

エジプトナイルデルタ地域の圃場における
二酸化炭素フラックスおよび炭素循環

辻 一 成

201221169

平成 2 6 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 2 5 年度 修士（環境科学）学位論文

エジプトナイルデルタ地域の圃場における二酸化炭素フラックスおよび炭素循環

Impact of agricultural land on CO₂ flux and carbon balance in the Nile Delta Egypt

要旨

農地における炭素収支の研究は数多く行われ、多くの研究者によってその特徴が明らかになっている。しかし、これらはある短期間におけるものや単一の作物におけるものが多く、同一土壌および同一気体条件下において、異なる作物や異なる灌漑方法で長期間連続して観測したものは少ない。また特に本研究で対象としている乾燥～半乾燥地域において様々な灌漑を行っている農地の研究は極めて少ない。以上により、同環境下において炭素循環の循環過程を解明する事は重要であるとされる。そこで、本研究では乾燥地域における農地開発が行われているエジプトナイルデルタ地域の農業生態系で、3～4年程度における炭素収支の時系列変化と循環機構の解明および炭素収支を制御する環境要因の決定を目的とする。研究対象地域である、エジプト・アラブ共和国北部に位置するナイルデルタにおける3圃場(Sakha A, Sakha B, Zankalon)に設置した超音波風向風速計、オープンパスガスアナライザー(LI-7500)により観測された風速、二酸化炭素濃度などのデータから渦相関法によりCO₂フラックスを求めた。さらに現地滞在時の観測によりチャンバー法(LI-8100, LI-840A)で土壌呼吸速度、光合成速度測定装置(LI-6400XT)で植物による呼吸・光合成速度を観測したと共に気温、地温、土壌水分、植物の葉の多少の度合いを示すLAIなどを測定し、作物生育段階別CO₂フラックス収支の解析を行った。夏季主要作物であるメイズを表面灌漑で生育させたZankalon圃場に注目し、CO₂フラックス収支を純生態系CO₂交換(NEE)として挙動を示したところ、LAIの増加に従ってNEE積算値は増加し圃場に吸収の機能が見られたが、光合成活動が最も活発であるとされるLAIとNEE積算値のピーク時期は異なっていた。次に作物の成長段階別によるNEE、光合成有効放射(PAR)の日平均値を算出した。作物サイクルは播種：6月23日、収穫：9月27日で、LAIは播種日から約2ヶ月で成長のピークを迎えた。NEE日変化より、CO₂は作付け前の6月は1日を通して大気に対して放出源であるに対し、7月に入ると正午にかけて吸収源に転じピークを迎えた。8月には吸収量は減少したと共に7月に比べて夜間NEEがわずかに増加した。次にCO₂放出成分である土壌呼吸は灌漑を行う事によって土壌呼吸が9μmol m⁻² s⁻¹減少した。その直接的な要因としては土壌水分増加と地温減少が挙げられるが、そのうち地温による減少は1μmol m⁻² s⁻¹程度であったため、大部分は土壌水分増加によるものであった。また、両チャンバーと光合成速度測定装置により得られた測定値から回帰モデルを作成し、そこから算出した推定値と渦相関法による実測値を用いて圃場全体のCO₂収支量を算出した結果、2012年に注目すると、冬作では-9～5 gCm⁻²day⁻¹程度、夏作では-9～5 gCm⁻²day⁻¹程度、非作付け期間では20 gCm⁻²day⁻¹程度で

あった。また，年間で積算すると，3 圃場は炭素放出源であった。

キーワード：炭素循環，農地生態系，CO₂フラックス，渦相関法，チャンバー法

目次

1. 序論	1
1.1. 研究背景	1
1.2. 研究目的	2
2. 方法	3
2.1. 観測地点	3
2.2. 観測方法	10
2.2.1. 自動気象観測装置 (Automatic Weather Station) による気象観測	10
2.2.2. 土壌呼吸測定システム (LI-840A) による土壌呼吸測定	10
2.2.3. 全自動土壌呼吸測定システム (LI-8100A) による土壌呼吸観測	11
2.2.4. キャノピーアナライザー (LAI-2200) による植生分布量の観測	11
2.2.5. 植物光合成総合解析装置 (LI-6400XT) による光合成速度の観測	11
2.2.6. 地温および土壌水分観測	12
2.3. データの処理	23
2.3.1. 二酸化炭素濃度補正	23
2.3.2. 主風向に対する座標変換	23
2.3.3. 空気密度変動補正 (WPL 補正)	24
2.3.4. 渦相関法によるフラックス等の算出	25
2.4. データの品質管理	29
2.4.1. フラックスの絶対値	29
2.4.2. 降雨時のデータ	29
2.4.3. 夜間の u_* が小さい場合のデータ	29
2.4.4. 移動平均値からの偏差	29
2.4.5. 乱流強度	29
2.4.6. 鉛直変換角度	31
2.5. 欠損データの補完	33
2.5.1. 内挿	33
2.5.2. 平均日変化法	33
2.6. 二酸化炭素収支	33
2.6.1. 土壌呼吸量	34
2.6.2. 純一次生産	34
3. 結果および考察	36
3.1. 環境条件	36
3.2. 植生調査	42
3.3. 土壌呼吸量	46
3.3.1. 土壌呼吸測定システム (LI-840A)による結果	46
3.3.2. 全自動土壌呼吸測定システム (LI-8100A) による結果	46

3.3.3. 各チャンバーによる比較	47
3.4. 純一次生産量	76
3.5. 作物生育期間の CO ₂ フラックス	82
3.6. 回帰モデル	86
3.7. 正味炭素収支量	99
4. 結論	104
謝辞	106
引用文献	107

表目次

表 2.1	作物と灌漑管理方法	4
表 2.2	観測項目	13
表 2.3	畝の上下，点滴および乾燥部分で適用させた土壌水分のセンサー	14
表 3.1	2012 年夏季における各圃場の作物生育状況	43
表 3.2	使用したチャンバー (2012 年夏季).....	49
表 3.3	農地生態系における純一次生産推定のために使用した各圃場の LAI 実測値	77

図目次

図 2.1	対象地域 (福田 2011).....	5
図 2.2	水田の様子 (Sakha A にて 2012 年 08 月 27 日撮影).....	6
図 2.3	細溝灌漑の様子 (Sakha B にて 2012 年 09 月 11 日撮影).....	7
図 2.4	畝間灌漑の様子 (Zankalon にて 2012 年 08 月 31 日撮影).....	8
図 2.5	圃場と観測タワーの様子 (Sakha A にて 2012 年 08 月 24 日撮影)...	9
図 2.6	2012 年 9 月 16 日 Sakha B においてチャンバーのカラーをクローズした時の内部二酸化炭素濃度変化	15
図 2.7	全自動土壌呼吸測定システムの測定の様子 (チャンバーオープン時) (Sakha B にて 2012 年 09 月 11 日撮影).....	16
図 2.8	全自動土壌呼吸測定システムの測定の様子 (チャンバークローズ時) (Sakha B にて 2012 年 09 月 11 日撮影).....	17
図 2.9	キャノピーアナライザーの測定の様子 (Zankalon にて 2012 年 09 月 01 日撮影).....	18
図 2.10	植物光合成総合解析装置の測定の様子 (Sakha B にて 2012 年 09 月 16 日撮影).....	19
図 2.11	LAI の測定位置	20
図 2.12	地温および土壌水分のセンサー位置 (点滴灌漑時).....	21
図 2.13	3cm 深度におけるセンサー No. 1~7 における土壌水分の時系列変化	22
図 2.14	各圃場における日中(13 時~15 時)平均 CO ₂ 濃度の日変化 (2010 年)	26
図 2.15	補正に用いる傾き a の算出	27
図 2.16	CO ₂ 濃度補正前後の CO ₂ フラックス	28
図 2.17	CO ₂ フラックスにおける異常値除去処理前後の比較 (2010 年 Zankalon)	32
図 2.18	炭素収支の概念図	35
図 3.1	月平均気温の年変化	37
図 3.2	月平均相対湿度の年変化	38
図 3.3	月平均光合成有効放射量の年変化	39
図 3.4	2012 年 Zankalon における深度別日平均地温の推移	40
図 3.5	2012 年 Zankalon における深度別日平均土壌水分量の推移	41
図 3.6	2012 年夏季における各圃場の作物の植生高変化	44
図 3.7	2012 年夏季における各圃場の作物の LAI 変化	45
図 3.8	2011 年 07 月 18 日 Sakha A においてマニュアルチャンバーで観測した 3cm 深度の地温および土壌呼吸速度	50

図 3.9	2011年07月22日 Zankalon においてマニュアルチャンバーで観測した 3cm 深度の地温および土壌呼吸速度	51
図 3.10	2011年07月27日 Sakha B においてマニュアルチャンバーで観測した 3cm 深度の地温および土壌呼吸速度	52
図 3.11	2012年08月26日 Sakha A においてマニュアルチャンバーで観測した 3cm 深度の地温および土壌呼吸速度	53
図 3.12	2012年08月31日 Zankalon においてマニュアルチャンバーで観測した 3cm 深度の地温および土壌呼吸速度	54
図 3.13	2012年09月07日 Zankalon においてマニュアルチャンバーで観測した 3cm 深度の地温および土壌呼吸速度	55
図 3.14	2012年09月16日 Sakha B においてマニュアルチャンバーで観測した 3cm 深度の地温および土壌呼吸速度	56
図 3.15	2012年08月31日および09月07日 Zankalon においてマニュアルチャンバーで観測した 3cm 深度の地温および土壌呼吸速度の灌漑前後の比較	57
図 3.16	2012年08月31日および09月07日 Zankalon においてマニュアルチャンバーで観測した 3cm 深度の地温と土壌呼吸速度の関係	58
図 3.17	2012年08月25日 Sakha A においてロングタームチャンバーにより測定された地温(上図), 土壌呼吸(中図), タワー付近の TDR による土壌水分(下図)	59
図 3.18	2012年08月26日 Sakha A においてロングタームチャンバーにより測定された地温(上図), 土壌呼吸(中図), タワー付近の TDR による土壌水分(下図)	60
図 3.19	2012年08月27日 Sakha A においてロングタームチャンバーにより測定された地温(上図), 土壌呼吸(中図), タワー付近の TDR による土壌水分(下図)	61
図 3.20	2012年09月11日 Sakha B においてロングタームチャンバーにより測定された地温(上図), 土壌呼吸(中図), タワー付近の TDR による土壌水分(下図)	62
図 3.21	2012年09月12日 Sakha B においてロングタームチャンバーにより測定された地温(上図), 土壌呼吸(中図), タワー付近の TDR による土壌水分(下図)	63
図 3.22	2012年09月13日 Sakha B においてロングタームチャンバーにより測定された地温(上図), 土壌呼吸(中図), タワー付近の TDR による土壌水分(下図)	64
図 3.23	2012年09月15日 Sakha B においてロングタームチャンバーにより測定された地温(上図), 土壌呼吸(中図), タワー付近の TDR による土壌水分(下図)	65
図 3.24	2012年09月16日 Sakha B においてロングタームチャンバーにより測定された地温(上図), 土壌呼吸(中図), タワー付近の TDR による土壌	

水分(下図)	66
図 3.25 2012年08月31日 Zankalonにおいてロングタームチャンバーにより測定された地温(上図), 土壌呼吸(中図), タワー付近の TDR による土壌水分(下図).....	67
図 3.26 2012年09月01日 Zankalonにおいてロングタームチャンバーにより測定された地温(上図), 土壌呼吸(中図), タワー付近の TDR による土壌水分(下図).....	68
図 3.27 2012年09月06日 Zankalonにおいてロングタームチャンバーにより測定された地温(上図), 土壌呼吸(中図), タワー付近の TDR による土壌水分(下図).....	69
図 3.28 2012年09月07日 Zankalonにおいてロングタームチャンバーにより測定された地温(上図), 土壌呼吸(中図), タワー付近の TDR による土壌水分(下図).....	70
図 3.29 2012年09月08日 Zankalonにおいてロングタームチャンバーにより測定された地温(上図), 土壌呼吸(中図), タワー付近の TDR による土壌水分(下図).....	71
図 3.30 土壌水分が異なる時の地温と土壌呼吸の関係 (Sakha B).....	72
図 3.31 土壌水分が異なる時の地温と土壌呼吸の相関 (Zankalon).....	73
図 3.32 チャンバーの透明・不透明の違いによる地温および土壌呼吸の相関の差.....	74
図 3.33 2012年09月07日におけるチャンバー法による土壌呼吸比較	75
図 3.34 2012年08月26日 Sakha A にて測定した植物の光合成速度の日変化 (ライス).....	78
図 3.35 2012年09月15日 Sakha B にて測定した植物の光合成速度の日変化 (メイズ).....	79
図 3.36 2012年08月31日, 09月01日, 09月08日 Zankalon にて測定した植物の光合成速度の日変化 (メイズ).....	80
図 3.37 対象とした3圃場の群落生態系における光合成速度の日変化	81
図 3.38 作物生育期間における各環境要因の変動 (2012年 Zankalon).....	84
図 3.39 作物生育期間における CO ₂ フラックスの日変化 (2012年 Zankalon)	85
図 3.40 2011年 Sakha A における 3cm 深度地温とタワーにより観測された夜間(18:00-05:30)の土壌呼吸の関係	88
図 3.41 2012年 Sakha A における 3cm 深度地温とタワーにより観測された夜間(18:00-05:30)の土壌呼吸の関係	89
図 3.42 2011年 Sakha B における 3cm 深度地温とタワーにより観測された夜間(18:00-05:30)の土壌呼吸の関係	90
図 3.43 2012年 Sakha B における 3cm 深度地温とタワーにより観測された夜間(18:00-05:30)の土壌呼吸の関係	91
図 3.44 2011年 Zankalon における 3cm 深度地温とタワーにより観測された	

	夜間(18:00-05:30)の土壌呼吸およびロングターチャンバーにより観測された土壌呼吸の関係 (エラーバーは標準偏差).....	92
図 3.45	2012年 Zankalon における 3cm 深度地温とタワーにより観測された夜間(18:00-05:30)の土壌呼吸およびロングターチャンバーにより観測された土壌呼吸の関係 (エラーバーは標準偏差).....	93
図 3.46	Zankalon における不透明チャンバーによる地温と土壌呼吸の相関.....	94
図 3.47	下向き短波放射と光分解による関係 (2011, 2012年 Zankalon)....	95
図 3.48	光合成速度測定装置により観測された作物別の光合成速度と光合成有効放射(PAR)との関係.....	96
図 3.49	回帰モデルにより得られた NEE (2012年夏季 作付け期間)	97
図 3.50	回帰モデルにより得られた NEE (2012年夏季 非作付け期間).....	98
図 3.51	タワーにより観測された NEE の欠損部分に回帰モデルによって得られた結果で補間した月積算 NEE (2011年).....	100
図 3.52	タワーにより観測された NEE の欠損部分に回帰モデルによって得られた結果で補間した月積算 NEE (2012年).....	101
図 3.53	2012年における冬作作付け期間, 夏作作付け期間, 非作付け期間における日積算 NEE	103

1. 序論

1.1. 研究背景

地球上の大気中二酸化炭素濃度は年々上昇しており、温室効果ガスによる地球温暖化問題が今日でも重要な課題とされている。なかでも二酸化炭素による温暖化への影響は最も大きいとされており、今後温暖化が継続すれば気候変動や植生の変化など様々な問題が予測されている。そういった課題を背景に、さまざまな陸域生態系における二酸化炭素収支の把握が重要視され、詳細な解明が求められている。中でも森林や草原での二酸化炭素収支の研究は数多く行われており、例えば、Li *et al.*, (2005) はモンゴルの北方林で二酸化炭素収支を表した NEE (純生態系 CO₂ 交換) の年変動を解析し、葉の成長が著しい夏季以前においてわずかな炭素吸収があるものの累積値では炭素放出となる事や、7 月頃から炭素吸収が著しく増加し吸収量と成長期のピークが一致した事、そして 9 月頃には再び炭素放出源に転じる事を述べた。また、浦野 (2004) ではモンゴル草原において土壌呼吸の実測値から得られた回帰式から年次変動を求め、放牧区と禁牧区ともに 5 月以降 7 月まではほとんど大気に対して炭素放出源で 7 月からのバイオマスの増加に伴って急速に吸収源に転じ、10 月末に植物が枯死するまで吸収が継続した事を示した。また、放牧区と禁牧区の年次変動の結果より、2003 年は両地点ともに炭素吸収源として機能している事を示した。また、農地生態系においても、作付け期間については作物の光合成による炭素吸収が存在する事から、炭素収支の観測も行われており、例えば崔・井上 (2004) は黒ボク畑地において LAI の違いによって作物の成長段階別に炭素収支の日変化を求め、裸地期間や収穫後の期間においては放出成分の土壌呼吸の日変化が見られた事や、成長段階別に吸収量が増加する事を示した。また、Hui-Min・Da-Wen (2010) は同圃場で異なる作物の非生育期間、生育期間中の炭素収支を求め、特に生育期間中の日最大吸収量はトウモロコシとコムギはともに $-10 \text{ [gCm}^{-2}\text{day}^{-1}]$ 程度であることを算出した。農地における炭素収支の研究は数多く行われ、多くの研究者によってその特徴が明らかになっている。しかし、これらはある短期間におけるものや単一の作物におけるものが多く、異なる作物や異なる灌漑方法で長期間連続して観測したものは多くない。また、特に乾燥～半乾燥地域において様々な灌漑を行っている農地の研究は極めて少なく、これまで研究された農地と同程度の炭素吸収機能もしくは放出機能を持っているかどうか分からない。以上のことより、同環境下において炭素循環のメカニズムを解明する事は重要であるとされる。

乾燥～半乾燥地域に属するエジプトは降雨が少ない事から水資源に乏しく、ナイル川の水資源を利用した灌漑によって農業生産活動が行われており、近年になって将来予測される人口増加に対応するため砂漠地域での農地開発が進められている。そのため、特にこれから増えると予測される農地での観測は農業生態系における二酸化炭素収支を大きく左右させる重要なものになると言える。しかし、エジプトの農地において作物の種類や灌漑管理方法による炭素収支の違いや、炭素吸収源または放出源としての機能があるかどうかなどの詳細な調査がなされていない。

1.2. 研究目的

本研究では乾燥・半乾燥地域において農地開発が行われているエジプトナイルデルタ地域における農地生態系での長期的な炭素収支と循環機構の解明および炭素収支を制御する環境要因の決定とメカニズムの把握，また正味炭素収支量の算定を目的とした。

2. 方法

2.1. 観測地点

本研究ではエジプト・ナイルデルタに位置する Sakha A, Sakha B, Zankalon の 3 圃場を研究対象地域とした。それぞれの圃場の位置は(31°05'54.7"N, 30°55'21"E), (31°05'54.6"N, 30°55'21.2"E), (30°34'50.04"N, 31°25'59.94"E)となっている。それぞれの圃場は大きさ約 200m×200m の広さがあり、その中には同種類の作物が広がっている。また毎年季節ごとに異なる作物を栽培し、異なる灌漑管理方法が行われている。本研究の対象期間における作物・灌漑管理方法については表 2.1 および図 2.2 から 2.4 にてまとめた。図 2.2 は水田を表しており、圃場全体は葉が水没しない程度に冠水しており土壌水分は飽和状態に保たれている。図 2.3 は細溝灌漑を表しており、水が供給される場所付近に植物を植えて水を供給しやすくしている方法である。図 2.4 は畝間灌漑を表しており、メスカと呼ばれる二次水路から水を流し、圃場が冠水するほどに供給される。また、点滴灌漑は土壌面に敷かれたチューブの穴から水を供給する仕組みであり、チューブとチューブの間隔は約 90cm で、エミッター (チューブの穴) の間隔は約 40cm である。マルチングは土壌面の上にマルチ材と呼ばれる藁を敷くことである。マルチ材として敷かれている藁は平均して約 0.4kg/m² の密度で敷かれている (福田 2012)。

表 2.1 作物と灌漑管理方法

2010年 夏季			2010-2011年 冬季		2011年 夏季		2011-2012年 冬季	
	作物	管理方法	作物	管理方法	作物	管理方法	作物	管理方法
Sakha A	トウモロコシ	畝間灌漑	テンサイ	畝間灌漑	トウモロコシ	畝間灌漑	コムギ	畝間灌漑
Sakha B	トウモロコシ	点滴灌漑	テンサイ	点滴灌漑	トウモロコシ	点滴灌漑	コムギ	畝間灌漑
Zankalon	トウモロコシ	畝間灌漑+マルチング	テンサイ	畝間灌漑+マルチング	トウモロコシ		ベルシウム	畝間灌漑

2012年 夏季			2012-2013年 冬季		2013年 夏季		2013-2014年 冬季	
	作物	管理方法	作物	管理方法	作物	管理方法	作物	管理方法
Sakha A	コメ	水田	テンサイ		トウモロコシ	畝間灌漑		
Sakha B	トウモロコシ	細溝灌漑	テンサイ		トウモロコシ	点滴灌漑		
Zankalon	トウモロコシ	畝間灌漑	ベルシウム		トウモロコシ	細溝灌漑		

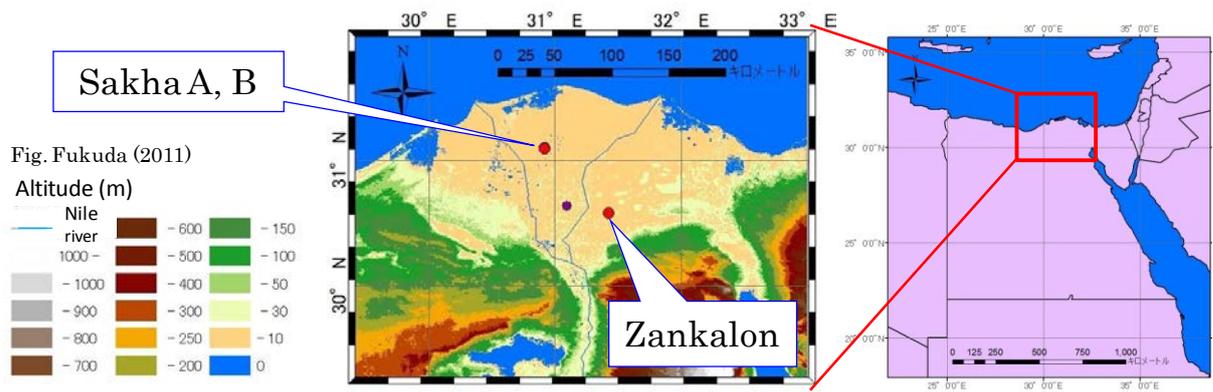


図 2.1 対象地域 (福田 2011)



図 2.2 水田の様子 (Sakha A にて 2012 年 08 月 27 日撮影)



図 2.3 細溝灌漑の様子 (Sakha B にて 2012 年 09 月 11 日撮影)



図 2.4 畝間灌漑の様子 (Zankalon にて 2012 年 08 月 31 日撮影)



図 2.5 圃場と観測タワーの様子 (Sakha A にて 2012 年 08 月 24 日撮影)

2.2. 観測方法

観測は、大きく分けて、自動気象観測装置 (Automatic Weather Station) による気象観測, 土壌呼吸測定システム (LI-840A) による土壌呼吸観測, 全自動土壌呼吸測定システム (LI-8100A) による土壌呼吸観測, キャノピーアナライザー (LAI-2200) による植生分布量の観測, 植物光合成総合解析装置 (LI-6400XT) による光合成速度の観測の4つである. 機器についての製造元と型名は表 2.2 に示す. 本研究で対象とする観測期間は, 観測タワーを設置した 2010 年 6 月から 2013 年 9 月にかけてであり, このうち 2012 年夏季 (2012 年 8 月 22 日 - 9 月 22 日) においては土壌呼吸量や光合成速度などの現地観測を行い, この期間におけるデータを中心に考察を行う.

2.2.1. 自動気象観測装置 (Automatic Weather Station) による気象観測

2010 年 6 月に観測タワーが設置されて以来, 連続して観測が行われている. 各観測機器をタワーに取り付け, それぞれの項目を測定した. また, 観測項目および観測機器, 観測高度, サンプルング時間, 平均化時間, ロガー出力時刻を表 2.2 にまとめた. なお風速 3 成分 u, v, w [m/s], 気温 T [°C], 水蒸気密度 ρ_v [kg/m³], 二酸化炭素濃度 ρ_c [mmol/m³] に関しては,

$$\text{分散} : \sigma_{xr} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (1)$$

$$\text{共分散} : \overline{xy}_r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n} \quad (2)$$

についても 30 分毎に記録している. ここで添え字の r は生データからの偏差である事を意味し, x_i, y_i は任意の物理量の瞬間値, \bar{x}, \bar{y} はその 30 分平均値を示す. また, n [= 18000] は 30 分間のデータ数を表している.

2.2.2. 土壌呼吸測定システム (LI-840A) による土壌呼吸測定

土壌中の微生物分解および根の呼吸による二酸化炭素放出量についてはチャンバー法を用いて測定を行った. それらの和である土壌呼吸については浦野 (2004), 松野 (2011) を元に作成した式 (3) を用いて算出した. また, 特に 2012 年夏季の観測において, Sakha B, Zankalon については畝の上を対象として定点観測を行った.

$$Fc = \Delta c \times \frac{v}{a} \times P \times M \times \frac{1}{RT} \times 3600 \quad (3)$$

ここで, Fc [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] は土壌呼吸, v [m^3] は体積, a [m^2] は底面積, P [atm] は大気圧, M [g mol^{-1}] は分子量, R [$\text{atm m}^3 \text{K}^{-1} \text{mol}^{-1}$] は気体定数, T [K] は気温である. なお, Δc については, 図 2.6 の赤いラインに示すようにチャンバーをクローズして測定を開始してから 3 秒

間の二酸化炭素濃度増加率を計算に用いた。

2.2.3. 全自動土壌呼吸測定システム (LI-8100A) による土壌呼吸観測

土壌中の微生物分解および根の呼吸による二酸化炭素放出量についてはチャンバー法を用いて測定を行った。それらの和である土壌呼吸は式(4)を用いて算出した。また、特に Sakha B, Zankalon については畝の上を対象として定点観測を行った。

$$FC = \frac{10VP_0 \times \left(1 - \frac{W_0}{1000}\right) \partial C}{RS \times (T_0 + 273.15)} \frac{\partial C}{\partial t} \quad (4)$$

ここで、 FC [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] は土壌呼吸、 V [cm^3] は体積、 P_0 [kPa] は初期圧力、 W_0 [mmol mol^{-1}] は初期水蒸気モル分率、 R [$\text{Pa m}^3 \text{K}^{-1} \text{mol}^{-1}$] は気体定数、 S [cm^2] は土壌表面積、 T_0 [$^{\circ}\text{C}$] は初期気温、 $\partial C / \partial t$ [$\mu\text{mol}^{-1} \text{mol s}^{-1}$] は水蒸気補正された二酸化炭素モル分率の初期変化率である。

2.2.4. キャノピーアナライザー (LAI-2200) による植生分布量の観測

群落生態系における全光合成量および植生の成長による光合成量の変化量を得るため植生情報である LAI (Leaf Area Index (葉面積指数)) を観測した。キャノピーアナライザーはセンサー部分に魚眼レンズへの入射光を、角度分割しそれぞれの光吸収を同時に測定することにより植物群落の LAI を測定する。測定手順は、まず植物群落上にて太陽の入射光を測定し、次に群落内の地上数 cm の高さで透過光を測定する。そしてこれら両者の測定値から内蔵されたコンピュータ計算により LAI が計算される。それぞれの測定回数については、まず太陽の入射光を 1 回測定し、次に地上数 cm の高さで透過光を 5 回測定する。最後に再び太陽の入射光を 1 回測定する。再び太陽の入射光を 1 回測定し、次に植生高の 1/2 の高さで透過光を 5 回測定する。最後に再び太陽の入射光を 1 回測定する。この測定により、あるエリアにおける群落と群落高 1/2 の地点における LAI を得る事が出来た。

2.2.5. 植物光合成総合解析装置 (LI-6400XT) による光合成速度の観測

タワーにより観測された群落生態系における光合成速と植物の呼吸量のある植物個体による光合成速度と植物の呼吸量との比較を行うために光合成速度を測定した。植物光合成総合解析装置は、サンプル用とリファレンス用の 2 機の独立した分析計で炭酸ガスを測定し、それらの差から光合成速度を算出する。植物によって行われる光合成の日変化を測定することで、群落生態系における総二酸化炭素吸収量を算出した。測定は展開葉 (葉が広がった状態にあるもの) を対象とし、葉の先端から 1/3 の場所を測定した。また最も高い位置にある展開葉と植生高の 1/2 の場所にある展開葉の 2 箇所を測定を行い、日射の当たり具合による光合成速度の違いも算出した。

また、農地生態系での炭素収支を算出するためには葉単体の光合成速度から農地生態系全体の光合成速度の値にスケールアップが必要があり、以下の式を用いてその換算を行った。

$$LAI_{\frac{1}{2}h} = \int_{\frac{1}{2}h}^h L_A(h)dh \quad (5)$$

$$LAI = LAI_h = \int_0^h L_A(h)dh \quad (6)$$

$$\Delta LAI = LAI_h - LAI_{\frac{1}{2}h} = \int_0^{\frac{1}{2}h} L_A(h)dh \quad (7)$$

$$\text{群落における } (GPP + AR) = LAI_{\frac{1}{2}h} \times (GPP + AR)_{\text{above}} + \Delta LAI \times (GPP + AR)_{\text{below}} \quad (8)$$

ここで、 $L_A(h)$ は $z = h$ における単位面積当たりの葉面積、 ΔLAI は植生高の 1/2 の地点と最下部の地点での LAI の差を示している (表 3.3) . スケールアップの際には、それぞれ上部と下部で測定した光合成速度と呼吸量の和にそれぞれ上部と下部の LAI を掛け算してその和をもって求めた. 群落における $(GPP+AR)$ [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] は農地生態系に換算した後の光合成速度と呼吸量の和、 $(GPP+AR)_{\text{above}}$ [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] と $(GPP+AR)_{\text{below}}$ [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] はそれぞれ植生高の 1/2 の地点と最下部の地点で測定した葉単体の光合成速度と呼吸量の和を示している.

2.2.6. 地温および土壌水分観測

地温および土壌水分量については 3, 10, 20, 40, 80 の 5 深度において 30 分毎に観測を行っている. センサー埋設位置は図 2.12 に示す. また、それぞれの作付け期における畝の上、畝の下における地温と土壌水分を観測したセンサーの選定を行った. 畝の上の直下にある場合では時間経過による土壌水分の逡減が大きいとされ、また、畝の下の直下にある場合では高い土壌水分を保持したまま徐々に減少する. また、畝が存在しない点滴灌漑の場合、水を供給するチューブの直下にある場合では灌漑による急激な土壌水分増加が確認されるが、それ以外の場所であれば土壌水分は一定である. このような定義をしてそれぞれ選定を行った. 図 2.13 上図の例では、全センサーが灌漑による土壌水分増加を観測しているが、No.4 について時間経過による逡減が激しいと分かる. そのためこの場合畝の上の直下にあるのが No.4 のセンサーだとして、畝の下の直下にあるのが No.6 のセンサーとした. また図 2.13 下図の例では、点滴灌漑による土壌水分増加が観測されたのが No.2, No.3 であるため、No.2 を点滴場所のセンサー、そして No.6 を乾燥場所のセンサーとした. それぞれ観測期間におけるセンサーの選定については表 2.3 にまとめた.

表 2.2 観測項目

観測項目		測器	測定高度	測定時刻	平均化時間	ロガー出力時刻
風速3成分 u, v, w	[m/s]	超音波風速温度計	5.78 m	毎 0.1 秒	前 30 分	毎時 0, 30 分
音仮温度 T	[°C]	(GILL Instruments R3-50)				
水蒸気濃度 ρ_v	[mmol/m ³]	オープンパスガスアナライザー	5.78 m	毎 0.1 秒	前 30 分	毎時 0, 30 分
二酸化炭素濃度 ρ_c	[mmol/m ³]	(LI-COR, Inc., LI-7500)				
短波放射 S^\uparrow, S^\downarrow	[W/m ²]	4成分放射計	4.20 m	毎 10 秒	前 30 分	毎時 0, 30 分
長波放射 L^\uparrow, L^\downarrow	[W/m ²]	(Hukseflux NR01)				
気温 T_a 湿度 Rh	[°C] [%]	温湿度計 (3高度)	3.00 m	毎 10 秒	前 30 分	毎時 0, 30 分
		(Vaisala MP155, with	1.00 m			
		Climatec radiation shield)	0.50 m			
気圧 P	[hPa]	気圧計 (Vaisala PTB210)	0.50 m	毎 0.1 秒	前 30 分	毎時 0, 30 分
地中熱流量 G	[W/m ²]	地中熱流板 (Hukseflux HFP-01)	0.03 m	毎 10 秒	前 30 分	毎時 0, 30 分

表 2.3 畝の上下，点滴および乾燥部分で適用させた土壌水分のセンサー

Field	Date	Sensor No.		Irrigation Management
		Top of a furrow, No Drip area	Bottom of a furrow, Drip area	
Sakha A	2010/06/18-2010/12/31	No. 5	No. 1	Surface irrigation
	2011/01/01-2011/12/31	No. 4	No. 6	Surface irrigation
	2012/01/01-2012/12/31	No. 4	No. 2	Paddy
Sakha B	2010/06/06-2010/12/31	No. 1	No. 3	Drip irrigation
	2011/01/01-2011/12/31	No. 6	No. 2	Drip irrigation
	2012/01/01-2012/07/18	No. 4	No. 6	Surface irrigation
	2012/07/18-2012/12/31	No. 4	No. 1	Strip irrigation
Zankalon	2010/8/24-2010/12/31	No. 3	No. 6	Surface irrigation
	2011/01/01-2011/06/15	No. 3	No. 6	Surface irrigation
	2011/06/16-2011/12/31	No. 6	No. 2	Surface irrigation
	2012/01/01-2012/06/23	No. 6	No. 2	Surface irrigation
	2012/06/24-2012/12/31	No. 5	No. 6	Surface irrigation

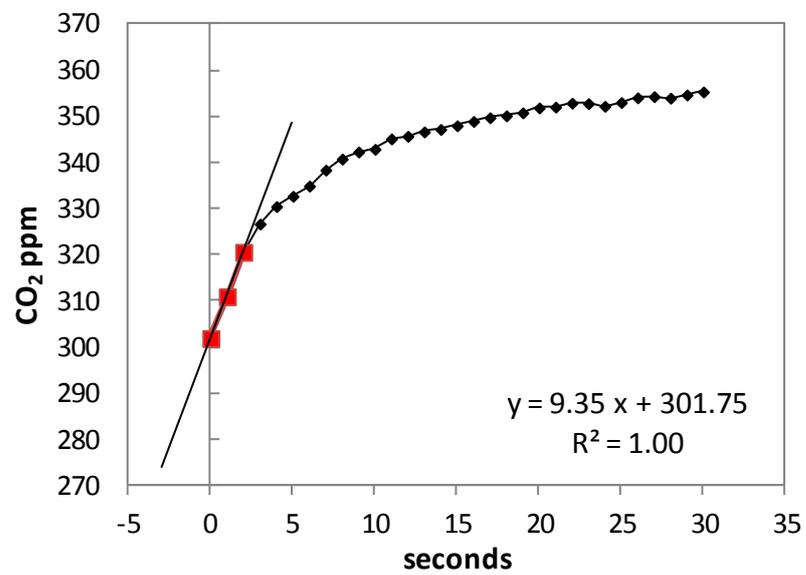


図 2.6 2012年9月16日 Sakha Bにおいてチャンバーのカラーをクローズした時の内部二酸化炭素濃度変化



図 2.7 全自動土壌呼吸測定システムの測定の様子 (チャンバーオープン時)
(Sakha B にて 2012 年 09 月 11 日撮影)



図 2.8 全自動土壌呼吸測定システムの測定の様子 (チャンバークローズ時)
(Sakha B にて 2012 年 09 月 11 日撮影)



図 2.9 キャノピーアナライザーの測定の様子 (Zankalonにて2012年09月01日撮影)



図 2.10 植物光合成総合解析装置の測定の様子 (Sakha Bにて2012年09月16日撮影)

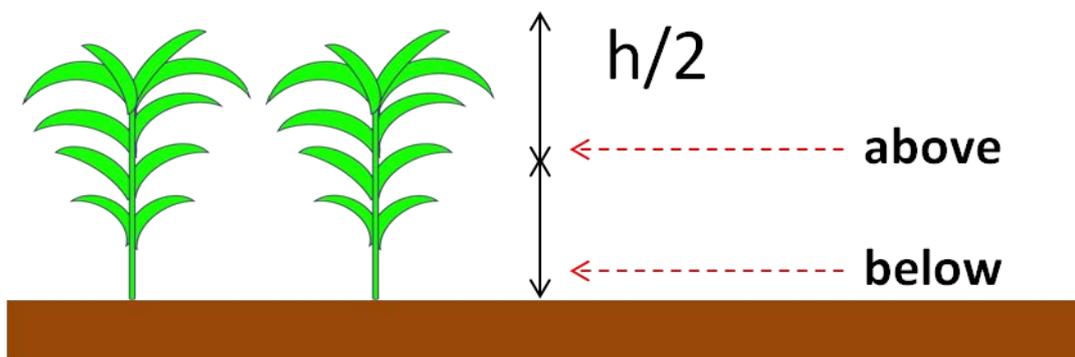


図 2.11 LAI の測定位置

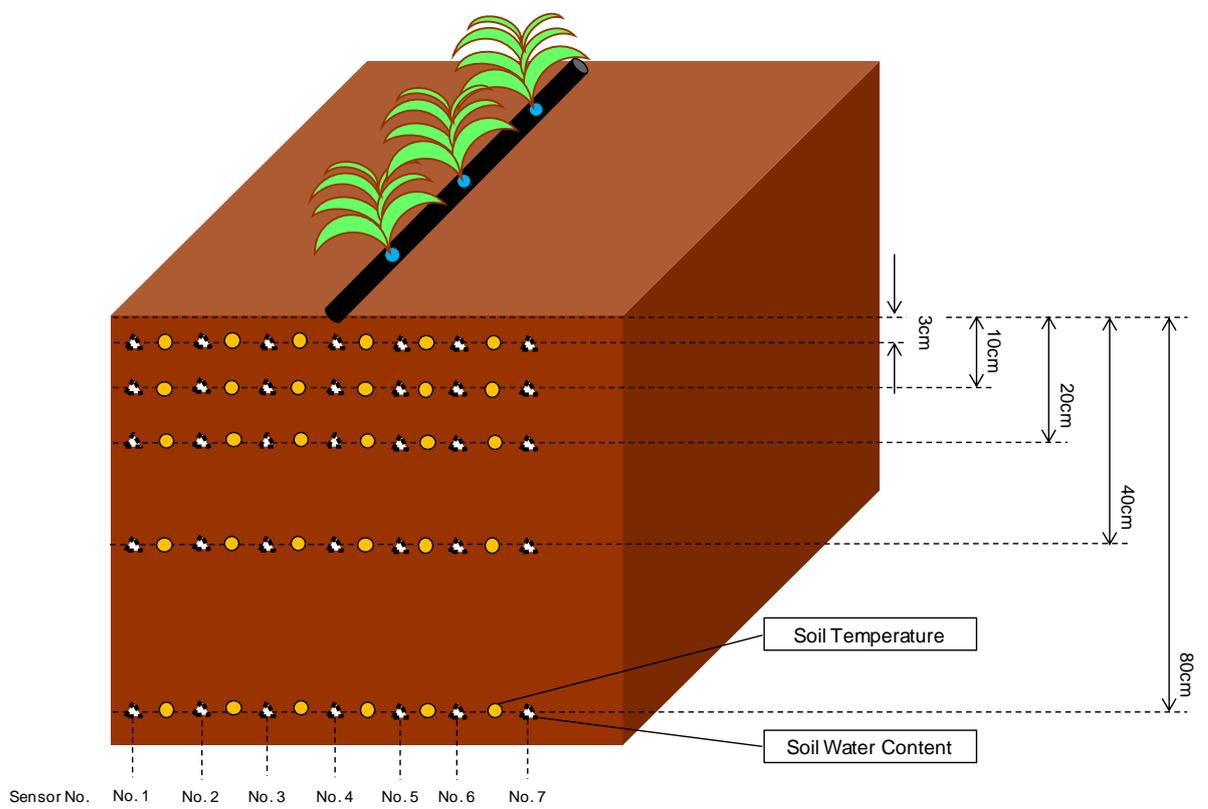


図 2.12 地温および土壌水分のセンサー位置 (点滴灌漑時)

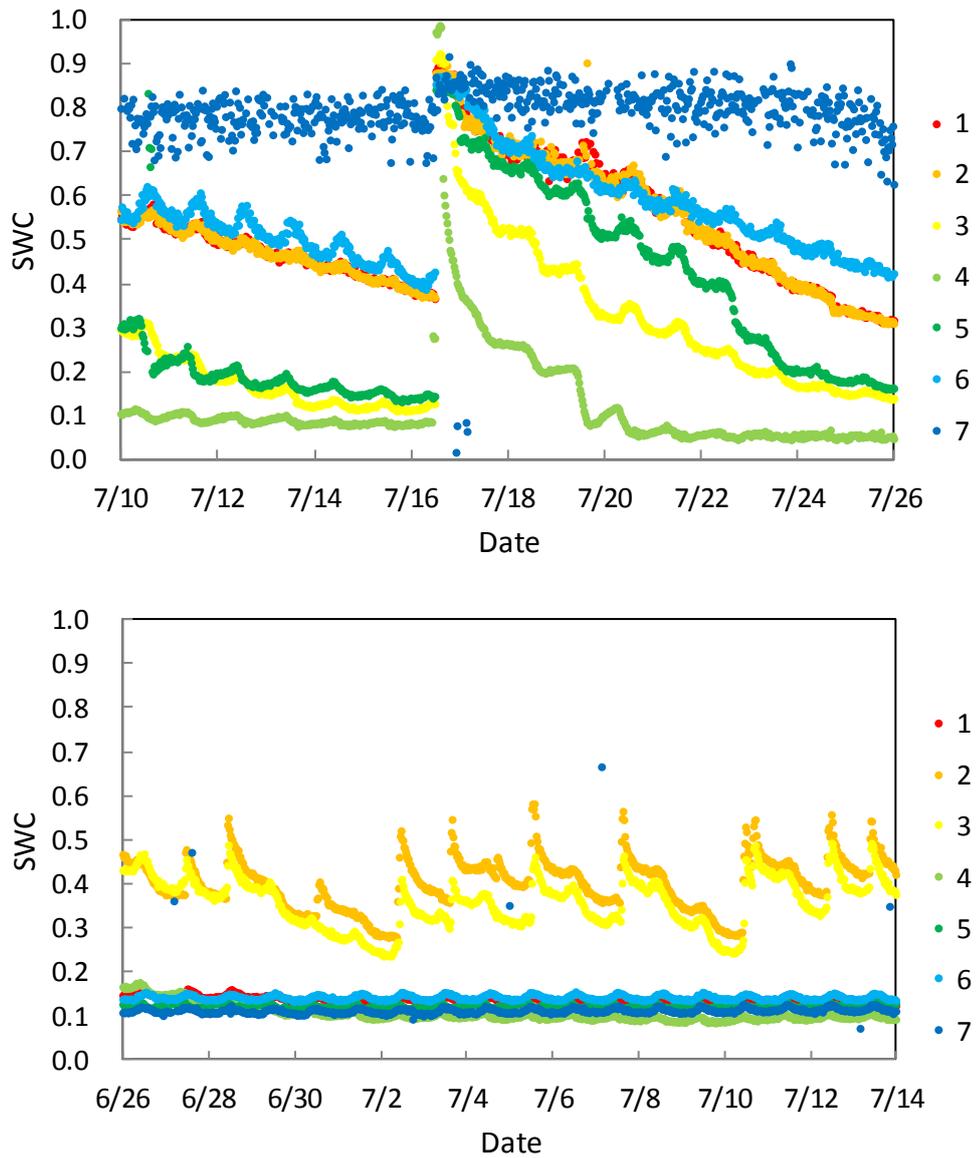


図 2.13 3cm 深度におけるセンサーNo. 1～7 における土壌水分の時系列変化
 上図：2011 年 Sakha A (畝間灌漑)
 下図：2011 年 Sakha B (点滴灌漑)

2.3. データの処理

自動気象観測装置による観測データのデータ処理方法について示す。

2.3.1. 二酸化炭素濃度補正

各圃場に設置した機器間による観測誤差を無くすために、二酸化炭素濃度による生データの補正を行った。これは、各圃場において測定された大気中の二酸化炭素濃度は一定であるという仮定に基づいたものである。まず、各圃場における昼間 (13:00–15:00) の二酸化炭素濃度データを時系列として比較し、そのうちずれが大きいものを目視で判断する。そしてずれが小さい他の2つの値のうち、ずれの大きいものと近い地点のデータを真値とし、両者の関係を式により1週間ごとに求める。 \hat{y} を真値の二酸化炭素平均濃度、 a を係数、 x をずれた地点の二酸化炭素濃度とする。図 2.14 は、2010年7月における各地点の日中の二酸化炭素濃度の日平均値を表したものであり、この例であれば、Zankalon が他の2地点よりもずれが生じている事が確認されたため、Zankalon において二酸化炭素濃度補正を行った。また補正に用いる補正係数 a の算出は図 2.15 から $a = 1.0021$ と求めた。

$$\hat{y} = ax \quad (9)$$

次に算出された係数 a の値の変化をグラフ化し、滑らかに変化していれば求められた a の値を使って式によりフラックスの補正を行う。ただし、滑らかに変化していなければさらに細分化して1日ごとに係数 a を求めて同様の操作を行う。 y を補正後のフラックスデータ、 x を観測されたフラックスデータとする。

$$y = ax \quad (10)$$

2.3.2. 主風向に対する座標変換

30分平均値の分散・共分散について、フラックス算出のためには水平一様な地形上で鉛直風速 w の平均が 0 である必要があるため、主風向に対する座標変換を水平方向と鉛直方向について行った(宮田 2004)。計算方法は Asia Flux 運営委員会 (2003) に従い以下の通りに行った。

・水平方向の主風向変換

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

$$\vartheta = \tan^{-1} \left(\frac{Y}{X} \right) \quad (11)$$

$$U = X \cos \theta + Y \sin \theta \quad (12)$$

$$V = -X\sin\theta + Y\cos\theta \quad (13)$$

となる．結果，平均操作に対しては次のようになる．

$$\bar{V} = -\bar{X}\sin\theta + \bar{Y}\cos\theta = (-\bar{X}\tan\theta + \bar{Y})\cos\theta = 0 \quad (14)$$

・鉛直方向の主風向変換

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

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{\bar{W}}{\bar{U}}\right) \quad (15)$$

$$U_c = U\cos\alpha + W\sin\alpha \quad (16)$$

$$W_c = -U\sin\alpha + W\cos\alpha \quad (17)$$

とする．結果，平均操作に対しては次のようになる．

$$\bar{W}_c = -\bar{U}\sin\alpha + \bar{W}\cos\alpha = (-\bar{U}\tan\alpha + \bar{W})\cos\alpha = 0 \quad (18)$$

2.3.3. 空気密度変動補正 (WPL 補正)

Webb *et al.* (1980) によれば，微量気体のフラックスについて空気密度が変動している場合には，乱流輸送量における平均流による輸送量を考慮しないという仮定が成立しなくなると仮定している．そのため Asia Flux 運営委員会 (2003) に従い以下の通りに補正を行った．

$$\overline{w\rho_v} = \left(1 + \frac{e}{\rho_a}\right) \left(\overline{w\rho_v} + \frac{\rho_v}{T}\overline{wT}\right) \quad (19)$$

$$\overline{w\rho_c} = \overline{w\rho_{c,r}} + \mu\frac{\rho_c}{\rho_a} \cdot \overline{w\rho_{c,r}} \cdot 10^{-3} + \left(1 + \mu\frac{\rho_v}{\rho_a} \cdot 10^{-3}\right) \left(\frac{\rho_c}{T} + \overline{wT}_r\right) \quad (20)$$

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

$$e = \frac{\rho_v T}{216.7} \quad (21)$$

$$\rho_a = 1.293 \cdot \frac{273.15}{T} \cdot \frac{P-0.378e}{1013.25} \quad (22)$$

2.3.4. 渦相関法によるフラックス等の算出

これまでの処理によって補正された共分散を用いて、顕熱フラックス H [W/m^2], 潜熱フラックス lE [W/m^2], 二酸化炭素フラックス C [$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$], および摩擦速度 u^* [m/s]をそれぞれ渦相関法により求めた。ただし、いずれのフラックスも鉛直上向きを正とする。

$$H = C_p \rho_a \overline{wT} \quad (23)$$

$$lE = \overline{lw \rho_v} \quad (24)$$

$$C = \overline{w \rho_c} \quad (25)$$

$$u^* = \sqrt[4]{(\overline{uw})^2 + (\overline{vw})^2} \quad (26)$$

ここで、 C_p [$\text{J}/\text{kg}/\text{K}$]は大気の定圧比熱、 l [J/kg]は蒸発潜熱であり、それぞれ以下の式によって算出した。

$$C_p = 1005 \left(1 + 0.84 \frac{\rho_v}{\rho_a} \right) \quad (27)$$

$$l = 3.15 \cdot 10^3 - 2.38(273.15 + T) \quad (28)$$

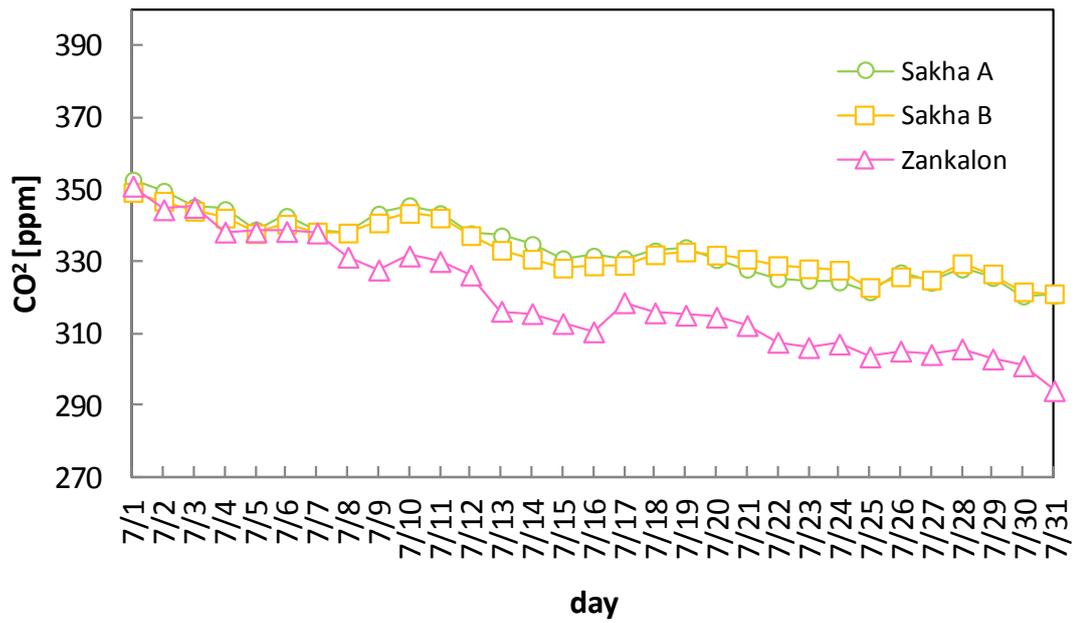


図 2.14 各圃場における日中(13時～15時)平均 CO₂ 濃度の日変化 (2010年)

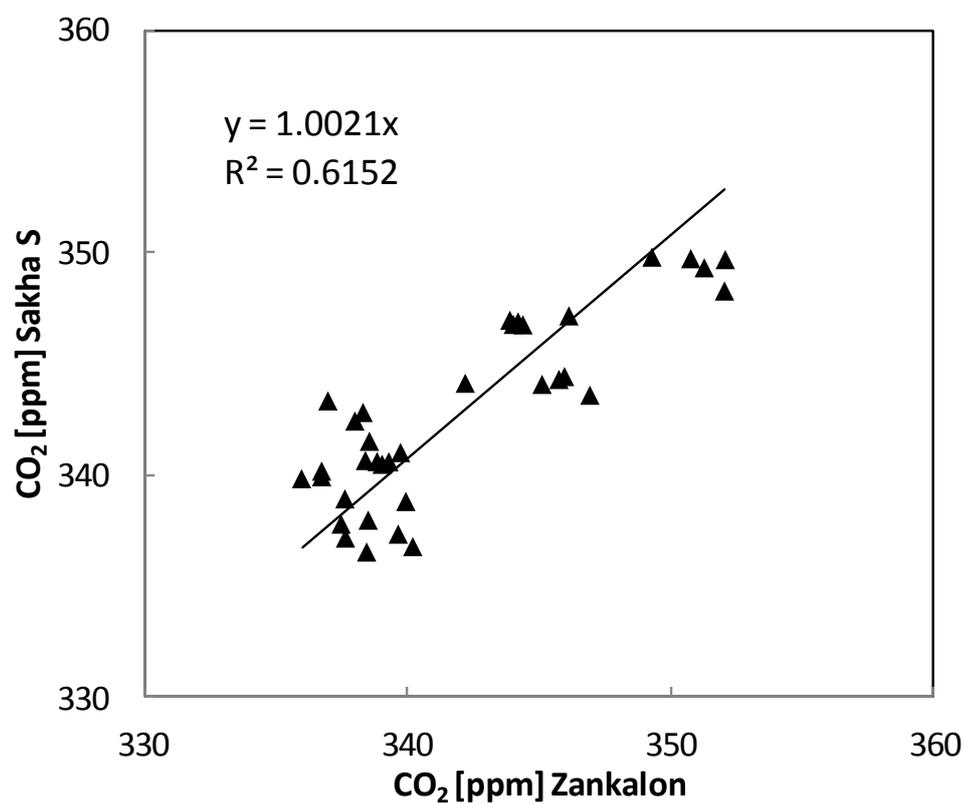


図 2.15 補正に用いる傾き a の算出

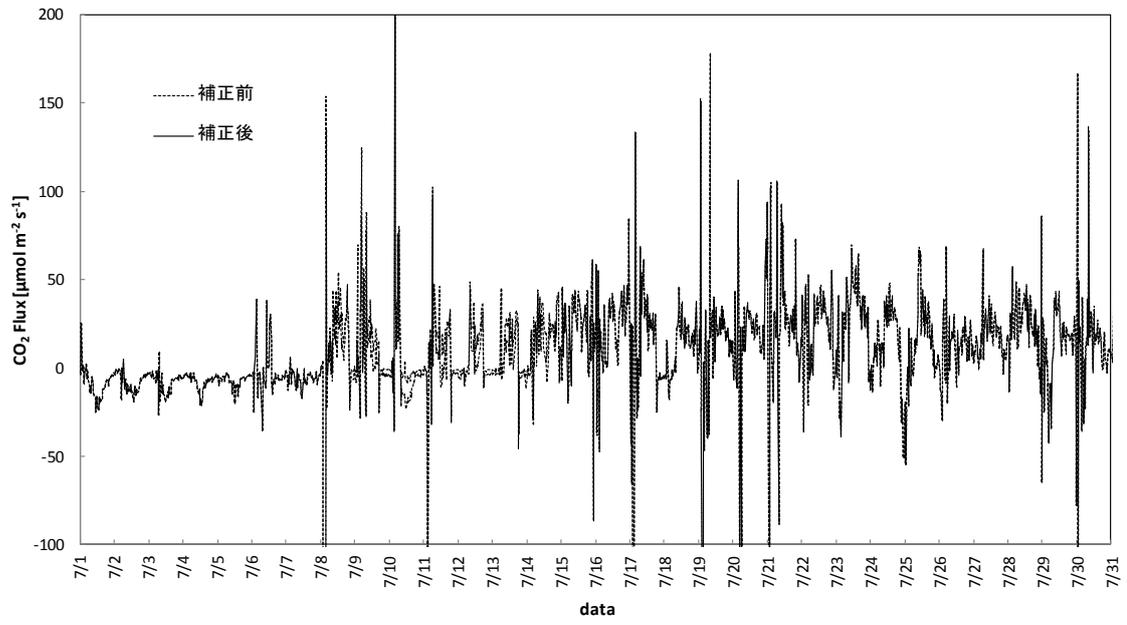


図 2.16 CO₂ 濃度補正前後の CO₂ フラックス

2.4. データの品質管理

以上の方法でフラックスの算出を行ったが、フラックス観測における長期測定データには測器のトラブルを含んだデータや、乱流測定に不適当な気象条件で得られたデータなど、様々な品質のデータが混在している。そのため、本研究で扱う二酸化炭素フラックスデータの品質を吟味し異常値を選別した。

2.4.1. フラックスの絶対値

二酸化炭素フラックスに閾値を設定して、その範囲を超えるデータについては異常値と判断した。作物別に閾値を設定し、Asia Flux 運営委員会 (2003), Surker *et al.*, (2005) に従って、それぞれコメは $-60 \sim +30 [\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}]$, その他のトウモロコシなどは $-30 \sim +15 [\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}]$ とした。

2.4.2. 降雨時のデータ

オープンパスガスアナライザーは、プローブのレンズ面に水滴が付着すると正しい測定が出来ない事から、降雨中や降雨後も付着した水滴が蒸発するまでの間のデータを異常値と判断した。降雨が確認された日付に記録された全てのデータを対象にこの処理を行った。

2.4.3. 夜間の u^* が小さい場合のデータ

夜間 (18:00–06:00) において、摩擦速度 u^* が小さい条件下では、渦相関法によるフラックスは過小評価されるため、閾値 ($u^* = 0.02 [\text{m}/\text{s}]$) を設定し、それより小さい u^* が観測された時のデータを異常値と判断した。

2.4.4. 移動平均値からの偏差

フラックスデータの時系列の中に、前後から突出したデータがある場合、それらを異常値とした。各測定時刻について、前後 7 項の移動平均値とその標準偏差 σ を計算し、測定値が移動平均値から 3σ 以上離れている場合を異常値と判断した。この方法は気象学的、生態学的な根拠は希薄だが、他の判定法では異常値と判断されない突出したデータの検出に有効である。

2.4.5. 乱流強度

Monin-Obukhov 相似測によるフラックスと分散の関係が成り立っているかを判定基準とするテストを行った。まず、観測データから、鉛直風速 w , 気温 T , 水蒸気濃度 q , 二酸化炭素の混合比 c について、それぞれ無次元化された標準偏差を計算した。

$$w \text{ について無次元化された標準偏差} = \frac{\sigma_w}{u^*} \quad (29)$$

$$T \text{ について無次元化された標準偏差} = \frac{\sigma_T}{|T^*|} \quad (30)$$

$$q \text{ について無次元化された標準偏差} = \frac{\sigma_q}{|q^*|} \quad (31)$$

$$c \text{ について無次元化された標準偏差} = \frac{\sigma_c}{|c^*|} \quad (32)$$

ここで，それぞれの値は

$$T^* = \frac{\overline{wT}}{u^*} \quad (33)$$

$$q^* = \frac{\overline{wq}}{u^*} \quad (34)$$

$$c^* = \frac{\overline{wc}}{u^*} \quad (35)$$

である．

次に，大気安定度 ζ を計算した． z は測定高度 (=5.78 [m])， d_0 は地面修正量である．

$$\zeta = -\frac{z-d_0}{L} \quad (36)$$

d_0 は Monteith (1976) より以下の式で求めた．

$$d_0 = 1.04h^{0.88} \quad (37)$$

ここで， h は植生高度であり，またこの式はメイズの植生に関して与えられたものであり，今回は全期間においてこの式を用いた．また L は Obukhov 長であり，以下の式で求めた．

$$L = \frac{-Tu^{*3}}{kg(\overline{wT} + 0.61\overline{wq})} \quad (38)$$

ここで， T は観測高度での気温 [K]， k はカルマン定数 (=0.4)， g は重力加速度， \overline{wq} は鉛直風速と比湿の共分散であり， $\overline{w\rho_v}$ からの換算値を入れた．そして無

次元化した標準偏差と式の経験式から得られる値を、以下の判別式 ITC を用いて比較した。 a_1 , a_2 は ζ によって変化する数値である。 Foken *et al.*, (2004), 間野ほか (2007) では, ITC が 0.3 より小さい場合には十分に発達した乱流場とみなす事が出来るとしているが, 大部分のデータが取り除かれてしまうため, 今回は $ITC \geq 2.0$ の場合のデータを異常値と判断した。

$$\frac{\sigma_{w,T,q,c}}{u^*,T^*,q^*,c^*} = a_1(|\zeta|)^{a_2} \quad (39)$$

$$ITC_{w,T,q,c} = \left| \frac{\{a_1(|\zeta|)^{a_2} - \frac{\sigma_{w,T,q,c}}{u^*,T^*,q^*,c^*}\}}{a_1(|\zeta|)^{a_2}} \right| \quad (40)$$

2.4.6. 鉛直変換角度

座標変換時の鉛直変換角度について, 角度が 5° 以上ある場合のデータについて異常値と判断した。

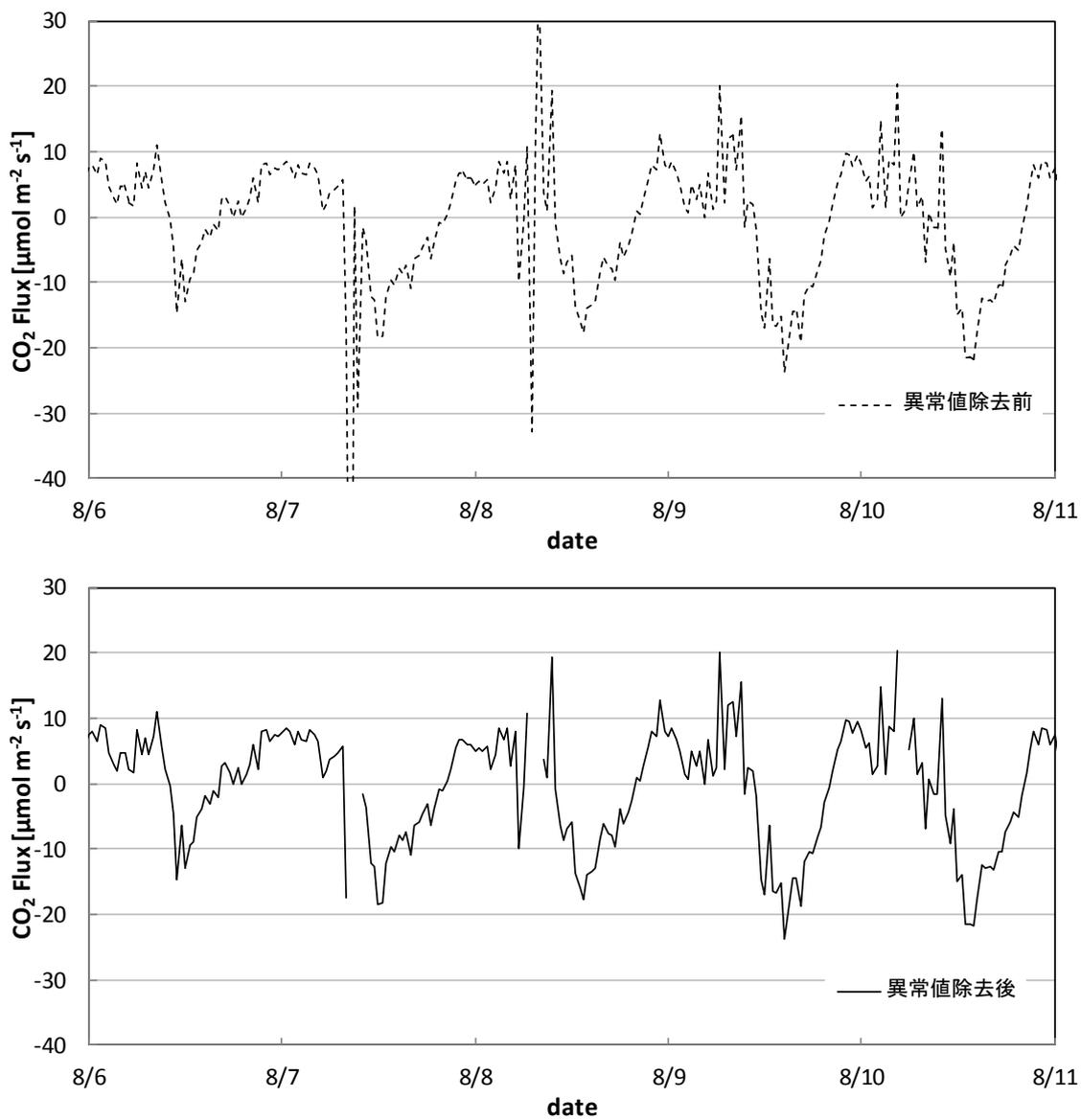


図 2.17 CO₂フラックスにおける異常値除去処理前後の比較 (2010年 Zankalon)

2.5. 欠損データの補完

これまでの異常値判別によって品質が悪いと判定され取り除かれたデータに加え、長期のフラックス観測では、電源系や測器類の予期せぬトラブルによる欠測が避けられない。しかしながら、群落生態系における年間の NEE を求めるためには欠損したデータの補完が不可欠となる。そこでフラックスデータの特別値 (30 分値) について補完を行った。

2.5.1. 内挿

30 分値で 1~3 個の欠損データについては、欠損期間をはさむ 2 つのデータを用いて時間に対して線形に内挿した。

2.5.2. 平均日変化法

4 個以上の欠損データについては、半月毎に観測時刻別のフラックスの平均値を計算し、その期間の平均的な日変化パターンをあらかじめ求めておき、欠損データはその時刻の期間平均値で置き換えた。平均化区間の長さは、各観測時刻のデータが得られる程度に長く、またフラックスの日変化パターンが大きく変化しない程度に短くとる必要がある (Asia Flux 運営委員会, 2003)。

2.6. 二酸化炭素収支

群落生態系の二酸化炭素収支は、吸収と放出の差により求められる。ここでは群落生態系における各コンポーネントについて述べる。まず、植物群落の光合成活動により大気中の二酸化炭素が植物中に総一次生産 GPP (Gross Primary Production) となって植物に固定される。植物に固定された炭素のうち、一部は落葉や枯死などにより土壌へ還元されて微生物により分解される Rm (Microbe Respiration)。また、微生物や根の呼吸、太陽照射による土壌地表面の有機物分解 (Photodegradation) が加わり二酸化炭素となって土壌呼吸 SR (Soil Respiration) として大気中へ放出される。さらに SR に植物の呼吸による二酸化炭素放出 AR (Autotrophic Respiration) が加わり、生態系呼吸 ER (Ecosystem Respiration) となる。そして GPP と ER の差をもって群落生態系の生態系純 CO₂ 交換量 NEE (Net Ecosystem Exchange) が決まる。それぞれ、SR は土壌呼吸測定システムおよび全自動土壌呼吸測定システムにて、AR と GPP は植物光合成総合解析装置にて、NEE は自動気象観測装置にて測定した。また、同じ収支の観測として微気象学的な視点からの NEE の他に生態学的な視点からの生態系純生産量 NEP (Net Ecosystem Production) がある。それぞれの関係式と図 2.18 に炭素収支の概念図を示す。

$$NEE = ER - (GPP + AR) \quad (41)$$

$$NEP = -NEE \quad (42)$$

2.6.1. 土壌呼吸量

炭素放出成分である土壌呼吸量の算出にはフラックスタワーとチャンバー法による2種類の測器から得られたデータを用いた。フラックスタワーによるデータについては、作付け期間については18:00～翌05:30の土壌呼吸のみを観測したデータを、非作付け期間については1日のデータを用いた。また、チャンバーによるデータについては、ロングタームチャンバーについては1日のデータ、マニュアルチャンバーについては日中のデータを用いた。また、土壌呼吸量パラメータ化について式を用いた(Lloyd and Taylor., 1994).

$$R_{eco} = R_0 \exp\left(\frac{\ln Q_{10}}{10} T\right) \quad (43)$$

ここで、 R_{eco} [$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$] は土壌呼吸量、 R_0 [$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$] は $T = 0$ [$^{\circ}\text{C}$] の時の土壌呼吸量、 Q_{10} は温度反応係数、 T [$^{\circ}\text{C}$] は3cm深度の地温である。

2.6.2. 純一次生産

炭素吸収成分である光合成速度の算出には光合成速度測定装置のデータを用いた。また、光合成速度のパラメータ化について式を用いた (Goulden *et al.*, 1996).

$$Ag = \frac{Ag_{max} \times P}{\frac{Ag_{max}}{\alpha} + P} \quad (44)$$

ここで、 Ag [$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$] は農地生態系の光合成速度、 Ag_{max} [$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$] は最大の放射量の時における農地生態系の光合成速度、 P は光合成速度測定装置で測定した光合成有効放射量 [$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$]、 α はパラメータである。

また、一方で農地生態系における全体の光合成有効放射量 PAR は以下の式で求めた (Weiss and Norman 1995), (Li *et al.*, 2005) .

$$PAR = 2.16 \times K_d \quad (45)$$

ここで、 PAR [$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$] は光合成有効放射量、 K_d は下向き短波放射 [W/m^2] である。

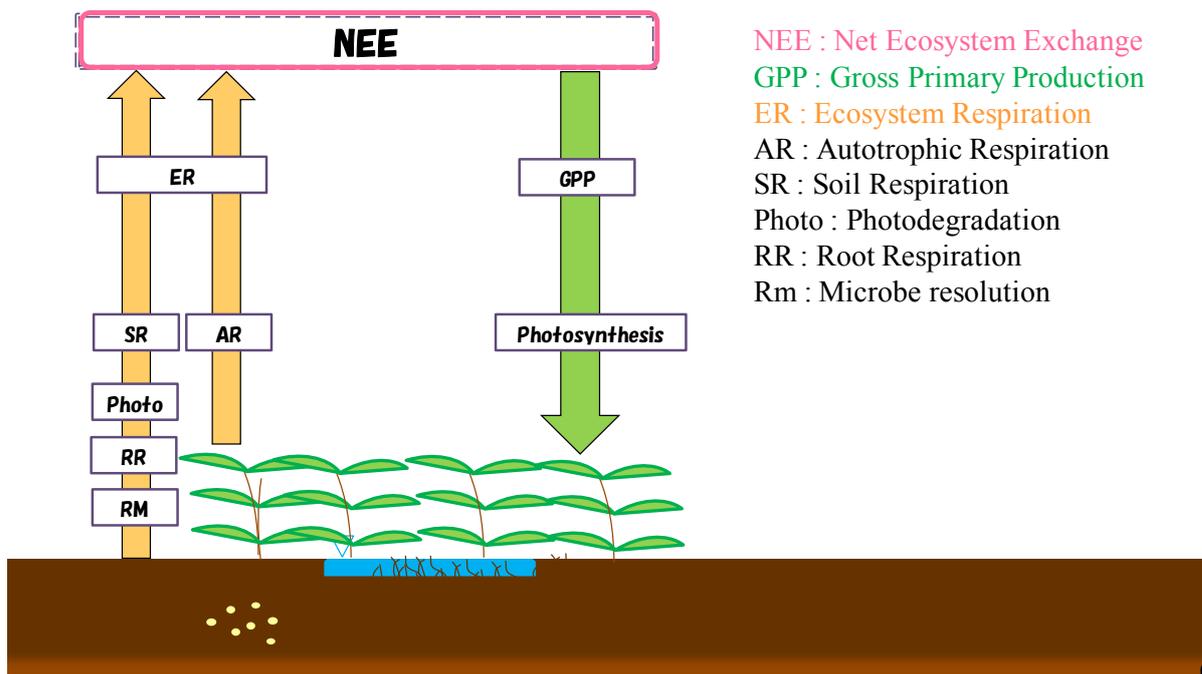


図 2.18 炭素収支の概念図

3. 結果および考察

3.1. 環境条件

はじめに、対象地域の圃場における 2010 年から 2012 年までの環境条件の変動について図 3.1 から図 3.5 に示す。

図 3.1, 図 3.2 には高度 3m の位置に設置した温湿度計で観測された月平均気温と月平均相対湿度の年変化を示す。月平均気温については年間を通して 11℃ から 27℃ 程度を変動しており、毎年 7 月から 8 月にかけて最高気温となり、1 月頃に最低気温となる。Zankalon については Sakha A, B よりも南に位置するため(図 2.1), 夏季について値が大きくなった。またこれらピークの時期はそれぞれ夏作, 冬作の時期と重なる。また月平均相対湿度については年間を通して 60% から 80% 程度を変動しており、その変動については夏作が栽培される 7-9 月, 冬作が栽培される 12-2 月にかけて値が増加していた。これは灌漑による対象地域への水の供給がなされたために蒸発散量が増えたためだと考えられる。

図 3.3 には高度 4.2m の位置に設置した 4 成分放射計により観測された下向き短波放射について、式(43)を用いて算出した月平均光合成有効放射量(PAR)を示す。月平均光合成有効放射量については年間を通して 200 から 700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 程度を変動しており、夏季にかけて値が増加して冬季は減少した。光合成有効放射量は植物が光合成活動を行うにあたって必要となる波長の放射量を表しており、この変動から夏季の方が冬季よりも植物の生育に適している事が分かる。

図 3.4, 図 3.5 には Zankalon 圃場の観測タワー付近で TDR により測定された深度別日平均地温と土壌水分量を示す。日平均地温については年間を通して 5℃ から 35℃ 程度を変動しており、6 月から 7 月頃にピークを迎えた。いくつかの箇所で見られる急激な減少が見られるが、これは灌漑を行ったために水が供給され地温の減少を招いたためと考えられる。また深度別には特に夏季においては浅いほど値が高い事や変動幅が大きい事が確認され、それらは深度が大きくなるにつれて小さくなった。次に、日平均土壌水分量については、いずれの深度についても灌漑による急激な土壌水分量の増加が明瞭に示され、灌漑により土壌水分量が 0.6 程度にまで増加する事が分かった。また灌漑後については、最も浅い 3cm や 10cm は急激に土壌水分量の減少が見られたものの、一方で 80cm の深度についてはほとんど見られなかった。この事から 80cm 程度までになれば高い土壌水分量を維持できる事が分かった。

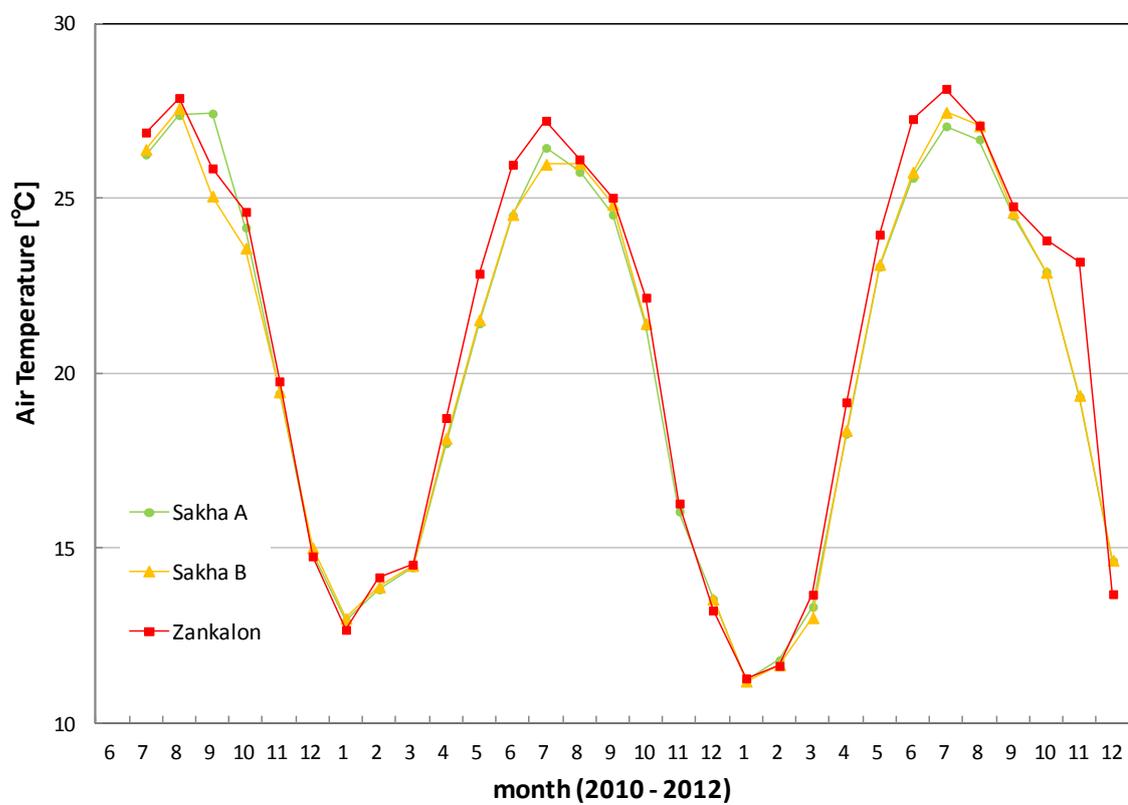


図 3.1 月平均気温の年変化

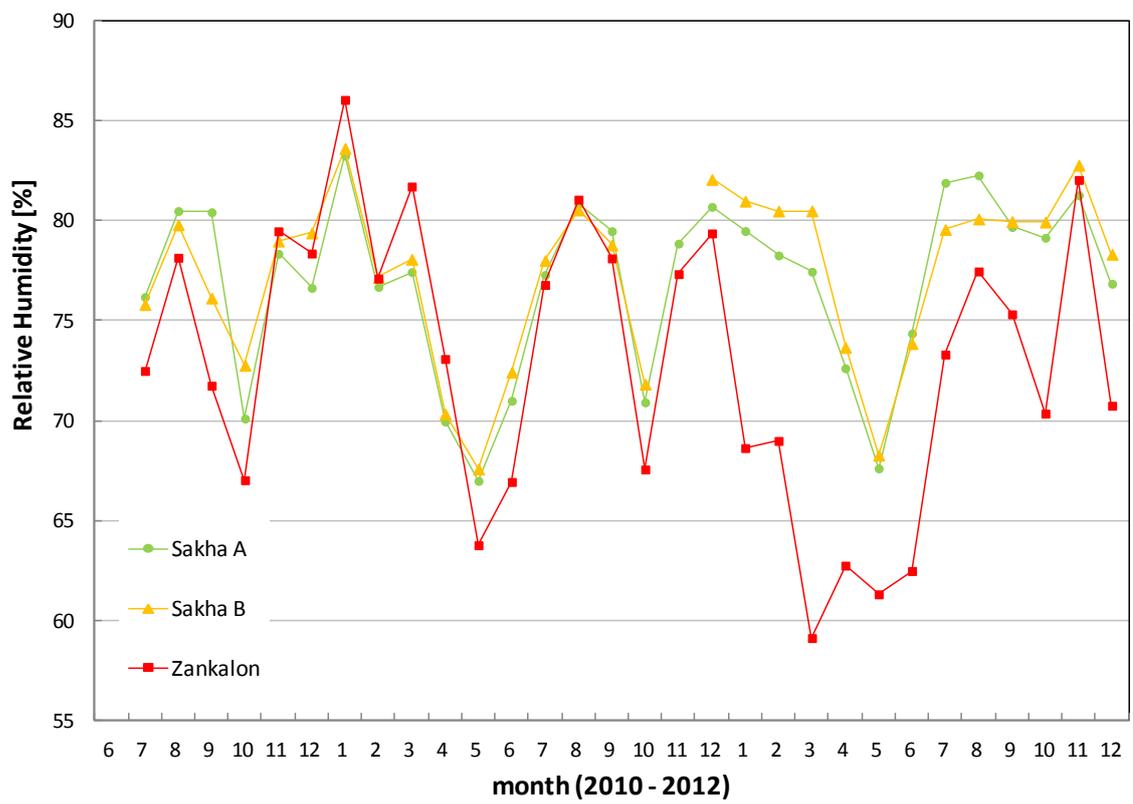


図 3.2 月平均相対湿度の年変化

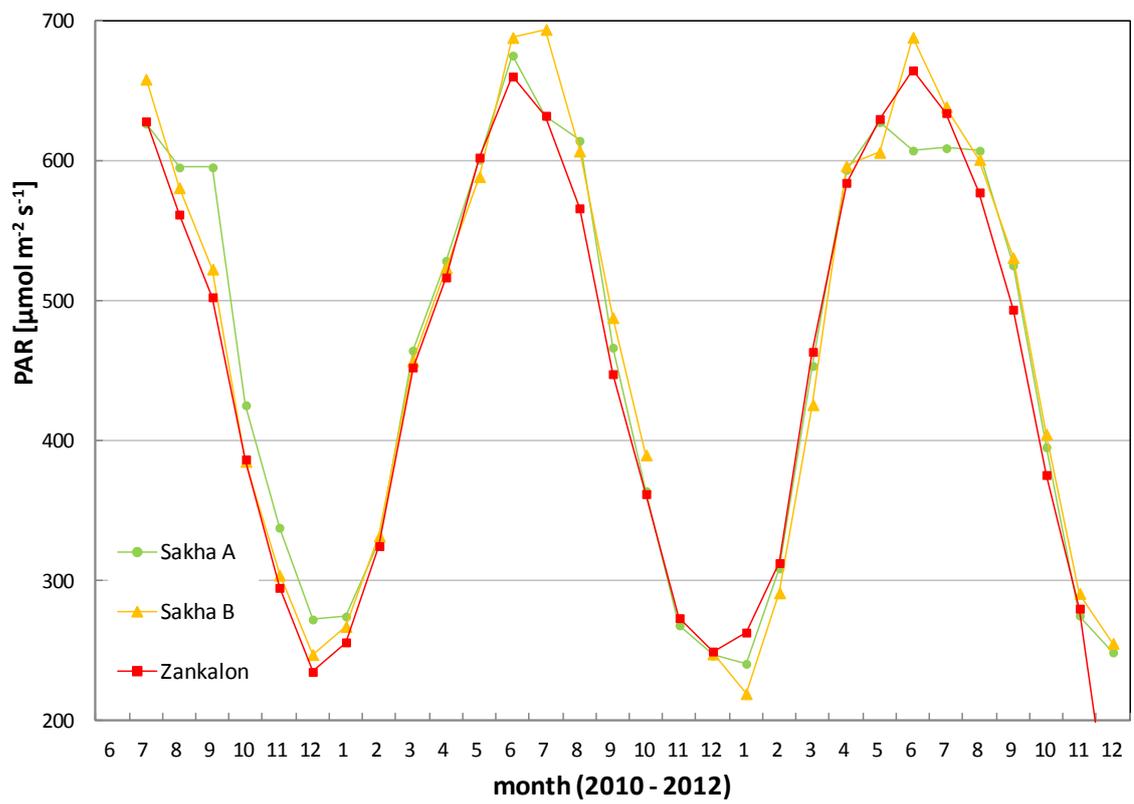


図 3.3 月平均光合成有効放射量の年変化

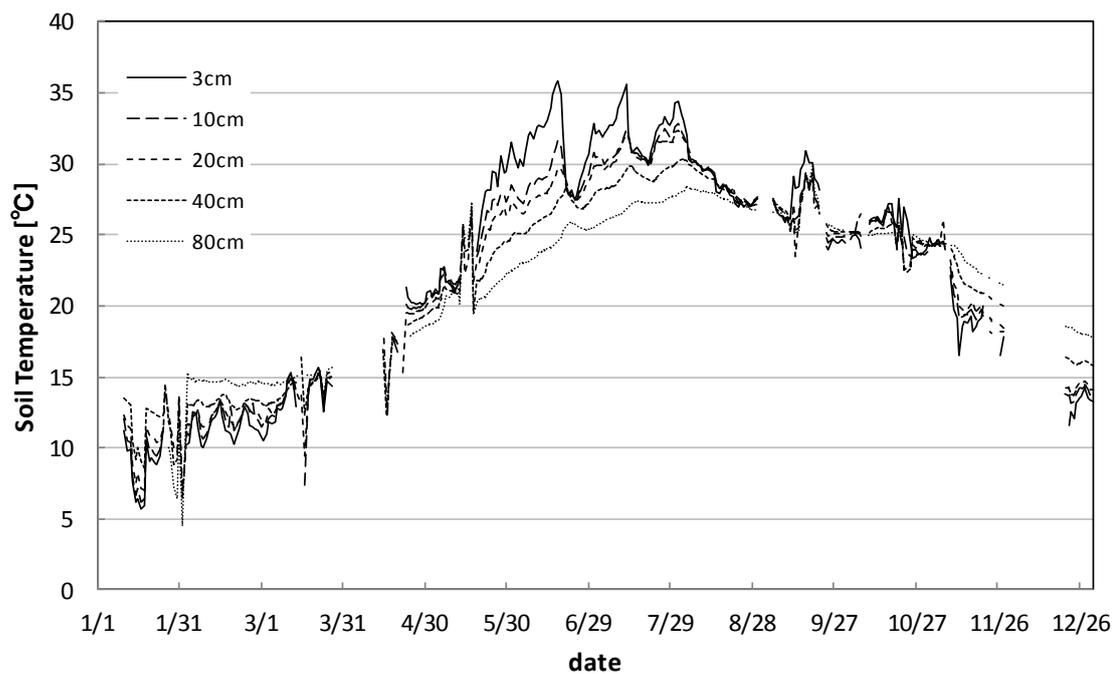


図 3.4 2012 年 Zankalon における深度別日平均地温の推移

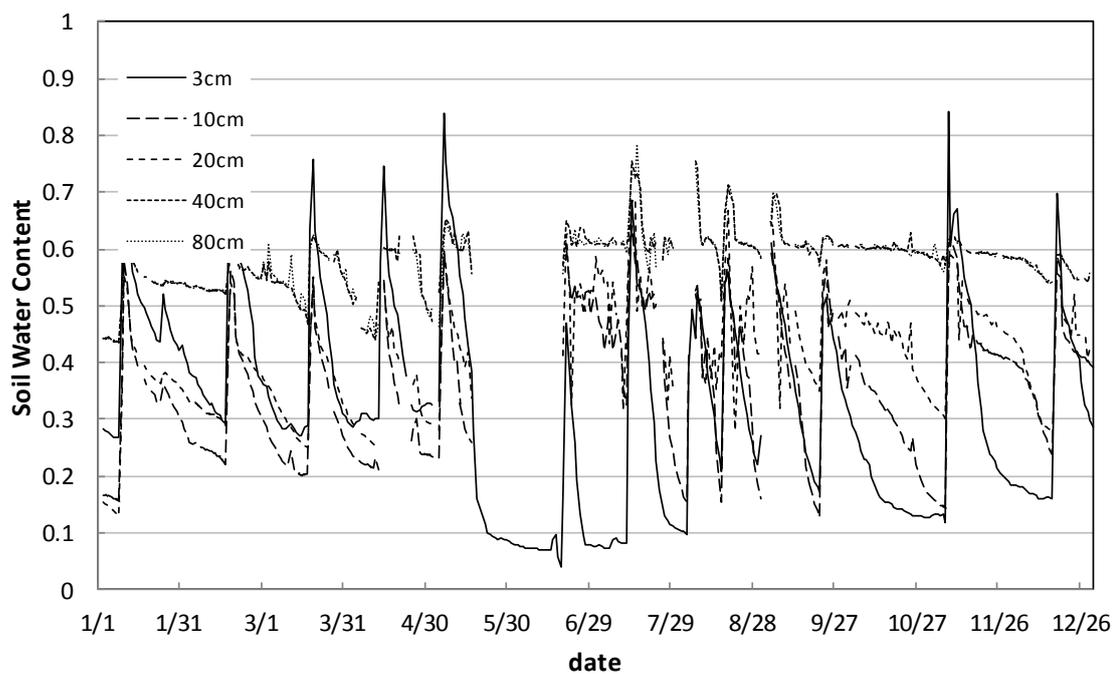


図 3.5 2012 年 Zankalon における深度別日平均土壌水分量の推移

3.2. 植生調査

表 3.1 に 2012 年夏季における植生の成長過程を植生高と LAI で示した。さらに、それぞれの生育過程を図 3.6 から 3.7 に示す。

表 3.1 2012 年夏季における各圃場の作物生育状況

Sakha A (Rice)	5/28	7/30	8/12	9/27	
Plant Length [cm]	0	50.2	88.5	106.5	
LAI					
Sakha B (Maize)	7/12	7/30	8/23	9/27	10/17
Plant Length [cm]	0	21.4	92.7	209.6	187.8
LAI	0.00	0.03	0.83	3.12	2.77
Zankalon (Maize)	6/20	7/31	8/23	9/25	9/27
Plant Length [cm]	0	166.8	300.2	279.5	300.3
LAI	0.00	2.50	3.35	3.57	2.96

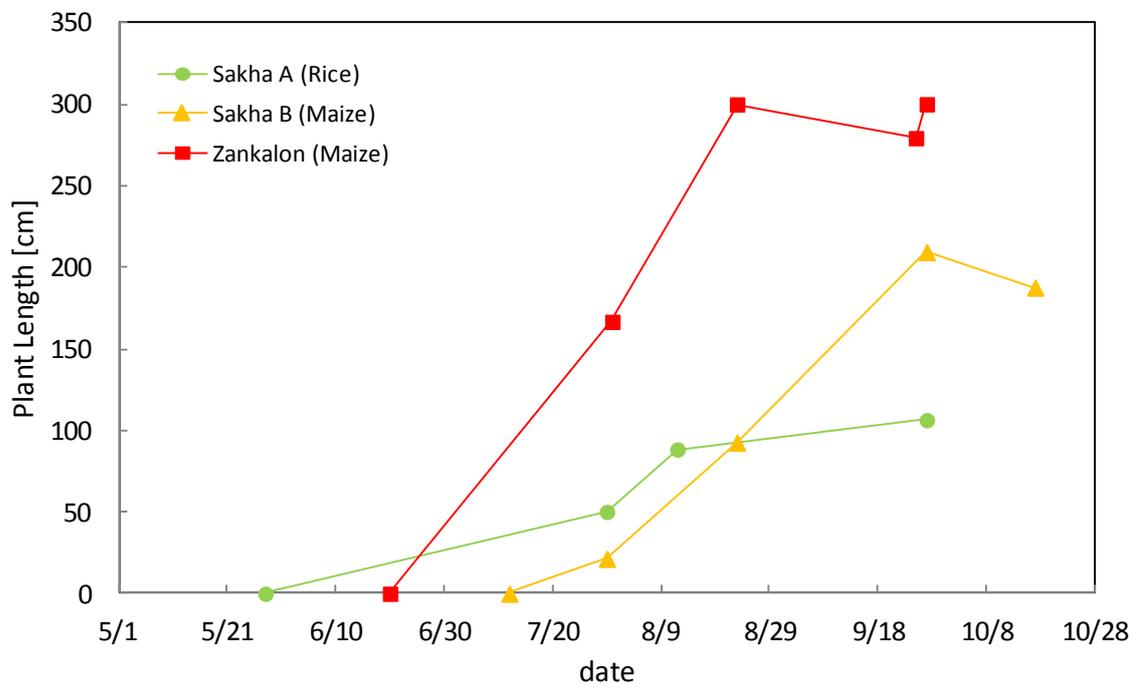


図 3.6 2012 年夏季における各圃場の作物の植生高変化

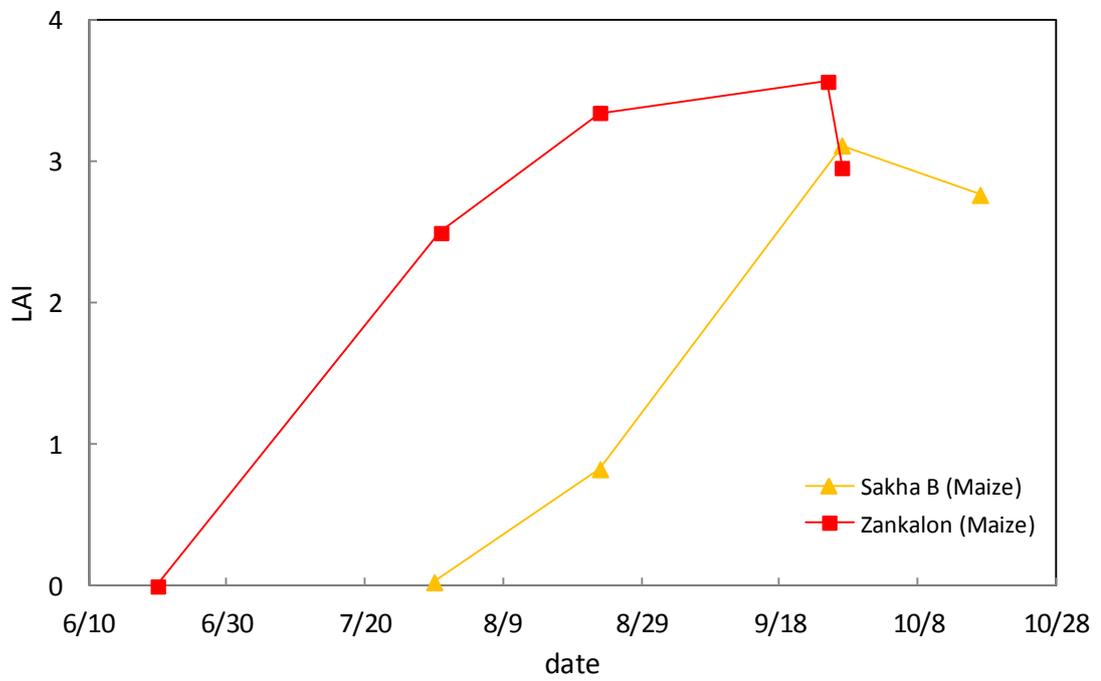


図 3.7 2012 年夏季における各圃場の作物の LAI 変化

3.3. 土壌呼吸量

土壌による CO₂ 発生プロセスは、有機物分解および根の呼吸であり、その制御要因としては、温度、水分、有機物、根活性などが挙げられる(澤本 2003)。それら土壌呼吸の直接的な測定として、今回は手動で測定を行うマニュアルチャンバーと自動的に測定が可能なロングタームチャンバーの 2 種類のチャンバーを用いて測定を行った。

3.3.1. 土壌呼吸測定システム (LI-840A)による結果

はじめにマニュアルチャンバーで測定した地温および土壌呼吸の日変化を図 3.8~3.15 に示した。それぞれのプロットはある時刻で同地点において測定した 5 回の平均値を表し、それぞれ標準偏差をエラーバーで示した。

まず Sakha A については、昼頃から午後にかけて地温および土壌呼吸の増加が見られた。次に Sakha B については、地温については朝方から徐々に増加して午後にかけてピークを迎え夜間に従うにつれて小さくなるという明瞭な日変化が見られた。一方土壌呼吸については地温ほど明瞭な日変化は見られなかったものの、夜間にかけての減少が見られた。Zankalon については、同様に地温は明瞭な日変化が見られたものの、灌漑前の 8 月 31 日に比べ灌漑後の 9 月 7 日の方が日中から午後にかけての地温の増加が緩やかであった。また、地温と土壌呼吸との相関を図 3.16 に示したところ、灌漑前の 8 月 31 日は高い相関が見られ、地温の増加に伴う土壌呼吸の増加が確認できたのに対し、灌漑後の 9 月 7 日は相関が見られなかった。この事から土壌水分が 0.5 まで増加すると地温と土壌呼吸との間に相関が無くなる事が分かった。

3.3.2. 全自動土壌呼吸測定システム (LI-8100A) による結果

はじめに、各圃場における地温、土壌呼吸、土壌水分の日変化を図 3.17~3.29 に示した。地温および土壌呼吸についてはロングタームチャンバー、土壌水分についてはタワー付近に埋設された TDR によって測定された値を用いた。図 3.17~3.29 に示す地温と土壌呼吸の値は 5 分平均値を用いた。

まず Sakha A において、地温は、3 日間の測定においていずれも地温は 25°C ~ 33°C 付近を変動しており、9:00 頃に最小値を迎え 18:00 頃に最大値を迎えるという明瞭な日変化が見られた。土壌水分については、0.8 程度でほぼ 1 日を通して明瞭な変化は見られなかった。8 月 25 日に灌水が行われたために土壌水分の値が高くなっている。土壌呼吸については、8 月 25, 26 日については 0 ~ 2 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 程度を変動しており、8 月 26 日については昼頃にわずかに値が高くなるという日変化が見られ、灌水状態であってもわずかな土壌呼吸が観測された。

次に Sakha B において、同様に地温は 22°C ~ 32°C 付近を変動しており、明瞭な日変化も見られた。土壌水分については、9 月 11 日の 18:00 頃に灌漑が行われた事から 0.2 から 0.9 まで上昇している。土壌水分の測定結果は 9 月 12 日の午前中以降は欠損であったが、それ以降は緩やかに減少している事が予測

される。土壤呼吸については、 $0\sim 8\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$ 程度を変動しており、水田である Sakha A よりも日最大値が大きかった。まず 9 月 12 日の土壤呼吸は深夜から早朝にかけて減少しており、また昼頃にわずかに増加したのちに再び減少した。この変化は地温の変化と類似しており、地温の減少により土壤呼吸が不活発になった事が考えられる。しかし、9 月 12 日では地温の変化と関係なく土壤呼吸はほぼ $1\sim 2\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$ 程度で推移している。これらは図 3.30 より、土壤水分が小さければ地温と土壤呼吸の間に相関が見られ、土壤水分が大きくなると地温の上昇に伴う土壤呼吸の増加率が小さくなるという事が分かった。

次に Zankalon において、同様に地温は $22^{\circ}\text{C}\sim 36^{\circ}\text{C}$ 付近を変動しており、明瞭な日変化も見られた。土壤水分については、灌漑前の 8 月 31 日では 0.2 で灌漑後の 9 月 6 日～9 月 8 日では 0.6 程度まで上昇した。土壤呼吸については、灌漑前は $10\sim 18\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$ 程度、灌漑後は $4\sim 8\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$ 程度を変動しており、Sakha B と同様に水田である Sakha A よりも日最大値が大きかったと共に、灌漑前後では土壤呼吸の変動幅が大きく減少する事が分かった。次に、灌漑前の 8 月 31 日における地温と土壤呼吸の相関を調べたところ、図 3.31 より地温が増加しても土壤呼吸はあまり変化がなく、明瞭な関係性は見られなかった。これらはチャンバーの種類による違いが原因と考えられる。図 3.32 より、灌漑後の高土壤水分条件下において、透明なチャンバーと不透明なチャンバーを用いた時の地温および土壤呼吸の関係を示したところ、透明なチャンバーの方は地温と土壤呼吸との高い相関が得られたのに対し、不透明なチャンバーの方は透明なチャンバーほど高い相関は得られなかった。そのことから、地温の他に土壤呼吸に影響する環境要因が挙げられ、透明なチャンバーでは日射を通してしまうためにその事が影響しているのだと考えられた。

3.3.3. 各チャンバーによる比較

同じ日に測定したマニュアルチャンバーとロングタームチャンバーによる測定結果の違いを図 3.33 に示す。ここで、マニュアルチャンバーは同測定地点においてある 5 回のタイミングで 5 回ずつ測定を行い、プロットはそれぞれの平均値、エラーバーは標準偏差を表している。ロングタームチャンバーのプロットはそれぞれ 5 分平均値を表している。マニュアルチャンバーは透明なチャンバーを、ロングタームチャンバーは不透明なチャンバーを使用した。また、タワーで得られた下向き短波放射の日変化も示した。図 3.33 より、不透明なチャンバーを使用して測定したロングタームチャンバーの土壤呼吸は日変化がほとんど見られなかった一方で、透明なチャンバーを使用して測定したマニュアルチャンバーの土壤呼吸は日中にピークを迎えて午後から夜間にかけて減少するといった明瞭な日変化が見られた。この 2 つの差は透明か不透明かという差が原因だと考えられ、透明なチャンバーであれば日射を考慮に入れる必要があるとされた。同地温の条件下にあっても日射の強弱により土壤表面から直接 CO_2 が放出され土壤呼吸量を大きく見積もってしまう事を示唆しており (Rutledge *et al.*, 2010)(King *et al.*, 2012)。今回も同様に日射の影響を考慮する

必要があると考えられた．実際に下向き短波放射と透明なチャンバーを使用した際の土壌呼吸との間には高い相関が見られた．

表 3.2 使用したチャンバー (2012 年夏季)

圃場	日付	使用したチャンバー	
		マニュアルチャンバー	ロングタームチャンバー
Sakha A	8/25		不透明
	8/26	透明	不透明
	8/27		不透明
Zankalon	8/31	透明	不透明
	9/1		不透明
	9/6		不透明
	9/7	透明	不透明
	9/8		不透明
Sakha B	9/11		透明
	9/12		透明
	9/13		透明
	9/14		透明
	9/15		透明
	9/16	透明	透明

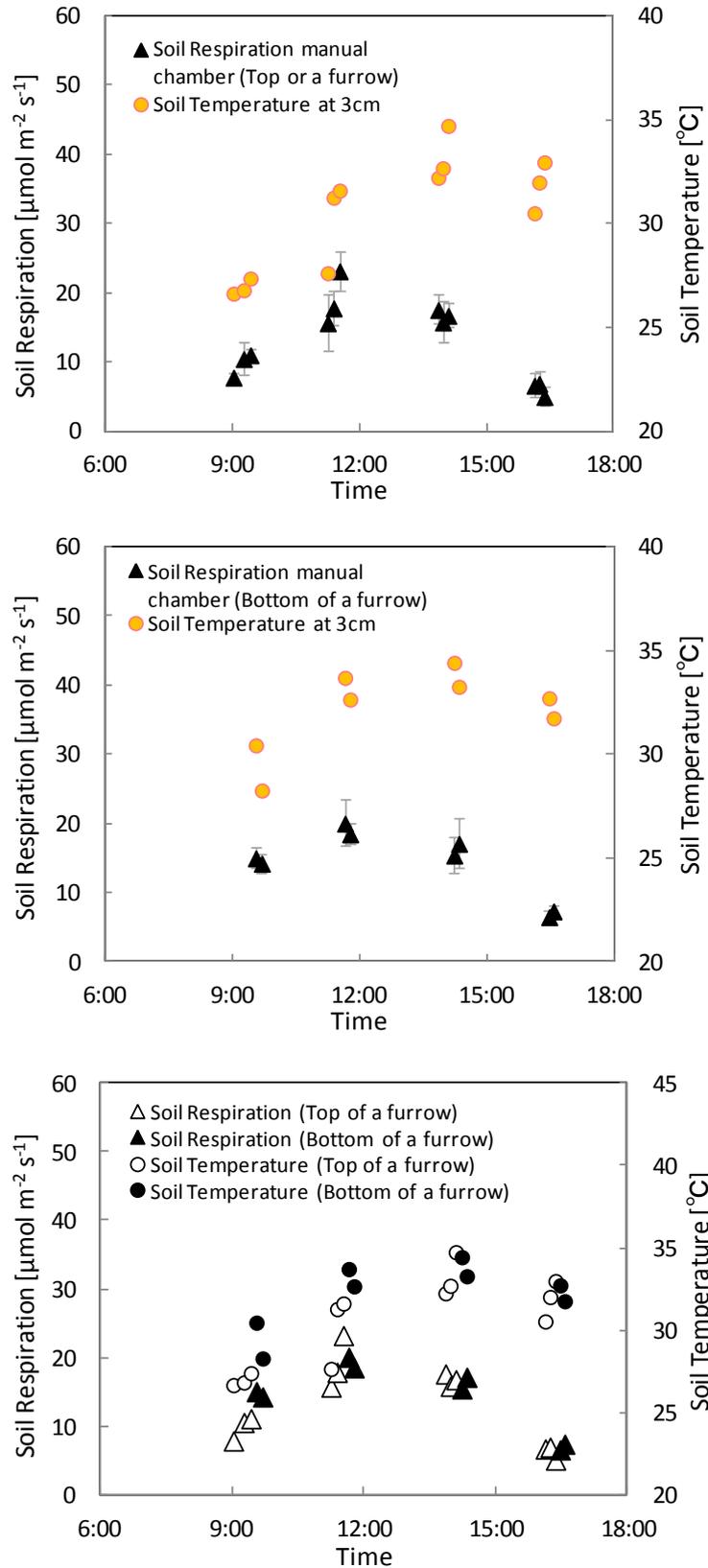


図 3.8 2011 年 07 月 18 日 Sakha A においてマニュアルチャンバーで観測した 3cm 深度の地温および土壌呼吸速度 (上図：畝の上，中図：畝の下，下図：両者比較図)

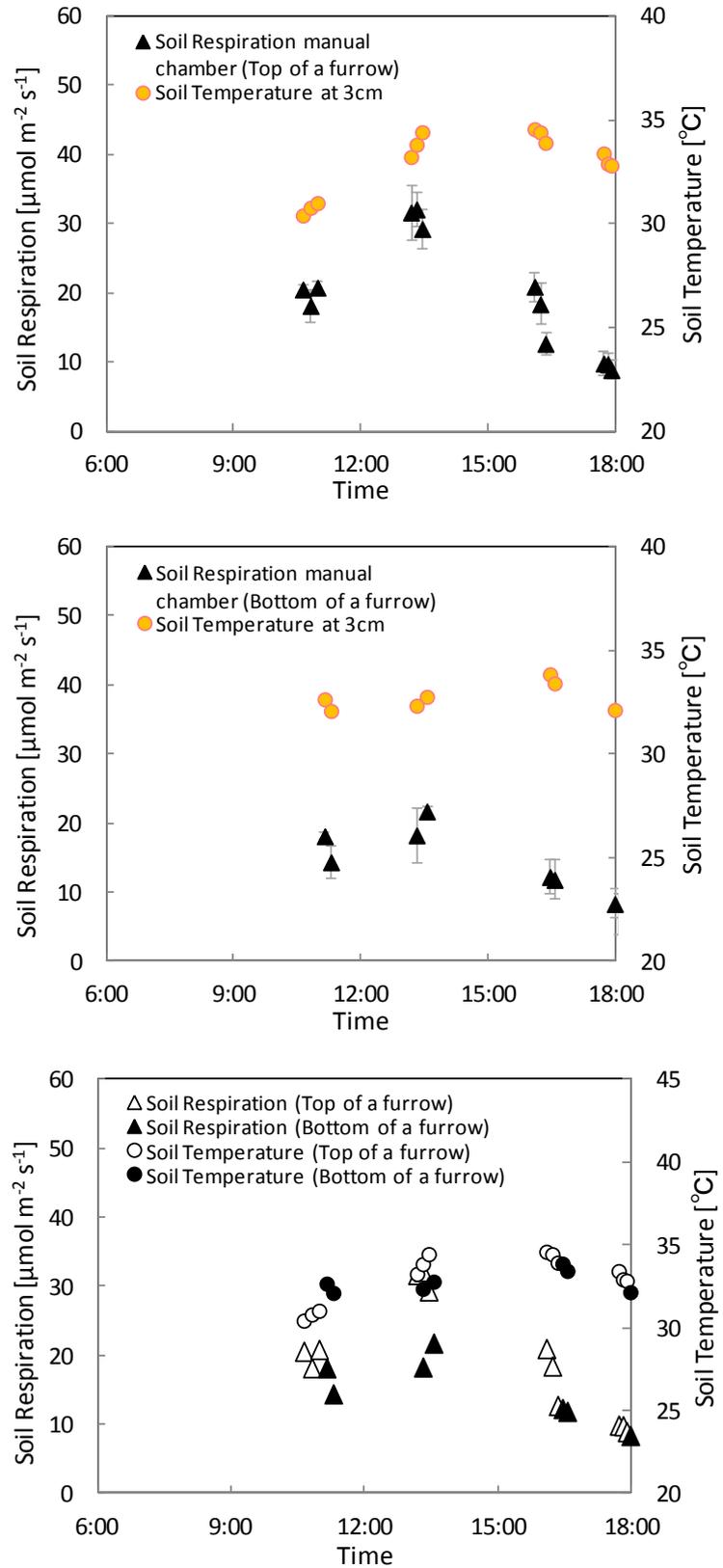


図 3.9 2011年07月22日 Zankalon においてマニュアルチャンバーで観測した
3cm 深度の地温および土壌呼吸速度
(上図：畝の上，中図：畝の下，下図：両者比較図)

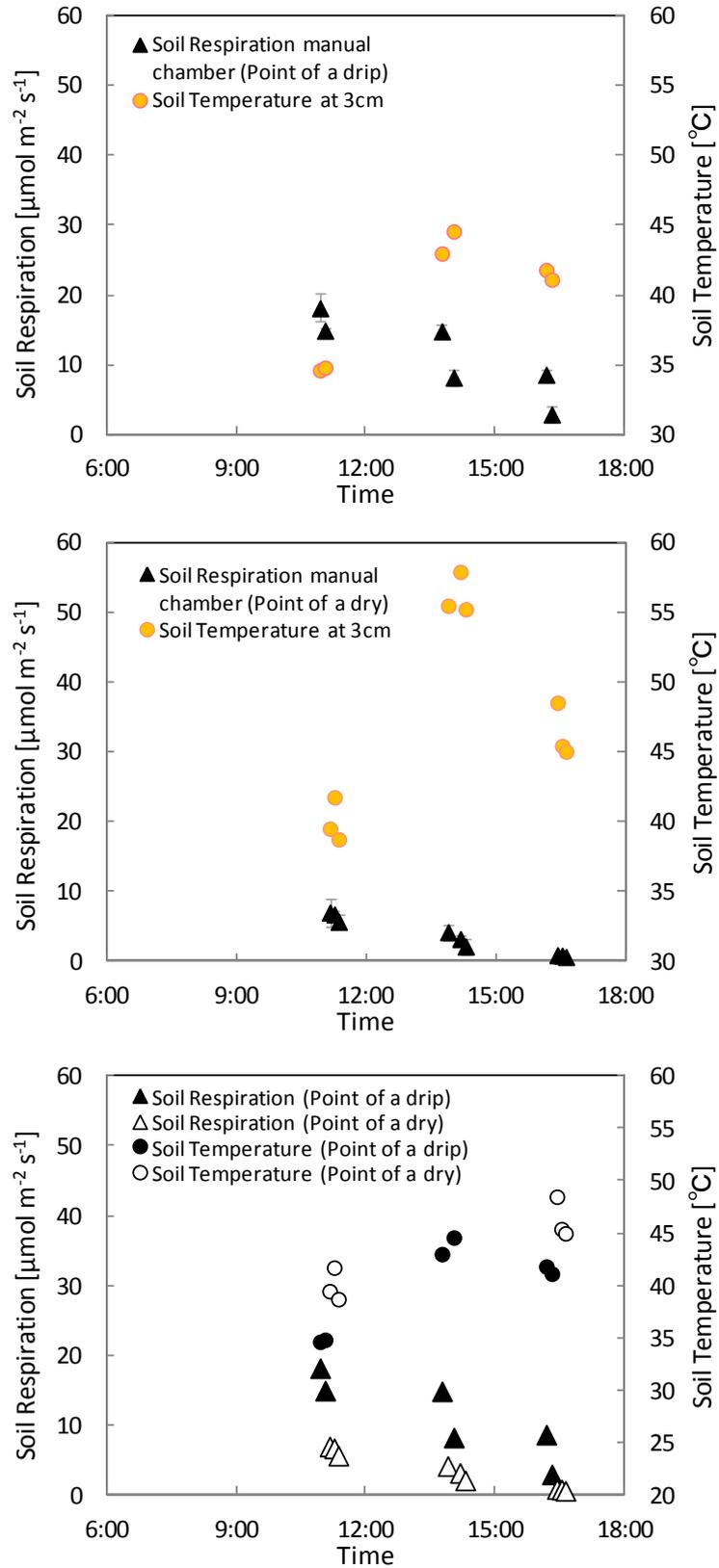


図 3.10 2011年07月27日 Sakha Bにおいてマニュアルチャンバーで観測した3cm深度の地温および土壌呼吸速度
(上図：点滴部分，中図：乾燥部分，下図：両者比較図)

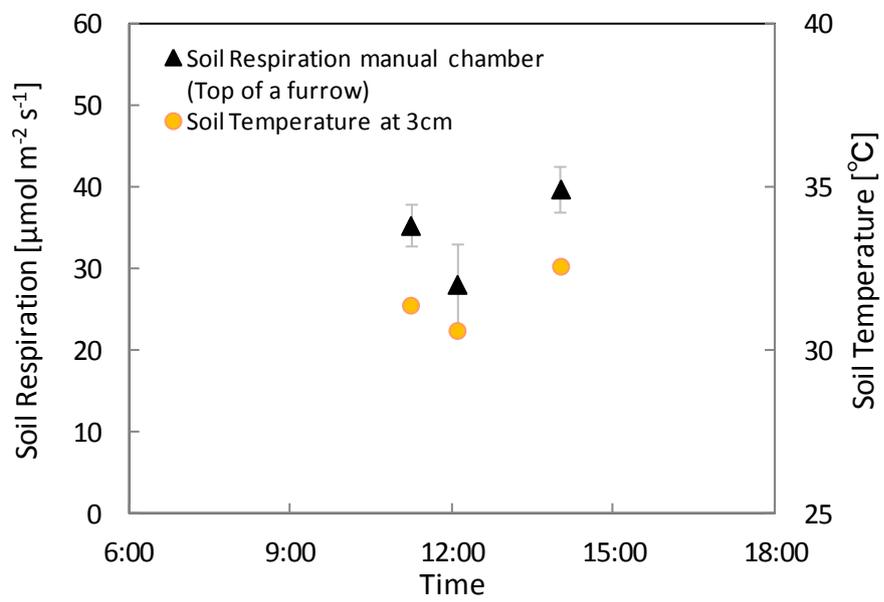


図 3.11 2012年08月26日 Sakha Aにおいてマニュアルチャンバーで観測した3cm深度の地温および土壌呼吸速度

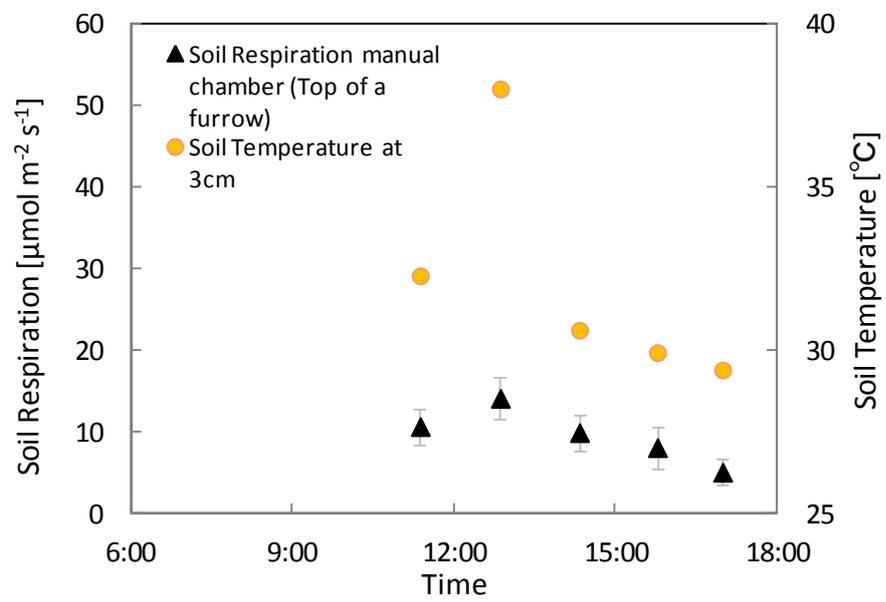


図 3.12 2012年08月31日 Zankalonにおいてマニュアルチャンバーで観測した3cm深度の地温および土壌呼吸速度

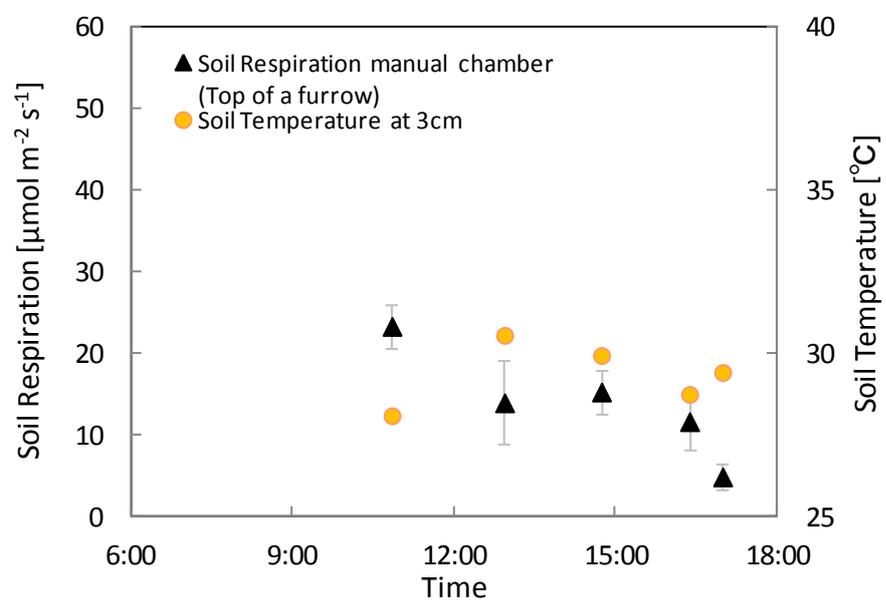


図 3.13 2012年09月07日 Zankalonにおいてマニュアルチャンバーで観測した3cm深度の地温および土壌呼吸速度

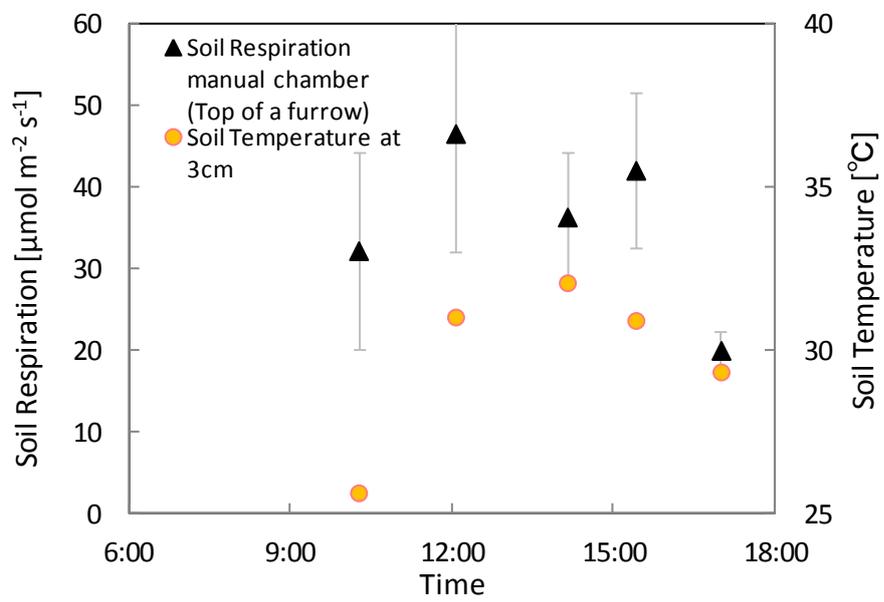


図 3.14 2012 年 09 月 16 日 Sakha B においてマニュアルチャンバーで観測した 3cm 深度の地温および土壌呼吸速度

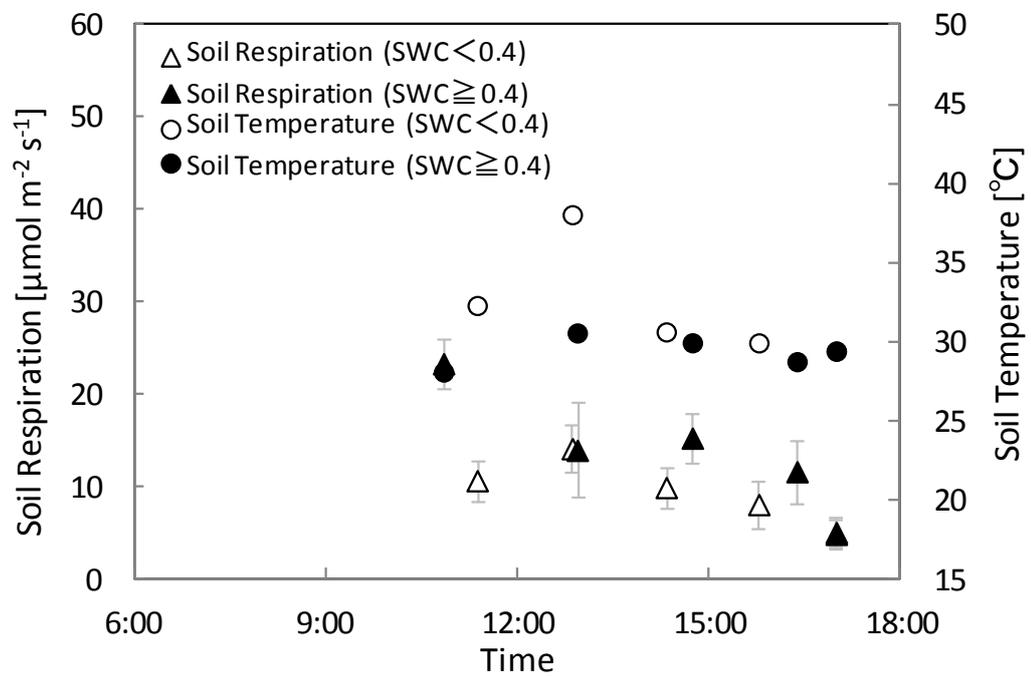


図 3.15 2012年08月31日および09月07日 Zankalonにおいてマニュアルチャンバーで観測した3cm深度の地温および土壌呼吸速度の灌漑前後の比較
 灌漑前：08月31日 (SWC < 0.4)
 灌漑後：09月07日 (SWC \geq 0.4)

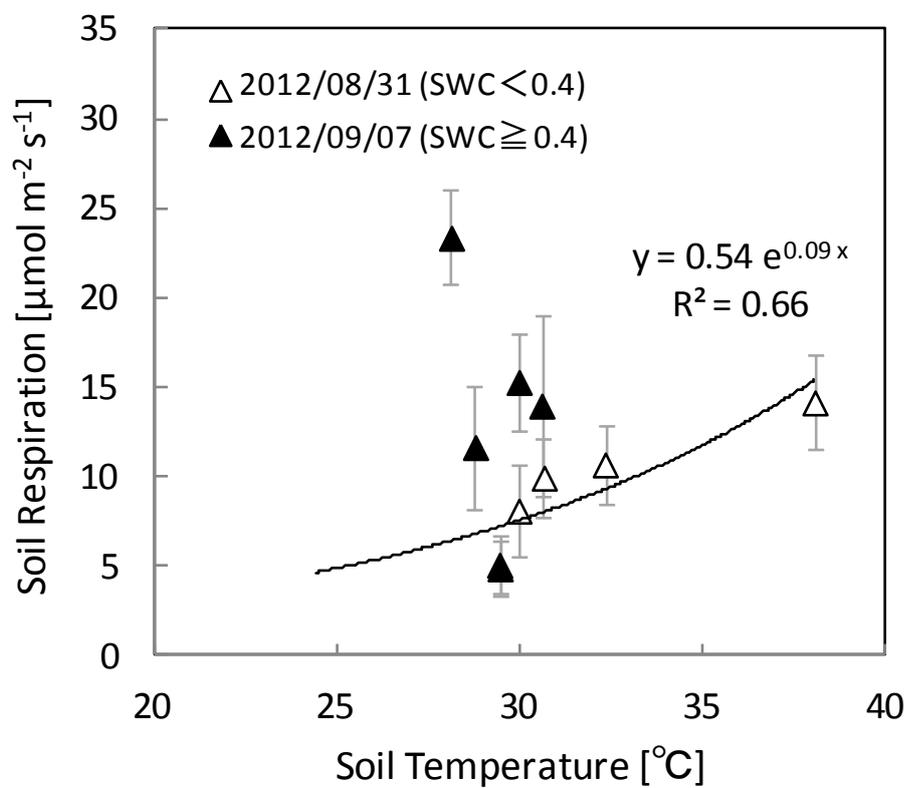


図 3.16 2012年 08月 31日および 09月 07日 Zankalonにおいてマニュアルチャンバーで観測した 3cm 深度の地温と土壤呼吸速度の関係

灌漑前後の比較

灌漑前：08月 31日 (SWC < 0.4)

灌漑後：09月 07日 (SWC ≥ 0.4)

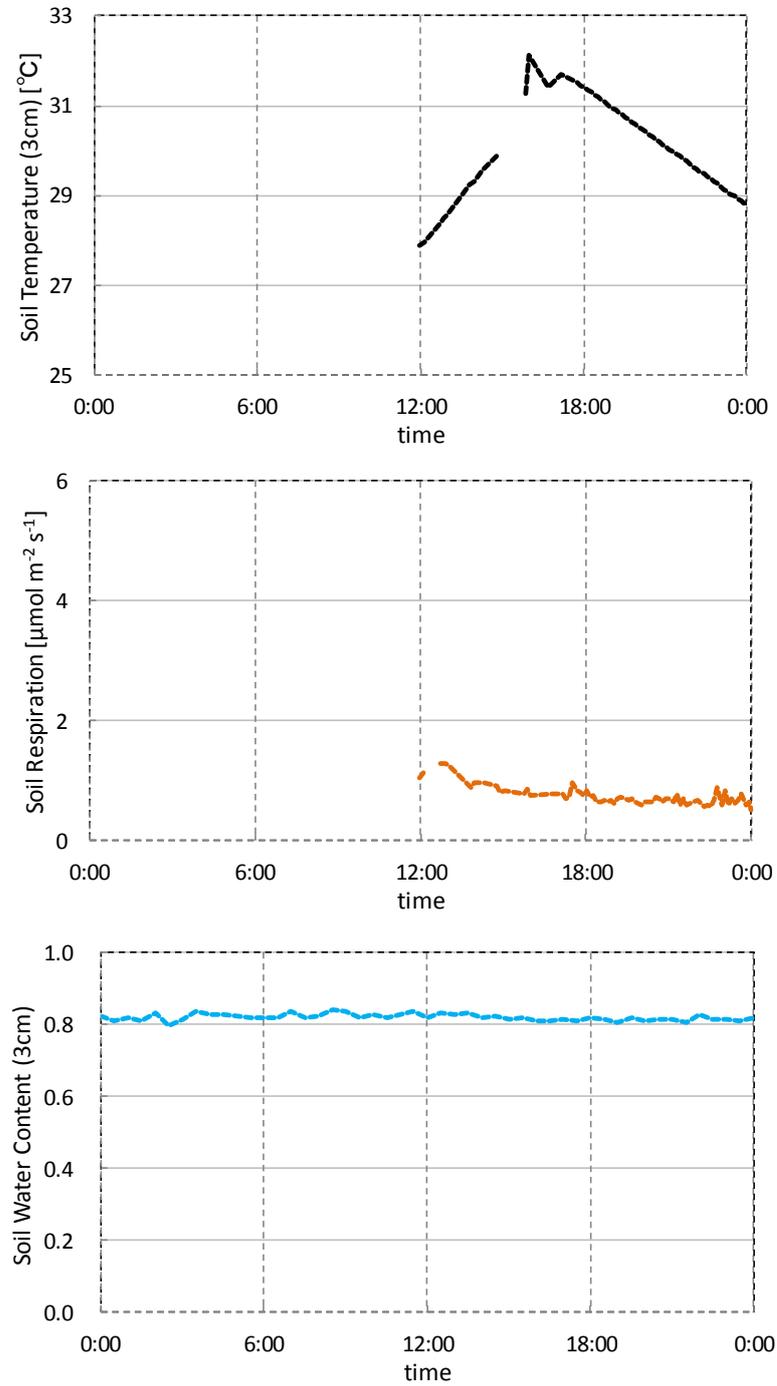


図 3.17 2012 年 08 月 25 日 Sakha A においてロングタームチャンバーにより測定された地温(上図), 土壌呼吸(中図), タワー付近の TDR による土壌水分(下図)

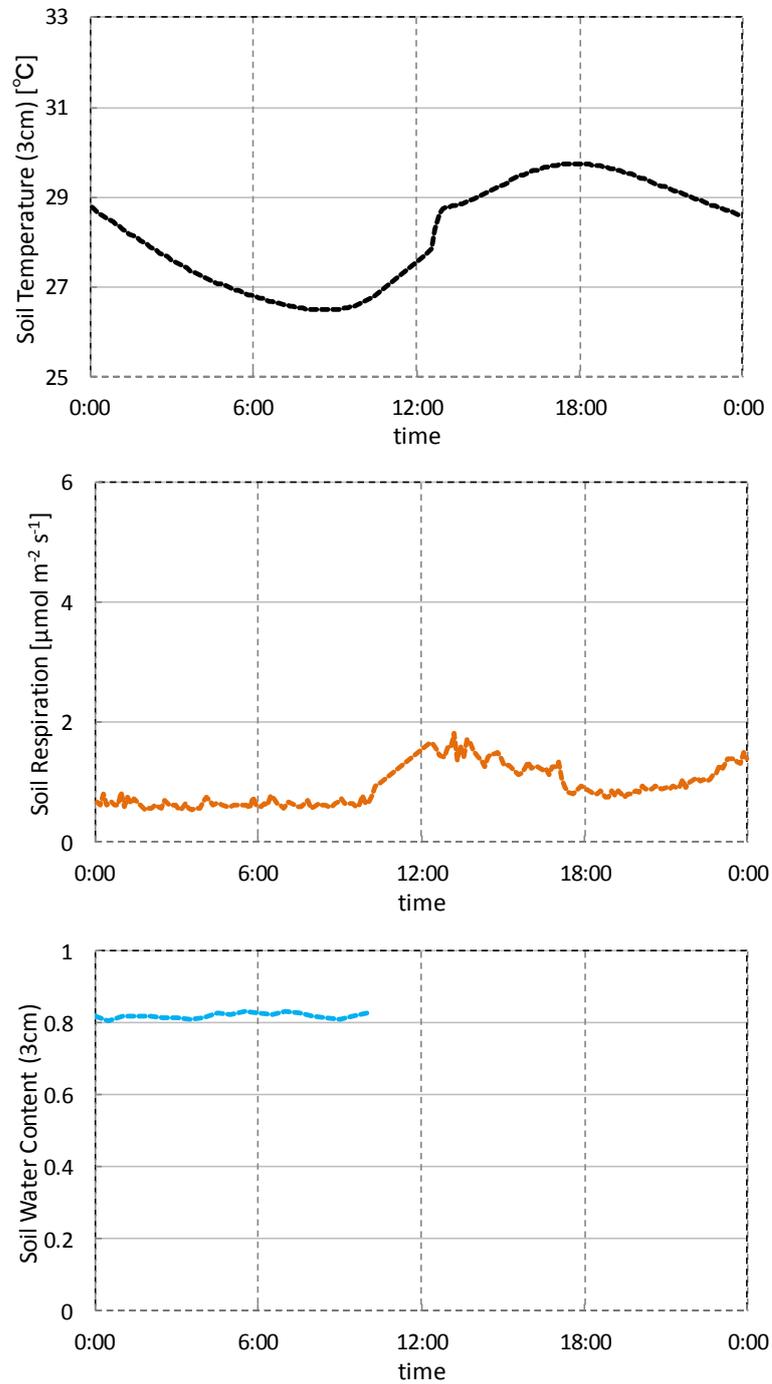


図 3.18 2012 年 08 月 26 日 Sakha A においてロングタームチャンバーにより測定された地温(上図), 土壌呼吸(中図), タワー付近の TDR による土壌水分(下図)

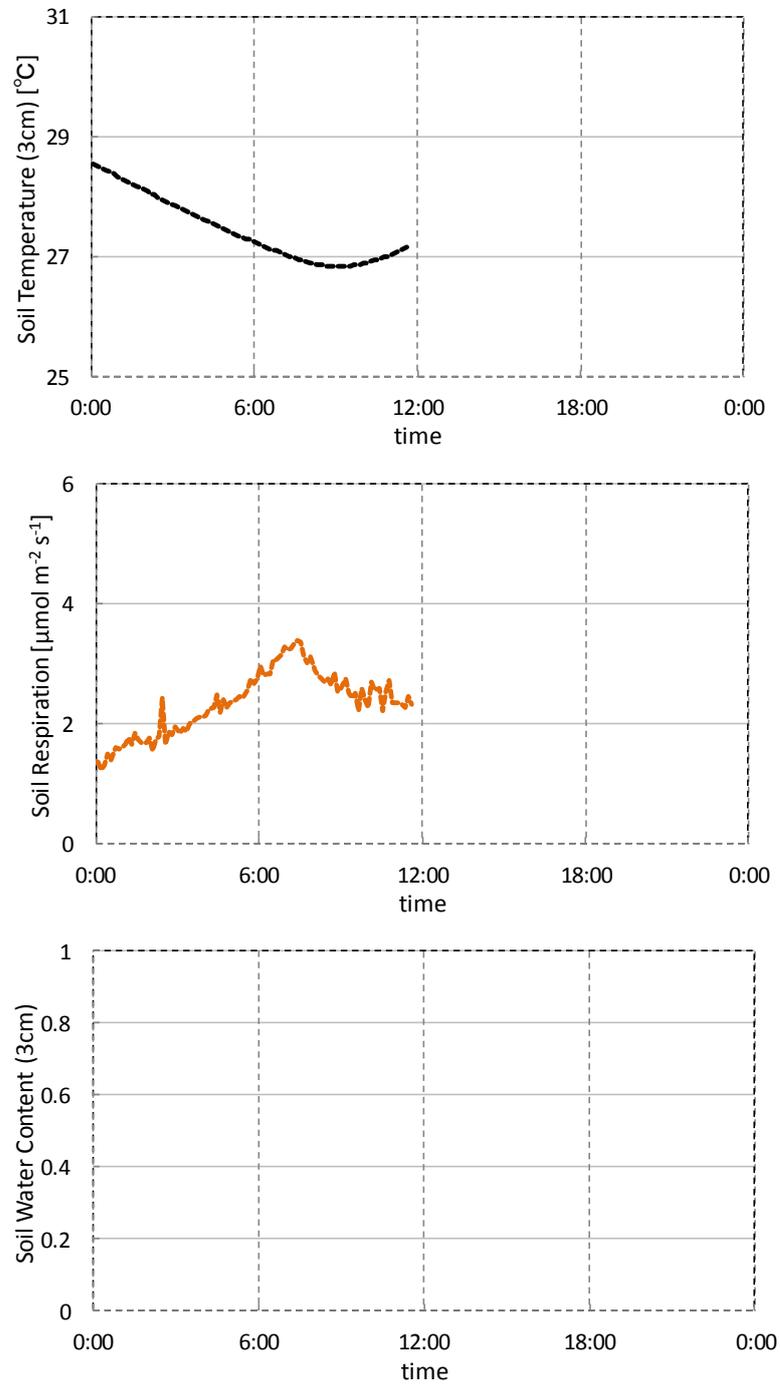


図 3.19 2012 年 08 月 27 日 Sakha A においてロングタームチャンバーにより測定された地温(上図), 土壌呼吸(中図), タワー付近の TDR による土壌水分(下図)

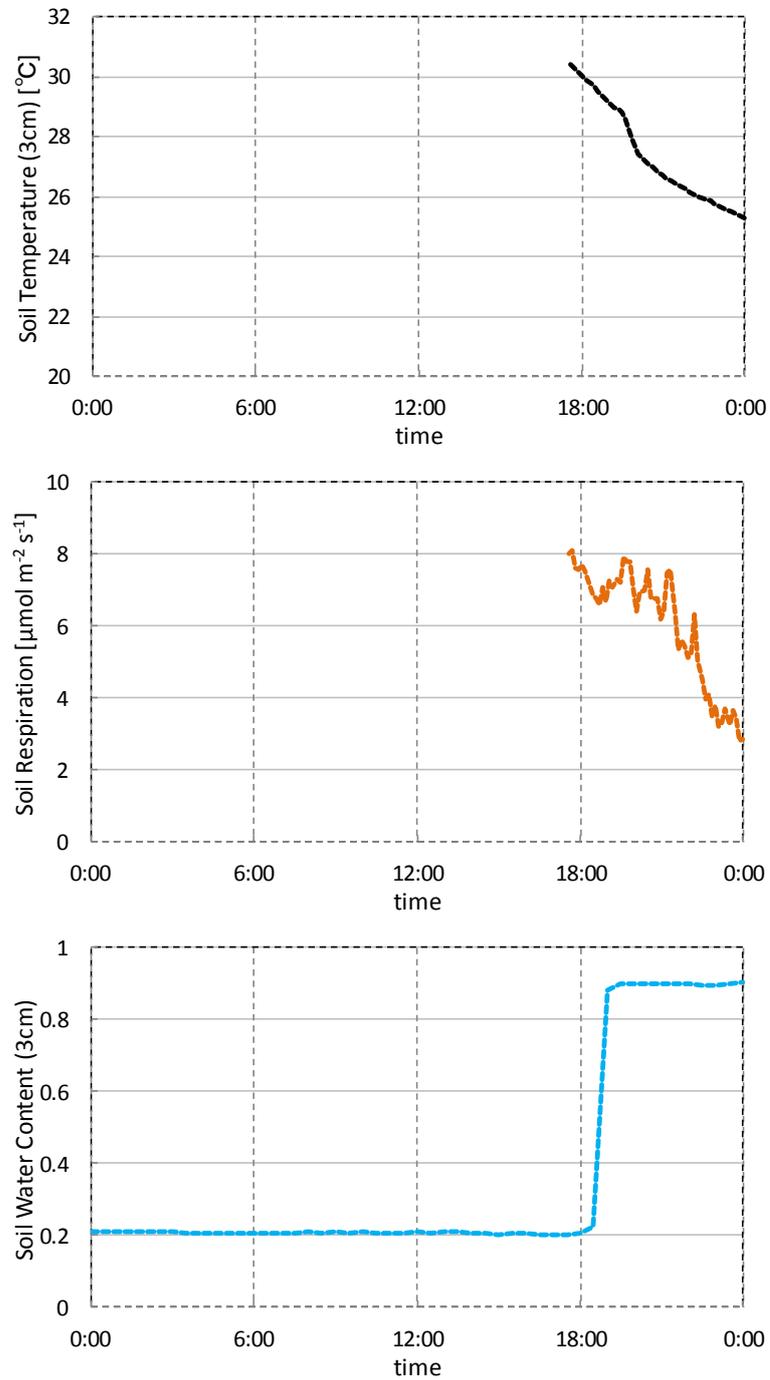


図 3.20 2012 年 09 月 11 日 Sakha B においてロングタームチャンバーにより測定された地温(上図), 土壌呼吸(中図), タワー付近の TDR による土壌水分(下図)

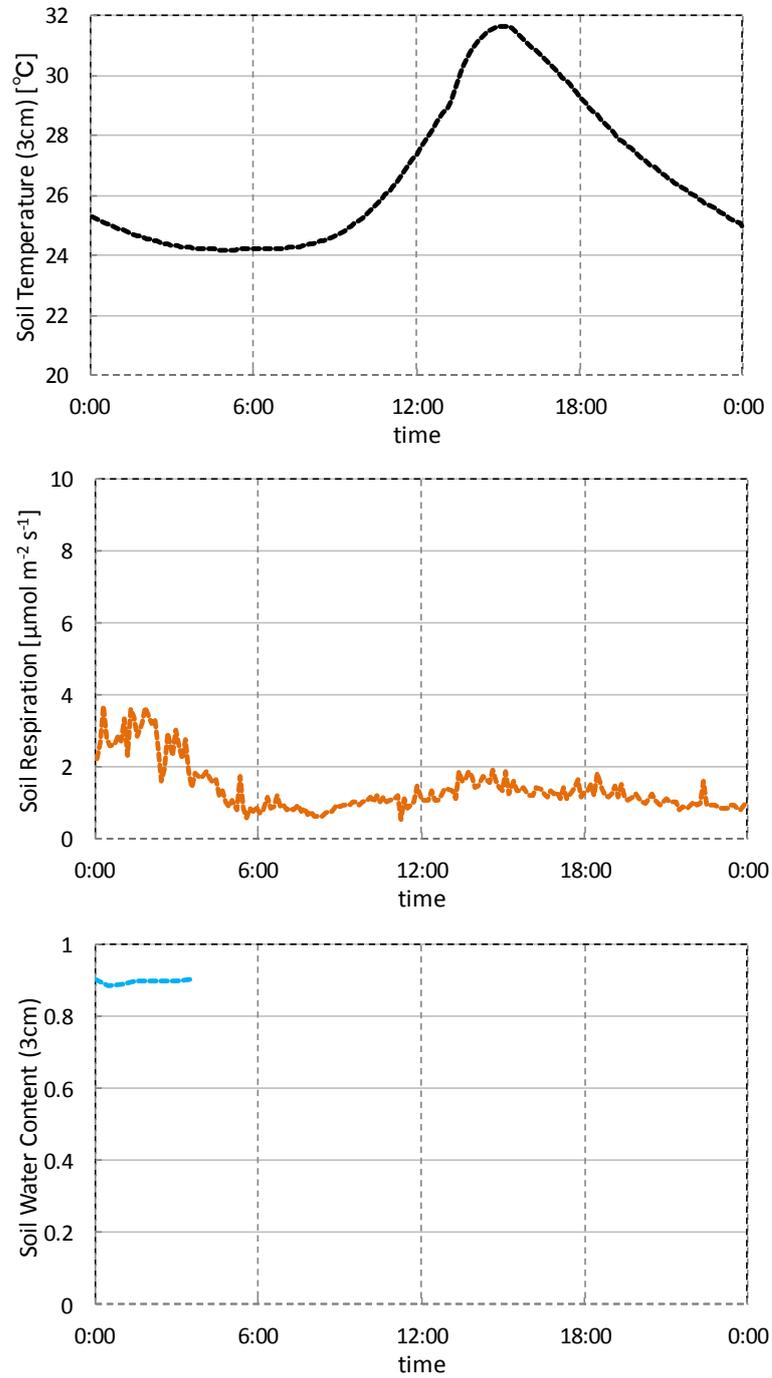


図 3.21 2012 年 09 月 12 日 Sakha B においてロングタームチャンバーにより測定された地温(上図), 土壌呼吸(中図), タワー付近の TDR による土壌水分(下図)

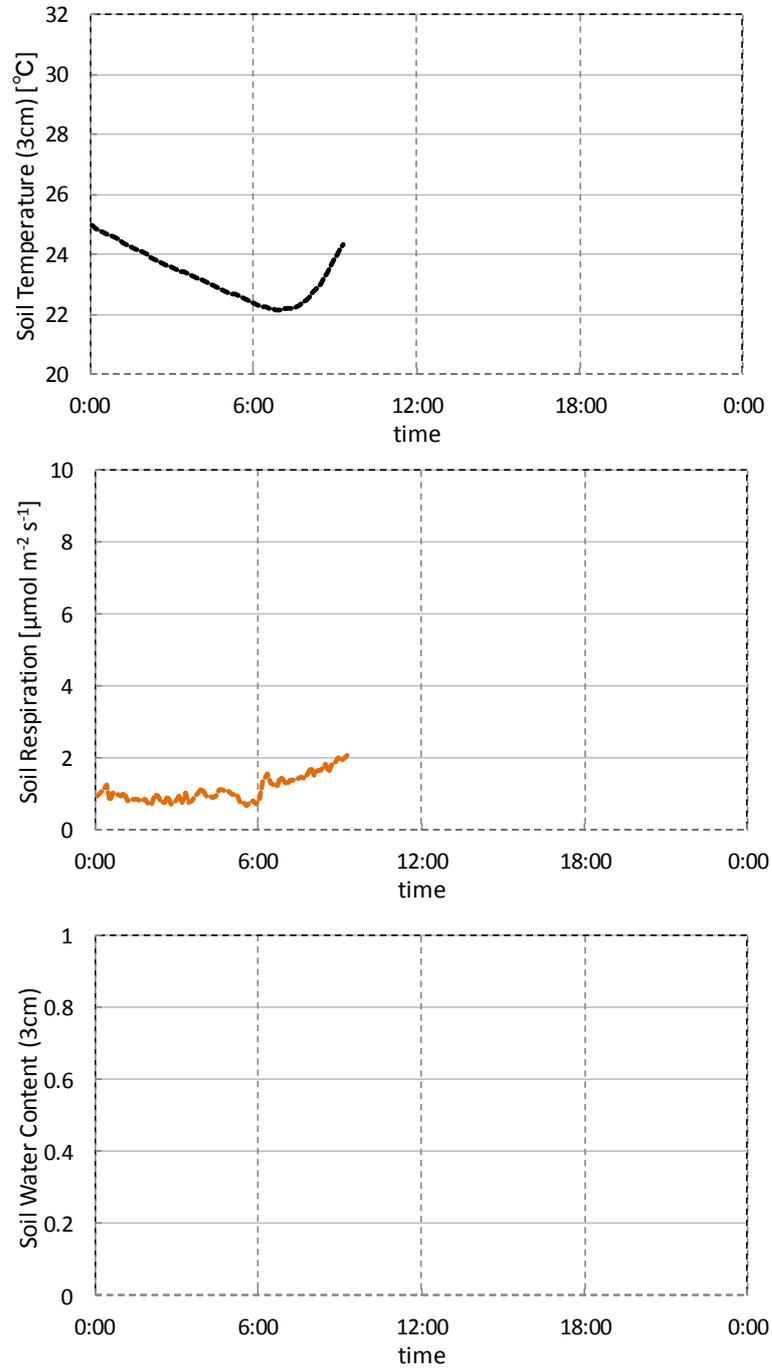


図 3.22 2012 年 09 月 13 日 Sakha B においてロングタームチャンバーにより測定された地温(上図), 土壌呼吸(中図), タワー付近の TDR による土壌水分(下図)

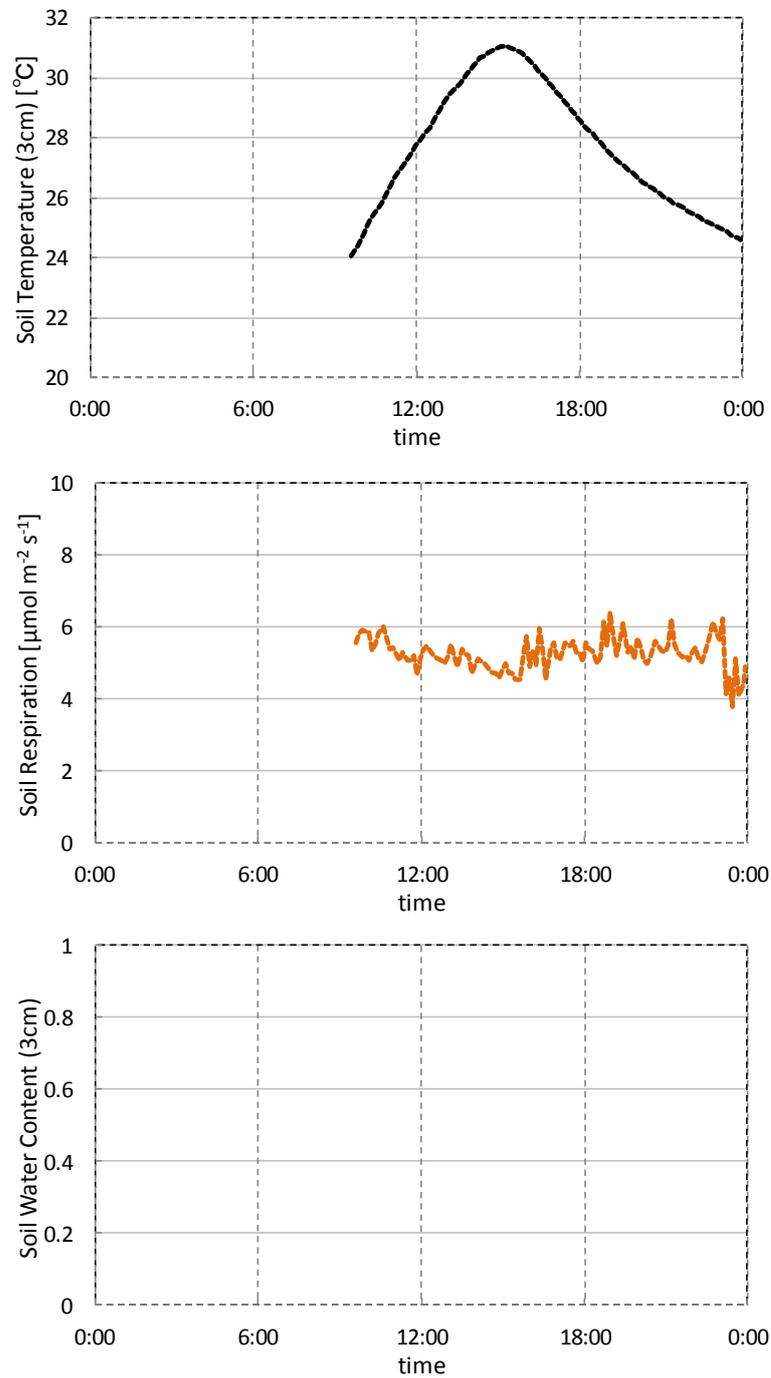


図 3.23 2012年09月15日 Sakha Bにおいてロングタームチャンバーにより測定された地温(上図), 土壌呼吸(中図), タワー付近の TDR による土壌水分(下図)

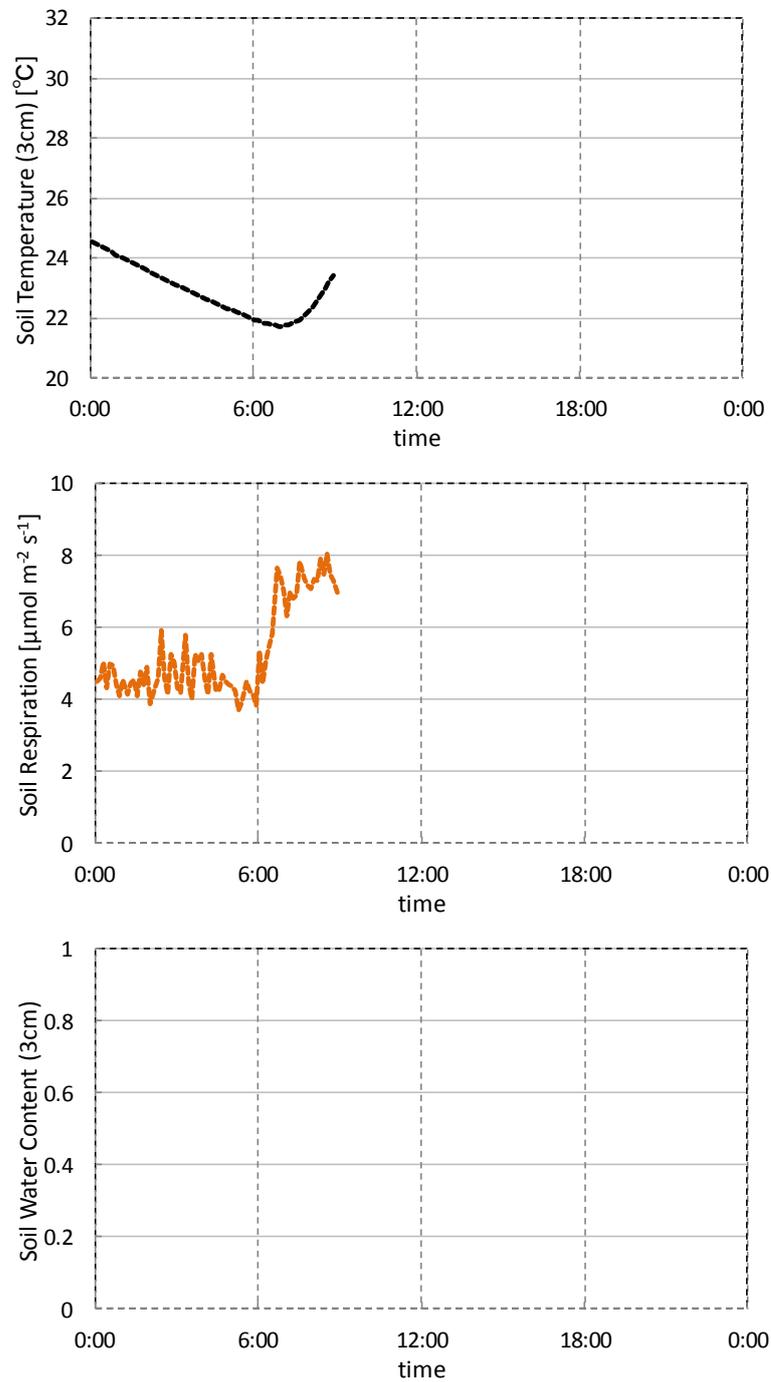


図 3.24 2012 年 09 月 16 日 Sakha B においてロングタームチャンバーにより測定された地温(上図), 土壌呼吸(中図), タワー付近の TDR による土壌水分(下図)

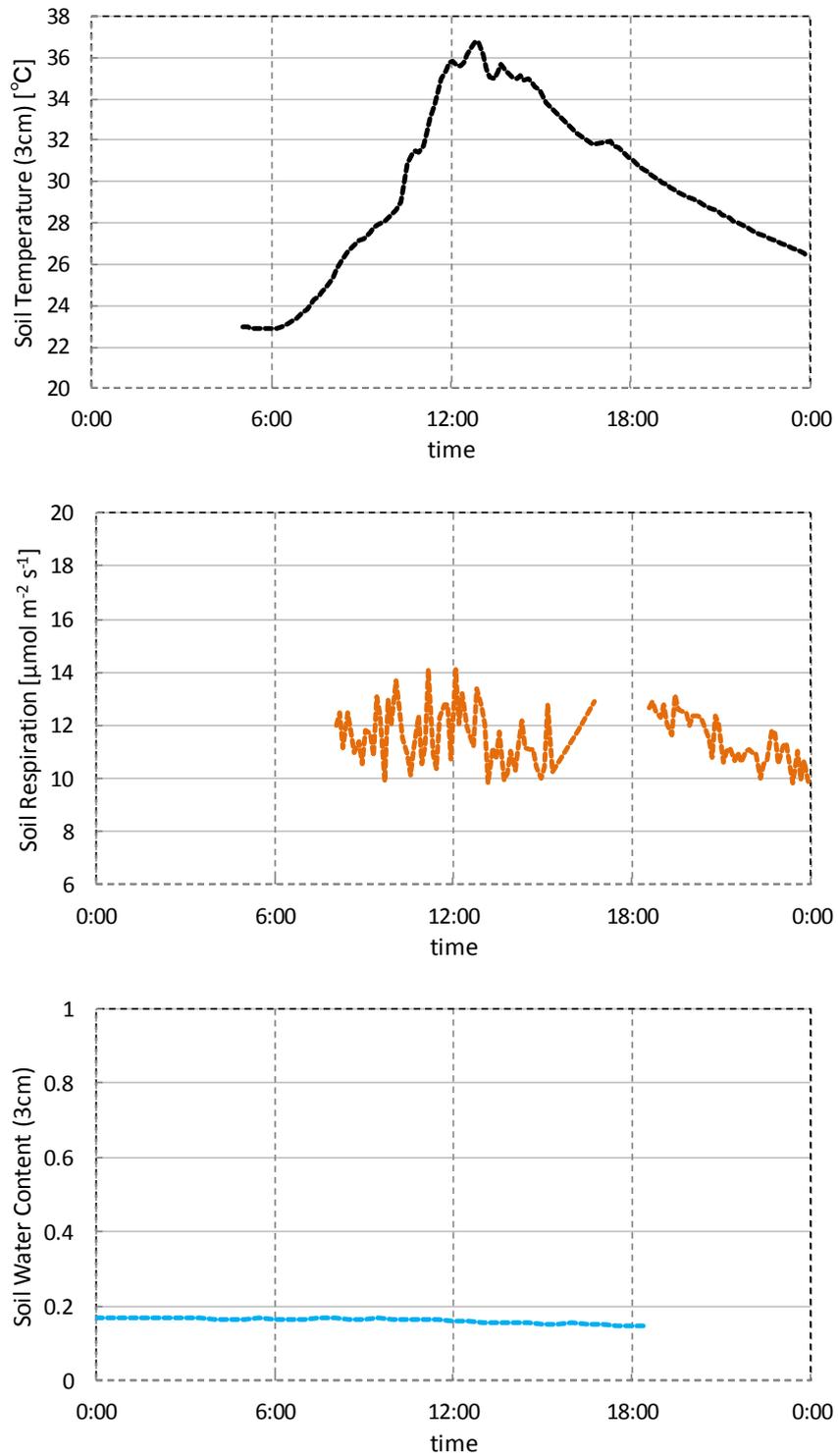


図 3.25 2012 年 08 月 31 日 Zankalon においてロングタームチャンバーにより測定された地温(上図), 土壌呼吸(中図), タワー付近の TDR による土壌水分(下図)

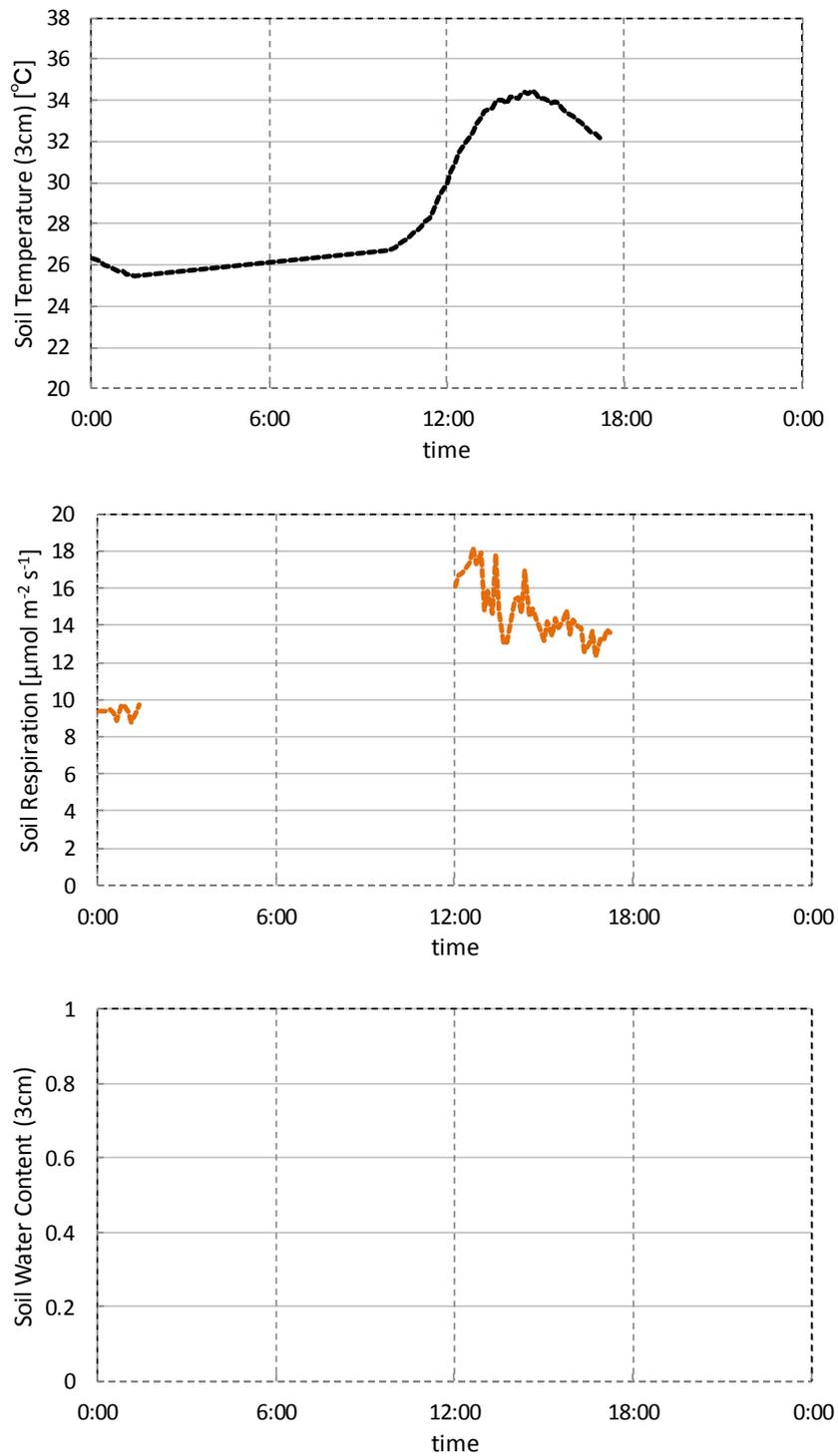


図 3.26 2012 年 09 月 01 日 Zankalon においてロングタームチャンバーにより測定された地温(上図), 土壌呼吸(中図), タワー付近の TDR による土壌水分(下図)

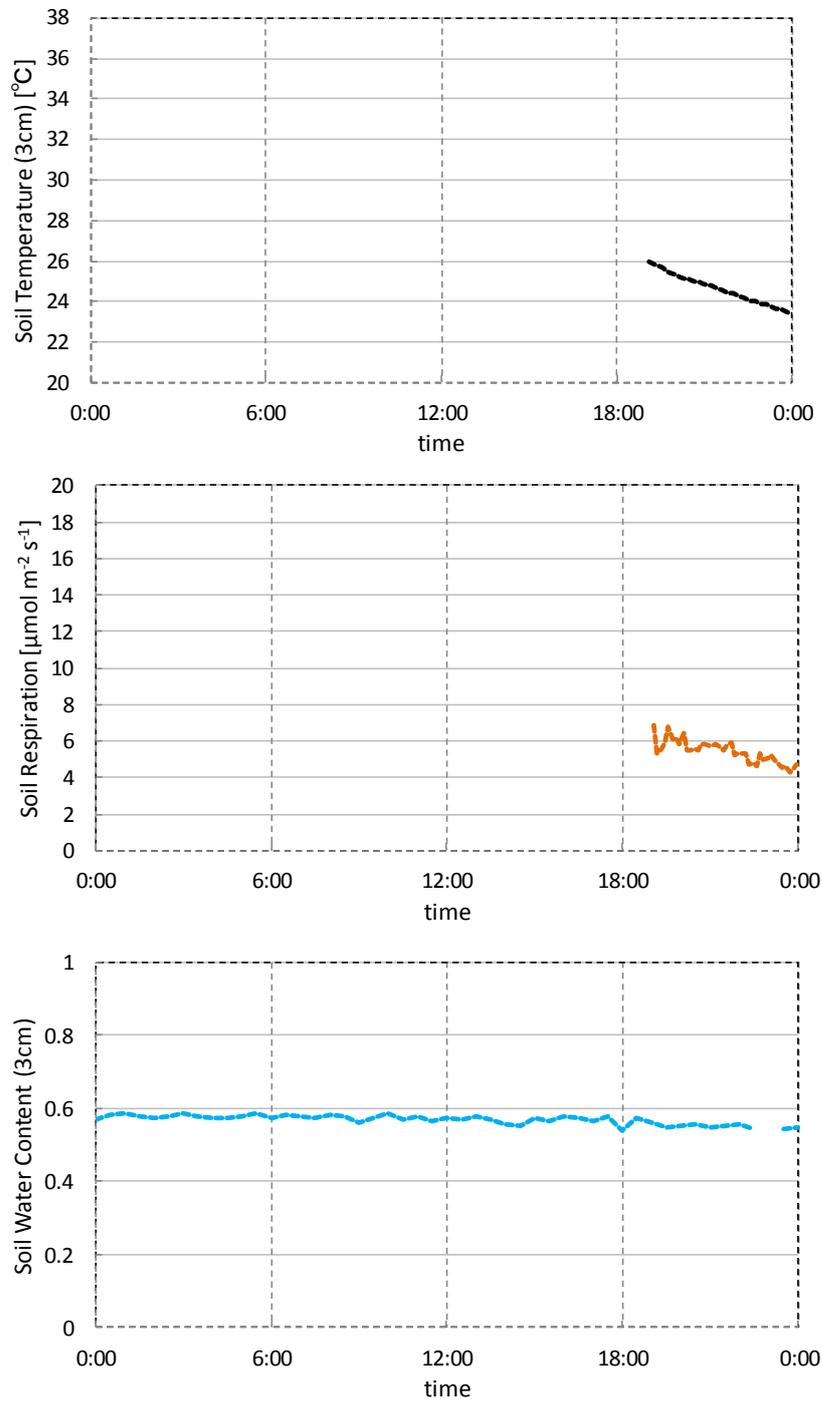


図 3.27 2012 年 09 月 06 日 Zankalon においてロングタームチャンバーにより測定された地温(上図), 土壌呼吸(中図), タワー付近の TDR による土壌水分(下図)

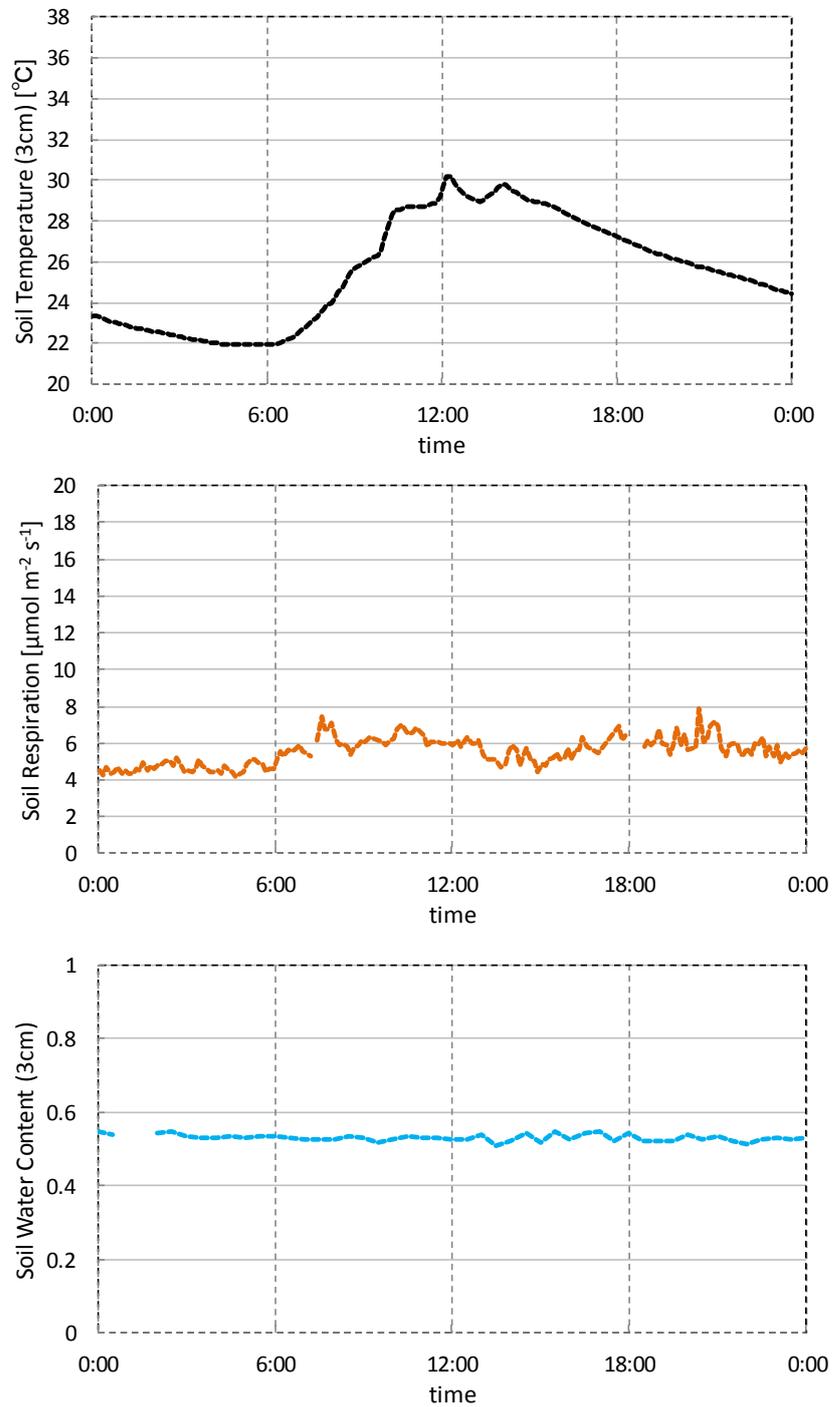


図 3.28 2012 年 09 月 07 日 Zankalon においてロングタームチャンバーにより測定された地温(上図), 土壌呼吸(中図), タワー付近の TDR による土壌水分(下図)

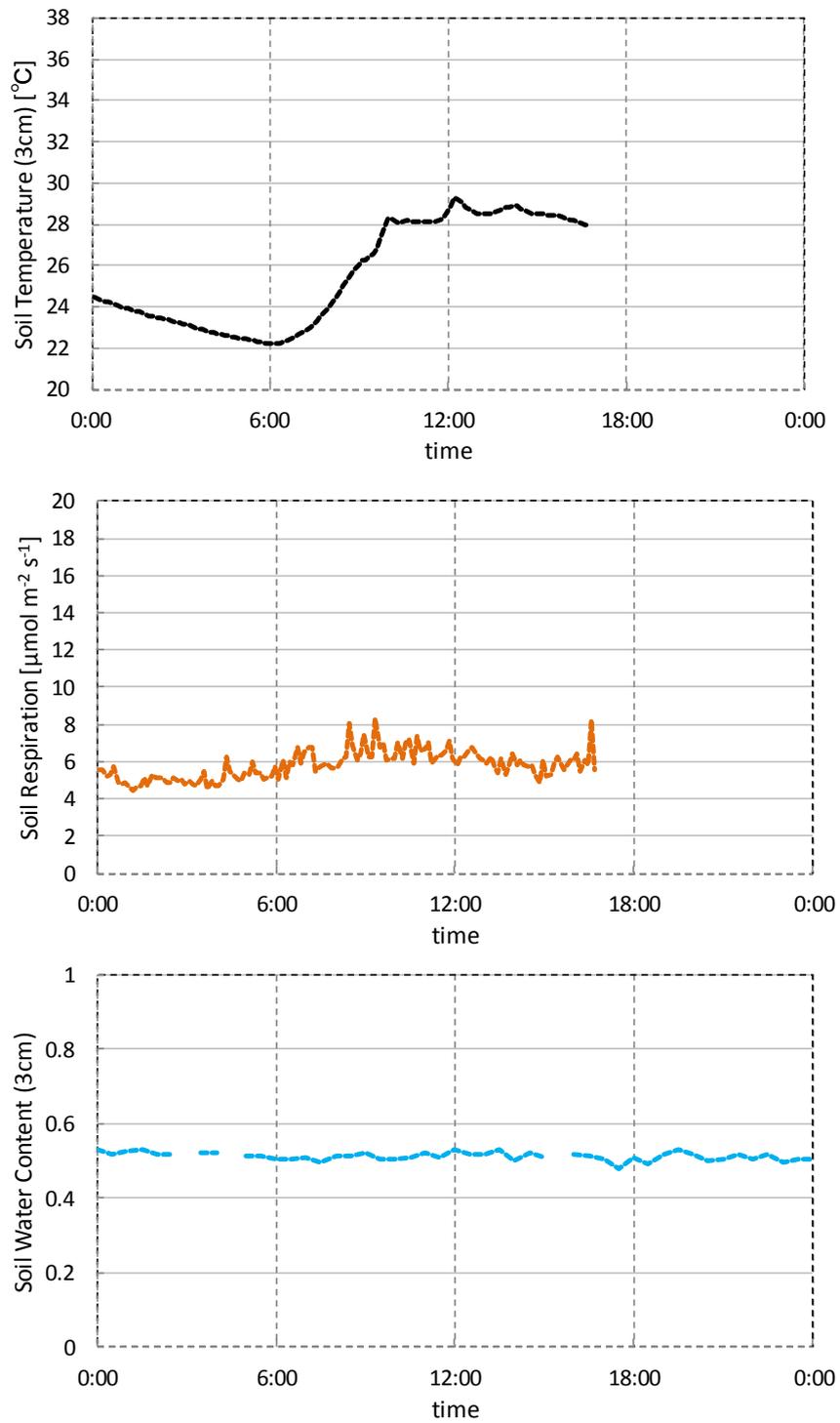


図 3.29 2012 年 09 月 08 日 Zankalon においてロングタームチャンバーにより測定された地温(上図), 土壌呼吸(中図), タワー付近の TDR による土壌水分(下図)

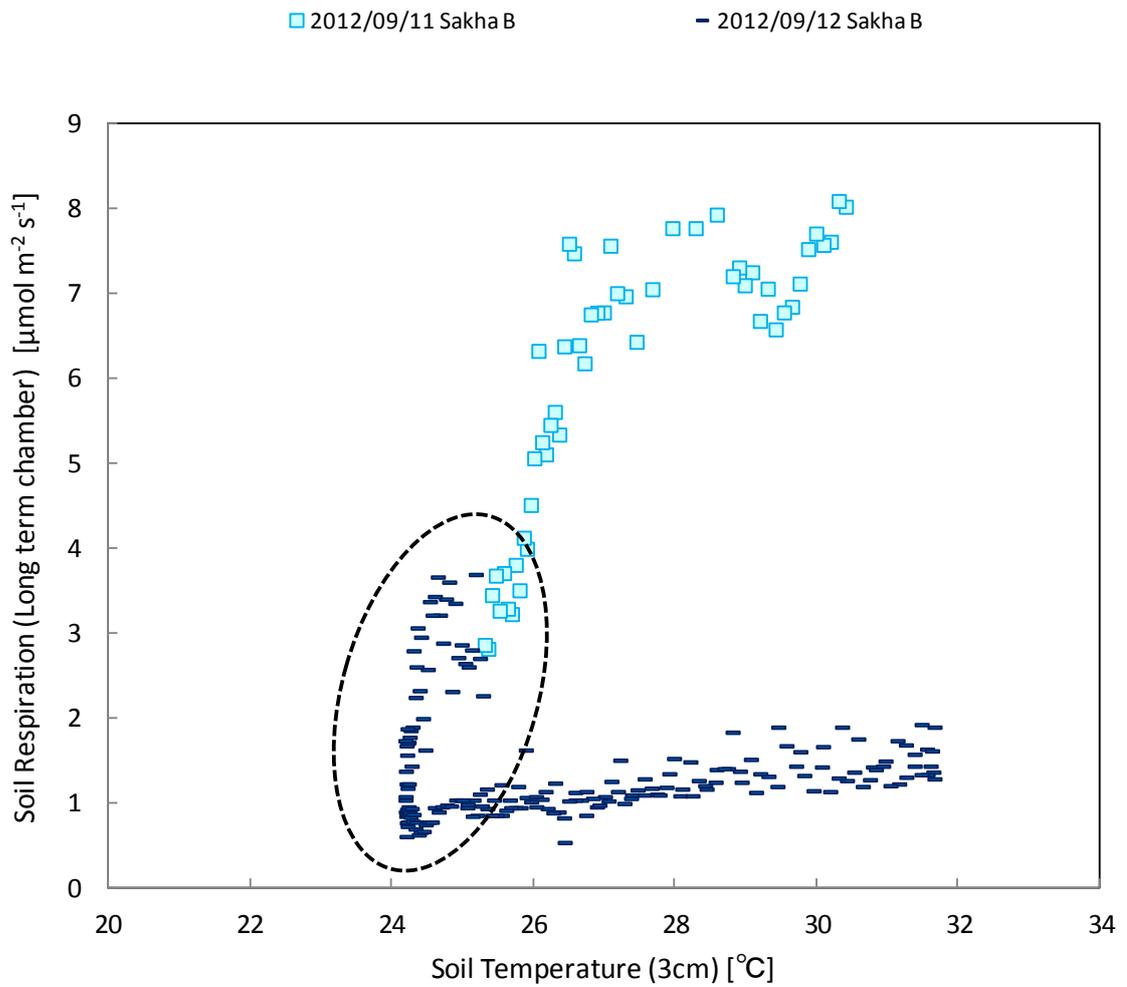


図 3.30 土壤水分が異なる時の地温と土壤呼吸の関係 (Sakha B)

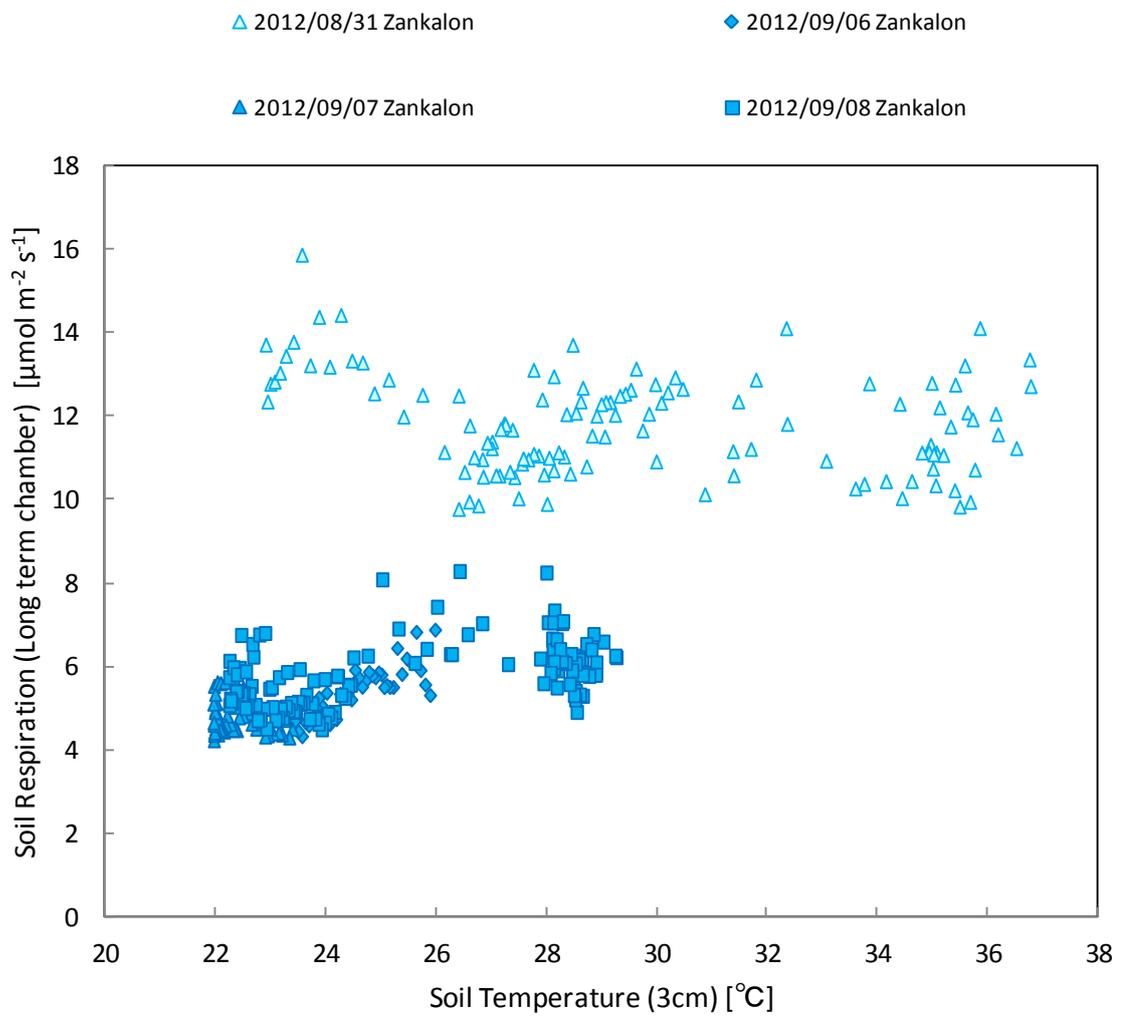


図 3.31 土壤水分が異なる時の地温と土壤呼吸の相関 (Zankalon)

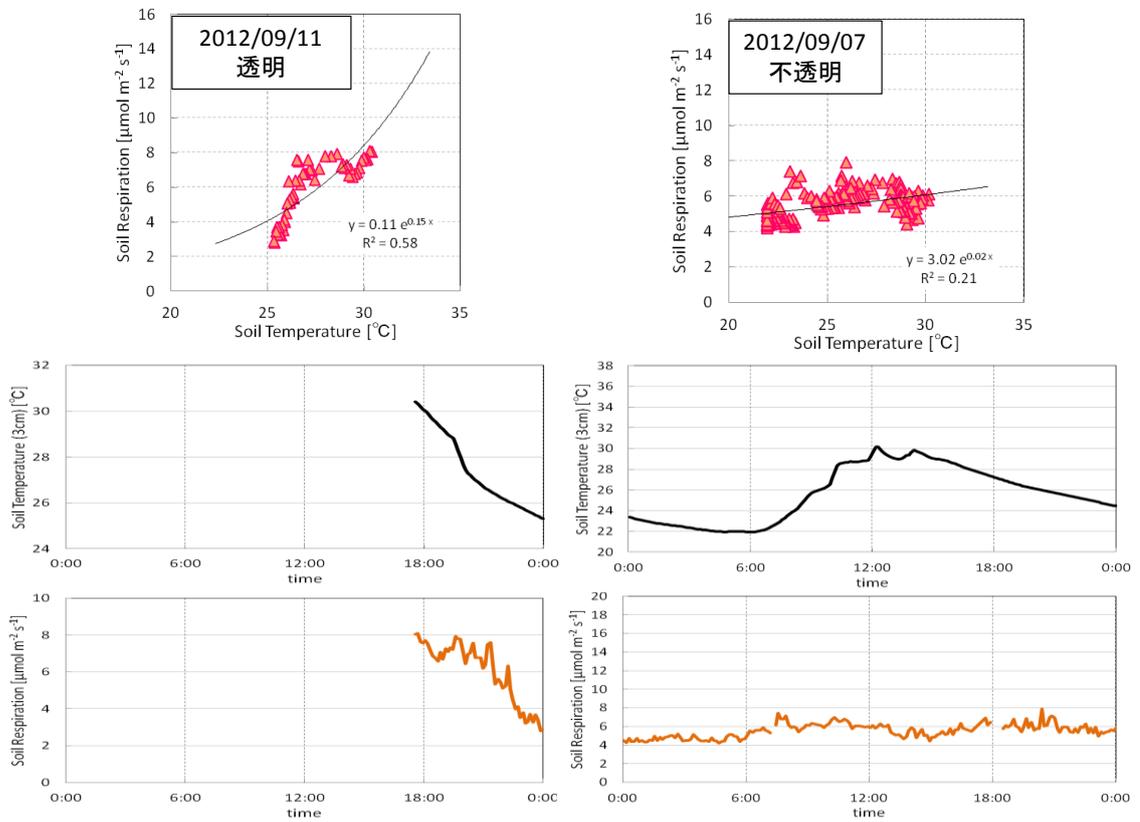


図 3.32 チャンバーの透明・不透明の違いによる地温および土壌呼吸の相関の差

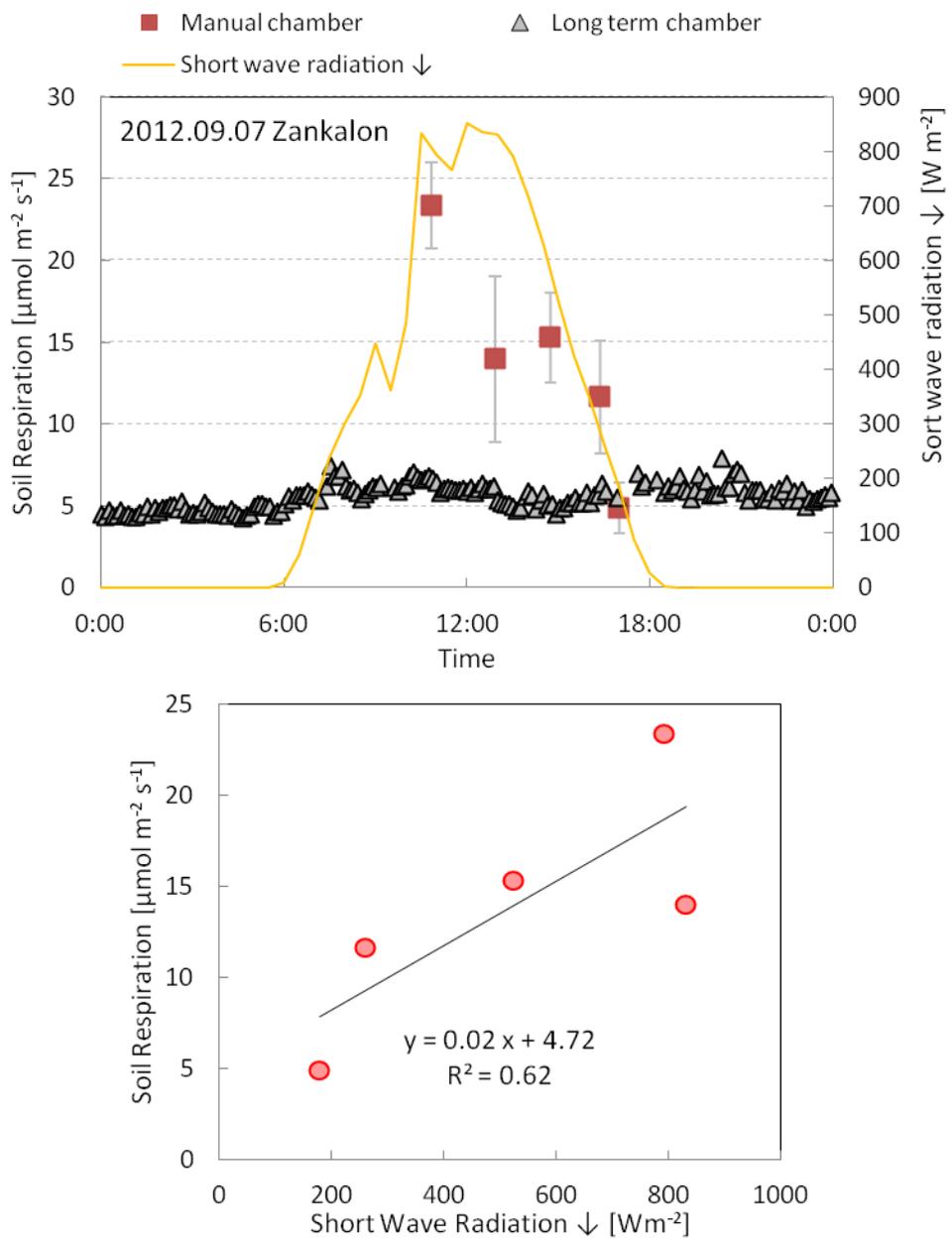


図 3.33 2012 年 09 月 07 日におけるチャンバー法による土壌呼吸比較

3.4. 純一次生産量

植生の働きである呼吸や光合成は、成長過程において植物と周辺環境との間でなされ、中でも CO_2 の交換である光合成は日射がある日中に主に気孔を通して行われる。光合成によって得られた CO_2 は植物体自身の構成やエネルギーに使われたりする。また、普段は呼吸によって CO_2 を放出しており、それらのバランスによって群落から大気への CO_2 放出か吸収かが決定される。今回は、対象地域の作物群落において、圃場全体の群落における総呼吸量および光合成量の測定を行った。まず、光合成速度測定装置で測定した値について、Sakha A, Sakha B, Zankalon の 3 圃場における植生において、植生高の 1/2 の高さにおいて測定したもの (Above) , 最下部で測定したもの (Below) を図 3.34~3.36 に示した。図 3.34~3.36 においては光合成速度と呼吸の和を縦軸にとり、マイナスであれば大気からの CO_2 吸収、プラスであれば CO_2 放出を表している。

はじめに Sakha A については Above, Below 共に昼の 12 時頃に光合成活動のピークを迎え午後から夜間に向かうに従って光合成量が減少していき、18 時前には光合成量は 0 になりそれからわずかに増加した。光合成量が $0\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ となったのは光合成量=呼吸量となったことを示しており、それ以降は呼吸量の方が光合成量を上回った事になる。また Above と Below はそれぞれ値に大きな差はなく、その原因としては、Sakha A の作物はライスであったために Above と Below の測定距離が近かったために、光合成を行う環境が類似していた事が考えられる。実際に測定された箇所 LAI を比較してみてもその差は LAI = 1 以内であった。Sakha B については Sakha A と同様に 12 時頃に光合成活動のピークを迎え午後から夜間に向かうに従って光合成量が減少して行った。また 1 日を通して光合成量は Above の方が大きくなり、Above と Below との間に光合成量の差が見られた。またその差は、日中の方が大きく午後から夜間に向かうに従って小さくなっていった。これは植生の上下の葉における日射の当たり方によるものだと考えられる。またこのような挙動は Zankalon についても見られ、Sakha A と比較すると作物の違いによる原因も挙げられた。ライスに比べてメイズは植生高や Below の LAI が大きく、日射が最下部まで到達しにくい事も考えられる。Zankalon においては得られた測定結果が少なかったため、本観測期間の短期間であればそれぞれ異なる日に測定したある時刻に対する光合成量は変化しないと仮定し、日変化を 1 つの図 3.36 に示した。次に、群落生態系全体の光合成量を算出するためにこれらの結果とそれぞれの圃場において植生高別に測定した LAI の結果を用いて、それぞれ作物別にスケールアップしたものを図 3.37 に示す。それぞれ Sakha A はライス、Sakha B および Zankalon はメイズである。スケールアップに使用した LAI の結果は表 3.3 に示す。各圃場共に明瞭な日変化が見られたと共に日中の 12 時頃に最大光合成量は $60\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 程度となり、また作物別に比較するとわずかにメイズの方が 1 日を通しての光合成量が大きくなる結果となった。

表 3.3 農地生態系における純一次生産推定のために使用した各圃場の LAI
実測値

<i>LAI</i>			
	Sakha A	Sakha B	Zankalon
Below	2.54	2.62	3.03
Above	2.01	1.38	2.28

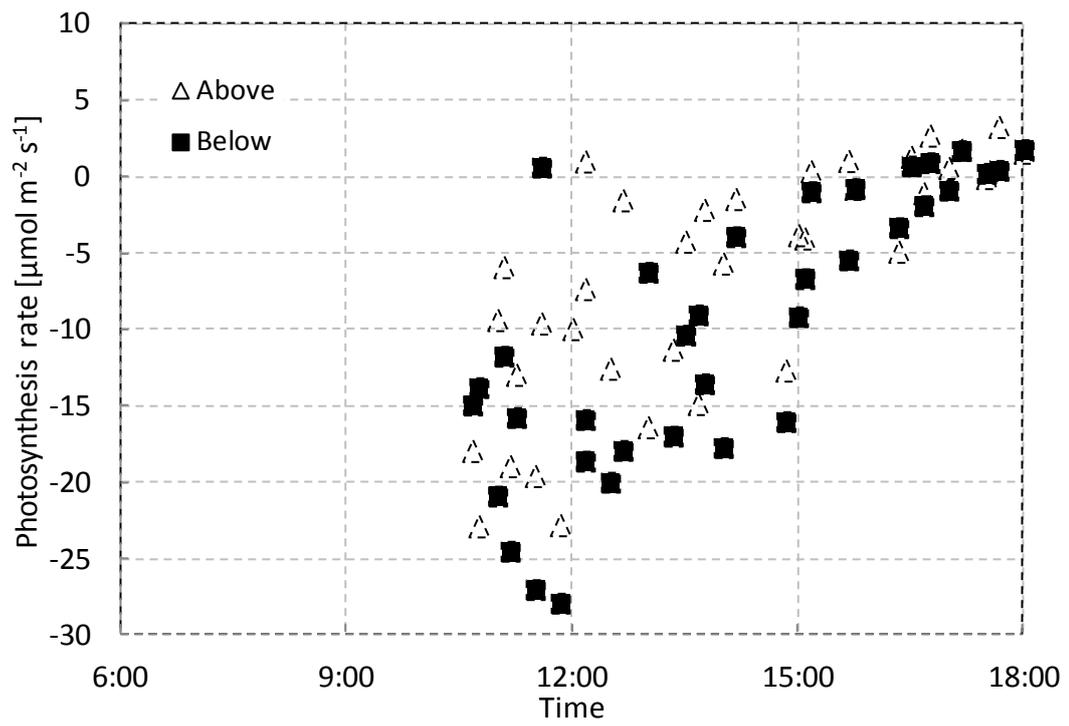


図 3.34 2012 年 08 月 26 日 Sakha A にて測定した植物の光合成速度の日変化 (ライス)

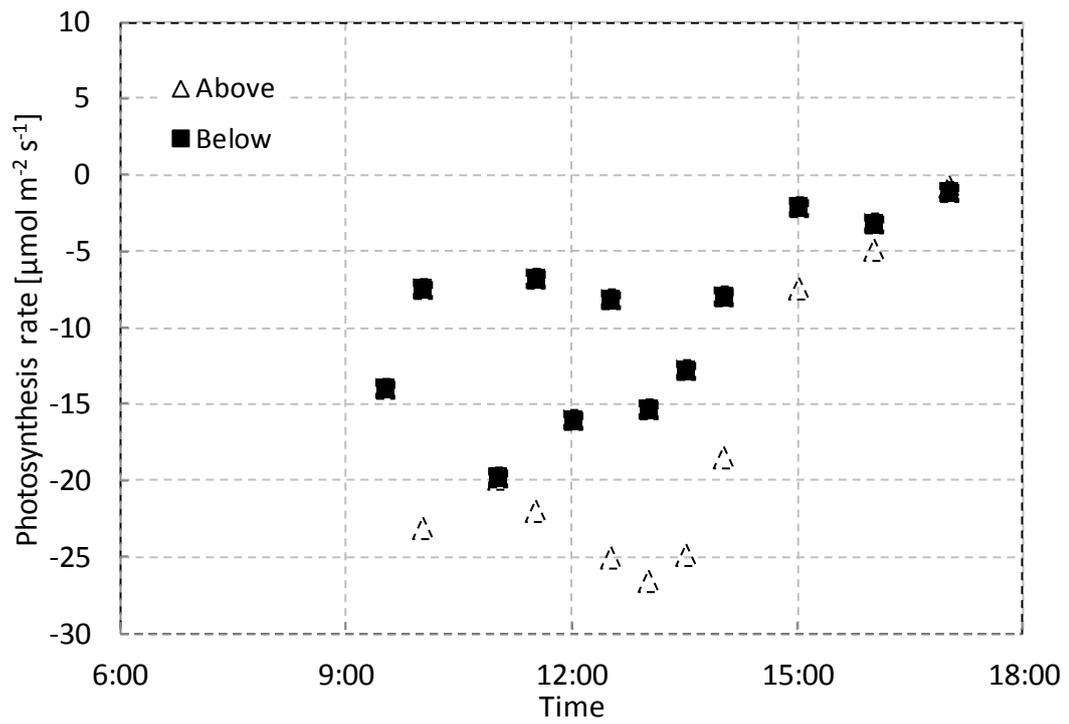


図 3.35 2012年09月15日 Sakha B にて測定した植物の光合成速度の日変化 (メイズ)

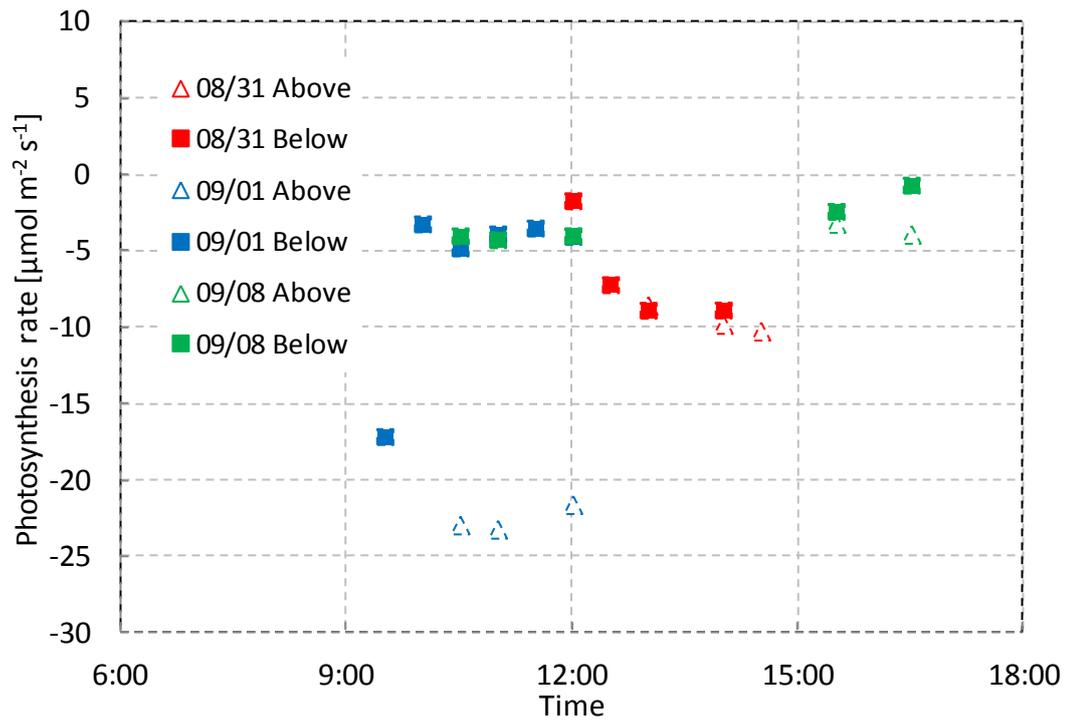


図 3.36 2012 年 08 月 31 日, 09 月 01 日, 09 月 08 日 Zankalon にて測定した植物の光合成速度の日変化 (メイズ)

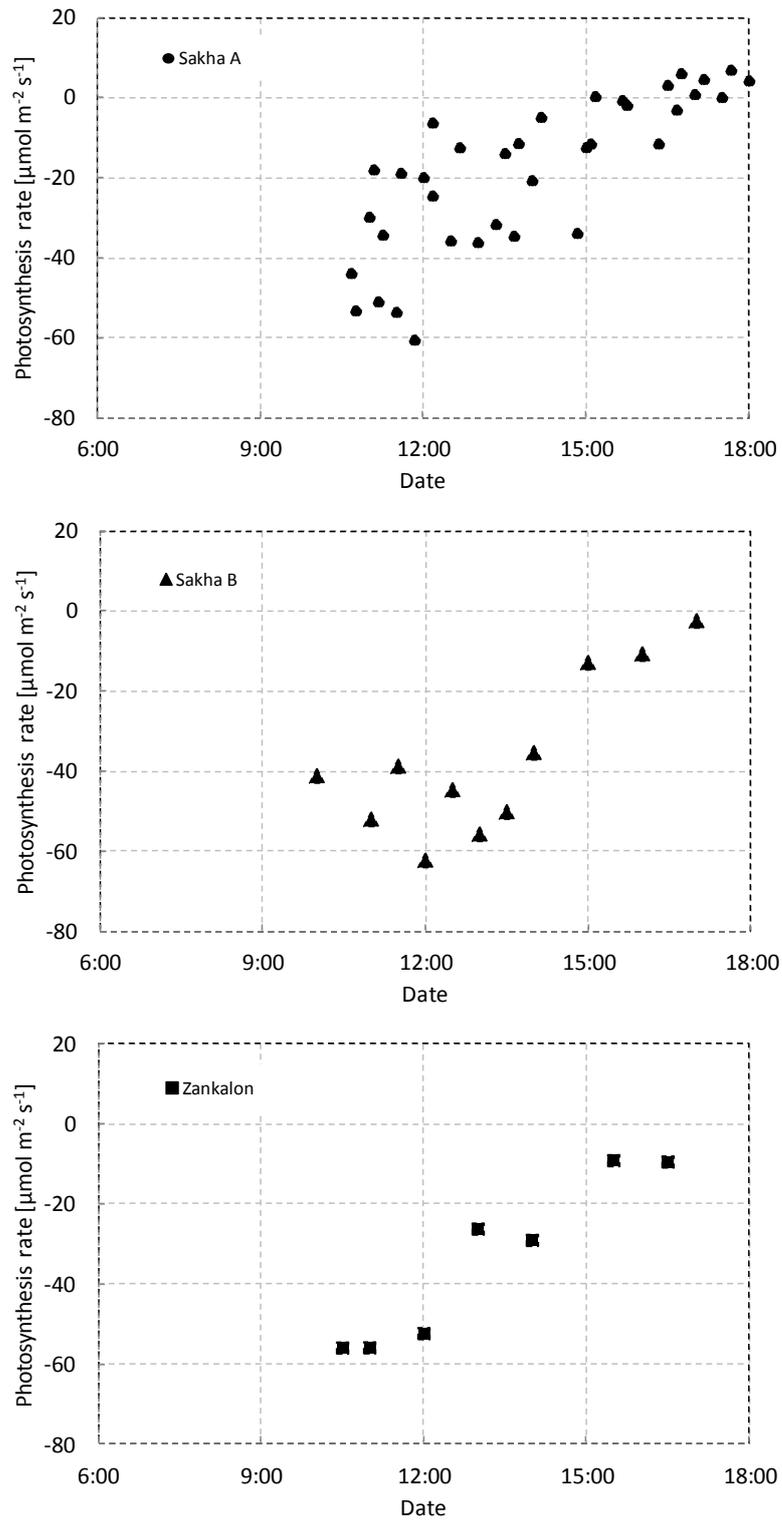


図 3.37 対象とした 3 圃場の群落生態系における光合成速度の日変化 (上から Sakha A, Sakha B, Zankalon)

3.5. 作物生育期間の CO₂ フラックス

ここで、2012年 Zankalon において作物生育期間中における CO₂ フラックスおよびそれぞれの環境要因の動態を図 3.38, 図 3.39 に示した。はじめに図 3.38 について、上段から、圃場において実測された LAI からその間を線形内挿し変化を実線で表したもの、観測タワーにて観測された CO₂ フラックス積算値(欠損値は内挿および平均日変化法にて補完)、観測タワー付近で観測された 4 深度の地温および土壌水分となっている。この圃場については播種が 6 月 23 日、収穫が 9 月 27 日に行われ、作物はメイズが栽培されていた。はじめに、LAI の変動については 7 月初旬から 8 月下旬にかけて増加し、それからはほとんど増加しなくなり収穫を迎えた。最後には作物が枯れてしまいわずかに LAI が下がった。CO₂ フラックス積算値 (NEE 積算値) については播種以前の 6 月の間は作物が無いため光合成が行われず、土壌呼吸のみであり、大気に対して放出になっており、そこから LAI の増加に従って徐々に吸収に転じた。吸収のピークが 7 月中旬から下旬にかけてであり、そこから徐々に吸収量が減少していき、収穫後は 6 月の間と同じ放出に転じた。LAI のピークと NEE 積算値のピークにズレがある点から、7 月期間の方が作物の光合成活動が活発であったことが示唆され、作物の生育段階による光合成活動の強弱が見られたとともに、LAI の増加率が光合成速度に影響しているということが考えられた。次に、地温については対象期間を通して 30℃ 前後を変動しており、それぞれの最大値と最小値となった時間は 3cm が 14 時と 5 時、10cm が 17 時と 7 時、20cm が 18 時と 8 時、40cm が 18 時と 8 時であり、深度によって日射の伝わりが異なりピークが異なって表れる事が確認された。また、灌漑直後には急激な地温低下が確認された。この変動は浅い地温であるほど影響が強く、最も深い深度である 40cm はほとんど見られなかった。深度別の地温の差は作物の成長に従って小さくなっていった。これはおそらく葉の存在によって日射が地表面に当たってからの地温変動が滑らかなったためだと考えられる。土壌水分については、数回の灌漑により土壌水分が 0.7 付近まで増加されるという明瞭な応答が見られた。最も浅い深度ほど応答が敏感であり、深度別の差も確認できた。次に図 3.39 について、上段から圃場において実測された LAI からその間を線形内挿し変化を実線で表したもの、観測タワーにて観測された CO₂ フラックス、正味放射量、顕熱フラックス、潜熱フラックス、地中熱流量の各月における 11 日から 20 日の日変化(欠損値は内挿および平均日変化法にて補完)を示したものである。6 月に関しては播種以前であるため NEE の日変化はあまり見られず、0 付近からややプラスの値(放出)を推移している。7 月に入ると NEE が日中にマイナス(吸収)の値に転じ、今回の生育期間における吸収のピークを迎えた。またこの増加は LAI の増加と一致しており、日変化でいうと、PAR の日変化と同じパターンをしている事から PAR が光合成活動に影響を与える主たる環境要因であることが分かった。8 月に入ると吸収量は少し減少したものの、日中に吸収のピークが見られた。しかし 7 月と比べて夜間での NEE がわずかにプラスに転じている。これは土壌呼吸による炭素放出成分が増えたことによる

と考えられ、地温の上昇に伴って7月よりも根の呼吸や土壌中微生物の分解作用が活発になったことが原因と考えられる。9月に入ると吸収はほとんど見られず、収穫後は播種時期の6月と似たような挙動を示した。収穫後の10月はその期間ともにNEEは日中にマイナスの値をとるどころかプラスとなり、圃場は炭素放出源に転じたことが確認できた。これは光合成による吸収成分が無くなったため、土壌呼吸の放出成分のみを表している。

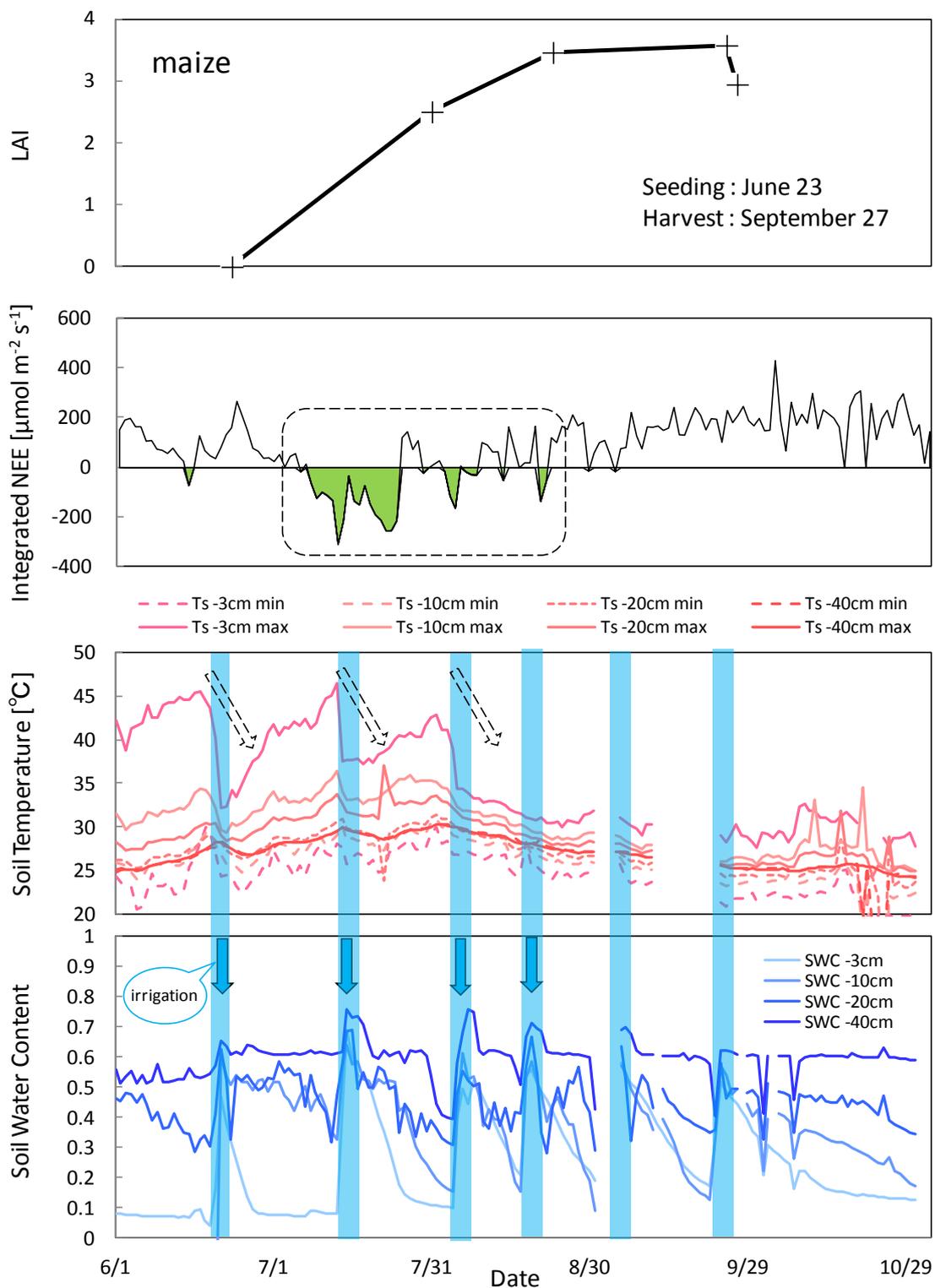


図 3.38 作物生育期間における各環境要因の変動 (2012 年 Zankalon)
 (上から LAI 実測値, 観測タワーにより観測された CO_2 フラックス積算値, 観測
 タワー付近の TDR より観測された地温, 土壤水分)

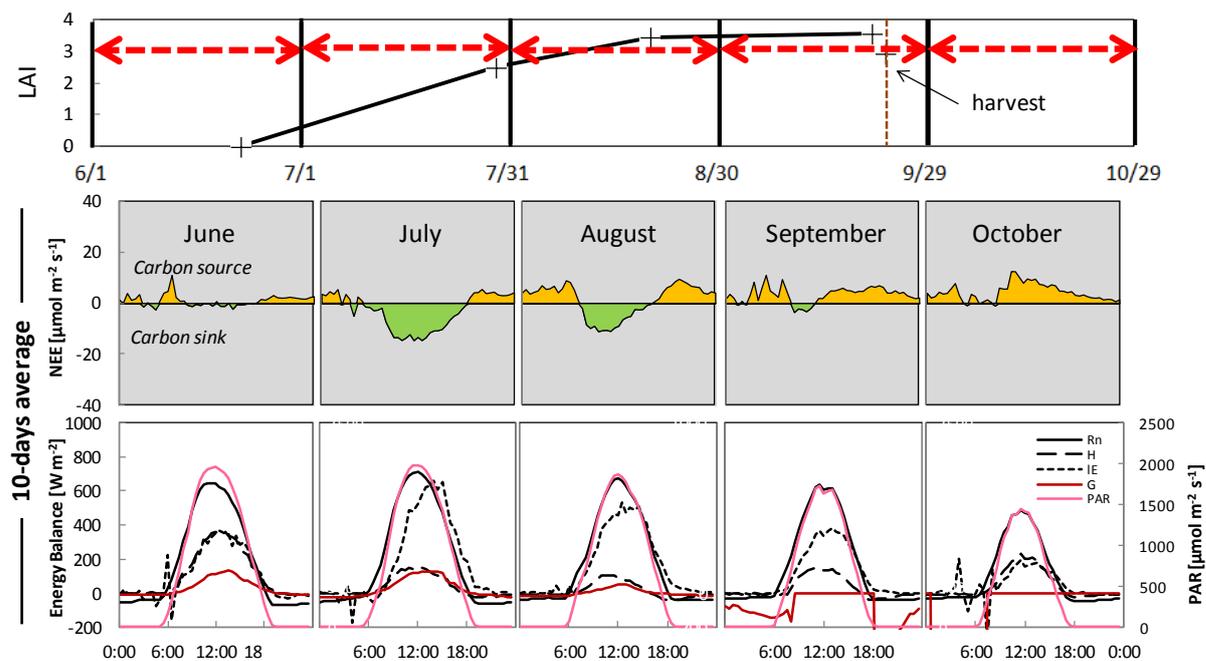


図 3.39 作物生育期間における CO_2 フラックスの日変化 (2012 年 Zankalon)
 (上から LAI 実測値, 観測タワーにより観測された CO_2 フラックス, 正味放射量,
 顕熱フラックス, 潜熱フラックス, 地中熱流量, PAR の日変化)

3.6. 回帰モデル

ロングタームチャンバーとマニュアルチャンバーで測定された土壌呼吸および光合成測定装置で測定された光合成速度それぞれの結果からパラメータ化を行い、回帰モデルを作成した。はじめに、土壌呼吸については式(41)を用いて地温の関数とした(Black *et al.*, 1996)。透明および不透明なチャンバーの違いによる光強度の影響の差異を議論したが、まずは土壌呼吸のみのパラメータ化を行うために、ロングタームチャンバーから得られた土壌呼吸および地温を用いた。Zankalon について地温と土壌呼吸の相関から指数近似を行い、式(41)におけるパラメータの決定を行った。これまでの研究では $Q_{10}=1\sim 2$ のものが多く、今回は $1\sim 2$ に入ったため妥当な数値が得られたとされる。また、パラメータ化を行うに当たって地温のレンジを広く必要とするため、タワーの結果を用いた。図 3.40 から図 3.45 にフラックスタワーおよびロングタームチャンバーにより観測された 3cm 深度の地温と土壌呼吸の回帰した結果を示す。それぞれ光分解の影響を受けない夜間の時間帯(18:00–05:30)のデータや不透明なチャンバーのデータを用いた。

はじめに、Sakha A については 2011 年、2012 年とともに $SWC < 0.4$ の条件下では地温の増加に伴う土壌呼吸の増加があまり見られなかった。一方で $SWC \geq 0.4$ の条件下では 2011 年においては地温 20°C から 30°C 付近に増加するに従って土壌呼吸が $4\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 増加し、また 2012 年においては地温 5°C から 30°C 付近まで徐々に増加していく傾向が見られ、全体的に地温増加に伴う土壌呼吸増加が確認できた。

Sakha B については 2011 年の $SWC \geq 0.4$ の条件下において地温増加による土壌呼吸増加が確認できなかった。この条件下における地温の温度幅は少なかった事が原因の一つに挙げられる。また 2012 年は Sakha A と同様に地温の増加に伴った土壌呼吸が増加したが、25°C 付近で一度減少し再び増加するという傾向が見られた。この傾向は両条件下において確認出来たので土壌水分量による環境条件の違いによるものではなかった。

Zankalon についてはタワーで観測した土壌呼吸と 2012 年に実測したロングタームチャンバーの土壌呼吸のデータを合わせて回帰した。2011 年、2012 年ともに Zankalon は $10\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 程度を変動しており、Sakha A, B に比べて土壌呼吸が多い事が分かった。また、 $SWC < 0.4$ の条件下ではロングタームチャンバーの結果は同地温においてもタワーの結果より比較的大きな値となったが、 $SWC \geq 0.4$ の条件下ではほぼ同じ値となった。Sakha A, B ではタワーの結果のみ、Zankalon ではタワーの結果茶チャンバーの結果を合わせて回帰式を作成した。

次に、光分解土壌呼吸の増加についてパラメータの決定を行った。はじめに光分解による土壌呼吸の増加を求めるため、マニュアルチャンバーで得られた土壌呼吸から先ほど得られた回帰式と地温の結果を用いて、測定時の地温増加による土壌呼吸を減じる。次に、図 3.47 よりそれらの値と下向き短波放射との相関を取り、今回は一次関数の関係にあると仮定して係数を求めた。この 2

段階を持って大気に対して炭素放出成分である土壌呼吸の回帰モデルを作成した。次に、光合成速度測定装置で得られた光合成速度と PAR を用いて式(42)におけるパラメータの決定を行った(図 3.48)。図 3.48 は光合成有効放射が増加するにつれ群落上の光合成速度が増加する関係を示しており、上からライス、メイズ、コムギを示している。これらの結果からパラメータを決定し、炭素吸収成分である光合成速度の回帰モデルを作成した。回帰モデルによる NEE の値は、これら 2 つの土壌呼吸の推定値から光合成速度の推定値を減じる事によって算出した。

ここで、2012 年 Zankalon における NEE 実測値と回帰モデルによって求められた NEE 推定値を、作付け期間と非作付け期間についての比較したものを図 3.49、図 3.50 に示した。作付け期間については実測値とモデル値の挙動が類似しており、日中の光合成や夜間の土壌呼吸の挙動などを良く表現できている。ただ日中における NEE のピークから徐々に増加していく挙動が実測値よりも遅れて表現された。また、非作付け期間については土壌呼吸の日変化の形は良く表現できているものの、1 日を通して全体的に実測値よりも大きい値となった。これら 2 つの差は、光分解による土壌呼吸の値を今回は一次関数で仮定してしまったために生じたものではないかと考えられる。また夜間については、土壌呼吸の実測値は 0 付近にまで減少しているのに対し、モデル値は 5 付近で減少は止まり、それ以下にはなっていない。これは、夜間は安定状態になるためタワーによる実測は過小評価されてしまうためだと考えられる。今後はさらに夜間の異常値除去判定をより精密にする必要がある。

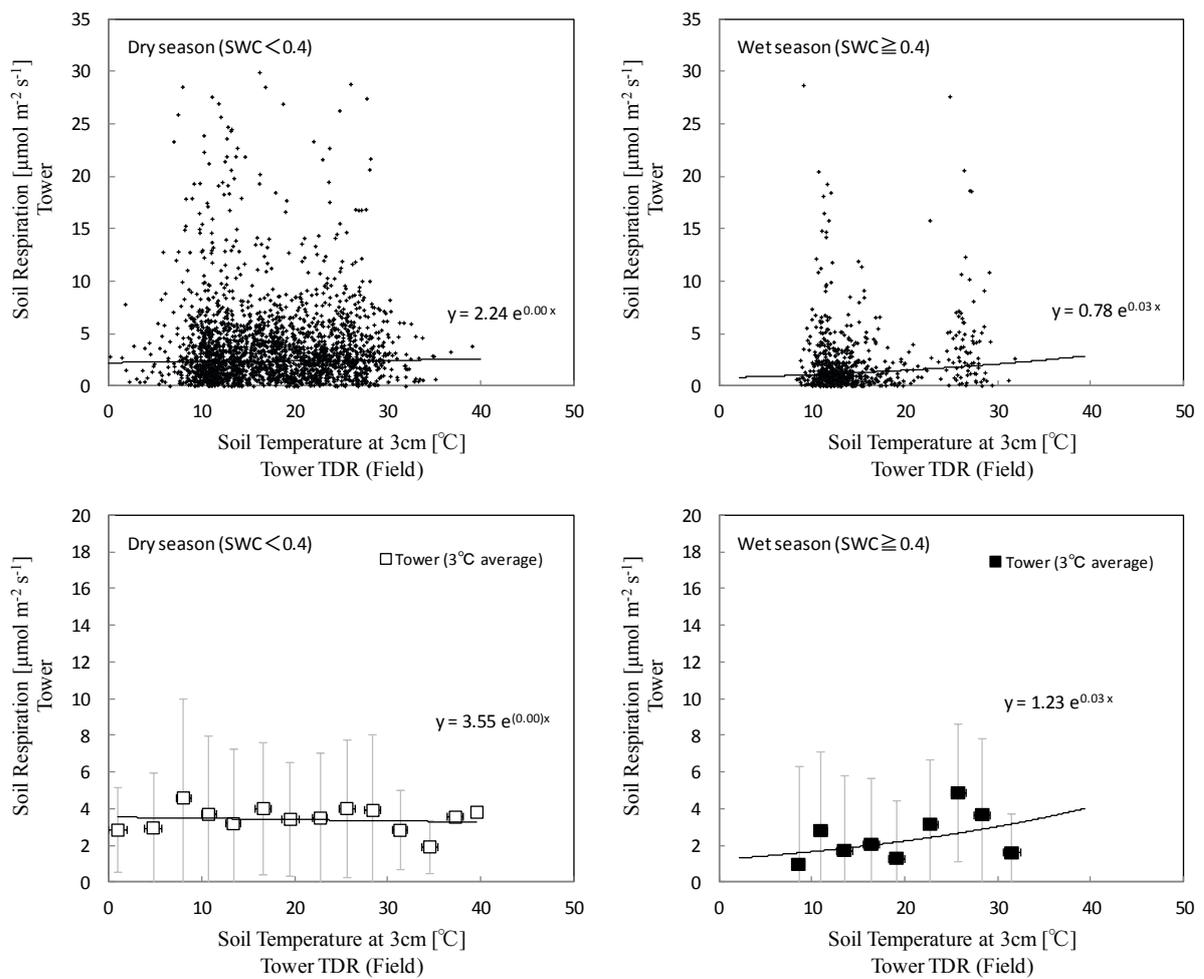


図 3.40 2011年 Sakha A における 3cm 深度地温とタワーにより観測された夜間(18:00-05:30)の土壤呼吸の関係

上左図：30分毎のデータ 地表面乾燥時(SWC < 0.4)

上右図：30分毎のデータ 地表面湿潤時(SWC ≥ 0.4)

下左図：地温 3°C 平均値毎のデータ 地表面乾燥時(SWC < 0.4)

下右図：地温 3°C 平均値毎のデータ 地表面湿潤時(SWC ≥ 0.4)

(エラーバーは標準偏差)

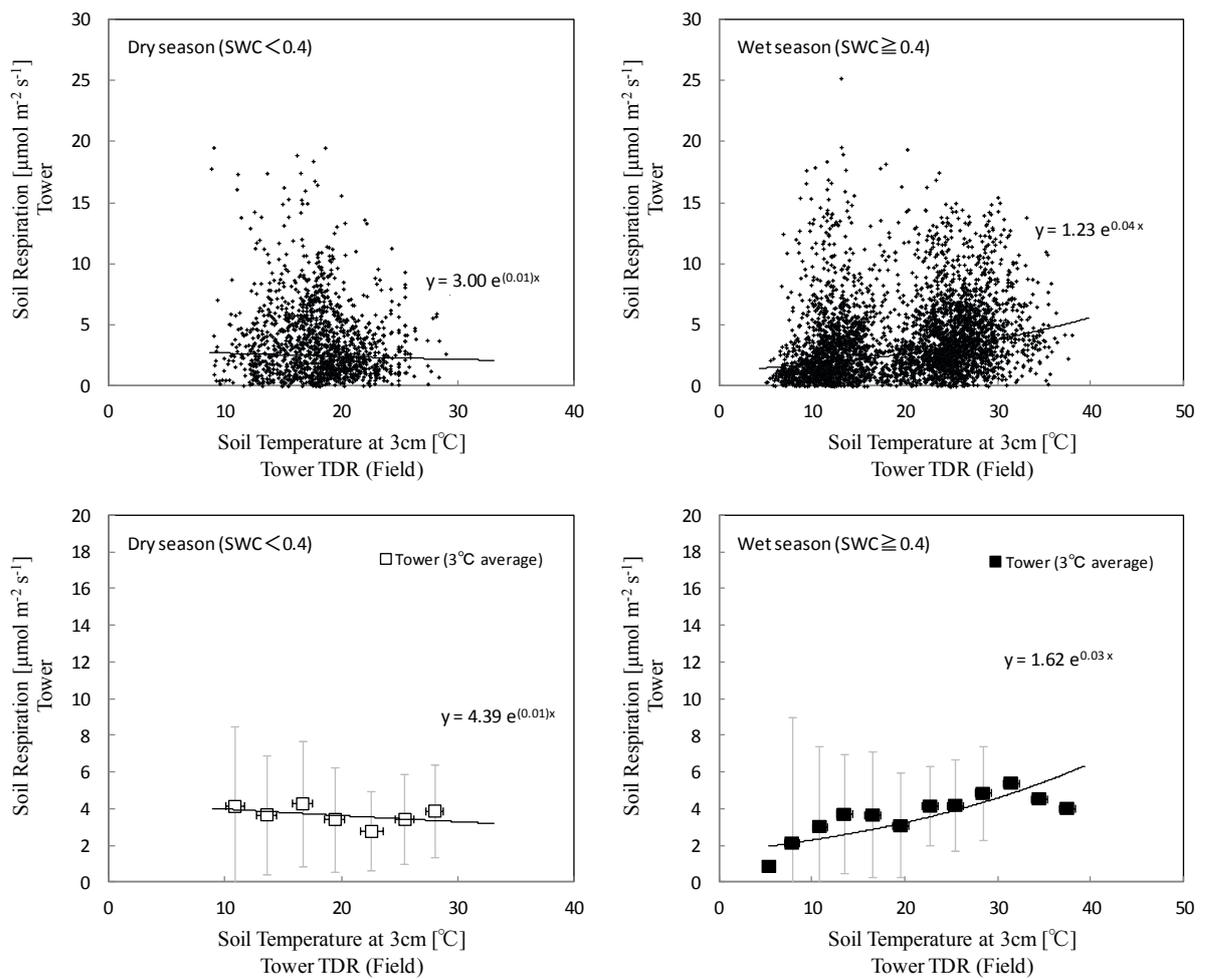


図 3.41 2012 年 Sakha A における 3cm 深度地温とタワーにより観測された夜間(18:00-05:30)の土壤呼吸の関係

上左図：30分毎のデータ 地表面乾燥時(SWC < 0.4)

上右図：30分毎のデータ 地表面湿潤時(SWC ≥ 0.4)

下左図：地温 3°C 平均値毎のデータ 地表面乾燥時(SWC < 0.4)

下右図：地温 3°C 平均値毎のデータ 地表面湿潤時(SWC ≥ 0.4)

(エラーバーは標準偏差)

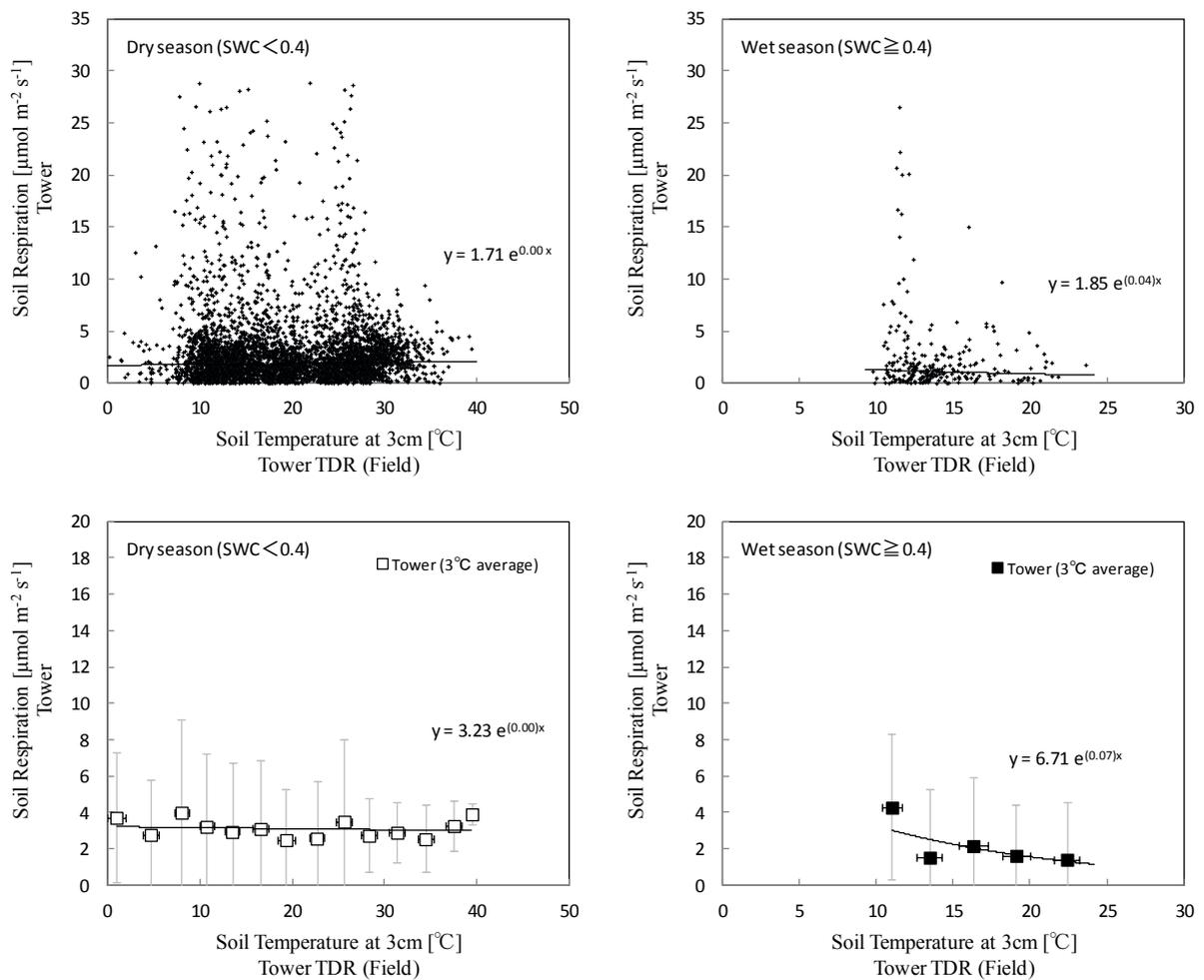


図 3.42 2011 年 Sakha B における 3cm 深度地温とタワーにより観測された夜間(18:00–05:30)の土壤呼吸の関係

上左図：30 分毎のデータ 地表面乾燥時(SWC < 0.4)

上右図：30 分毎のデータ 地表面湿潤時(SWC ≥ 0.4)

下左図：地温 3 $^{\circ}\text{C}$ 平均値毎のデータ 地表面乾燥時(SWC < 0.4)

下右図：地温 3 $^{\circ}\text{C}$ 平均値毎のデータ 地表面湿潤時(SWC ≥ 0.4)

(エラーバーは標準偏差)

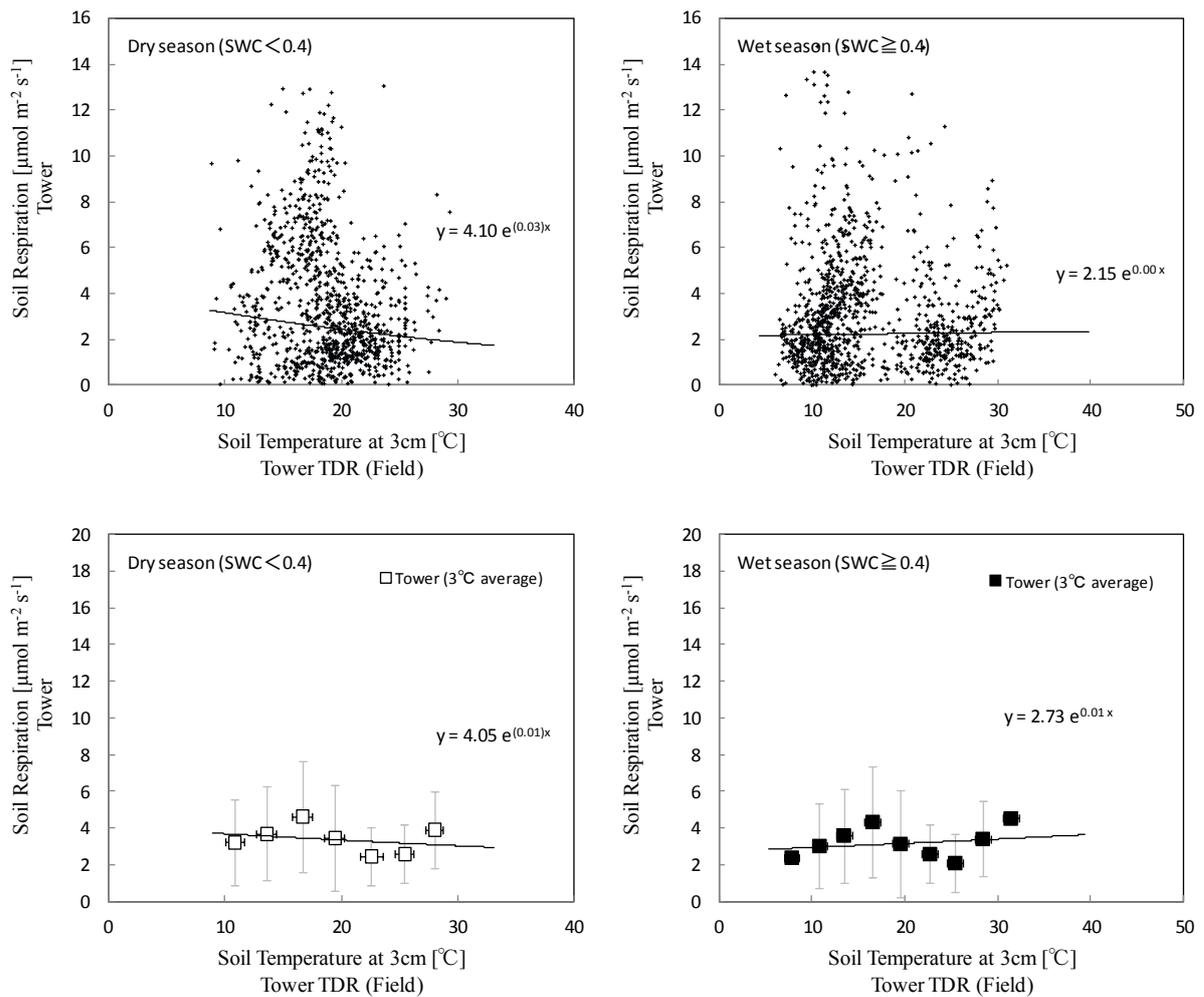


図 3.43 2012 年 Sakha B における 3cm 深度地温とタワーにより観測された夜間(18:00-05:30)の土壤呼吸の関係

上左図：30分毎のデータ 地表面乾燥時(SWC < 0.4)

上右図：30分毎のデータ 地表面湿潤時(SWC ≥ 0.4)

下左図：地温 3°C 平均値毎のデータ 地表面乾燥時(SWC < 0.4)

下右図：地温 3°C 平均値毎のデータ 地表面湿潤時(SWC ≥ 0.4)

(エラーバーは標準偏差)

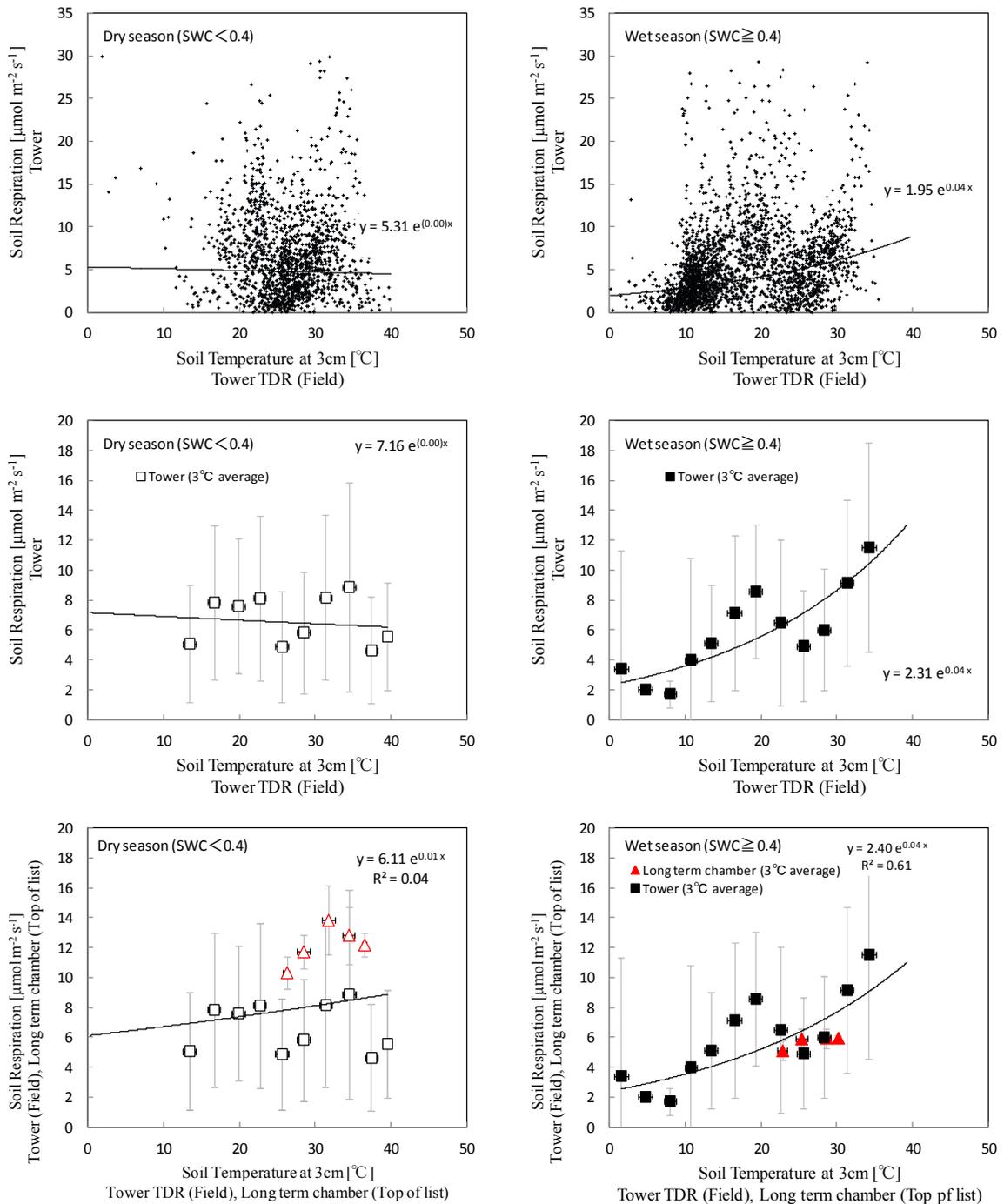


図 3.44 2011年 Zankalon における 3cm 深度地温とタワーにより観測された夜間(18:00-05:30)の土壤呼吸およびロングターチャンバーにより観測された土壤呼吸の関係 (エラーバーは標準偏差)

上左図：30分毎のデータ 地表面乾燥時(SWC < 0.4)

上右図：30分毎のデータ 地表面湿潤時(SWC ≥ 0.4)

中左図：地温 3°C 平均値毎のデータ 地表面乾燥時(SWC < 0.4)

中右図：地温 3°C 平均値毎のデータ 地表面湿潤時(SWC ≥ 0.4)

下左図：タワーおよびチャンバーのデータ 地表面乾燥時(SWC < 0.4)

下右図：タワーおよびチャンバーのデータ 地表面乾燥時(SWC ≥ 0.4)

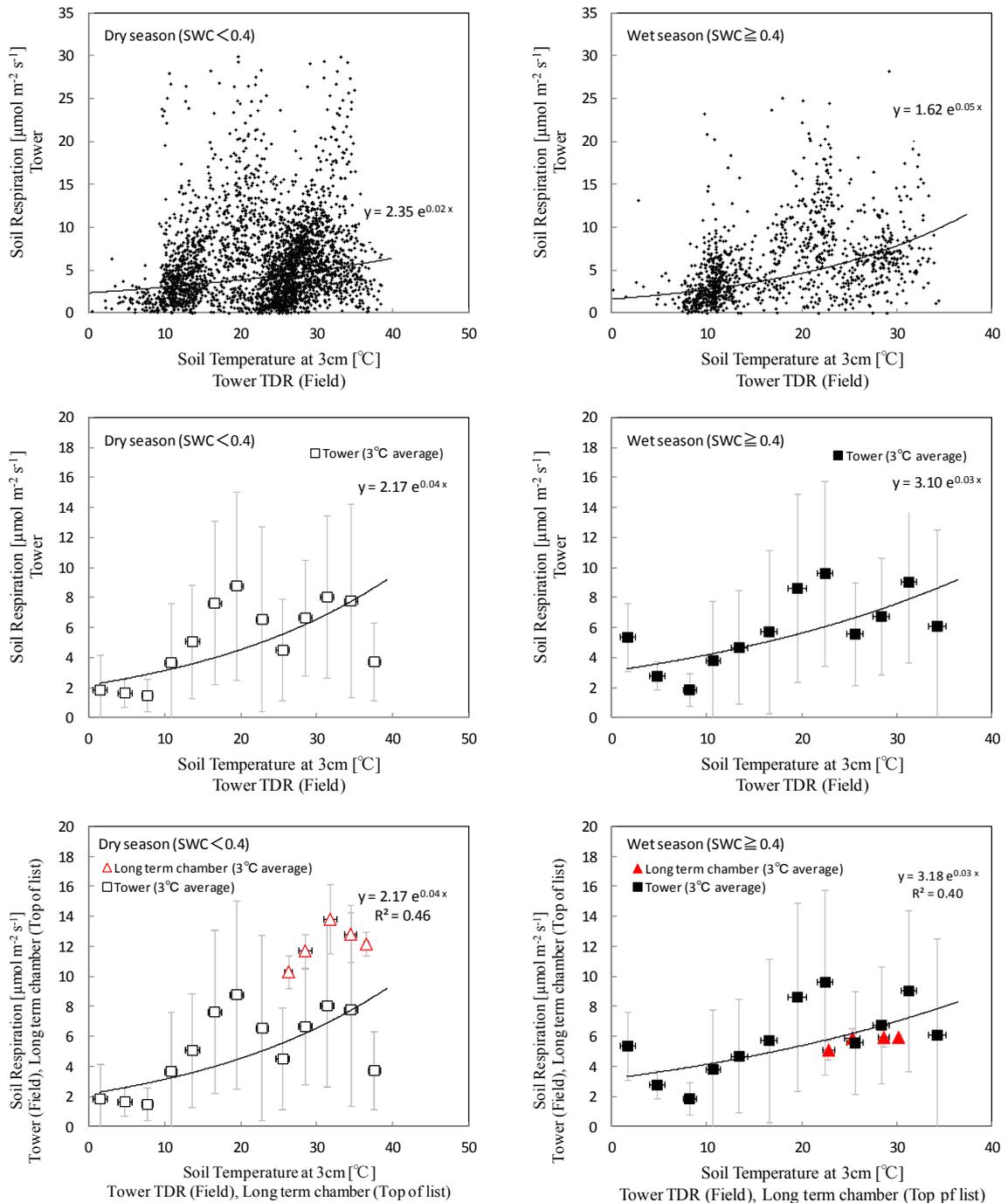


図 3.45 2012年 Zankalon における 3cm 深度地温とタワーにより観測された夜間(18:00-05:30)の土壌呼吸およびロングターチャンバーにより観測された土壌呼吸の関係 (エラーバーは標準偏差)

上左図：30分毎のデータ 地表面乾燥時(SWC < 0.4)

上右図：30分毎のデータ 地表面湿潤時(SWC ≥ 0.4)

中左図：地温 3°C 平均値毎のデータ 地表面乾燥時(SWC < 0.4)

中右図：地温 3°C 平均値毎のデータ 地表面湿潤時(SWC ≥ 0.4)

下左図：タワーおよびチャンバーのデータ 地表面乾燥時(SWC < 0.4)

下右図：タワーおよびチャンバーのデータ 地表面湿潤時(SWC ≥ 0.4)

Zankalon 不透明チャンバーのみ

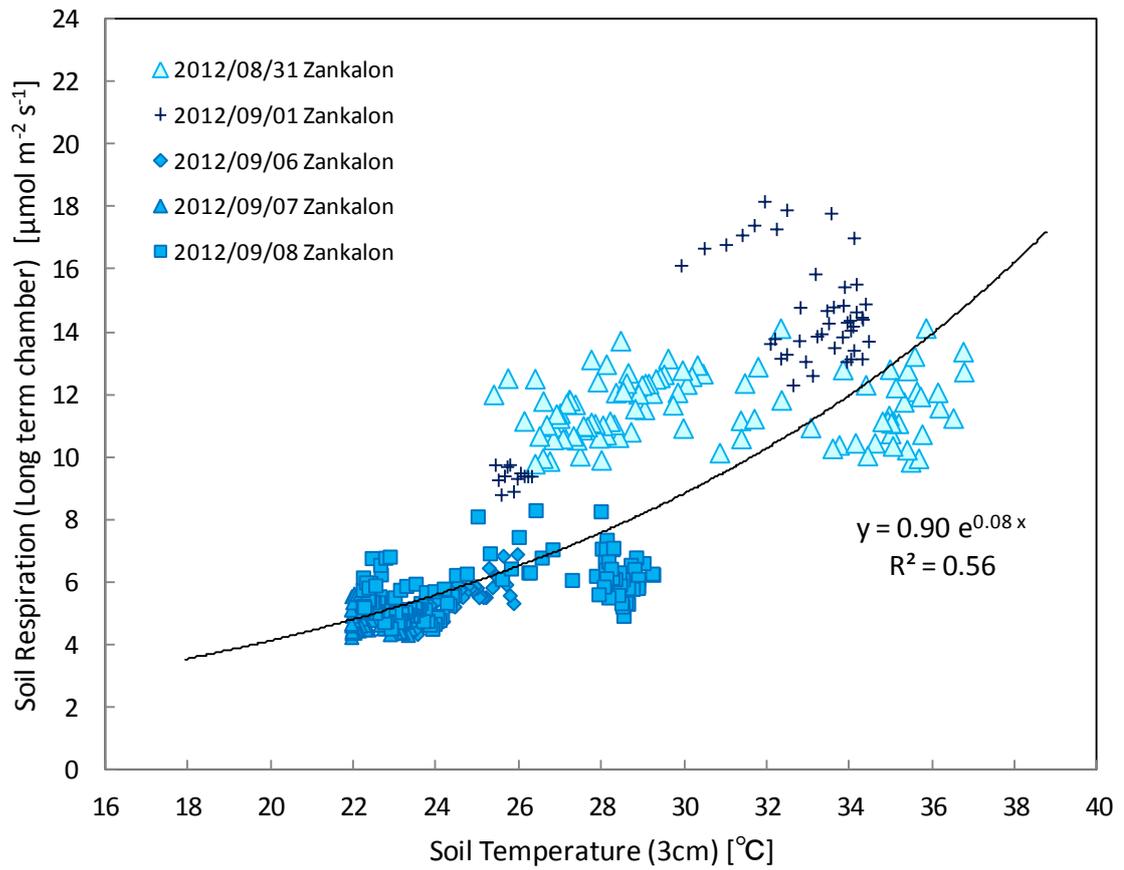


図 3.46 Zankalon における不透明チャンバーによる地温と土壌呼吸の相関

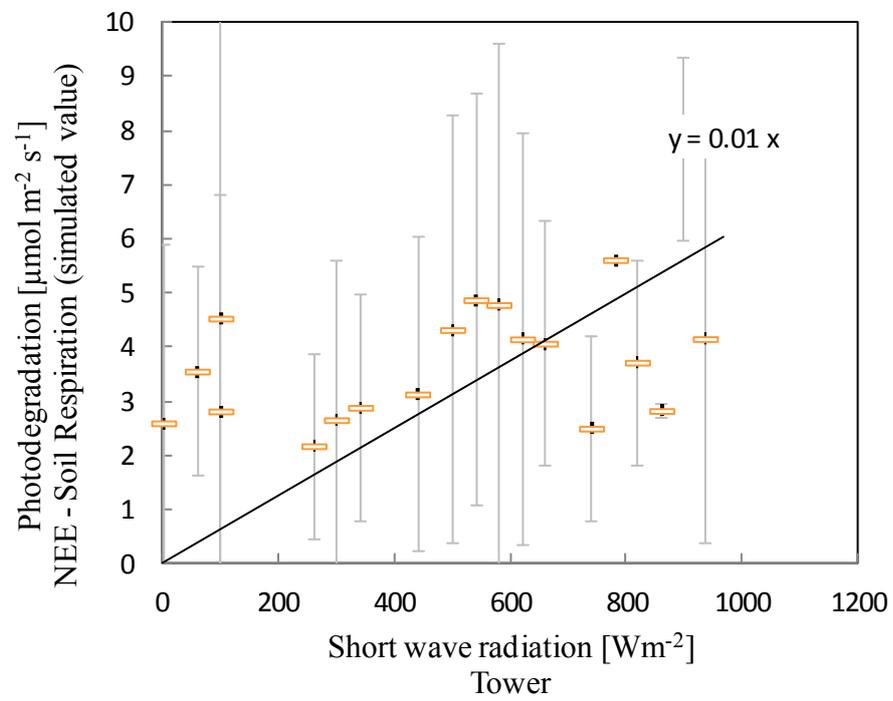


図 3.47 下向き短波放射と光分解による関係 (2011, 2012 年 Zankalon)

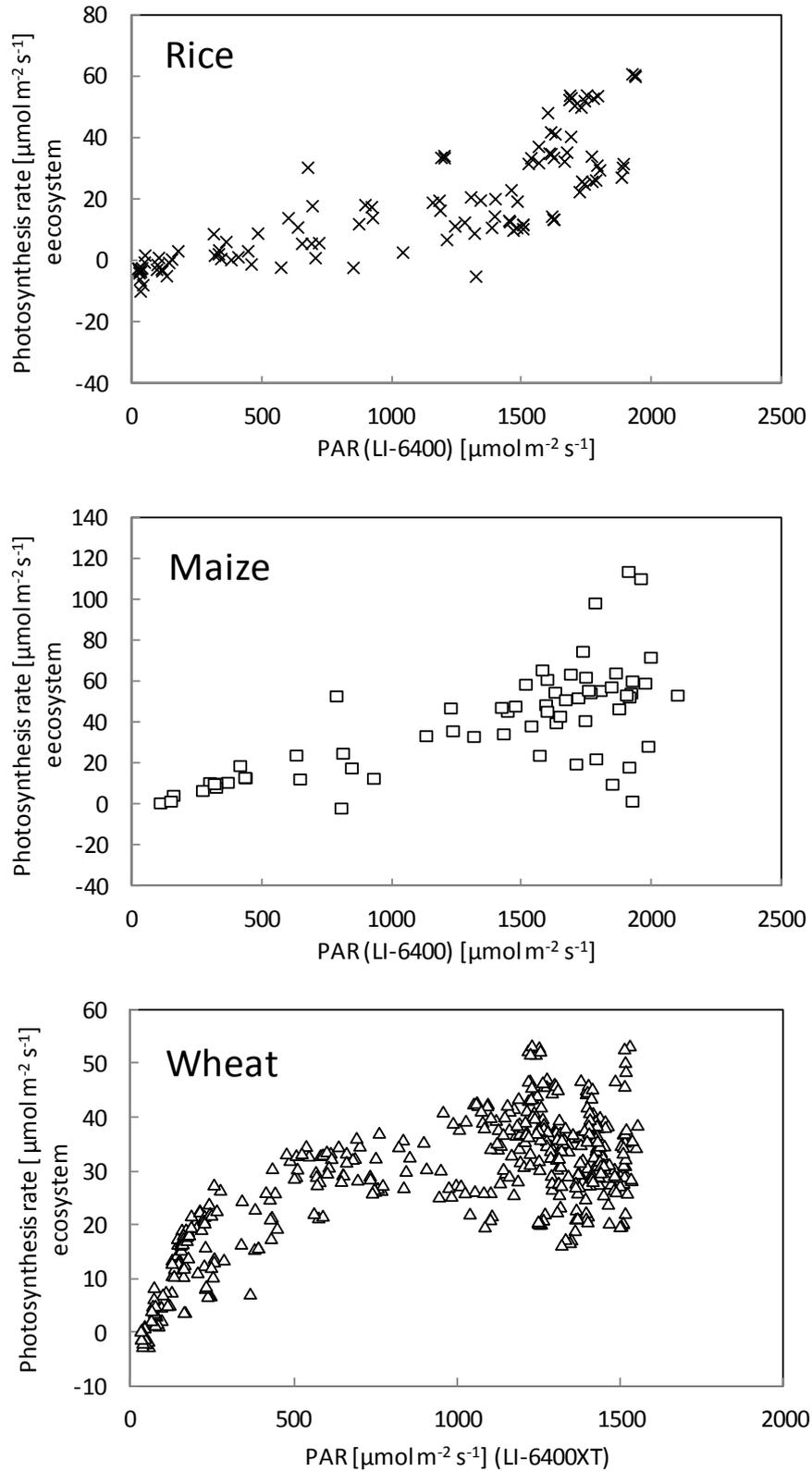


図 3.48 光合成速度測定装置により観測された作物別の光合成速度と光合成有効放射(PAR)との関係
(下図: Wheatについては久保田さんからのデータ提供)

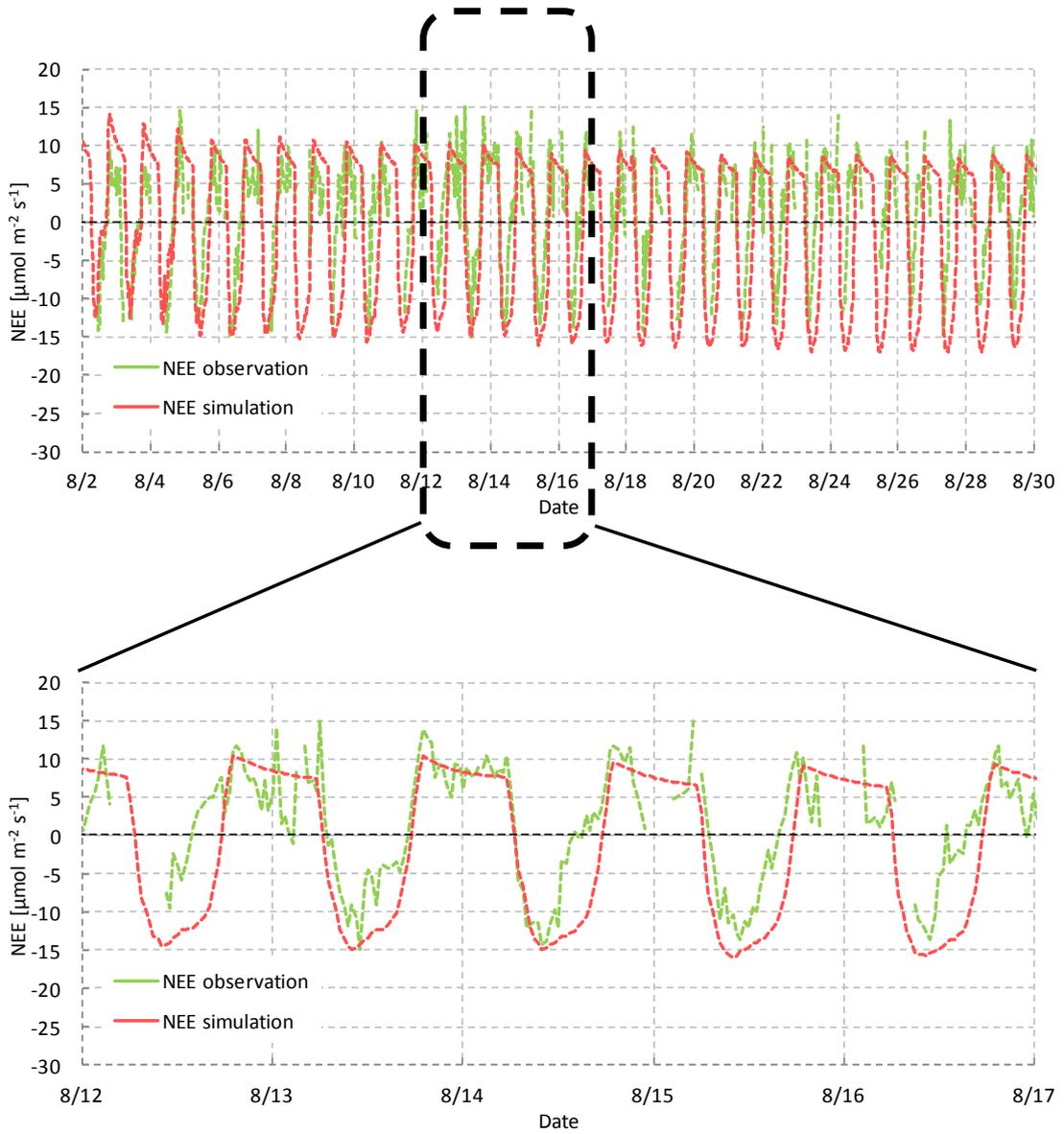


図 3.49 回帰モデルにより得られた NEE (2012 年夏季 作付け期間)

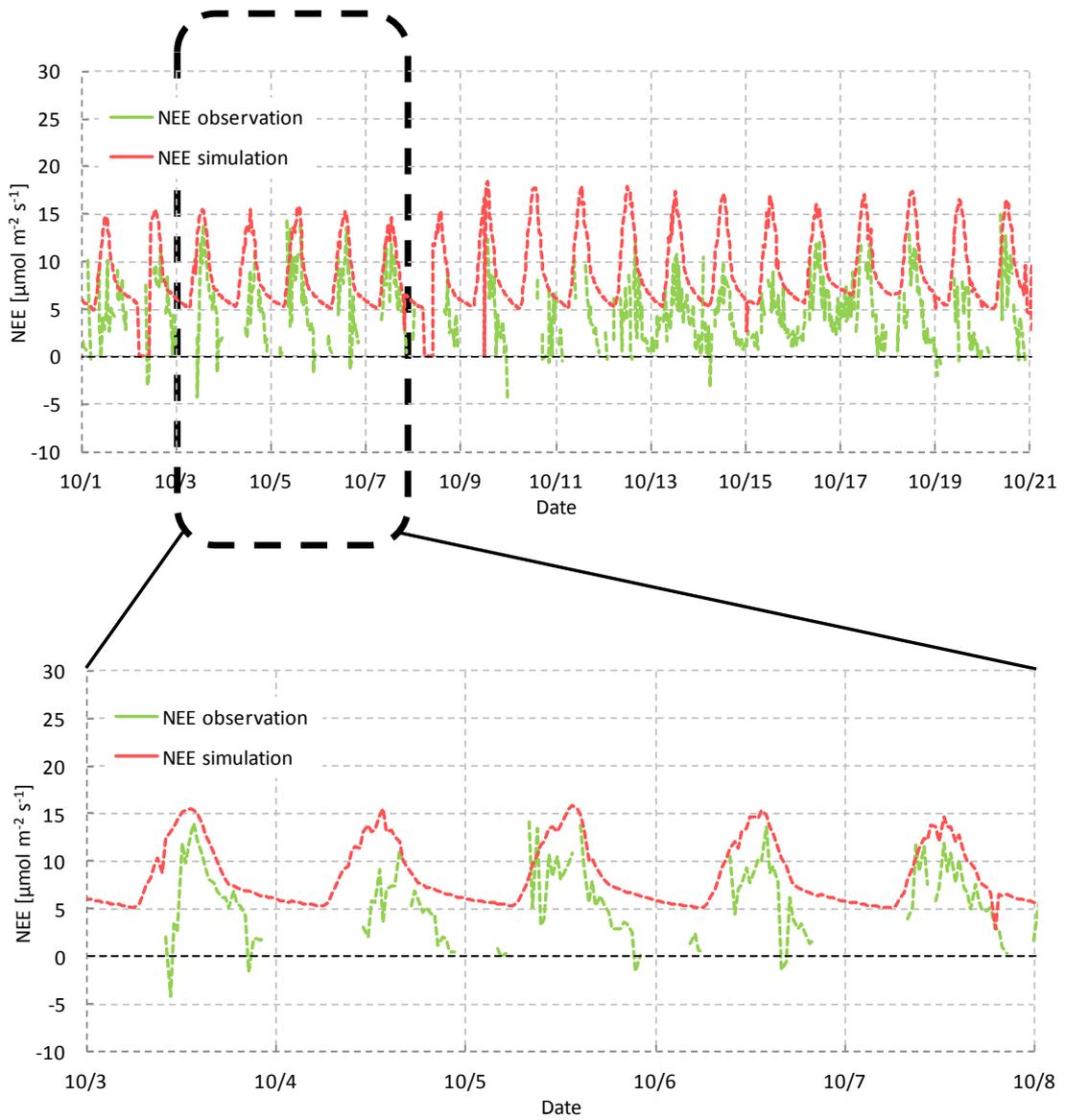


図 3.50 回帰モデルにより得られた NEE (2012 年夏季 非作付け期間)

3.7. 正味炭素収支量

タワーにより得られた NEE のうち異常値として除去されたデータについて、これまでの回帰モデルを用いて補完を行って総炭素収支量を図 3.51, 52 に示す。また冬作, 夏作, 非作付け期間を期間別に分けて積算値を算出したものを図 3.53 に示す。はじめに冬作においてコムギを栽培した Sakha A, B 圃場については、作物の成長に伴って炭素放出量が減少傾向にあったものの、月積算 NEE が正の値である事から栽培期間中は炭素放出源であった。また、図 3.53 から冬作におけるコムギの栽培期間中は炭素放出源である事が分かる。一方で、エジプシヤンクローバーを栽培した Zankalon 圃場については、2月～5月にかけて月積算 NEE は大きく負の値をとり炭素吸収源となった。図 3.53 からエジプシヤンクローバーの値はコムギの値の約 3 倍程度の吸収が見られ、コムギに比べて比較的大きな炭素吸収が確認できた。

次に、夏作においてライスを栽培した Sakha A 圃場については、8月において一度吸収源に転じたものの、それ以降は再び放出源となった。

一方で、トウモロコシを栽培した Sakha B, Zankalon 圃場について、Sakha B については7月から吸収源に転じ、その量は9月にかけて増加していきピークを迎えた後、放出源に転じた。それに対して Zankalon については7月に吸収源に転じ、その量も 2012 年において最大値となった。これは作物の成長の増加率が最も寄与していると考えられ、NEE の日変化を示した図 3.39 から同じ事が言える。図 3.53 から夏作における日積算 NEE について、ライスはコムギと同じくらいの炭素放出源となり、トウモロコシは最大でエジプシヤンクローバーと同じくらいの炭素吸収源となった。トウモロコシについての炭素吸収量の差異は、灌漑方法による違いによるものが挙げられ、細溝灌漑による方が植物への炭素固定が大きく炭素吸収量が増える事が考えられた。

最後に、非作付け期間においては作付け期間における吸収量よりも多くの放出量が観測された。図 3.53 での作付け期間, 非作付け期間での比較により、作付けをする事によってコムギならば 83~94%, エジプシヤンクローバーなら 152%, ライスならば 83%, トウモロコシならば 112~153%の炭素放出量を減少させる事が出来ると分かった。Verma *et al* (2005)はダイズとトウモロコシのローテーション管理の畑において 2002 年から 2003 年の年間 NEE が $48\text{gCm}^{-2}\text{year}^{-1}$ としており、年間で正味収支が炭素放出となった。

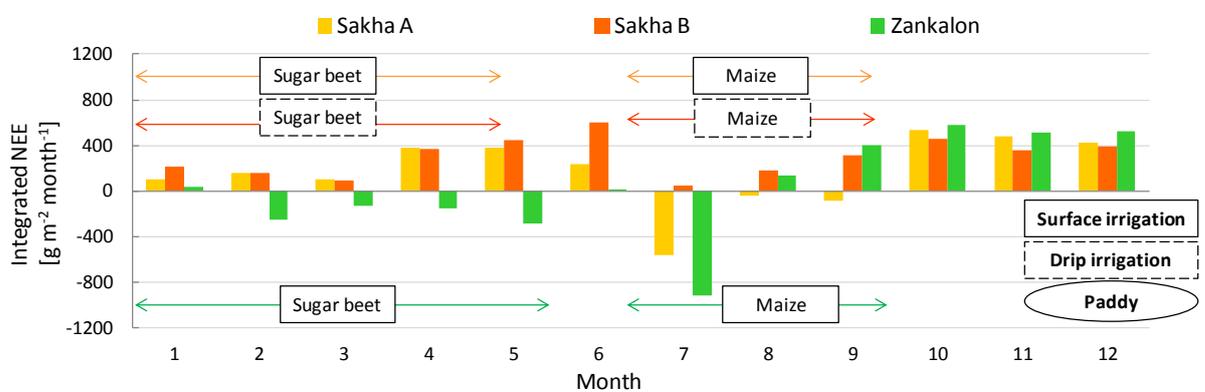


図 3.51 タワーにより観測された NEE の欠損部分に回帰モデルによって得られた結果で補間した月積算 NEE (2011 年)
 それぞれ，実線四角は表面灌漑，点線四角は点滴灌漑，楕円は水田を表す

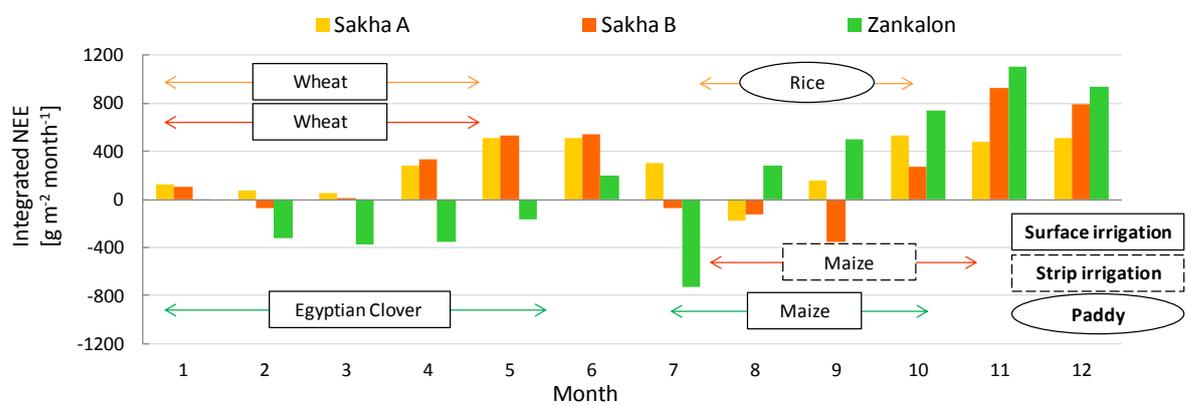


図 3.52 タワーにより観測された NEE の欠損部分に回帰モデルによって得られた結果で補間した月積算 NEE (2012 年)
 それぞれ，実線四角は表面灌漑，点線四角は細溝灌漑，楕円は水田を表す

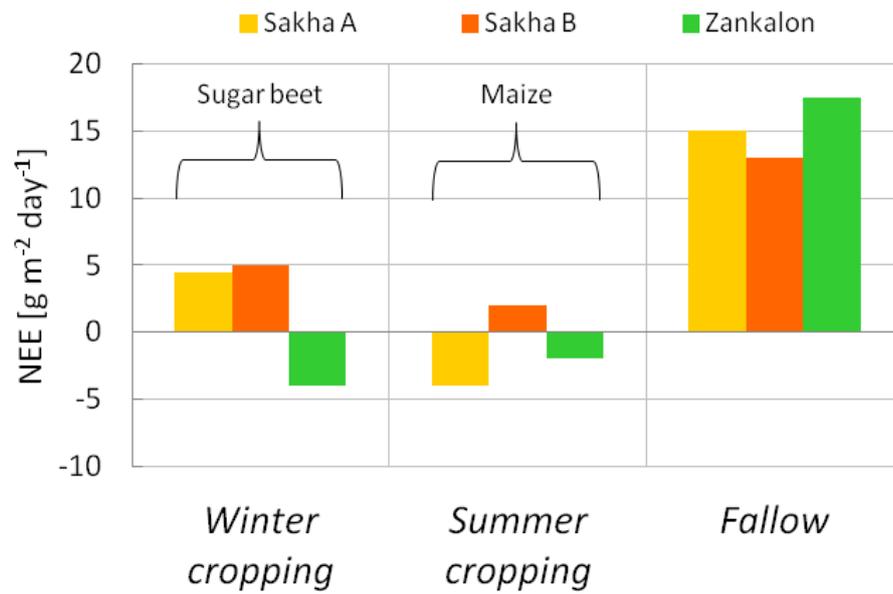


図 3.53 2011 年における冬作作付け期間，夏作作付け期間，非作付け期間における日積算 NEE

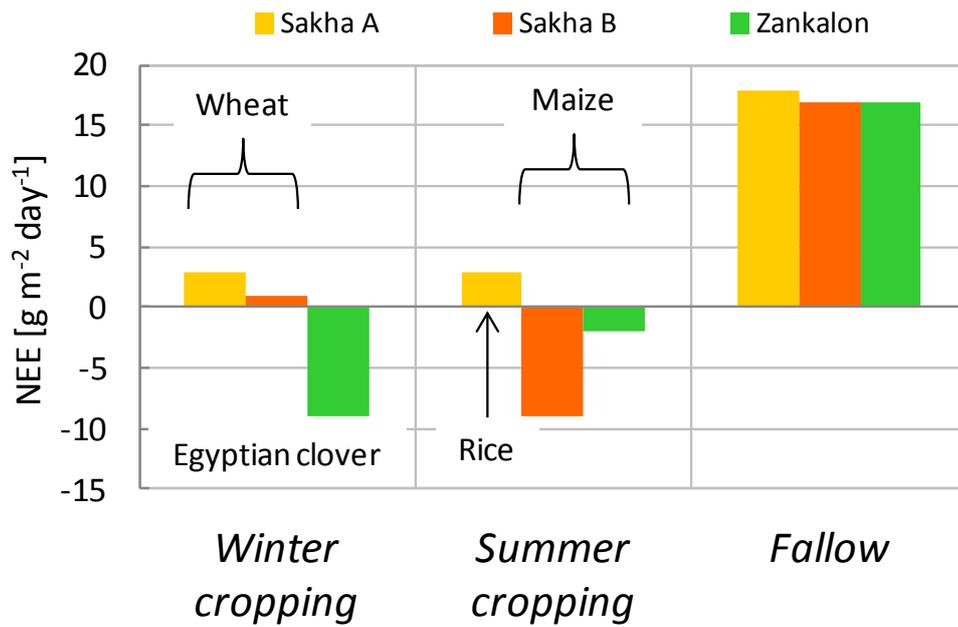


図 3.54 2012 年における冬作作付け期間，夏作作付け期間，非作付け期間における日積算 NEE

4. 結論

エジプトナイルデルタ地域の圃場において、炭素収支の把握のために、タワーによる炭素収支観測、土壌呼吸の観測、植物による光合成速度の観測、またそれぞれに影響があるとされる地温や土壌水分などの環境要因の観測を行った。また得られた結果から回帰モデルを作成し、炭素収支量の推定を行った。

[影響される環境要因]

- ・日変化をした NEE は特に PAR, 地温, 土壌水分に影響される。
- ・土壌呼吸は灌漑前後で変化した。灌漑後には $5-10\mu\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 減少した, その原因は $1-2^{\circ}\text{C}$ の地温低下と $0.3-0.4$ 程度の土壌水分増加によるものである。そして実際には, 作物がある期間について土壌呼吸は土壌水分別に, 地温による指数関数的な関係が見られた。
- ・土壌呼吸から光分解による影響を分ける事が出来た。またその割合は, 最大の時で, 光分解 80%, 正味の土壌呼吸 20%であった。

[農地による炭素の季節変化と炭素収支]

- ・毎日の NEE は作物の成長に伴って減少した, その理由は作物がある期間については CO_2 の吸収が正午にかけて増加したためである。
- ・非作付け期間において, NEE は一日を通して正の値で合った。また, 日変化が見られた
- ・作付け前期において, NEE は PAR の増加に伴い昼頃に減少した, またそれはピークを迎えた。
- ・作付け中期において, NEE は PAR の増加に伴い昼頃に減少した, またその値は弱まった。
- ・作付け後期において, NEE は一日を通して正の値に転じた。

[正味炭素収支量を見積もる]

- ・コムギおよび米の耕作地に関しては炭素吸収源としての機能を果たさなかったが, 一方で, エジプシャンクローバーおよびトウモロコシの耕作地に関しては炭素放出源としての機能を果たした。
- ・2012 年は全圃場において, 年間を通すと炭素放出である事が分かった。

NEE 日別積算値は作物の成長に伴って減少し日積算値が炭素吸収源を表すマイナスの値になる日も見られたが, 作物の成長のピークを迎える前に炭素放出源を表すプラスの値に転じた。このことから成長の傾きが NEE に最も影響を与えていると考えられる。

NEE 日別変化は作付け期間について日中の 12 時頃にマイナス側に凸となる日変化が見られた。この変動は PAR のそれと類似しており, 光合成活動に影響を与える主たる環境要因であるとされた。光合成による吸収成分が存在していない播種以前と収穫以後については土壌呼吸の存在により NEE が炭素放出

源に転じた。しかし、播種以前よりも収穫以後の土壌呼吸の方が値は大きくなった。これは収穫以後も茎や根などの有機物の残っており、それらによる炭素放出がこの差をもたらしたのではないかと考えられる。

灌漑による影響として、土壌呼吸は 5 から $10\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 程度の減少が確認された。つまり灌漑を行う事によって圃場全体の炭素放出量を抑制する事が出来る。その原因は土壌水分の増加と地温の低下が挙げられ、そのうち大部分は土壌水分の低下によるものであった。また、地温の増加は指数関数的に土壌呼吸の増加に影響を及ぼす事が分かった。

農地生態系での炭素収支の結果から、作付けを行うことで大気中への二酸化炭素放出を大幅に削減できる事が示唆されたと共に、国際的な課題である地球温暖化問題の解決に向けて農地の重要性が理解できた。しかし、炭素放出を抑制出来たものの、全体を通して吸収として機能してはならず、地球温暖化問題解決のための農地という考え方は未だ難しいと考えられる。今後は作物の種類を増やしたり、作付け方法を変えたりとしながらさらなる長期的な観測が必要であると考えられる。

謝辞

本修士論文の作成にあたり、筑波大学生命環境系の杉田倫明教授には、エジプトでの現地観測から日頃の熱心な御指導、ゼミでの貴重なアドバイスなど終始お世話になりました。ここに深く感謝の意を表します。また、筑波大学生命環境系の辻村真貴教授・浅沼順教授・河内敦助教には、主に流域環境研究ゼミにおいて貴重なご助言等をたくさん頂きました。また、杉田研究室のメンバーの方々には杉田研究室ゼミでの貴重なご助言のほか、本研究を作成するにあたって大変励まして頂きました。特に松野晃大氏・清水達輝氏にはエジプトでの過酷な条件下において現地観測を手伝って頂いたほか、解析方法のご助言等も頂き終始励まして頂きました。また、福田敬広氏には解析プログラムについてのご助言やデータ提供などをして頂きました。Wei Zhongwang 氏には解析プログラムについてご助言等も頂きました。早川恵里奈氏をはじめとする陸域生態学研究室の方々や、久保田亜希氏をはじめとするプロジェクトメンバーの方々には、機器の取り扱いについてご助言を頂きました。その他にも研究室のメンバーの方々には励まして頂きました。

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」として筑波大学生命環境系の佐藤政良名誉教授の代表の元に行われました。プロジェクトメンバーおよび現地の方々には大いにご協力をして頂きお世話になりました。特に現地サポートメンバーである、Dr. Shelif, Mr. Sayed, Mr. Hassan, Mr. Mohamad Samier, Mr. Ahamed には観測や移動の手配など大変お世話になりました。

また、流域環境研究室のメンバーには、研究生活を送っていく上で様々な面でお世話になりました。特に同じ杉田研究室である山本和也氏や、同期である富松幸亮氏・秋本泰良氏・榊原厚一氏・西野正高氏・堀内宣栄氏・吉澤鮎美氏の存在は研究生活において私にとって大きな励みとなりました。

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

そして、最後に大学院の修士まで進学させてくれて、長きに渡って心から暖かく見守ってくれた両親に心から感謝致します。

引用文献

- Black, T.A., Hartog, G.D., Neumann, H.H., Blanken, P.D., Yang, P.C., Russel, C., Nestic, Z., Lee, X., Chen, S.G., Staebler, R, and Novak, M.D. (1996) Annual cycles of water vapor and carbon dioxide fluxes in and above a boreal aspen forest, *Global Change Biology*, 2, pp.219-229.
- 崔毅年, 井上吉雄 (2004) 黒ボク土畑地における CO₂フラックスの動態と赤外放射測温による土壌面温度との関係, *Journal of Agricultural Meteorology* 60, pp.33-41.
- 福田敬広 (2012) ナイルデルタの農地における蒸発散量の評価および蒸発抑制効果の検証: 夏季のトウモロコシを対象とした例, 筑波大学大学院生命環境科学研究科・環境科学専攻修士学位論文 pp.1-104.
- Foken, T, M., Gockede, M., Mauder, L., Mahrt, B., Amiro, and W, Munger. (2004) Post-field data quality control, In Handbook of Micrometeorology, Edited by X, Lee., W, Massman and B, Law, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp.181-208.
- Goulden, M.L, J.W Munger, S.M Fan, B.C Daube, and S.C Wofsy. (1996) Measurement of carbon storage by long-term eddy correlation: Methods and a critical assessment of accuracy, *Global Change Biology*, 2, pp.169-182.
- Hui-min, L. and Y, Da-wen. (2010) Seasonal and interannual variations in carbon dioxide exchange over a cropland in the North China Plain, *Global Change Biology*, 16, pp.2944-2957.
- King, Jennifer Y., Brandt, Leslie A., Adair, E. Carol. (2012) Shedding light on plant litter decomposition: advances, implications and new directions in understanding the role of photodegradation, *Biogeochemistry*, 111, pp.57-81.
- 近藤純正 (2000). 地表面に近い大気の科学－理解と応用－, 東京大学出版会
- Li, S. G, Asanuma, J., Eugster, W., Kotani, A., Liu, J.J., Urano, T., Oikawa, T., Davaa, G., Oyunbaatar, D., Sugita, M. (2005) Net ecosystem carbon dioxide exchange over grazed steppe in central Mongolia, *Global Change Biology*, 11, pp.1941-1955.
- Li, S.G., Asanuma, J., Kotani, A., Eugster, W., Davaa, G., Oyunbaatar, D., and Sugita, M. (2005) Year-round measurements of net ecosystem CO₂ flux over a montane larch forest in Mongolia, *Journal of Geophysical Research*, 110, Issue D9, DOI. 10.1029/2004JD005453
- Lloyd, J. and Taylor, J.A. (1994) On the temperature dependence of soil respiration,

- Functional Ecology*, 8, pp.315-323.
- 間野正美, 宮田明, 安田幸生, 永井秀幸, 山田智康, 小野圭介, 斎藤誠, 小林義和 (2007) オープンパス型渦相関法データの品質管理, *Journal of Agricultural Meteorology*, pp.125-138.
- 松野晃大 (2011) 灌漑方法が異なる耕作地における安定同位体比とチャンバー法を用いた蒸発散の地面蒸発と蒸散への分離, 筑波大学大学院生命環境科学研究科・環境科学専攻修士学位論文, pp.1-83+付録.
- 宮田明 (2004) データの管理, データベース作成の実際. AsiaFlux 運営委員会編, 陸域生態系における二酸化炭素等のフラックス観測の実際, 国立環境研究所地球環境研究センター, pp.85-113.
- Montheith, J.L. (1976) *Vegetation and the Atmosphere*, Academic Press, p.298.
- 小野圭介 (2008). 渦相関法による水田生態系の二酸化炭素及び水蒸気フラックスの動態解明, 筑波大学大学院生命環境科学研究科・環境科学専攻博士学位論文, pp.59-93.
- Rutledge, S., Campbell, D.I., Baldocchi, D., and Schipper, L.A. (2010) Photodegradation leads to increased carbon dioxide losses from terrestrial organic matter, *Global Change Biology*, 16, pp.3065-3074.
- Saigusa, N, S Yamamoto, S Murayama, H Kondo, and M Gamo. (2001) A long-term flux measurement over a cool-temperate deciduous forest by the eddy covariance method, *Proceedings International Workshop for Advanced Flux Network and Flux Evaluation*, NIES/CGER-Report-M-001-2001, pp.145-148.
- 澤本卓治 (2003) 土壌からの温室効果ガス発生・吸収に関する研究動向. *Japanese Society of Soil Physics*, 33-39.
- 浦野忠朗 (2004) 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, 筑波大学大学院生命環境科学研究科・環境科学専攻修士学位論文, pp.1-51.
- Verma, Shashi B., Dobermann A., Cassman, Kenneth G., Walters, Daniel T., Knops, Johannes M., Arkebauer, Timothy J., Suyker, Andrew E., Burba, George G., Amos, Brigid., Yang, Haishun., Ginting, Daniel., Hubbard, Kenneth G., Gitelson, Anatoly A., Walter-Shea, Elizabeth A. (2005) Annual carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize-based agroecosystems, *Agricultural and Forest Meteorology*, 131, pp.77-96
- Webb, E.K., Pearman, G.I., and Leuning, R. (1980) Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 106, no.447, pp.85-100.

Weiss, A, and JM Norman. (1985) Partitioning solar radiation into direct and diffuse, visible and near-infrared components *Agricultural and Forest Meteorology*, 34, pp.205-213.

安田幸生，渡辺力，大谷義一，溝口康子 (2005) 渦相関法によって生態系呼吸速度を評価する際の問題点－間欠的な乱流状態下での摩擦速度補正について－, *Journal of Agricultural Meteorology*, pp.178-187.

2.3.1. 二酸化炭素濃度補正

各圃場で測定された二酸化炭素濃度を元に地点間誤差を無くす補正を行った後, さらにエジプトカイロにて測定された二酸化炭素濃度を元に地点間誤差を無くす為の補正式を作成した. 方法は 2.3.1. のものと同様であり, 比較的測定値が妥当なものとなっているエジプトカイロの値を真値とした. それぞれ補正後の二酸化炭素濃度時系列変化を図 1 に示した. また, 全圃場における 1 ヶ月間の二酸化炭素濃度平均値の時系列変化を元に, 明らかな異常値とされる 320ppm 以下および 480ppm 以上の値を除去し, y 切片をはじめの 1 月と 12 月の値の平均値として 5 次多項補正式を作成した (図 2). この補正式は夏季の強い日射によって作物の光合成活動が活性化し, 大気中二酸化炭素濃度が減少する事を表現出来ている.

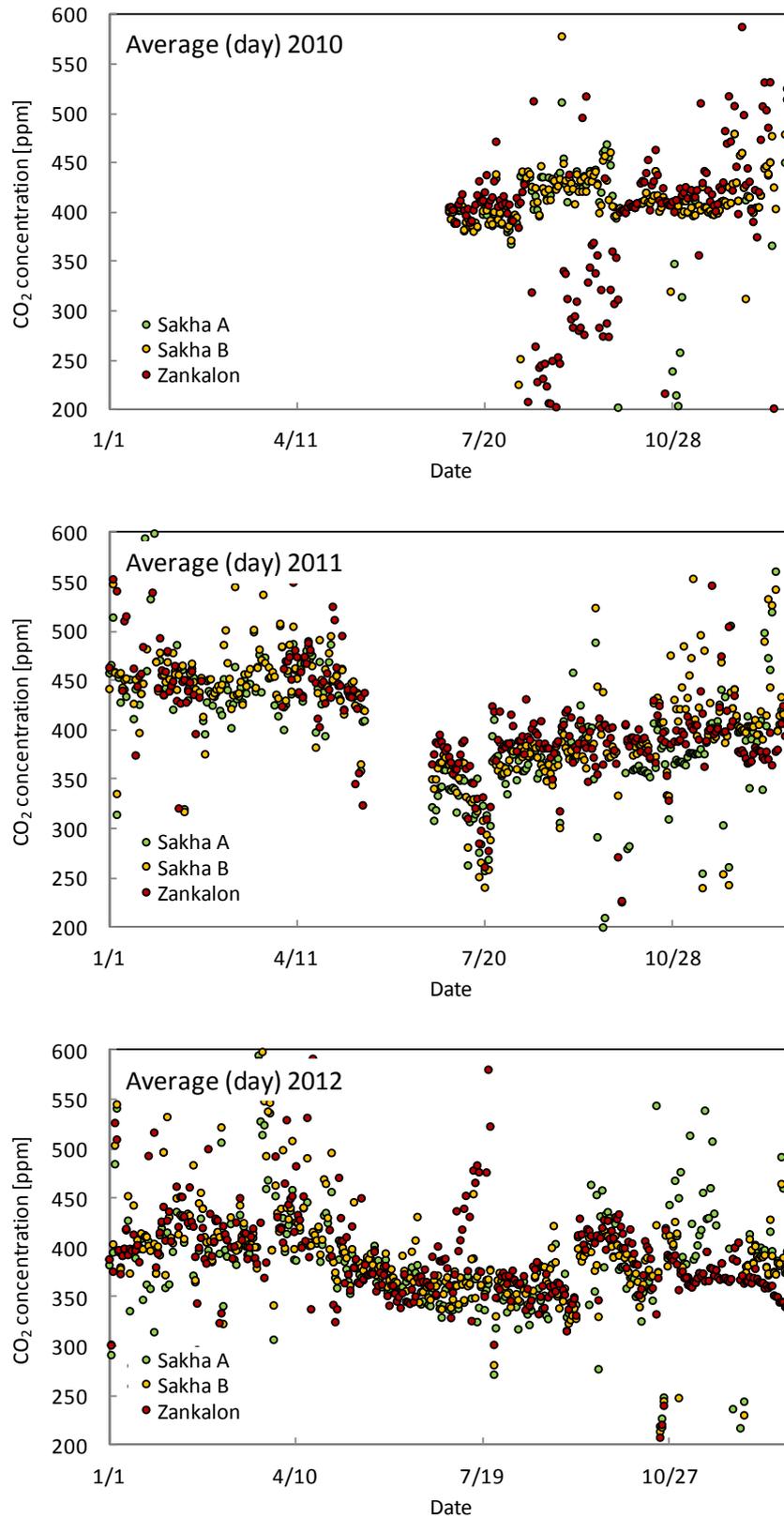


図 1 2010 年から 2012 年の各圃場における補正後の二酸化炭素濃度時系列変化 (日平均値)

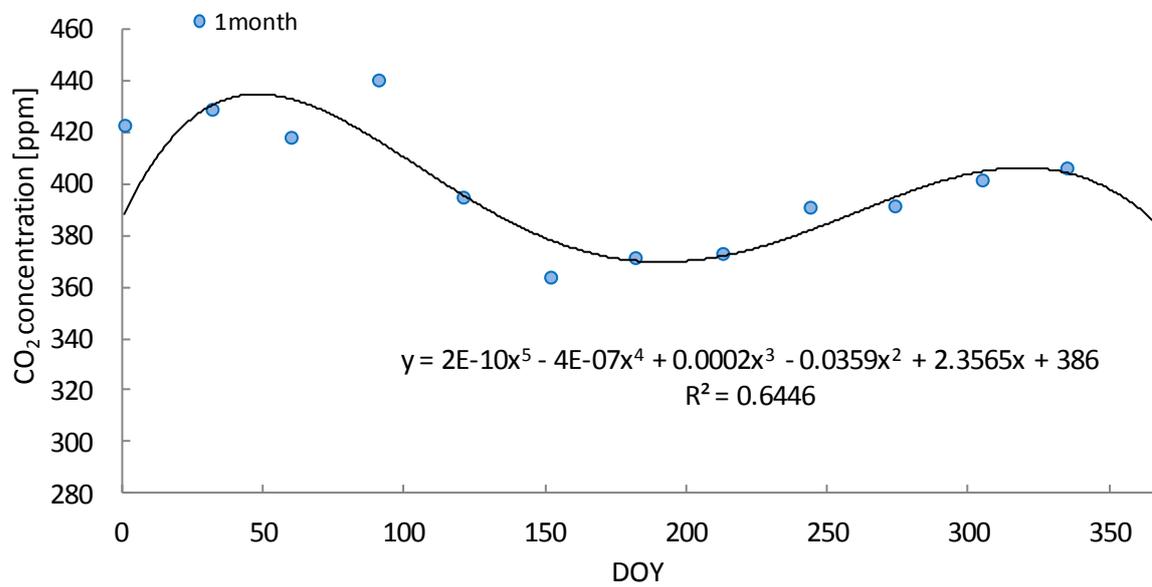


図 2 2010 年から 2012 年までの各月の値の差は無いと仮定し，また全圃場における値の差は無いと仮定してそれぞれ各月毎に平均値をとり作成した 5 次補正式