3.18 (b)の吸水強度分布 β は、30 cm 深まで一定とした。 $E_p : T_p$ は、乾燥Ⅰ期で 3:7 に決定し、その後、蒸発速度がゼロに収束する乾燥Ⅲ期の実測蒸発散速度 ET_a と可能蒸発散速度 ET_p の比(ET_a/ET_p)が 0.4 から 0.3 だったため、乾燥Ⅰ期から乾燥Ⅲ期まで $E_p : T_p$ は 3:7 一定とした。また、補填吸水モデルの限界ストレス指数 ω_c は、0.9 一定とした。推定したパラメータによって計算した蒸発散速度と土中水圧力を図 3.19 に示す。計算 ET_a は、実測 ET_a を乾燥Ⅰ期と乾燥Ⅲ期で過大評価し、乾燥Ⅱ期で過小評価した。図 3.20 は圧力分布と水分分布の計算値である。表層以外は一様に水分減少し、解析期間終盤には全層で永久しおれ点 h_4 付近まで減少した。

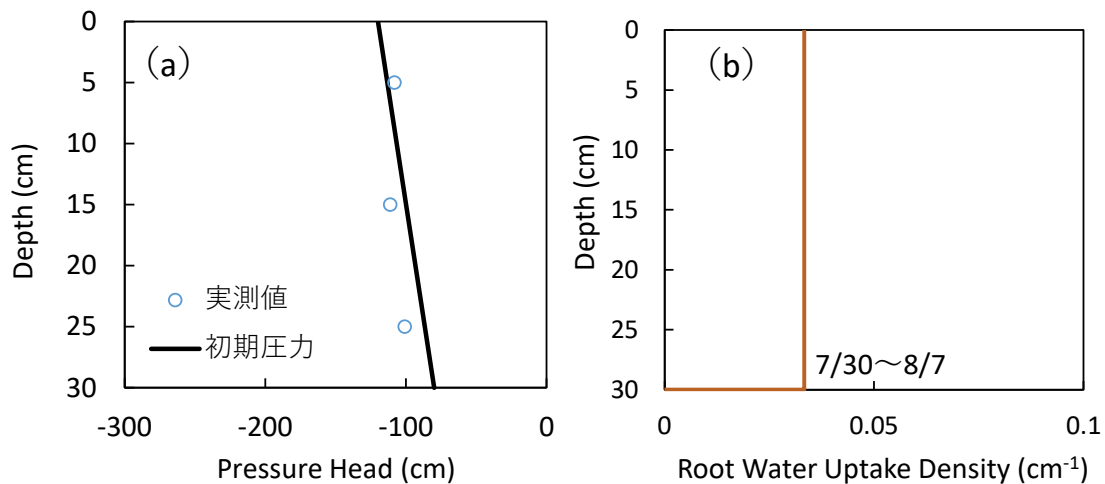


図 3.18 2018 年 2 期の (a) 初期条件 (b)吸水強度分布 β

表 3.7 2018 年 2 期データより推定した根の吸水に関するパラメータ

		吸水強度分布 β	$E_p : T_p$	ω_c
7/30	乾燥Ⅰ期	0-30 cm	3:7	0.9
7/31				
8/1	乾燥Ⅱ期	0-30 cm	3:7	0.9
8/2				
8/3	乾燥Ⅲ期	0-30 cm	3:7	0.9
8/4				
8/5				
8/6				
8/7				

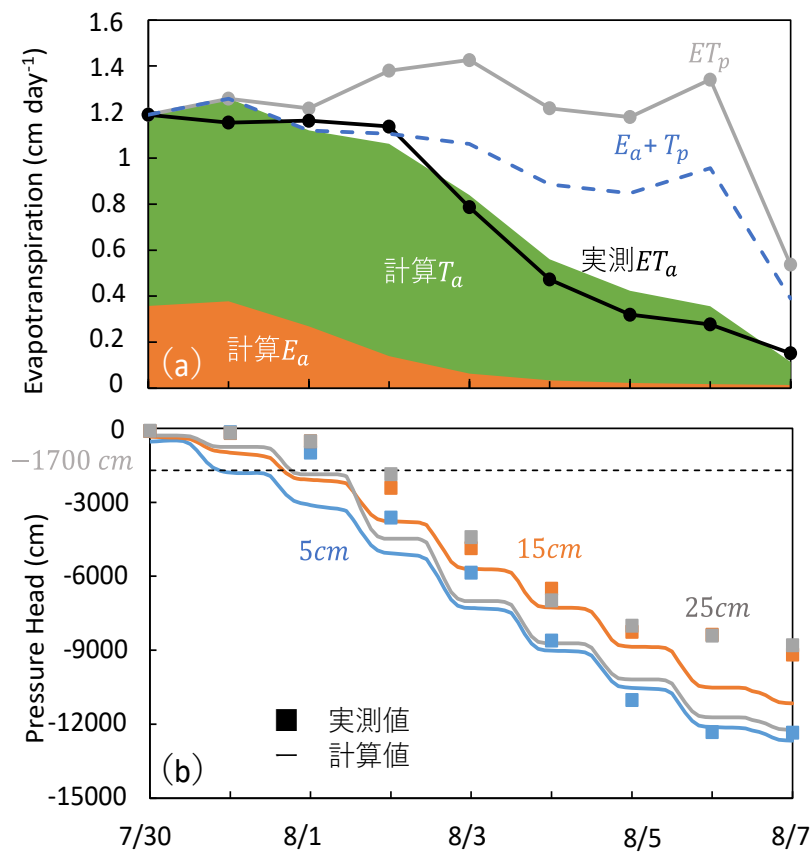


図 3.19 2018 年 2 期データによる計算結果 (a)蒸発散速度 (b)深度別土中水圧力

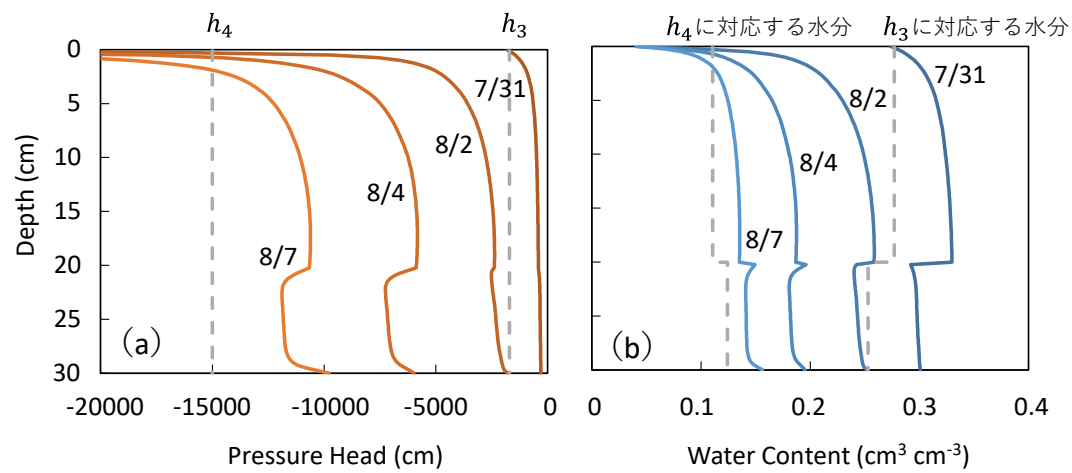


図 3.20 2018 年 2 期データの (a)圧力分布 (b)水分分布

根の伸長によって乾燥中期以降の蒸発散速度が増加した 2019 年データとは異なり, 2018 年 1 期の蒸発散速度は減少を続けた. 解析期間の早くに根が下端に到達して, 全層での一律の吸水により, 乾燥中期には既に全層で乾燥していたため, 蒸発散速度の増加は起こらなかったと考えられる. また, 2018 年 2 期の蒸発散速度は一定の蒸発散速度を維持した後, 減少した. 2018 年 2 期では, 2018 年 1 期や 2019 年データの乾燥初期と比較すると, 蒸発の減少が小さかった. これは, $E_p : T_p$ が 3:7 と蒸発が少なかったのが原因である.

3.5 まとめ

本章では、重量ライシメータを用いたダイズ栽培実験の乾燥過程に測定した実蒸発散速度 ET_a と土中水圧力 h を目的関数にして、解析期間を分割して、段階的に逆解析フローチャートの手順にしたがって水分移動モデルのパラメータを推定した。解析期間は、根の伸長と蒸発散速度の変化に注目して分割した。ペンマン式で推定した可能蒸発散速度 ET_p は、可能蒸発速度 E_p と可能蒸散速度 T_p に分離し、段階的に T_p の割合を増加させた。Feddes モデルの吸水強度分布 $\beta(z)$ の矩形分布は、根の伸長に対応させて下方へと広げた。そして、水分特性曲線 $\theta(h)$ と不飽和透水係数 $K(h)$ は、水収支の観点から実験室で測定した $\theta(h)$ と $K(h)$ を調整した。いずれの解析期間も土層内の水分をすべて消費する状況であったため、飽和体積含水率 θ_s が水収支の視点で重要であった。さらに水分不足を補うために、補填吸水モデルの限界ストレス指数 ω_c を徐々に小さくして吸水強度を高めた。 $\theta(h)$ と $K(h)$ の微調整はすべての計算値に影響を及ぼすため、乾燥初期に戻り解析を再確認する試行錯誤を繰り返し、それぞれのパラメータを収束させた。

根の生長が大きい 2019 年データは、蒸発散速度が乾燥初期から徐々に減少したが、乾燥中期より増加して終盤まで維持をした。これは、植物の生長にともなって可能蒸散速度 T_p の割合が増加し、根が下層の湿潤部へ到達して補填吸水の強度を増加させたことが原因と考えられた。また、乾燥が進行するにつれて、補填吸水モデルの限界ストレス指数 ω_c が徐々に減少し、補填吸水の強度が増加することが確認できた。

この解析手順は、2019 年データを基に作成し、2018 年データの 2 期間で検証した。いずれの期間においても、計算値は実測値をよく再現したことより、提案した解析手順は有効であったと判断できた。乾燥の進行にともなう補填吸水モデルの限界ストレス指数 ω_c の時間変化を考慮しなければ、実測値の再現は困難だった。しかし、吸水強度分布 $\beta(z)$ の形状には最も単純な矩形分布を用いたが、より実態に即した形状と長さを検討することは、今後の課題である。また、不飽和透水係数 $K(h)$ の間隙結合係数 l は 0.5 に固定した。しかし、多くの土の l は、0.5 以外の値をとることが報告されている（たとえば、坂井・取出（2007））。これは、今回用いた目的関数の実蒸発散速度 ET_a と土中水圧力 h に対しては、 $\theta(h)$ と $K(h)$ を定めきれないことも要因である。実際、 l に 0.5 以外の値を用いても、ほぼ同様の結果を与える異なるパラメータ値の $\theta(h)$ と $K(h)$ が存在した。今回の実験では、体積含水率 θ がセンサの不良で利用できなかったが、 $\theta(h)$ と $K(h)$ の推定精度を高めるためには、中村ら（2016）の報告にあるように、目的関数に体積含水率 θ の測定値の経時変化を含める必要があったと考える。

第4章 水ストレス下の根の吸水特性

前章では、重量ライシメータで測定した乾燥過程の蒸発散速度と土中水圧力を再現するように水分移動特性、可能蒸発速度 E_p と可能蒸散速度 T_p の割合、根の吸水特性のパラメータを推定した。本章では、推定した根の吸水特性に基づき、根の生長過程の吸水速度分布の変化を求め、水ストレス下の根の吸水特性について考察した。そして、補填吸水モデルによる吸水増加量に対して、下方へ生長した根による湿潤な下層からの補填吸水量を定量的に把握することを試みた。また、補填吸水モデルが表す水ストレス下の根の吸水特性である、補填吸水による増加とストレス耐性強化による増加について考察した。前章と同様に、まず、根の伸長が大きかった 2019 年のデータについての解析を行い、そのうえで 2018 年の 2 期間のデータを解析して、根の生長段階による違いを考察した。

4.1. 根が伸長段階の吸水特性（2019 年）

根が伸長段階にあるデータ（2019 年）の実蒸発散速度 ET_a の実測値と計算値とパラメータを図 4.1 に示す。根が 15 cm より 30 cm まで徐々に伸長し、可能蒸発速度 E_p と可能蒸散速度 T_p の割合は植物の生長にともなって 7:3 から 3:7 まで変化し、乾燥が進行して補填吸水モデルの限界ストレス指数 ω_c は 1 から 0.4 まで変化して、実蒸発散速度 ET_a の計算値は実測値を再現した。このときの水分移動の圧力分布と水分分布を図 4.2 に示す。期間の最後には、上層の水分は永久しおれ点付近まで減少し、下層も初期しおれ点を下回るまで減少が、最下層には若干の水分が残存していた。

この期間の正午の吸水速度分布を図 4.3 に示す。ここでは、1.3.3 項で定義した補填吸水モデルによる吸水増加分の成分分離にしたがい、補填吸水による増加分を青色とストレス耐性強化による増加分をオレンジ色で示した。7/31, 8/5, 8/10, 8/13 と根が伸長し、吸水領域は下方へと広がった。表層付近の水分が蒸発によって失われ、さらに蒸散で根群域の水分が失われた。それにより、水ストレスが生じて、上層から実吸水速度 S_a は可能吸水速度 S_p より小さくなった。20 cm 以深の下層は湿潤状態であり、下層へ根が到達すると、到達した領域から吸水が開始して実吸水速度 S_a は可能吸水速度 S_p を満たした。しかし、この吸水速度では計算値は実蒸発散速度 ET_a を過小評価した。そこで、補填吸水モデルを適用すると、実吸水速度 S_a は限界ストレス指数 ω_c に応じた倍率で補填実吸水速度 S_{ac} に増加した。そして、下層部の S_{ac} は S_p を大きく上回った。

図 4.4 は、図 4.3 で色分けして示した実吸水速度 S_a から補填実吸水速度 S_{ac} への増加に対する補填吸水による増加分とストレス耐性強化による増加分の経時変化である。根の伸長と補填吸水モデルの強度の増加により、補填吸水とストレス耐性強化の両者ともに増加した。特に 8/10 以降の補填吸水の増加は大きく、吸水増加に占める補填吸水による増加の割合は、最大で 6 割を示した。

図 4.5 には、1.3.3 項の定義に基づき、吸水速度分布より求まるみかけの水ストレス応答関数 α' を土中水圧力 h の関数として Feddes モデル型に示した。みかけの水ストレス応答関数 α' の存在範囲を示すために、土中水圧力 h に対して求まる α' をオレンジ色線で示した。7/31 の α' は、補填前の水ストレス応答関数 α 上に存在し、圧力の高い湿潤領域に偏在した。8/5, 8/10, 8/13 と進むごとに、みかけの α' は α よりも上方に現れ、存在範囲は低圧力の乾燥領域へ広がった。

また、みかけの水ストレス応答関数 α' の勾配が大きくなり、 $\alpha' = 1$ と関数が交差する点であるみかけの初期しおれ点 h_3' は、補填吸水モデルの増強にともなって低下した。補填吸水モデルを適用していない($\omega_c = 1$)ときには、 $h_3 = -1700\text{ cm}$ だったが、 $\omega_c = 0.4$ の 8/13 には、 $h_3' = -10000\text{ cm}$ まで低下した。図 4.4 には、みかけの初期しおれ点 h_3' の経時変化も併記した。

以上により、補填吸水モデルの適用によって、水ストレス下の吸水増加を、湿潤領域からの補填吸水とストレス耐性強化の 2 成分を分離して評価することができた。また、ストレス耐性強化をみかけの初期しおれ点 h_3' の低下として表現することができた。

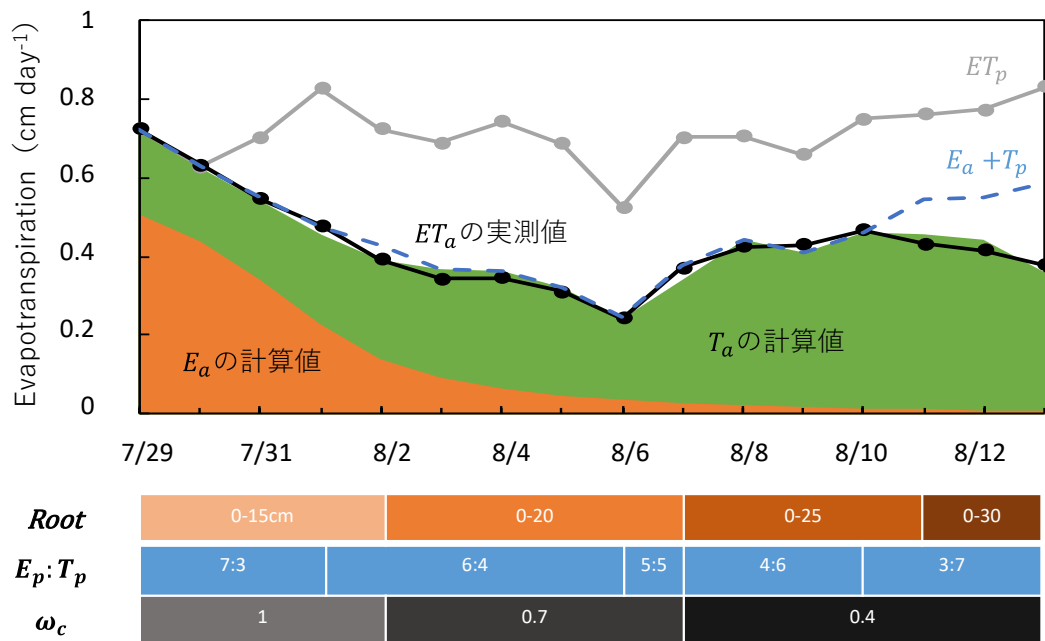


図 4.1 根が伸長段階にあるデータ（2019 年）の実蒸発散速度 ET_p の実測値と計算値とパラメータ

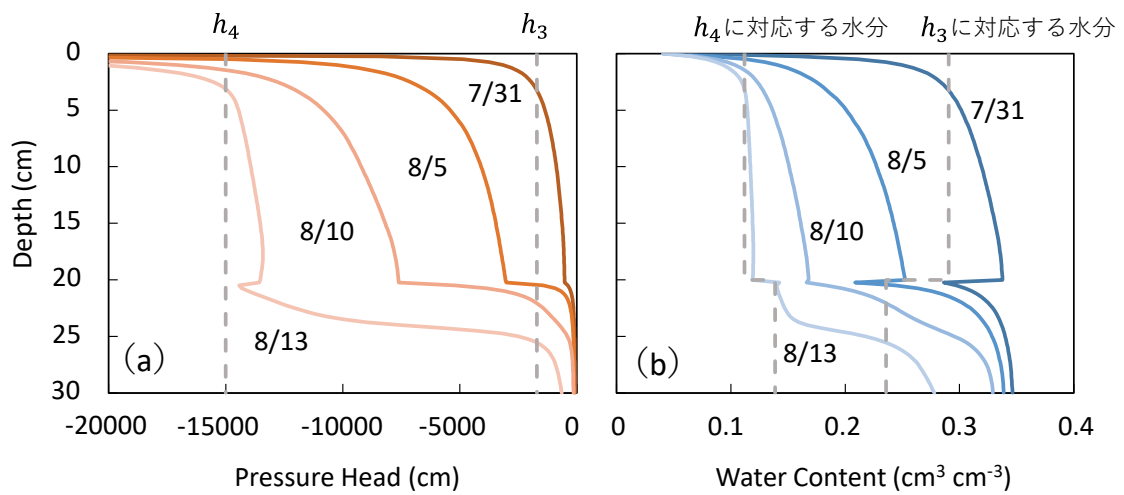


図 4.2 根が伸長段階にあるデータ（2019 年）の (a)圧力分布 (b)水分分布

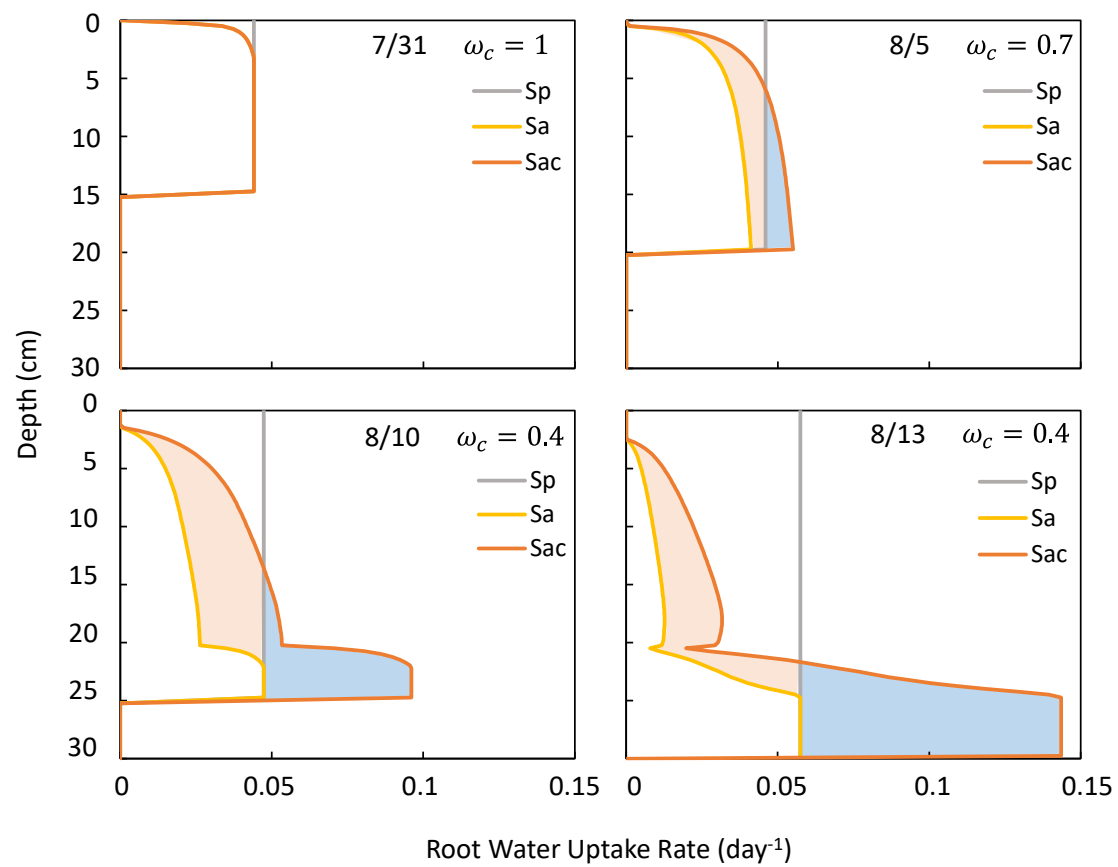


図 4.3 根が伸長段階にあるデータ（2019 年）の正午の吸水速度分布
水色は補填吸水による増加分，オレンジ色はストレス耐性強化による増加分．

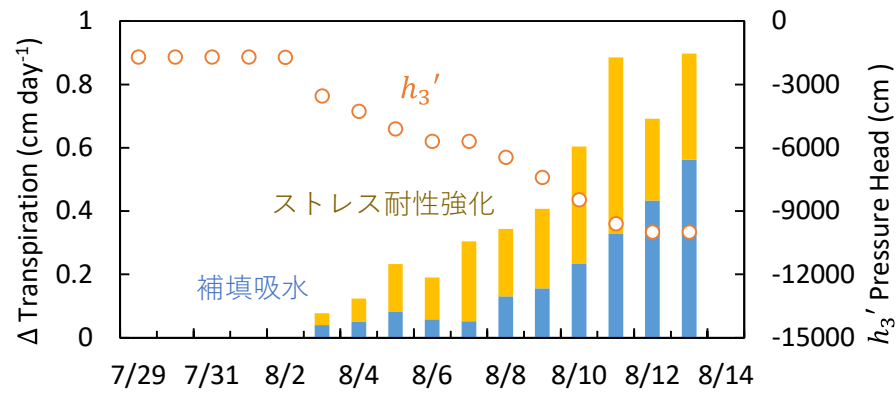


図 4.4 根が伸長段階にあるデータ（2019 年）の各日正午の補填実吸水速度 S_{ac} への補填吸水増加分とストレス耐性強化分およびみかけの初期しおれ点 h_3'

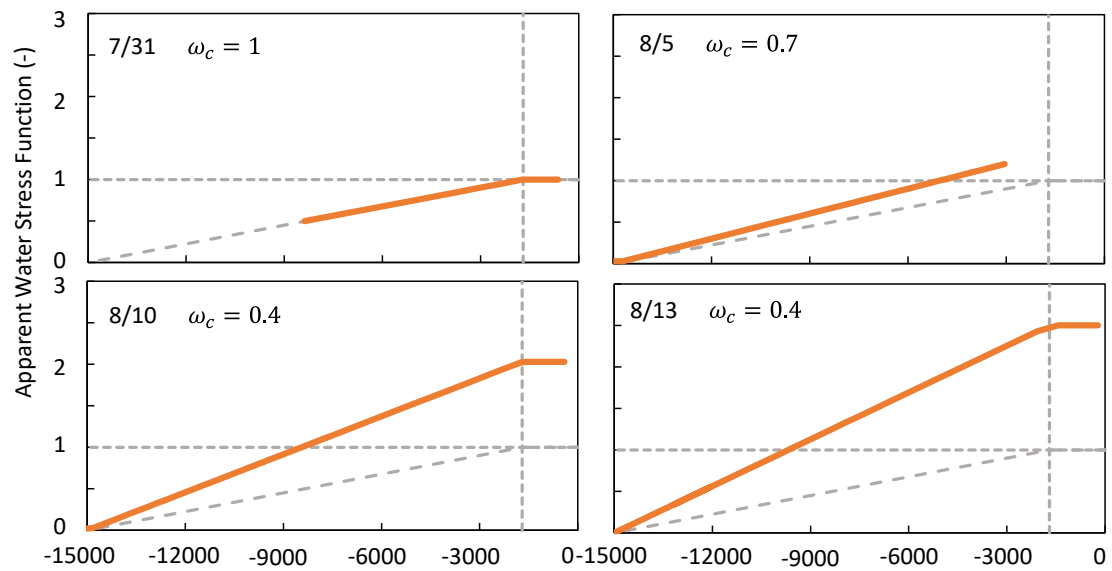


図 4.5 根が伸長段階にあるデータ（2019 年）のみかけの水ストレス応答関数 α'

4.2. 根が下端近傍にある吸水特性（2018 年）

2018 年データの乾燥期間 1 期のダイズは比較的小さく、2 期のダイズは大きく生長した。根が下端近傍にあるデータの 1 期と 2 期の吸水特性について、2019 年データと同じ吸水速度分布に基づく解析を行い、比較検討を行った。

1 期の吸水特性

根が下端近傍にある 1 期のデータの実蒸発散速度 ET_a の実測値と計算値とパラメータを図 4.6 に示す。根が 25 cm より 30 cm まで伸長し、可能蒸発速度 E_p と可能蒸散速度 T_p の割合は期間通して 5:5 一定、乾燥が進行して補填吸水モデルの限界ストレス指数 ω_c は 1 から 0.5 まで変化して、実蒸発散速度 ET_a の計算値は実測値を再現した。このときの水分移動の圧力分布と水分分布を図 4.7 に示す。根が下端まで到達した 7/14 には、最下層の水分消費が急増し、期間の最後には、上層も下層も水分は永久しおれ点付近まで減少した。

この期間の正午の吸水速度分布を図 4.8 に示す。図 4.3 と同じく、補填吸水による増加分を青色とストレス耐性強化による増加分をオレンジ色で示した。図 4.6 に示したように、7/11 の根は 25 cm 深まで到達しており、7/14 には 30 cm 深に到達した。2019 年データの根が伸長段階にあるときと同様、表層からの蒸発によって水分減少した表層の吸水速度は早くから減少した。しかし、乾燥初期段階で根群域が土層電体に広がったために、土層全体からの吸水によって全層の実吸水速度 S_a は低下した。補填吸水モデルを適用すると補填実吸水速度 S_{ac} は増加するが、青色の最下層の補填吸水による増加分はわずかであった。一方、ストレス耐性強化による単位時間あたりの吸水量は、限界ストレス指数 ω_c が減少して補填吸水強度が増すと増加した。

図 4.9 は図 4.5 と同じく Feddes モデル型のみかけの水ストレス応答関数 α' である。7/11 は、補填前の水ストレス応答関数 α 上に存在し、7/14、7/17、7/20、7/23 と進むごとに、みかけの水ストレス応答関数 α' は補填前の水ストレス応答関数 α よりも上方に現れたが、図 4.5 と比較すると増加は小さい。一方、補填吸水モデルの増強にともなって、みかけの水ストレス応答関数 α' の勾配は徐々に大きくなり、 $\omega_c = 0.5$ の 7/23 には、 $\alpha' = 1$ と関数が交差する点、みかけの初期しおれ点は $h_3' = -8500 \text{ cm}$ となった。

図 4.10 は、図 4.4 と同じく各日正午の補填実吸水速度 S_{ac} への補填吸水増加分とストレス耐性強化増加分およびみかけの初期しおれ点 h_3' の経時変化である。この乾燥期間中、補填吸水モデルの限界ストレス指数 ω_c は 1 から 0.5 まで減少させたが、湿潤な最下層からの補填吸水分はわずかである。この解析期間では、補填吸水モデルによる吸水増加の大半は、みかけの初期しおれ点 h_3' の低下によるストレス耐性強化による増加であったことがわかる。

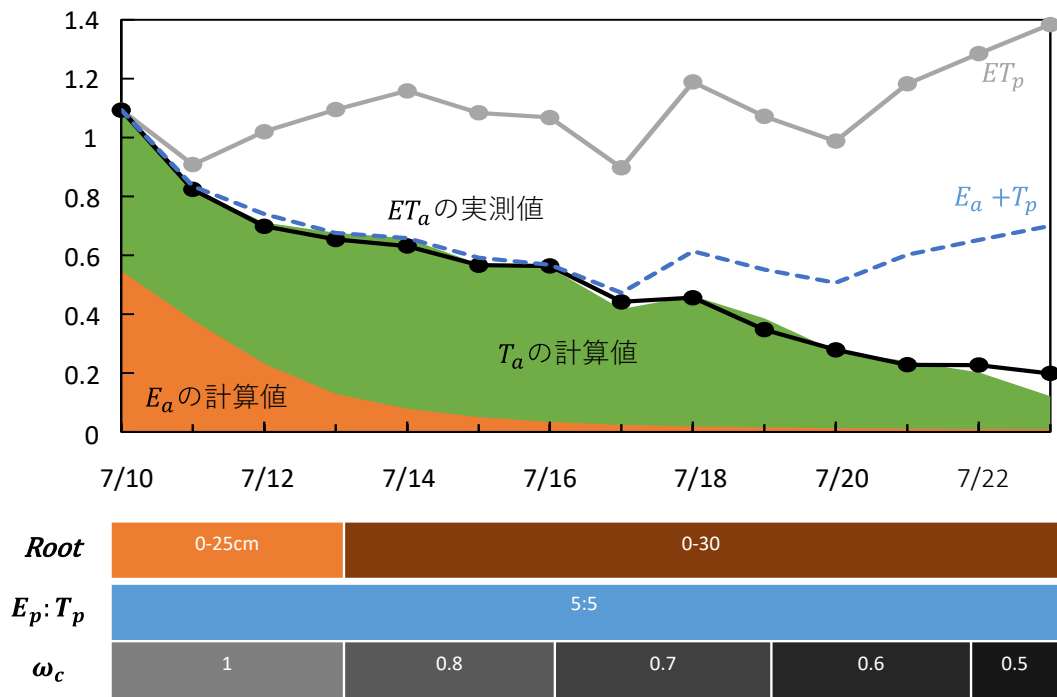


図 4.6 根が下端近傍にあるデータ（2018 年 1 期）の実蒸発散速度 ET_p の実測値と計算値とパラメータ

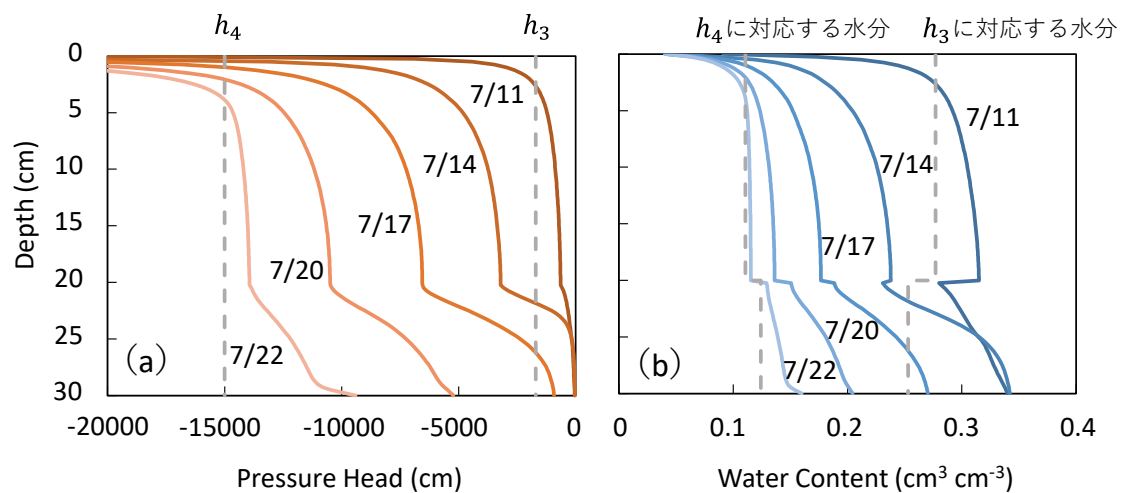


図 4.7 根が下端近傍にあるデータ（2018 年 1 期）の (a)圧力分布 (b)水分分布

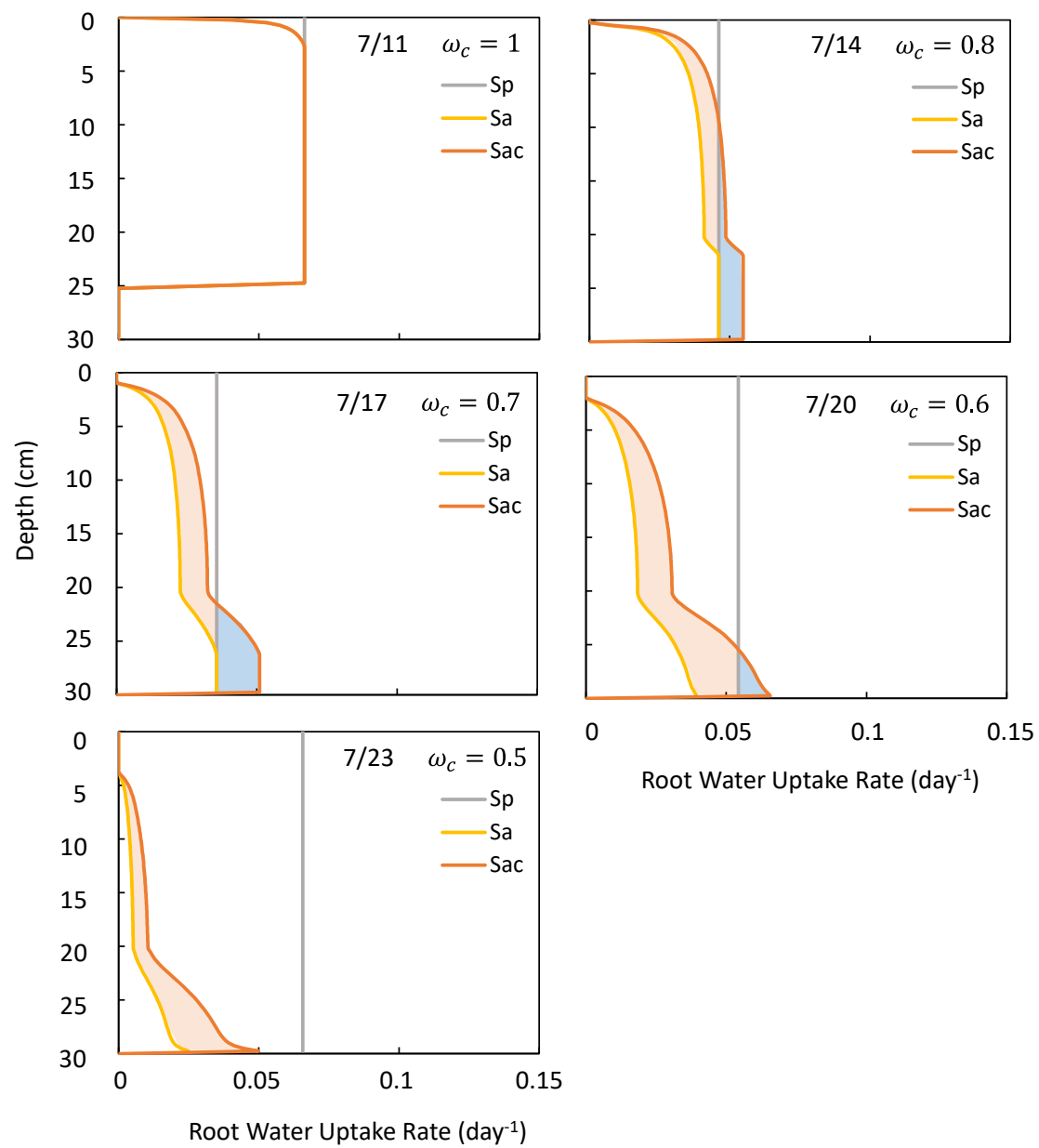


図 4.8 根が下端近傍にあるデータ（2018 年 1 期）の正午の吸水速度分布
水色は補填吸水による増加分。オレンジ色はストレス耐性強化による増加分。

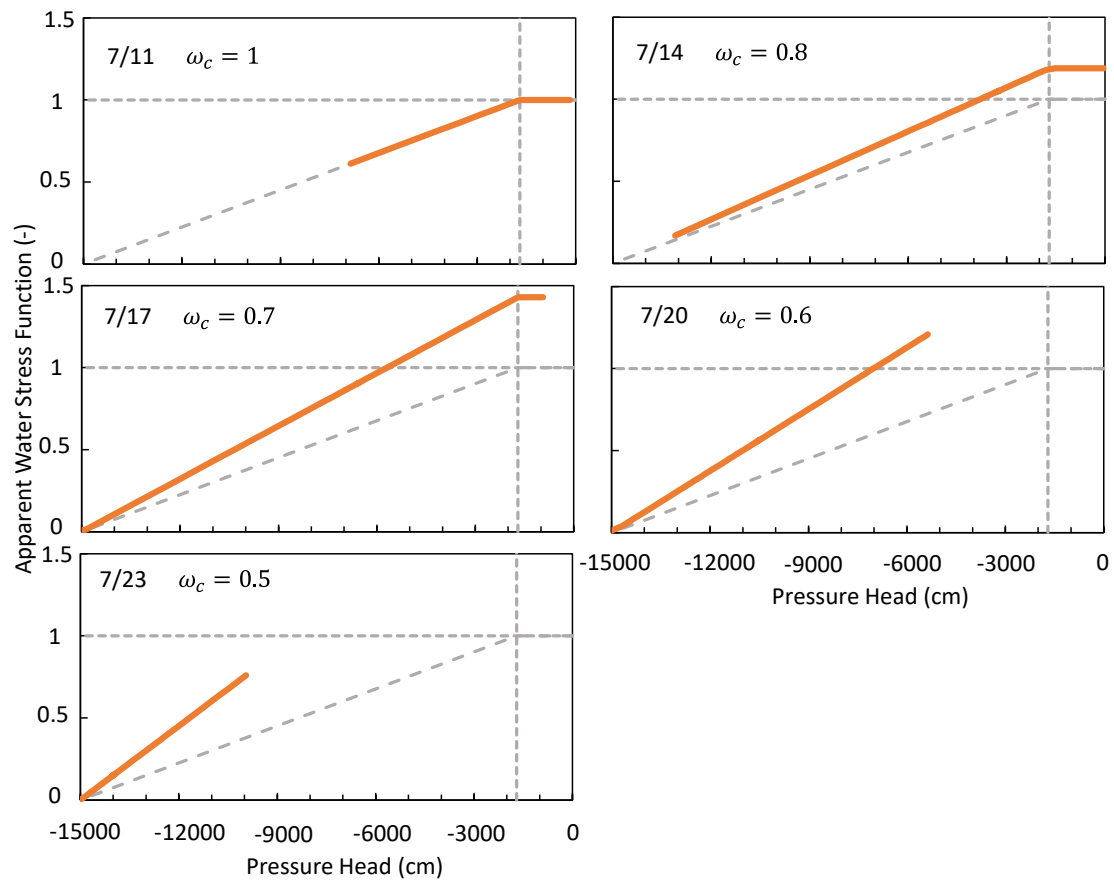


図 4.9 根が下端近傍にあるデータ（2018 年 1 期）のみかけの水ストレス応答関数 α'

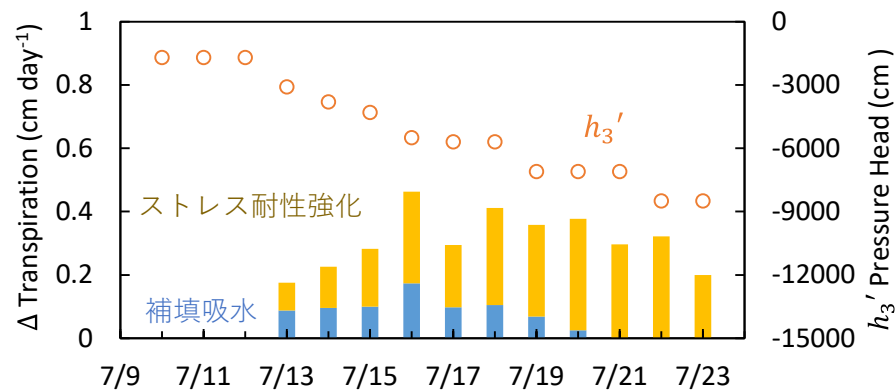


図 4.10 根が下端近傍にあるデータ（2018 年 1 期）の各日正午の単位時間あたりの吸水増加量とストレス耐性強化によって圧力低下した初期しおれ点に対応する h_3'

2 期の吸水特性

根が既に最下端まで到達していた 2 期データの実蒸発散速度 ET_a の実測値と計算値とパラメータを図 4.11 に示す。期間を通して、根は下端の 30cm、可能蒸発速度 E_p と可能蒸散速度 T_p の割合は 3:7 一定、補填吸水モデルの限界ストレス指数 ω_c は 0.9 一定として、実蒸発散速度 ET_a の計算値は実測値を再現した。図 4.12 に示す圧力分布と水分分布より、初期より全層で水分消費されたことがわかる。

図 4.13 は、正午の吸水速度分布である。図 4.14 は、Feddes モデル型のみかけの水ストレス応答関数 α' である。7/31 は、補填前の水ストレス応答関数 α 上に存在し、8/2, 8/4, 8/7 と進めても、みかけの水ストレス応答関数 α' は、水ストレス応答関数 α よりもわずか上方に現れる程度であるが、乾燥の進行にともなってプロットの存在範囲は、高圧力の湿潤領域から低圧力の乾燥領域へ移動した。みかけの水ストレス応答関数 α' は、補填吸水モデルの限界ストレス指数 ω_c が 0.9 一定だったため、 $\alpha' = 1$ と関数が交差するみかけの初期しおれ点 h_3' は $h_3' = -3000 \text{ cm}$ であり、前述の 2 例に比べて大きかった。

図 4.15 は、各日正午の補填実吸水速度 S_{ac} への補填吸水増加分とストレス耐性強化増加分およびみかけの初期しおれ点 h_3' の経時変化である。わずかに生じた補填吸水による増加分は、8/3 には消失し、吸水増加はストレス耐性強分に占められた。しかし、補填吸水モデルの限界ストレス指数 ω_c が 0.9 までの低下であったため、ストレス下の吸水増加は 1 期より小さかった。

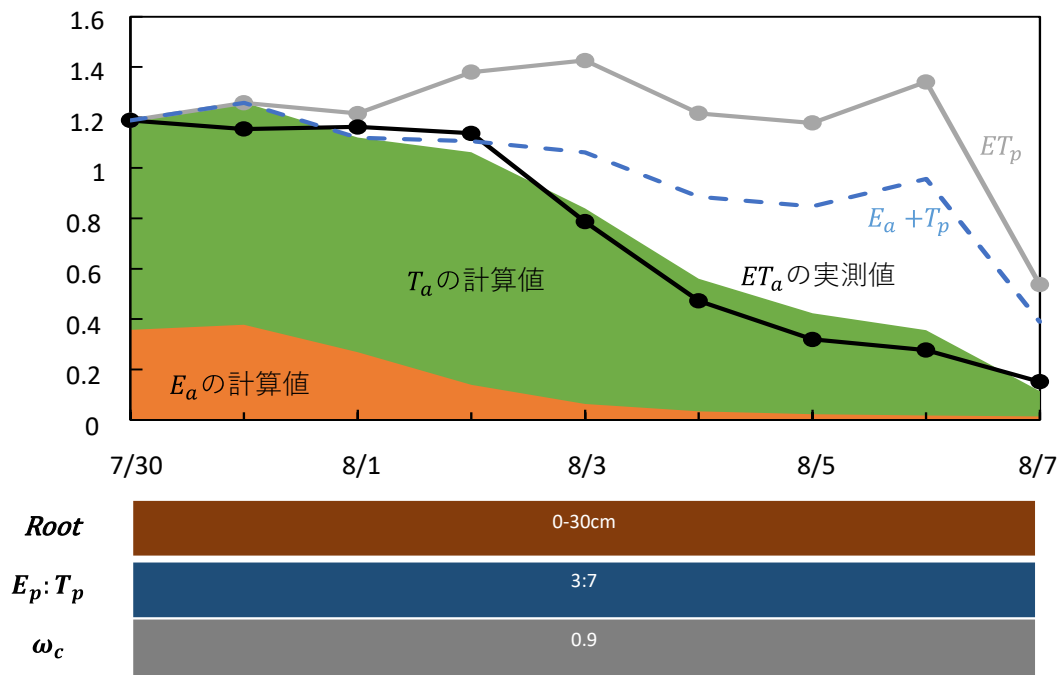


図 4.11 根が下端近傍にあるデータ（2018 年 2 期）の実蒸発散速度 ET_p の実測値と計算値とパラメータ

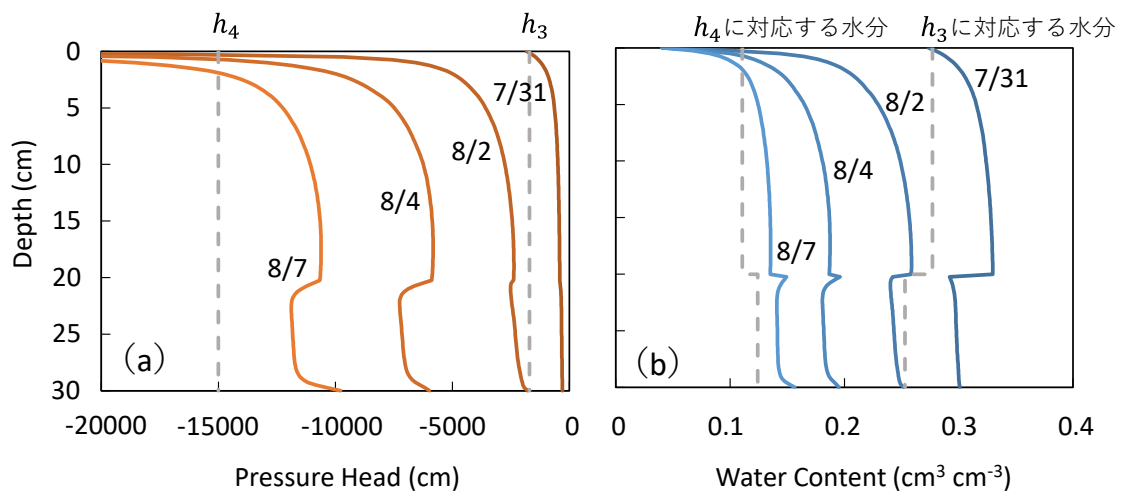


図 4.12 根が下端近傍にあるデータ（2018 年 2 期）の (a)圧力分布 (b)水分分布

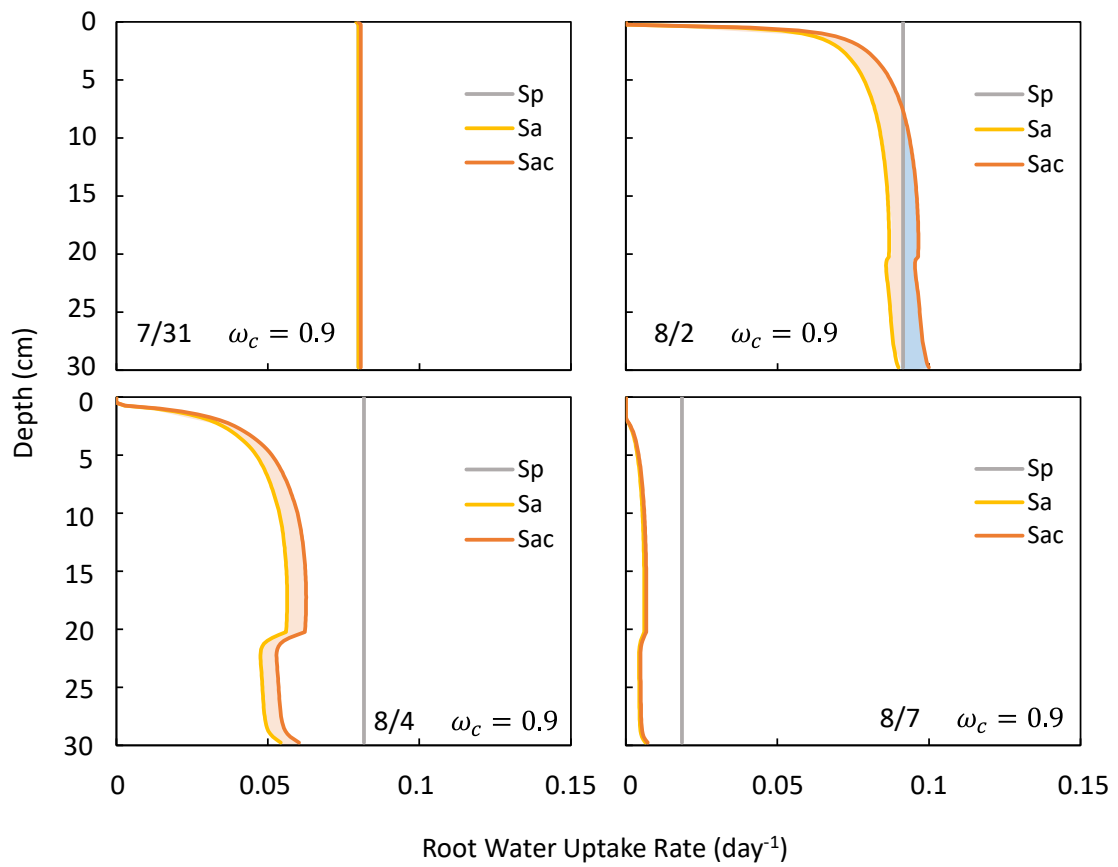


図 4.13 根が下端近傍にあるデータ（2018 年 2 期）の正午の吸水速度分布
水色は補填吸水による増加分，オレンジ色はストレス耐性強化による増加分。

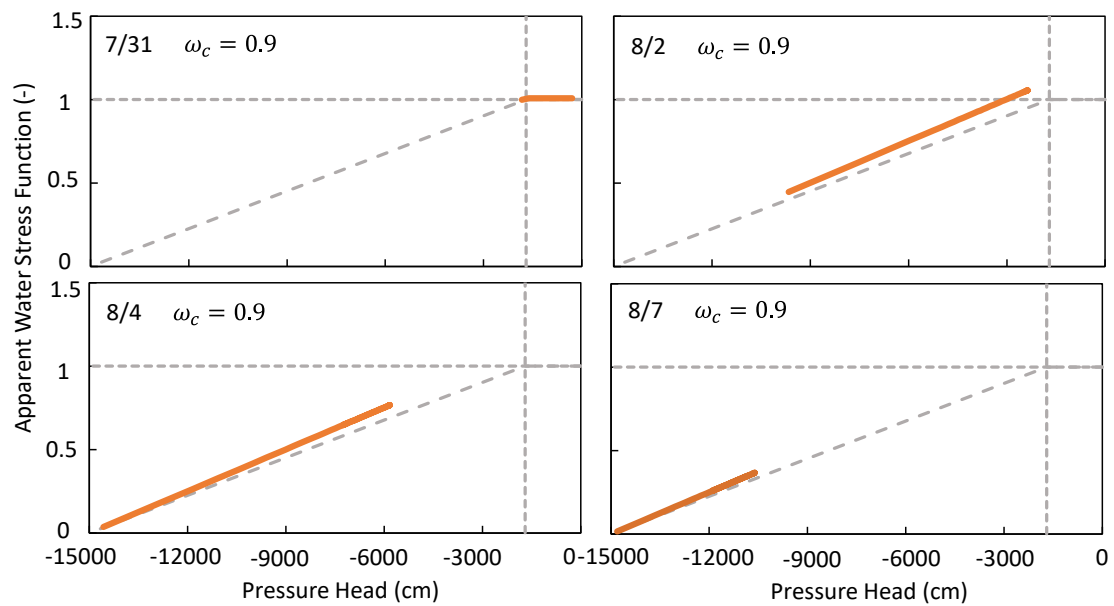


図 4.14 根が下端近傍にあるデータ（2018 年 2 期）のみかけの水ストレス応答関数 α'

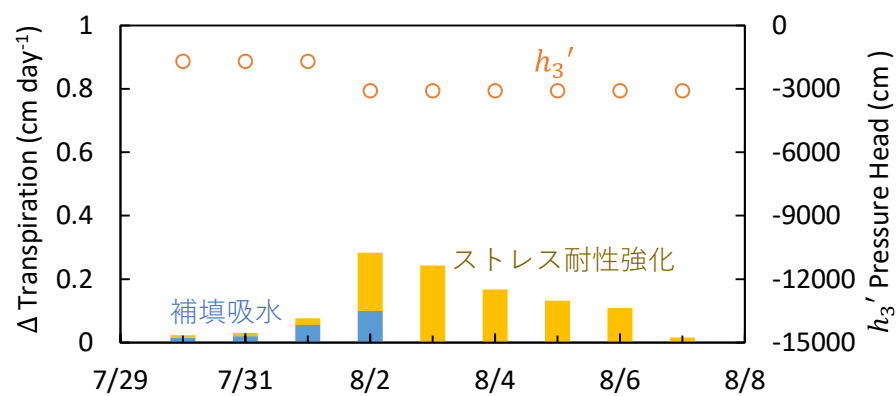


図 4.15 根が下端近傍にあるデータ（2018 年 2 期）の各日正午の単位時間あたりの吸水増加量とストレス耐性強化によって圧力低下した初期しおれ点に対応する h_3'

4.3. 補填吸水モデルについて

ここまで、乾燥過程の 3 期間におけるダイズの吸水特性について、補填吸水モデルを用いて推定を行った。根の吸水に Feddes モデルを用いた水分移動モデルに対して補填吸水モデルを適用すると、水ストレス下の実蒸散速度 T_a を増加させ、実測した実蒸発散速度 ET_a をよく再現することができた。重量ライシメータによる栽培実験において、最も信頼のおける測定値は ET_a である。通常の Feddes モデルを用いた水分移動モデルでは、 ET_a を過小評価した。これは、水ストレス下のダイズが、モデルの予測値以上の吸水を行ったことを意味する。この Feddes モデルによる水ストレス下の吸水を増加させる機能が補填吸水モデルであり、得られた補填実吸水速度 S_{ac} は、少なくとも実測値の水収支を満たす吸水分布である。

この補填実吸水速度 S_{ac} の分布に対して、可能吸水速度 S_p を超えた分を補填吸水の増分、 S_p 以下の範囲での増分をストレス耐性の増分とみなして評価したところ、補填吸水モデルは、根の伸長段階や土層の水分分布に応じて、湿潤部からの補填吸水とストレス耐性強化を同時に表現することが明らかになった。下方の湿潤部へ根が伸長する乾燥期間では補填吸水の割合が高いのに対して、下端まで根が到達した期間では、ストレス耐性を高めた吸水増加の割合が大半を占めた。さらに、補填吸水モデルを含めた Feddes モデルのみかけの水ストレス応答関数を定義して評価したところ、みかけの初期しおれ点は $h_3' = -10000\text{ cm}$ まで低下したことが明らかになった。

このように補填吸水モデルを用いる利点は、限界ストレス指数 ω_c のみを変化させることにより単純に吸水強度を高めることができ、2 種類のメカニズムの吸水増加を同時に表現できることである。一方、土中水の流れと水収支から推定した根の吸水特性と、植物根の生理・生態の視点からの多くの研究成果との整合性を図ることは、今後の課題と考える。Feddes モデルでは吸水強度分布 $\beta(z)$ を与えるが、本解析では深さ方向に一定の矩形分布を用いて下方への伸長のみを考慮した。吸水強度分布 $\beta(z)$ は根の分布を反映はするが、根の吸水を担う根毛の分布は図 1.5 に示す根密度分布とは一致しない。吸水の役割を担う根毛の分布を吸水強度に反映させることは現段階では難しい。また、ダイズが下方に根を伸長させる段階では、側方にも根を広げていたことも考えられる。さらに、断面方向の水分分布はミクロには不均一ではないことも考えられる。そのため、根が吸水した部位から水分量が低下し、乾燥の進行にともない根毛が水分を求めて断面方向にも広がり、さらなる吸水が生じた可能性もある。このような様々な要因により生じる吸水の増加を一次元の吸水強度分布 $\beta(z)$ と補填吸水モデルで解釈すると、みかけ上、初期しおれ点が $h_3' = -10000\text{ cm}$ 程度に低下するまで吸水が継続したことを示す。しかし、この結果は、初期しおれ点自体が大きく低下したのではなく、モデルで考慮されない要因の吸水増加が影響した結果と考えるのが妥当であると推測する。

4.4. まとめ

ダイズの根が伸長段階のデータの水ストレス下の根の吸水特性を、補填吸水モデルによる吸水速度分布より評価をした。ストレス耐性の強化では初期しおれ点 h_3 を低下させても、最大で可能吸水速度 S_p までの吸水速度の増加であるが、補填吸水モデルを適用することで S_p より大きい補填実吸水速度 S_{ac} を表現できた。根が伸長段階にある乾燥期間では、乾燥の進行にともなって、限界ストレス指数 ω_c は1から0.4まで徐々に減少して、補填吸水の強度は増大した。吸水強度分布の変化より根の伸長によって湿潤部に到達すると、乾燥が進行した上層での吸水低下を湿潤な下層における補填的な吸水増加で補う実態が明らかになった。実吸水速度 S_a から補填実吸水速度 S_{ac} への増加に対する補填吸水による増加分とストレス耐性強化による増加分を評価したところ、吸水増加に占める補填吸水による増加の割合は、最大で6割に達した。また、ストレス耐性も同時に強化され、補填吸水モデルの効果を含めたみかけの初期しおれ点は $h_3' = -10000\text{ cm}$ まで低下した。根がより生長していた他の2期間の乾燥過程に対しても補填吸水モデルは水ストレス下の吸水増加を表現することができたが、湿潤部からの補填吸水の割合は小さかった。

HYDRUS-1Dの補填吸水モデルは、限界ストレス指数 ω_c を低下させることにより、補填吸水の強度を強めることができる。本研究の3期間に対する補填吸水モデルの適用により、水ストレス下の吸水速度の増加を、根の伸長段階や土層の水分分布に応じて、湿潤部からの補填吸水とストレス耐性強化を同時に表現できるモデルであることが明らかになった。しかし、モデルによる解析結果は、植物生理の観点では初期しおれ点が -10000 cm まで低下したとは考えにくく、モデルでは考慮されていない要因による吸水増加が、みかけ上、初期しおれ点の低下となって現れたと考える。

第5章 おわりに

本研究では、重量ライシメータを用いたダイズ栽培実験で水ストレスを受けているダイズの根の吸水特性を明らかにすることを目的に、重量ライシメータを用いてダイズ栽培実験を行った。まず、乾燥過程の実蒸発散速度 ET_a と土中水圧力 h の変化を再現する、補填吸水モデルを用いた水分移動モデルのパラメータを段階的に推定した。そして、根の生長過程の補填吸水モデルに基づく吸水速度分布の変化を求め、水ストレス下の根の吸水特性について考察した。

ダイズ栽培実験は、2018年と2019年で同一圃場に設置した30 cm ライシメータを用いて行った。ライシメータでは、重量変化による実蒸発散速度 ET_a と3つの深さの土中水圧力 h を測定した。ライシメータが十分に湿潤状態であるときの実蒸発散量を可能蒸発散量とみなして、気象データよりペンマン式で求めた日蒸発散量をみかけの作物係数により補正した。さらに、日可能蒸発散量の日内の時間変化は、日射量によって変化すると仮定した。解析対象の乾燥期間は、2018年の2期間、2019年の1期間とした。

乾燥過程の根の吸水をとまなう水分移動モデルのパラメータの推定は、ダイズ栽培実験の乾燥過程に測定した実蒸発散速度 ET_a と土中水圧力 h を目的関数にして、根の伸長と蒸発散速度の変化に注目して解析期間を分割して、段階的に逆解析フローチャートの手順にしたがって水分移動モデルのパラメータを推定した。ペンマン式で推定した可能蒸発散速度 ET_p を可能蒸発速度 E_p と可能蒸散速度 T_p に分離し、段階的に T_p の割合を増加させた。また、Feddes モデルの吸水強度分布 $\beta(z)$ は、矩形分布を根の伸長に対応させて下方へと広げた。水分特性曲線 $\theta(h)$ と不飽和透水係数 $K(h)$ は、水収支の観点から実験室で測定した $\theta(h)$ と $K(h)$ を調整した。いずれの解析期間も土層内の水分をすべて消費する状況であったため、飽和体積含水率 θ_s が水収支の視点で重要であった。さらに水分不足を補うために、補填吸水モデルの限界ストレス指数 ω_c を徐々に小さくして吸水強度を高めた。根の生長が大きい2019年データは、蒸発散速度が、乾燥初期から徐々に減少したが、乾燥中期より増加して終盤まで維持をし、植物の生長にとまなう可能蒸散速度 T_p の割合が増加し、根が下層の湿潤部へ到達して補填吸水の強度を高めたことが原因と考えられた。また、乾燥が進行するにつれて、補填吸水モデルの限界ストレス指数 ω_c を徐々に減少し、補填吸水の強度が徐々に高まることが確認できた。この解析手順は、2019年データを基に作成し、2018年データの2期間で検証した。いずれの期間においても、計算値は実測値をよく再現したことより、提案した解析手順は有効であったと判断した。

水ストレス下の吸水特性は、ダイズの根が伸長段階の吸水特性を、補填吸水モデルによる吸水速度分布より評価をした。ストレス耐性の強化では初期しおれ点 h_3 を低下させても、最大で可能吸水速度 S_p までの吸水速度の増加であるが、補填吸水モデルを適用することで下層の湿潤部の S_p より大きい補填実吸水速度 S_{ac} を表現できた。乾燥の進行にとまなう、限界ストレス指数 ω_c は1から0.4まで徐々に減少して補填吸水の強度は増大し、根の伸長に

よって湿潤部に到達すると、乾燥が進行した上層での吸水低下を湿潤な下層における補填的な吸水増加で補う吸水速度分布が明らかになった。実吸水速度 S_a から補填実吸水速度 S_{ac} への増加に対して、補填吸水による増加分とストレス耐性強化による増加分を評価したところ、補填吸水による増加の割合は、最大で6割に達した。また、ストレス耐性も同時に強化され、補填吸水モデルの効果を含めたみかけの初期しおれ点は $h_3' = -10000\text{ cm}$ まで低下した。根がより生長していた他の2期間の乾燥過程に対しても補填吸水モデルは水ストレス下の吸水増加を表現することができたが、湿潤部からの補填吸水の割合は小さかった。HYDRUS-1Dの補填吸水モデルは、限界ストレス指数 ω_c を低下させることにより、補填吸水の強度を強めることができる。本研究の3期間に対する補填吸水モデルの適用により、水ストレス下の吸水速度の増加を、根の伸長段階や土層の水分分布に応じて、湿潤部からの補填吸水とストレス耐性強化を同時に表現できるモデルであることが明らかになった。しかし、初期しおれ点が -10000 cm まで低下すると示したことは、モデルでの解析結果であり、植物生理の実態と一致するものではないことが課題である。

以上をまとめると、本研究の成果は、次の5点である。

(1) 根の吸水をともなう水分移動特性の推定を、段階的に逆解析してパラメータを推定する手法を提案して、その手法を検証したところ、目的関数を再現したため、この手法の有効性が検証できた。

(2) 補填吸水モデルの限界ストレス指数 ω_c は、乾燥の進行にともなって徐々に小さく変化した。

(3) 補填吸水モデルの適用によって、吸水増加分を補填吸水による増加とストレス耐性強化による増加の2成分に分離できた。

(4) 補填吸水モデルの効果を用いて Feddes モデルの水ストレス応答関数に取り入れると、みかけの初期しおれ点 h_3' の低下を定量的に確認できた。

(5) 補填吸水モデルは補填吸水による増加とストレス耐性強化による増加の両方を発現できるモデルであることがわかった。

これらの成果は、根の吸水特性の解析に重要な知見であり、土中水分移動の研究や、植物の養分吸収の研究の発展の一助となることだろう。

参考文献

1. Durner, W. (1994): Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resour. Res.*, 30: 211-223.
2. FAO(1998):Crop Water requirements,Irrigation and drainage paper,No.56.
3. Fayer, M.H. and Simmons, C.S. (1995): Modified soil water retention functions for all matric suctions. *Water Resour. Res.*, 31: 1233-1238.
4. Frederik Schrader, Wolfgang Durner, Johann Fankb k, Sebastian Gebler, Thomas Pütz, Matthias Hannes, Ute Wollschlägere (2013): Estimating precipitation and actual evapotranspiration from precision lysimeter measurements, *Procedia Environmental Sciences*.
5. Jury, W.A. and Horton, R. (取出伸夫 監訳: 井上光弘・長裕幸・西村拓・諸泉利嗣・渡辺晋生訳)(2006): 土壌物理学－土中の水・熱・ガス・化学物質移動の基礎と応用－, 築地書店, 東京.
6. Kroes, J.G. and Van Dam, J.C. (2003): Reference manual SWAP version 3.0.3. Alterra, Green World research, Wageningen. Alterra-rapport no. 773.
[<http://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/35471>]
7. 三口貴久代(2018): 畑地の土中水分変化を最適表示するデータ選択の検討, 三重大学生物資源学部 卒業論文.
8. 三浦健志, 奥野林太郎(1993): ペンマン式による蒸発散位計算方法の詳細, 農業土木学会論文集, 164, 157-163.
9. 武藤由子, 窪田有真, 桐山直盛, 渡辺晋生(2017): 圃場における土壌水分量と電気伝導率の連続観測のための 5TE センサーの簡易な原位置キャリブレーション, 土壌の物理性, 137: 3-9.
10. 中村公人, 大串祥子, 池浦康広, 田中宣多(2016): 畑地用水計画のための HUDRUS-1D を用いた土壌水分移動解析における土壌水分特性パラメータの推定例, 土壌の物理性, 134: 25-40.
11. 成毛千尋 (2013): 土中水分変化から推定したダイズ根の吸水速度分布について, 三重大学生物資源学部 卒業論文.
12. 成毛千尋 (2015): ダイズ生長過程の土中水分量に基づく根の吸水速度分布の推定, 三重大学大学院生物資源学研究科 修士論文.
13. 農林水産省農村振興局(2016): 土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 計画「農業用水(畑)」.
14. 岡橋卓朗 (2015): 圃場におけるダイズ生長過程の土中水分変化と蒸発散について, 三重大学大学院生物資源学研究科 修士論文.

15. 大西一平 (2017): ポット栽培実験における蒸散速度の日変化に基づく水ストレス応答関数の推定,三重大学大学院生物資源学研究科 修士論文.
16. R.J.Hanks (1983): Yeild and water use relationships: an overview. *In*: Taylor, H.M., Jordan, W.R. and Sinclar, T.R. eds. *Limitations to efficient water use in crop production*. American Society of Agronomy, Madison, 393-411.
17. RITCHIE,JOE T(1972):Model for Predicting Evaporation from a Row Crop with Incomplete Cover,WATER RESOURCES RESEARCH,Vol.8,No.5.
18. Rossi, C. and Nimmo, J.R. (1994): Modeling of soil water retention from saturation to oven dryness. *Water Resour. Res.*, 30: 701-708.
19. 斎藤広隆,坂井 勝,Jiri Šimůnek,取出伸夫(2006):不飽和土中の水分移動モデルにおける境界条件,土壌の物理性,104: 63-73.
20. 斎藤広隆,取出伸夫(2011):蒸発過程の土中水分移動 1.土性の影響,土壌の物理性,119:65-74
21. 坂井 勝,取出伸夫(2007):砂質土と団粒土に対する水分移動特性の検討,土壌の物理性,107:63-77.
22. 坂井 勝,取出伸夫(2009):水分保持曲線と不飽和透水係数の水分移動特性モデル,土壌の物理性,111,61-73
23. 坂井 勝,高橋由奈,丸山篤志(2020):群落熱収支モデルと HYDRUS-1D の連結プログラムを用いた畑地の土壌水分量・地温予測モデルの構築ーダイズ栽培圃場における蒸発・蒸散の配分割合の検討ー,土壌の物理性,146:3-16.
24. Šimůnek,J., Jan W. Hopmans (2009): Modeling compensated root water and nutrient uptake, *Ecological modeling* 220: 505-521.
25. Sterling A. Taylor, Gaylen L. Ashcroft (1972): *PHYSICALEDAPHOLOGY -The physics of Irrigated and Nonirrigated soils-* W.H. Freeman and Company San Francisco:431-448,297-308.
26. 高橋英一(1982):水ストレスと植物の生育ー水不足とのたたかい,化学と生物,20 巻 6 号:380-389
27. van Genuchten, M.Th. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Soc. Am. J.*, 44: 892-898.
28. 弓削こずえ,阿南光政(2016):畑地における作物根の分布と土壌面蒸発の変動を考慮した土壌水分動態解析と消費水量の定量化,土壌の物理性,134,17-24.

付録

A-1 被覆率の算出手順

《概要》

農場で撮影した写真より被覆率を算出する。そのためには、計測エリアの緑色のみを識別できるように、画質調整・トリミングをする必要がある。画質調整は『Photoshop』で、トリミングおよび被覆率算出はフリーソフト『ImageJ』で行う。

《手順》

① 画像方向の正規化

農場の被覆率計測エリアを撮影した写真（撮影のポイントは別途説明）を計測エリアが矩形となるように画像を回転させ保存する。ツールは数種類存在する。

- iPhone 等スマホの画像編集機能
- フリーソフト『手軽にななめ直し』

② 画質調整

緑色を識別できるように『Photoshop』で画質調整する。（『Photoshop』は実験室左奥の PC 内）

1. 『Photoshop』で画像を開く
2. 「画質調整」>「明るさ・コントラスト」>「レベル調整」でチャンネル：「グリーン」を選択し、白スポイトで画像内の白基準を黒スポイトで黒基準を吸い取って調整した後、「OK」する
3. 画像を保存する

③ トリミング&被覆率算出

画質調整後の画像の被覆率計測エリア内の緑色の割合（被覆率）を算出できるように『ImageJ』でトリミング及び緑色率の算出をする。（『ImageJ』は個人机上 PC 内）

1. 『ImageJ』で画像を開く
2. 計測エリアを示す 4 本の杭より矩形選択して「Image」>「Crop」で計測エリアを決める
3. 「Image」>「Adjust」>「Threshold Color」でスライダーを動かして下記の値に調整して緑色を画面上赤色に変える（ダイアログボックス右上×で調整終了）

Hue : 50~120

Saturation : 0~255

Brightness : 0~255

4. 画像をモノクロにするため「Process」>「Binary」>「Make Binary」を選択する
5. 黒色部分の面積率を求めるため「Analyze」>「Analyze Particles」で次の項目へチェックを入れ「OK」する

Display results, Summarize

6. Summary ダイアログボックスに表示されたデータを「Edit」>「Select All」>「Copy」で取り込んだデータをデータ集約ファイルに貼り付ける

《撮影のポイント》

計測エリアの撮影は、地表面と平行になるようにカメラの角度を調整する。計測エリアの撮影サイズは小さくなくても、そこを切り出したものが正方形であればよい。画像の計測エリアが台形になっている場合は、平行に撮影していないため、正方形となるまで調整する必要がある。

A-2 LAI の算出手順

《概要》

農場で採取した株の葉より LAI を算出する。採取した株の全葉をスキャナで読み込んだ後、葉面積を算出する。スキャンは Photoshop で、葉面積算出はフリーソフト『Scion Image』で行う。

《手順》

① 葉の切り落とし

採取した株の全葉をハサミで切り落とす。ただし、開いていない幼葉は対象外とする。この時に、葉の大きさをおおまかに分類しておくとし、次工程がスムーズに行える。

② 葉面のスキャン

スキャナで葉面をスキャンする。スキャナは実験室左奥の PC の横に立てかけてあり、その PC へ接続する。読み込み用ツールは『Photoshop』を使用する。

1. スキャナを USB ポートへ接続する
2. 『Photoshop』を開く
3. スキャン面に葉面が重ならないように並べてフタをする
4. 「ファイル」>「読み込み」>「CanoScan LiDE30/N1240U・・・」で次の設定の状態で「プレビュー」をする

カラーモード：グレースケール 出力解像度：72dpi 原稿サイズ：A4 サイズ

5. プレビュー画面で葉面が重なっていないこと、葉が丸まっていないこと、A4 枠からはみ出していないこと、を確認する（NG の場合は 3.へ戻る）
 6. OK の場合は、「スキャン」をする
 7. （読み込みダイアログボックスを閉じて）「ファイル」>「別名で保存する」でネーミング方法にのっとりファイル名をつけて「bmp 形式」で保存する
- 3.～7.を全葉すべてのスキャンが終わるまで繰り返し実行する。

【格納場所とファイル名】 C:¥LAI2018¥(採取日)¥(採取日)_(日別通番号).bmp

(例)C:¥LAI2018¥0717¥0717_1.bmp

【スキャン時の注意点】

葉が重ならない
葉が丸まらない
A4 の枠に葉が重ならない

③ 葉面積取得

スキャンした画像より葉面積を『Scion Image』で算出をする。（『Scion Image』は個人机上 PC 内）

1. 『Scion Image』でスキャン画像を開く
2. 画像を window サイズに合わせる
「option」 > 「Scale to Fit Window」
3. 縮尺の設定をする
「Analyze」 > 「Set Scale」で次の設定をして「OK」
Measured Distance : 72Pixel
Known Distance : 2.54
Pixel Aspect Ratio : 1.000
Units : Centimeters
4. 測定項目の設定をする
「Analyze」 > 「Option」で次の項目へチェックをして「OK」
Area
Perimeter/Length
Ellipse Major Axis
Ellipse Minor Axis
Wand Auto-Measure
Headings
5. 画像の調整をする
「Process」 > 「Apply LUT」
「Option」 > 「Threshold」
「Process」 > 「Sharpen」
6. フチの影部分を消去する
消しゴムツールで A4 の境界部分の黒い影をこする
7. 個別測定オプションを設定する
「Analyze」 > 「Analyze Particle」で次の項目へチェックをして「OK」
Label Particles
Outline Particles
Ignore Particles Touching Edge
Reset Measurement Counter
8. 測定する
「Analyze」 > 「Measure」

9. 結果を取得する

「Analyze」 > 「Show Result」

「Edit」 > 「Copy Measurement」

集約ファイルの日付シートに貼り付け

(¥¥soilphys_ts¥share¥実験¥農場実験¥2018(高橋・鈴木・三口・尾関) ¥植
物の生長¥LAI¥LAI.xlsx)

1.～9.をスキャン画像の個数分繰り返し実行する.

④ LAI 算出

③で取得した各スキャン画像の葉面積より LAI を算出する.

1. 集約ファイルの日付シートのスキャン画像の葉面積データの「Area」列の合計を算出する
ただし、最終行は合計に含めない
(1 計測するごとに最終行へ合計行を出力する)
2. 全スキャン画像に対する 1.の結果を合計して 1 株の全葉面積とする
3. 2.を単位変換する (平方センチメートル→平方メートル)
4. 1 株の全葉面積に 1 平方メートルあたりの株数を乗じて LAI とする

A-3. 気象データ

圃場の日降水量、日平均気温、日平均相対湿度、高度 2m の日平均風速、日射量、純放射量を、2018 年と 2019 年について示す。

[日降水量]

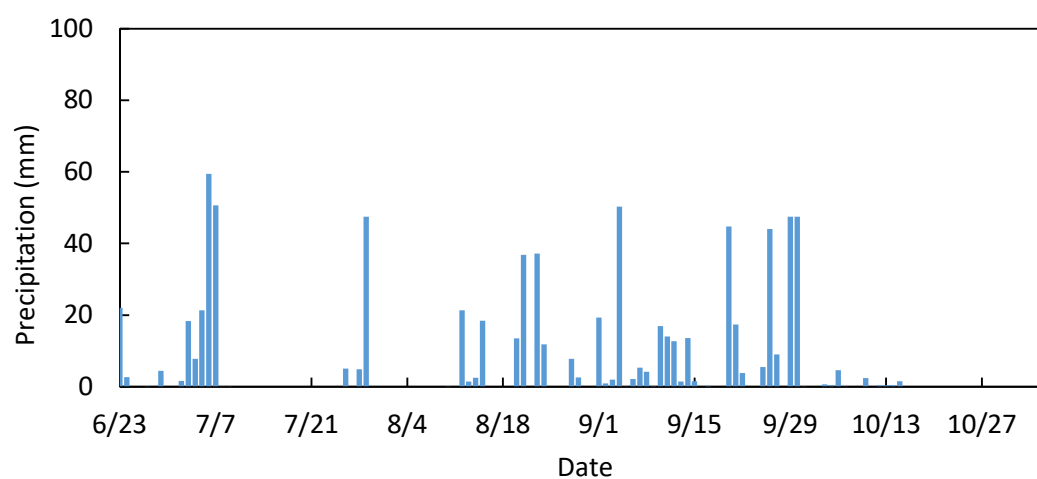


図 A-3.1 2018 年 日降水量

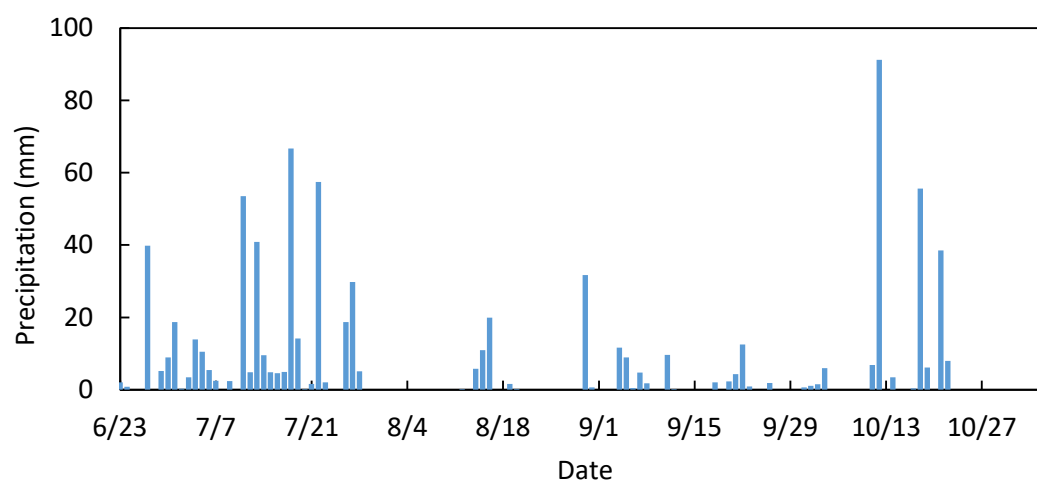


図 A-3.2 2019 年 日降水量

[日平均気温]

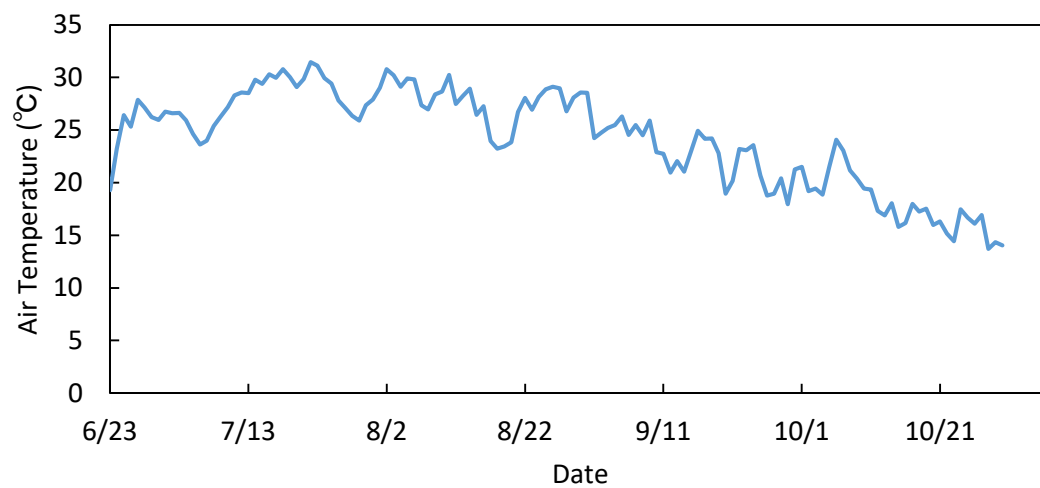


図 A-3.3 2018 年 日平均気温

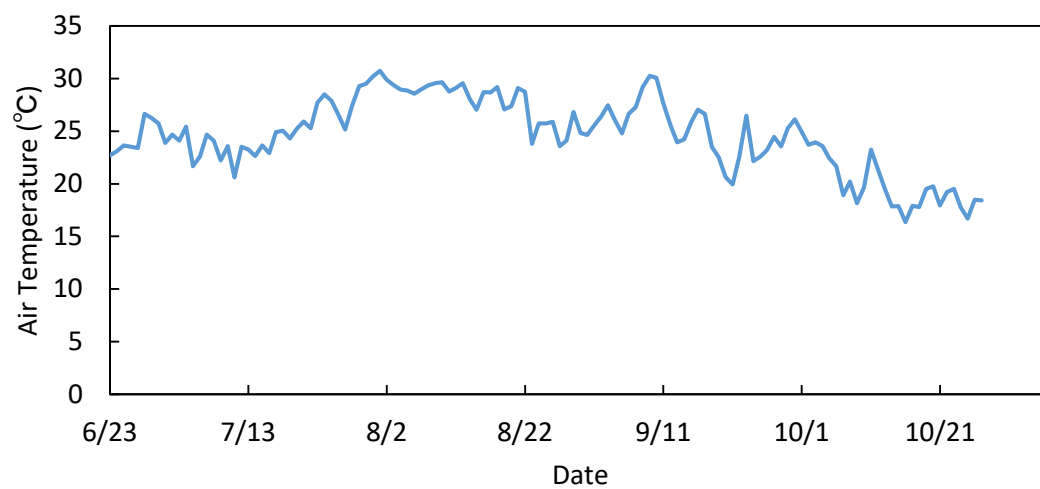


図 A-3.4 2019 年 日平均気温

[日平均相对湿度]

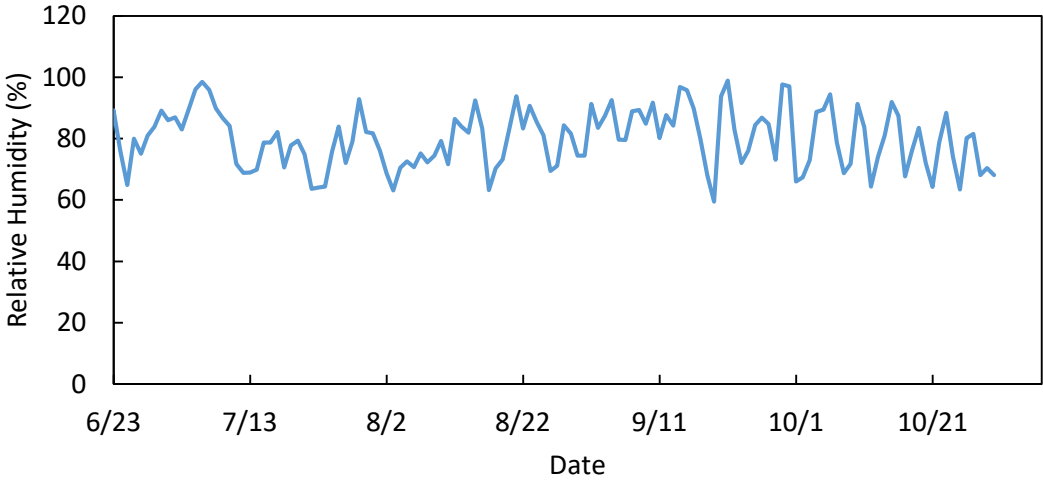


図 A-3.5 2018 年 日平均相对湿度

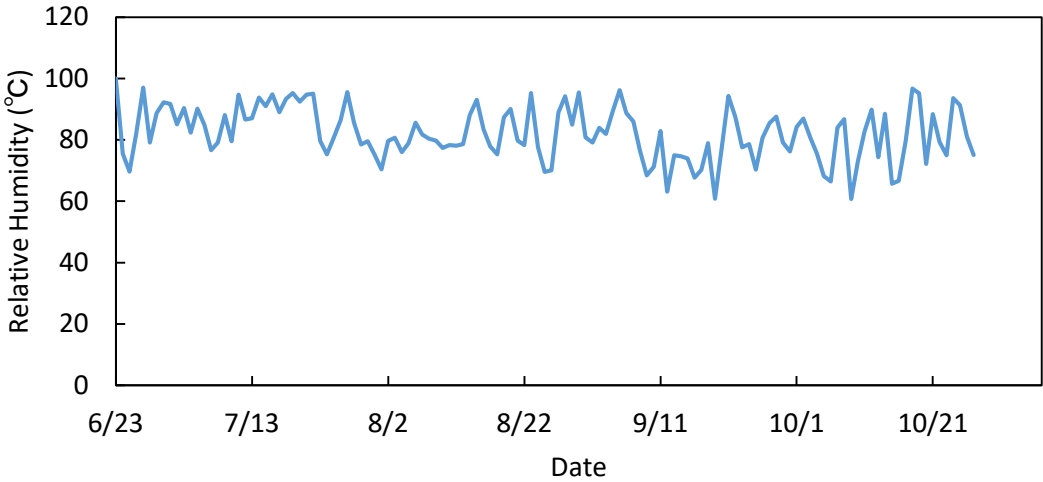


図 A-3.6 2019 年 日平均相对湿度

[高度 2m の日平均風速]

2018/8/21 から 10/1 までは、ウェザーステーションの風向風力計の故障により、未測定となった。そのため、参考資料として、亀山気象台の風速データを充当した。

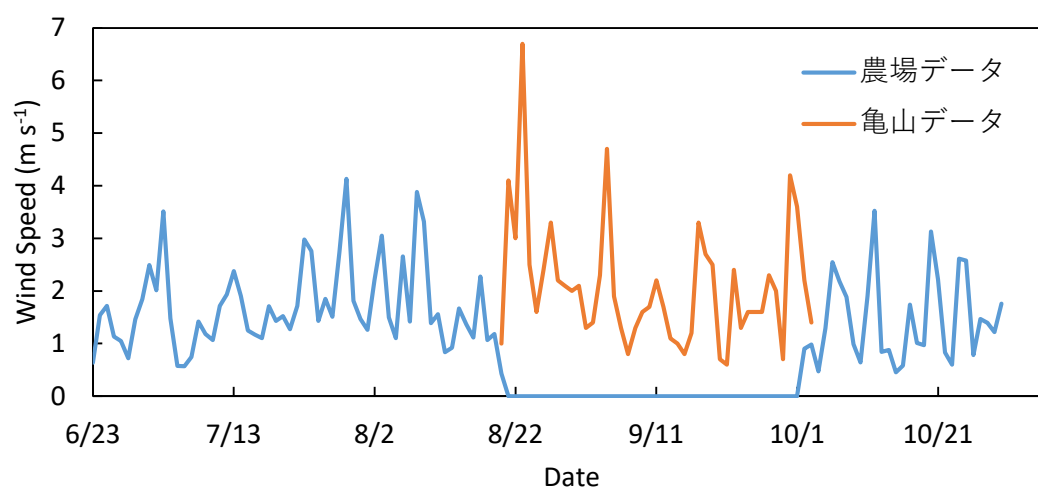


図 A-3.7 2018 年 高度 2m の日平均風速

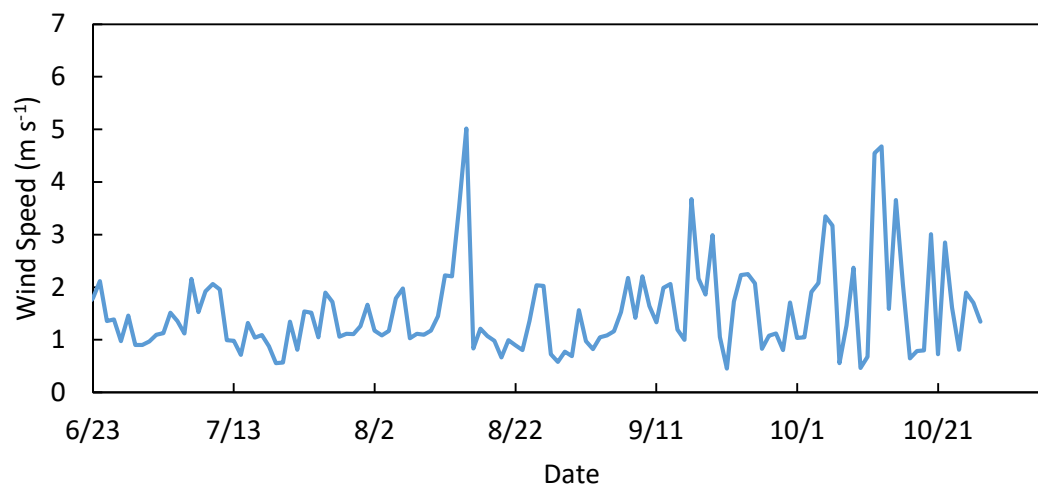


図 A-3.8 2019 年 高度 2m の日平均風速

[日射量]

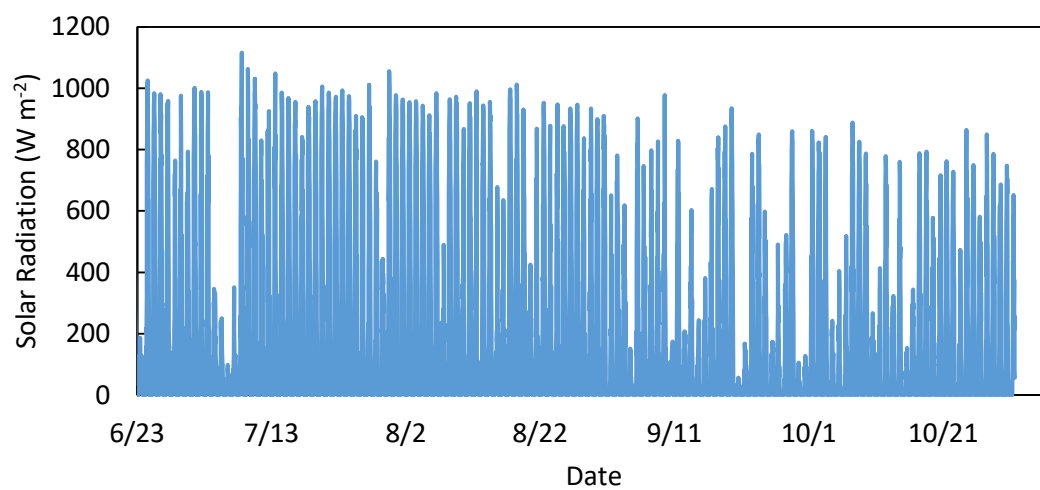


図 A-3.9 2018 年 日射量

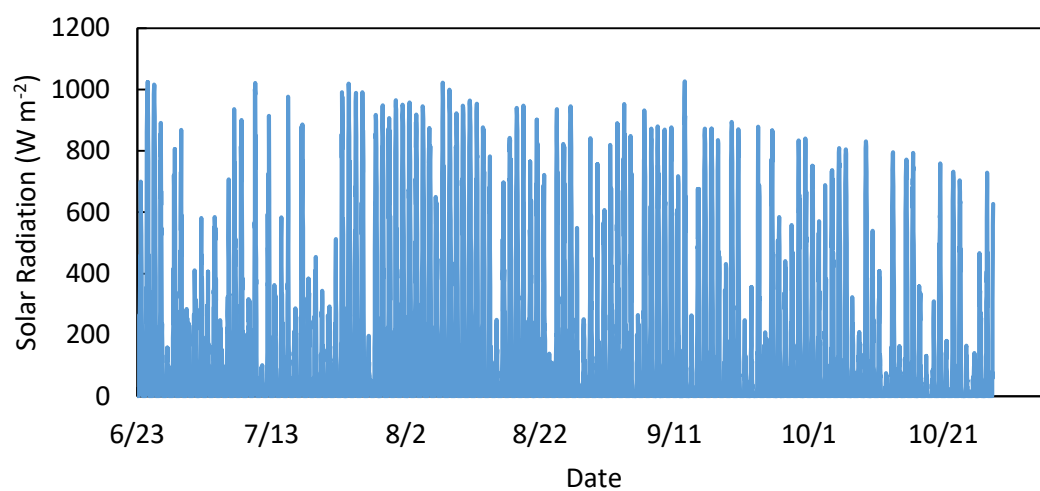


図 A-3.10 2019 年 日射量

[純放射量]

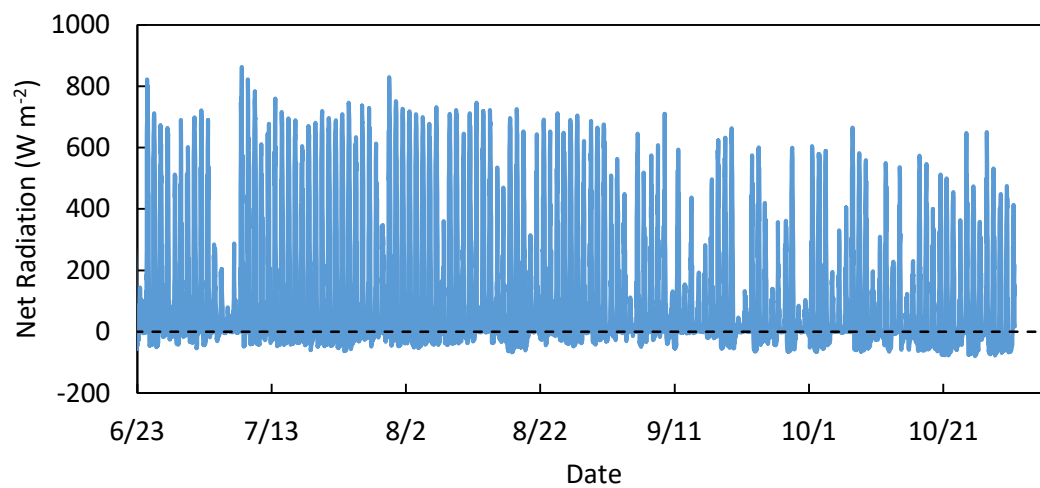


図 A-3.11 2018 年 純放射量

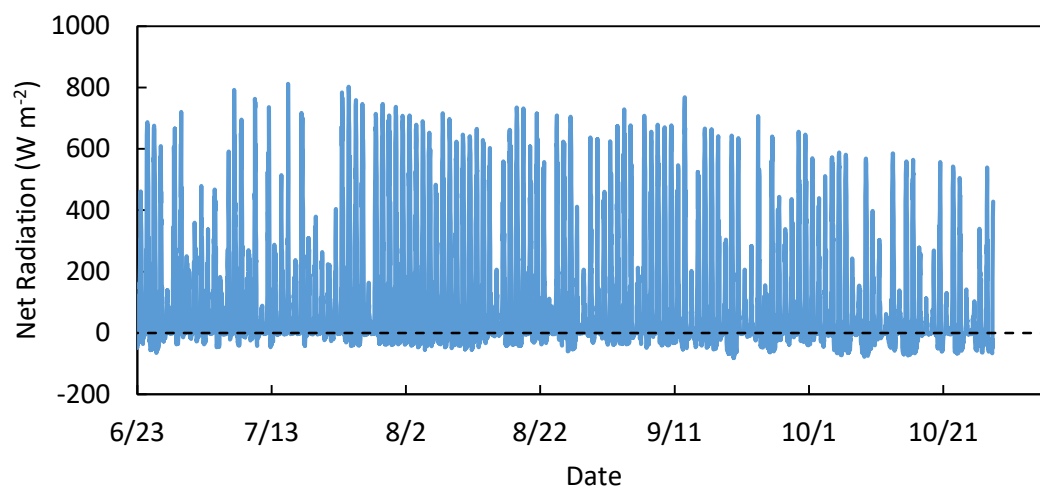
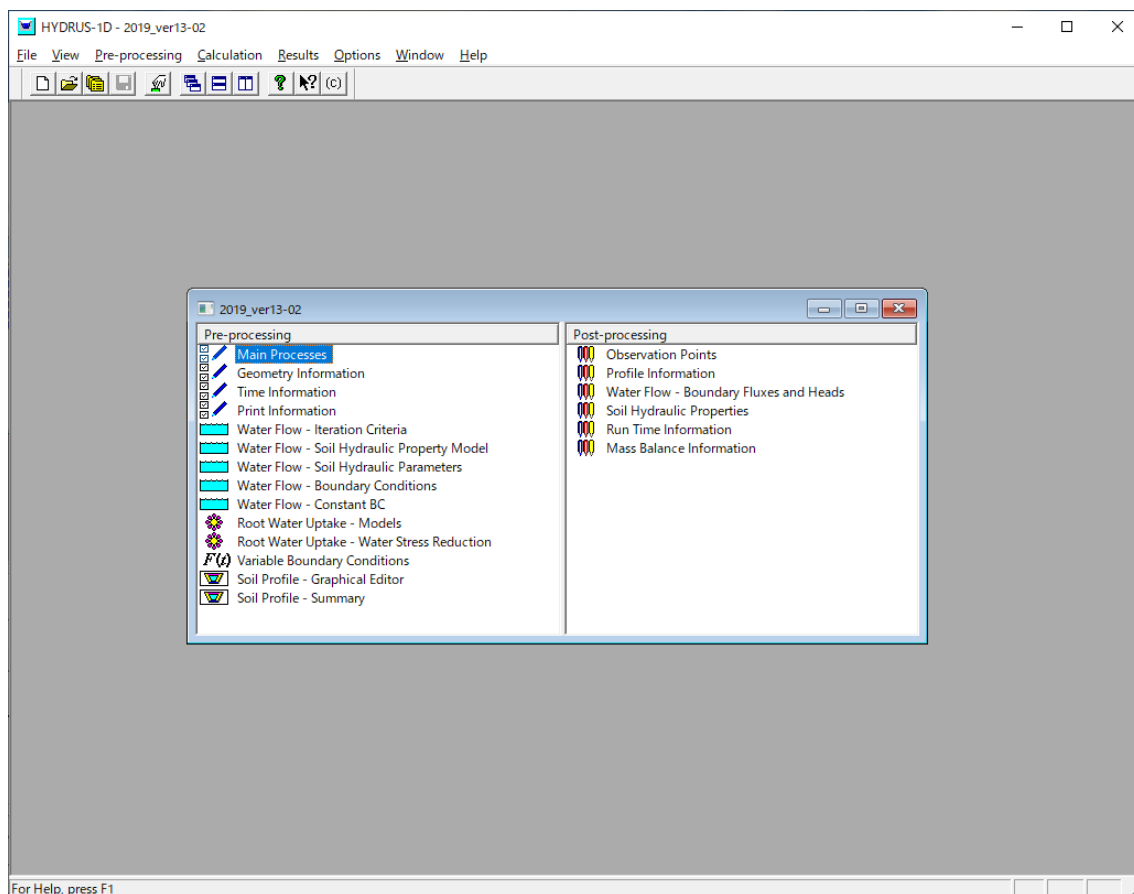


図 A-3.12 2019 年 純放射量

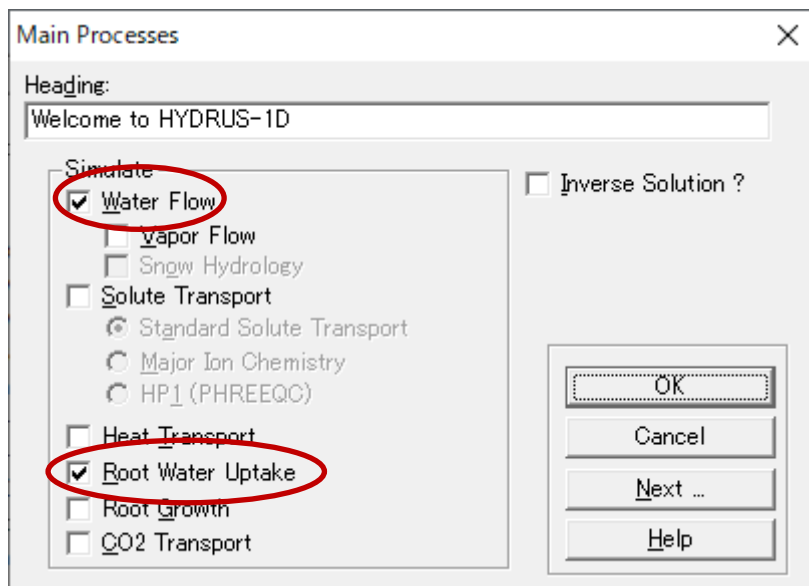
A-4 HYDRUS-1D の設定

今回の解析で用いた HYDRUS-1D の設定内容を画面ごとに説明する。

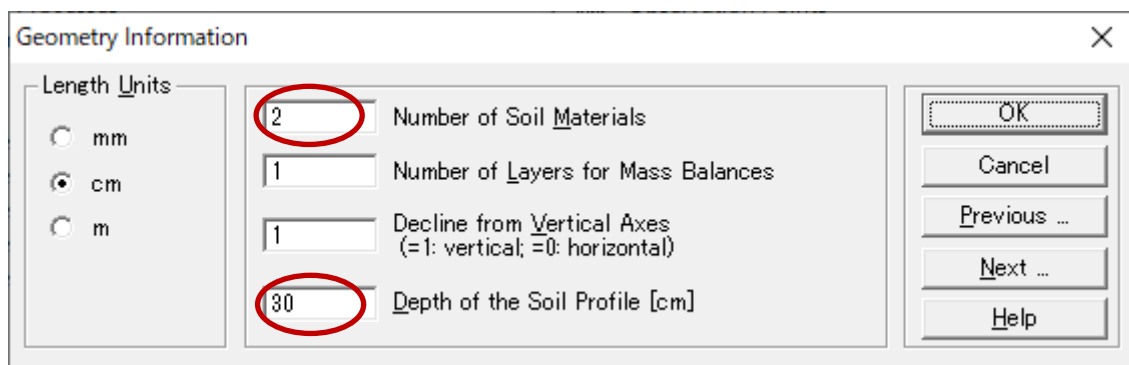
プロジェクトのトップ画面



「Main Processes」をダブルクリック。



「Water Flow」と「Root Water Uptake」へチェックして「OK」ボタンをクリック。



「Number of Soil Materials」へ土層の数（ここでは，2層），「Depth of the Soil Profile」へ土層長（ここでは，30cm）を設定して「OK」ボタンをクリック。

Time Information

Time Units

☐ Seconds
☐ Minutes
☐ Hours
☒ Days
☐ Years

Time Discretization

Initial Time [day]: 0
 Final Time [day]: 5
 Initial Time Step [day]: 0.001
 Minimum Time Step [day]: 1e-005
 Maximum Time Step [day]: 5

Time-Variable Boundary Conditions

☒ Time-Variable Boundary Conditions
 60 Number of Time-Variable Boundary Records (e.g., Precipitation)
☐ Repeat the same set of BC records n times: 1
☐ Daily Variations of Transpiration During Day Generated by HYDRUS
☐ Sinusoidal Variations of Precipitation Generated by HYDRUS

Meteorological Data

☐ Meteorological Data
 0 Number of Meteorological Records (e.g., Radiation)
☒ Penman-Montheith Equation
☐ Hargreaves Formula
☐ Energy Balance Boundary Condition
☐ Daily Variations of Meteo Data During Day Generated by HYDRUS

「Final Time」へ実行期間（ここでは、5 日）、「Time-Variable Boundary Conditions」へチェックをして「Number of Time-Variable Boundary Records」へ設定条件数（ここでは、60 回）を入れて、「OK」ボタンをクリック。

Print Information

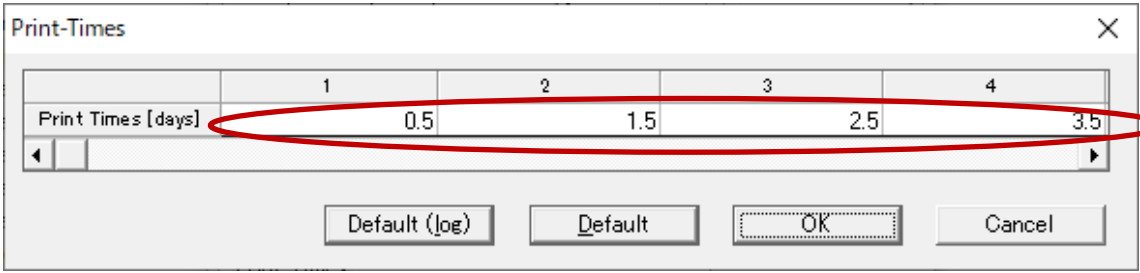
Print Options

☒ I-Level Information
 Every n time steps: 1
☐ Print at Regular Time Interval
 Time Interval [day]: 0.01
☒ Screen Output
☒ Print Fluxes (instead of Temp) for Observation Nodes
☒ Hit Enter at End?

Print Times

Number of Print Times: 6

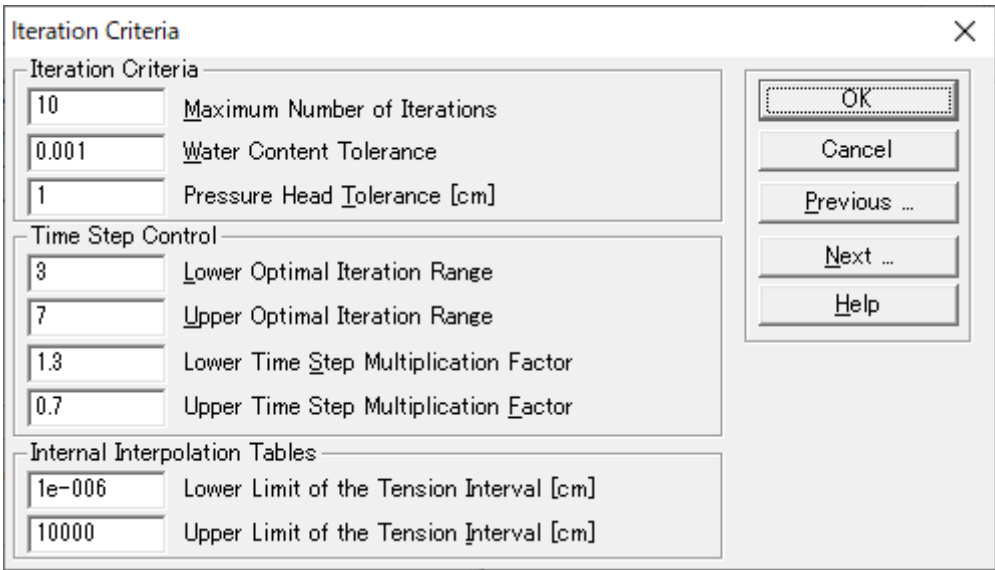
「Number of Print Times」へ回数を入れ、「Select Print Times」ボタンをクリック。



The 'Print-Times' dialog box features a table with four columns labeled 1, 2, 3, and 4. The first column is labeled 'Print Times [days]'. The values 0.5, 1.5, 2.5, and 3.5 are entered in columns 1 through 4 respectively. A red oval highlights the entire table area. Below the table are four buttons: 'Default (log)', 'Default', 'OK', and 'Cancel'.

	1	2	3	4
Print Times [days]	0.5	1.5	2.5	3.5

「」にプロファイルで出力したい時刻を設定（ここでは、正午の吸水を見たいため、0.5 日、1.5 日、と入力）して「OK」ボタンをクリック。



The 'Iteration Criteria' dialog box contains three sections: 'Iteration Criteria', 'Time Step Control', and 'Internal Interpolation Tables'. Each section has input fields and labels. On the right side, there are five buttons: 'OK', 'Cancel', 'Previous ...', 'Next ...', and 'Help'.

Iteration Criteria	
10	Maximum Number of Iterations
0.001	Water Content Tolerance
1	Pressure Head Tolerance [cm]

Time Step Control	
3	Lower Optimal Iteration Range
7	Upper Optimal Iteration Range
1.3	Lower Time Step Multiplication Factor
0.7	Upper Time Step Multiplication Factor

Internal Interpolation Tables	
1e-006	Lower Limit of the Tension Interval [cm]
10000	Upper Limit of the Tension Interval [cm]

計算を調整したい場合は適宜変更，変更がなければそのまま，「OK」ボタンをクリック。

Soil Hydraulic Model

Hydraulic Model

Single Porosity Models

- ☐ van Genuchten - Mualem
 - ☐ With Air-Entry Value of -2 cm
- ☐ Modified van Genuchten
- ☐ Brooks-Corey
- ☐ Kosugi (log-normal)

Dual-Porosity/Dual-Permeability Models

- ☒ Dual-porosity (Durner, dual van Genuchten - Mualem)
- ☐ Dual-porosity (mobile-immobile, water c. mass transfer)
- ☐ Dual-porosity (mobile-immobile, head mass transfer)

== Models below are recommended only for experienced users ==

- ☐ Dual-permeability (Kinematic wave equation)
- ☐ Dual-permeability (Gerke and van Genuchten, 1993)
- ☐ Look-up Tables

Hysteresis

- ☒ No hysteresis
- ☐ Hysteresis in retention curve
- ☐ Hysteresis in retention curve and conductivity
- ☐ Hysteresis in retention curve (no pumping, Bob Lenhard)
 - ☐ Initially drying curve
 - ☐ Initially wetting curve

OK Cancel Previous ... Next ... Help

「Dual-Porosity(Durner, dual van Genuchten - Mualem)」をチェック（ここでは，Durner モデルを採用した）して「OK」ボタンをクリック．

Water Flow Parameters

Mat	Qr [-]	Qs [-]	Alpha [1/cm]	n [-]	Ks [cm/day]	I [-]
1	0	0.44	0.017	1.27	10	0.5
2	0	0.38	0.018	1.25	0.1	0.5

☐ Temperature Dependence

OK Cancel Previous ... Next ... Help

土層ごとに Durner モデルのパラメータを設定して，「OK」ボタンをクリック．

Water Flow Boundary Conditions

Upper Boundary Condition

- ☐ Constant Pressure Head
- ☐ Constant Flux
- ☒ Atmospheric BC with Surface Layer
- ☐ Atmospheric BC with Surface Run Off
- ☐ Variable Pressure Head
- ☐ Variable Pressure Head/Flux
- ☐ Triggered Irrigation

Lower Boundary Condition

- ☐ Constant Pressure Head
- ☒ Constant Flux
- ☐ Variable Pressure Head
- ☐ Variable Flux
- ☐ Free Drainage
- ☐ Deep Drainage
- ☐ Seepage Face; h =
- ☐ Horizontal Drains

Initial Condition

- ☒ In Pressure Heads
- ☐ In Water Contents

Atmospheric BC

- ☐ Input PET and LAI

0 Max h at Soil Surface

OK Cancel Previous Next Help

「Upper Boundary Condition」で「Aomospheric B with Surface Layer」を、「Lower Boundary Condition」で「Constant Flux」をチェックして、「OK」ボタンをクリック。
 ただし、給排水システムが稼働している場合は、「Lower Boundary Condition」を「Variable Flux」にして、「Time Variable Boundary Conditions」の「rGWL」欄に給排水のフラックスを設定。

Constant Boundary Fluxes

Upper Boundary Flux:

Lower Boundary Flux: 0

Root Water Uptake:

OK Cancel Previous Next Help

「Lower Boundary Flux」へ「0」を設定して、「OK」ボタンをクリック。

Root Water and Solute Uptake Model

Root Water Uptake Model

Water Uptake Reduction Model

☒ Feddes

☐ S-Shape

Solute Stress Model

☒ No Solute Stress

☐ Additive Model

☐ Multiplicative Model

☐ Threshold Model

☐ S-Shape

0.7 Critical Stress Index for Water Uptake

Root Solute Uptake Model

☒ Active Solute Uptake

1 Solute with Active Uptake

0 Potential Solute Uptake Rate

0.5 Michaelis-Menten Constant

0 Minimum Concentration for Uptake

1 Critical Stress Index for Active Solute Uptake

☐ Reduced Potential Solute Uptake due to Reduced Water Uptake

OK

Cancel

Previous

Next

Help

「Critical Stress Index for Water Uptake」へ補填吸水モデルの限界ストレス指数を設定して、「OK」をクリック。ただし、「1」の場合は、補填吸水モデルの適用なし。

Root Water Uptake Parameters

Feddes' Parameters

PQ [cm] 0

POpt [cm] 0

P2H [cm] -1700

P2L [cm] -1700

P3 [cm] -15000

r2H [cm/day] 0.5

r2L [cm/day] 0.1

Database

OK

Cancel

Previous ...

Next ...

Help

「Feddes' Parameters」の各パラメータを設定して、「OK」ボタンをクリック。

「P0」は Feddes モデルの概念図の h_1 ，「POpt」は h_2 ，「P2H」は h_{3h} ，「P2L」は h_{3l} ，「P3」は h_4 に該当。ここでは， $h_1 = h_2 = 0$ cm， $h_3 = -1700$ cm， $h_4 = -15000$ cmと設定。

Time Variable Boundary Conditions

	Time [day]	Precip. [cm/day]	Evap. [cm/day]	hCritA [cm]	Transp. [cm/day]
1	0.0833333	0	2.0246E-005	100000	1.34973E-005
2	0.166667	0	1.01867E-005	100000	6.79114E-006
3	0.25	0	5.09338E-007	100000	3.39558E-007
4	0.333333	0	0.144669	100000	0.0964462
5	0.416667	0	0.428459	100000	0.285639
6	0.5	0	0.86689	100000	0.577927
7	0.583333	0	1.38211	100000	0.921405
8	0.666667	0	1.23877	100000	0.825849
9	0.75	0	0.744149	100000	0.496099
10	0.833333	0	0.156782	100000	0.104521
11	0.916667	0	0	100000	0
12	1	0	0	100000	0
13	1.08333	0	0	100000	0
14	1.16667	0	1.31147E-007	100000	8.7431E-008

OK Cancel Previous ... Next ... Help ... Add Line Delete Line Default Time

「Time Variable Boundary Conditions」の「Time」欄は時間（24h で1day）, 「Evap.」欄は可能蒸発速度, 「hCritA」欄は許容最小圧力（ここでは, 100000 cm デフォルト値）, 「Transp.」欄は可能蒸散速度を適宜設定し, 「OK」ボタンをクリック.

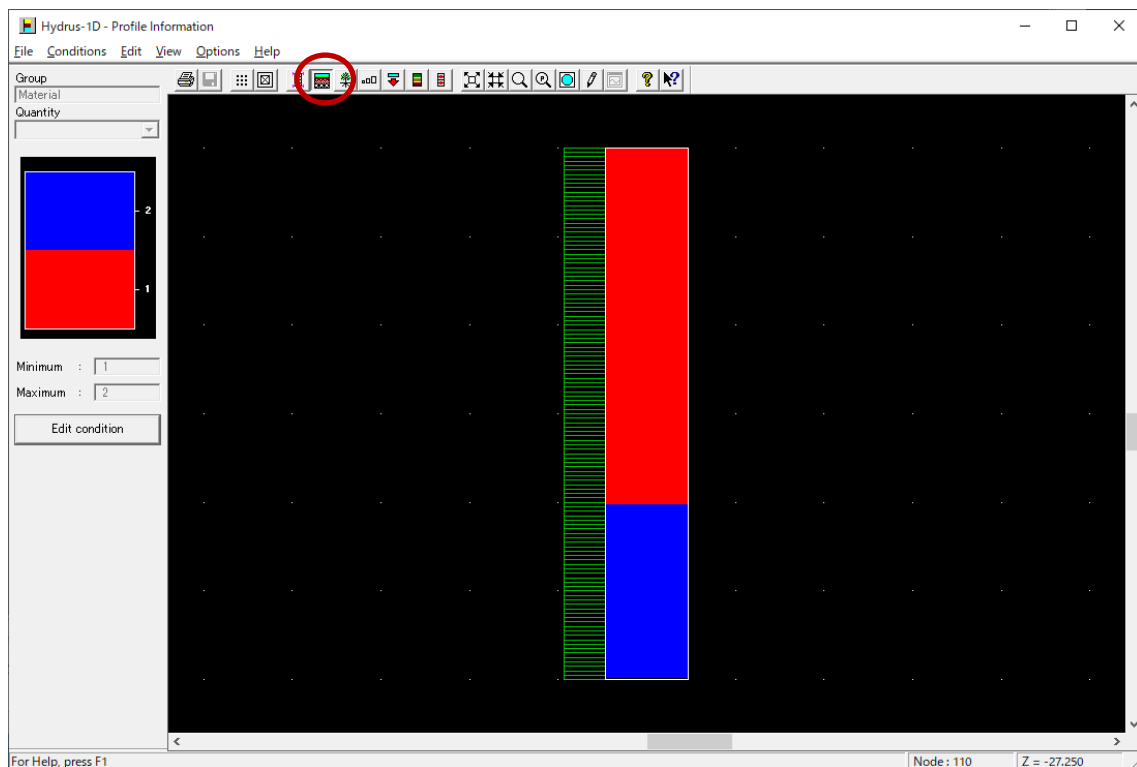
Soil Profile Summary

	z [cm]	h [cm]	Root [1/cm]	Axz	Bxz	Dxz	Mat
1	0	-15476	1	1	1	1	1
2	0.25	-12649.7	1	1	1	1	1
3	0.5	-10125.8	1	1	1	1	1
4	0.75	-8615.57	1	1	1	1	1
5	1	-7623.29	1	1	1	1	1
6	1.25	-6913.63	1	1	1	1	1
7	1.5	-6365.53	1	1	1	1	1
8	1.75	-5935.95	1	1	1	1	1
9	2	-5596.89	1	1	1	1	1
10	2.25	-5312.33	1	1	1	1	1
11	2.5	-5063.72	1	1	1	1	1
12	2.75	-4847.23	1	1	1	1	1
13	3	-4661.54	1	1	1	1	1
14	3.25	-4499.09	1	1	1	1	1
15	3.5	-4353.38	1	1	1	1	1

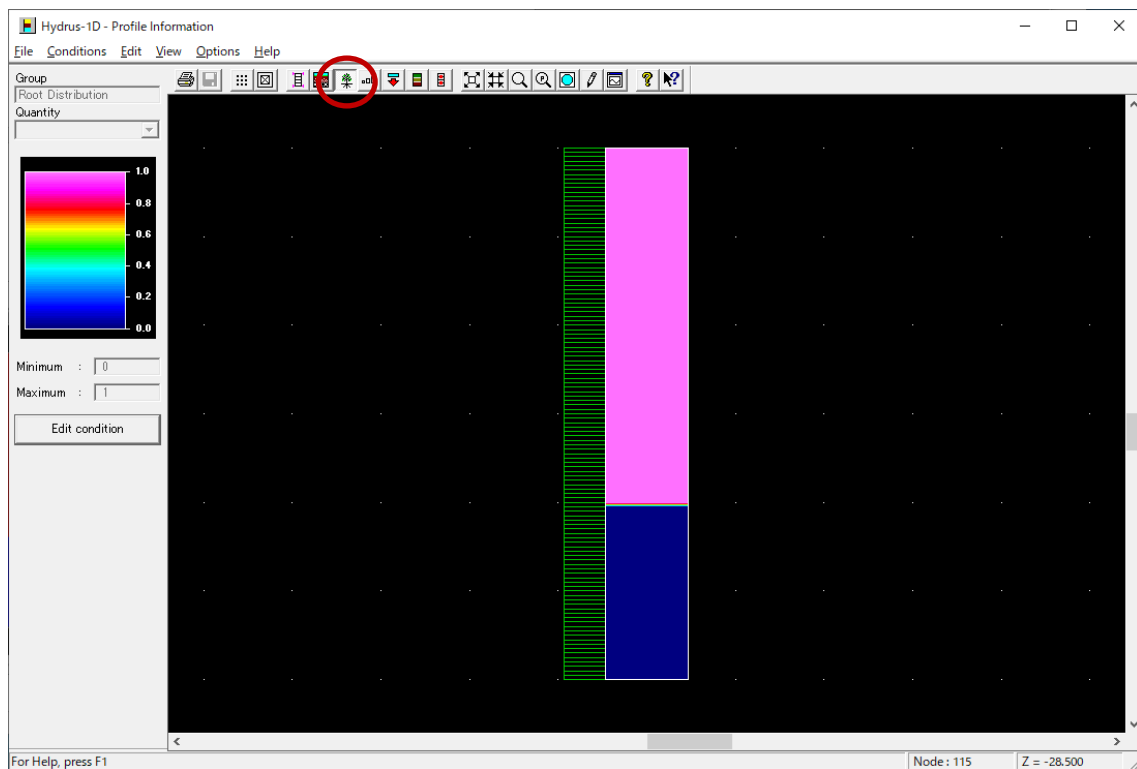
Set to Default Values Set Initial Conditions Equal to Field Capacity

OK Cancel Previous Next Help

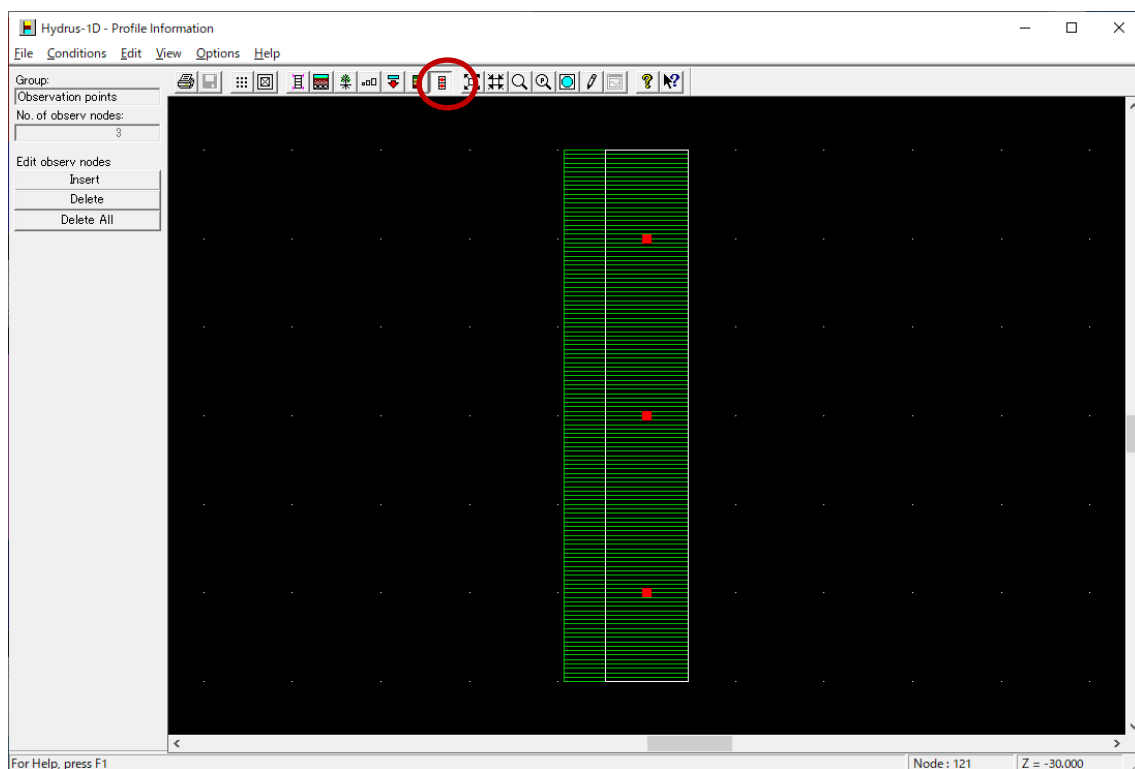
「Soil Profile Summary」の「h」欄へ初期圧力を設定し, 「OK」ボタンをクリック.
HYDRUS-1D で段階的に計算を進めていく場合に, 前段階の最終圧力分布をこの「h」欄に初期圧力として設定する.



土層の構成を設定. (ここでは, 0~20 cm を 1 層, 20~30 cm を 2 層)



吸水強度分布を設定. (ここでは, 0~20 cm で一定)



Observation Point を設定. (ここでは, 5 cm 深, 15 cm 深, 25 cm 深に設定)

A-5. 水分移動モデルのパラメータ推定の詳細

第3章の水分移動モデルのパラメータ推定において、2019年データのパラメータ推定を3.3節で行った。本論に記載しなかった解析の詳細を記載する。

根が伸長段階にある2019年データのパラメータ推定を図A-5.1に示す実蒸発散速度と土中水圧力を目的関数として、図A-5.2に示す逆解析フローチャートにしたがって段階的に逆解析した結果を示す。なお、測定値に基づく水分特性曲線と不飽和透水係数を初期値とした(図A-5.3, 図A-5.4, 表A-5.1)。乾燥Ⅱ期以降は、各段階で水分不足の判定を行った。その判定には、表A-5.2の各期の蒸発散量を用いた。

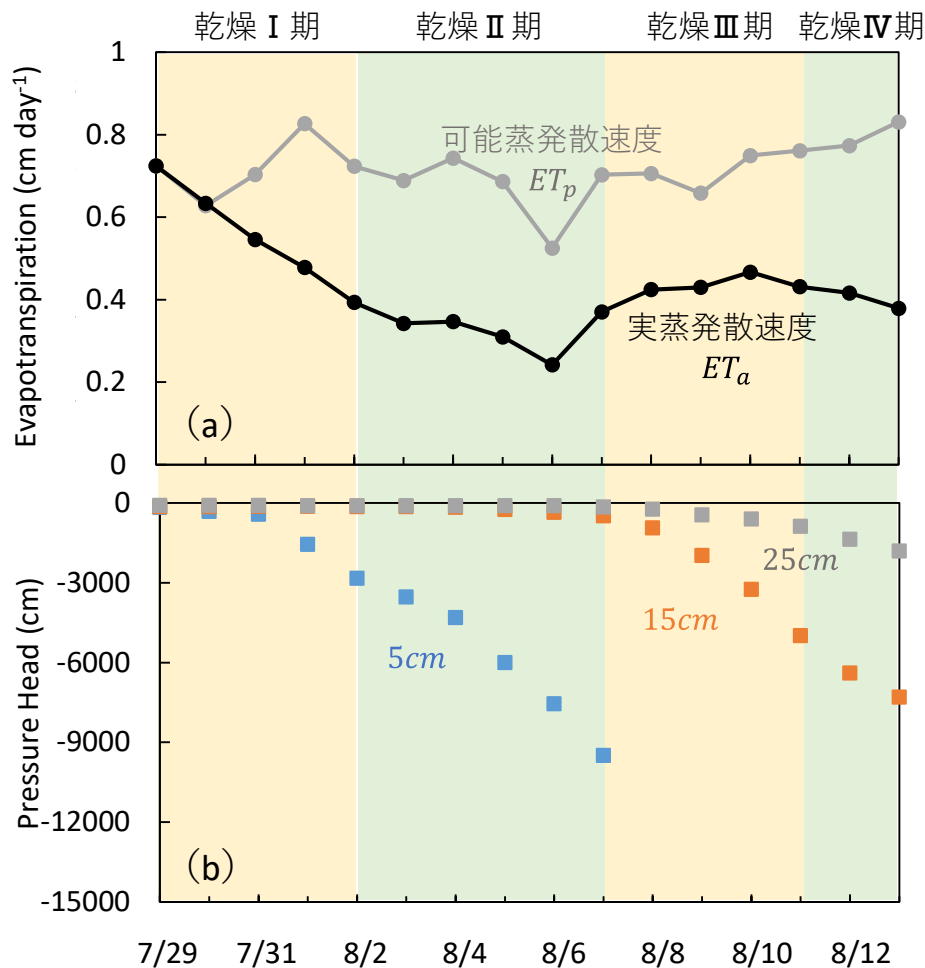


図 A-5.1 2019 年データの (a) 実蒸発散速度 ET_a と可能蒸発散速度 ET_p (b) 深度別土中水圧力 h の経時変化

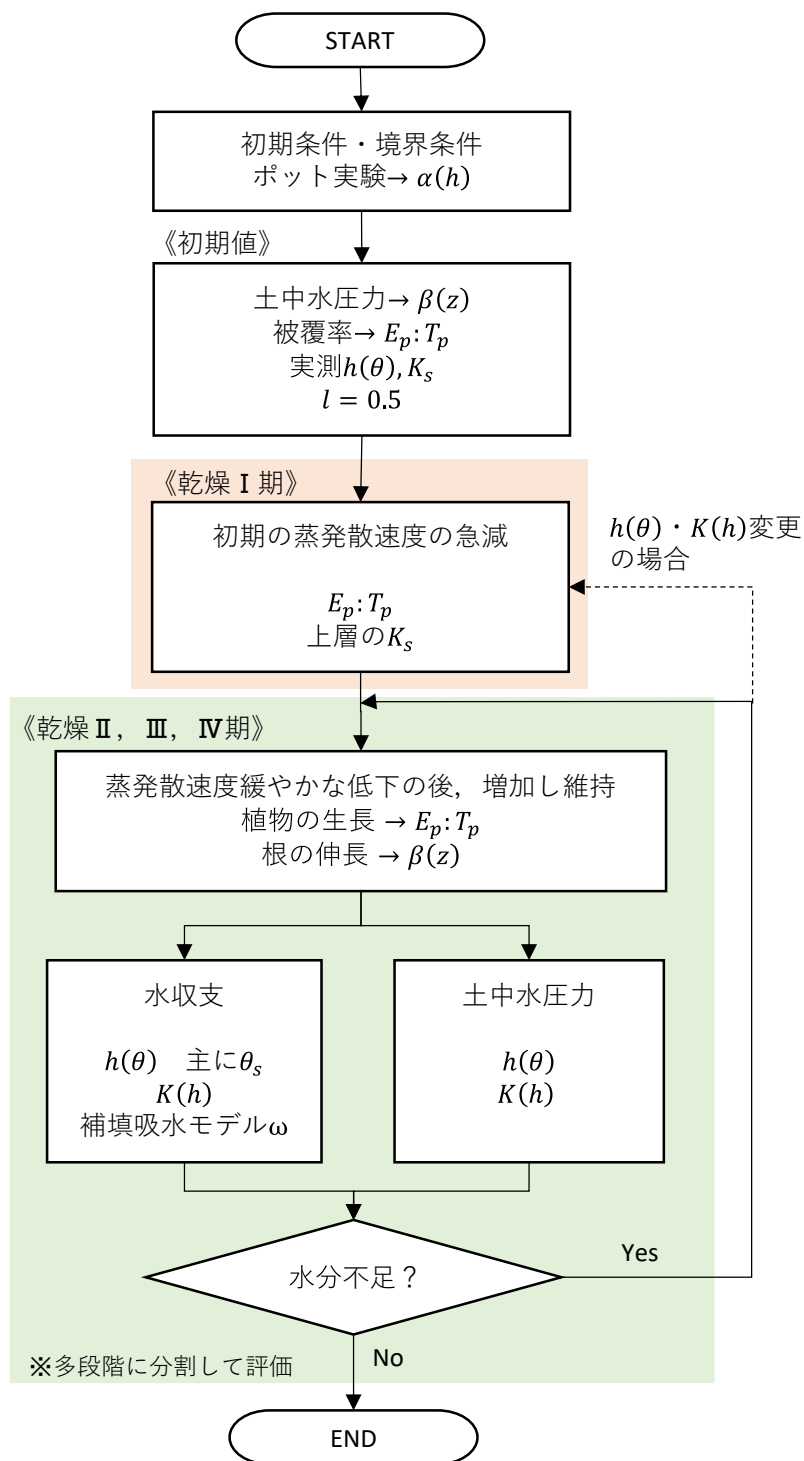


図 A-5.2 水分移動モデルの逆解析フローチャート

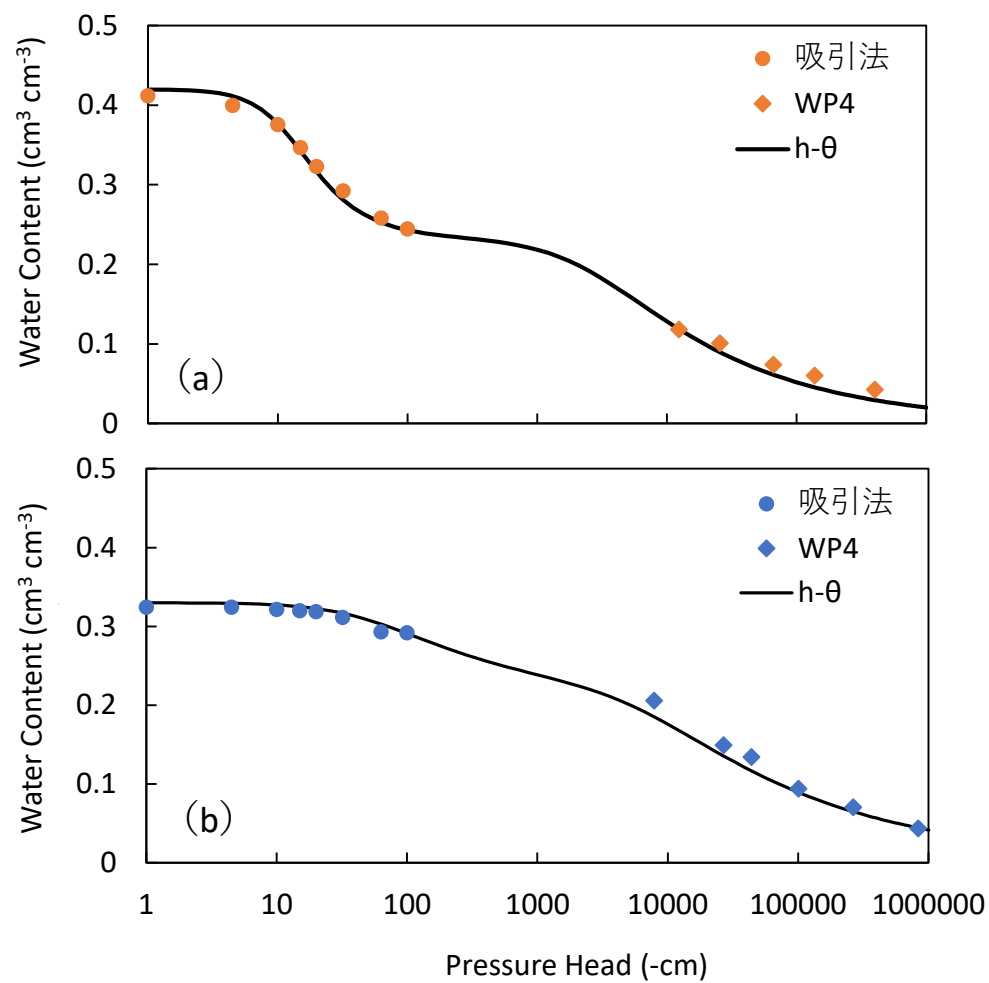


図 A-5.3 初期値に設定した水分特性曲線 (a)上層 (b)下層

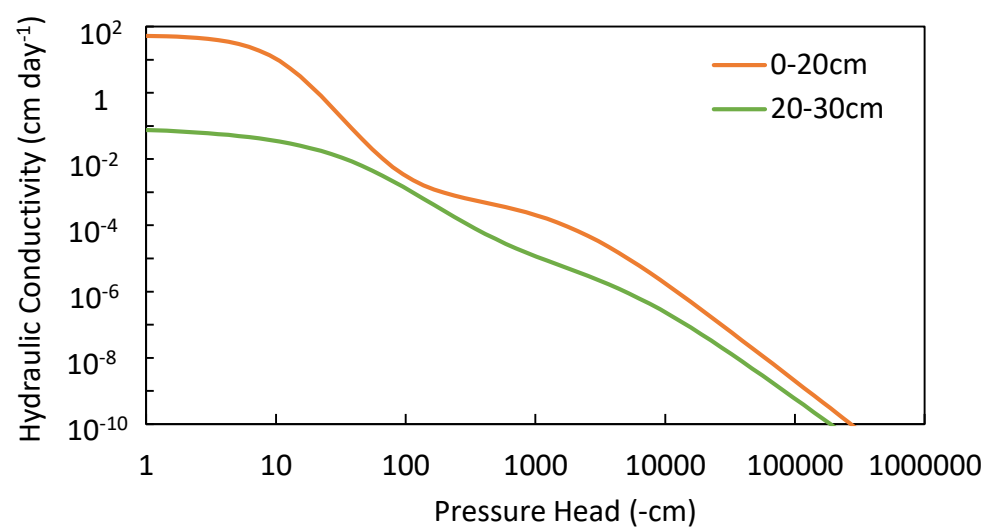


図 A-5.4 初期値に設定した不飽和透水係数

表 A-5.1 初期値に設定した Durner モデルのパラメータ

	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n (-)	K_s (cm day ⁻¹)	l (-)	w_2 (-)	α_2 (cm ⁻¹)	n_2 (-)
0~20 cm	0	0.42	0.0793	2.4	56	0.5	0.556	0.000391	1.41
20~30 cm	0	0.33	0.0183	1.51	0.1	0.5	0.659	0.000157	1.33

表 A-5.2 各期の蒸発散量

日	期	蒸発散量(cm)
7/29	乾燥Ⅰ期	2.77
7/30		
7/31		
8/1		
8/2		
8/3	乾燥Ⅱ期	1.61
8/4		
8/5		
8/6		
8/7		
8/8	乾燥Ⅲ期	1.75
8/9		
8/10		
8/11		
8/12	乾燥Ⅳ期	0.80
8/13		
合計		6.93

A-5-1 乾燥初期の推定パラメータ

乾燥初期である乾燥Ⅰ期の実蒸発散速度 ET_a の実測値（以降、実測 ET_a という）の経時変化（図 A-5.1a 実線黒）では、減少が特徴的である。乾燥Ⅰ期では、実蒸発散速度 ET_a が減少した。その中でも、実蒸発速度 E_a が急減したことより、図 A-5.5 に示すように、 $E_p : T_p$ は 7:3 とした。初期値の上層の水分特性曲線は空気侵入値が-10 cm程度であったが、先行研究の水分特性曲線を参考に、吸水侵入値は-100 cmより小さいと仮定して、水分特性曲線を見直した。また、初期値の上層の飽和透水係数 K_s が 56 cm day^{-1} だったため、実蒸発散速度 ET_a の計算値（以降、計算 ET_a という）は実測 ET_a を過大評価した。これは、地表面が蒸発して水分減少したところへ、下方から水分が供給されたことによって可能蒸発が継続して、実蒸発速度 E_a の計算値（以降、計算 E_a という）が過大評価されたためである。そこで、蒸発の抑制に効果的なパラメータである上層の飽和透水係数 K_s を 5 cm day^{-1} に変更して再計算した結果、計算 ET_a は実測 ET_a を再現した（図 A-5.6）。この変更では、主に地表面付近の蒸発による水分移動が抑制され、吸水強度分布全体の水分移動である実蒸散速度 T_a の計算値（以降、計算 T_a という）への影響は小さくなった。図 A-5.6 中の $E_a + T_p$ （青破線）は、実蒸発速度 E_a に植物の吸水が 100%行われた場合の蒸散速度（可能蒸散速度 T_p ）を積み上げた値で、実蒸発する条件下での蒸発散速度の最大値を表す。

この段階では、初期の実測 ET_a を再現する $E_p : T_p$ は初期値 7:3 を 8/2 に 6:4 に変化、上層の飽和透水係数 K_s は 5 cm day^{-1} とした。ただし、水分特性曲線の形状を変更する（ α, n, α_2, n_2 の変更）と透水係数が変化する場合があるため、飽和透水係数 K_s と間隙結合係数 l は仮決めとした。

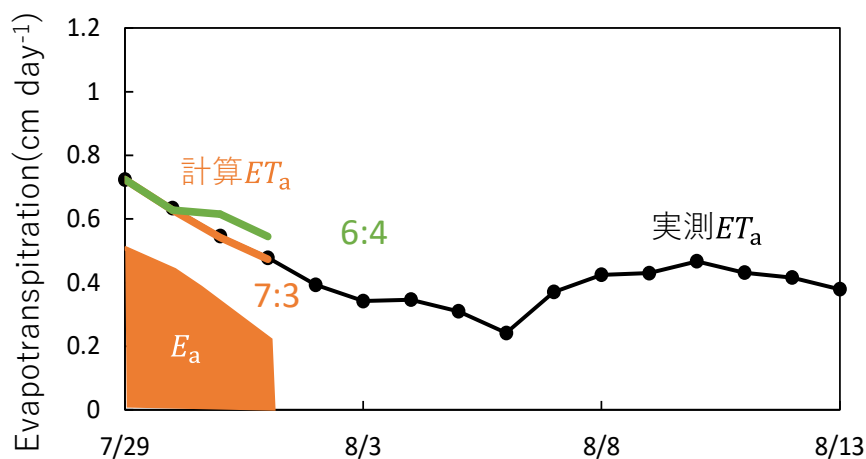


図 A-5.5 乾燥Ⅰ期の異なる $E_p : T_p$ の計算値

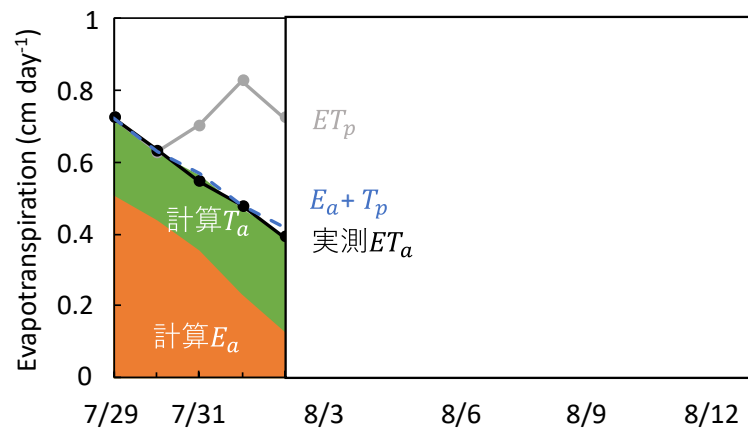


図 A-5.6 変更後の乾燥Ⅰ期の蒸発散速度の計算結果

A-5-2 乾燥中期以降の推定パラメータ

乾燥中期以降（乾燥Ⅱ期，Ⅲ期，Ⅳ期）の実測 ET_a は，緩やかに低下した後，増加して維持した．蒸発がゼロに収束する時期に実測 ET_a が増加する要因は，蒸散の増加である．蒸散が増加するためには， $E_p : T_p$ の T_p 割合の増加，吸水強度分布 β の領域の拡大（根の伸長），補填吸水モデルの補填強度の増加がある．各期で水収支と土中水圧力変化を満たすパラメータを推定した．水分不足の場合は， $E_p : T_p$ ，根の長さ，飽和体積含水率 θ_s を再検討した．水分不足の判定は，水分分布と土中水圧力の経時変化より行った．

乾燥Ⅱ期

乾燥Ⅱ期では，上層の水分特性が蒸発散速度へ大きく寄与するため，推定対象は上層の水分特性曲線および不飽和透水係数とした．乾燥Ⅱ期の計算結果を図 A-5.7 に示す．このときの水分特性曲線および不飽和透水係数は乾燥Ⅰ期で仮決めしたパラメータとした． $E_p : T_p$ は，乾燥Ⅱ期の期首は 6:4 とし，8/7 に 5:5 へ変化させた．吸水強度分布 β は，根が 20 cm 深まで伸長したとして，20 cm 深まで一定とした．

図 A-5.7 (a)に示す補填吸水モデルの適用なしの場合は，8/4 以降の計算 ET_a は過小評価した．図 A-5.7 (b)に示す補填吸水モデルの限界ストレス指数を $\omega_c = 0.6$ とした場合は，計算 ET_a は実測 ET_a を再現した．このときの水分分布を図 A-5.8 に示す．表 A-5.2 によると，乾燥Ⅲ期以降の蒸発散量は，2.55 cm であり，全期における 37%を占める．図 A-5.8 では上層水分の残量は約 0.5 cm であるため，乾燥Ⅲ期以降の下層水分への期待値は 2 cm 以上である．これらより水分不足と判断し，上層の初期水分量の増加と水分の消費方法の改善のため，上層の水分特性曲線を見直した．

見直し後の上層の水分特性曲線および不飽和透水係数を図 A-5.9 に，そのときの Durner

モデルのパラメータは表 A-5.3 に示す．見直した水分特性による計算結果を図 A-5.10 に示す．補填吸水モデルの限界ストレス指数は $\omega_c = 0.7$ とした．見直し前の $\omega_c = 0.6$ より補填吸水モデルの強度を緩和したが，計算 ET_a は実測 ET_a を再現した．このときの水分分布（図 A-5.11）によると上層水分の残量は約 1 cm で，下層水分への期待値は約 1.5 cm となった．

以上より，この段階では，上層の水分特性曲線と不飽和透水係数， $E_p : T_p$ は 6:4 から 5:5 へ変化，根の長さは 20 cm 深まで均一，補填吸水モデルの限界ストレス指数 ω_c は 0.7 に決定した．

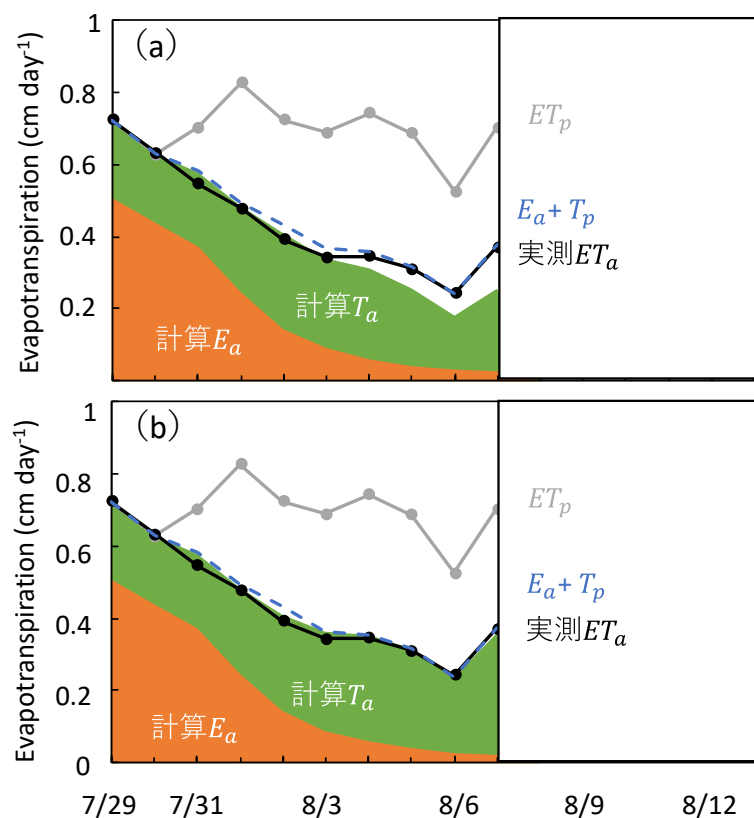


図 A-5.7 乾燥Ⅱ期の水分特性見直し前の蒸発散速度の計算結果 (a) 補填吸水なし
(b) 補填吸水あり ($\omega_c = 0.6$)

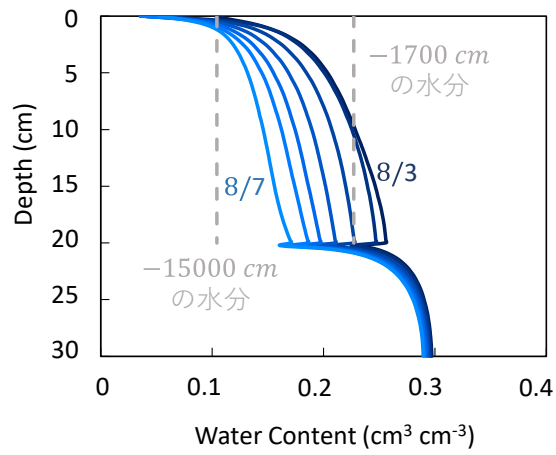


図 A-5.8 乾燥Ⅱ期の水分特性見直し前の水分分布

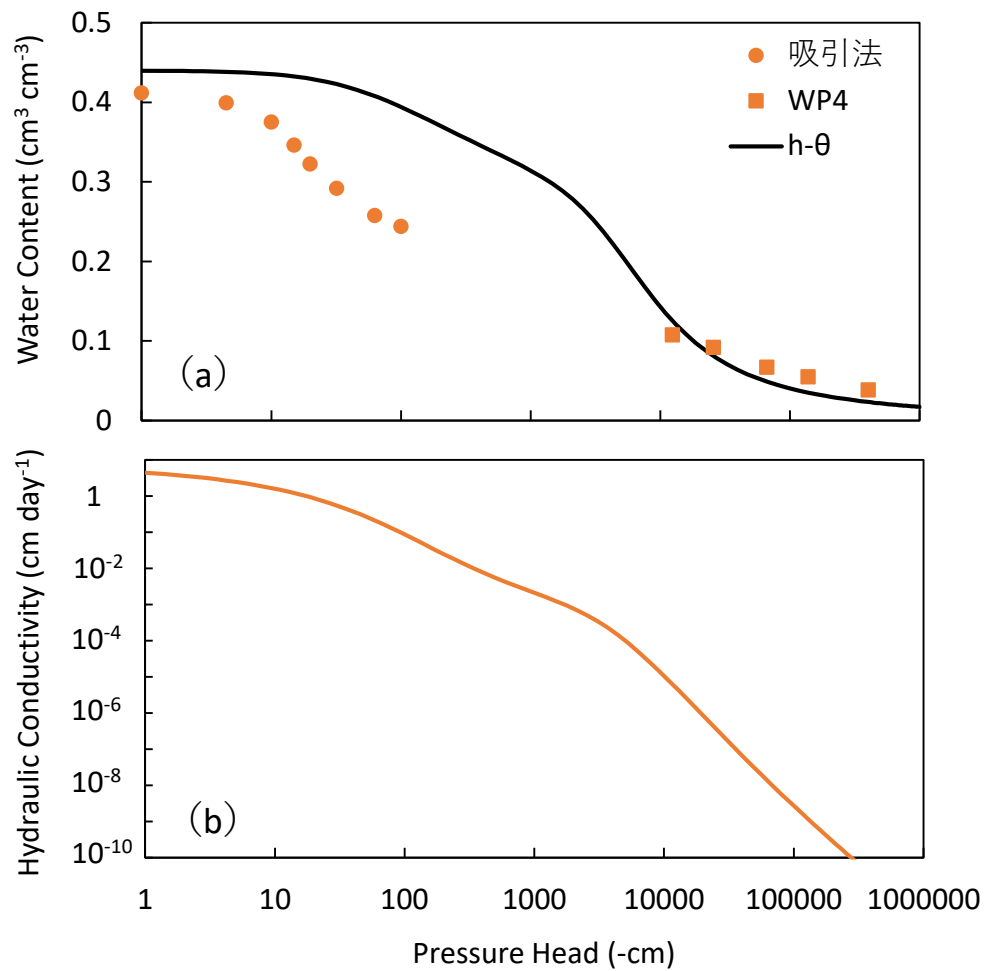


図 A-5.9 乾燥Ⅱ期に見直した上層の水分特性 (a) 水分特性曲線 (b) 不飽和透水係数

表 A-5.3 乾燥Ⅱ期に見直した Durner モデルのパラメータ

	θ_r	θ_s	α	n	K_s	l	w_2	α_2	n_2
	($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	(cm^{-1})	(-)	(cm day^{-1})	(-)	(-)	(cm^{-1})	(-)
0~20 cm	0	0.44	0.017	1.27	10	0.5	0.494	0.000240	1.95
20~30 cm	0	0.33	0.018	1.25	0.1	0.5	0.5	0.000793	1.29

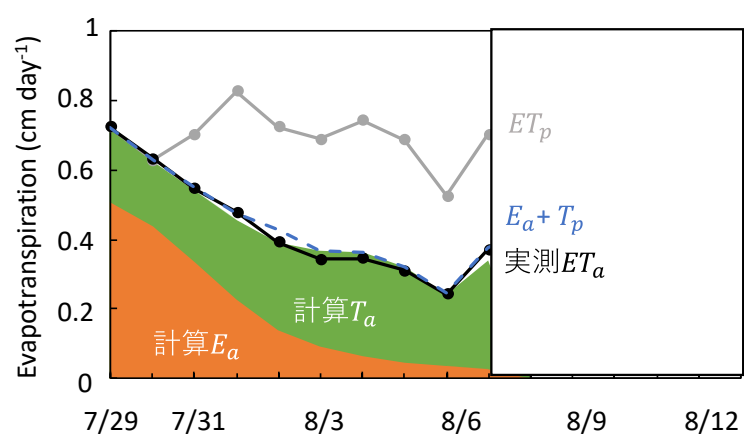


図 A-5.10 乾燥Ⅱ期の水分特性見直し後の蒸発散速度の計算結果 補填吸水あり ($\omega_c = 0.7$)

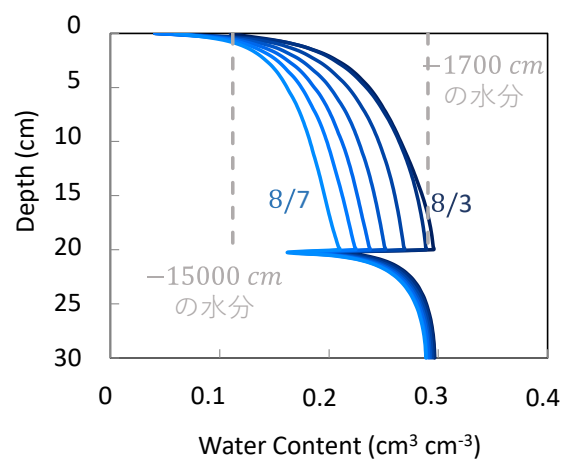


図 A-5.11 乾燥Ⅱ期の水分特性見直し後の水分分布

乾燥Ⅲ期

乾燥Ⅲ期は、蒸発がゼロに収束する時期であり、上層の水分が減少していることも影響して、下層の水分特性が蒸散速度へ寄与する。蒸発がゼロに収束する ($E_a \simeq 0$) ことより、実蒸発散速度 ET_a は実蒸散速度 T_a と同等 ($ET_a \simeq T_a$) とみなせる。これより、実蒸発散速度 ET_a と可能蒸発散速度 ET_p の比は、実蒸散速度 T_a と可能蒸発散速度 ET_p の比とみなすことができる ($ET_a/ET_p \simeq T_a/ET_p$)。 $E_p : T_p$ を変形して蒸発散における蒸散の割合 (T_p/ET_p) にすると、 $T_a/ET_p \leq T_p/ET_p$ より、実蒸発散速度 ET_a と可能蒸発散速度 ET_p の比 (ET_a/ET_p) は可能蒸発散速度 ET_p における可能蒸散速度 T_p の割合 (T_p/ET_p) に近似する。乾燥Ⅲ期以降の実蒸発散速度 ET_a と可能蒸発散速度 ET_p の比 (ET_a/ET_p) を表 A-5.4 に示す。これによると、 T_p/ET_p は 0.6 以上、つまりこの段階の $E_p : T_p$ は 4:6 から 3:7 と推定できる。また、乾燥が進行して乾燥Ⅲ期終盤の実蒸散速度 T_a は失速したため、 ET_a/ET_p が減少したと考えられる。

乾燥Ⅲ期の計算結果を図 A-5.12 に示す。このときの水分特性曲線および不飽和透水係数には、上層は乾燥Ⅱ期で決定したパラメータ、下層は乾燥Ⅰ期で仮決めしたパラメータを設定した。 $E_p : T_p$ は、乾燥Ⅲ期の期首は 4:6、8/10 から 3:7 に変化させた。吸水強度分布 β は、根が 25 cm 深に伸長して 25 cm 深まで一定にした。補填吸水モデルの限界ストレス指数は、 $\omega_c = 0.4$ とした。これらのパラメータによる計算 ET_a は、実測 ET_a を再現した。このときの水分分布を図 A-5.13 に示す。これによると、上層は枯渇し下層は水分が残存しているが、次の段階での必要水分 0.80 cm と下層の残存水分 (約 0.8 cm) はほぼ同じであった。

表 A-5.4 乾燥Ⅲ期の実蒸発散速度と可能蒸発散速度の比 (ET_a/ET_p)

	ET_a/ET_p (-)
8/8	0.601
8/9	0.653
8/10	0.623
8/11	0.567

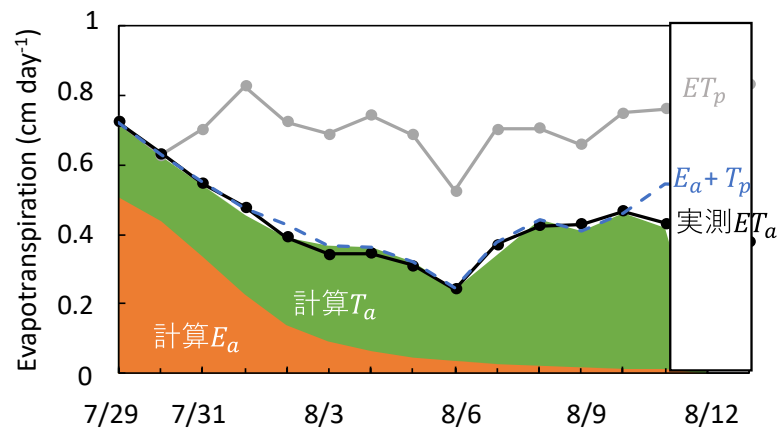


図 A-5.12 乾燥Ⅲ期の蒸発散速度の計算結果 補填吸水あり ($\omega_c = 0.4$)

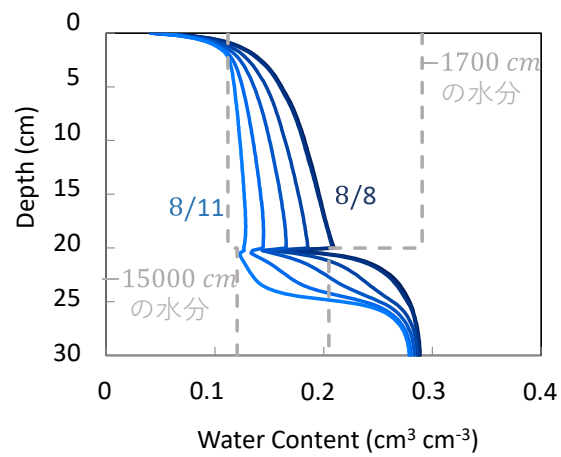


図 A-5.13 乾燥Ⅲ期の水分分布

乾燥Ⅳ期

乾燥Ⅳ期は、乾燥Ⅲ期に引き続き、下層の水分特性が蒸散速度へ寄与する段階である。乾燥Ⅳ期の計算結果を図 A-5.14 に示す。このときの水分特性曲線および不飽和透水係数には、上層は乾燥Ⅱ期で決定したパラメータとし、下層は乾燥Ⅰ期で仮決めしたパラメータを設定した。 $E_p : T_p$ は、乾燥Ⅲ期の終盤と同様 3:7 とした。吸水強度分布 β は、根が 30 cm 深まで伸長したとして、30 cm 深まで一定にした。補填吸水モデルの限界ストレス指数は、 $\omega_c = 0.4$ とした。その結果、計算 ET_a は実測 ET_a をほぼ再現した。このときの水分分布を図 A-5.15 に、深度別土中水圧力の経時変化を図 A-5.16 に示す。図 A-5.15 では下層に水分が残存しているように見えるが、図 A-5.16 からは 25 cm 深の最終日の土中水圧力が激減して実測値と乖離した。これは下層の水分量が不足していたことを表しており、これを改善するために、下層の水分特性を見直した。

見直し後の下層の水分特性曲線および不飽和透水係数を図 A-5.17 に、その Durner モデルのパラメータを表 A-5.5 に示す。見直した水分特性による計算結果は、図 A-5.18 のとおり、計算 ET_a は実測 ET_a を再現した。このときの水分分布を図 A-5.19 に、深度別土中水圧力の経時変化を図 A-5.20 に示す。見直し後の水分分布（図 A-5.19）と見直し前の水分分布（図 A-5.15）の最終日を比較すると、見直し後の残存水分は増加していた。見直し後の最終日の 25 cm 深の土中水圧力（図 A-5.20）は、圧力の減少が改善した。

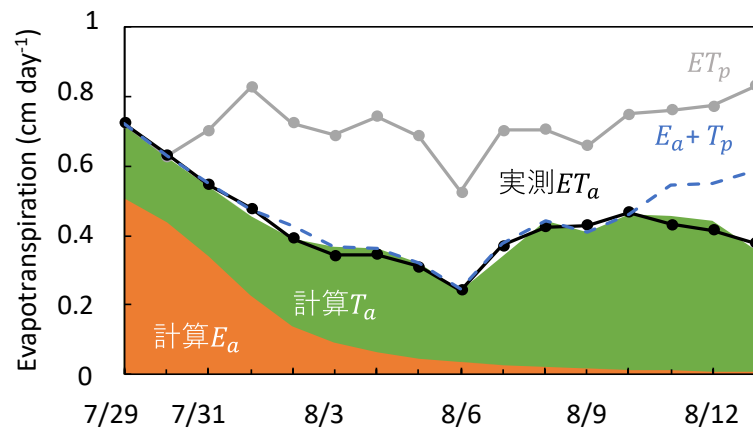


図 A-5.14 乾燥Ⅳ期の水分特性見直し前の蒸発散速度の計算結果 $\omega_c = 0.4$

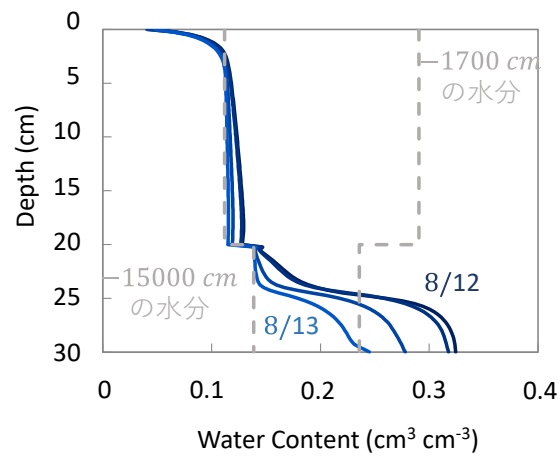


図 A-5.15 乾燥Ⅳ期の水分特性見直し前の水分分布

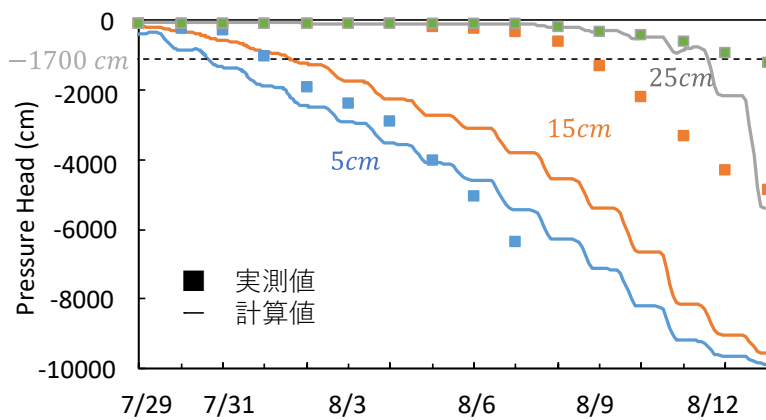


図 A-5.16 水分特性見直し前の深度別土中水圧力の経時変化

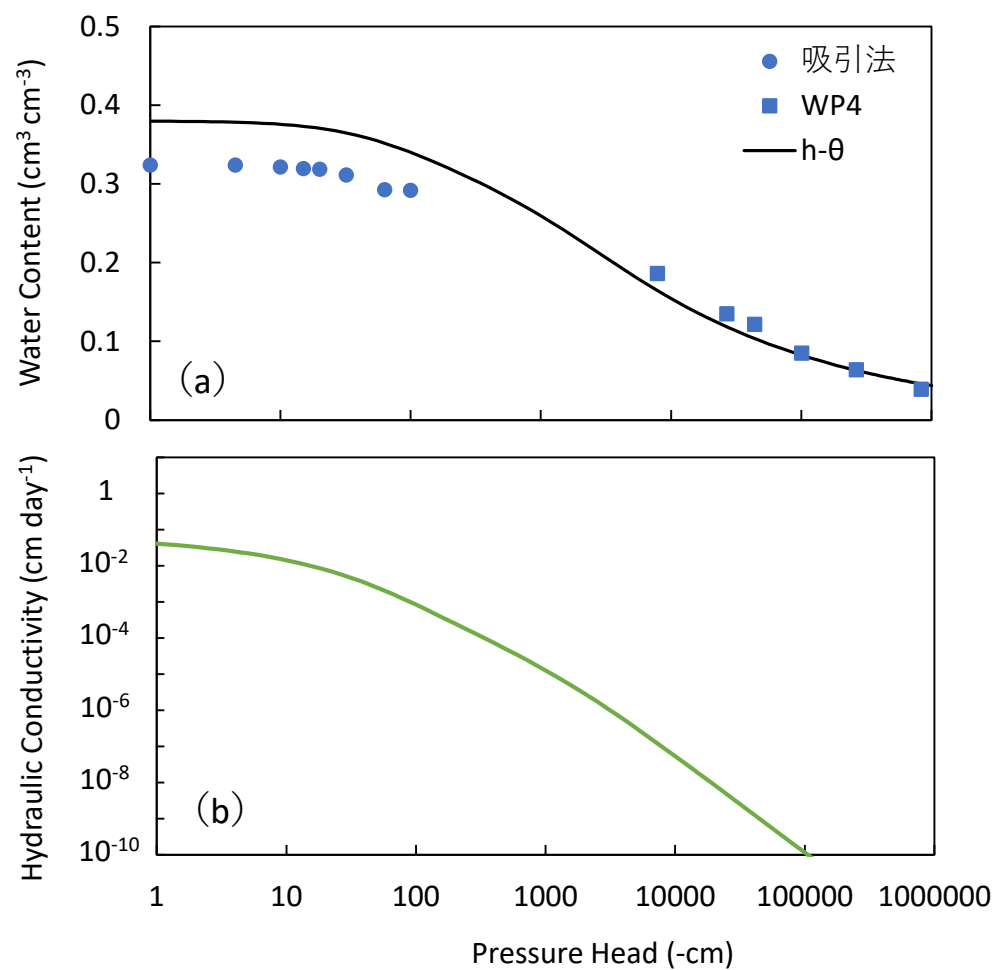


図 A-5.17 乾燥Ⅳ期に見直した下層の水分特性 (a) 水分特性曲線 (b) 不飽和透水係数

表 A-5.5 乾燥Ⅳ期に見直した Durner モデルのパラメータ

	θ_r	θ_s	α	n	K_s	l	w_2	α_2	n_2
	($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	(cm^{-1})	(-)	(cm day^{-1})	(-)	(-)	(cm^{-1})	(-)
0~20 cm	0	0.44	0.017	1.27	10	0.5	0.494	0.000240	1.95
20~30 cm	0	0.38	0.018	1.25	0.1	0.5	0.5	0.000793	1.29

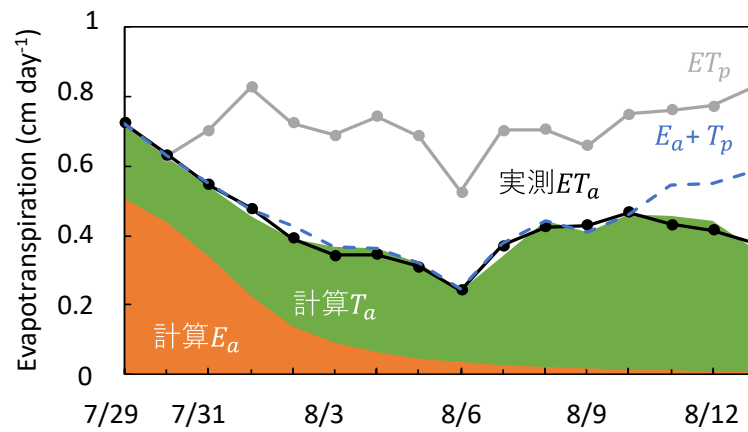


図 A-5.18 乾燥Ⅳ期の水分特性見直し後の蒸発散速度の計算結果 $\omega_c = 0.4$

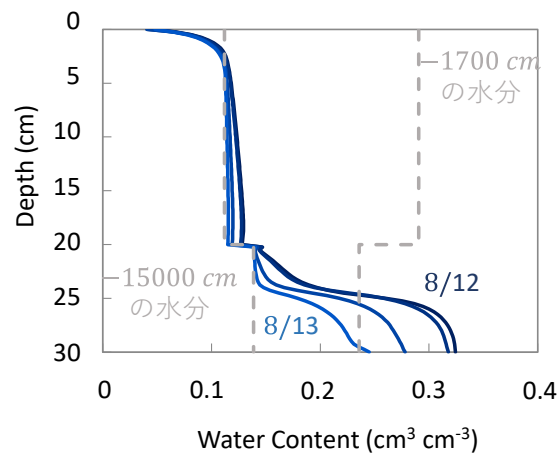


図 A-5.19 乾燥Ⅳ期の水分特性見直し後の水分分布

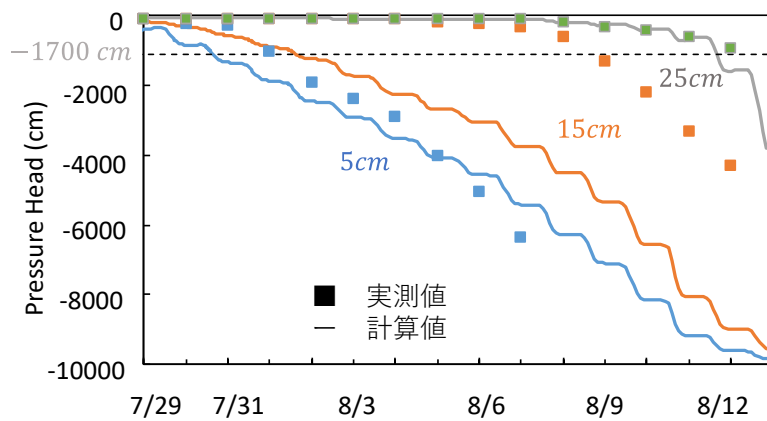


図 A-5.20 水分特性見直し後の深度別土中水圧力の経時変化

A-5-3 まとめ

逆解析フローチャート（図 A-5.2）にしたがって水分移動パラメータを推定した。吸水強度分布 β 、 $E_p : T_p$ 、補填吸水モデルの限界ストレス指数 ω_c は、植物の生長と乾燥の進行によって変化した（表 A-5.6）。推定したパラメータによって計算した蒸発散速度と深度別土中水圧力を図 A-5.21 に示す。計算 ET_a は実測 ET_a をよく再現した。深度別土中水圧力は、15 cm 深以外は計算値が実測値を再現した。圧力分布と水分分布を図 A-5.22 に示す。表層付近は蒸発により早期より水分減少し、上層の水分は解析期間終盤には永久しおれ点 h_4 付近まで消費された。一方、下層の水分は、下層まで根が到達していない乾燥Ⅱ期（8/3～8/7）には消費されず、根が到達した乾燥Ⅲ期（8/8～8/11）以降に消費された。乾燥Ⅲ期以降に消費した水分は、ほとんどが下層から調達された水分だったと推測する。

表 A-5.6 2019 年データより推定した根の吸水に関するパラメータ

		吸水強度分布 β	$E_p : T_p$	ω_c
7/29	乾燥Ⅰ期	0-15 cm	7:3	1
7/30				
7/31				
8/1				
8/2			6:4	
8/3	乾燥Ⅱ期	0-20 cm	6:4	0.7
8/4				
8/5				
8/6				
8/7			5:5	
8/8	乾燥Ⅲ期	0-25 cm	4:6	0.4
8/9				
8/10				
8/11			3:7	
8/12	乾燥Ⅳ期	0-30 cm	3:7	0.4
8/13				

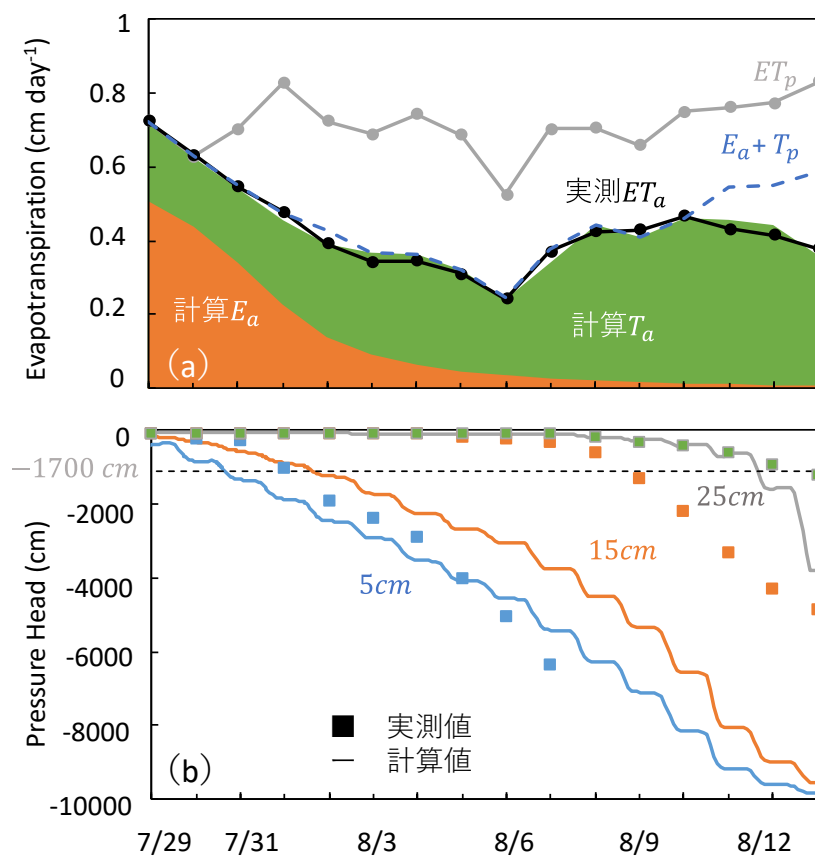


図 A-5.21 2019 年データによる計算結果 (a)蒸発散速度 (b)深度別土中水圧力

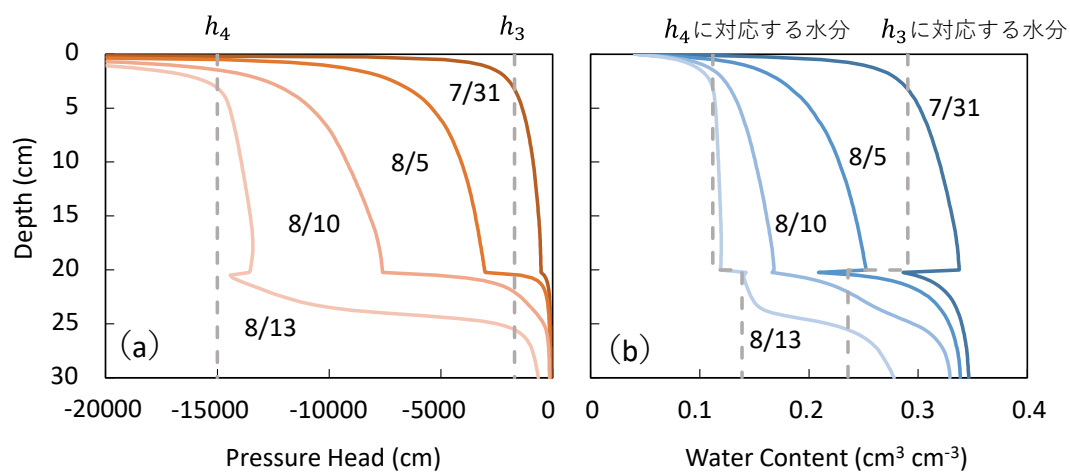


図 A-5.22 2019 年データの (a)圧力分布 (b)水分分布

謝辞

修士論文執筆にあたり、ご指導およびご支援いただきました先生方、ならびにご協力いただきました研究室の方々に、感謝申し上げます。

大学院入学直前、我が家にふりかかった大事件により、進学を断念することとも視野に入れるような状況でした。取出伸夫教授は、進学できる策を練るところから始まり、研究をどのようにしたら論文まで持ち込めるかを考えてくださり、なかなか本稼働しない私を、根気よく指導してくださいました。最後の2か月は、昼夜問わず、休日にも指導をしていただき、修士論文完成するに至りました。渡辺晋生教授には、研究室ゼミでの私のまとまらない話に長々とお付き合いいただき、ご迷惑をおかけしました。坂井勝講師からは、ゼミ以外でもご意見を多々いただき、私の導いた結果・考察を成果とっていただけたことが、たいへんありがたく感じました。

研究室の皆様には、親子ほどの年齢差があるにもかかわらず、頼ってもらうことがあったり、助けてもらうことがあったりと、仲良くしていただき、たいへん楽しませていただきました。

人生が狂うほどの逆境からも、私を取り巻く方々のご協力と、私自身の多少の努力によって、前に進むことができるということを学んだ2年間でした。ここで得たことを糧に、次のステージに進みたいと思います。

最後に、この2か月あまり、積極的に家事をしてくれた夫に、たいへん感謝いたします。そして、今後ともよろしく願ひいたします。