

灌漑方法が異なる耕作地における安定同位体比とチャンバー
法を用いた蒸発散の地面蒸発と蒸散への分離

松野 晃大
200921305

平成 23 年 1 月

筑波大学大学院
生命環境科学研究科環境科学専攻
平成 22 年度 修士（環境科学）学位論文

灌漑方法が異なる耕作地における安定同位体比とチャンバー法を用いた蒸発散の地面蒸発と蒸散への分離

The separation of evaporation and transpiration by using stable isotope and chamber method in different irrigation cultivated land

松野晃大

要旨

Abstract

現在エジプトでは人口が増加し、従来の農業生産量では将来の人口増加に対応できない。そこで新たに砂漠地域を開発し、農地にする計画がある。水使用量の大半を占めるナイルデルタ地域において使用できる水が少なくなることが予想されるため、ナイルデルタ全体の地面蒸発を抑制し、使用できる水の量を増やし、計画に対応する必要がある。地面蒸発を抑制するためにはナイルデルタの耕作地において、慣行灌漑から点滴灌漑に変えることや、マルチ材を敷き詰める方策が考えられる。地面蒸発を抑制するための方策を講じた際の蒸発散量やそれに占める地面蒸発量と蒸散量を推定し、灌漑方法の違いによる、蒸発散量の違いとその内訳である地面蒸発量と作物の蒸散量を定量的に明らかにするのが本研究の目的である。研究対象地はナイルデルタ中心部の Sakha と Zankalon の実験圃場である。圃場における蒸発散量測定には Zankalon と Sakha では北側の Sakha N と南側の Sakha S で Automatic Weather Station を設置し、渦相関法を用いて行った。Zankalon では慣行灌漑（畝間灌漑）を行い、夏季の観測においてはとうもろこしを生産した。またマルチ材（わら）を畝の上に覆った。Sakha N では慣行灌漑を行い、Sakha S では点滴灌漑を行った。

また本研究では、チャンバー法を利用し、地面蒸発量を測定し、蒸発散量から地面蒸発量を減じ、作物の蒸散量を推定した。次に土壌・水蒸気を複数時間・複数高度採取し、作物を1個体から複数採取し、そこから水を抽出し、レーザーmass分析計にて酸素・水素安定同位体比を求め、水蒸気同位体比は Keeling plot model に代入し、蒸発散同位体比 (δ_{ET}) を求めた。土壌面蒸発同位体比 (δ_T) は表面土壌 (0~20 cm) の同位体比と水蒸気同位体比を Craig-Gordon model (佐々木, 2004) に代入し、求めた。これらの値と作物同位体比 (δ_T) と 20 cm 以下の土壌水同位体比 (δ_T) から、一日の圃場全体の蒸発散量に占める作物の蒸散量の割合である蒸散比率を求めた。

チャンバー法においてマルチングを行っていない場所と行った場所の地面蒸発量を比較した結果、地面蒸発量の差はなく、また同時刻・同場所の土壌水分量を比較した結果、マルチングによる蒸発抑制効果は見られなかった。これは蒸発抑制効果を示した、様々な先行研究とは異なる結果である。次に Sakha において点滴灌漑と慣行灌漑の蒸散量を

比べた。蒸散量とは測定した1日の内の地面蒸発量の合計を蒸発散量の合計から減じたものである。この蒸散量を蒸発散量の合計で除した結果を蒸散比率として、Sakha Sでは28～41%、Sakha Nでは46～73%となった。Sakha S、Sakha Nの被度は、31%と44%であり、LAIは、0.89と1.78であった。つまり被度とLAIが大きい方が蒸散比率は大きくなった。一方安定同位体比分析の結果は、Zankalonでは一日の蒸散比率が86～89%、Sakha Nでは91～96%、Sakha Sでは37～65%という結果となった。これによりチャンバー法の結果と同じくLAIと被度がそれぞれ大きい方が、蒸散比率が大きかった。

キーワード: 慣行灌漑, 点滴灌漑, マルチング, チャンバー法, 安定同位体比

目次

第1章 序論.....	1
1-1 背景.....	1
1-2 目的.....	1
1-3 先行研究.....	1
第2章 方法.....	5
2-1 観測場所.....	5
2-2 安定同位体比.....	5
2-2-1 水蒸気採取.....	5
2-2-2 土壌採取.....	6
2-2-3 植物採取.....	6
2-2-4 真空蒸留.....	6
2-2-5 遠心分離.....	7
2-2-6 常温蒸留.....	7
2-2-7 安定同位体比計測.....	7
2-3 チャンバー法.....	7
第3章 結果と考察.....	29
3-1 安定同位体比.....	29
3-1-1 Keeling plot analysis の概要.....	29
3-1-2 常温蒸留補正值計算.....	32
3-1-3 真空蒸留同位体比・遠心分離同位体比・デルタダイアグラム.....	33
3-1-4 土壌水同位体鉛直プロファイル.....	33
3-1-5 Keeling plot analysis の結果と検証.....	33
3-2 チャンバー法.....	34
3-2-1 水蒸気濃度から蒸発量へ換算.....	34
3-2-2 ΔE の算出.....	34
3-2-3 チャンバー法結果.....	35
3-2-4 蒸散比率算出, PAR・飽差・風速との比較.....	35
3-2-5 土壌水分量.....	35
3-2-6 有意解析.....	35
3-3 蒸散比率比較.....	36
3-4 蒸発抑制効果検証.....	36
第4章 結論.....	78
謝辞	
引用文献	

表目次

表 1	夏季実験圃場の状況.....	10
表 2	水蒸気採取の概要	16
表 3	土壌採取個数.....	26
表 4	植物サンプル概要	27
表 5	チャンバー法観測回数	28
表 6	常温蒸留補正結果	39
表 7	遠心分離同位体比測定値	40
表 8	真空蒸留同位体比測定値 (水蒸気)	41
表 9	真空蒸留同位体比測定値 (植物).....	42
表 10	地下水・灌漑水同位体比測定値	43
表 11	安定同位体比を用いた蒸散比率 (T/ET) 推定まとめ.....	55
表 12	チャンバー法蒸散比率まとめ	71
表 13	安定同位体比とチャンバー法蒸散比率比較	76
表 14	蒸発抑制効果検証	77

図目次

図 1	農地拡大計画.....	3
図 2	ナイル川における水使用の内訳.....	4
図 3	エジプト地図.....	9
図 4	Zankalon 圃場平面図.....	11
図 5	Zankalon 圃場断面図と畝の様子.....	12
図 6	Sakha 圃場平面図.....	13
図 7	Sakha N 断面図と畝の様子.....	14
図 8	Sakha S 点滴灌漑断面図・平面図.....	15
図 9	水蒸気サンプル採取場所.....	17
図 10	水蒸気トラップの概要.....	18
図 11	水蒸気トラップの流れ.....	19
図 12	真空蒸留装置概要.....	20
図 13	植物を湯煎し、植物の水を抽出する様子.....	21
図 14	水蒸気サンプルの加熱作業. ななめから見た図.....	22
図 15	遠心分離写真.....	23
図 16	常温蒸留装置.....	24
図 17	チャンバー法概要.....	25
図 18	Keeling plot analysis 概念図.....	38
図 19	Zankalon デルタダイアグラム.....	44
図 20	Sakha S デルタダイアグラム.....	45
図 21	Sakha N のデルタダイアグラム.....	46
図 22	Zankalon 土壌水・地下水・灌漑水同位体比.....	47
図 23	Sakha S 土壌水・地下水・灌漑水同位体比.....	48
図 24	Sakha N 土壌水・地下水・灌漑水同位体比.....	49
図 25	Keeling plot analysis の結果 (Zankalon 8/3).....	50
図 26	Keeling plot analysis 結果 (Zankalon 8/4).....	51
図 27	Keeling plot analysis の結果 (Zankalon 8/5).....	52
図 28	Keeling plot analysis の結果 (Zankalon 8/5).....	53
図 29	Keeling plot analysis の結果 (Zankalon 8/5).....	54
図 30	8/3 Zankalon 水蒸気濃度変化 (10:30~).....	56
図 31	8/3 Zankalon 水蒸気濃度変化 (10:43~).....	57
図 32	8/7 SakhaS 水蒸気濃度変化 (11:20~).....	58
図 33	チャンバー法により求められた地面蒸発量と AWS による蒸発散量 (8/4).....	59
図 34	地面蒸発量・蒸散量・蒸発散量と飽差・PAR・風速の時間変化の比較 (8/4).....	60
図 35	チャンバー法により求められた地面蒸発量と AWS による蒸発散量 (8/5).....	61
図 36	地面蒸発量・蒸散量・蒸発散量と飽差・PAR・風速の時間変化の比較 (8/5).....	62

図 37	チャンバー法により求められた地面蒸発量と AWS による蒸発散量 (8/7).....	63
図 38	地面蒸発量・蒸散量・蒸発散量と飽差・PAR・風速の時間変化の比較 (8/7).....	64
図 39	チャンバー法により求められた地面蒸発量と AWS による蒸発散量 (8/8).....	65
図 40	地面蒸発量・蒸散量・蒸発散量と飽差・PAR・風速の時間変化の比較 (8/8).....	66
図 41	チャンバー法により求められた地面蒸発量と AWS による蒸発散量 (8/9).....	67
図 42	地面蒸発量・蒸散量・蒸発散量と飽差・PAR・風速の時間変化の比較 (8/9).....	68
図 43	チャンバー法により求められた地面蒸発量と AWS による蒸発散量 (8/10).....	69
図 44	地面蒸発量・蒸散量・蒸発散量と飽差・PAR・風速の時間変化の比較 (8/10).....	70
図 45	Zankalon 土壌水分量の推移.....	72
図 46	Zankalon 土壌水分量分布	73
図 47	SakhaS 土壌水分量分布	74
図 48	SakhaN 土壌水分量分布	75

第1章 序論

1-1 背景

エジプトでは古くからナイル川の氾濫により農地が生成されていた。これをハウド灌漑または Basin 灌漑とよぶ (鈴木, 1986)。しかし, 1964 年, ナイル川上流にアスワンハイダムが建設されたことにより, エジプトは慣行灌漑へと移行した。その後人口増加に伴う, 灌漑農地の開発が進行し, 1988 年ナイル川上流のナセル湖の水位低下により水不足となり, 水資源管理の限界が叫ばれるようになった (Ministry of Water Resources and Irrigation of Arab Republic of Egypt, 2005)。

1997 年において人口増加がさらに進み, 従来の農業生産量では将来の人口増加に対応できない。そこで新たに砂漠地域であるエジプト南部のトシュカ地区やナイルデルタ東地区やシナイ半島北部などを開発し, 農地にする計画がある (図 1: Ministry of Water Resources and Irrigation of Arab Republic of Egypt, 2005)。この計画では 2017 年までにエジプト全体において灌漑耕作地を 1997 年と比較して約 $1.3 \times 10^{10} \text{ m}^2$ 増やす予定であるが, 耕作地を増やすためには, 使える水の使用量は限られているため大規模な節水対策を行う必要がある。ここで水使用の内訳 (図 2) を見ると, 約 70% 近くの水が農業で使用されて蒸発している, よって人口の大半と農業生産の大半を占めるナイルデルタにおいて大規模な蒸発抑制政策を行えば, 第一に灌漑排水が増えて, 下流にも灌漑水が行き渡るようになり, 第二に蒸発を抑制することにより圃場の土壌水分の減少が遅くなるので, 灌漑回数を少なくすることができて, 節水することができる。その中で抑制しなければならないのは, 地面蒸発のみであり, 蒸散量は農作物の生産に大きく寄与するので, 減らすことができない。つまり, 耕作地の蒸発散量の内地面蒸発量と蒸散量を正確に把握する必要がある。

1-2 目的

地面蒸発を抑制するためには一般的にナイルデルタの耕作地において, 慣行灌漑 (畝間灌漑) から点滴灌漑に変えること (Ajai, 2008) や, マルチ材を敷き詰める方策が考えられる (Chen, 2007)。本研究では, 地面蒸発を抑制するための方策を講じた際の蒸発散量やそれに占める地面蒸発量と蒸散量を推定し, 灌漑方法の違いによる, 蒸発散量の違いとその内訳である地面蒸発量と作物の蒸散量を定量的に明らかにするのが目的である。

1-3 先行研究

先行研究では, 例えば Chen (2007) ではライシメーターを用いてマルチングを行っている場所と行っていない場所の蒸発量を比べた結果マルチングを行っている場所は行っていない場所にくらべ平均 30% 蒸発量が少なかった (中国科学院圃場にて小麦畑)。また井上 (2007) では, マルチング (稲ワラ) を行った場所とマルチングを行っていない場所の積算蒸発量を比較した結果, マルチングを行った場所の蒸発量は行っていない場所に比べ 1/2

以下であった。また Yamanaka (2004) では温度や相対湿度を管理できる、実験施設において砂利のマルチを施した場所と施していない場所を比べた結果、蒸発抑制効果を示した。点滴灌漑に関する研究は例えば Bonachela (2001) では点滴灌漑圃場全体の蒸発量をマイクロライシメーターで湿っている場所といない場所をそれぞれ算出した。しかし慣行灌漑と点滴灌漑を直接比べ、蒸発抑制効果に言及した研究はほとんどない。

蒸発散量を地面蒸発量と蒸散量に分離するには、蒸発散量を示し、チャンバー法によって圃場の植物が生えていない場所の地面蒸発量を直接観測し、その値を蒸発散量から減じることによって蒸散量とする。先行研究では例えば Sato (2010) のようにチャンバー内に植物を入れて、地面蒸発量+蒸散量=蒸発散量とする方法が取られていたが、本研究のような手法で蒸発と蒸散を分離する研究はあまり行われていなく、灌漑方法の異なる圃場でそれを行う研究もあまりない。安定同位体比を利用し、蒸散と地面蒸発を分離する研究は様々行われている (山中, 2009)。しかし、灌漑方法が異なる圃場でその研究を行った例は今までなく、本研究の意義は極めて大きい。

以上より本研究では正確な観測方法である渦相関法 (杉田・田中, 2009) を用いて、蒸発散量を示し、灌漑方法の異なる圃場においてチャンバー法と安定同位体比という二つの方法を用いて地面蒸発と蒸散を分離したという点で極めて本研究の意義は大きい。

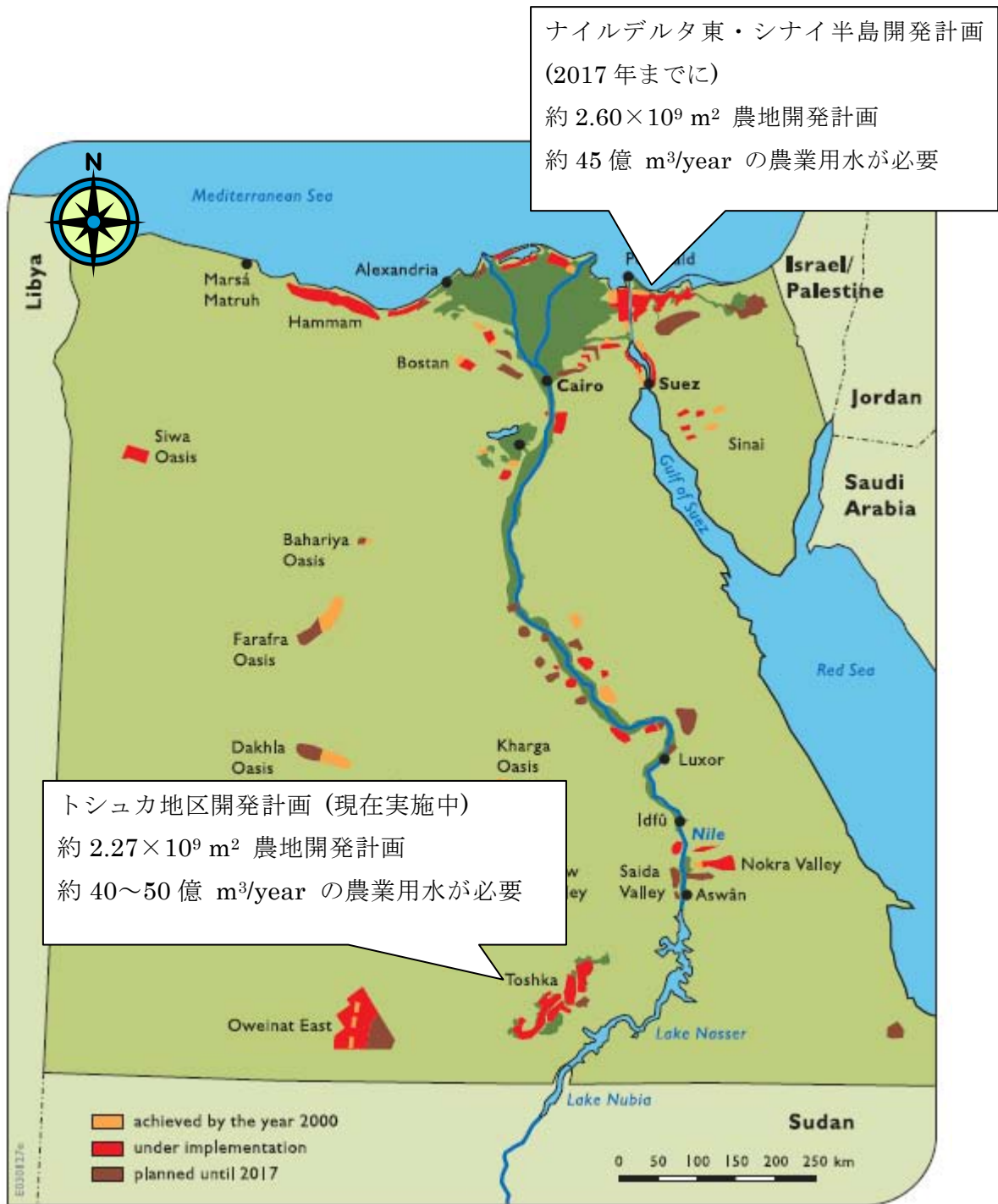


図 1 農地拡大計画. (Ministry of Water Resources and Irrigation of Arab Republic of Egypt, 2005 を加筆)

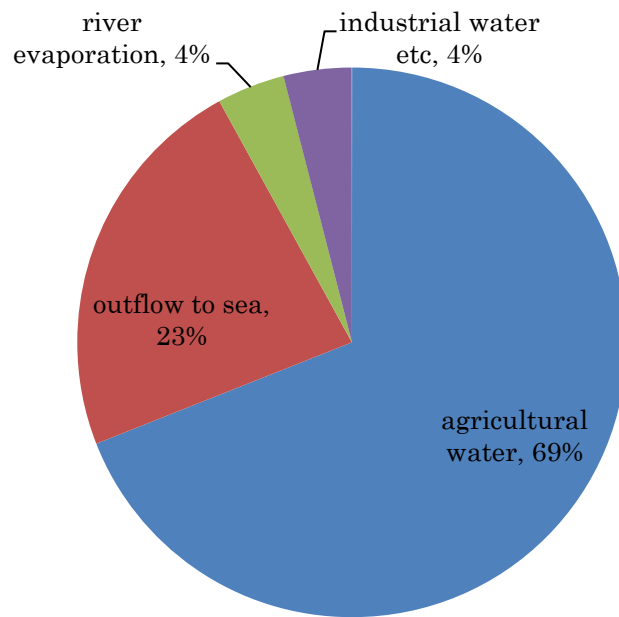


図 2 ナイル川における水使用の内訳. (Ministry of Water Resources and Irrigation of Arab Republic of Egypt, 2005)

第 2 章 方法

2-1 観測場所

観測場所は図 3 の Zankalon (N30°34'50.04", E31°25'59.94"), Sakha 実験圃場の北側 (N 31°5'54.2", E 30°55'24.2" : Sakha N), Sakha 実験圃場の南側 (N 31°5'47.6", E30°5'21.205" : Sakha S) で行った. 観測場所の灌漑状況と作物は表 1 のとおりである. 圃場の平面図と断面図は図 4 と図 5 にまとめた. また古来よりナイルデルタ地域は世界でも有数の肥沃な農地を形成してきた. これは, 青ナイル上流域のエチオピア山岳地帯に分布する肥沃なバーティゾル土壌 (Vertisols) をナイル川がその沿岸に供給し続けたためである (北村, 1994).

2-2 安定同位体比

2-2-1 水蒸気採取

水蒸気採取はまず Zankalon では 3 日間採取を行い, Sakha S では 2 日間採取を行い, Sakha N では 2 日間採取を行った. 詳細は表 2 にまとめた. また観測地点の概要は図 9 のとおりである.

次に採取の流れは以下の通りである (図 11).

1. ガラス管 1 にガラスビーズ 30 g を入れ, グリースでガラス管 2 と連結させた (図 10).
2. 連結したガラス管の質量を秤で計測した. 秤は風の影響を受けないようにプラスチックの箱の中に入れて, 使用した.
3. 各測器および水蒸気トラップ管をチューブでつないだ.
4. 現地で得られた Automatic Weather Station (AWS) の水蒸気濃度 (g/m^3) と相対湿度 (%) をもとに予め, 絶対湿度 (kg/m^3) と 1 g の水蒸気を回収するために必要な時間を計算した.
5. 流量計とポンプを準備した. 流量計は手前のネジを完全に開けた.
6. ポンプをオンにして, 流速を設定した. 流量計にて 1 (L/min) に設定した.
7. 片方のチューブを設定高度に設置したら, チューブ内の空気が設定高度の空気となるように換気を行った. (約 3 分)
8. 換気の際にデュワ瓶に液体窒素を入れた. また換気がすんだら, ポンプを止めた.
9. トラップ管を液体窒素につけた. (約 3 分). 管内がよく冷えるまでポンプはオフ.
10. ポンプをオンにして, 管内に空気を通した. (水蒸気トラップ開始). 約 3 時間かかった. トラップ中はこまめに液体窒素を注ぎ足す.
11. ポンプを止めた.
12. トラップ管を液体窒素につけたままの状態ですべてのトラップ管の上向きの方に装着してあるゴムチューブを外し, 素早くパラフィルムをかぶせ, 洗濯ばさみで止めた. →液体窒素から出

すと管内の圧力が上がる。そのため気体（液体酸素など）が激しく噴出することがあり、それに伴いビーズが飛び出すことを防ぐため。しかし、完全にビーズが飛び出すのを防ぐことができなかった。原因は図 11 にもあるが、ガラス管内において水蒸気が凍ってしまい、常温に戻した時、管内の空気が膨張した際に、横から空気が出なくなってしまうからである。

13. トラップ管からビニールチューブ（横の空気を取ってきたほう）を外した。
14. トラップ管を液体窒素から出した。
15. 管内と外の圧力差がある程度縮まってきたら管の口にパラフィルムをつけた。
16. 管内の氷がとけたら、水滴を良く拭いて計測した。ここで 1 g 取れていない場合は、もう一度チューブをつなぎ、3 に戻した。
17. 管 1 と 2 を外し、管 1 にグリースをつけてガラス栓をした。

2-2-2 土壌採取

土壌水と土壌面蒸発における安定同位体比を推定するために、土壌サンプルを採取した。Zankalon では 3 日間で地表面（0～5 cm）を毎日 2 サンプル採取した。2 サンプルは畝の上と下である（図 5）。また表 3 の高度において採取した。採取方法は大きな穴を掘り、横からサンプル缶を入れて採取した（攪乱サンプル）。また Sakha S と Sakha N においても同じ個数を採取した。ただし Sakha S で採取した表面土壌は点滴灌漑の水で湿った場所と湿っていない場所（図 8）である。

2-2-3 植物採取

植物中の水の安定同位体比を測定するために、Zankalon, Sakha S, Sakha N でサンプルのトウモロコシをそれぞれ採取した。こちらは概要を表 4 にまとめた。

2-2-4 真空蒸留

採取した水蒸気サンプルと植物サンプルは飯塚（2004）に沿って真空蒸留を行った。蒸留の簡単な工程は以下の通りである。

1. 枝管の接続部にシリコングリースを塗り、植物サンプルおよび水蒸気サンプルの入った試験管と空の試験管を接続した（図 12）。
2. コックを閉めた状態でサンプルの入った試験管を液体窒素で冷却し、サンプルを完全に冷却した（図 12）。
3. 枝管を真空ポンプに接続し、コックを開けて内部を十分に減圧した後（5 分程度）、コックを閉じ。このときサンプルを入れた試験管は液体窒素で冷却されたままであるので、植物体中の水が気化して散逸することはない（図 12）。
4. サンプルの入った試験管の冷却を止め、植物サンプルの場合湯煎（90℃）にかけ（図 13）、水蒸気サンプルの場合直接ガスバーナーで加熱した（図 14）、また同時に空の試験管を液体窒素で冷却した。植物サンプルは試験管を沸騰させた水に入れて約 2 時間湯煎した。水蒸気

サンプルの場合直接バーナーで加熱させながら、見た目でも水蒸気が空の試験管に完全に移動するまで加熱した。

2-2-5 遠心分離

採取したサンプルは山中 (1997) に沿って遠心分離を行った。土壌試料を充填した 100 cc のステンレス製採土管をろ過筒に集水管とともに土壌用遠心ローター (図 15: 佐久間製作所製 HB-R 型) に格納し, 10000 rpm で 10 時間冷却遠心操作を行い, 水分を採取した。

2-2-6 常温蒸留

土壌を封入した容器と-40°Cに冷却したエタノールにつけたガラス管およびポンプ(榎本マイクロポンプ製作所製, MV-6005VP) をビニールチューブでつないでできる閉鎖系経路内において空気を一定速度で循環させ, 容器内で蒸発した水分をガラス管に凝結させて採取した (図16)。水分の回収は5~12 時間かけて行った。この水の安定同位体比に対し, 回収されずに残った水分量の割合(f)と回収装置ごとに求めた以下の式と分別係数 (酸素: 1.0123 水素: 1.08665) から補正を行い (山中, 1997; 佐々木, 2004), 各土壌水の安定同位体比を求めた。

$$\delta_0 = \frac{(1-f)\delta_v + 1000(f^{\frac{1}{\alpha}} - f)}{1 - f^{\frac{1}{\alpha}}} \quad (1)$$

ここで δ_0 は補正した同位体比, f は液状水残存率, δ_v は補正前の同位体比, α は同位体分別係数である。

2-2-7 安定同位体比計測

以上の方法より抽出した水と灌漑水と地下水を筑波大学恩田研究室所蔵のPicarro L1102-i Isotopic Liquid Water and Water Vapor Analyzerにて水素・酸素安定同位体比の計測を行った。

2-3 チャンバー法

チャンバー法は Sato (2010) に基づき行った。Zankalon ではまず 1 日目 (8/3) 午前中, 圃場 5 カ所にカラーを置き, 12 時から観測を開始した。5 カ所は畝の上 3 カ所と畝の下でマルチを敷き詰めた状態の所に置いた (図 5)。Sakha S ではカラーの置いた場所は, 2 カ所点滴灌漑によって水が噴出する場所に置き, 3 カ所は水が噴出しない地面に置いた (図 8)。次に Sakha N ではカラーの置いた場所は, 2 カ所畝の上, 3 カ所畝の下に置いて観測を行った (図 9)。観測は一つのカラーにつき 1 セットにつき 5 回観測を行った。概要を図 17 に詳細は表 5 にまとめた。

次に以下のマニュアルに従い観測を行った。

カラーを数か所に設置する。ロガー、LI-840、電源、ポンプ、チャンバー、タフブック、チューブ、ファン、熱電対、などを接続し、コードとバッテリーをつなぐ。タフブックのロガーネットを開いて **connect** をクリック、**Numeric** や **Graph** の **1** を開いて H_2O 、 CO_2 などの値が正常かどうかを見た。正常であることの見極める手段として、グラフの値がチャンバーをカラーに覆った直後に右肩上がりに上昇していればよいが、一見ではわからないので、グラフの最大値・最小値もチェックした。ほとんど正常であったので **Collect** をクリックして記録を保存した。覆った後、約 1 分かけて正常な値であれば、**disconnect** をクリックし、1 回の測定を終えた。覆った人以外にロガーネットをチェックした人は覆った時間と測定を終えた時間を記録しておいた。これを一つのカラーに 5 回繰り返して、次のカラーに移動した。

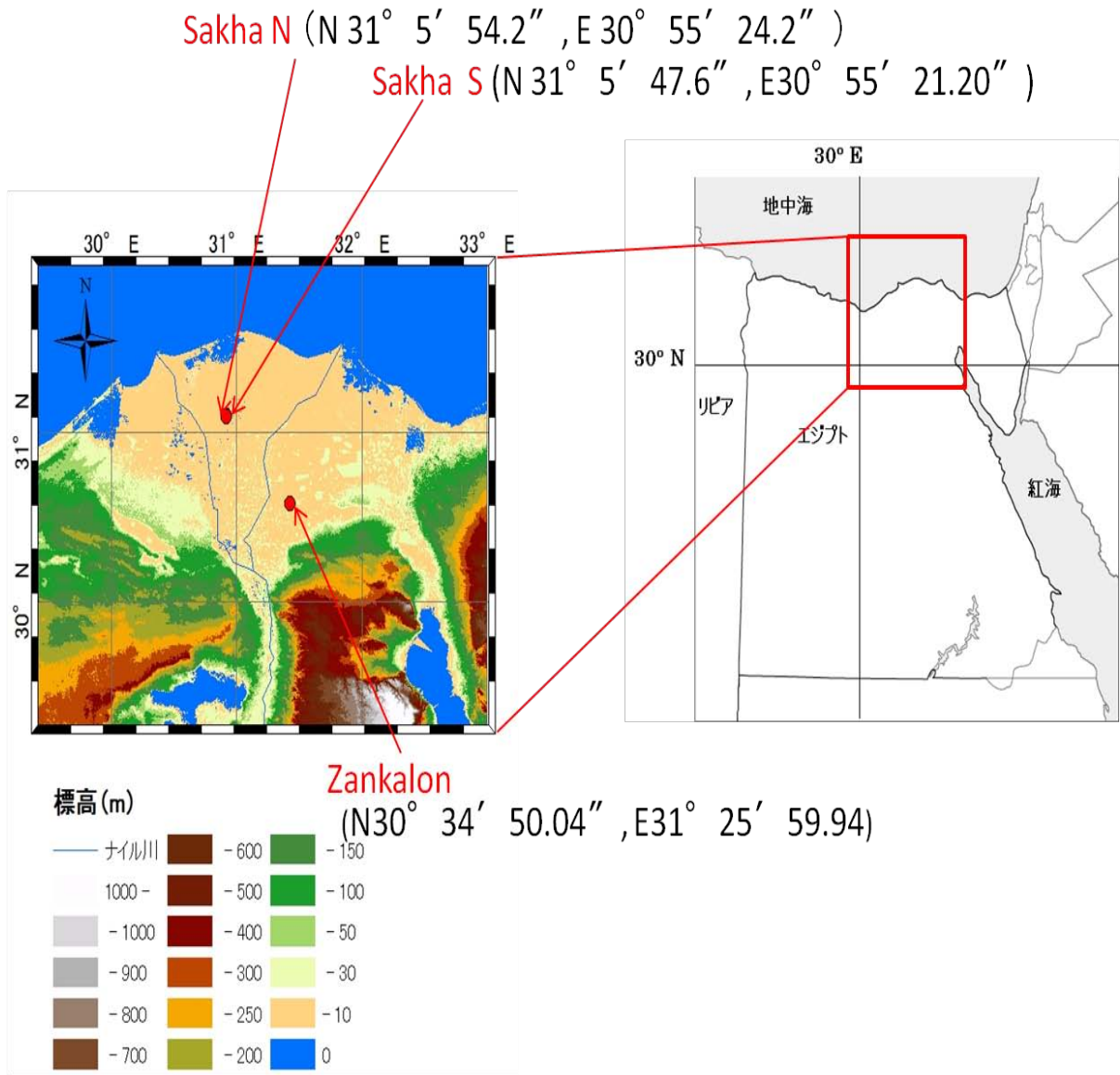
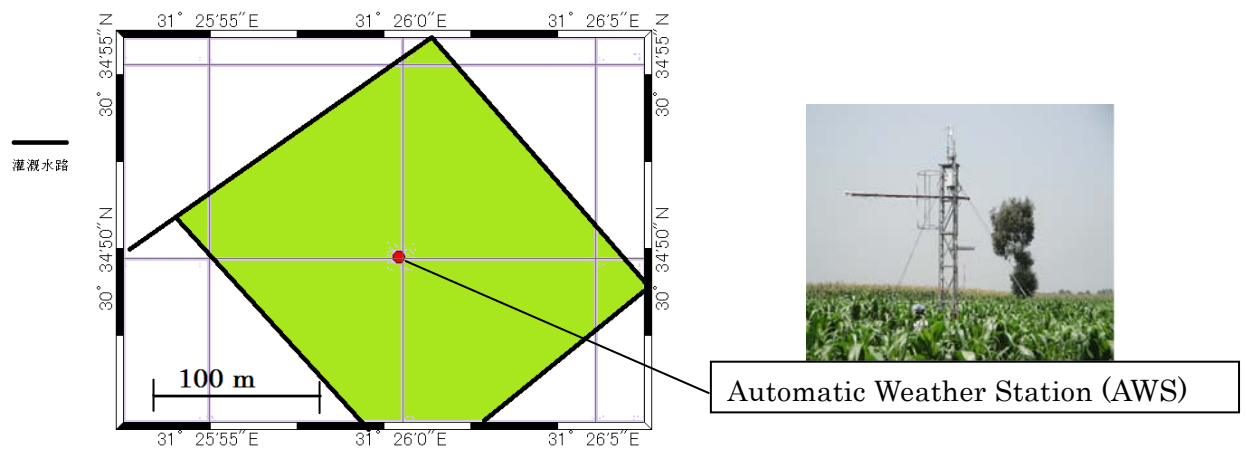


図 3 エジプト地図. 左の地図は Map source は Aster G-DEM であり, 右の白地図は福田 (2010) のエジプト全体の地図を基に作成した.

表 1 夏季実験圃場の状況

対象地	灌漑方法	作物	播種	刈り取り
Zankalon	慣行灌漑 + マルチ ング	とうもろこし (Cross 10)	6月18日-24日	9月18日
Sakha N	慣行灌漑		6月20-25日	9月18・28日
Sakha S	点滴灌漑		6月26-7月上旬	9月19日



拡大図

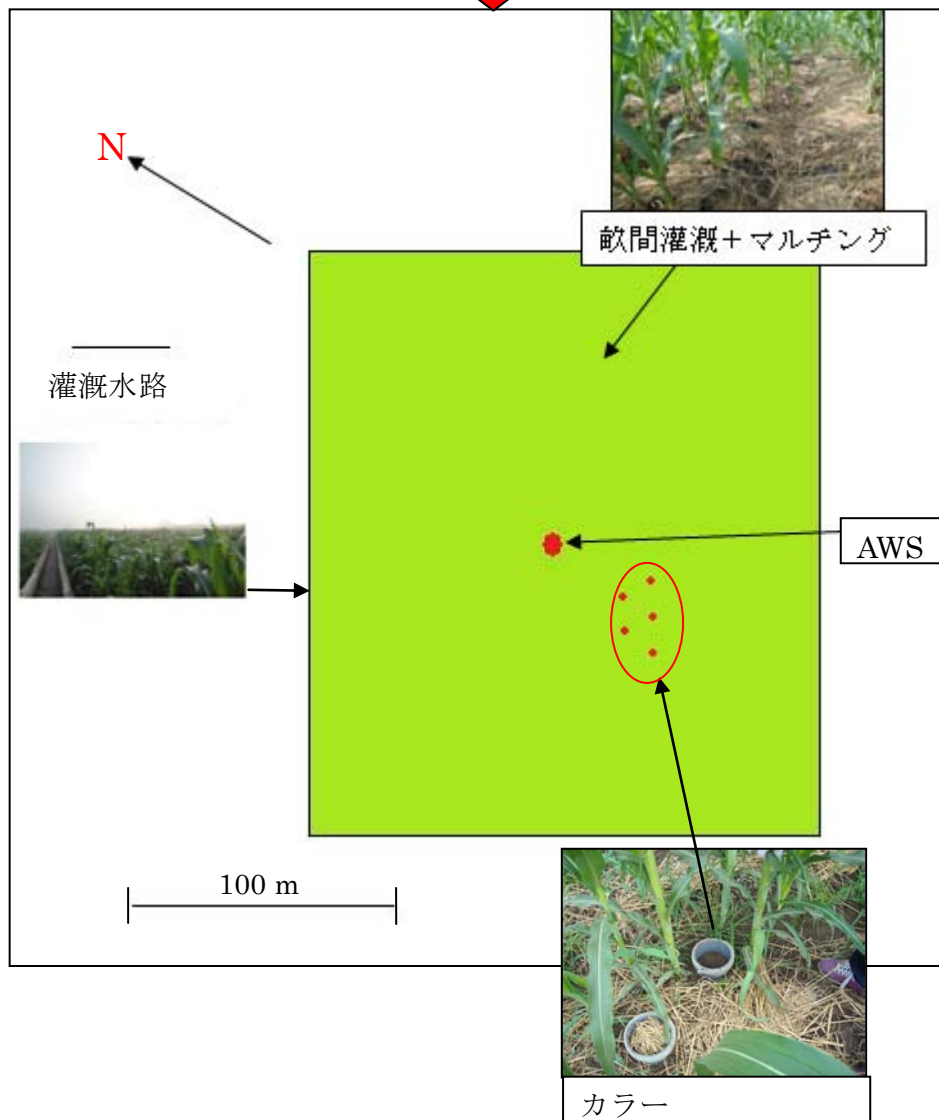
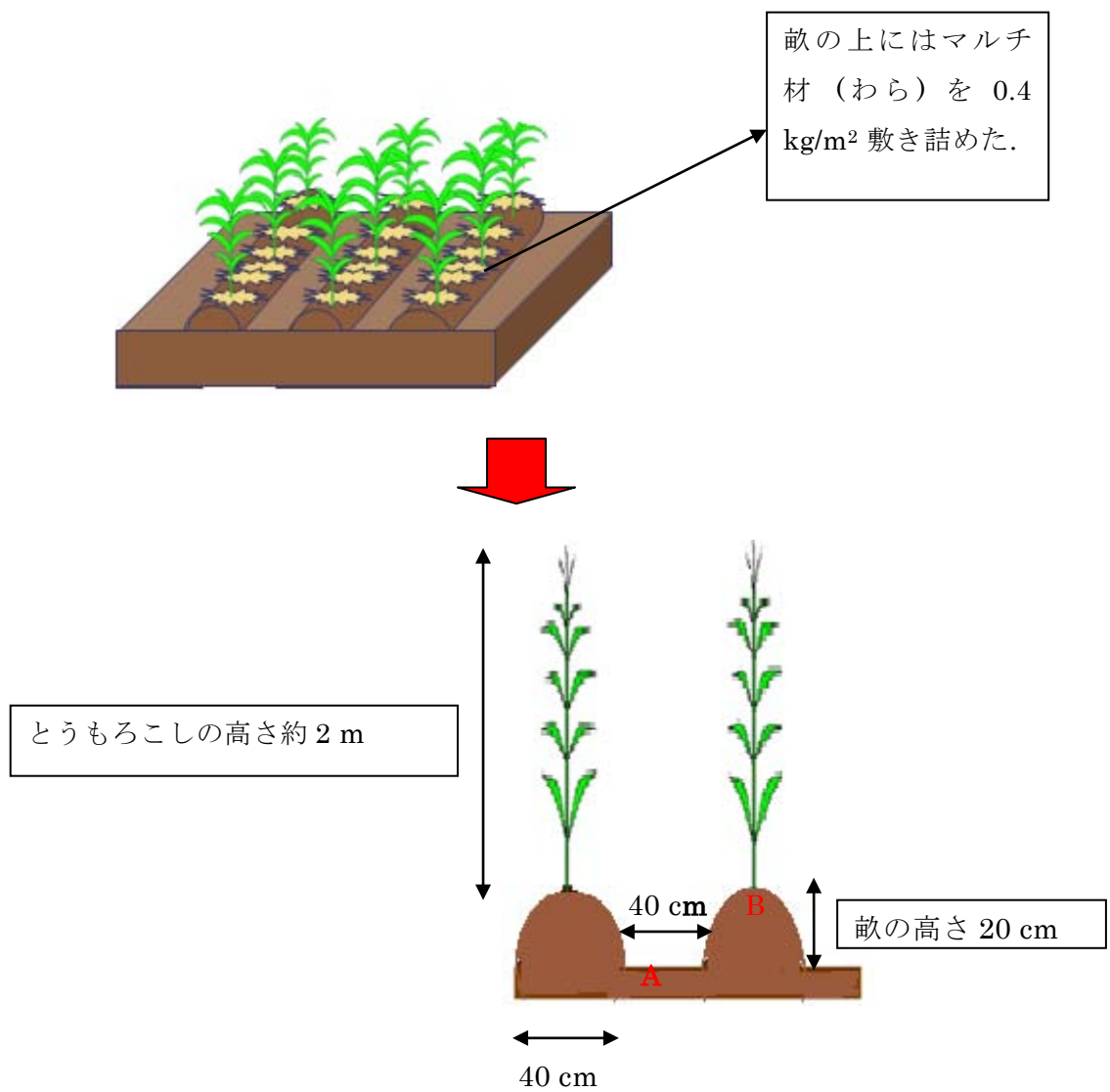


図 4 Zankalon 圃場平面図



○図中の赤字の A 地点を畝の下, B 地点を畝の上と呼ぶ.

図 5 Zankalon 圃場断面図と畝の様子

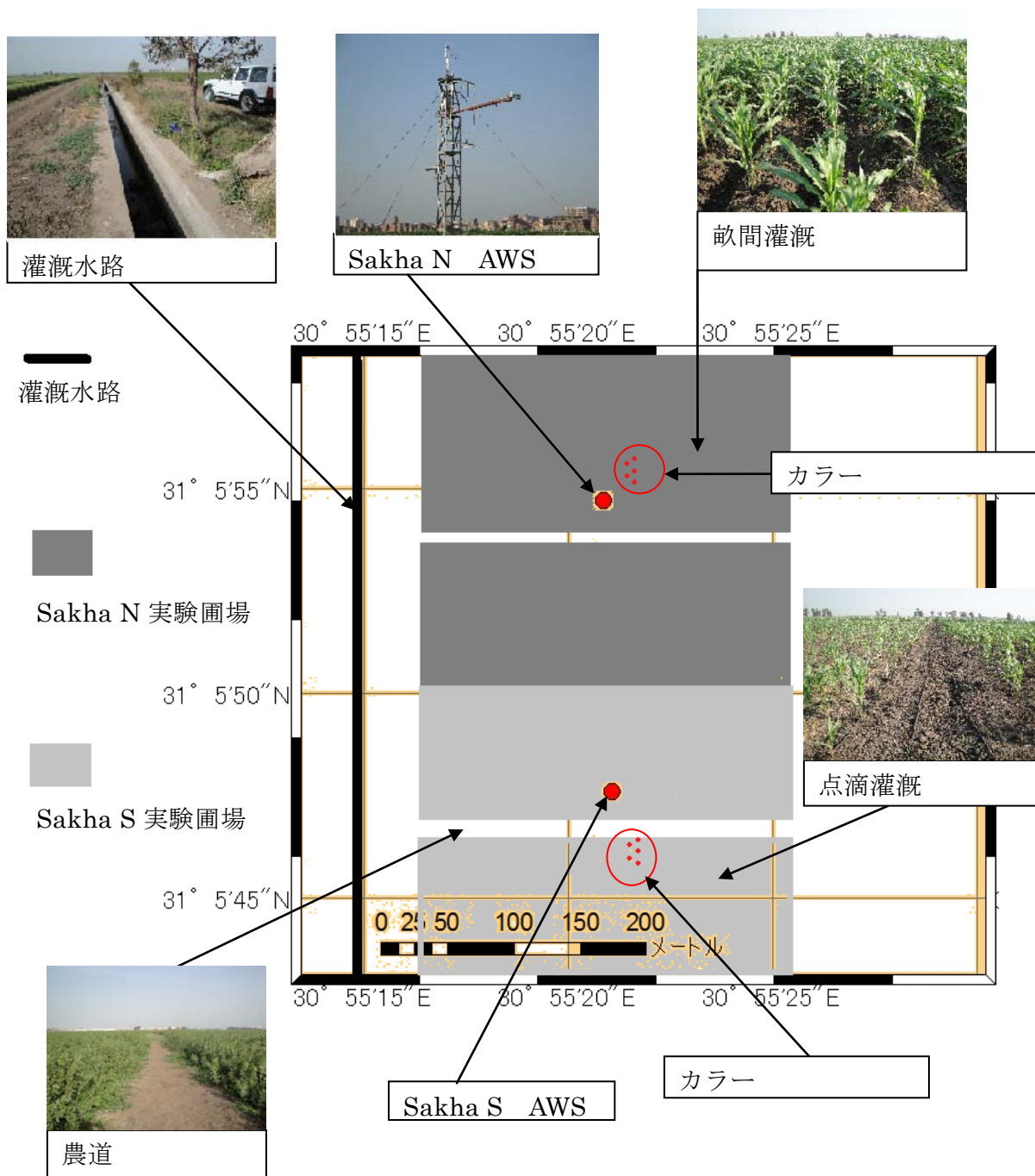
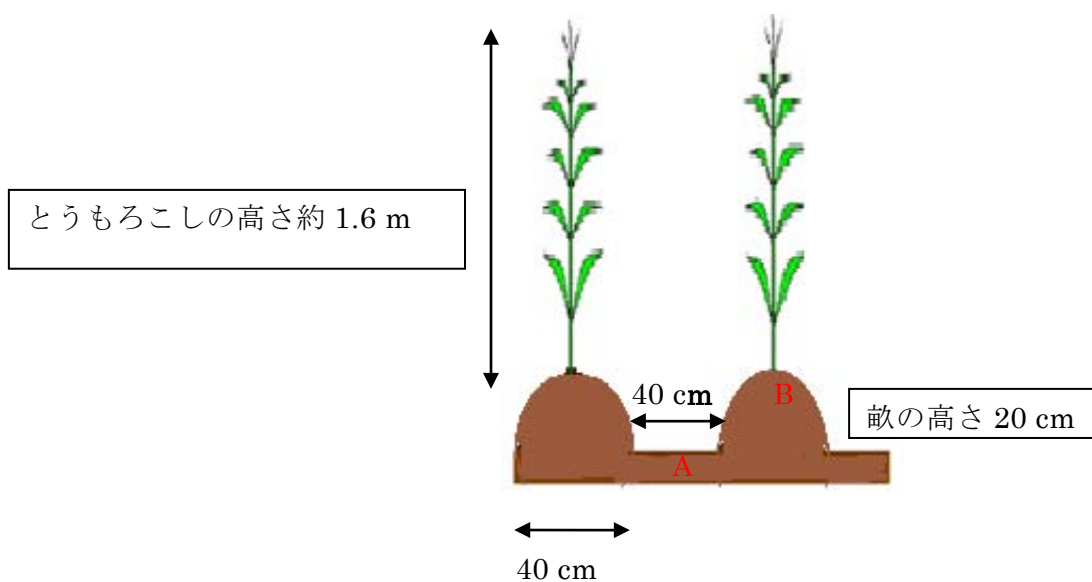
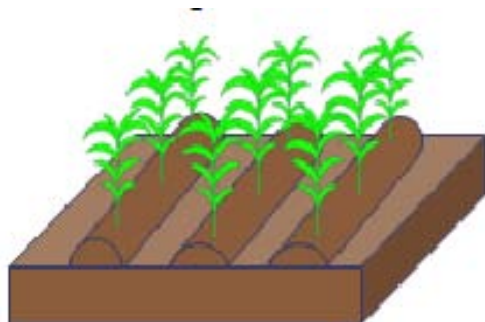
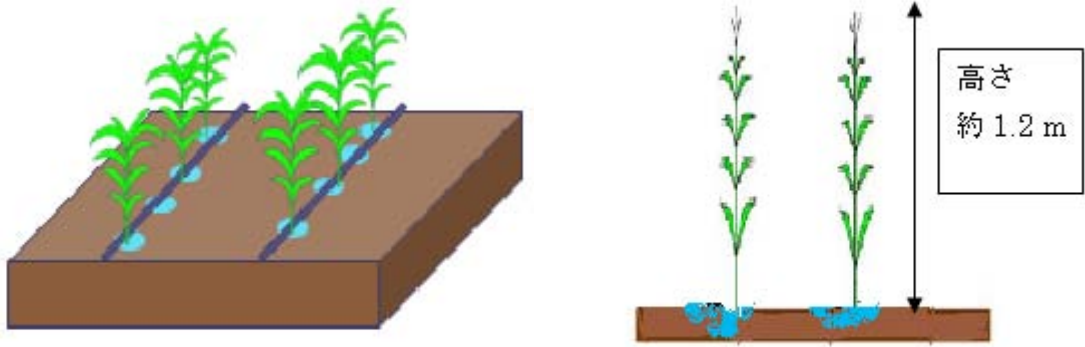


図 6 Sakha 圃場平面図. 北側を Sakha N 南側を Sakha S とした. 作物: トウモロコシ
 Sakha N では畝間灌漑 Sakha S では点滴灌漑を行った. 周辺は放牧地, 小麦畑, 農道などであった.



○図中の赤字の A 地点を畝の下, B 地点を畝の上と呼ぶ.

図 7 Sakha N 断面図と畝の様子



点滴灌溉断面図



点滴灌溉平面図

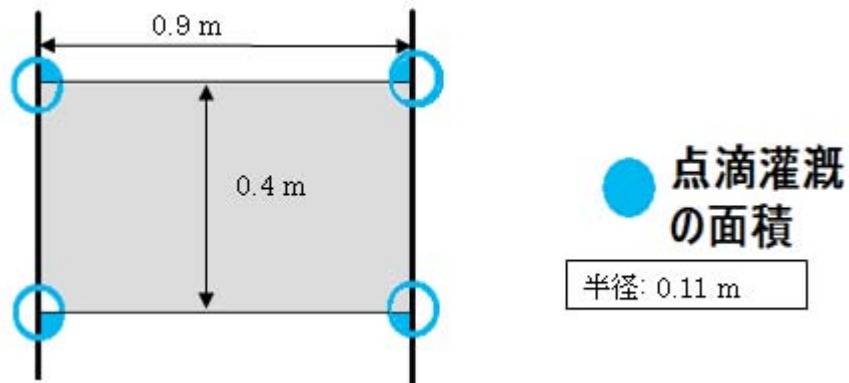


図 8 Sakha S 点滴灌溉断面図・平面図

表 2 水蒸気採取の概要

場所	年/月/日	高度	採取時刻（エジプト時間）*
Zankalon	2010/8/3	5.78 m, 3.0 m, 1.0 m	13:10~16:30
Zankalon	8/4	5.78 m, 3.0 m, 1.0 m, 0.5 m	9:20~17:30, 17:44~19:20
Zankalon	8/5	5.78 m, 3.0 m, 1.0 m, 0.5 m	8:45~14:30
		5.78 m, 3.0 m	15:30~19:20
Sakha S	8/7	5.78 m, 3.0 m, 1.0 m, 0.5 m	8:10~12:10, 15:50~19:20
Sakha S	8/8	5.78 m, 3.0 m, 1.0 m	7:50~12:10
		5.78 m, 3.0 m, 1.0 m	15:45~19:20
Sakha N	8/9	5.78 m, 3.0 m, 1.0 m, 0.5 m	8:00~12:20, 15:45~19:20
Sakha N	8/10	5.78 m, 3.0 m, 1.0 m	7:45~12:20
		5.78 m, 3.0 m, 1.0 m	15:40~18:30

*エジプト時間はサマータイムを適用しているため UT+2 時間

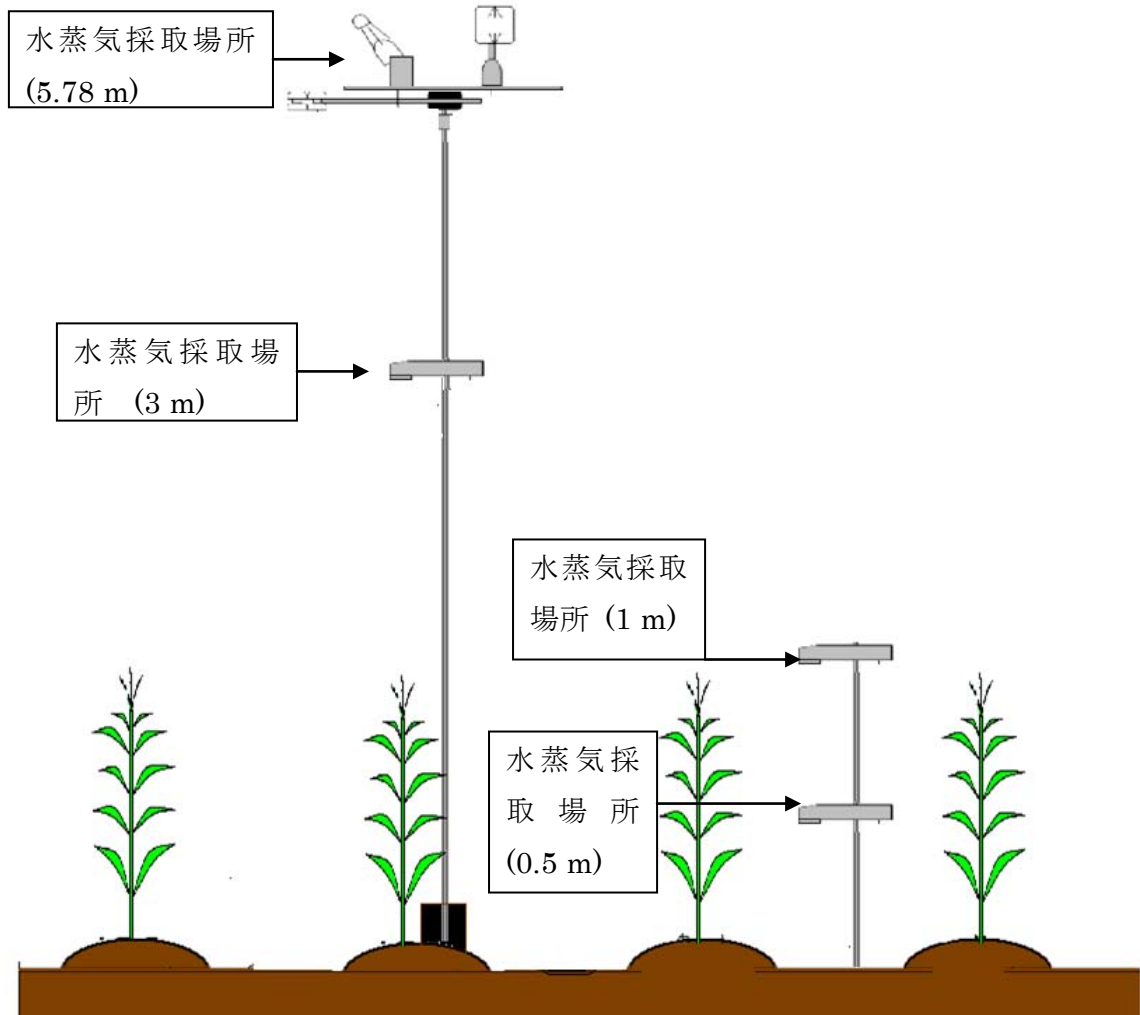


図 9 水蒸気サンプル採取場所。以上の 4 地点において水蒸気を採取するとともに、5.78 m においては水蒸気濃度 (g/m^3), 3 m, 1 m, 0.5 m においては温湿度計により相対湿度 (%) を測定した。

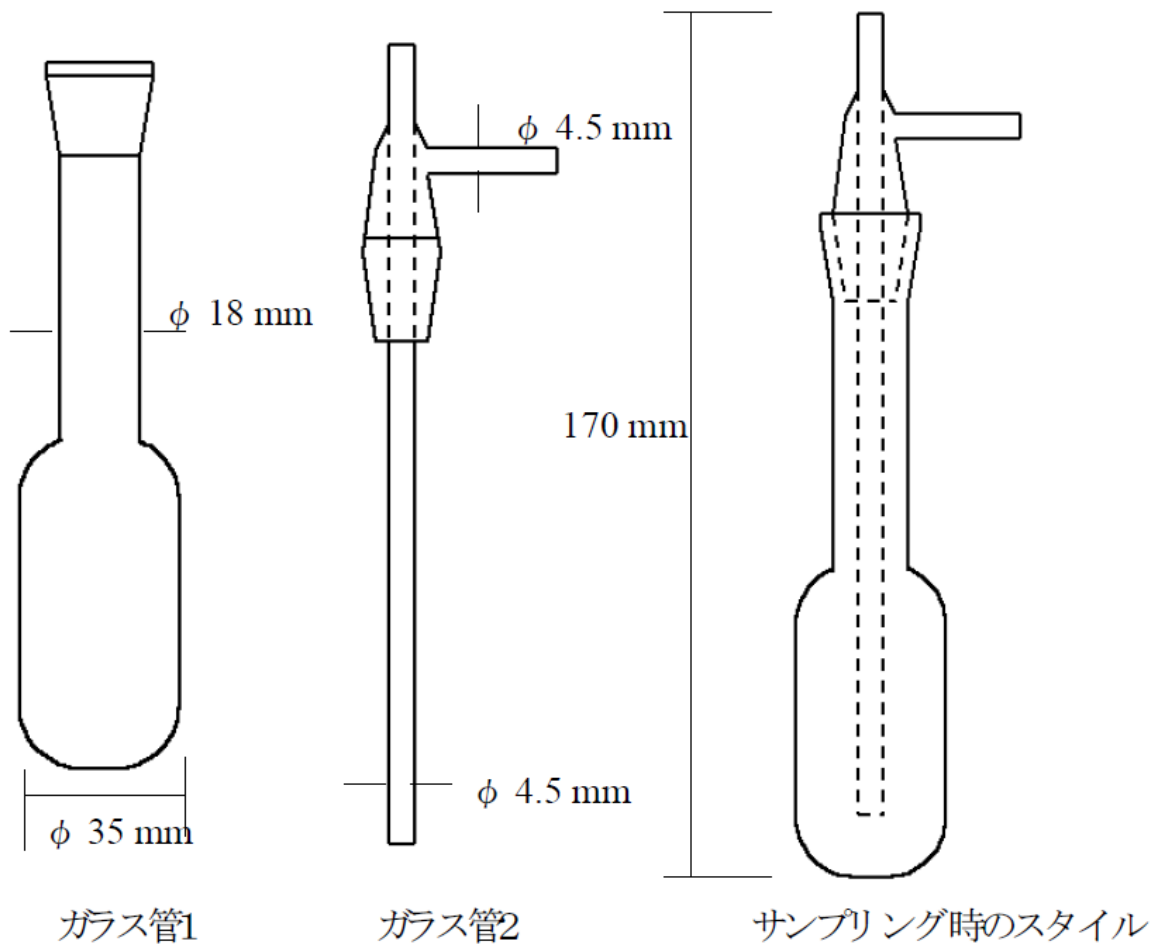


図 10 水蒸気トラップの概要 (佐々木, 2004)

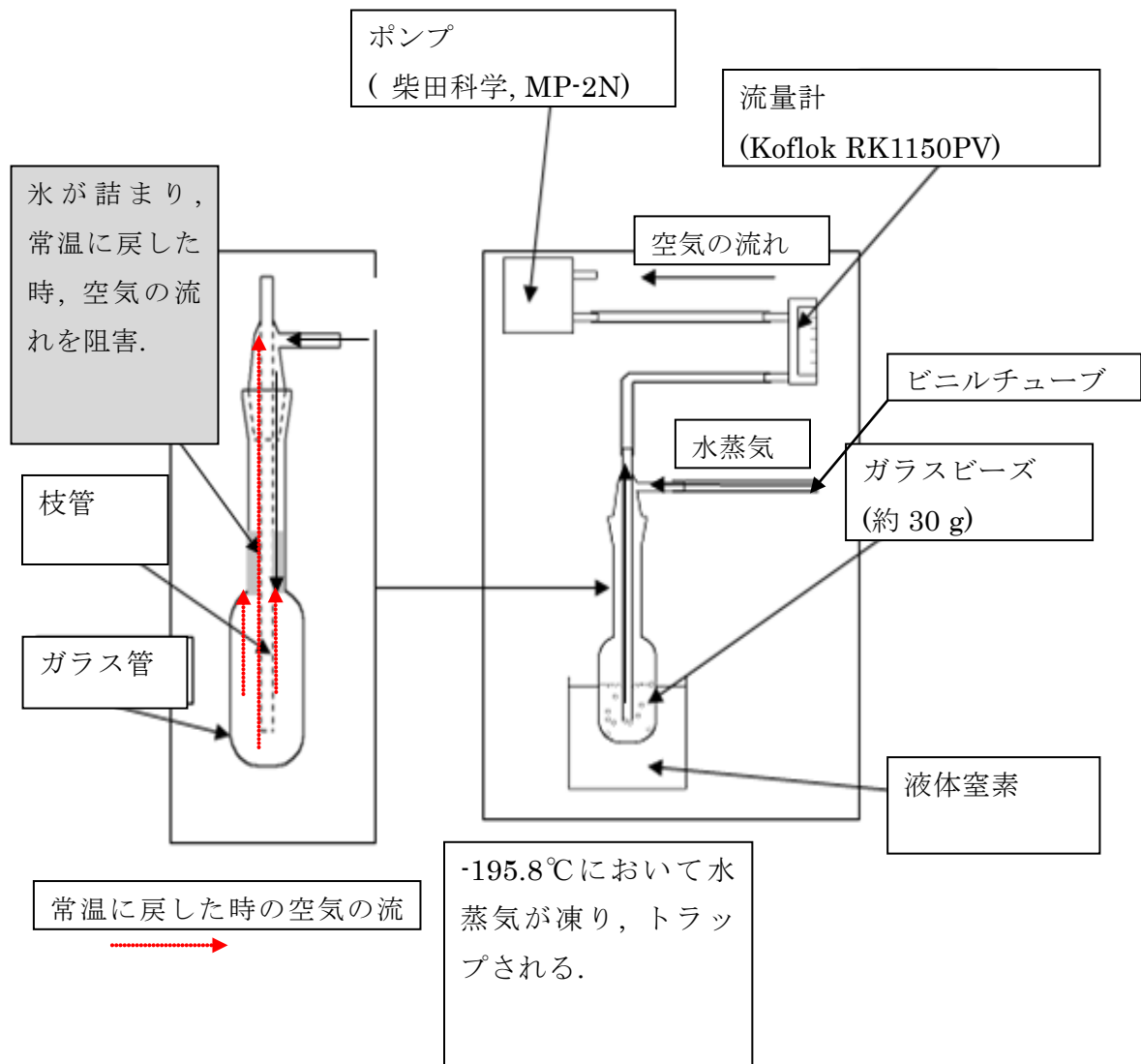


図 11 水蒸気トラップの流れ

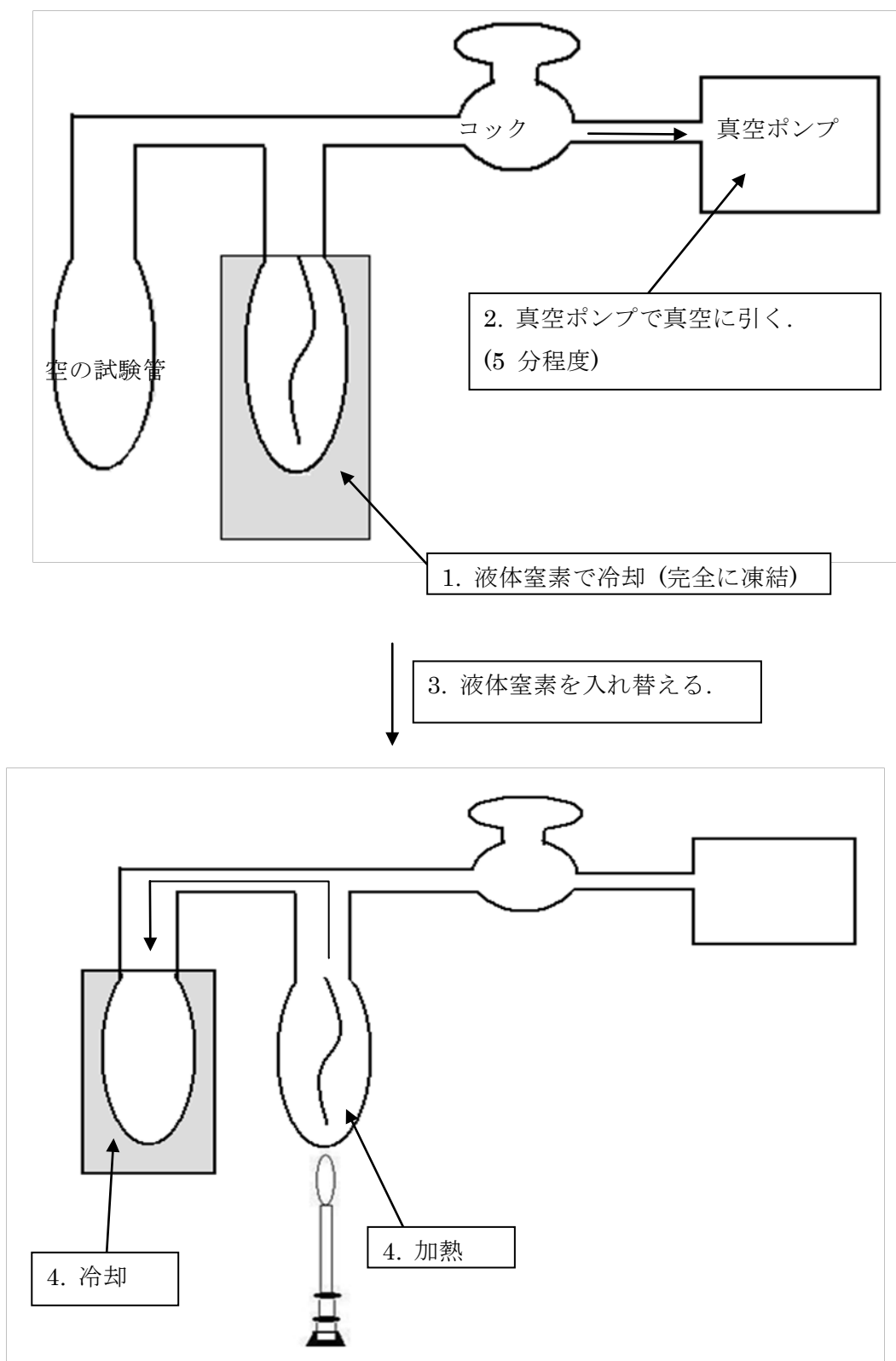


図 12 真空蒸留装置概要



図 13 植物を湯煎し、植物の水を抽出する様子

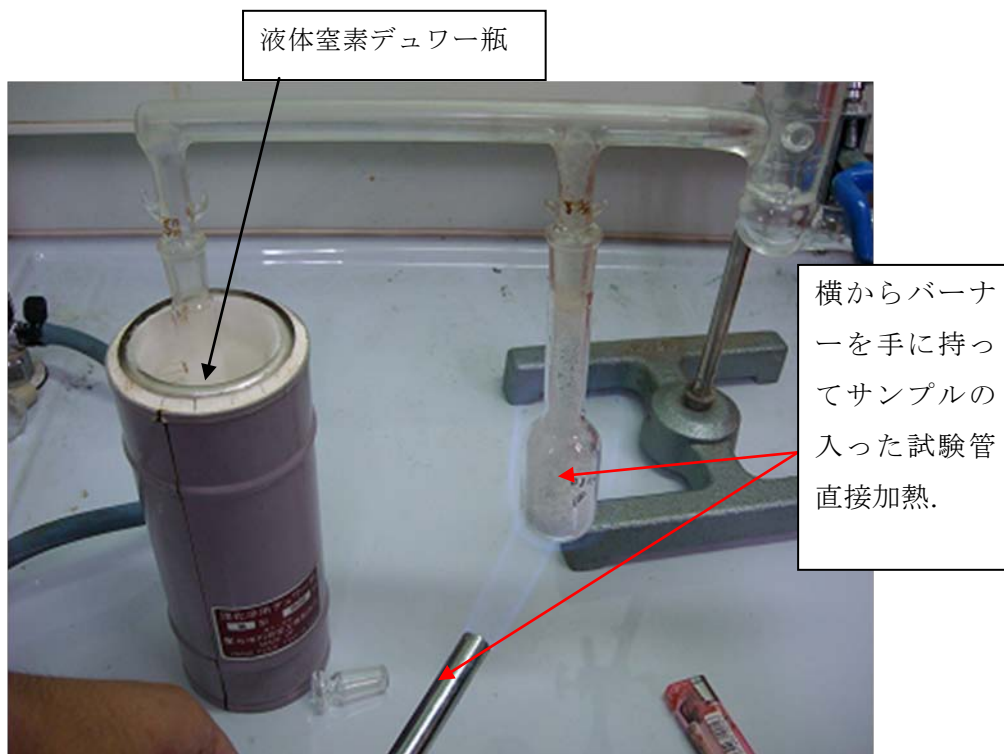


図 14 水蒸気サンプルの加熱作業. ななめから見た図



図 15 遠心分離写真. 土壌を円筒に詰めた. また円筒と土壌の全質量が二つのサンプルで同じになるように調節し, 計量した. 遠心分離機の中の様子.

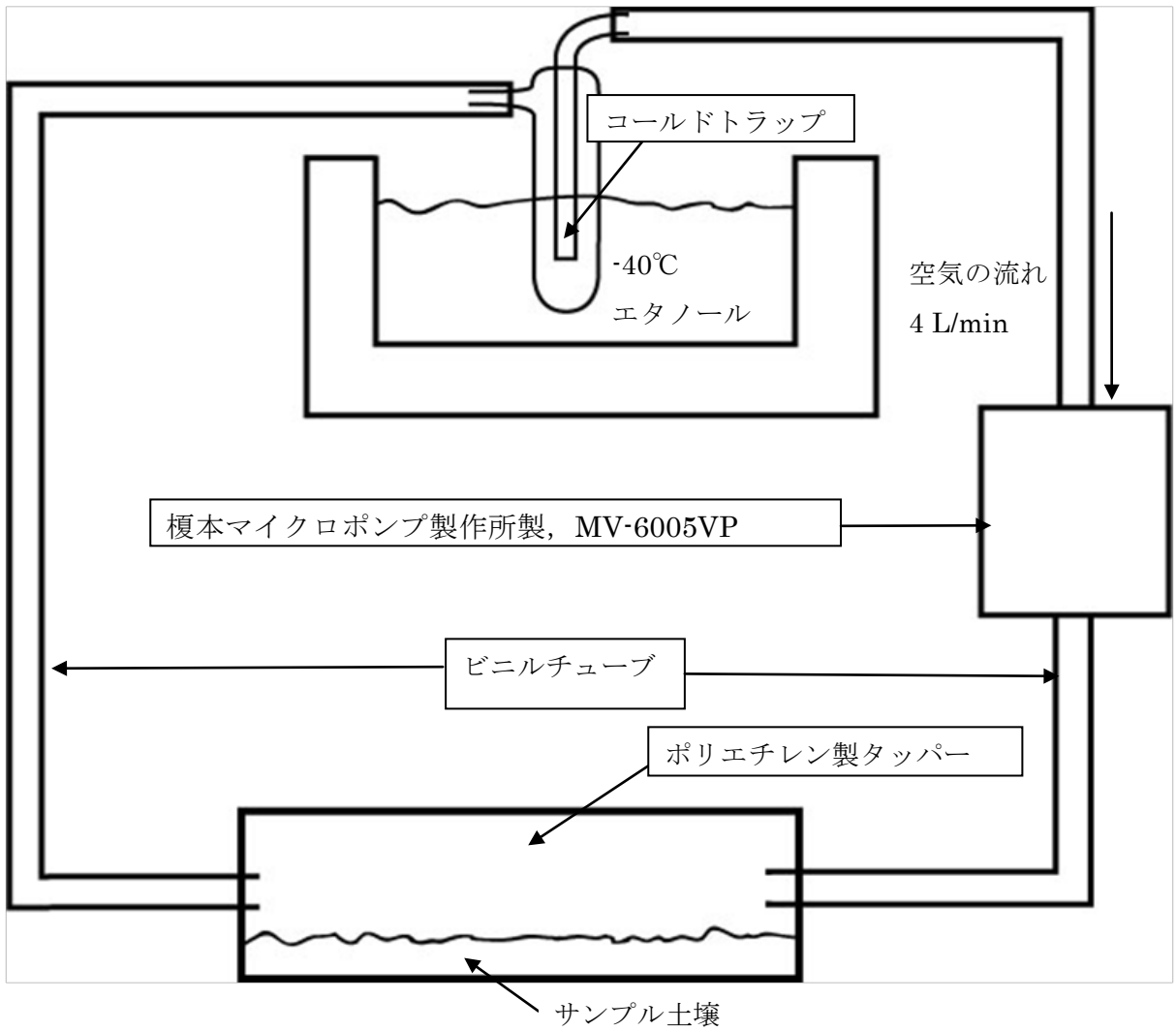


図 16 常温蒸留装置

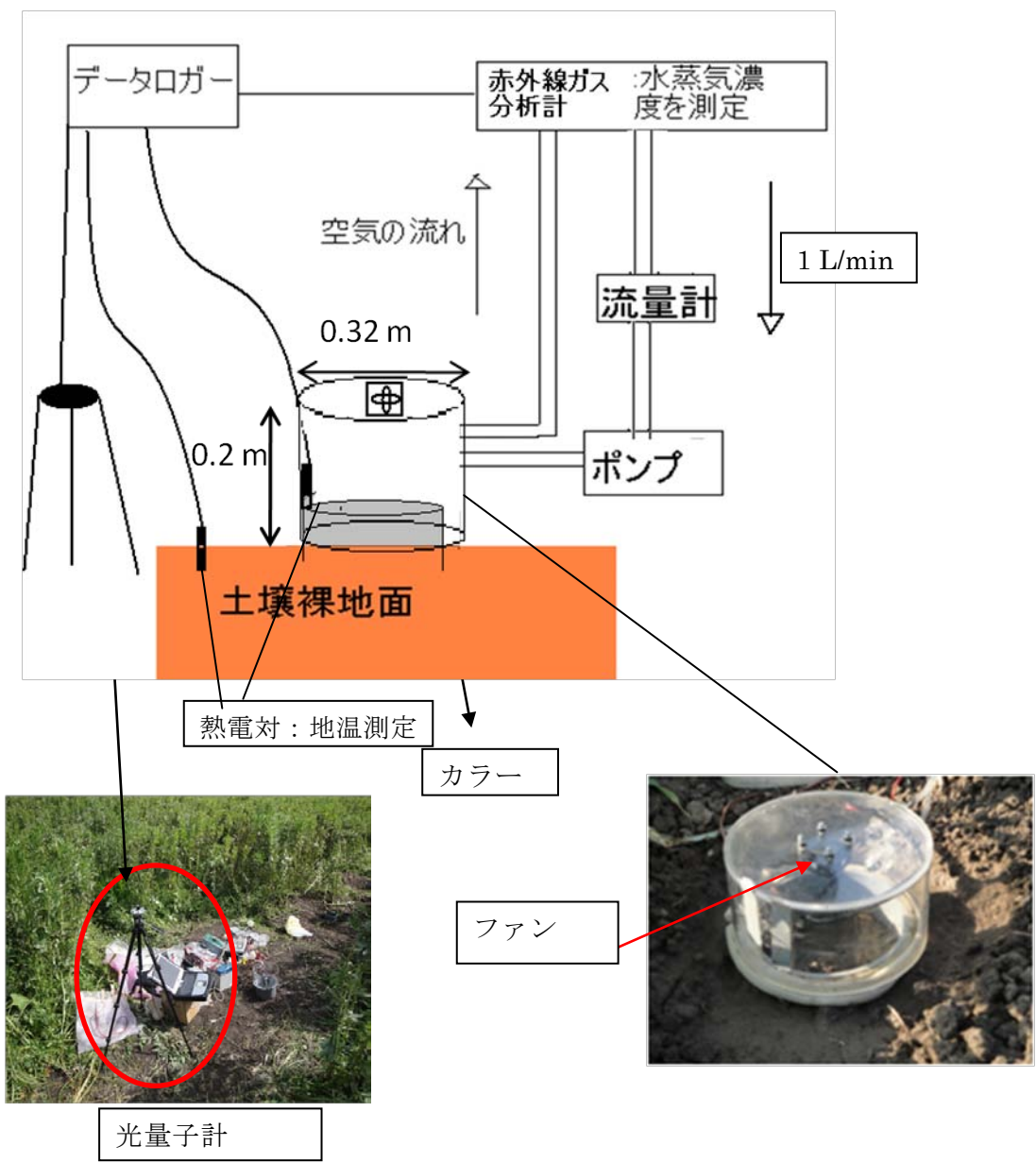


図 17 チャンバー法概要

表 3 土壌採取個数

		採取高度 (cm)					
		24~0 畝の上	0~(-10) 畝間	(-10)~(-20)	(-20)~(-30)	(-30)~(-40)	(-70)~(-80)
場所	年/月/日	個数					
Zankalon	2010/8/3	1	1	1	1	1	1
Zankalon	8/4	1	1	0	0	0	0
Zankalon	8/5	1	1	0	0	0	0
		点滴周辺	点滴以外				
Sakha S	8/7	1	1	1	1	1	1
Sakha S	8/8	1	1	0	0	0	0
		25~0 畝の上	0~(-10) 畝間				
Sakha N	8/9	1	1	1	1	1	1
Sakha N	8/10	1	1	0	0	0	0

1: サンプル管 1 個またはサンプル瓶で 1 個土壌採取.

0: 採取なし.

表 4 植物サンプル概要

場所	年/月/日	草丈	採取した個所	個数
Zankalon	2010/8/5	2 m	根から 0.2 m と根から 0.5 m	1 個ずつ
Sakha S	8/8	1.10 m	根から 0.15 m と根から 0.3 m	1 個ずつ
Sakha N	8/10	1.30 m	根から 0.2 m と根から 0.3 m	1 個ずつ

表 5 チャンバー法観測回数

場所	年/月/日	観測 (セット回数)*
Zankalon	2010/8/3	2
Zankalon	8/4	5
Zankalon	8/5	5
Sakha S	8/7	5
Sakha S	8/8	6
Sakha N	8/9	6
Sakha N	8/10	5

*1 セット：5 個のカラーの観測, 1 個のカラーで 5 回の観測を行っているので, 1 セット $5 \times 5 = 25$ 回観測を行った.

第3章 結果と考察

3-1 安定同位体比

3-1-1 Keeling plot analysis の概要

任意の地点における大気を構成する水蒸気の起源として主に、土壌面蒸発で生じる水蒸気、蒸散で生じる水蒸気、そして自由大気の水蒸気の3つが考えられる。ここで、蒸発と蒸散を一緒にした蒸発散水と自由大気中水蒸気の2つの混合を考えると、その過程は以下の式で表される (Moreira, 1997)。

$$\delta_V = [Q_{atm} (\delta_{atm} - \delta_{ET})] \left(\frac{1}{Q} \right) + \delta_{ET} \quad (2)$$

δ_V は各高度の水蒸気の安定同位体比、 Q_{atm} は大気水蒸気の絶対湿度、 δ_{atm} はバックグラウンド大気の安定同位体比、 $\frac{1}{Q}$ は各高度における絶対湿度の逆数、 δ_{ET} は蒸発散により生じている水蒸気の安定同位体比である。

この方法は、Keeling (1961) が植物および土壌呼吸によって大気に放出される二酸化炭素の同位体組成を把握するために提案した手法を水蒸気に適用させたもので、任意の地点における水蒸気がバックグラウンドとなる大気の水蒸気と、蒸発散による水蒸気のみから構成されること、そして水蒸気量の変化が上記の2者の混合のみによって生じる、という仮定に基づいている。この仮定のもと、上式に従って地上数高度で採取した水蒸気の安定同位体比を絶対湿度の逆数に対してプロットすると、その回帰直線の切片が蒸発散水の安定同位体比を示す。Moreira et al. (1997) にて示された Keeling plot analysis の概念図を図18に示す。この図において、各サンプルのプロットがライン1上にある場合は土壌面からの蒸発水、ライン2上にある場合は蒸散水が主な水蒸気源であることを示す。また、ライン1と2の間にあたる3の領域にプロットされる場合は蒸発と蒸散の両方が寄与していることを示す。

ところで山中 (2009) によると、Keelingプロット法は質量保存則を基礎として導くことができるが、全く別の方法で導出することができる。水蒸気フラックスの同位体比 (δ_F) は、通常の水分子の質量フラックス (F) に対する重い同位体分子 (F^i) の質量フラックスの比として定義される。

$$\delta_F = j^{-1} \frac{F^i}{F} \quad (3)$$

ここで、 j は通常の水の質量数と重い同位体の質量数の比 (HDOについて19/18,

H_2^{18}O については20/18) であり, 上付き添え字*i*は同位体に関する値であることを示す. 接地層内の水蒸気フラックスは (分子拡散の影響が及ぶ粘性底層や粗度層下部を除けば) flux-gradient relation (Garatt, 1992 など) によって次式のように表せる.

$$F = \frac{ku_*\rho (q_1 - q_2)}{\ln \frac{z_2 - d}{z_1 - d} - \Psi_q} \quad (4)$$

ここで*K*は乱流拡散係数, *z*は高度である. 同様に同位体フラックスは次式で表現される.

$$F' = \frac{ku_*\rho (q_1' - q_2')}{\ln \frac{Z_2 - d}{Z_1 - d} - \Psi_q} \quad (5)$$

ここで (5)/(4)を行うと,

$$F / F' = \frac{q_1 - q_2}{q_1' - q_2'} = \frac{j^{-1}}{\delta_F} \quad (6)$$

ここで *j* は通常の水の質量数と重い同位体比の質量数の比であり, $\text{HDO}=19/18$, $\text{H}_{218}\text{O}=20/18$ である. δ_F は水蒸気同位体比である. ここで

$$R = \frac{[D]}{[H]_{\text{H}_2\text{O}}}, \frac{[^{18}\text{O}]}{[^{16}\text{O}]_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (7)$$

$$\delta = \left[\frac{R}{R_{std}} - 1 \right] \times 10^3 \quad (8)$$

(8)を用いると,

$$\frac{q_1 - q_2}{q_1' - q_2'} = \frac{1}{j} \frac{1}{\left(\frac{\delta_F}{10^3} + 1 \right) R_{std}} \quad (9)$$

よって水蒸気フラックスの同位体比は次式で与えられる.

$$\delta_F = j^{-1} \frac{dQ^i}{dQ} \quad (10)$$

式中の微分を二高度での差分に置き換えると

$$\delta_F = \frac{Q_2 \delta_2 - Q_1 \delta_1}{Q_2 - Q_1} \quad (11)$$

下付き添え字2と1を比べ、2の方が高度上位であることを表す. この式は δ_F が、Keeling plot上の点 ($1/Q_2, \delta_2$)ともう一点 ($1/Q_1, \delta_1$) を通る直線の切片を表す式に等しい (連立方程式から切片を求める). つまり図18 上に置いて回帰直線の切片は地表面からの水蒸気フラックスの δ 値と同値である. またflux gradient relationが成立するためには十分なフェッチが必要であり、その目安は測定高度の数十倍から100倍程度である (杉田, 1996). 本研究においては測定高度5.8 mに対して、最低圃場に60 mの幅が必要であるが、図4・図6を見てもわかるようにその条件は満たしている.

土壌面蒸発により生成される水蒸気の安定同位体比には、大気中の水蒸気の安定同位体比、相対湿度、平衡分別係数、非平衡分別係数が影響する. これに伴う同位体分別は、以下の式で示される (Moreira et al. 1997).

$$\delta_E = \left(\frac{1}{\alpha_k} \right) \left[(\delta_S / \alpha^* - \delta_a h) / (1 - h) \right] \quad (12)$$

δ_E は土壌面蒸発の同位体比、 δ_a は採取した0.5 mにおける水蒸気の同位体比、 h は採取した0.5 mにおける相対湿度 (%) δ_S は本研究においてはZankalon Sakha Nにおいて畝の上と下各々サンプルを採取しているので、その値を以下の加重平均計算式にあてはめ算出した.

$$\delta_S = 1/2(\overline{E_1} \delta_{s1} + \overline{E_2} \delta_{s2}) \quad (13)$$

δ_{s1} は畝の上で採取したサンプル (0~1 cm) で δ_{s2} は畝の下で採取したサンプル (0~1 cm)である. $\overline{E_1}$ は畝の上の蒸発速度 (mm/h), $\overline{E_2}$ は畝の下の蒸発速度 (mm/h)である. 一方 Sakha Sにおいては図8の平面図から、点滴灌漑周辺と点滴灌漑以外の場所を分

けて加重平均計算式にあてはめ算出した。

$$\delta s = \frac{a_2}{a_1} \overline{E_1} d_1 \delta d_1 + \left(1 - \frac{a_2}{a_1}\right) \overline{E_2} d_2 \delta d_2 \quad (14)$$

a_1 は 0.9×0.4 (点滴灌漑の4つの穴を囲った部分の面積) m^2 , a_2 は 0.11×0.11 (点滴灌漑周辺的面積) m^2 , δd_1 は点滴灌漑で湿った場所で採取したサンプル (0~1 cm), δd_2 は点滴灌漑で湿っていない場所で採取したサンプル (0~1 cm), $\overline{E}d_1$ は点滴灌漑の蒸発速度 (mm/h), $\overline{E}d_2$ は点滴灌漑以外の蒸発速度 (mm/h) である。

a_k と a^* はそれぞれ、境界層内における動的分別係数と平衡分別係数をあらわす。Majoube (1971)によれば、酸素安定同位体についての平衡分別に関する a^* は次式によって表される。

$$\ln a^* = 1.137 \times 10^3 / T^2 - 0.4156 / T - 2.0667 \times 10^{-3} \quad (15)$$

ここで T は温度 (K)である。 a^* は深度0~20 cmにおける地温から求めた値を用いた。また、 a^k には、水素について1.017, 酸素について1.0189という値を用いた。この値は Kays and Crawford (1980)と Marliat (1978)による計算法、および測定値から計算された値である(Flanagan et al. 1991)。

これらの値から、蒸発散に占める蒸散の割合を Yakir and daSternberg (2000) に示された以下の式を用いて求めた。ここで、蒸散比率はある一日の蒸発散に占める蒸散の割合、 δ_{ET} は蒸発散水の安定同位体比、 δ_T は蒸散水の安定同位体比、そして δ_E は蒸発水の安定同位体比をあらわす。

$$\text{蒸散比率} = 100 \times (\delta_{ET} - \delta_E) / (\delta_T - \delta_E) \quad (16)$$

δ_{ET} は keeling plot で算出した同位体比、 δ_E は土壌面蒸発の同位体比、 δ_T は蒸散の同位体比(植物サンプルの同位体比、根の深さまでの同位体比、根長密度を基に加重平均を行った同位体比)

3-1-2 常温蒸留補正值計算

安定同位体比を測定するうえで、土壌水をまず遠心分離をかけて、抽出を行うのであるが、乾燥度が進み遠心分離できなかった水を抽出するのに常温蒸留を行った。表6はその結果である。なお r : 液状水残存率は式 (13)で表した。

$$1 - r = \frac{x}{x + y} \quad (17)$$

ここで x は常温蒸留でトラップした水の質量 (g), y は常温蒸留でトラップできなかった水の質量 (g) である. y は常温蒸留を行った直後の土壌を 100°C のオーブンで 24 時間乾燥させた後の前後の差を計量することにより求めた.

3-1-3 真空蒸留同位体比・遠心分離同位体比・デルタダイアグラム

表 7 に遠心分離で水を抽出した土壌水, 表 8 に真空蒸留で抽出した水蒸気と同位体比, 表 9 に真空蒸留で抽出した植物の同位体比, 表 10 に灌漑水・地下水のデータをまとめた. また図 19・図 20・図 21 において各圃場のデルタダイアグラムをまとめた.

デルタダイアグラムを見ると, 3 圃場ともに土壌水は蒸発の影響を非常に受けている事がわかった. また植物の同位体比は茎の部位の上の部分が同位体比が高くなった.

3-1-4 土壌水同位体鉛直プロファイル

図 22・図 23・図 24 に土壌水同位体比の鉛直プロファイルを示した. また比較するためにとらもろこしの根長密度と土壌水分量を示した. この図からまず Zankalon, SakhaS, SakhaN 3 ヶ所ともに土壌水同位体比は表面に行けば行くほど蒸発の影響から高くなっている. また深度が深くなればなるほど同位体比は一定に近づいていくということがわかった. また植物の同位体比は土壌水の同位体と全く一致しないことがわかった. 植物の同位体比は土壌水よりむしろ灌漑水や地下水の水に近い値を示した. これにより同位体データから, 観測期間中に植物は土壌水を吸水していないという結論に至った.

3-1-5 Keeling plot analysis の結果と検証

図 25～図 29 まで Keeling plot analysis の結果を示した, トレーサーは誤差の少ない $\delta_{18}\text{O}$ を用いた. 絶対湿度は観測時間の中間値を採用した. この結果から δ_{ET} を推定した. これを基に一日の蒸発散に占める蒸散比率 (T/ET) 表 11 にまとめた. 表 11 の T/ET を見てみると, 土壌水を δ_T とおいた場合と植物を δ_T とおいた場合に比べ, 植物の蒸散比率のほうが大きくなる傾向となることがわかった. 両者を比較し, どちらが真値か検討した時, 例えば福田 (2010) では蒸散比率は 70% と定義していたが, 本研究の場合, 植物を δ_T として用いた場合, その比率に近い傾向となった. また Williams (2004) では灌漑圃場におけるオリーブ畑において Keeling plot analysis を用いて, 蒸散比率を推定したが, 69-100% という結論となった. また土壌鉛直プロファイルからこの植物は観測期間中, 土壌から吸水していないのではないかと, 仮説があったので, 植物を δ_T として用いた場合のほうがより真値に近いのではないかと結論に

いたった。

3-2 チャンバー法

3-2-1 水蒸気濃度から蒸発量へ換算

チャンバー法により算出される値は水蒸気濃度 (ppt) であるのでそれを蒸発量 (mm/h) に変換しなければならない。その変換には Sato (2010) や浦野 (2005) を参考に以下の式を用いて行った。

$$E = \Delta E \times \frac{v}{a} \times \frac{PM}{RT} \times \frac{1}{\rho_w} \times 60 \times 60 \quad (18)$$

E は蒸発量 (mm/h)である、 ΔE は水蒸気濃度の 1 秒毎の変化率 (ppt/s) である。 v はチャンバーの体積 (m^3)、 a はチャンバーの底面積 (m^2)、 ρ_w は大気圧 (atm)、 M は水のモル質量 18 (g/mol)、 T は気温(K)、 R は気体定数 8.31×10^{-2} (atm · $\text{m}^3/\text{mol} \cdot \text{K}$)、 ρ_w は水の密度 1000 (g/m^3) である。気温は本来ならチャンバー内の気温を熱電対に観測しなければならなかったのだが、今回観測することができなかつたので、チャンバー内の地温を用いた。また気圧も観測することができなかつたので、AWS の気圧値を用いた。

3-2-2 ΔE の算出

ΔE は様々なグラフやチャンバーの大きさや水蒸気濃度が飽和するまでの時間を考えて、図 30 のように観測開始時間から 10 秒間の水蒸気濃度データの回帰線の傾きを用いた。しかし、図 31 のように 0 秒から傾きが上昇しないものや、図 32 のように 10 秒前に水蒸気濃度が飽和してしまうものもある、そこで決定方法を以下のように定めた。

- ① まず傾きの上昇が始まる点を始点とおいてそこから 10 秒間の回帰線の傾きを算出した。
- ② ①で決定した回帰線の決定係数が 10 秒間で 0.985 以下のものは、秒数を 10 秒から順番に 5 秒まで減らしていき、そのとき自由度調整付き変数 (R^2): (15) が 0.985 以上になったらその値を採用する。

$$R^2 = \left(R^2 - \frac{k}{n-1} \right) \left(\frac{n-1}{n-k-1} \right) \quad (19)$$

ここで R^2 は回帰線の決定係数である。また k は説明変数であり、この場合 1 である。 n はサンプル数であり、この場合 10~5 秒である。

- ③ 5 秒まで減らしても、 R^2 が 0.985 以上にならないものは、10~5 秒で一番大きいものを採用した (図 32)。

3-2-3 チャンバー法結果

以上の解析から蒸発量 (mm/h)を算出した, それとともに Zankalon では 3 m と 1 m の AWS のボーエン比を利用し, ボーエン比法 (杉田・田中, 2009; 近藤, 2000 など) で蒸発散量 (mm/h)を算出した. SakhaS と SakhaN では渦相関法 (杉田・田中, 2009) で蒸発散量 (mm/h) を算出した. 図 33・図 34・図 35・図 36・図 37・図 38 ではそれらの結果の生データを示した.

3-2-4 蒸散比率算出, PAR・飽差・風速との比較

チャンバー法で算出した蒸発量を表 5 の 1 セット毎の時間と蒸発量のメディアンを取り, その値を畝間灌漑には (9) 式を利用し, 点滴灌漑には (10) 式を利用し, それぞれ加重平均することによって, 地面蒸発量を求めた, その一日分の地面蒸発量を全て加え, 1 セット毎の時間のメディアンにおける蒸発散量 (ET) を全て加えたものから減じたのが蒸散量 (T) である. この一日の T/ET が蒸散比率となる. 図 39・図 40・図 33・図 35・図 37・図 39・図 41・図 43 にチャンバー法で測定した地面蒸発量と蒸発散量をそれぞれ示した. また表 12 にチャンバー法の蒸散比率のまとめを示した. これに土平 (私信, 2011) による LAI と被度のデータも示した. 図 34・図 36・図 38・図 40・図 42・図 44 に測定した PAR (光合成有効放射量) との比較を行った. 全ての場合で PAR が上昇すれば, 蒸散量と地面蒸発量が上昇することがわかった. また大気の乾燥度を示す飽差との比較も示した. 近藤 (2000) によると飽差が 30 hPa 以上になる時, 植物は過剰な蒸散を防ぐために気孔を閉じてしまうことがあるが, 本研究においてはまず図 36 において飽差が 30 hPa がこのとき蒸散が少なくなった. また図 44 において飽差が 30 hPa に近い値を示した時, 飽差が少なくなった. また風速との比較も示したが特徴は見られなかった.

3-2-5 土壌水分量

土壌水分の分布を図 46・図 47・図 48 に示した, Zankalon では地中深くなるにつれて土壌水分が少なくなり, SakhaS では点滴灌漑の影響下で土壌水分が多くなり, SakhaN ではほぼ全体的に一定であった.

3-2-6 有意性の解析

図 46 を見ても明らかなようにマルチを施した場所と施していない場所の平均値が見た目では全く差が見られず土壌水分量にも差が見られなかったので, t 検定と F 検定を行い, 統計学的に有意な差があるか検証した. その方法は帰無仮説というマルチを施した場所と施していない場所の平均値に有意な差がないという仮説を立て, t 検定で信頼区間を算出した. この結果 8/4・8/5 とともに確率 95%以内に信頼区間があり, 帰無仮説を否定できないことから, 平均値に有意な差はないことがわかった. この原因とし

て図 45 にあるように土壌水分が少なくなり土壌の乾燥が進み、蒸発する水が少なくなり差を感知できなくなったのではないかと考えられる。

3-3 蒸散比率の比較

表 13 にチャンバーの蒸散比率と同位体比による同位体比を比較し、まとめた。これを見ると、チャンバー法に比べ、安定同位体比の方が特に植物を δ_T と取った方が、全体的に蒸散比率が大きくなる傾向がある。この原因として考えられるのがチャンバー法の一日の観測回数 5 セットのうち 1 回でも地面蒸発の大きい時に観測を行った場合、その値は安定同位体比の測定よりも一日の合計地面蒸発量に大きく影響してしまうからである。チャンバー法で蒸発散量と同じ時間の測定を行えば、より真値に近づくと考えられる。また圃場の土壌水分量にばらつきがあった場合、その値を大きく評価してしまう可能性もある。

3-4 蒸発抑制効果の検証

点滴灌漑とマルチの蒸発抑制効果を検証するために、そのまま地面蒸発の値を比較するのでは正しく議論することができない。なぜなら植生の成長度などが異なるからである。そこで LAI の値を全て等しく補正してから議論することにした。そのために LAI の値のみから蒸発比率 (E/ET) が検証できる、(20) を Merta (2006) から適用した。そのモデルは

$$\frac{E}{ET} = 0.19 \times LAI^{-0.9} \quad (20)$$

この LAI に各圃場で算出された、LAI の値を代入すれば蒸発比率が推定できる。これに

$$\text{補正值} = E \times \frac{A_1}{A_2} \quad (21)$$

E は補正する前の蒸発量、 A_1 は (15) 式で示した、SakhaN の蒸発比率、 A_2 は (15) 式で示したそれぞれの Sakha S、Sakha N の蒸発比率である。その結果を表 14 に示した。

表 14 の地面蒸発量の補正值を見ると、Zankalon と SakhaN、SakhaS と SakhaN を比べると、Zankalon と SakhaS の方が高く、蒸発抑制効果が表れていないことが分かる。この原因は土壌の乾燥にあると考え、まず表面土壌の土壌水分量をみたところ、土壌水分量は 20% 以下と低く、土壌は乾燥しているということがわかった。また土壌の乾燥度を示すもう一つの指標として、土壌が乾燥すれば植物が吸水しなくなるため蒸散が少なくなることから、蒸散比率に注目したところ、特に SakhaS では蒸散比は

低く，土壤の乾燥が進んでいるものと考えられる．

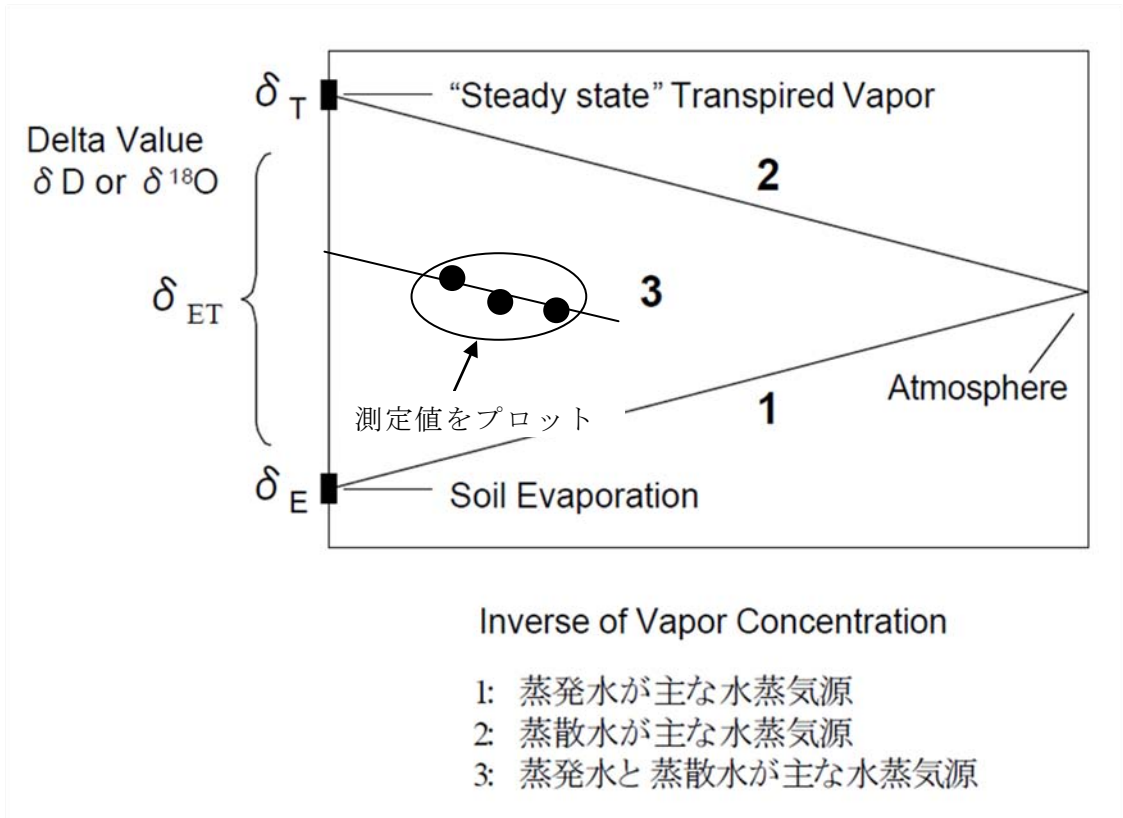


図 18 Keeling plot analysis 概念図

表 6 常溫蒸留補正結果

Sample name	$\delta_{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	r	1-r	$\delta_{18}\text{O}$ 補正值 (‰)	δD 補正值 (‰)
A-1	-3.09	-14.98	0.33	0.67	8.98	65.59
A-2	0.52	2.69	0.87	0.13	4.25	29.69
A-3	0.11	0.42	0.86	0.14	4.02	28.62
A-4	0.19	0.70	0.86	0.14	4.21	29.63
A-5	-0.07	0.23	0.86	0.14	3.83	28.21
A-6	0.70	0.59	0.83	0.17	5.01	32.18
A-7	2.10	5.68	0.79	0.21	6.77	40.93
A-8	3.80	9.44	0.83	0.17	7.67	40.27
B-1	2.45	0.83	0.81	0.19	6.74	34.62
B-2	4.27	13.63	0.91	0.09	6.86	34.02
B-3	3.76	3.32	0.86	0.14	7.12	30.74
B-4	-1.13	-23.41	0.36	0.64	9.40	60.80
B-5	3.15	0.26	0.86	0.14	6.62	28.33
B-6	5.99	6.11	0.91	0.09	8.42	27.15
B-7	-4.51	-27.89	0.32	0.68	8.58	61.76
B-8	-3.10	-26.73	0.33	0.67	8.98	61.72
B-9	-0.40	2.47	0.92	0.08	2.26	21.48
B-10	-0.52	-9.11	0.68	0.32	6.25	40.64
C-1	1.15	-0.66	0.82	0.18	5.53	32.26
C-2	2.37	4.70	0.88	0.12	5.70	30.21
C-3	-2.63	-20.54	0.42	0.58	8.19	56.98
C-4	1.64	-1.10	0.85	0.15	5.45	28.15
C-5	-7.16	-48.11	0.28	0.72	8.40	59.90
C-6	-1.96	-15.25	0.78	0.22	3.69	25.35
C-7	1.07	-11.47	0.44	0.56	9.54	58.94
C-8	3.64	8.10	0.85	0.15	7.17	36.11

表 7 遠心分離同位体比測定値

Sample name	$\delta_{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)
0803 Zankalon 畝上	7.83	39.94
0803 Zankalon 畝下	7.01	39.72
0805 Zan 畝上	6.19	38.03
0805 0-5 Zan 畝下	6.72	35.14
0808SakhaN 0-10	3.93	24.96
0808SakhaN 10-20	4.59	26.96

表 8 真空蒸留同位体比測定値 (水蒸気)

Sample name 月日-採取場所(1:5.78 m 2: 3 m 3: 1 m 4: 0.5 m)	$\delta_{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)
0803-1	-9.18	-64.49
0803-2	-8.77	-66.30
0803-3	-7.69	-51.84
0804-1	-8.91	-59.30
0804-2	-10.59	-60.00
0804-3	-8.51	-64.74
0804-4	-8.31	-58.50
0804-7	-7.45	-54.65
0804-8	-7.83	-60.43
0805-1	-9.13	-60.74
0805-2	-7.98	-51.81
0805-4	-8.85	-54.15
0805-5	-5.59	-54.89
0807-1	-8.38	-72.76
0807-4	-9.15	-65.75
0808-1	-9.75	-63.89
0808-2	-9.03	-64.44
0808-3	-8.75	-59.49
0809-1	-8.88	-63.16
0809-3	-8.59	-64.69
0810-1	-9.50	-72.72
0810-2	-9.53	-70.26
0810-3	-7.41	-61.27

表 9 真空蒸留同位体比測定値 (植物)

Sample name	$\delta_{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)
Zan-1-maize	2.26	15.02
Zan-2-maize	-2.69	-11.83
SakhaS-1-maize	1.28	15.78
SakhaS-2-maize	-5.60	-23.07
SakhaN-1-maize	3.33	20.49
SakhaN-2-maize	1.40	12.03

○Sample name の 1 と 2 とは植物個体のサンプルを採取した場所を示す. 1 に比べ 2 の方が高い場所で採取した.

表 10 地下水・灌漑水同位体比測定値

Sample name	$\delta_{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)
Zankalon 地下水-1.142m	3.01	25.43
Zankalon 地下水-30 m	-0.01	6.97
Zankalon 地下水星野採水*	-0.63	0.84
Zankalon 灌漑水	2.79	24.68
Sakha 井戸①	3.67	25.94
Sakha 井戸②	4.21	29.46
Sakha 灌漑水	2.92	25.41

*地下水星野採水は約 1 m～3 m 付近

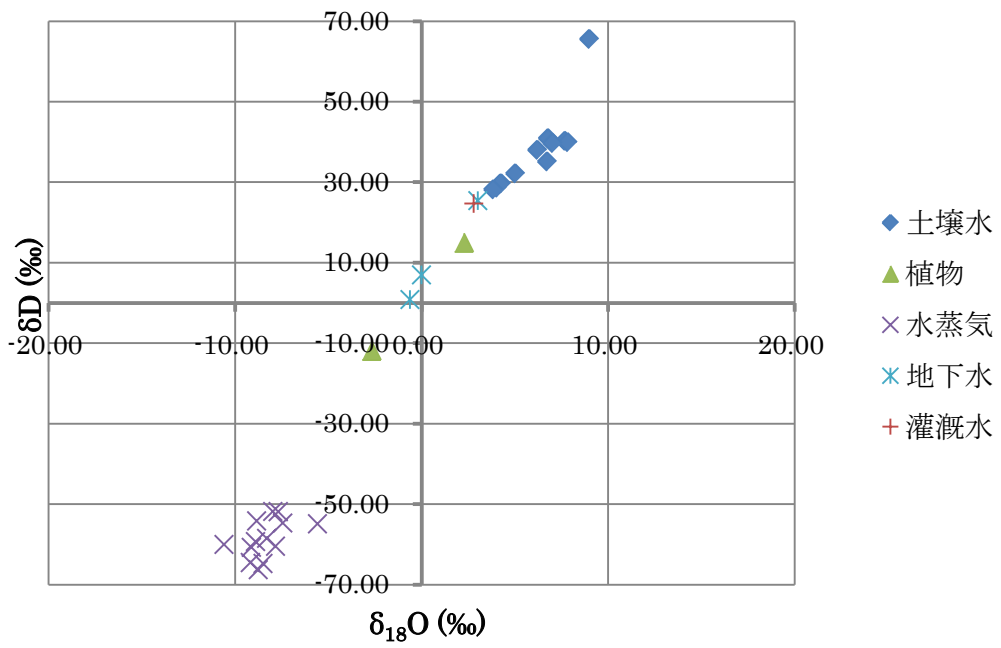


図 19 Zankalon デルタダイアグラム

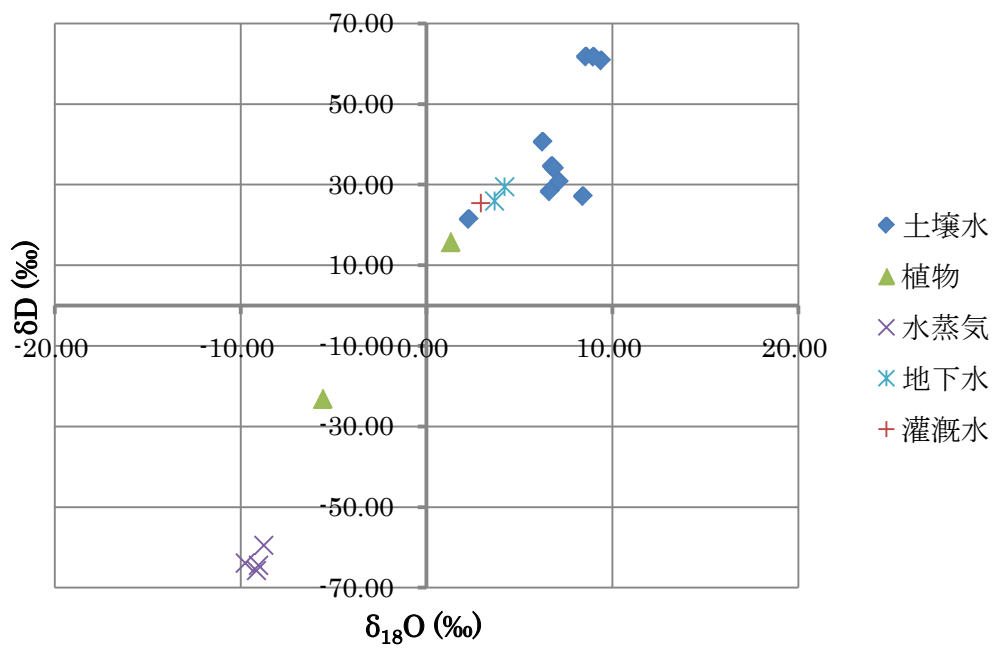


図 20 Sakha S デルタダイアグラム

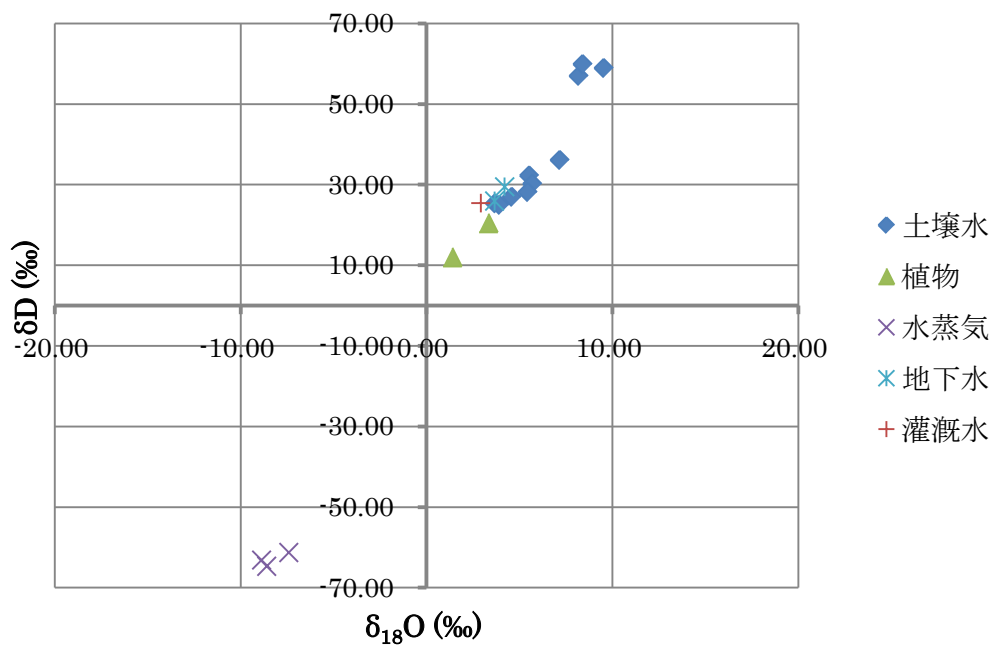


図 21 Sakha N のデルタダイアグラム

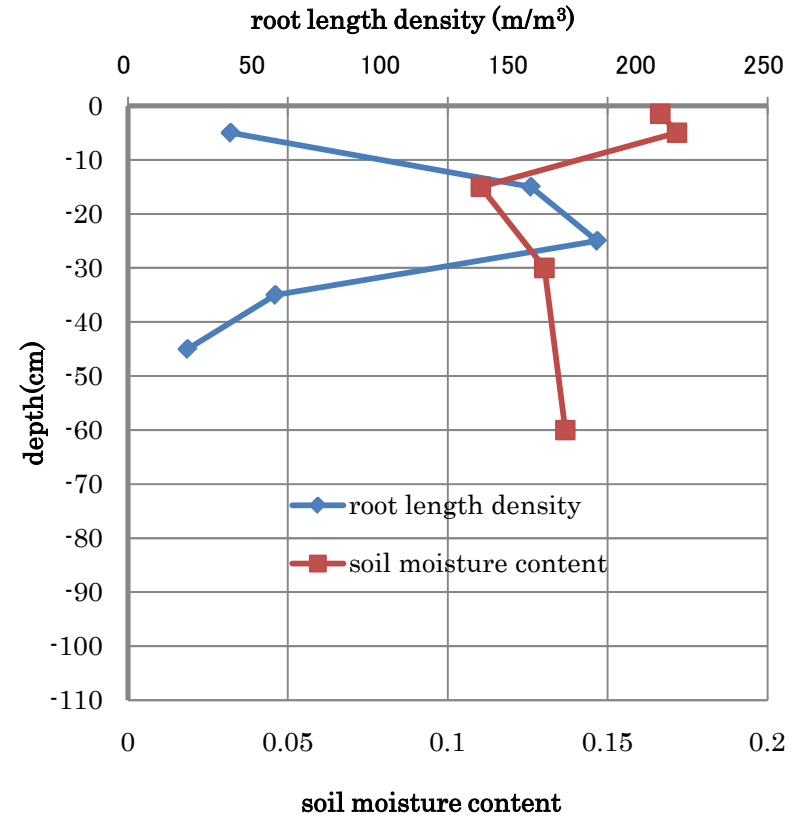
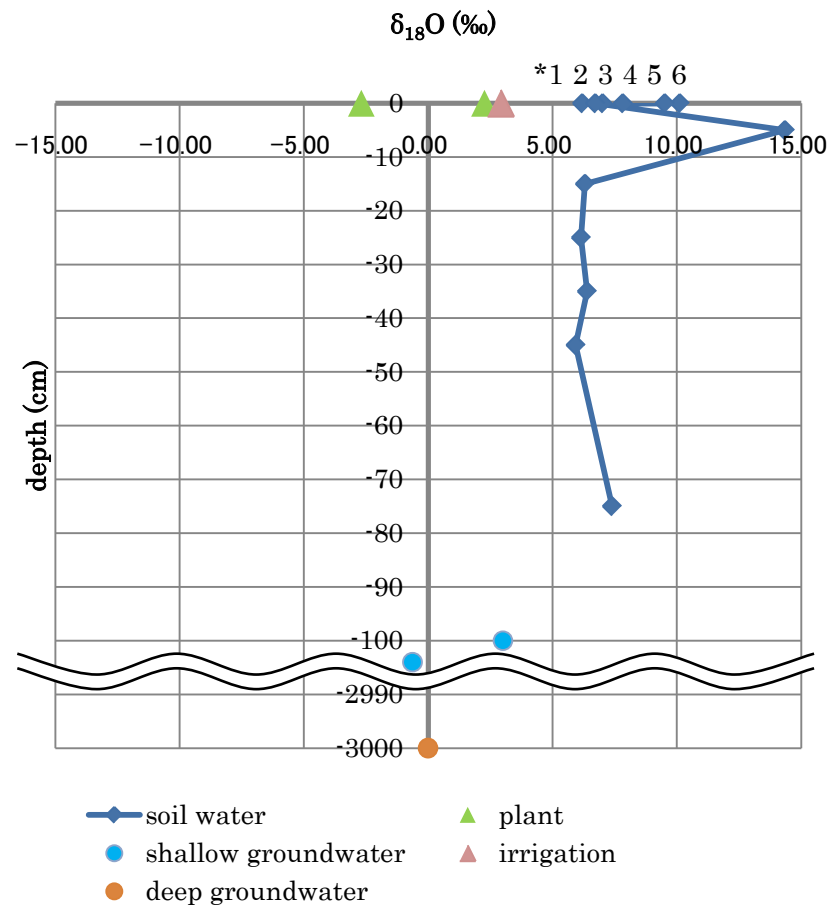


図 22 Zankalon 土壌水・地下水・灌漑水同位体比と深さと土壌水分量と根長密度 (8/3・8/4・8/5). *1 は畝の上+マルチ (8/4), 2 は畝の下 (8/5), 3 は畝の下 (8/3), 4 は畝の上+マルチ(8/5), 5 は畝の下 (8/4), 6 は畝の上+マルチ (8/3) (図 5 参照).いは

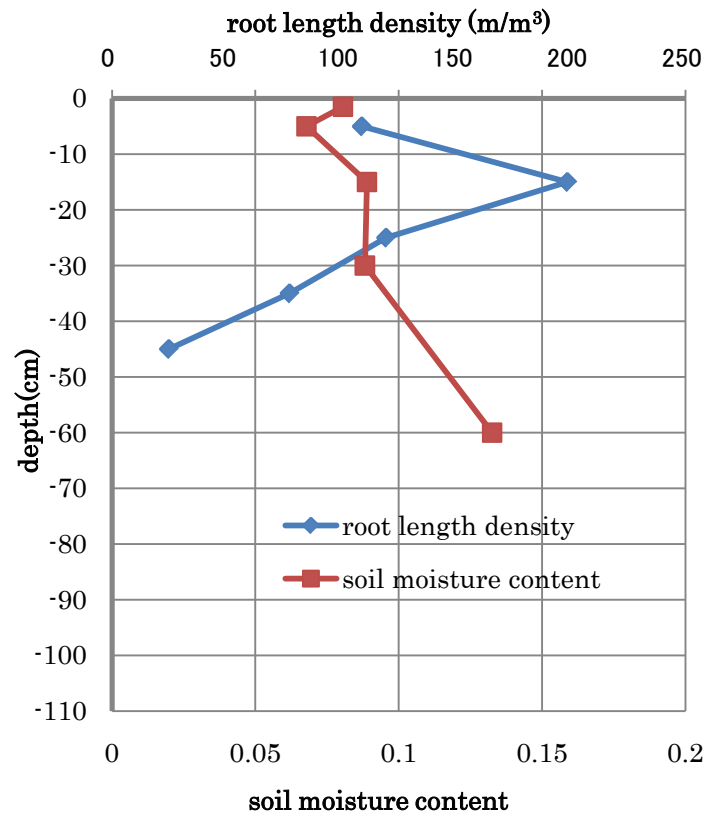
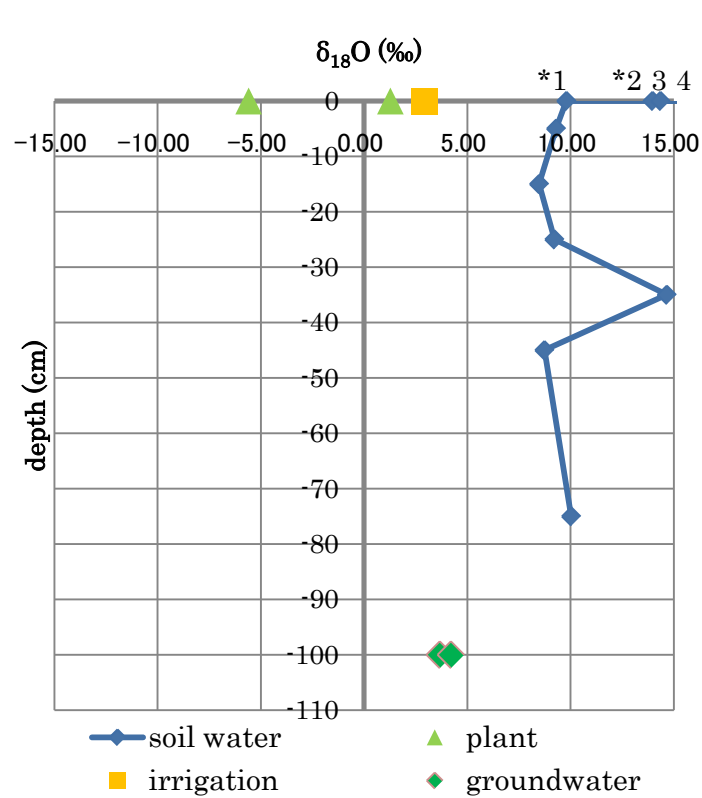


図 23 Sakha S 土壌水・地下水・灌漑水同位体比と土壌水分量と根長密度 (8/7・8/8). *1は 8/7 *点滴灌漑周辺, 2は 8/8 *点滴灌漑以外の場所, 3は 8/7 点滴灌漑以外の場所, 4は 8/8 点滴灌漑周辺. *点滴灌漑周辺とは図 8 で点滴灌漑において湿った場所を指す, 点滴灌漑以外の場所とはそれ以外の表面が乾いた場所を指す. 植物の同位体比は茎の上が大きかった.

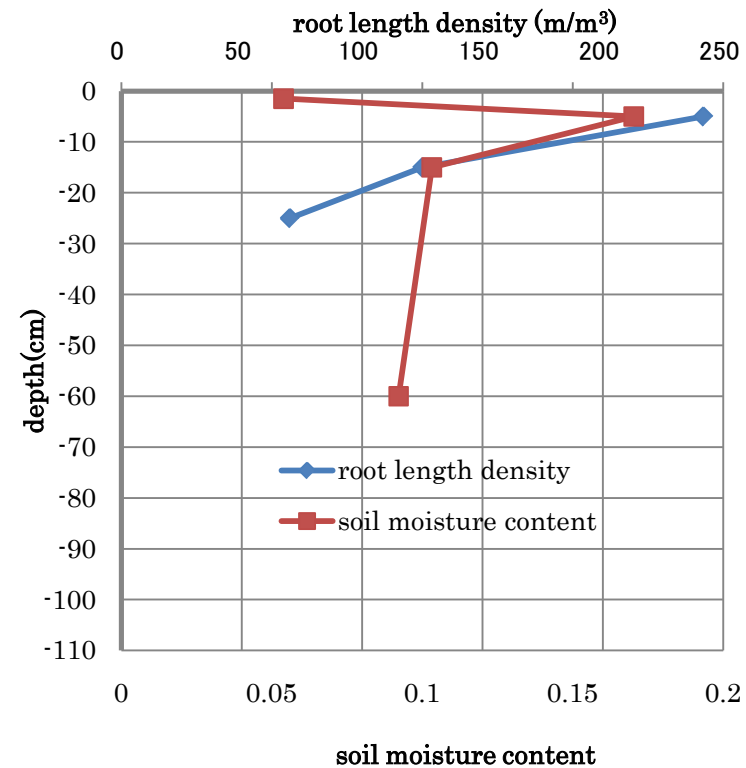
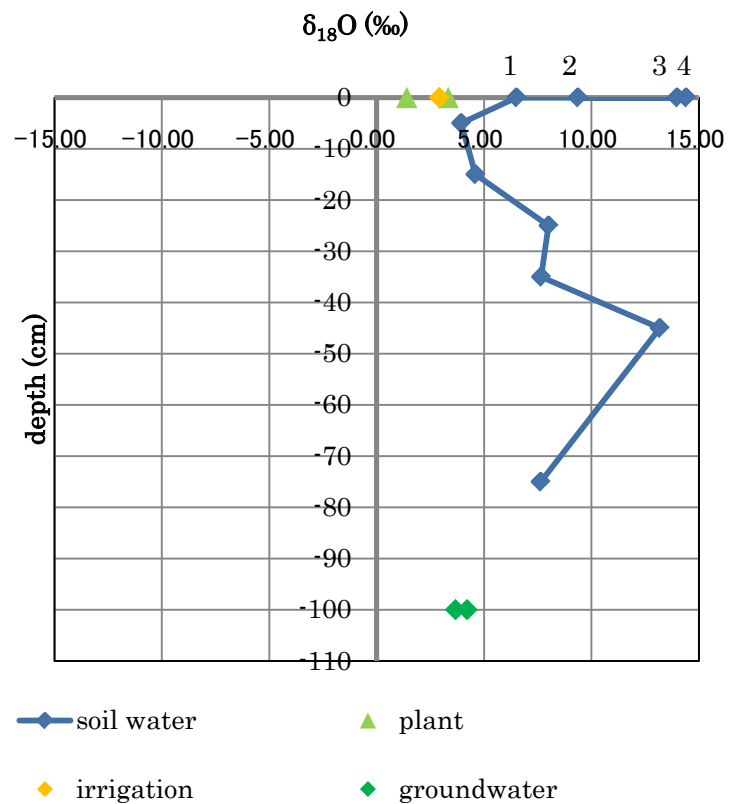


図 24 Sakha N 土壌水・地下水・灌漑水同位体比と土壌水分量と根長密度 (8/9・8/10). 1 は畝の上(8/10), 2 は畝の下(8/9), 3 は畝の上(8/10), 4 は畝の下 (8/9) (図 7). 土壌水分量は 8/9・8/10 にデータが欠損していたので 8/7 のデータを示した. 植物の同位体比は茎の上が大きかった.

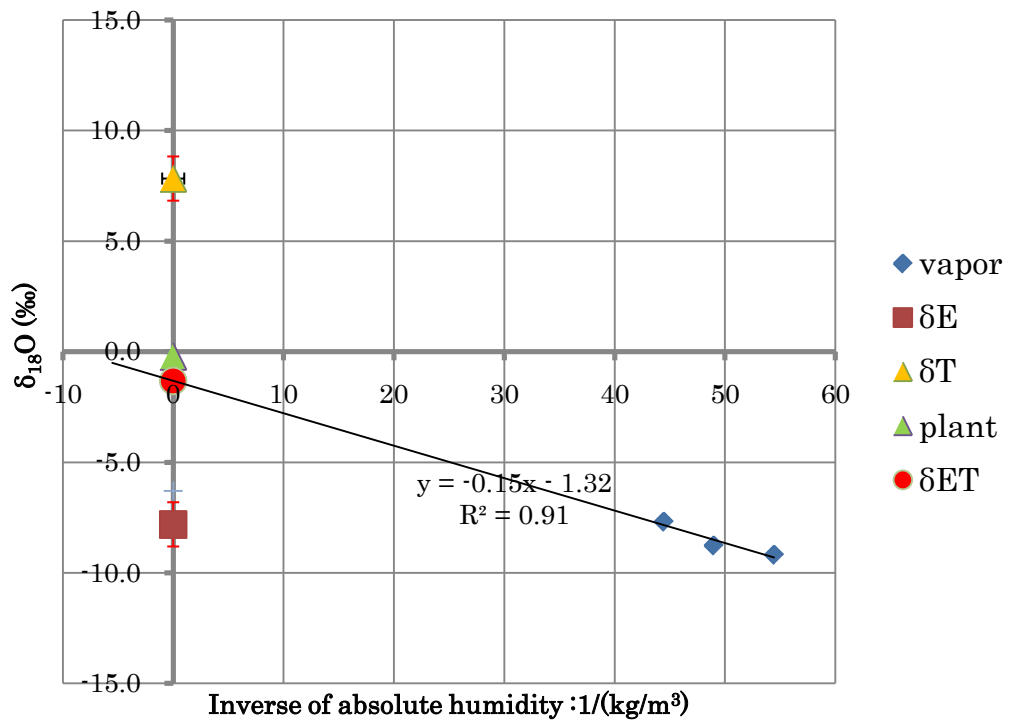


図 25 Keeling plot analysis の結果 (Zankalon 8/3). 観測時刻は 13:10~16:30 で δT は 0~50 cm までの土壌水同位体比

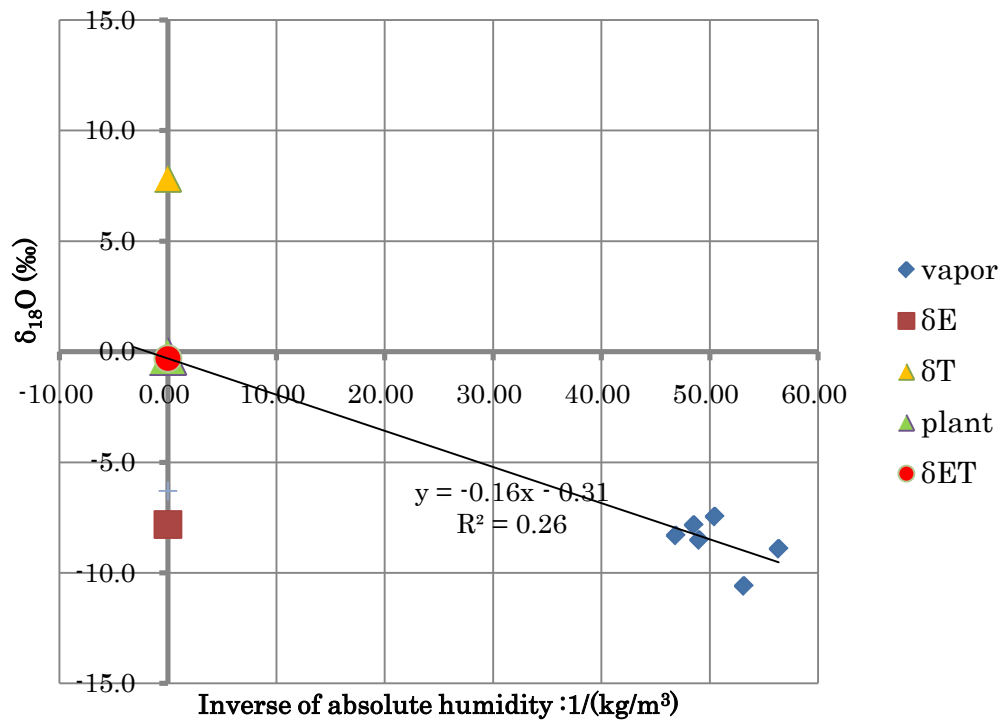


図 26 Keeling plot analysis 結果 (Zankalon 8/4). 観測時刻は 8:45 ~ 12:30 15:30 ~ 19:20 で δT は 0 ~ 50 cm までの土壌水同位体比

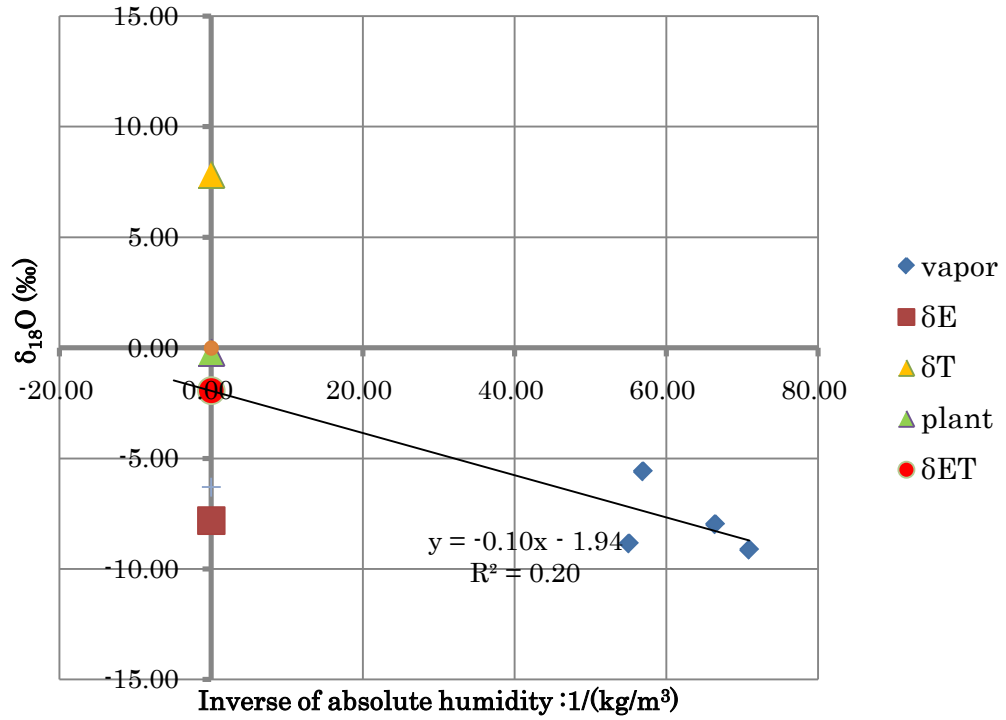


図 27 Keeling plot analysis の結果 (Zankalon 8/5). 観測時刻は 8:45~12:30, 15:30 ~19:20 で δT は 0~50 cm までの土壌水同位体比

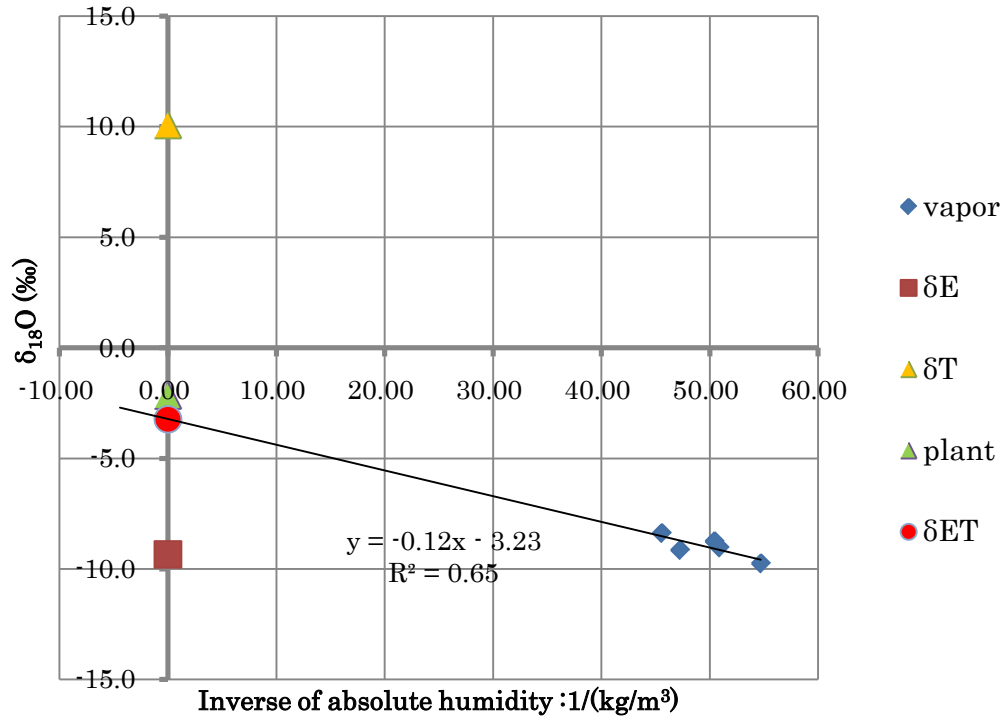


図 28 Keeling plot analysis の結果 (Zankalon 8/5). 観測時刻は 8:45~12:30 15:30~19:20 で δT は 0~50 cm までの土壌水同位体比.

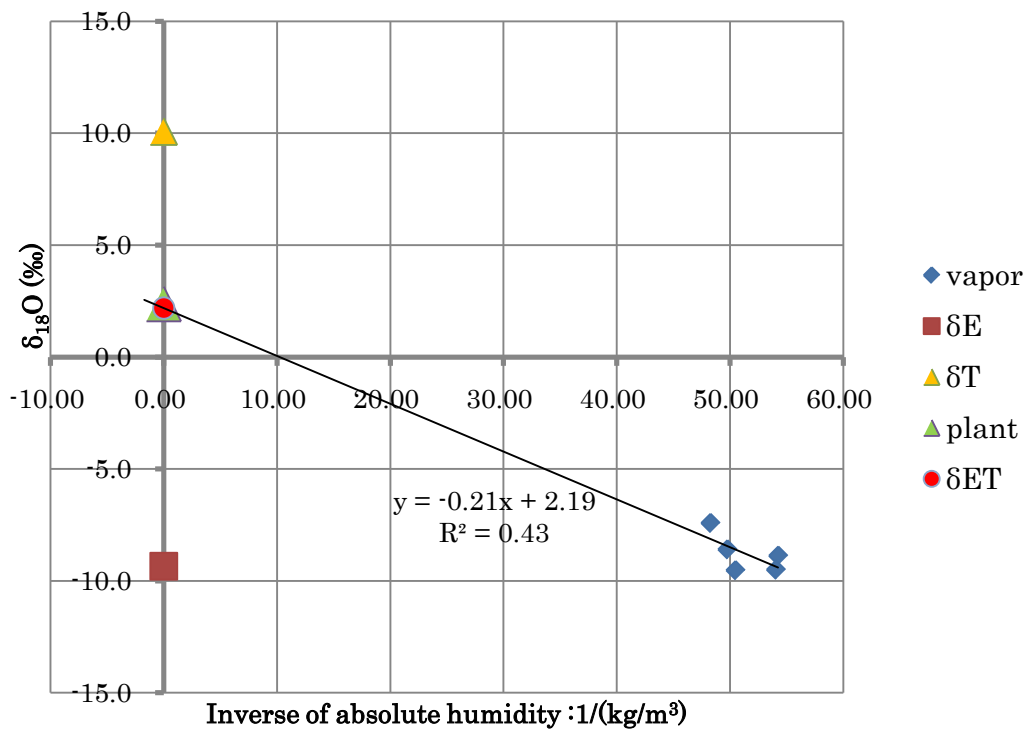


図 29 Keeling plot analysis の結果 (Zankalon 8/5). 観測時刻は 8:45~12:30
15:30~19:20 で δ_T は 0~30 cm の土壤水

表 11 安定同位体比を用いた蒸散比率 (T/ET) 推定まとめ

	Zankalon			SakhaS		SakhaN	
δ_T	8月3日	8月4日	8月5日	8月7日	8月8日	8月9日	8月10日
植物 (茎上)	100%	100%	100%	100%		100%	
植物 (茎下)	64%	76%	63%	58%		89%	
植物平均	85%	98%	80%	85%		98%	
土壌水	42%	50%	42%	31%		72%	
土壌加重平均	41%	48%	53%	35%		66%	

○蒸散比率 100%とは δ_{ET} が δ_T よりも大きい値を示したものを表す。つまり蒸散のみ。

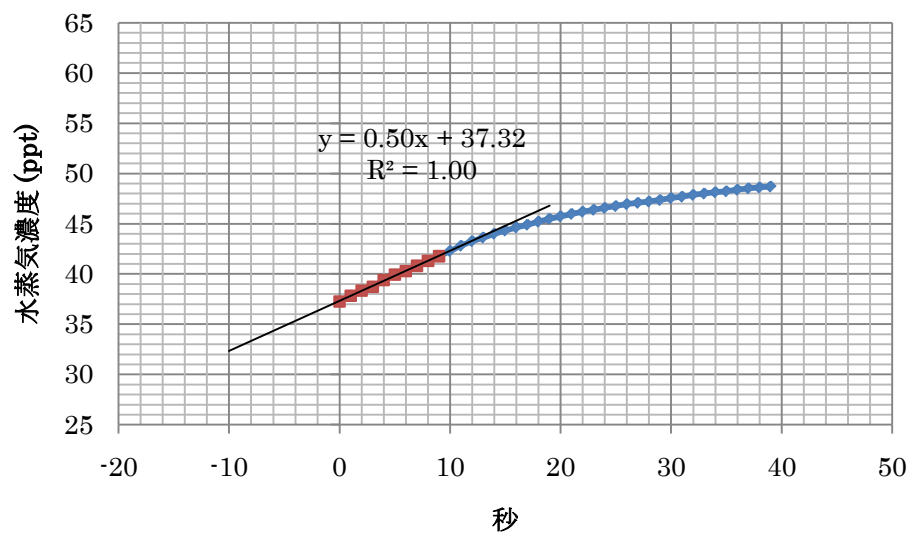


図 30 8/3 Zankalon 水蒸気濃度変化 (10:30~). 0 秒から観測開始した.

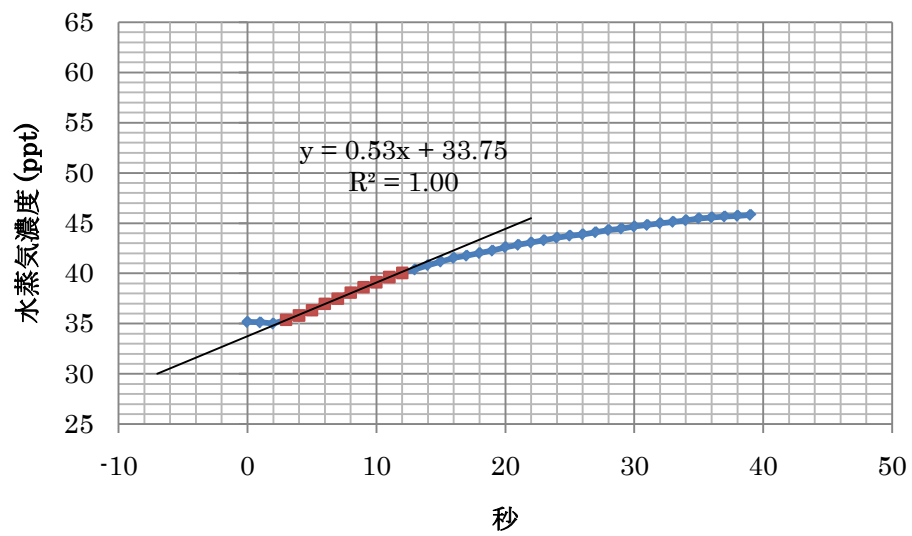
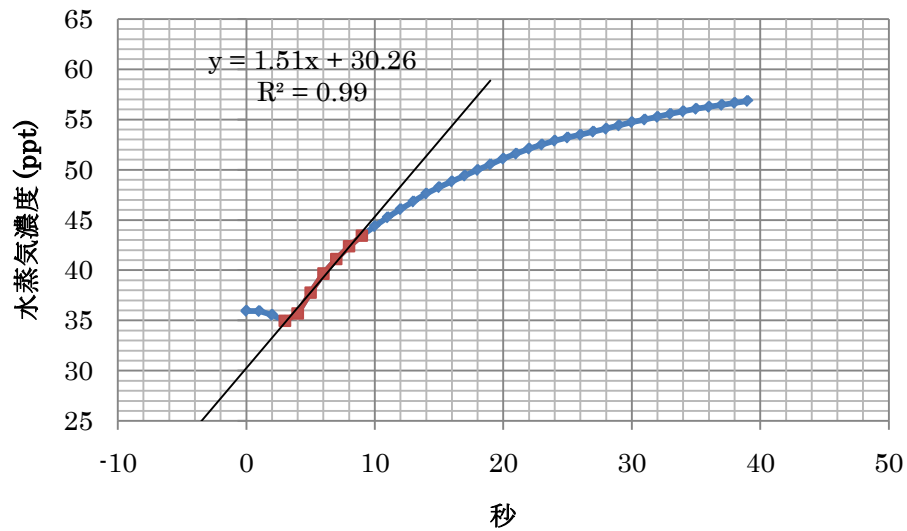


図 31 8/3 Zankalon 水蒸気濃度変化 (10:43~). 3 秒から観測開始した.



○赤い曲線の傾きを算出した。

サンプル数 (秒)	R ²	R ¹²
10	0.979	0.976
9	0.982	0.980
8	0.985	0.983
7	0.988	0.9861
6	0.989	0.9858
5	0.983	0.978

図 32 8/7 SakhaS 水蒸気濃度変化 (11:20～). 3 秒から観測開始した. サンプル数を 10 秒から 7 秒まで減らした. 黄色の塗った場所は自由度調整付き決定係数が一番大きかったのを採用した.

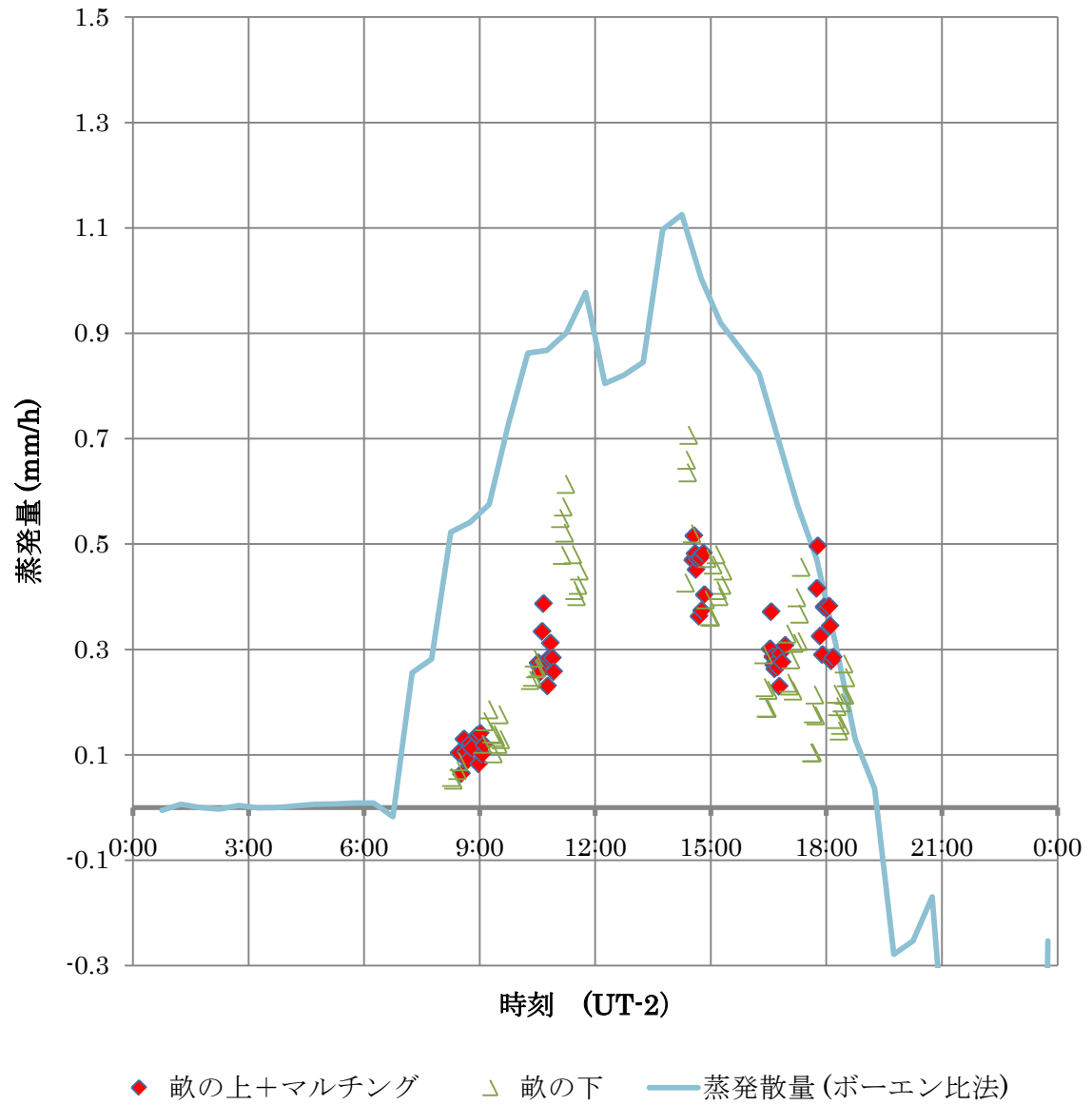


図 33 チャンバー法により求められた地面蒸発量と AWS による蒸発散量 (8/4).
観測場所は Zankalon である.

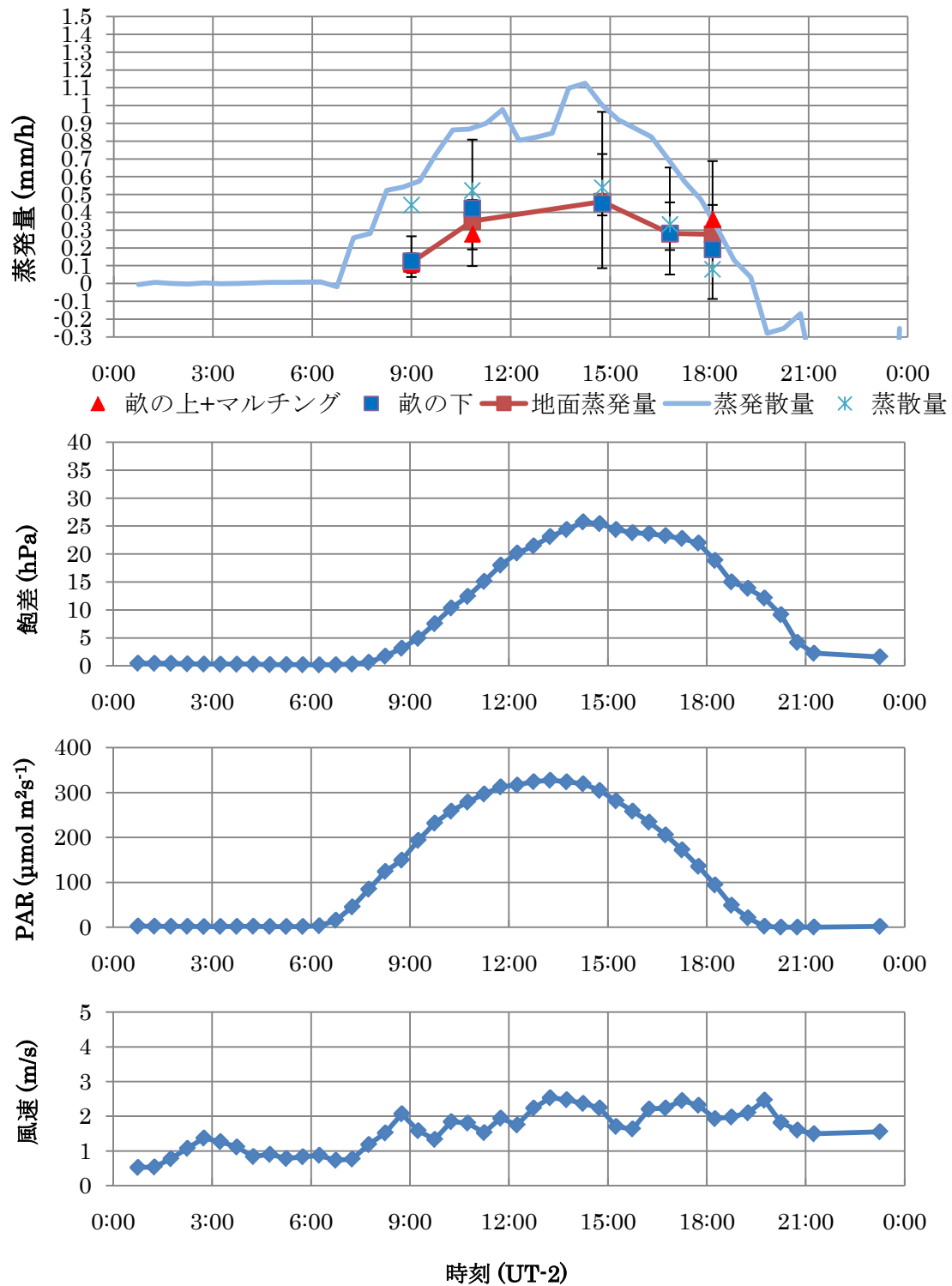


図 34 地面蒸発量・蒸散量・蒸発散量と飽差・PAR・風速の時間変化の比較 (8/4). 地面蒸発量は図 33 の 1 セット毎の中間値を取った. エラーバーはチャンバーで測定した地面蒸発量の最大値と最小値である. 観測地は Zankalon である.

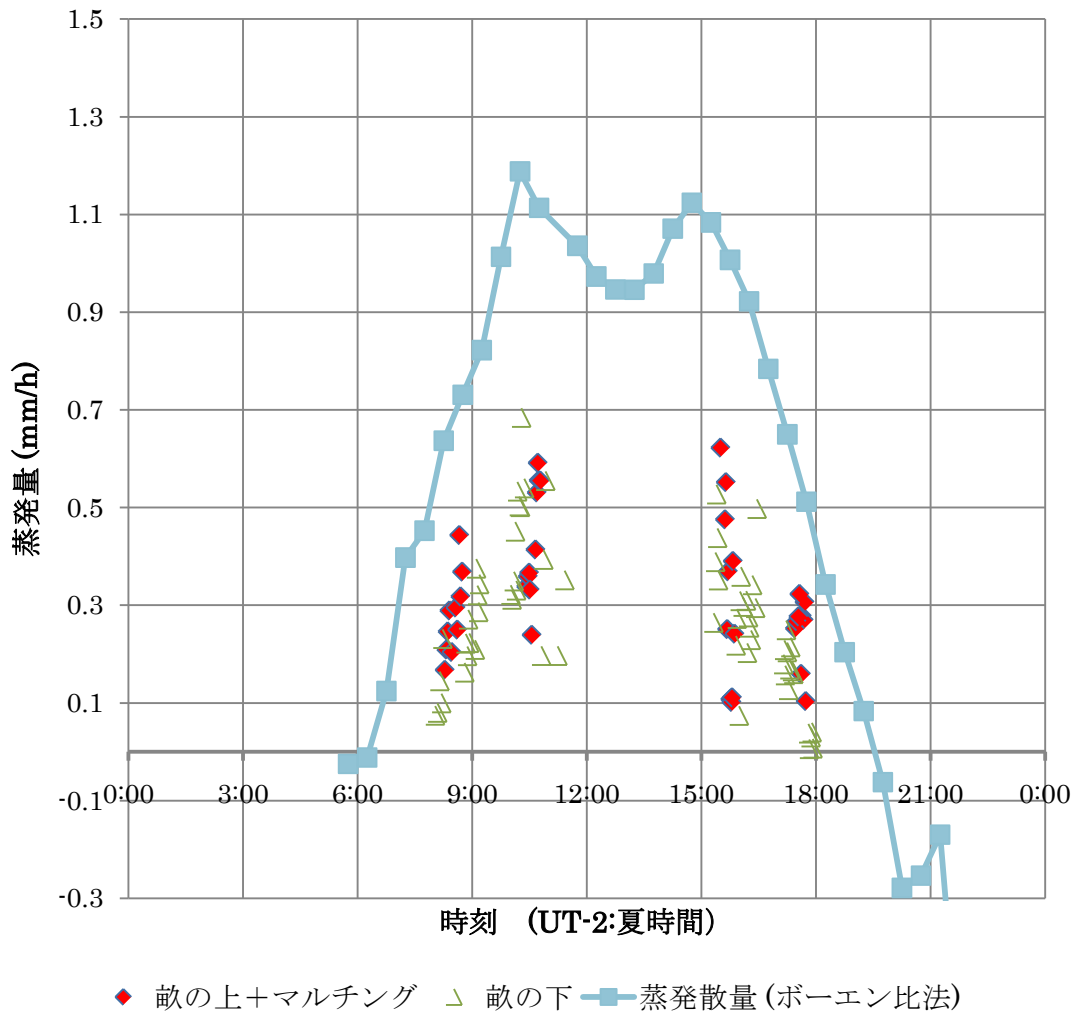


図 35 チャンバー法により求められた地面蒸発量と AWS による蒸発散量 (8/5).
観測場所は Zankalon である.

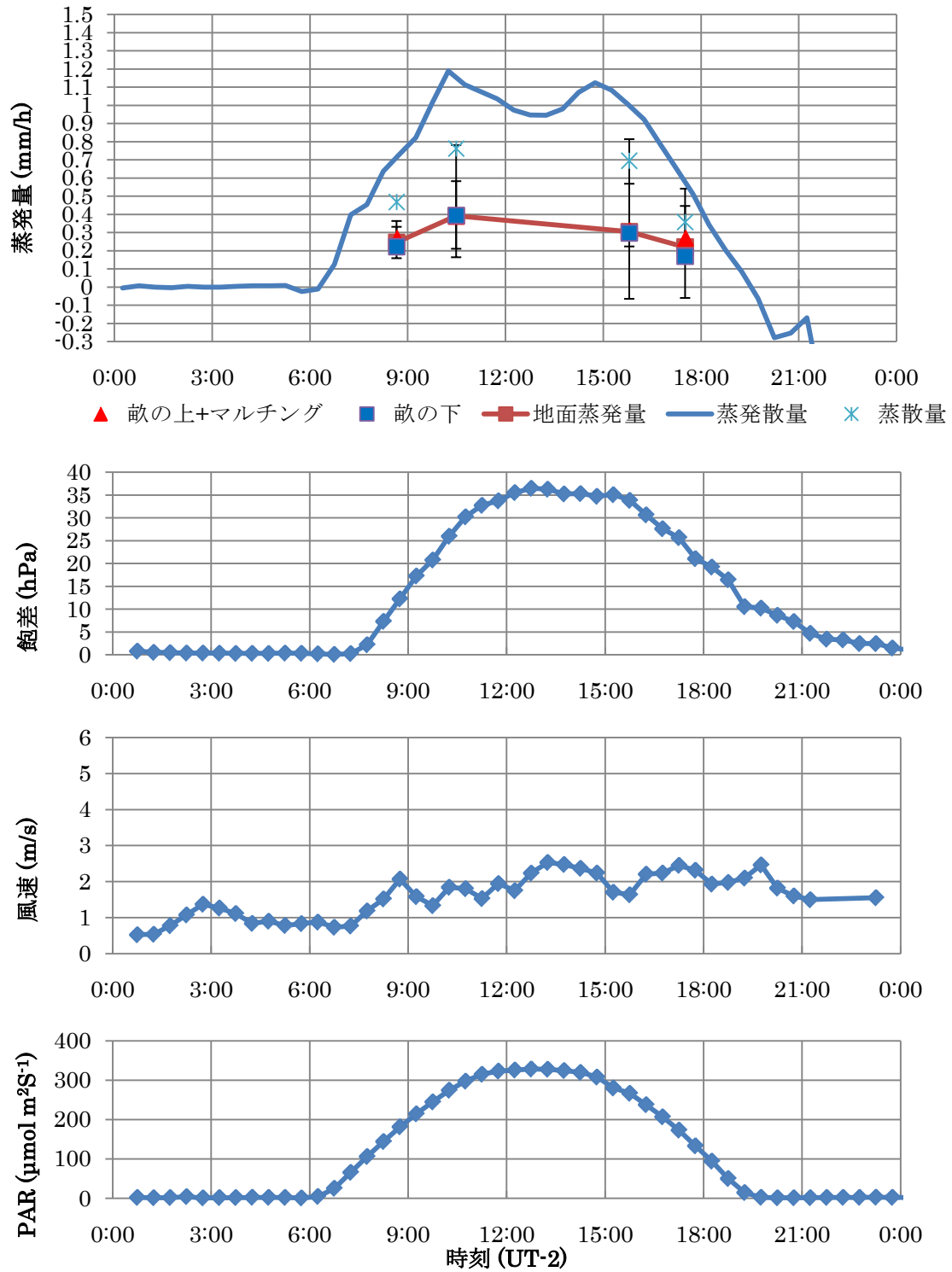


図 36 地面蒸発量・蒸散量・蒸発散量と飽差・PAR・風速の時間変化の比較 (8/5). 地面蒸発量は図 35 の 1 セット毎の中間値を取った. エラーバーはチャンバーで測定した地面蒸発量の最大値と最小値である. 観測地は Zankalon である.

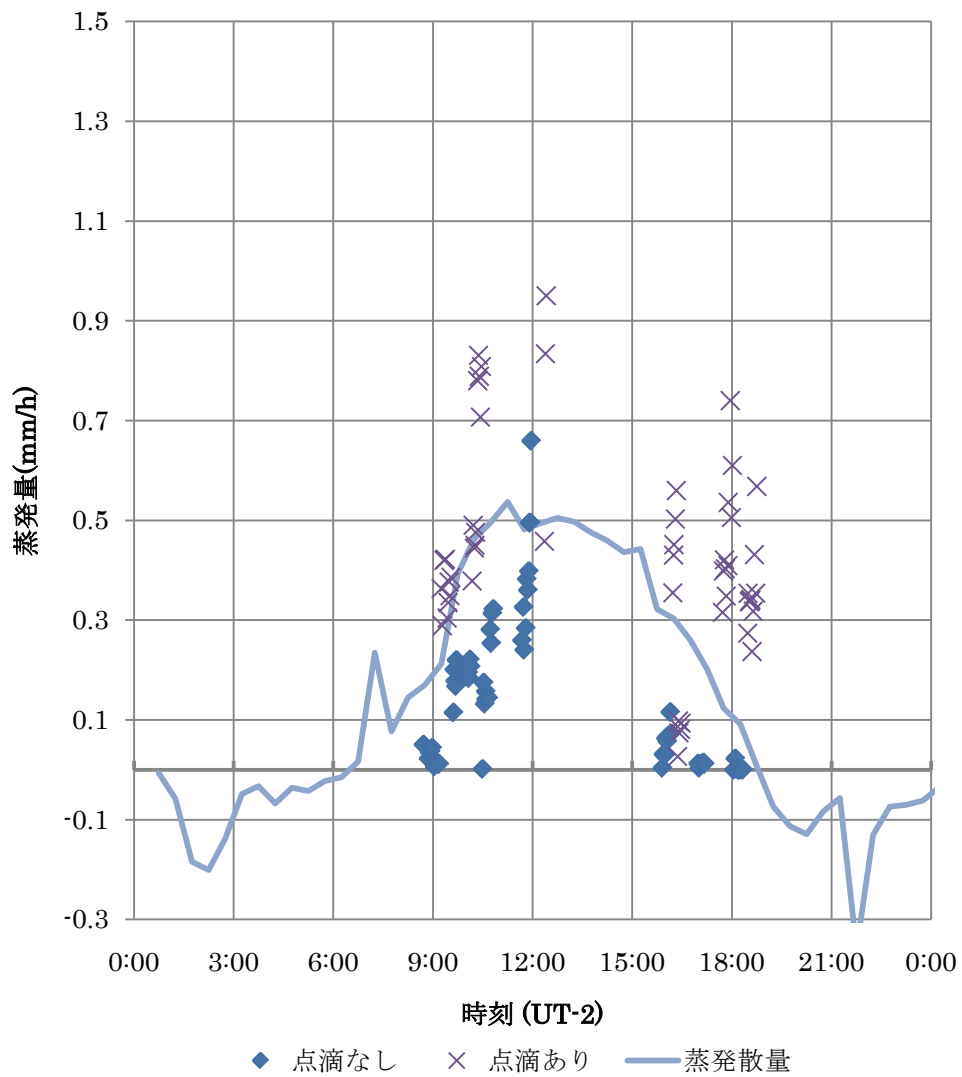


図 37 チャンバー法により求められた地面蒸発量と AWS による蒸発散量 (8/7). 観測場所は SakhaS である. 点滴なしとは図 8 の点滴灌漑で湿った場所以外のところであり, 点滴ありとは図 8 の点滴灌漑で湿った場所のことである.

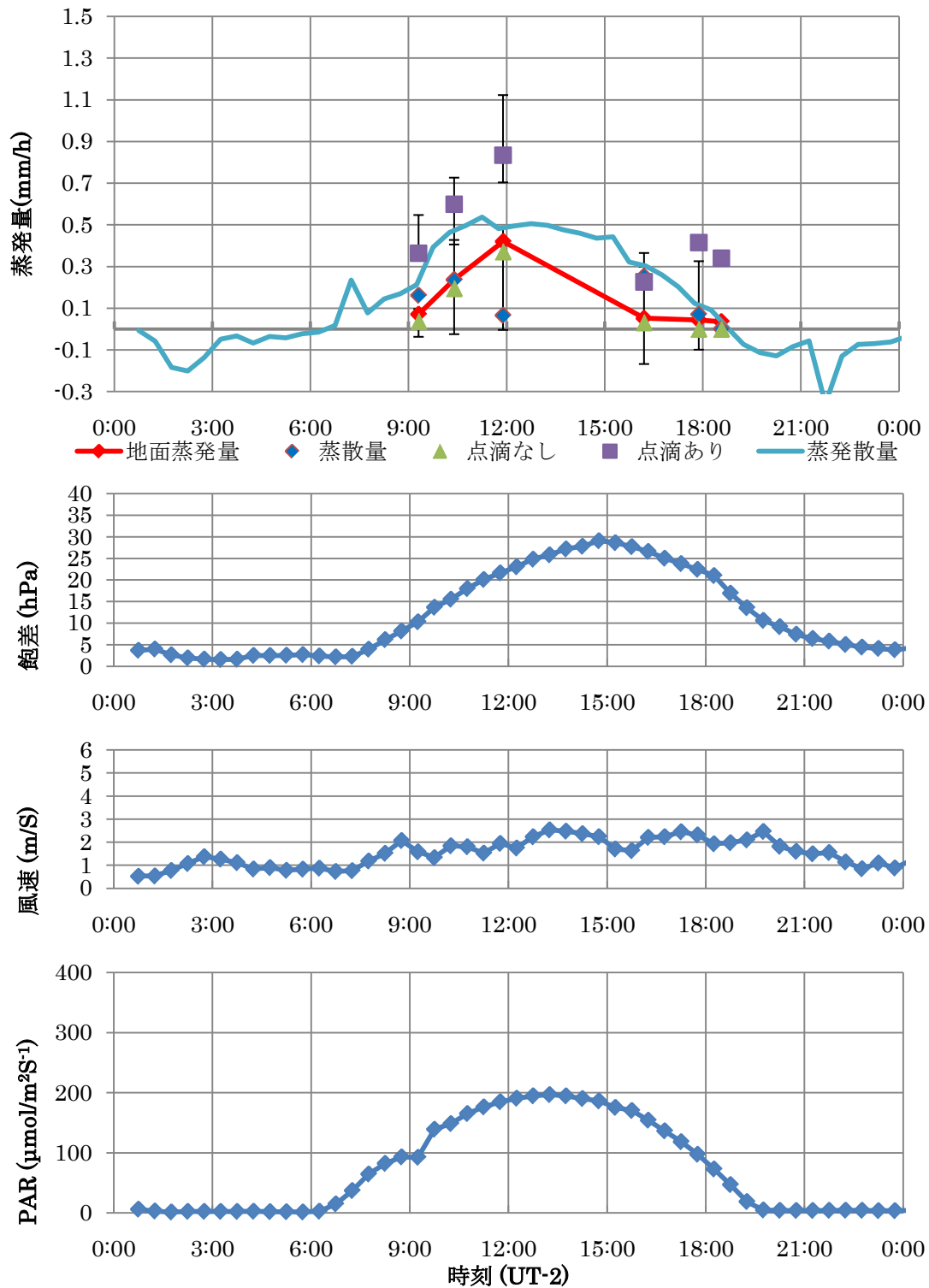


図 38 地面蒸発量・蒸散量・蒸発散量と飽差・PAR・風速の時間変化の比較 (8/7). 地面蒸発量は図 37 の 1 セット毎の中間値を取った. エラーバーはチャンバーで測定した地面蒸発量の最大値と最小値である. 観測地は SakhaS である.

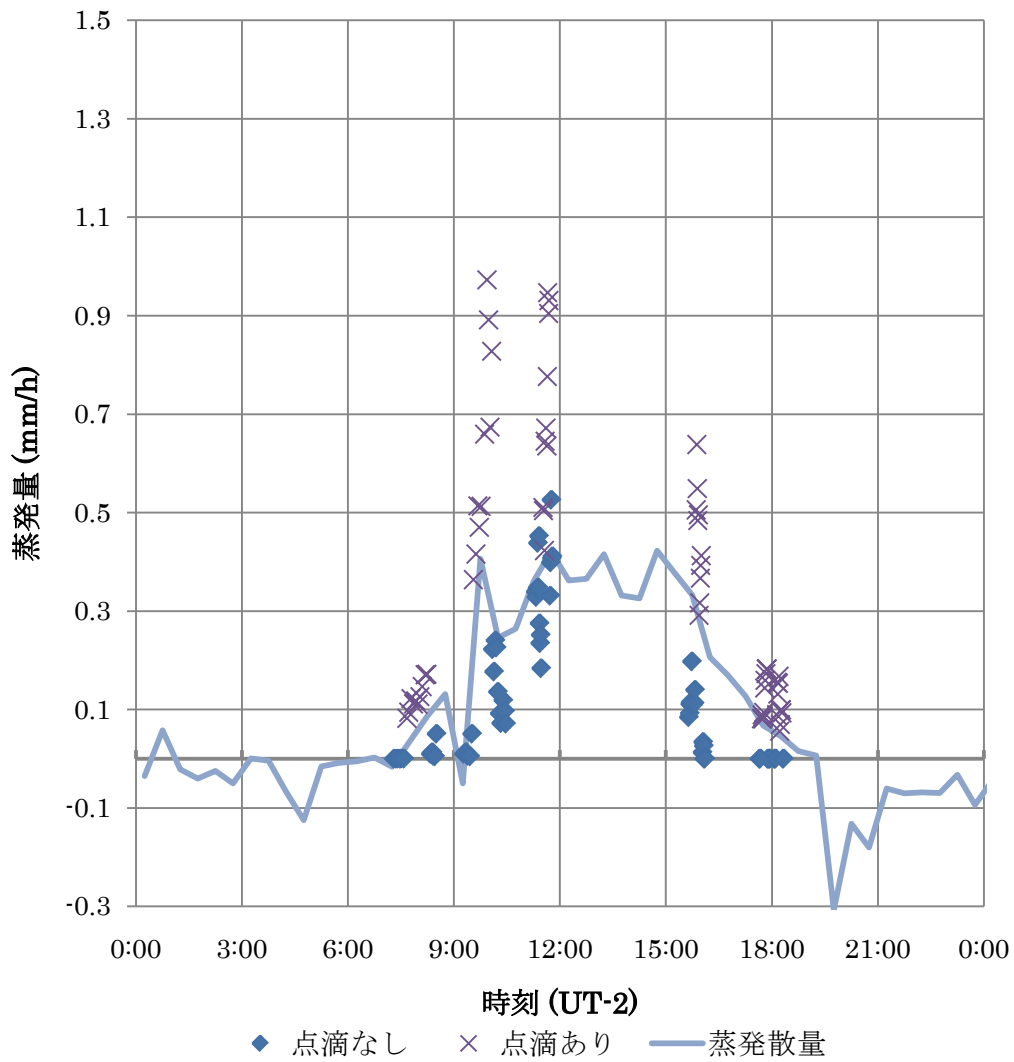


図 39 チャンバー法により求められた地面蒸発量と AWS による蒸発散量 (8/8).
 観測場所は SakhaS である. 点滴なしとは図 8 の点滴灌漑で湿った場所以外のところ
 であり, 点滴ありとは図 8 の点滴灌漑で湿った場所のことである.

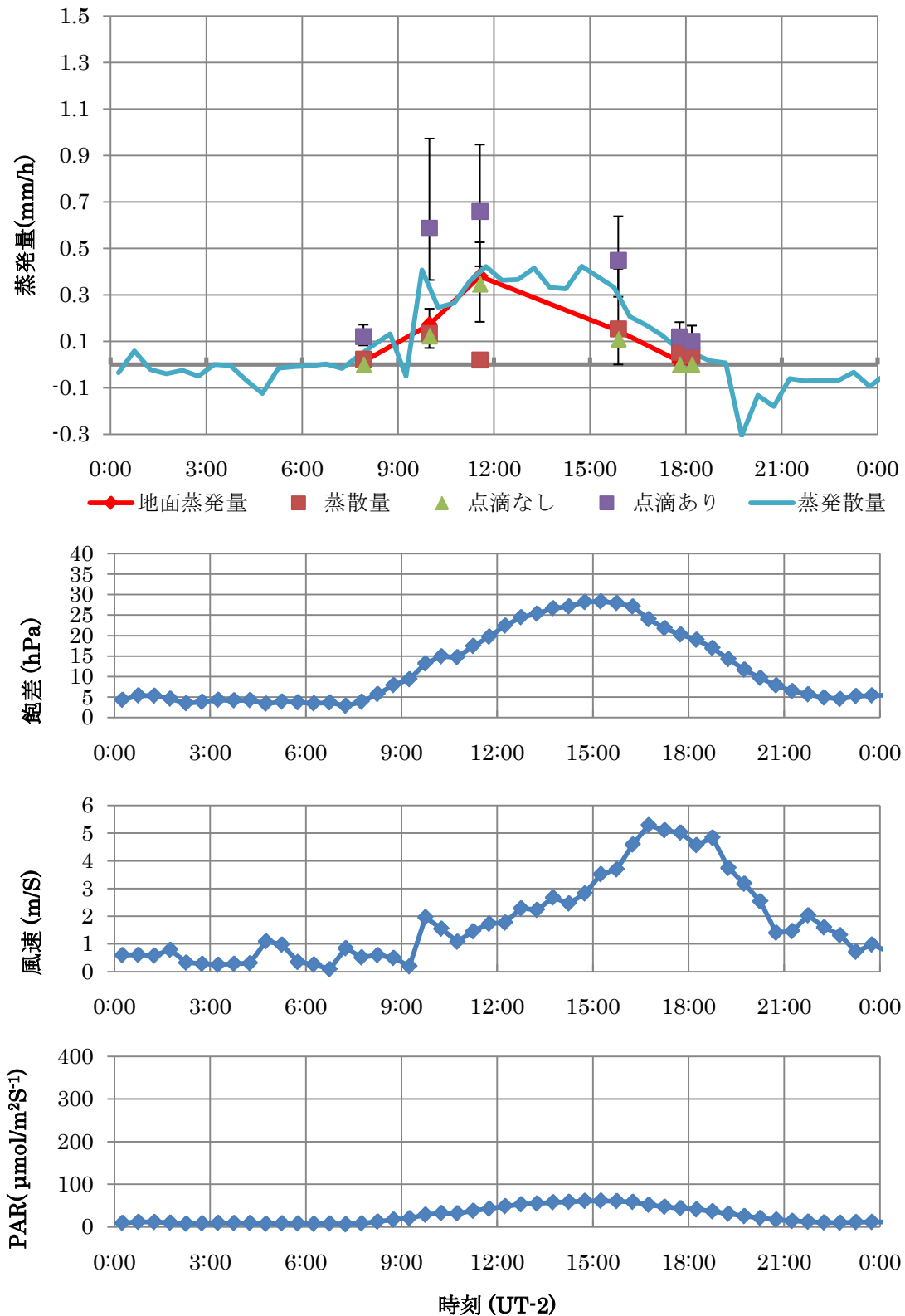


図 40 地面蒸発量・蒸散量・蒸発散量と飽差・PAR・風速の時間変化の比較 (8/8). 地面蒸発量は図 39 の 1 セット毎の中間値を取った. エラーバーはチャンバーで測定した地面蒸発量の最大値と最小値である. 観測地は SakhaS である.

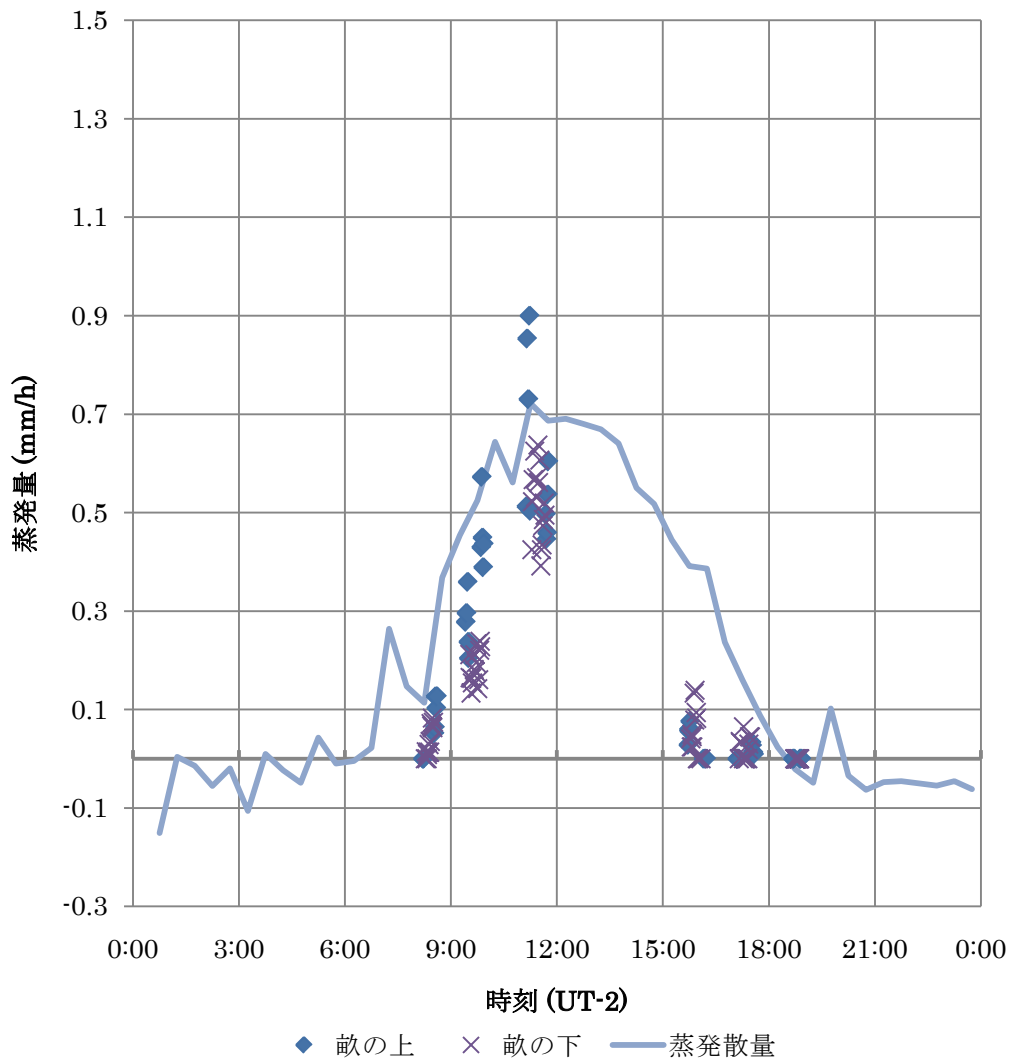


図 41 チャンバー法により求められた地面蒸発量と AWS による蒸発散量 (8/9).
観測場所は SakhaN である.

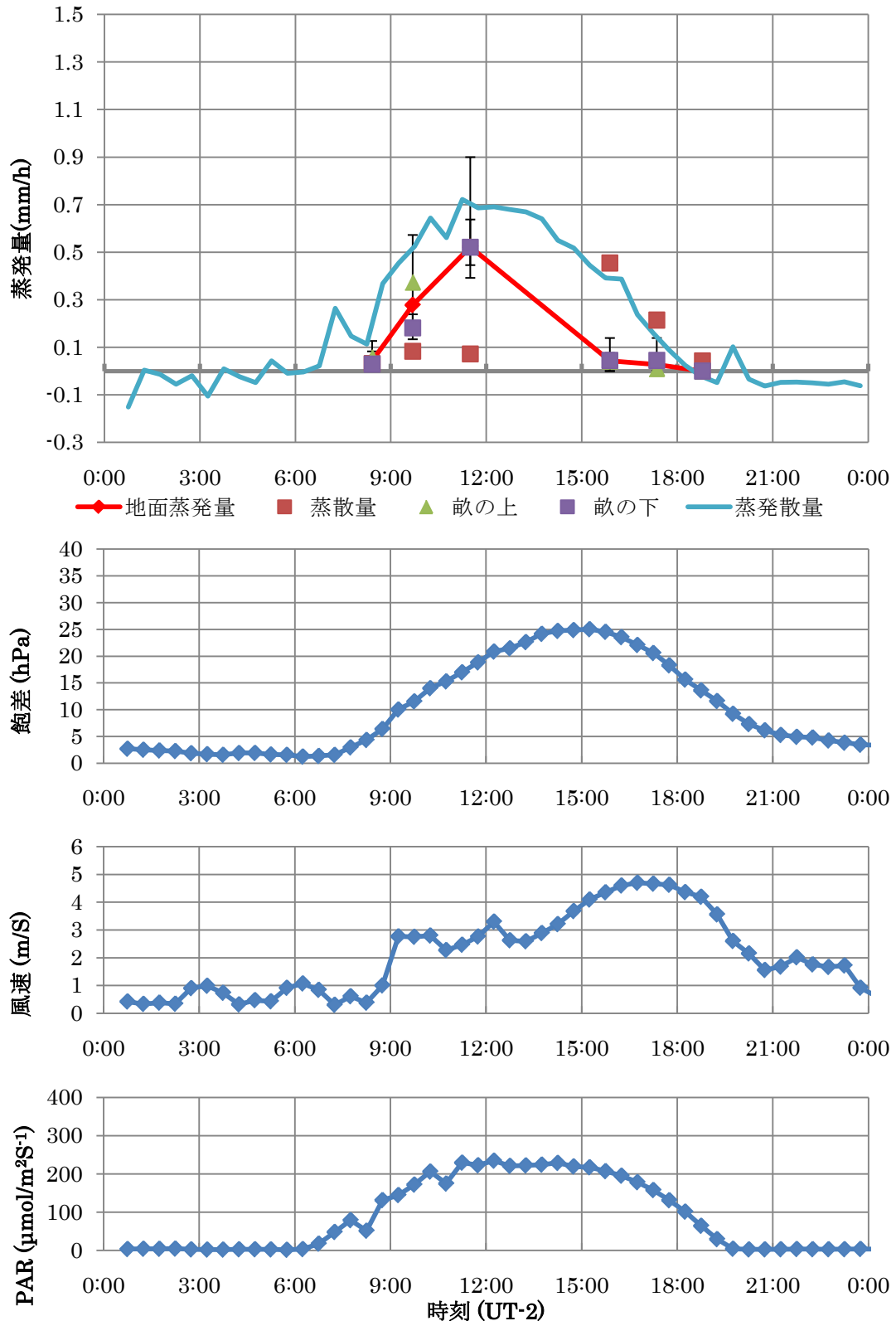


図 42 地面蒸発量・蒸散量・蒸発散量と飽差・PAR・風速の時間変化の比較 (8/9). 地面蒸発量は図 41 の 1 セット毎の中間値を取った. エラーバーはチャンバーで測定した地面蒸発量の最大値と最小値である. 観測地は SakhaN である.

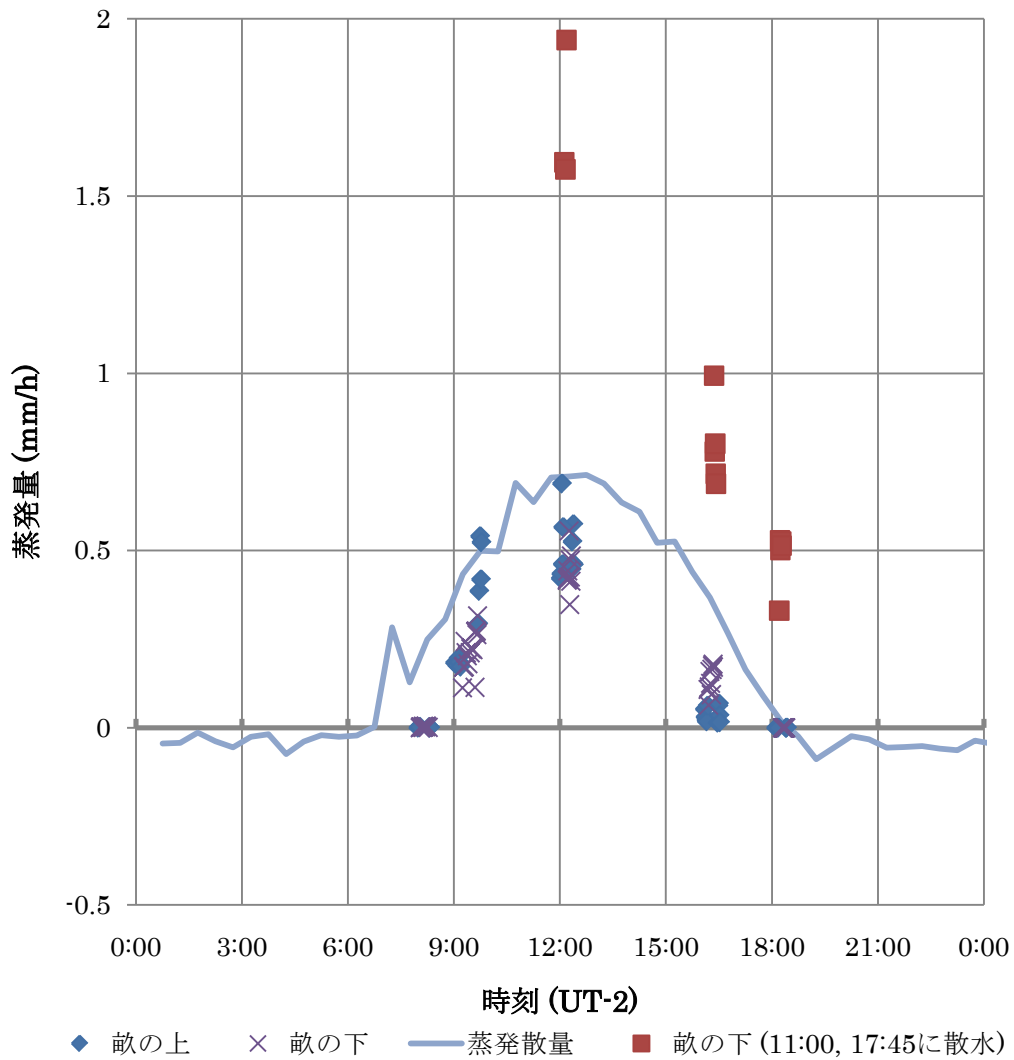


図 43 チャンバー法により求められた地面蒸発量と AWS による蒸発散量 (8/10). 観測場所は SakhaN である. 畝の下への散水量は 11:00, 17:45 にそれぞれ 1.8 L である.

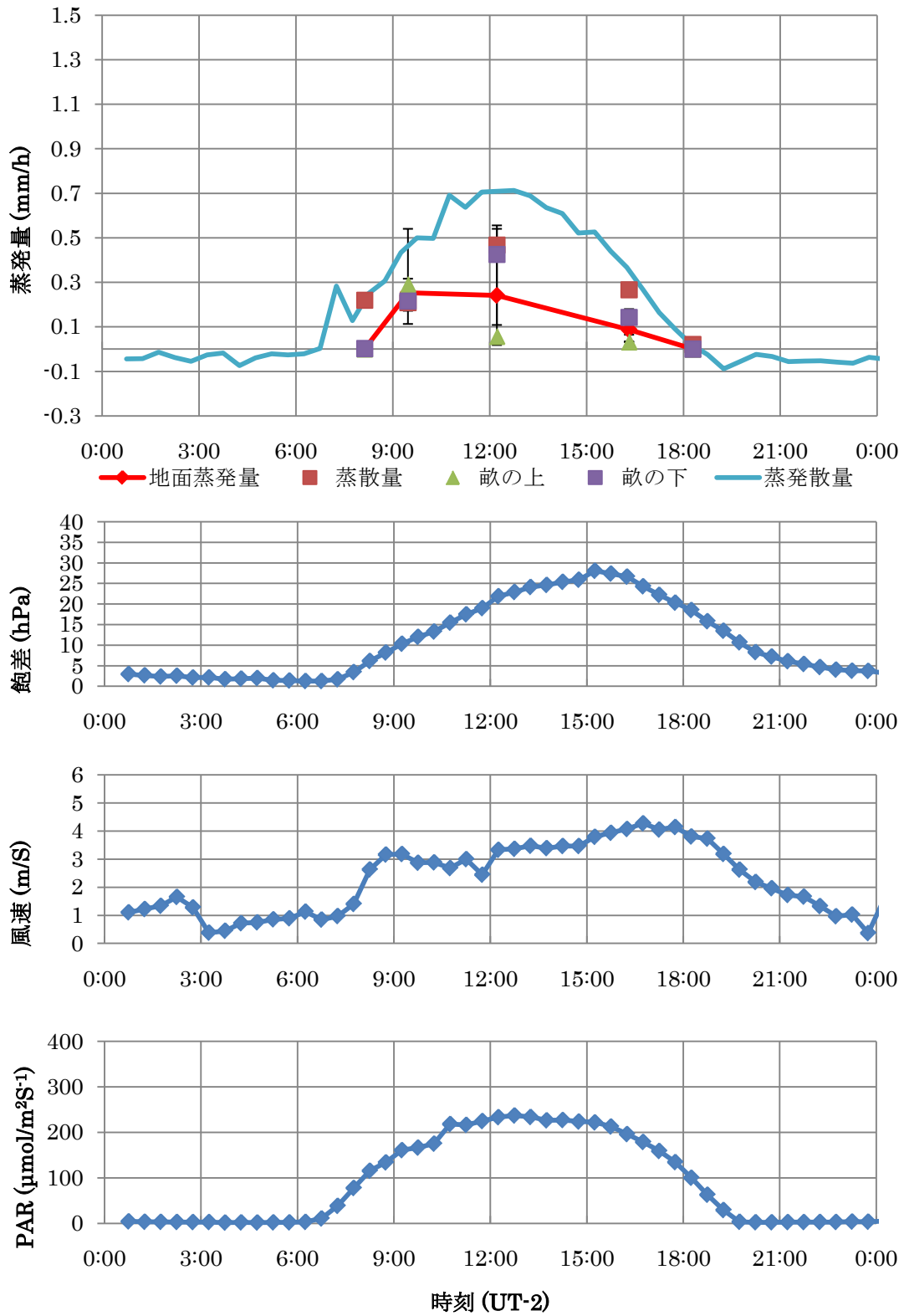


図 44 地面蒸発量・蒸散量・蒸発散量と飽差・PAR・風速の時間変化の比較 (8/10). 地面蒸発量は図 42 の 1 セット毎の散水した場所以外の中間値を取った. エラーバーはチャンバーで測定した地面蒸発量の最大値と最小値である. 観測地は Sakhn である.

表 12 チャンバー法蒸散比率まとめ

	Zankalon		SakhaS		SakhaN	
	8月4日	8月5日	8月7日	8月8日	8月9日	8月10日
蒸散比	56%	59%	50%	36%	53%	67%
平均 LAI	1.78		0.89		1.36	
平均被度	47%		31%		44%	

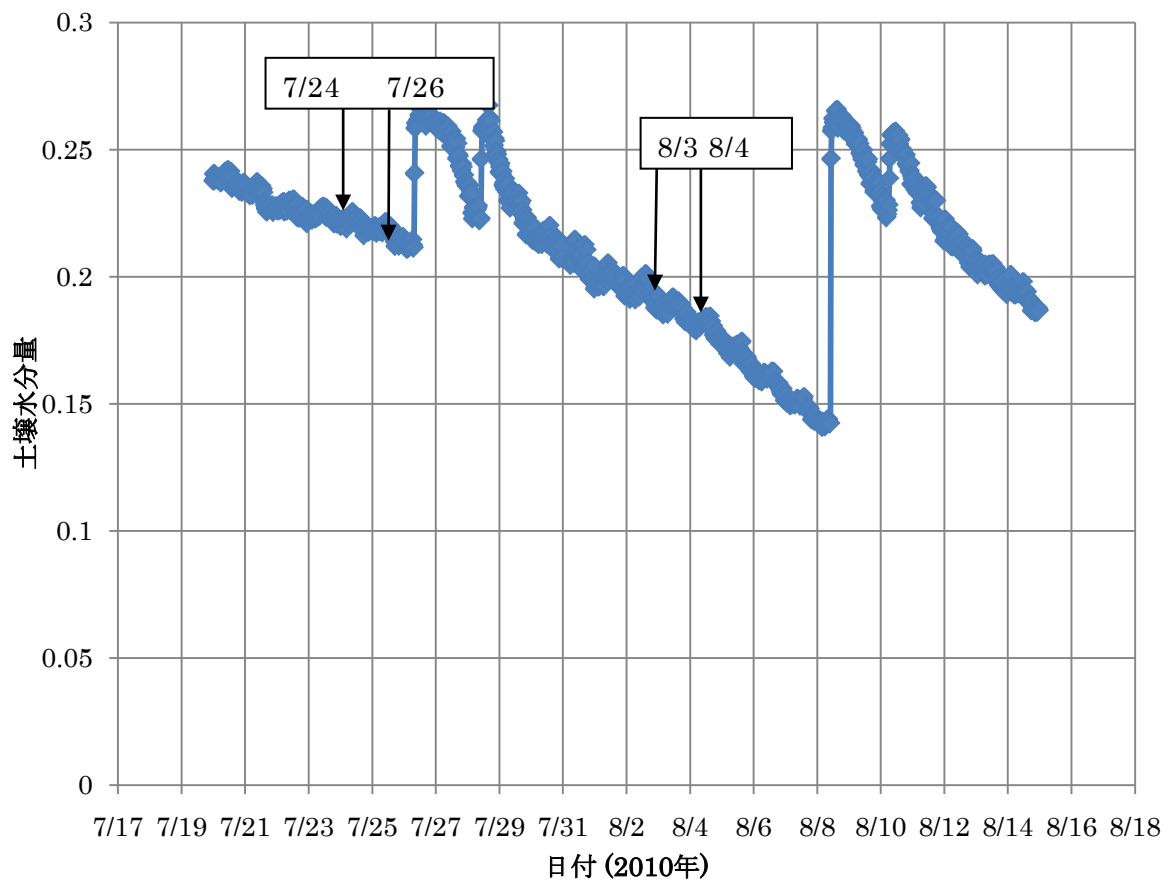


図 45 Zankalon 土壤水分量の推移. 7/24・7/26 に灌漑が行われた. 8/3・8/4 が観測日である.

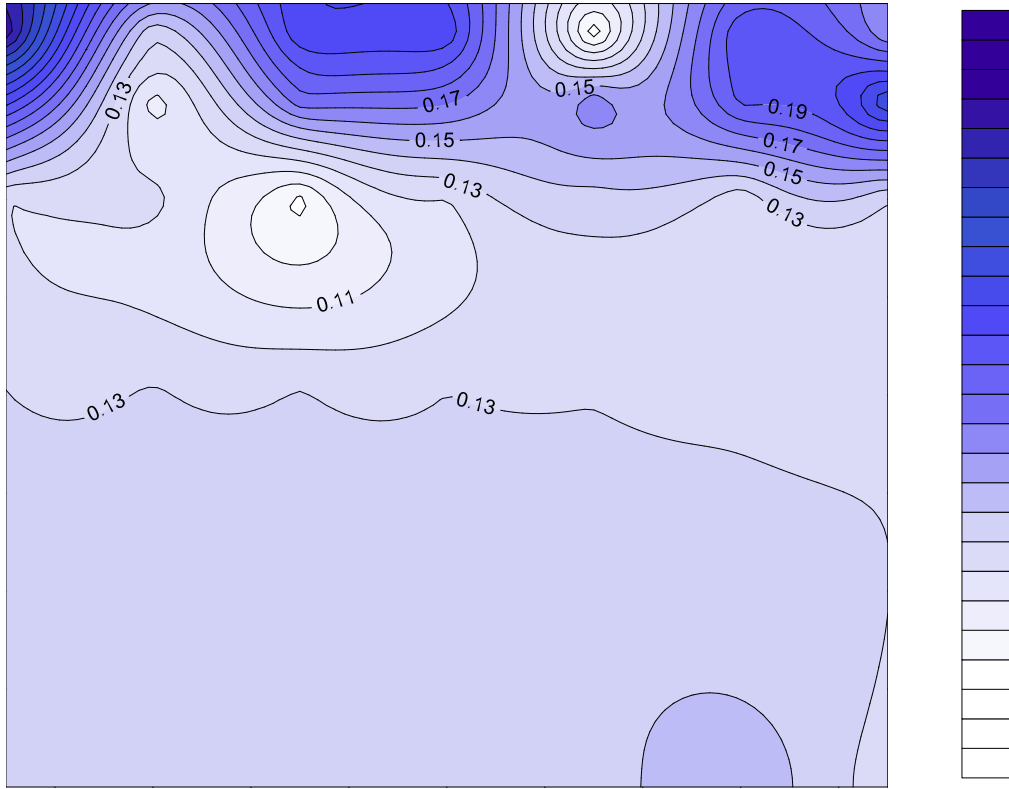


図 46 Zankalon 土壌水分量分布. 各カラムの 8/3~8/5 の平均値である. width 0 m 付近が畝の上である.

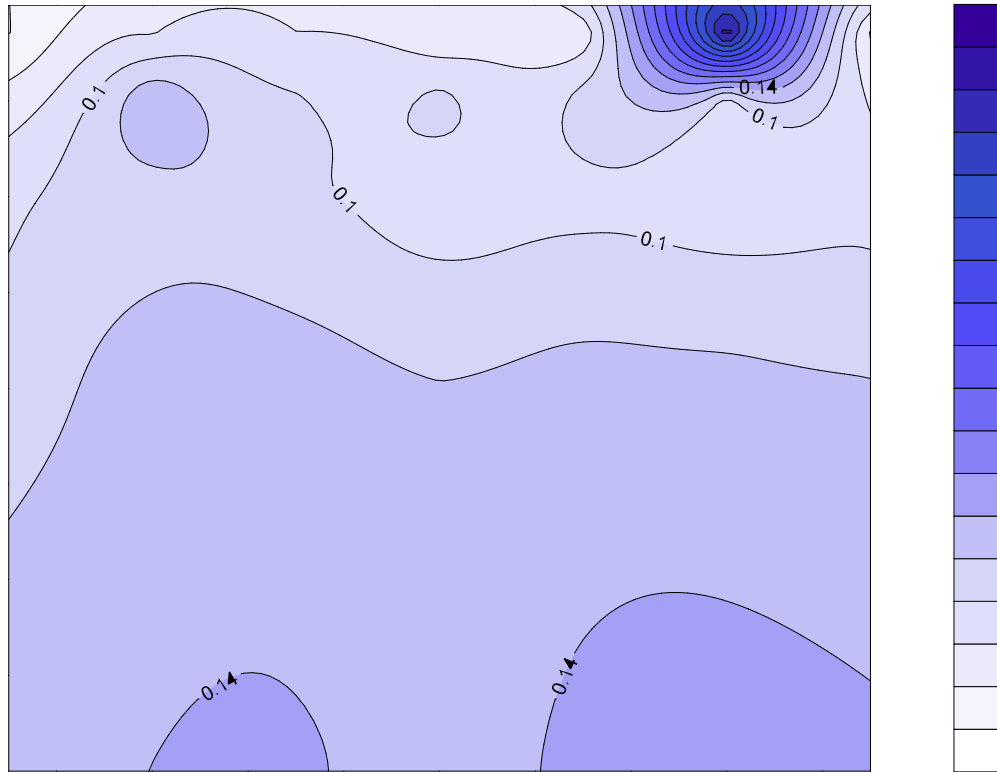


図 47 SakhaS 土壌水分分布. 各カラムの 8/7~8/8 の平均値である. 当初 width 0 m 付近が点滴灌漑の中心であったが, 0.3 m 付近まで移動したと考えられる.

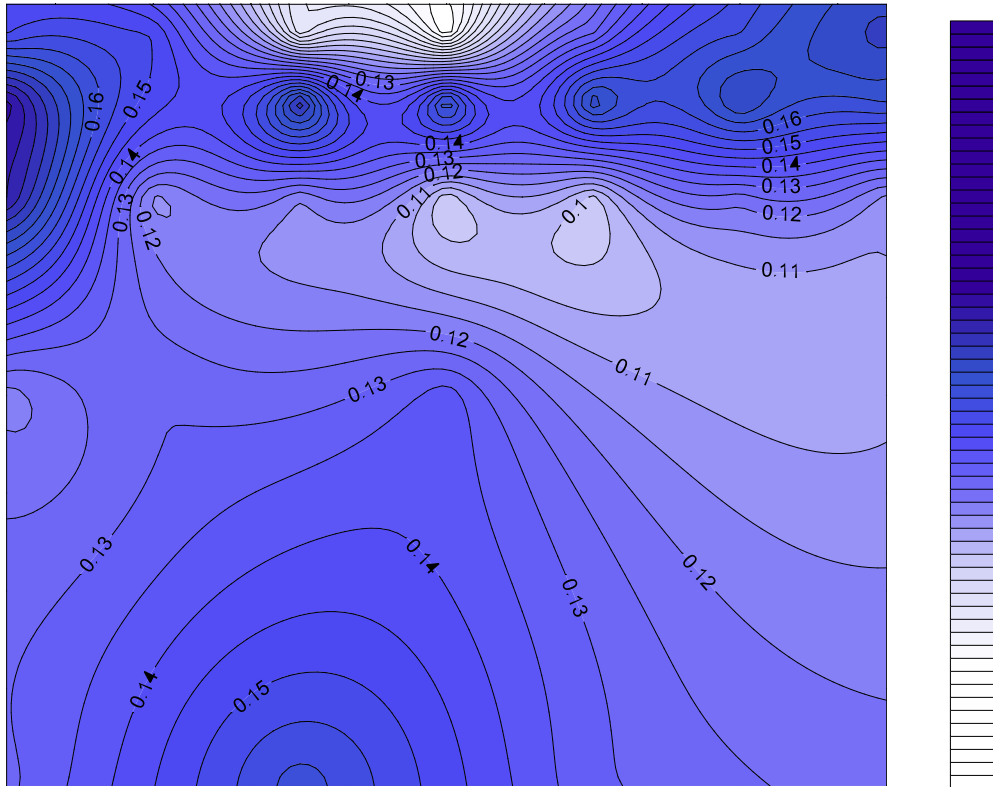


図 48 SakhaN 土壌水分量分布. 8/6 の各カラムの平均値である. width 0 m 付近が畝の上である.

表 13 安定同位体比とチャンバー法蒸散比率比較

	Zankalon			Sakha S		Sakha N	
	8/3	8/4	8/5	8/7	8/8	8/9	8/10
チャンバー法		56%	59%	50%	36%	53%	67%
安定同位体比 δ_T : 植物平均	85%	98%	80%	85%		98%	
δ_T : 土壌水 (45 cm まで)	42%	50%	42%	31%		72%	
δ_T : 根長加重平均	41%	48%	53%	35%		66%	

表 14 蒸発抑制効果検証

		Zankalon			Sakha S		Sakha N	
		8/3	8/4	8/5	8/7	8/8	8/9	8/10
チャンバー法	蒸散比		56%	59%	50%	36%	53%	67%
	地面蒸発 (mm/h)		1.49	2.86	0.86	0.73	0.91	0.58
LAI		1.78			0.89			1.36
被度		47%			31%		44%	
論文値 (Merta, 2006)	地面蒸発/蒸発散量	0.11	0.11	0.11	0.21		0.14	
圃場測定値	地面蒸発/蒸発散量		0.44	0.41	0.50	0.64	0.47	0.33
補正值	地面蒸発量		1.20	2.31	1.25	1.07	0.91	0.58
蒸散比率			0.66	0.34	0.24	0.18	0.53	0.67
土壌水分量		20%	20%	10~ (40%)	10~ (40%)	10~ (40%)	10~15%	10~15%

○SakhaS の土壌水分量の最大値が 40%と高い数値を示したのは点滴灌漑が行われたため。

第4章 結論

1. デルタダイアグラム

デルタダイアグラムを見ると、3 圃場ともに土壌水は蒸発の影響を非常に受けている事がわかった。また植物の同位体比は茎の部位の上の部分と同位体比が高くなった。

2. 土壌同位体鉛直プロファイル

Zankalon, SakhaS, SakhaN 3 ヶ所ともに土壌水同位体比は表面に行けば行くほど蒸発の影響から高くなっている。また深度が深くなればなるほど同位体比は一定に近づいていくということがわかった。また植物の同位体比は土壌水の同位体と全く一致しないことがわかった。植物の同位体比は土壌水よりむしろ灌漑水や地下水の水に近い値を示した。これにより同位体データから、観測期間中に植物は土壌水を吸水していないという結論に至った。また土壌の乾燥が進み、土壌水の同位体比が灌漑直後と比べ、変化していると考えられるのでそれも植物の同位体比と土壌水の同位体比が異なることに起因していると考えられる。

3. 同位体から蒸散比算出

土壌水を δ_T として用いた場合と植物を δ_T として用いた場合、植物を用いた場合、蒸散比が大きくなった。これは 90%近い値を示し、福田 (2007) の蒸散比率に近い値を示した。

4. チャンバー法から Zankalon の抑制効果検証

Zankalon においてチャンバー法でマルチを施していない場所という場所で直接蒸発量を比べた結果、土壌水分量にも差が見られなかったため、統計学的に有意な差があるか検証したところ有意な差はみられなかった。この原因として図 45 にあるように土壌水分が少なくなり土壌の乾燥が進み、蒸発する水が少なくなり差を感知できなくなったのではないかと考えられる。

5. チャンバー法と安定同位体比蒸散比率比較

チャンバー法に比べ、安定同位体比の方が特に植物を δ_T と取った方が、全体的に蒸散比率が大きくなる傾向がある。この原因として考えられるのがチャンバー法の一日の観測回数 5 セットのうち 1 回でも地面蒸発の大きい時に観測を行った場合、その値は安定同位体比の測定よりも一日の合計地面蒸発量に大きく影響してしまうからである。チャンバー法で蒸発散量と同じ時間の測定を行えば、より真値に近づくと考えられる。

6. 蒸発抑制効果検証

点滴灌漑とマルチの蒸発抑制効果を検証するために、そのまま地面蒸発の値を比較するのでは正しく議論することができないので LAI の値を全て等しく補正してから議論することにしたところ蒸発抑制効果が表れていないことが分かった。この原

因は土壤の乾燥にあると考え、まず表面土壤の土壤水分量をみたところ、土壤水分量は 20%以下と低く、土壤は乾燥しているということがわかった。蒸散比率に注目したところ、特に SakhaS では蒸散比は低く、土壤の乾燥が進んでいるものと考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり、筑波大学大学院生命環境科学研究科地球環境科学専攻の杉田倫明先生には、現地観測をはじめ、研究方法における丁寧なご指導など、たくさんの面で終始お世話になりました。大変感謝申し上げます。また、筑波大学大学院生命環境科学研究科持続環境学専攻の田瀬則雄先生・辻村真貴先生には、発表など機会のある度に貴重なご助言等いただきました。またレーザーマス質量分析計使用に当たり筑波大学陸域環境研究センターの山中勤先生・岩上翔準研究員には大変お世話になりました。また、杉田研究室の方々にはゼミでの貴重なご助言・ご意見のほか、本研究に対する励ましもいただきました。特に、元筑波大学大学院生命環境科学研究科環境科学専攻の佐藤隆氏、宮野愛子氏、伊倉宏弥氏、現地球環境科学専攻の吉澤新太郎氏からは水収支、熱収支に関する知識からその応用まで、全般にわたってお世話になりました。また現地調査では、同期の土平功志氏、地球学類の入柿ゆい氏、清水達輝氏には過酷な条件の中様々な観測を手伝っていただき、感謝申し上げます。環境科学専攻の福田敬広氏には現地観測に加え、データ処理も助けていただき感謝しております。

本研究は JST-JICA 地球規模課題対応科学技術協力事業「ナイル川流域における食糧・燃料の持続的生産」(WAT プロジェクト: 佐藤政良代表)のもとに行われました。プロジェクトメンバーおよび、観測圃場を提供してくださった現地の方々など多くの人の援助により観測が可能となり、様々な面で大変お世話になりました。またカイロ大学の Dr.Rushdi には観測における協力・ご助言等いただきました。

クリマテック株式会社の方々には、観測機材の設置など様々な場面でご協力いただきました。

また、安倍豊氏をはじめとする流域環境研究室のみなさま、同期ではげましあって来た杉田研究室の横山勇太氏、その他筑波大学生命環境科学研究科環境科学専攻の皆様のご存在は、研究を続けるにあたって大きな励みになりました。

以上の方々をはじめとする、本研究に対して応援して下さった全ての方々に、この場を借りて心から御礼申し上げます。最後に修士課程修了まで見守って下さいました、両親に心から感謝いたします。

引用文献

- 相澤佑介 (2006): 統計処理に使う Excel 活用法, 株式会社カットシステム, 207p.
- Ajai, S (2008): Economic feasibility of growing capsicum crop under drip irrigation in West Bengal, India. *Irrig Drainage Syst* 22:179–188.
- Brutsaert, W., 杉田倫明訳 (2008) : 水文学, 共立出版, pp.502
- 福田敬広 (2010) : ナイルデルタの農地における蒸発散量の評価, 筑波大学第一学群自然科学類卒業論文, 74p.
- Chen, X.Y. Zhang, D. Pei, H.Y. Sun & S.L. Chen (2007): Effects of straw mulching on soil temperature, evaporation and yield of winter wheat: field experiments on the North China Plain, *Ann Appl Biol* 150 , 261–268.
- Garratt, J.R., (1992): *The Atmospheric Boundary Layer*. Cambridge Univ Press, 316pp.
- He, H. and Smith, R.B. (1999): Stable isotope composition of water vapor in the atmospheric boundary layer above the forests of New England. *Journal of Geophysical Research*, 104, 11657-11673.
- 飯塚幸子・山中勤・田中正 (2004): 安定同位体分析のための植物体からの水の抽出について—ポット試験による検討—. 筑波大学陸域環境研究センター報告, No.5, 81-86.
- 井上光弘 (2007) : 種々のマルチ材による土壌面蒸発と温度環境, 農業および園芸 第 82 卷 第六号 683-686.
- 北村義信・渡辺紹裕・新保義剛 (1994): エジプトの水資源と灌漑排水. 農工研技報, 189, 75-99.
- Keeling, C.D. (1961): The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in rural and marine air. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 24, 277-298.
- Keys, W.M. and Crawford, M.E. (1980) : *Convective Heat and Mass Transfer*. Ed 2. McGraw-Hill, New York. 417.
- 近藤純正 (2000): 地表面に近い大気科学 —理解と応用—. 東京大学出版社, 350p.
- Majoube, M. (1971): Fractionnement en oxygen-18 et en deuterium entre leau et sa vapeur. *Journal of Chemical Physics*, 68, 1423-1436.
- Merta, M, Christina, S & Tatjana, F (2006): Estimation of evaporation components in agricultural crops, *Biologia, Bratislava*, 61, S280-S283
- Marlivat, L. (1978): Molecular diffusivities of H₂O in gases. *Journal of Chemical Physics*, 69, 2864-287
- Moreira, M.Z., Martinelli, L A., Victoria, R.L., Barbosa, E.M., Bonates, L.C.M. and

- Nepstad, D.C. (1997): Contribution of transpiration to forest ambient vapour based on isotopic measurements. *Global Change Biology*, 3, 439-450.
- Ministry of Water Resources and Irrigation of Arab Republic of Egypt (2005) : Water for the Future, National Water Resource Plan , pp.268.
- Sato, T (2010): Study on Vapor Transfer Processes into the Atmosphere from Vegetated Surface in an Arid Region, A Thesis Submitted to The Graduate School of Life and Environmental Sciences The University of Tsukuba in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Environmental Sciences, 98p.
- 佐々木リサ (2004) : モンゴル・ヘルレン川流域における水循環に伴う安定同位体比変動プロセス. 筑波大学大学院環境科学研究科修士論文. pp.57.
- Santiago, B., Francisco, O., Francisco J. V & Elias, F (2001): Soil evaporation from drip-irrigated olive orchards, *Irrig Sci*, 20, 65-71.
- 杉田倫明 (1996): 「蒸発散」Ⅱ. 蒸発散の測定法 (1). *ハイドロロジー (日本水文科学会誌)*, 26, 49-56.
- 杉田倫明・田中正 (2009) : 水文科学, 共立出版, pp.275.
- 鈴木弘明 (1986) : エジプト近代灌漑史 W・ウィルコックス論, アジア経済研究所, 129p.
- Thomas H. W., 田畑 吉雄・太田 拓男訳 (1998): 回帰分析とその応用, 現代数学社, 629p
- Tsujimura, M., Sasaki, L., Yamanaka, T., Sugimoto D., Li.S.-G., Matsushima, D., Kotani A and Saandar M (2007b): Vertical distribution of stable isotopic composition in atmospheric water vapor and subsurface water in grassland and forest sites, eastern Mongolia. *J. Hydrol.*, 333, 35-46.
- 浦野忠明 (2005): モンゴル半乾燥草原における放牧区及び禁牧区での地上部バイオマスとCO₂フラックスの季節変化. 筑波大学大学院環境科学研究科修士論文, 45p.
- Williams, D.G., W.Cable, K. Hultine, J.C.B. Hoedjes, E. A. Yepez, V. Simonneaux, S. Er-Raki, G. Boulet, H. A. R. de Bruin, A. Chehbouni, O.K. Hartogensis and F. Timouk, 2004: Evapotranspiration components determined by stable isotope , sap flow and eddy covariance techniques. *Agric. For. Meteorol.*, 125, 241-258.
- Yamanaka. T, Inoue. M, Kaihotsu. I. (2004): Effects of gravel mulch on water vapor transfer above and below the soil surface. *Agricultural Water Management*, 67, 145-155.
- Yakir, D. (1992): Water compartmentation in plant tissue: isotopic evidence. In Somero, S.G.N., Osmond, C.B. and Bolis, C.L. (ed.), *Water and Life*, Springer, Berlin, 205-222.

Yakir, D. and da Sternberg, L.S. (2000): The use of stable isotopes to study ecosystem gas exchange. *Oecologia*, 123, 297-311.

山中勤・嶋田純 (1997) : 安定同位体分析のための信頼性ある簡便な土壌水採取法の提案, *水文・水資源学会誌*, 10, No 2, 181-184.

山中勤 (2009) : 水蒸気の同位体を利用した大気境界層研究, *気象研究ノート* 第 220 号 気象学における水安定同位体比の利用, 第5章, 61-77.

付録 1 修士論文加筆

2-4 Automatic Weather Station (AWS) データ処理

2-4-1 渦相関法

蒸発散量は Sakha S と Sakha N では渦相関法とボーエン比法で測定を行った。渦相関法は

$$L_e E = \rho l_e \overline{w'q'} \quad (22)$$

で求められた。 E は蒸発量 (mm/h), ρ は空気密度, w は鉛直風速, q は平均比湿である。 l_e は蒸発潜熱であり以下の式で求めた。

$$l_e = a + bT \quad (23)$$

$a = 3.32 \times 10^5$, $b = -2.365 \times 10^3$ である (Fritschen and Gay, 1979)。 T (K)は 0.5 m の気温 ($273.15 + t$) を用いた。

また $L_e E$ は

$$L_e E = (R_n - G) / (1 + B_o) \quad (24)$$

R_n は正味放射量, G は地中熱流量, B_o はボーエン比で以下の式に従う。

$$B_o = H / L_e E \quad (25)$$

2-4-2 ボーエン比法

Zankalon では蒸発散量を測定する機器に不具合が生じたため、渦相関法ではなく、2 高度間 (3 m と 1 m) のボーエン比を利用し、蒸発散量を推定した。ボーエン比法は杉田・田中 (2009) に従った。

$$B_o = H / L_e E = \frac{c_p}{l_e} \frac{T_1 - T_2}{q_1 - q_2} \quad (26)$$

c_p は $1005 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ (近藤, 2000) であり, T_1 , q_1 は 3 m における気温と比湿, T_2 , q_2 は 1 m における気温と比湿である。

求めたボーエン比 (B_0) を(24) に代入し, $L_e E$ を求めた.

しかし, ボーエン比法には藪崎 (2005) や 阪口 (2007) により2 高度間の水蒸気圧の差が分母となっているため, この差が0に近くなるとボーエン比は正常な値から大きく外れた値となってしまう夜間のデータの信頼性が指摘されており, 今回は日の出前と日の入り後のデータは省いた.

2-4-3 AWS 測定項目と絶対湿度補正

表15にAWSの測定項目を示したが, 温度と湿度は5.78 mのLI-7500と3, 1, 0.5 mの温湿度計というように測器が異なるため, LI-7500と温湿度計の器差補正を行う必要がある. この器差補正は2010年3/1~3/10まで本学陸域環境研究センターにて, この二つの測器を同高度・同時刻で測定を行っているのので, その際のLI-7500の絶対湿度 (kg/m^3) を3 m 付近の温湿度計の絶対湿度 (kg/m^3) に合わせるという方法を取った. 結果は図49・図50・図51のようになった. しかし図49・図50・図51のままでは, 回帰直線の決定係数があまりにも低いため, 降雨の影響が大きい相対湿度80%以上の数値と明らかな外れ値は除去した. その結果は図52・図53・図54である. エジプトにおける観測期間中のデータはこの回帰直線の傾きと切片にLI-7500で算出された絶対湿度値 (kg/m^3) を代入し補正を行った.

表 15 Automatic Weather Station (AWS) 測定項目

Location	my research item	Sensor id	type	make/type	height (m)
Zankalon/SakhaS/SakhaN	humidity/Air temperature	TRH1	ventilated hygrothermometer with radiation shield	Vaisala HMP155, with Climatec radiation shield	0.5
		TRH2	same as above	same as above	1
		TRH3	same as above	same as above	3
	soil heat flux	G	soil heat flux plate	Hukseflux HFP-01	-0.03
	wind speed	SAT	sonic anemometer	Gill Instruments R3-50	5.78
	H ₂ O density (g/m ³)/ Latent heat Flux (W/m ²)	LI7500	CO ₂ /H ₂ O open path gas analyzer	LI-COR LI-7500	5.78
	Net radiation	NR01	4-component radiometer	Hukseflux NR01	4.2
	Atmospheric Pressure	PTB210	barometer	Vaisala PTB210	0.9

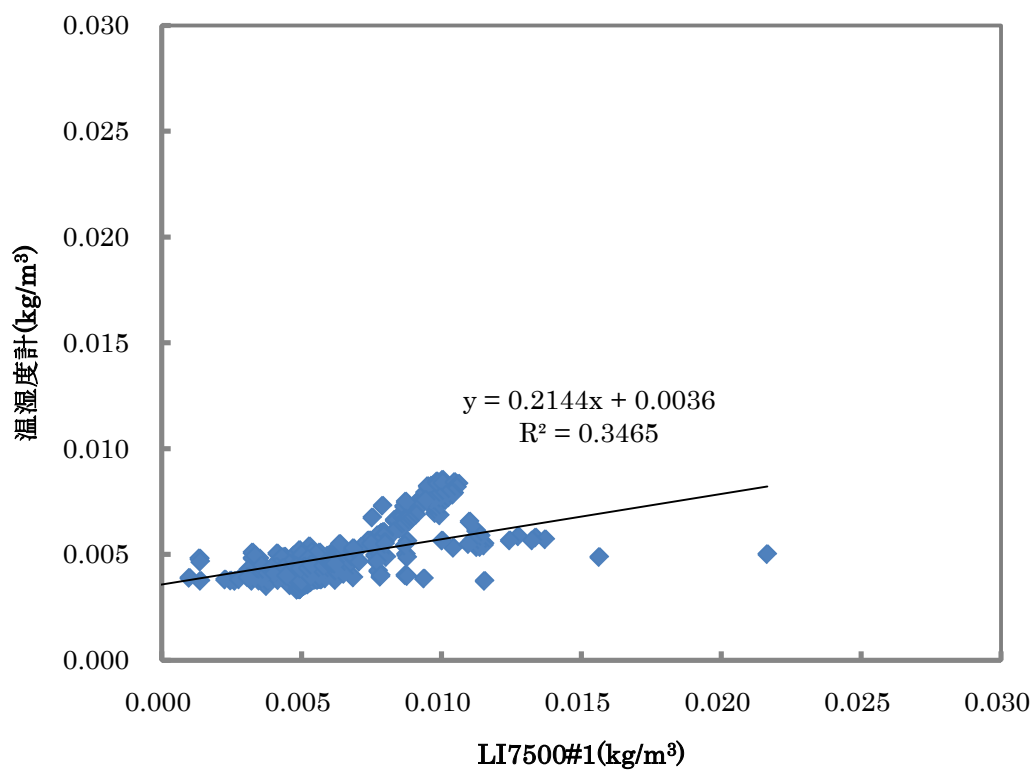


図 49 温湿度計と LI7500 生データ

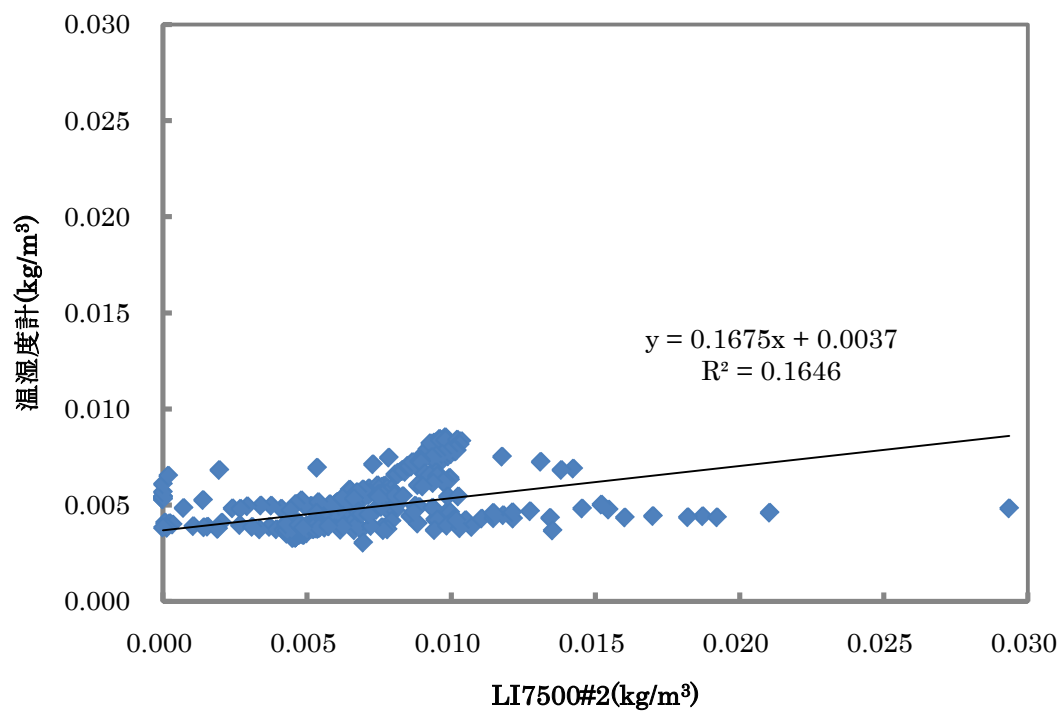


図 50 温湿度計と LI7500 生データ

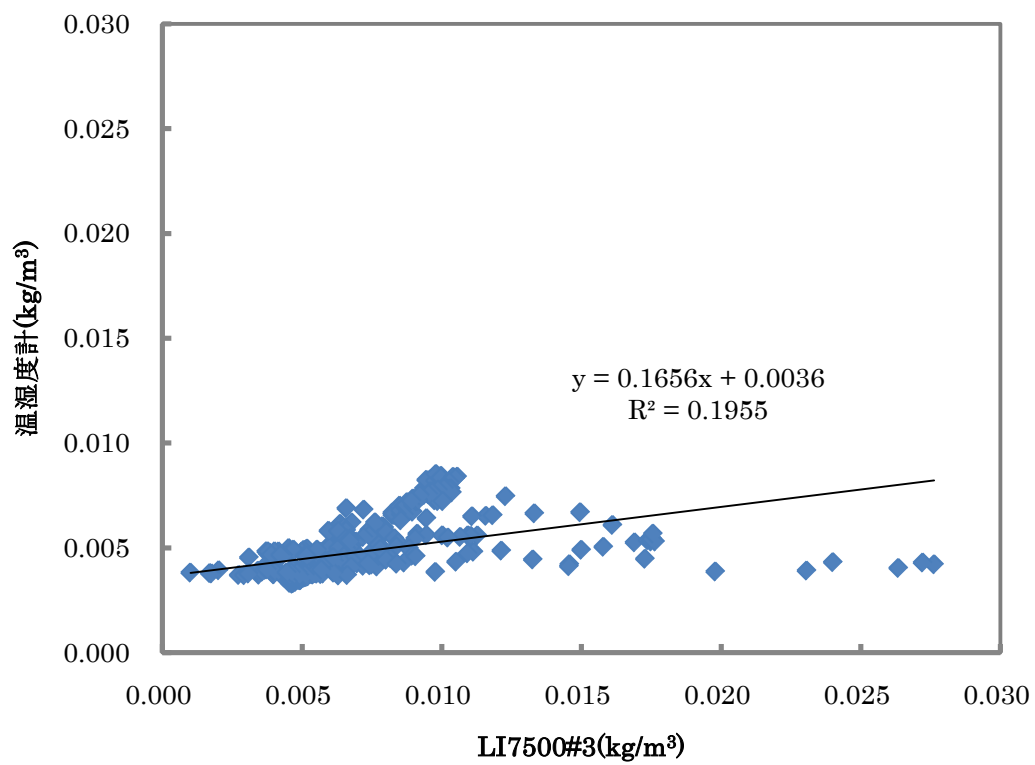


図 51 温湿度計と LI-7500 生データ

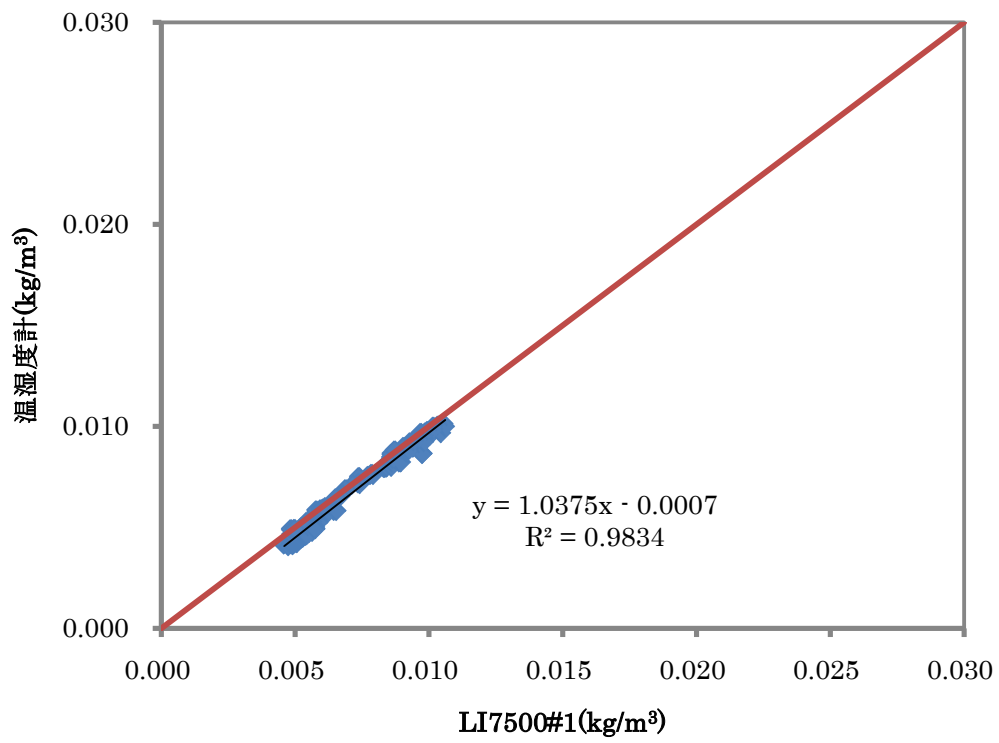


図 52 温湿度計と LI-7500 (補正值)

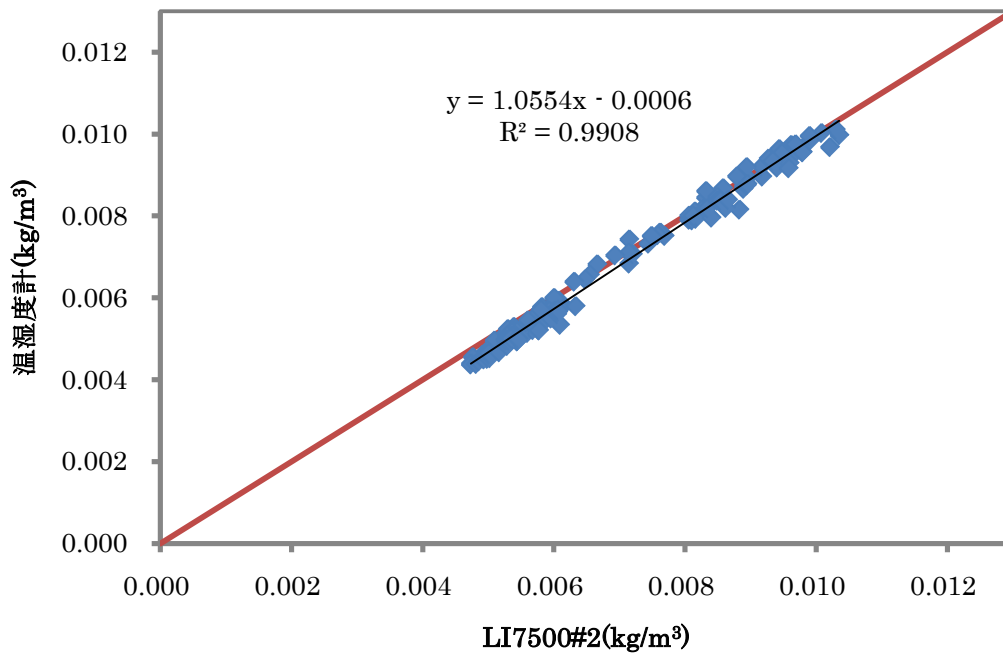


図 53 温湿度計と LI-7500 (補正值)

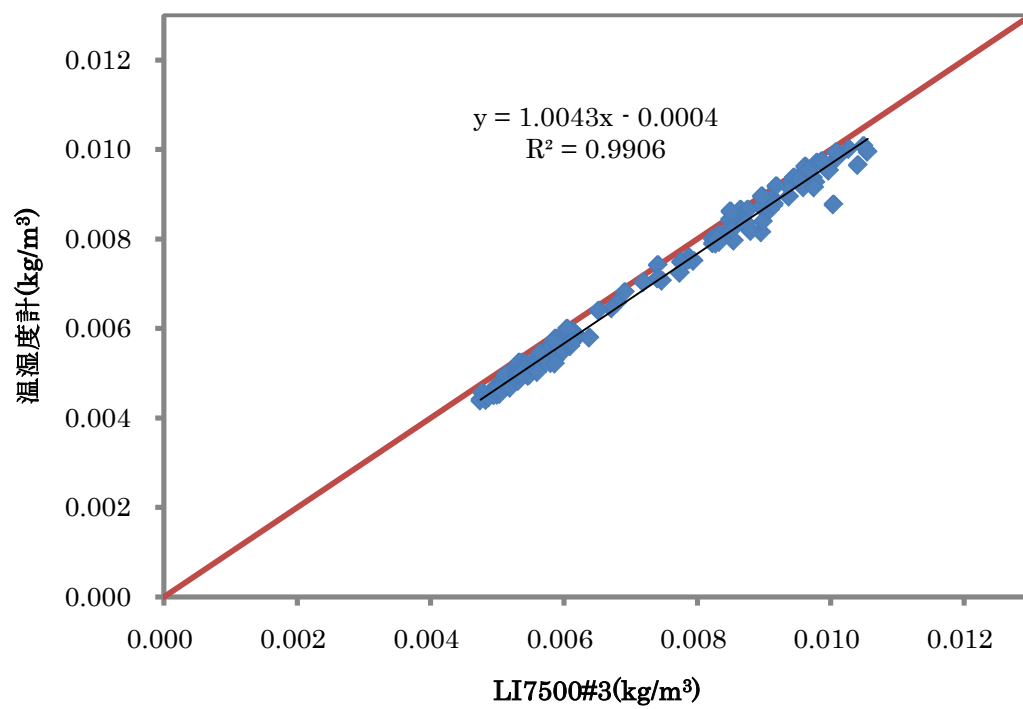


図 54 温湿度計と LI-7500 (補正值)