

不飽和土壌中の根群域からの下方浸透水と
肥料溶脱のモニタリングに関する研究

Monitoring of Infiltration Water and Fertilizer Leaching
from the Root Zone in Unsaturated Soils

鳥取大学大学院連合農学研究科
生物環境科学専攻 国際乾燥地農学講座

東 直 子
Naoko HIGASHI

2006

目次

第 I 章 緒論	1
1. 1 研究の背景	1
1. 2 下方浸透水量測定に関する既往の研究	2
1. 3 本論文の目的と構成	4
第 II 章 砂質土壌に適用可能な 自動サクション制御型サンプラーの開発	6
2. 1 はじめに	6
2. 2 自動サクション制御型サンプラーの概要	7
2. 3 実験方法	10
2. 3. 1 砂質土壌	10
2. 3. 2 フィルター試験	10
2. 3. 3 吸引判定値	11
2. 3. 4 バッファー容器の採用と採水容器の大きさ	13
2. 4 結果および考察	14
2. 4. 1 砂質土壌に適したフィルターの選定	14
2. 4. 2 シミュレーションによる吸引判定値の決定	15
2. 4. 3 弱いサクションをかけるための工夫	17
2. 4. 4 自動圧力制御プログラム	17
2. 5 まとめ	20
第 III 章 室内カラム実験における 自動サクション制御型サンプラーの採水性能評価	21
3. 1 はじめに	21
3. 2 実験方法	21
3. 2. 1 室内カラム実験装置	21
3. 2. 2 異なる降雨強度下の採水効率の算出	22
3. 3 結果および考察	24
3. 3. 1 連続降雨，定常浸潤状態下での採水	24
3. 3. 2 短期降雨，非定常浸潤状態下での採水	25

3. 3. 3	異なる降雨条件下での SCFS の採水強度のばらつき	26
3. 4	まとめ	26
第IV章	ラッキョウ栽培下の砂丘砂圃場における	
	下方浸透水モニタリング	30
4. 1	はじめに	30
4. 2	実験方法	31
4. 2. 1	実験圃場の概要	31
4. 2. 2	測定機器の設置	32
4. 2. 3	採水効率の算出	32
4. 2. 4	定植・灌漑および施肥条件	34
4. 2. 5	データおよび浸透水の回収と水質分析	34
4. 2. 6	観測井の設置と土壌抽出液・地下水の水質分析	36
4. 2. 7	センサー類の校正および配線	37
4. 3	結果および考察	38
4. 3. 1	圃場における SCFS の採水効率	38
4. 3. 2	センサーで捉える土壌中の溶質移動	42
4. 3. 3	下方浸透水と地下水における硝酸態窒素濃度の違い	44
4. 3. 4	肥料成分の溶脱傾向	45
4. 3. 5	冬期の採水および肥料溶脱	46
4. 4	まとめ	49
第V章	サクシオン固定型サンプラーによる	
	砂丘砂圃場での下方浸透水モニタリング	51
5. 1	はじめに	51
5. 2	実験方法	51
5. 3	結果および考察	53
5. 3. 1	サクシオン固定型サンプラーの採水効率	53
5. 3. 2	裸地区における溶質移動と肥料成分の溶脱傾向	55
5. 4	まとめ	57
第VI章	自動サクシオン制御型サンプラーの実用化への提案	58
6. 1	はじめに	58

6. 2 実験方法	59
6. 2. 1 シミュレーション設定条件	59
6. 2. 2 遠隔操作によるデータ回収システム	61
6. 3 結果および考察	61
6. 3. 1 フィルター直上に土壌水分量の低い部分が残される現象	61
6. 3. 2 様々なフィルターの砂質土壌への適用	62
6. 3. 3 ガラスフィルターを用いた様々な土壌での採水	62
6. 3. 4 遠隔操作によるモニタリングデータの回収	66
6. 4 まとめ	69
第VII章 総合考察	70
付録	74
謝辞	89
引用文献	90
摘要	97
Summary	99
論文リスト	101

— 圖表 目次 —

Fig.1.1	Flowchart of this thesis	5
Fig.2.1	Schematic of the suction controlled flux sampler (SCFS)	8
Fig.2.2	Arrangement of the tensiometers for suction control and detail of the sampling filter device (SFD)	9
Fig.2.3	Water retention curve of Tottori dune sand	10
Fig.2.4	Boundary condition for simulation by HYDRUS-2D	12
Fig.2.5	Changes in hydraulic conductivity in the clogging test by suspended solution	14
Fig.2.6	Result of the calculation by HYDRUS-2D with 50 cm constant suction at the filter	16
Fig.2.7	Maximum suction in different sampling bottles connected with the buffer container	18
Fig.2.8	Time schedule for the suction control by the AVS	19
Fig.3.1	Schematic of the soil column experimental set up	23
Fig.3.2	Infiltration water sampling by SCFS under continuous rainfall	27
Fig.3.3	Infiltration water sampling by SCFS under short-term rainfall	28
Fig.3.4	Changes in the criteria for suction control ($h_C - h_{LR}$)	29
Fig.4.1	Photos of the experimental plot	31
Fig.4.2	Photos of the observation pit	33
Fig.4.3	Schematic representation of the filed experimental design	33
Fig.4.4	Photos of the observation well	37
Fig.4.5	Properties of infiltration water sampled by SCFS during a 50-day period (Aug.18 th 2004 ~ Oct.7 th 2004)	40
Fig.4.6	Variations in water content and electrical conductivity measured by TDR sensors during a 50-day period (Aug.18 th 2004 ~ Oct. 7 th 2004)	43
Fig.4.7	Variation in the EC of infiltration water measured with the four-electrode sensor in the sampling tube ($EC_{iw-4ele}$) and with the EC meter in the sampling bottle ($EC_{iw-bottle}$)	44
Fig.4.8	Quality of collected infiltration water during a 50-day period (Aug.18 th 2004 ~ Oct.7 th 2004)	47

Fig.4.9	Properties of infiltration water sampled by SCFS during a 50-day period (Dec.23 th 2004 ~ Feb.10 th 2005)	48
Fig.4.10	Quality of collected infiltration water during cultivation of scallion (Aug.18 th 2004 ~ May.25 th 2004)	50
Fig.5.1	Schematic representation of the field experimental design (Fixed-suction sampler, No-planting)	52
Fig.5.2	Changes in the matric potential and soil water content of each depth .	54
Fig.5.3	Changes in EC _{iw-bottle} collected by fixed-suction sampler and SCFS during field experiment (Aug.18 th 2004 ~ May.25 th 2005)	55
Fig.5.4	Quality of infiltration water collected by fixed-suction sampler during field experiment (Aug.18 th 2004 ~ May.25 th 2005)	56
Fig.6.1	Simulation results with 50 cm constant suction at the various filter, G4 (a), Porous plate (b), 1.2 μ m membrane (c) in sandy soil. (d) is a case of the 100 cm constant suction at the 1.2 μ m membrane	64
Fig.6.2	Simulation results with 50 cm constant suction at the G4 filter in different soil types, Dune sand(a), Loam(b), Silt Loam(c)	65
Fig.6.3	Photo of the data-collecting system using cellular phone	67
Fig.6.4	A wiring diagram of the data-collecting system using a cellular phone .	67
Fig.6.5	Sample program for data-collection using a cellular phone with a wiring shown in Fig.6.4	67
Fig.6.6	The screen of PC208W for data-collection using a cellular phone	68
Fig.A-1	A wiring diagram of the Automated Vacuum System (AVS)	84
Fig.A-2	A wiring diagram of the several sensors	85
Fig.A-3	A wiring diagram of the call-back system and help for ASCII characters input	88
Table 2.1	Physicochemical properties of Tottori dune sand	9
Table 2.2	Saturated hydraulic conductivity and air entry pressure of tested filters	15
Table 3.1	Water-collecting efficiency under various rainfall conditions	25
Table 4.1	Components of basal and top-dressed fertilizers	35

Table 4.2	Properties of extracted solution from sandy soil samples(average values are shown)at different depths. Before and after cultivation . . .	36
Table 4.3	Water-collecting efficiency of SCFS	39
Table 4.4	NO ₃ ⁻ concentration and EC in groundwater (EC _{gw}) and infiltration water (EC _{iw-bottlr})	45
Table 5.1	Water-collecting efficiency of Fixed-suction sampler and SCFS . . .	54
Table 6.1.	Input parameters for HYDRUS-2D simulation	60

第 I 章

緒 論

1. 1 研究の背景

酸性雨や農薬等化学物質の土壌への投与などにより、様々な化学物質が土壌水と共に移動して土壌や地下水が汚染されていくことに対し、大きな関心が寄せられている。あらゆる物質について土壌・地下水での移動・存在量に偏りが生じれば、「汚染」と呼ばれる現象となる(岡崎 2002)。近年、先進諸国および我が国において硝酸態窒素による地下水の汚染が問題となっており(鈴木・志賀 2004)、1982 年に環境庁が実施した全国の地下水質測定結果において、最も検出率の高かった物質は硝酸態および亜硝酸態窒素であると報告された(小川 2000)。農村地域における地下水中の硝酸態窒素濃度の高まりは、土壌-植物系のもつ窒素循環の容量を超えた、化学肥料の多量施用や畜産廃棄物などの投棄的な土壌還元がその原因であるとされ、法的な規制とともに抜本的な対策技術の開発が急がれている(小川 2000)。硝酸態窒素に限らず、様々な物質が土壌水に溶解して移動するため、土壌や地下水の汚染を明らかにするには土壌浸透水のモニタリングが必要であり、環境への負荷が懸念される地域や環境的に重要な地域を中心に土壌・水質のモニタリングの強化(金子 2002)が図られている。また、地域環境、地球環境問題では、土壌が介在する物質の循環やフローの収支を定量化することが不可欠であるとされている。

水田土壌のように飽和した土壌中における水や物質の収支は比較的容易に測定できるが、砂質の畑地のような不飽和土壌では、不飽和透水係数などの特性値の非線形性や計測の難しさから収支がとりにくく、複雑な土壌内部での物質の移動現象を捉えることは容易ではない(小杉 2000 ; Mori et al. 2003)。そのため、これまではテンシオメータで水のポテンシャル差を測定することなどにより、土壌中の水分量を測定するにとどまっていたが、浸透水量を直接測定し、且つ水質分析に利用可能な浸透水を採取する方法を確立させることができれば、環境負荷物質のモニタリングも容易となる。モニタリングとは、語義からいえば「監視すること」であり、さらに「評価を行い」「警告となるもの」と

いう語義も含まれる。したがって、土壌・水質の分析調査を継続するだけでは本来のモニタリングとならず、モニタリング結果から、土壌管理方策などを策定することが本来の目的となる(金子 2002)。また、モニタリング自体は現象を観察する手段であるため、最終的には要因の抽出とモデル化が求められるが、予測モデルの精度を向上させ、汚染の防止のためにも、まずはモデル対象系内で起きている様々な過程の寄与を定量化せねばならない(長谷川 2002)。どのような環境負荷物質が不飽和土壌中のどこに、どれだけ存在しているのかを把握するために、下方浸透水の水量および水質の両方について正確な測定が求められている。

1. 2 下方浸透水量測定に関する既往の研究

土壌中の下方浸透水のモニタリングには、間接的な方法である水収支法と浸透水を直接採取するライシメータ法、ダルシーの法則を用いて浸透水量を推定するフラックス法がある(長谷川 2002)。降雨に伴う地下水位の応答は一般的には日単位で現われることが多く(田中 2001)、そのタイムラグの影響を受け、地下水と土壌間隙水中では硝酸態窒素などの溶質濃度が異なる(Spalding et al. 2001)ことから、地下水の水質分析結果のみから物質の排出負荷量を算出して対策を講じるには限界がある(鈴木・志賀 2004)。そのため、下方浸透水を直接採水し、根群域からの浸透水の水量および水質を正確に把握するための様々な装置が開発されてきた。

テンションフリーライシメータ、ゼロテンションサンプラー、パンライシメータ(Barzegar et al. 2004; 小杉 2000; 金子 2002; Schoen et al. 1999; Zhu et al. 2002)などと呼ばれる装置は、土層中に埋設した不透水性のプレートによって浸透水を集める構造であるが、プレート上面の土壌が飽和状態とならない限り採水できないため、採水断面全体が自然状態よりも著しく湿潤な環境となってしまう(Flury et al. 1999; 小杉 2000)。また大型設備やライシメータの設置により浸透水を採取し、硝酸態窒素の動態を解析した実験では、測定器具の設置工事時に土壌を攪乱し、土壌構造・透水性の変化が測定結果に影響していること(小川 2000)、費用が高額であることが報告されている。また採水率が 45~58%と低く(Jemison and Fox 1992)、火山砂放出物の未熟土では特に低い(三木 2002)などという問題があった。

採水断面の土壌水分量が周囲よりも増加することを防ぐために、キャピラリーライシメータ、ウィックサンプラー(Brandi-Dohrn et al. 1996-a ; Maeda et al. 1999 ; Zhu et al. 2002)が考案された。これはテンションフリーライシメータの底部にグラスファイバーやナイロンで作った毛管を敷き詰め、排水部へと誘導する構造で、採水部の土壌には毛管力によるサクションがかかる。しかし、かかるサクションは一定値であるため、採水断面の土壌水分状態が常に自然状態と等しく保たれるわけではない(小杉 2000)。また、ウィックの材質が採取した浸透水の水質に影響すること(Boll et al. 1992 ; Goyne et al. 2000)、採水が降雨強度の変化に敏感でなく、一度採水が開始されると長時間継続すること(猪迫ら 2005)が指摘されている。

先端に多孔質管(ポーラスカップ)を取り付けたパイプを埋設し、ポーラスカップ内部を減圧して採水を行うテンションサンプラー、吸引ポーラスカップサンプラー、サクションカップサンプラー(Brandi-Dohrn et al. 1996-b ; Hart and Lowery 1997)は、水質分析のための浸透水採取を主な目的として用いられる。土層中の一点からの吸引採水であるため浸透水量の把握ができず(小杉 2000)、採水時にかかるサクションの強弱(Rhoades and Oster 1986)あるいはセラミックのポーラスカップを通過させることで水質が異なること(Hart and Lowery 1997 ; McGuire et al. 1992 ; Siemens and Kaupenjohann 2003)も指摘されている。

以上のように、多くの研究者が様々な浸透水採取方法を用いているが、それぞれに長所と短所があるため、土壌や目的に合わせて適切な方法を選択する必要がある(長谷川 2002)。各種採水装置の採水率(小杉 2000 ; Siemens and Kaupenjohann 2004 ; Zhu et al. 2002)や水質(Haines et al. 1982 ; Landon et al. 1999)を比較した研究も行われており、また、各採水法の問題点を踏まえ、改良を加えた採水装置の開発も続いている(Bowman et al. 2002 ; Gee et al. 2003)。その中で、浸透水の流線を乱すことなく効率よく採水可能な装置として、採水断面における水分条件が周囲の自然状態の断面と等しくなるように吸引圧を制御する装置(小杉 2000)が開発されている(Brye et al. 1999 ; Kosugi and Katsuyama 2004 ; Lentz and Kincaid 2003 ; Mertens et al. 2005 ; Siemens and Kaupenjohann 2004)。それらは手動あるいは自動で吸引圧を制御することから、サクションコントロールライシメータ、平衡テンションサンプラーなどと呼ばれている。特に採水断面のサクションを自動制御するものは、他の装置と比較して採水効率が高いため、本研究では Wagenet(1986)が下方浸透水を直接採水する装置と

してフラックスメータという名で紹介し、van Grinsven et al.(1988)や Inoue and Dirksen(2000)が提案している装置に注目した。

1. 3 本論文の目的と構成

本研究の目的は、土壤構造を破壊することなく土壤水分、溶質濃度、地温、下方浸透量などの変化を同時測定し、データロガーと各種センサー、および下方浸水採取装置を用いた根群域からの下方浸透水のモニタリングシステムを構築することである。不飽和土壤中に流入した物質の動態および溶脱量を把握し、圃場における適切な土壤管理方法を提案することを目指した。

本論文の多くでは、乾燥・半乾燥地にも多い土性で灌漑・排水の条件さえ整えば高い収量が期待できる砂質土壤における、硝酸態窒素など肥料成分の溶脱に注目した。論文構成は Fig.1.1 のフローチャートに示した。

まず、第Ⅱ章に示したように、僅かなサクシオン変化に対して土壤水分量が大きく変化する砂質土壤において、流線を乱すことなく下方浸透水を採取可能な Suction Controlled Flux Sampler(SCFS)を開発した。装置の概要、および砂質土壤における採水のために改良・工夫した点を詳細に記した。次に、室内カラム実験で SCFS の採水性能の評価を行い第Ⅲ章とした。異なる降雨条件下での採水性能を採水効率の算出により評価し、SCFS が高い採水効率で採水可能な装置であることを示した。また、SCFS の採水強度のばらつきについても検討した。第Ⅳ章では SCFS と各種センサー技術を併用した下方浸透水モニタリングシステムを構築し、実際のラッキョウ栽培下の砂丘砂圃場における肥料成分の溶脱をモニタリングした。また第Ⅴ章では、SCFS よりも安価で簡便な採水装置を用いた下方浸透水モニタリングについて検討するべく、サクシオン固定型サンプラーによる砂丘砂圃場でのモニタリング結果を示した。さらに第Ⅵ章では、SCFS を実用化させるための提案を行った。フィルターや土壤の組み合わせを変化させてシミュレーションを行い、採水フィルター周辺の土壤水分量とマトリックポテンシャルの変化を観察することで、SCFS の適用性を考察した。また、我々の開発したモニタリングシステムは、SCFS だけでなく多様な機器で構築されており、このシステムが記録するデータを遠隔操作によって自動回収することも試みた。最後に、不飽和土壤中の下方浸透水モニタリングに関する本研究の総合考察を第Ⅶ章にまとめた。

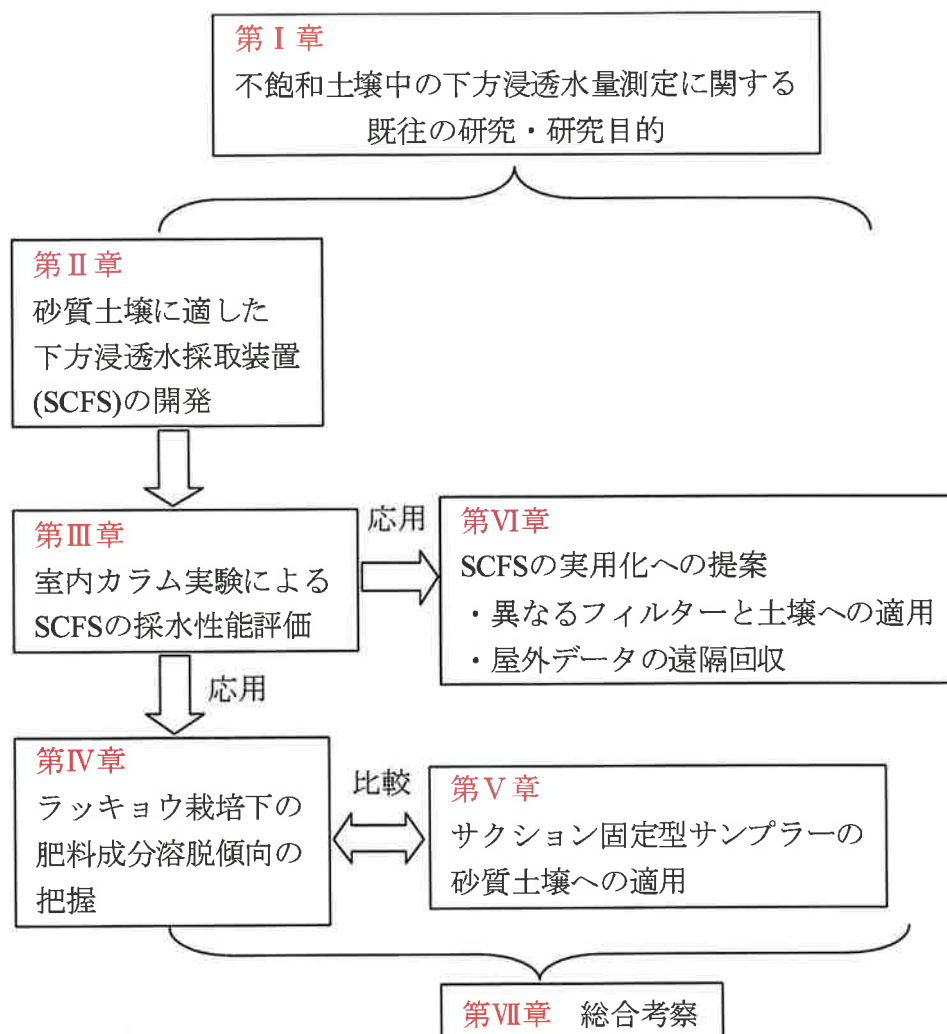


Fig.1.1 Flowchart of this thesis.

第Ⅱ章

砂質土壤に適用可能な 自動サクシオン制御型サンプラーの開発

2. 1 はじめに

近年は灌漑・施肥技術の発達によって、有機物に乏しく、保肥性・保水性に劣る砂質土壤でも営農活動が可能になっている(松本 1993)。また世界的に見れば、蒸発散量が多いが灌漑・排水の条件さえ整えば高い収量が期待できる乾燥・半乾燥地域(環境土壤学編集委員会 1998)の土性は砂質土壤であることが多い。砂質土壤は透水性が高く、肥料の溶脱リスクも高いため厳格な水管理と施肥管理が求められ、特に根群域下に流出する浸透水の管理が必要と考えられる。実際、砂質土壤への多量の施肥後の灌水あるいは降雨により下層へのイオン集積が引き起こされ、土壤イオンの損失や地下水へのイオン負荷の増大という問題につながる可能性が明らかにされている(中村ら 2003)。したがって、砂質土壤に注目した下方浸透水の管理技術を確立しておくべきである。

流線を乱すことなく、最も効率よく下方浸透水を直接採取する方法として、フィルターにかかるサクシオンを制御することにより、土壤中の下方浸透水量と同水量を採取できるサクシオンコントロールサンプラーが開発されている。これは採水装置のサクシオンを周囲の土壤と等しく制御することで周囲のポテンシャルプロファイルを乱さず、つまり、浸透水の流線を自然状態から変えずに採水することを目指した装置である。van Grinsven et al.(1988)は砂壤土において、定常・非定常降雨下でフィルター直上とその周辺土壤のマトリックポテンシャルの差が 10%未満になるようサクシオンを制御するシステムを報告し、小杉(2000)は豊浦砂を用いた室内実験や森林土壤の屋外実験において、土壤水分状態の攪乱を最小限に抑えた採水が可能な装置を開発している。しかし、いずれの研究でも、採水用フィルターの選定は行われておらず、また、サクシオンの制御方法を土壤の種類ごとに細かく変更するような工夫も為されていない。そのため、現在のところ様々な土壤に適用可能な下方浸透水の直接的な採水方法は確立されていない。特に、砂質土壤は僅かなサクシオン変化に対し

て土壌水分量が大きく変化してしまうため、既存のサククションコントロールサンプラーを用いるには砂質土壌に適したフィルターの選定や厳密なサククション制御を行う必要がある。

そこで、既存のサククションコントロールサンプラーを改良して、砂質土壌で下方浸透水の流線を乱すことなく定量的な採水が可能な装置を開発した。本章では、サククションをかけて採水を行う際の条件判定と弱いサククションをかける工夫について特記した。採水効率の向上を目指し、フィルターサククションを自動制御するシステムのうち、砂質土壌での採水のために留意すべき改良点を示した。

2. 2 自動サククション制御型サンプラーの概要

まず、砂質土壌での下方浸透水採水のために様々な改良を加えた自動サククション制御型サンプラー(Suction Controlled Flux Sampler ; 以後 SCFS)の概略を Fig.2.1 に示し、装置全体について概説する。

van Grinsven et al.(1988)や Inoue and Dirksen(2000)の報告を基に作製された SCFS は、採水フィルター(Sampling Filter Device ; 以後 SFD)と圧力を自動制御する部分(Automated Vacuum System ; 以後 AVS)から成る(Fig.2.1)。土壌中に埋設する SFD には、透水性の高い砂質土壌における採水に適するフィルターを選択した。SFD には、AVS による制御の乱れが少々あったとしても採水フラックスを確保できるよう高さ 4 cm の側壁を設け(Fig.2.2)、それを通してフィルターの 2.5 cm 上にテンシオメータ 1 本を挿入した。このテンシオメータが測定するフィルター直上のマトリックポテンシャル(h_C)と、同深度の自然土壌中のマトリックポテンシャル(h_L, h_R) の 3 分間の平均値がそれぞれ記録される。吸引判定に用いる 3 本のテンシオメータの配置は Fig.2.2 のとおりである。 h_C とフィルター外のマトリックポテンシャルの平均値(h_{LR})から吸引判定を行い、AVS によりフィルターにかかるサククションを制御した。SFD から採水容器へと続く採取チューブ内は水理学的連続が保たれており、途中に挿入した自作の 4 極塩分センサーで採取した水溶液の電気伝導度(EC)をモニターした。なお、この EC 値は本章の範囲内では考察には使用していない。AVS は吸引判定用テンシオメータ、真空ポンプ、電磁弁、圧力変換器、バッファ容器、採水容器、および電子天秤で構成され、1 台のデータロガー(CR10X ; Campbell Scientific)

が5分を1サイクルとするプログラムで制御している。弱いサクションを実現するためのバッファー容器は、真空ポンプと電磁弁 V_3 によって常に 80 cm 以上のサクションが保たれている。実際には次のようなタイミングで採水を行った。

下方浸透の無い場合は、 $(h_C - h_{LR}) = -5 \text{ cm}$ で平衡となる。これは、次節で詳述する実験結果から得られたものであり、すなわち $(h_C - h_{LR}) = -5 \text{ cm}$ が AVS による吸引判定の基準である。したがって、フィルター深度に浸透水が到達し、 $(h_C - h_{LR}) > -5 \text{ cm}$ となると、電磁弁 V_1 が 10 秒間開き、バッファー容器と採水容器を接続することでフィルターにサクションをかけ採水する。一方、フィルター直上が設定値以上に乾燥した $(h_C - h_{LR}) \leq -5 \text{ cm}$ の場合、電磁弁 V_2 を 10 秒間開いて採水容器を大気に開放し、フィルターサクションが大気圧に近づくことで徐々に採水が行われなくなる。以上のようにして自然状態のポテンシャルプロファイルを維持し、流線を乱すことなく浸透水を採取するようにした。

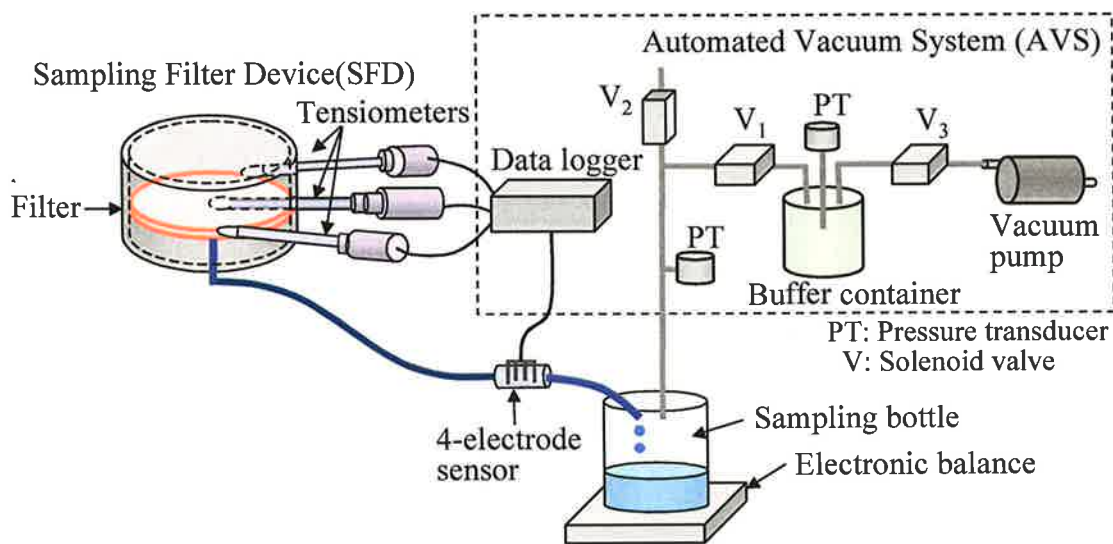


Fig. 2.1 Schematic of the suction controlled flux sampler (SCFS).

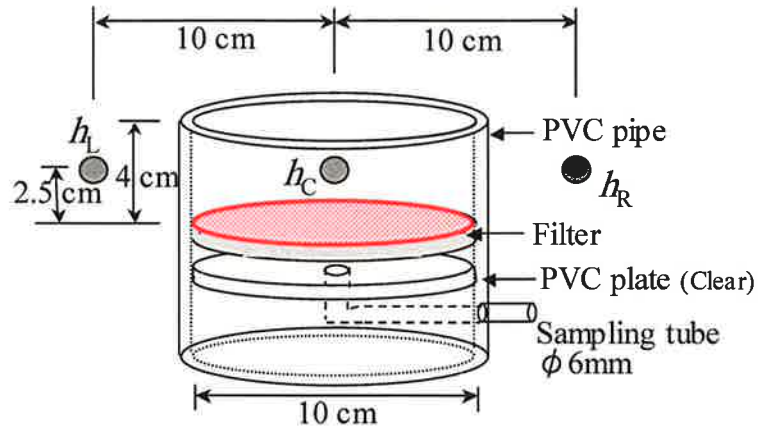


Fig. 2.2 Arrangement of the tensiometers for suction control and detail of the sampling filter device (SFD).

Table 2.1 Physicochemical properties of Tottori dune sand (Endo et al. 2003).

Texture	Three phases (%)			Bulk density (Mg m ⁻³)	Saturated hydraulic conductivity (cm s ⁻¹)	Specific gravity	
	Solid	Liquid	Gas				
S	52.8	9.5	37.7	1.56	0.034	2.68	
pH	EC dS m ⁻¹	Total-N g kg ⁻¹	Exchangeable cation (cmol _c kg ⁻¹)				CEC cmol _c kg ⁻¹
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	
6.67	0.08	0.01	0.33	0.21	0.25	0.19	0.97

2. 3 実験方法

2. 3. 1 砂質土壌

実験で使用する砂質土壌は、鳥取砂丘砂(砂丘未熟土, Samments, Arenosols)であり、土壌水分特性曲線(Fig.2.3)からわかるように、わずかなサクシヨンの変化で土壌水分量が大きく変化する透水性の高い土壌である。その温度依存性などの詳細は矢野ら(1983)、物理学的性質は Toride et al.(2003)で報告されている。理化学的性質については遠藤ら(2003)に示されており、Table2.1 のとおりである。

2. 3. 2 フィルター試験

既往の研究では、各土壌に最適な採水フィルターの選定は行われておらず、サクシヨンの制御に耐え得る空気侵入値をもつポーラス板など(小杉 2000 ; van Grinsven et al. 1988)が使用されてきた。しかし本研究では、対象となる砂丘砂の透水性の高さを考慮し、飽和透水係数や空気侵入値、土粒子による目詰まりを検討して砂質土壌に適したフィルターを選出した。試験したフィルターは孔径や材質の異なる 8 種のフィルターで(Table2.2)、ガラスおよびステンレスフィルターは Fig.2.2 のような構造の状態を試験した。メンブレンフィルターは、マルチステップ流出法で用いられる圧力セル(森ら 2001)に固定して試験した。

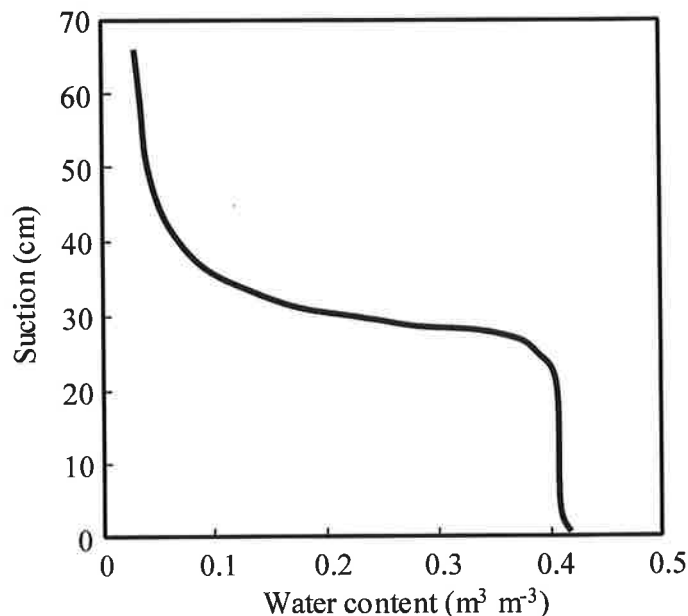


Fig. 2.3 Water retention curve of Tottori dune sand (Bulk density : 1.55 Mg m⁻³).

フィルターの飽和透水係数は定水頭法(Klute and Dirksen 1986; 中野ら 1995), 空気侵入値は脱気・飽和したフィルターに徐々に正圧をかけていく方法により求めた. また, 鳥取砂丘砂を洗浄して得られる懸濁液(浮遊物質 SS: 0.003 mg L⁻¹, EC: 0.67 dS m⁻¹)を用いて定水頭法による飽和透水試験を繰り返し, 目詰まりによる透水係数の変化を記録した.

2. 3. 3 吸引判定値

鳥取砂丘砂の土壌水分特性曲線(Fig.2.3)から, より厳密なサクション制御が求められると予想されたため, 二次元土中水分・塩分移動予測汎用プログラムである HYDRUS-2D(ver.2.05; Šimůnek et al. 1999; 取出・井上 2004)を利用してシミュレーションを行い, その結果から吸引判定値を検討した. なお, シミュレーションでは, SCFS のようにフィルターサクションを自動制御するような条件選定が困難であることを考慮し, 以下のような設定とした.

1メッシュを1cmとして縦50cm×横20cmの砂質土壌の鉛直二次元断面を作成し, 4cmの側壁を設けたフィルターが砂質土壌中に埋設されているとした(Fig.2.4). フィルター内外には, 吸引判定用のテンシオメータのように観測点を設け, その地点のマトリックポテンシャルの経時変化および水分分布の変化を注視した. HYDRUS-2D で入力した物質の各パラメータ(van Genuchten-Mualem Model)は, 砂質土壌: $\theta_r = 0.0486 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, $\theta_s = 0.4132 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, $\alpha = 0.03 \text{ cm}^{-1}$, $n = 5.5$, $K_s = 760.48 \text{ cm d}^{-1}$, $l = 0.5$, 採水フィルター: $\theta_r = 0.0283 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, $\theta_s = 0.33 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, $\alpha = 0.01 \text{ cm}^{-1}$, $n = 5.0$, $K_s = 50.97 \text{ cm d}^{-1}$, $l = 0.5$ である. フィルターサクションは50cm一定とした. 初期の水分条件を飽和とし, フィルター外側の境界条件もサクション50cm一定として1日排水させ, その後, 降雨強度 20 mm h^{-1} の連続降雨が1日発生したと仮定し, その2日間の計算を行った.

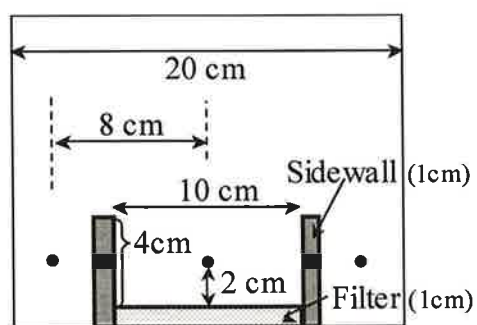
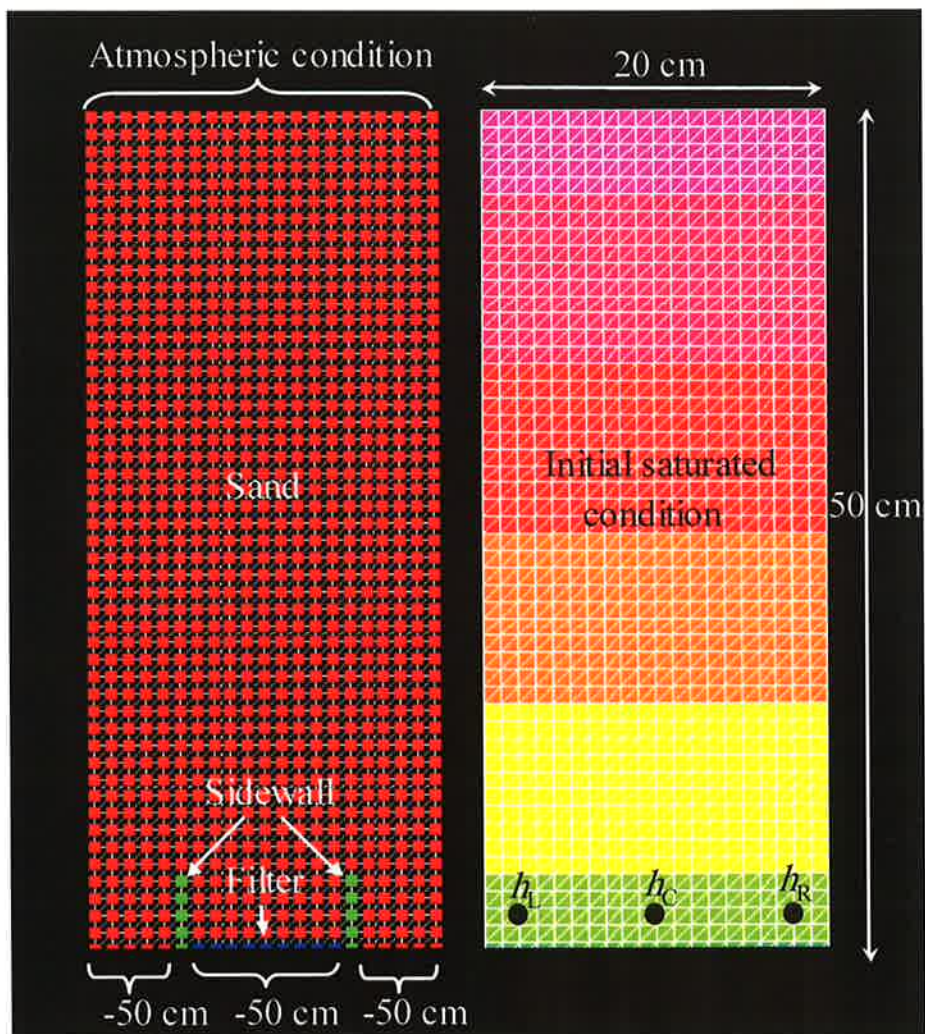


Fig. 2.4 Boundary condition for simulation by HYDRUS-2D.

2. 3. 4 バッファ容器の採用と採水容器の大きさ

短いサイクルでフィルター内外のマトリックポテンシャルをモニターし、強いサクシオンを瞬間的に適用させる採水方法(Kosugi and Katsuyama 2004)が森林土壌では功を奏している。しかし、砂質土壌で採水するためには弱いサクシオンをかける必要があり(中尾ら 2003)、強いサクシオンをかけることは許されない。微妙なサクシオンを制御できるポンプの採用も考えられるが、システムを安価に仕上げるために、ここではバッファ容器を採用することにした。すなわち、ポンプと採水容器との間にバッファ容器を設置し(Fig.2.1)、その容器内が常に弱いサクシオンを保つように制御した。これにより、ポンプ稼働時にしばしば見られる過剰な運転と、それに伴う過剰なサクシオン変化を防ぐことができる。今回使用した容積 3500 cm³のバッファ容器を、真空ポンプによって 15 秒間吸引すると最高到達サクシオンは 300 cm であった。また、鳥取砂丘砂の土壌水分量の減少がほとんど起こらなくなるサクシオンは 80 cm(土壌水分特性曲線, Fig.2.3 参照)と考えられる。そこで、フィルターサクシオンを 0 ~ 80 cm で制御するため、フィルターにかかるサクシオンは 80 cm が上限となるよう、バッファ容器のサクシオンは 80 ~ 300 cm に調整した。実際には、ポンプが稼働してサクシオン 300 cm になったバッファ容器は、採水容器に接続される毎にそのサクシオンを減じ、サクシオン 80 cm を下回ったところで再びポンプが稼働し、300 cm まで吸引されるということを繰り返す。

バッファ容器を採用した場合、採水容器がバッファ容器より大きすぎると採水に十分なサクシオンをフィルターに反映できず、さらに、採水容器には採取した浸透水を貯留させる役目もあることを考えると容器が過小でも採水が困難となる。このように採水容器の大きさについて検討する必要があると考えられた。そこで、630, 1500, 3500, 4300, 6600 cm³の密閉可能な容器を用意し、予めサクシオン 80 あるいは 300 cm に保たれたバッファ容器と 10 秒間接続した際に、各容器が到達するサクシオンを測定し、最適な容積の採水容器を選出した。

2. 4 結果および考察

2. 4. 1 砂質土壤に適したフィルターの選定

砂質土壤に適した採水フィルターを選出するために供試したフィルターは Table 2.2 の 8 種である。透水性は良いが空気侵入値が低い孔径 20~30 μm のガラスフィルター(G3), および目詰まり試験(Fig. 2.5)において 10 回の試験で一桁の透水係数の低下が認められたメンブレンフィルターは, 砂質土壤での SCFS による採水に不適と判断した。さらに, 採取した浸透水の水質について考慮すると, 重金属類のフィルターへの吸着など(McGuire et al. 1992)から, ステンレスフィルターよりもガラスフィルターが適していると考えられた。したがって, 砂質土壤での SCFS による下方浸透水採取には, 孔径 5~10 μm のガラスフィルター(G4)が最適と判断し, 以後, 本研究ではこの G4 フィルターを使用した。

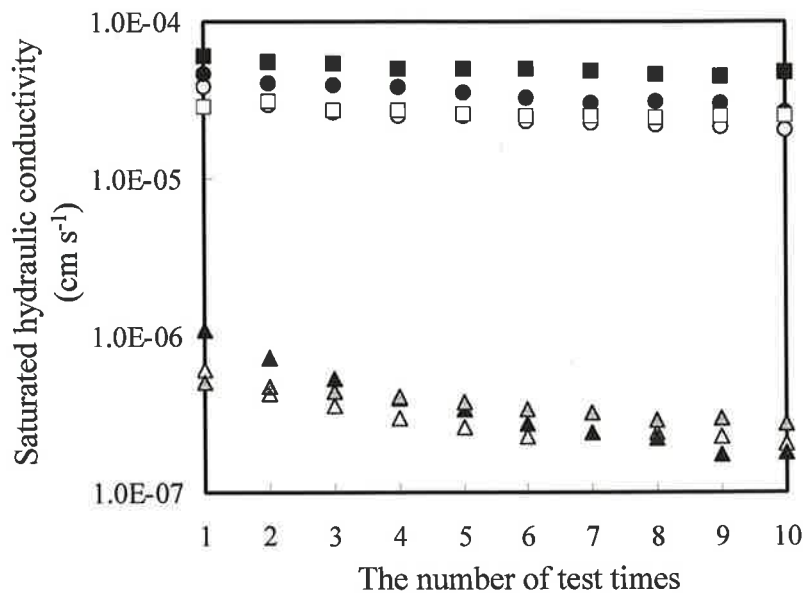


Fig. 2.5 Changes in hydraulic conductivity in the clogging test by suspended solution.

Glass 2-5 μm (□), Glass 5-10 μm (■), Stainless 2 μm (○), Stainless 5 μm (●), Membrane 1.2 μm (▲), Membrane 3 μm (△), Membrane 5 μm (▲).

Table 2.2 Saturated hydraulic conductivity and air entry pressure of tested filters.

Filters	Pore size (μm)	Thickness (mm)	Hydraulic conductivity (cm s^{-1})	Air entry pressure (cm)
Glass (G5)	2- 5	8	1.4×10^{-4} ($\pm 0.2 \times 10^{-4}$)	300
Glass (G4)	5- 10	8	5.8×10^{-4} ($\pm 0.3 \times 10^{-4}$)	90
Glass (G3)	20- 30	8	2.1×10^{-3} ($\pm 0.4 \times 10^{-3}$)	40
Stainless	2	8	1.9×10^{-4} ($\pm 0.1 \times 10^{-4}$)	180*
Stainless	5	8	2.4×10^{-4} ($\pm 0.1 \times 10^{-4}$)	180*
Membrane	1.2	0.1	1.4×10^{-5} ($\pm 0.2 \times 10^{-5}$)	400*
Membrane	3	0.1	1.6×10^{-5} ($\pm 0.1 \times 10^{-5}$)	200*
Membrane	5	0.1	1.5×10^{-5} ($\pm 0.1 \times 10^{-5}$)	350*

*Data from company catalog.

Glass(Tokyo Koshin Rikagaku Seisakusho, Japan), Stainless(Sankeirika, Japan), Membrane 1.2 μm , 3 μm (Versapor; Pall, U.S.A), Membrane 5 μm (Millipore; Nihon Millipore, Japan).

2. 4. 2 シミュレーションによる吸引判定値の決定

これまでに、吸引判定値を $(h_C - h_{LR}) = \pm 0.5 \text{ cm}$ とする案 (Inoue and Dirksen 2000)や、 h_C と h_{LR} が全く同じになるように制御する案(小杉, 2000)が報告されていた。いずれの場合も、 $(h_C - h_{LR}) = 0$ が平衡であることが前提である。しかし、HYDRUS-2Dによるシミュレーションの結果、Fig.2.6-aのように、連続降雨下で h_C と h_{LR} は一定の差を保って平衡となり、 $(h_C - h_{LR}) = 0$ とならないことが明らかとなった。砂質土壌内に設置した採水フィルターに周辺土壌と同等のサクションがかかっているとしても、前の浸透水の通過後にできた不飽和部分が残ったまま(Fig.2.6-b)次の浸透が起こるため、浸透水とフィルターとの間に空気の封じ込めが起こっている(Fig.2.6-c)。今回掲載したシミュレーション結果(Fig.2.6-a)において、 h_C と h_{LR} の差はおよそ2.5 cmであるが、物質のパラメータや境界条件の設定値を変化させると差も大きくなった。シミュレーションで20 mm h⁻¹という高い降雨強度を想定した場合でさえも、フィルター直上は周囲よりも乾燥した状態で平衡となった。したがって、カラム実験で設定したような降雨強度で、もし吸引判定基準を $(h_C - h_{LR}) = 0 \text{ cm}$ としていると、浸透水が到達しているにもかかわらず、いつまでも採水命令が出ないことになって

しまう。これらのことから、本実験では吸引判定の際に h_c と h_{LR} を全く同じに合わせるのではなく、フィルターには周囲よりも 5 cm 程度強めのサクションをかけて採水することが最良の結果を与えると判断し、吸引判定値を $(h_c - h_{LR}) = -5 \text{ cm}$ と決定した。一般には周囲の土壌と全く同じ値が採水基準として考えやすいが、浸潤前線または排水後退線の移動の結果、不飽和部分がフィルター上に取り残される場合があることが明らかとなった。

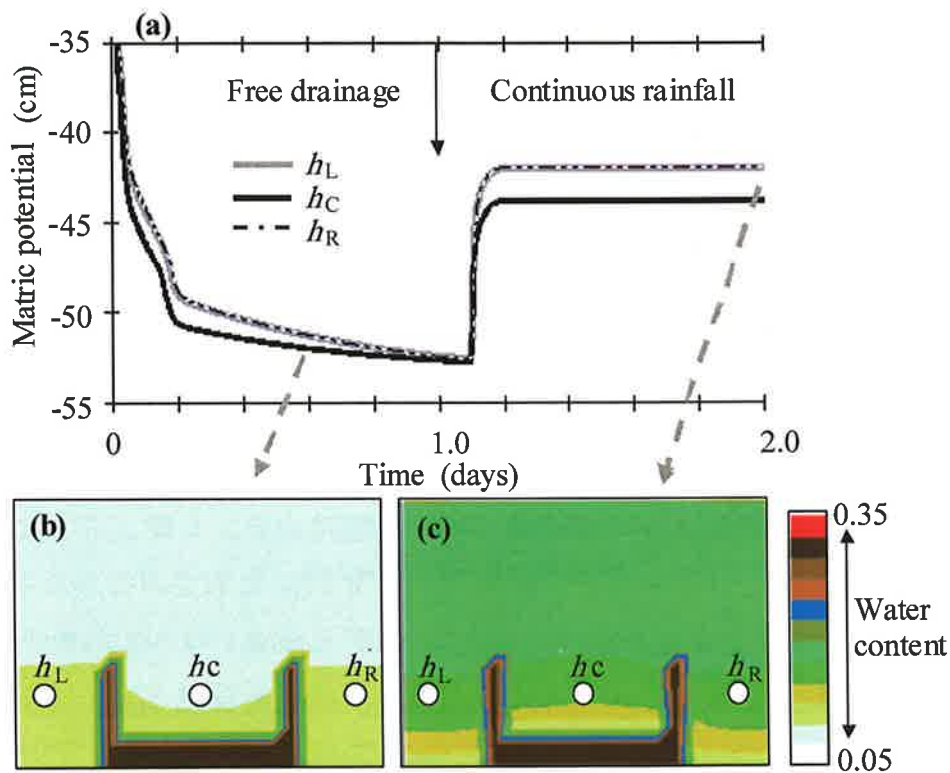


Fig. 2.6 Result of the calculation by HYDRUS-2D with 50 cm constant suction at the filter.

- (a) : Changes in the matric potential inside and outside the SFD.
- (b) : Soil water content under free drainage.
- (c) : Soil water content under continuous rainfall with 20 mm h^{-1} .

2. 4. 3 弱いサクシオンをかけるための工夫

最高到達サクシオンが 700 cm もあるような真空ポンプを使用した場合でも、容積 3500 cm³ のバッファー容器を 15 秒吸引することで予め 80~300 cm のサクシオンを保ち、これと採水容器とを接続して間接的にフィルターにサクシオンをかけることにより、微妙な圧力制御が可能となった。Fig.2.7 には、最高サクシオン 300 cm、あるいは最低サクシオン 80 cm で採水容器に接続したときに実現できるサクシオンを示した。サクシオン 300 cm のときはいずれの容器でも十分な吸引能力を示したが、80 cm の時は容器が大きくなると十分なサクシオンを発揮できなかった。

土壌水分特性曲線(Fig.2.3)から、可動水採水のためにはサクシオン 50 cm までは必要と考え、バッファー容器がサクシオン 80 cm の場合でも採水可能な 50 cm が反映される採水容器の容積を探ると、Fig.2.7 から明らかのように 630 および 1500 cm³ と判断できた。採取した浸透水の貯留のためには採水容器は大きい方が良く、取り扱いの容易さも考慮し、容積 1500 cm³ の容器が採水容器として最適と判断した。また、採水容器とバッファー容器との接続時間は 10 秒間で充分であることを確認した。

2. 4. 4 自動圧力制御プログラム

AVS に指示を与えるデータロガーのプログラムスケジュールは Fig.2.8 のようになっている。Flag-2 が ON の間は吸引判定用のテンシオメータによる測定が行われ、Count-2 が 400 のとき(1 カウント 0.5 秒)に判定が行われる。ここでフィルターにサクシオンをかける場合は V₁ が Count-1 の 115 から 135 の間、つまり 10 秒間開き、逆にフィルターを大気圧にする場合は V₂ が 10 秒間開く。また、バッファー容器内を何秒吸引するかは V₃ を開閉するカウント(Fig.2.8 では Count-1 の 200~230, 15 秒)で決定される。本実験で使用した AVS で鳥取砂丘砂に対して下方浸透水採取を行う場合は、上述のようにサクシオン 80~300 cm のバッファー容器と 1500 cm³ の採水容器を 10 秒間接続することが最も効率の良い採水システムとなった。①バッファー容器の有無とその大きさ、②採水容器の大きさと接続時間、③どの電磁弁を何秒開くかのカウント指定という 3 点を変更させることにより、さまざまな吸引条件を作り出すことができる。土壌水分特性曲線の勾配が急で、おそらく最も吸引採水が難しいと考えられる砂丘砂において、後述するように効率よく採水可能であったことから、条

件を変えることで様々な土壌に AVS を適用させることが可能と考えられる。

なお、データロガーに送信した SCFS の制御プログラム(ソフト PC208W 詳細)とその概説, および AVS やテンシオメータを含めたデータロガーの配線図については付録 2 (Fig.A-1)に掲載した。

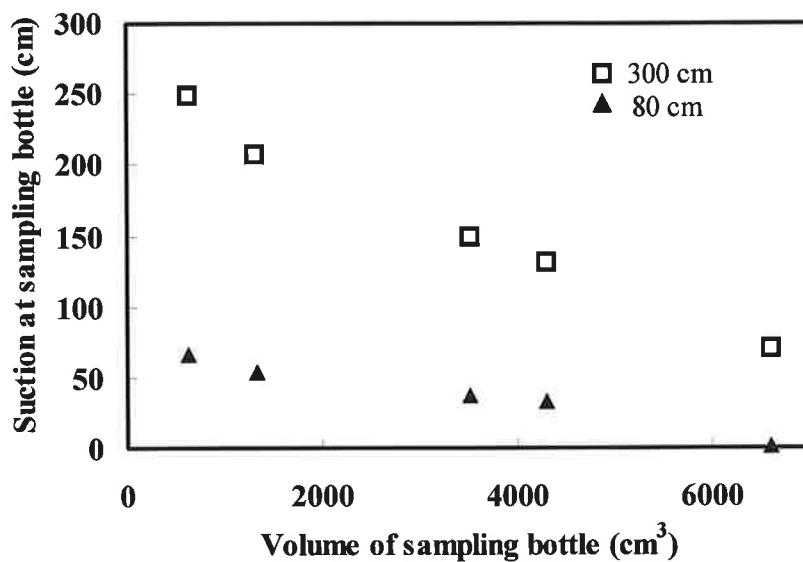


Fig. 2.7 Maximum suction in different sampling bottles connected with the buffer container. Suction 80cm(▲) and suction 300cm(□).

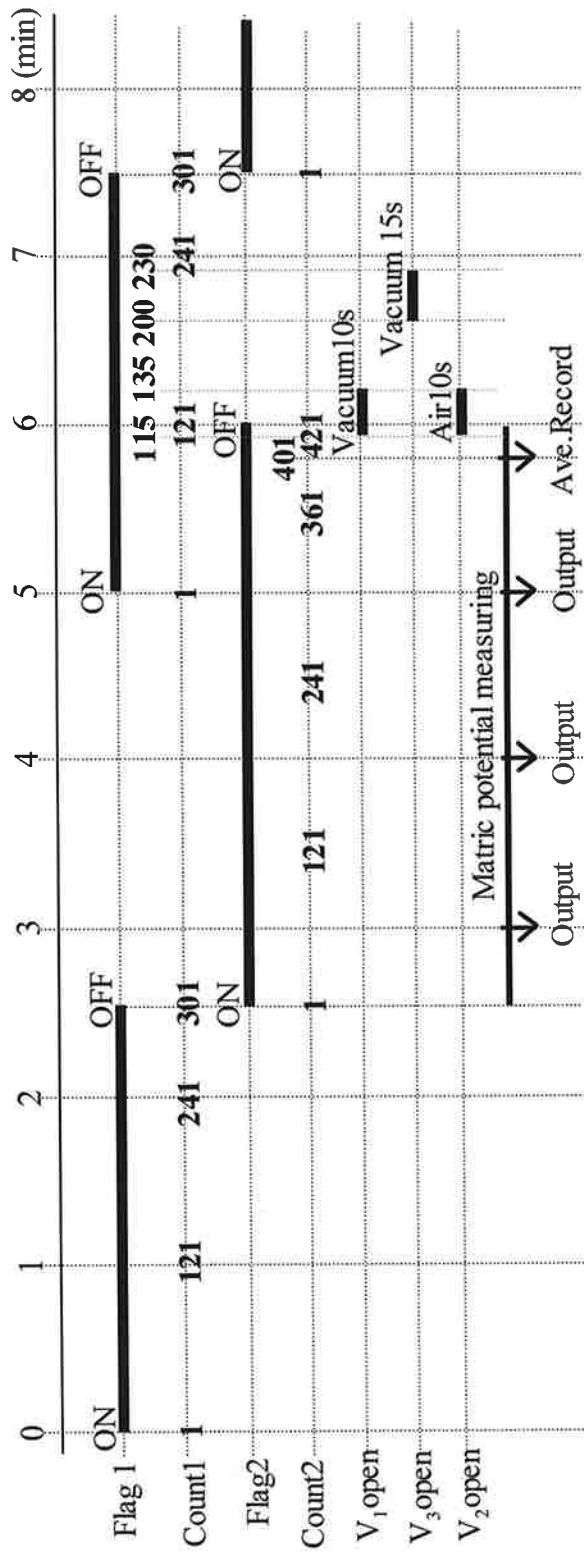


Fig. 2.8 Time schedule for the suction control by the AVS.

2. 5 まとめ

サクシオンをかけて採水することが難しい砂質土壌において、下方浸透水を高い採水効率で採水することを目指し、既存のサクシオン制御サンプラーに様々な改良を加えて SCFS を開発した。まず、フィルターを選定を行い、透水性や空気侵入値、目詰まりについて考慮した結果、孔径 5~10 μm のガラスフィルターが最適であることが明らかとなった。次に、サクシオンをかけた採水を行うことでフィルター直上に空気の封じ込めが起こることがシミュレーション結果から示され、採水吸引判定値($h_C - h_{LR}$)を周囲と同じというよりは僅かに(5 cm)乾燥側に設定することで、その影響を回避できると判断した。また、弱いサクシオンをかけるためにバッファー容器を採用し、土壌組成(本実験の場合は砂)の違いに応じ、バッファー容器を設けることによってフィルターにかけるサクシオンを調整できることを示した。

第Ⅲ章

室内カラム実験における 自動サクション制御型サンプラーの採水性能評価

3. 1 はじめに

砂質土壌に適した下方浸透水採取装置，Suction Controlled Flux Sampler(SCFS)を前章で示したような工夫を加えて開発した．本章では，このSCFSが砂質土壌において浸透水の流線を乱すことなく効率よく採水可能であるか，その採水性能を評価することを目的とし，鳥取砂丘砂を充填したカラムを用いた室内実験を行った．具体的には，採水効率(Water-Collecting Efficiency；以後WCE)を算出することにより評価した．まず，小杉(2000)のように連続降雨でカラム内を定常状態にして採水の精度についても検討し，さらに，実際の圃場条件と同じとなるよう短期降雨による非定常条件下でも採水を行った．

3. 2 実験方法

3. 2. 3 室内カラム実験装置

室内土壌カラム実験の概略を Fig.3.1 に示す．内径 20 cm，高さ 105 cm の PVC カラムに 0.85 mm の篩に通した鳥取砂丘砂を乾燥密度 1.55 Mg m^{-3} となるよう湿式充填した．目詰まりを防ぐためカラムの底(深度 105 cm)から深度 70 cm までは洗浄砂を用い，70 cm 以上は洗浄していない風乾砂を使用した．SFD のフィルター表面が深度 50 cm，吸引判定用のテンシオメータ 3 本は深度 47.5 cm になるよう設置した．カラム内の不飽和流や土壌水分量変化を観察するため，予め校正した TDR センサー(プローブ直径 1.8 cm，ロッド長 6 cm，ロッド数 3 本；サンケイ理化)を深度 20, 30, 40, 46, 70 cm に，マイクロテンシオメータ(UNSUC；サンケイ理化)を深度 20, 30, 40, 70 cm に挿入した．TDR センサーおよびマイクロテンシオメータの校正や配線についての詳細は次章 4.2.7 に記す．カラムの底にも前章 2.4.1 で選出したガラスフィルターと同じものをアクリル

セルで固定して設置し、そのサクシオンを 15 cm 一定とした。定流量ポンプに接続した人工降雨装置を用いて、カラム上部から一定の降雨強度(q_i)で蒸留水を供給した。Run-1 は $q_i = 2 \text{ mm h}^{-1}$ の連続降雨で飽和に近い定常状態であり、SCFS の AVS を使用せず、フィルターサクシオンは 15 cm に固定した場合とし、Run-2~6 ではフィルターサクシオンを AVS により制御した。Run-2 および Run-3 は、それぞれ $q_i = 2 \text{ mm h}^{-1}$, 10 mm h^{-1} の連続降雨、Run-4~6 は $q_i = 20 \text{ mm h}^{-1}$, 10 mm h^{-1} , 4 mm h^{-1} の短期降雨とした。SCFS の採水チューブの滴下点はフィルターの深度と同じ 50 cm に設置し、採水チューブによってフィルターにかかるサクシオンはゼロとしたため、フィルターサクシオンは採水容器内のサクシオンに等しくなる。

3. 2. 2 異なる降雨強度下の採水効率の算出

本研究では雨水もしくは灌漑水の下方浸透水をどれほど自然に近い状態で採水できるかを焦点に置いているため、フラックスを比較し、SCFS の採水性能を以下のように WCE を求めることにより評価した。まず、異なる降雨・採水条件における採水効率を算出するための期間を Run と定義する。Run ごと (1Run は 12 時間) の積算降雨量 $Q_r (\text{cm}^3)$ をカラム面積および Run 時間で除して降雨フラックス $q_r (\text{cm h}^{-1})$ とする。また、SCFS からの積算採水量 $Q_e (\text{cm}^3)$ を採水フィルター面積と Run 時間で除して採水フラックス $q_e (\text{cm h}^{-1})$ を算出する。一方、これらの値は土壌中の水分貯留量に影響されるため、TDR センサーにより求められる深度別の土壌水分量の変化から、カラム内の 0~50 cm 深における単位時間の水分貯留量変化 $q_s (\text{cm h}^{-1})$ を算出した。この q_s を考慮に入れ、SCFS の WCE を(1)式により求めた。

$$\text{WCE (\%)} = 100 \times q_e / (q_r - q_s) \cdots \cdots (1)$$

WCE が 100 %未満の時は浸透水の流線が SFD を避けるように乱されて採水量が少なくなったと考えられ、逆に 100%以上の場合は SFD の範囲外から土壌水を多く集めてしまったと考えられる。なお、カラムからの積算排水量を $Q_d (\text{cm}^3)$ とし、雨量に対する採水および排水量の割合を、カラム内全体の水分貯留量の増減を示す値(Change of Water Storage in the column ; 以後 CWS)として以下の(2)式により算出し、参考値として付記した。CWS が 100%未満であれ

ばカラム内全体の水分貯留量が増加, CWS が 100%を超えるとそれが減少していることになる.

$$\text{CWS (\%)} = 100 \times (Q_e + Q_d) / Q_r \dots \dots \dots (2)$$

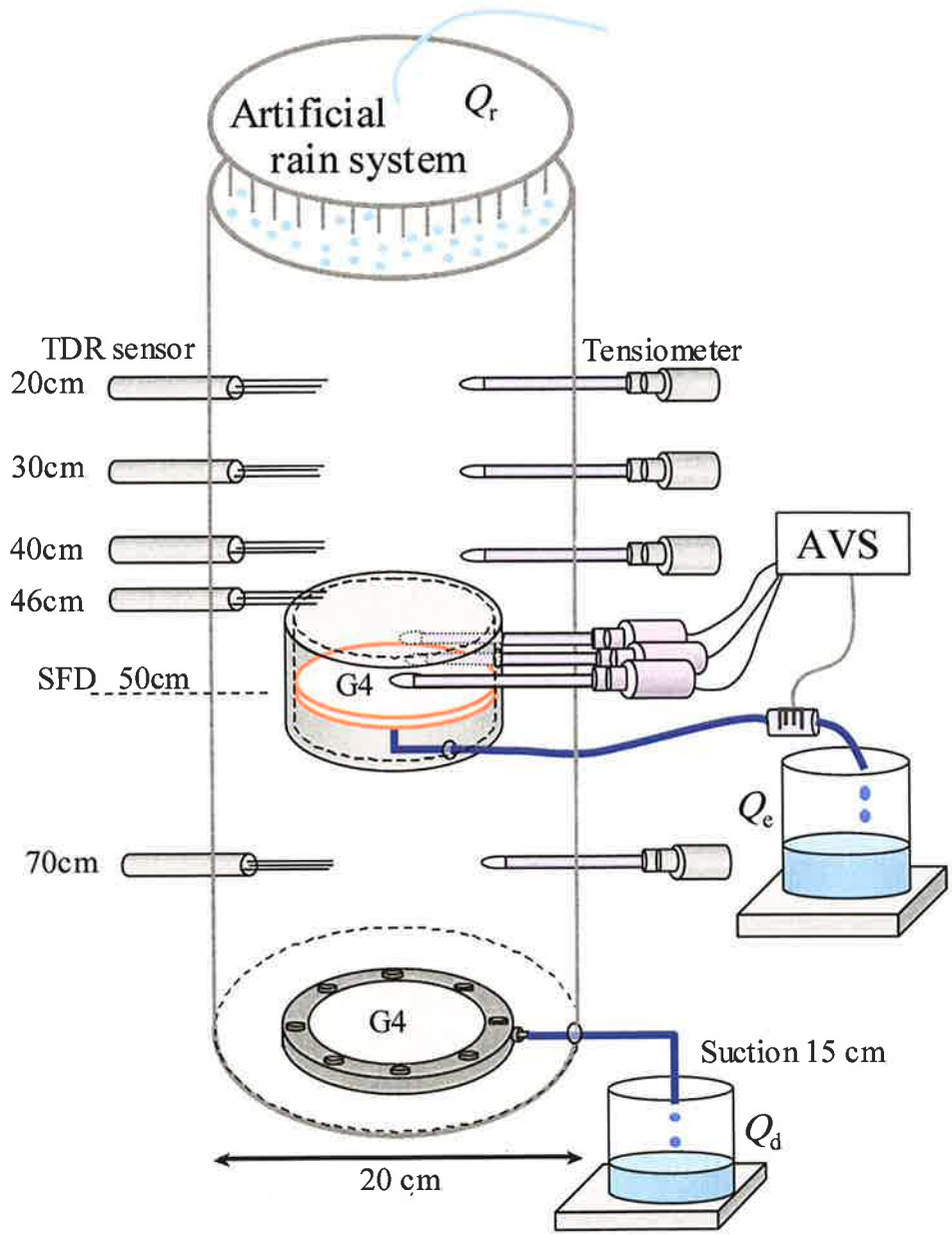


Fig. 3.1 Schematic of the soil column experimental set up.

3. 3 結果および考察

3. 3. 1 連続降雨，定常浸潤状態下での採水

室内土壌カラム実験の定常浸潤状態下での SCFS の採水状況を Fig.3.2 に、算出した WCE を Table3.1 に示す。Run-1 では $q_i = 2 \text{ mm h}^{-1}$ の連続降雨によってカラム内の 0~50 cm 深までの平均土壌水分量が $\theta = 0.33 \pm 0.03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ となった。CWS は 114% であり、フィルター以深で排水がやや過剰であったこととなる。 h_C と h_{LR} にほとんど差は認められず (Fig.3.2-1-a)，WCE は 56.5% であった (Table3.1)。WCE の低さは、浸透水がフィルターを避けてしまったためと考えられた。これが AVS を使ってサクションを自動制御し、流線を乱さない採水を目指す理由である。

Run-2 では、CWS が 111%，0~50 cm 深の平均土壌水分量は $\theta = 0.19 \pm 0.02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ となり、WCE は 93.6% であった (Table3.1)。同じ降雨強度にも関わらず Run-2 が Run-1 よりも高い WCE となったのは、AVS を用いて自動でフィルターサクションを制御した効果といえる。Run-2 の WCE は 100% 未満になったことから、わずかにフィルターを避けるような浸透水の流れが発生していたことが推察される。実験中に h_C は、 h_L や h_R と 5 cm の差を保って同じように変化しており (Fig.3.2-2-a)，プログラムどおりの圧力制御が行われていることを示した。降雨強度 2 mm h^{-1} に対し、採水強度は $0 \sim 4 \text{ mm h}^{-1}$ で変化した (Fig.3.2-2-b)。採水容器内のサクションは AVS によって頻繁に制御され、最高サクションは 35 cm であった (Fig.3.2-2-c)。

Run-3 では、0~50 cm 深の平均土壌水分量は $\theta = 0.22 \pm 0.02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ となり、AVS はフィルターサクションを最高 27 cm で制御した (Fig.3.2-3-c)。WCE は Run-3 でも 108.5% と高くなった (Table3.1) が、Run-3 は Run-2 と反して WCE が 100% を超え、僅かではあるがフィルターの外から浸透水を多く集めたことが推察された。降雨強度 10 mm h^{-1} に対し、採水強度は $0 \sim 15 \text{ mm h}^{-1}$ で変化した (Fig.3.2-3-b)。なお、Run-3 では降雨強度が高く、実験期間の最後にはカラム底部が飽和に近い状態となったため、CWS が 100% に至らなかった (Table3.1)。高さ 105 cm の砂質土壌カラムで一様な水分プロファイルを作ることはほぼ不可能であるため、カラム底部で土壌水分量が高くなったが、フィルターを通過する時点での採水効率も Run-2、3 とともに 100% 近くを実現しているため目的は達成できていると判断した。

Table 3.1 Water-collecting efficiency under various rainfall conditions.

Run	1*	2	3	4	5	6
Run time (h)	12	12	12	45	74	74
q_i (mm h ⁻¹)	2	2	10	20	10	4
Rain term (h)	12	12	12	1.7	2.5	4.2
Q_r (cm ³)	753.6	753.6	3768.0	1088.5	774.5	522.8
Q_d (cm ³)	760.6	652.7	2237.8	787.3	530.9	384.3
Q_e (cm ³)	97.5	183.7	1031.0	344.9	245.6	159.4
CWS (%)	113.9	111.0	86.8	104.0	100.3	104.0
q_s (cm h ⁻¹)	0.017	-0.008	-0.008	-0.41	-0.04	-0.048
q_r (cm h ⁻¹)	0.2	0.2	1.0	2.04	0.99	0.40
q_e (cm h ⁻¹)	0.104	0.195	1.094	2.58	1.25	0.48
SD (mm h ⁻¹)**	---	0.79	2.07	---	---	---
WCE (%)	56.5	93.6	108.5	105.3	121.4	108.8

* Constant filter suction at 15 cm by hanging water.

**Standard deviation of sampling intensity (mm h⁻¹) under steady state condition.

3. 3. 2 短期降雨，非定常浸潤状態下での採水

土壌カラムへの水供給を停止し乾燥した状態が続くと，深度 47.5 cm に設置している吸引判定用テンシオメータの測定値 h_C , h_L , h_R は，-49 から -54 cm でほぼ一定となった．その後，Table 3.1 に示したように $q_i = 20, 10, 4$ mm h⁻¹ の短期降雨で蒸留水を供給した (Run-4~6)．フィルター直上のマトリックポテンシャル， h_C は 5 cm の差を保って h_L や h_R と同様に制御されている (Fig. 3.3-a)．降雨後に下方浸透水がフィルター深度にまで達すると，吸引判定値 ($h_C - h_{LR}$) が -5 cm 以上となり，AVS から浸透水採水の指示が出る．Run-4~6 では，フィルターサクションは 0~39 cm に制御され (Fig. 3.3-c)，WCE は 105.3~121.4% であった (Table 3.1)．Run-5 の 2000~3000 分のところに注目すると，採水フラックスの上昇点 (Fig. 3.3-5-b) とマトリックポテンシャルの上昇点 (Fig. 3.3-5-a) はほぼ一致している．Run-4 あるいは Run-6 でも同様の結果が得られた．さらに，SCFS は下方浸透が終了すると採水を止めている (Fig. 3.3-5-b) ことから，SCFS はフィルター埋設深度で浸透が起こっている場合のみ制御どおりに採水を行っていたことが明らかとなった．

3. 3. 3 異なる降雨条件下での SCFS の採水強度のばらつき

定常浸潤の連続降雨実験中、AVS 制御を行わなかった Run-1 においては採水強度が安定していた(Fig.3.2-1-b)のに対し、Run-2, 3 では明らかに採水強度に大きな差が認められ、降雨強度を超えるときもあった(Fig.3.2-2-b, 3.2-3-b). そこで採水強度のばらつきについて検討した. 実際の砂質圃場で定常浸潤状態となることは無いが、室内のカラム実験の場合は Run-2 および Run-3 のような連続降雨を行うことにより、定常状態を作り出すことができた. 深度別に挿入した TDR センサーの測定値からカラム内の 0 ~ 50 cm 深の水分貯留量の変化が少ないことを確認し、この定常状態で採水強度の標準偏差を比較した (Table 3.1). Run-2 よりも Run-3 の方が採水強度のばらつきが大きいですが、これは降雨強度の影響を受けていると考えられた. 降雨強度が異なった場合でも、吸引判定に用いる h_c の変動(Fig.3.2-2-a, 3.2-3-a)に応じてフィルターサクシジョンの制御をより頻繁に行うことにより、Run-2 および Run-3 共に高い採水効率を得ている. AVS は離散的に制御を行うために採水強度にばらつきがでるが、採水効率は確保されており、フィルターサクシジョンの自動制御の効果を確認することができた. 一方、非定常状態での採水については、定常状態と同様の採水強度のばらつきの評価が困難であるため、吸引判定値($h_c - h_{LR}$)の標準偏差 (SD)および平均値(Ave.)を算出した(Fig.3.4). その結果、実際の圃場の状況に近いと考えられる短期降雨後の AVS によるマトリックポテンシャルの制御 (Fig.3.4-d'e'f')の方が、連続降雨下(Fig.3.4-b'c')よりも採水強度のばらつきが小さいことが明らかとなった. さらに、最も精度良く採水が行われたのは $q_i = 20 \text{ min h}^{-1}$ の短期降雨後であった(Fig.3.4-d').

3. 4 まとめ

砂質土壌において、下方浸透水を効率良く採水するために開発した SCFS の採水性能を、砂丘砂を充填した土壌カラムを用いて様々な降雨条件下で評価した. SCFS は連続降雨による定常状態下だけでなく、短期降雨後の非定常状態下でも WCE が 94 ~ 121% の高い採水効率で下方浸透水を採取可能であることが明らかとなった. 特に、実際の圃場における降雨条件に近い短期降雨後で採水強度のばらつきが小さく、砂質土壌のために改良を加えた AVS によるフィルター周辺のサクシジョン制御が適切に行われていることが確認できた.

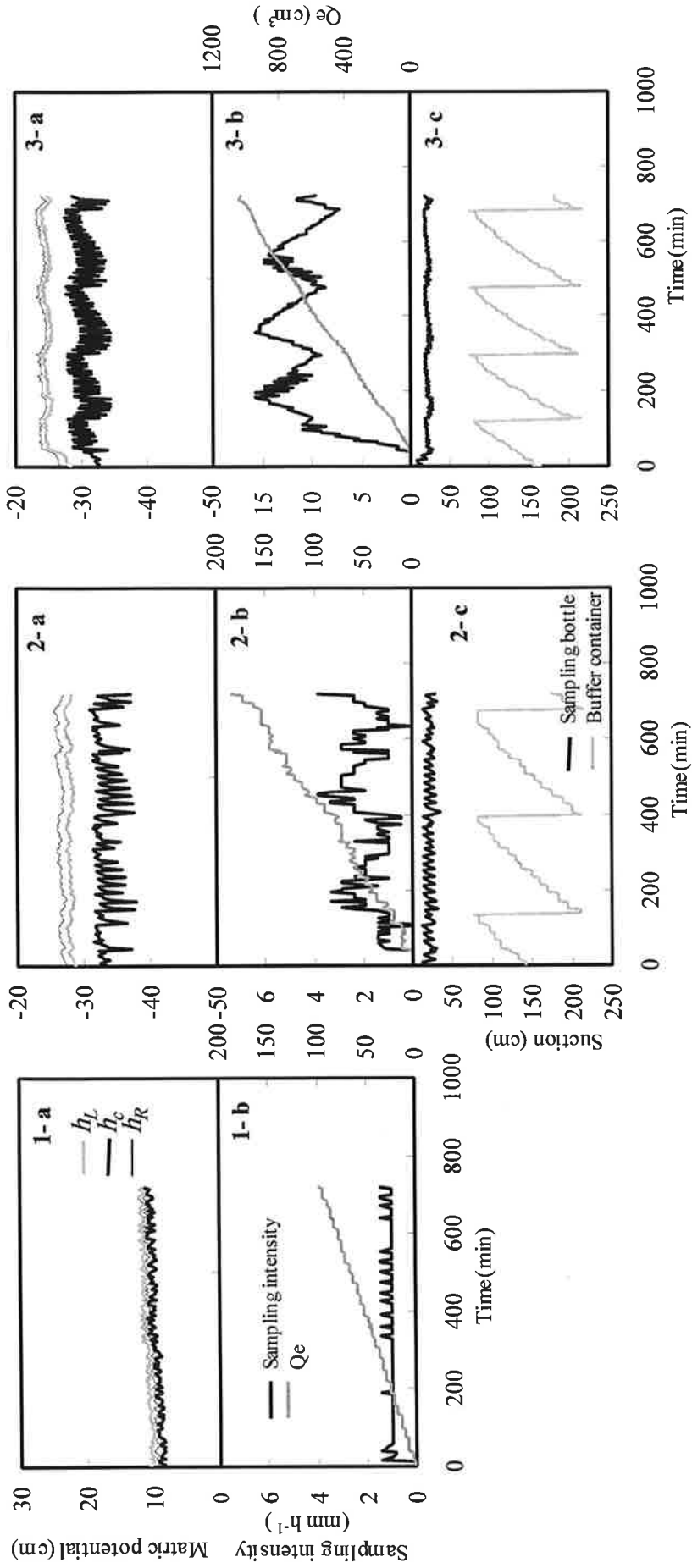


Fig. 3.2 Infiltration water sampling by SCFS under continuous rainfall.

- a: Matric potential for suction control.
- b: Sampling intensity and cumulative amount of sampling water(Q_e).
- c: Suction in the sampling bottle and the buffer container.

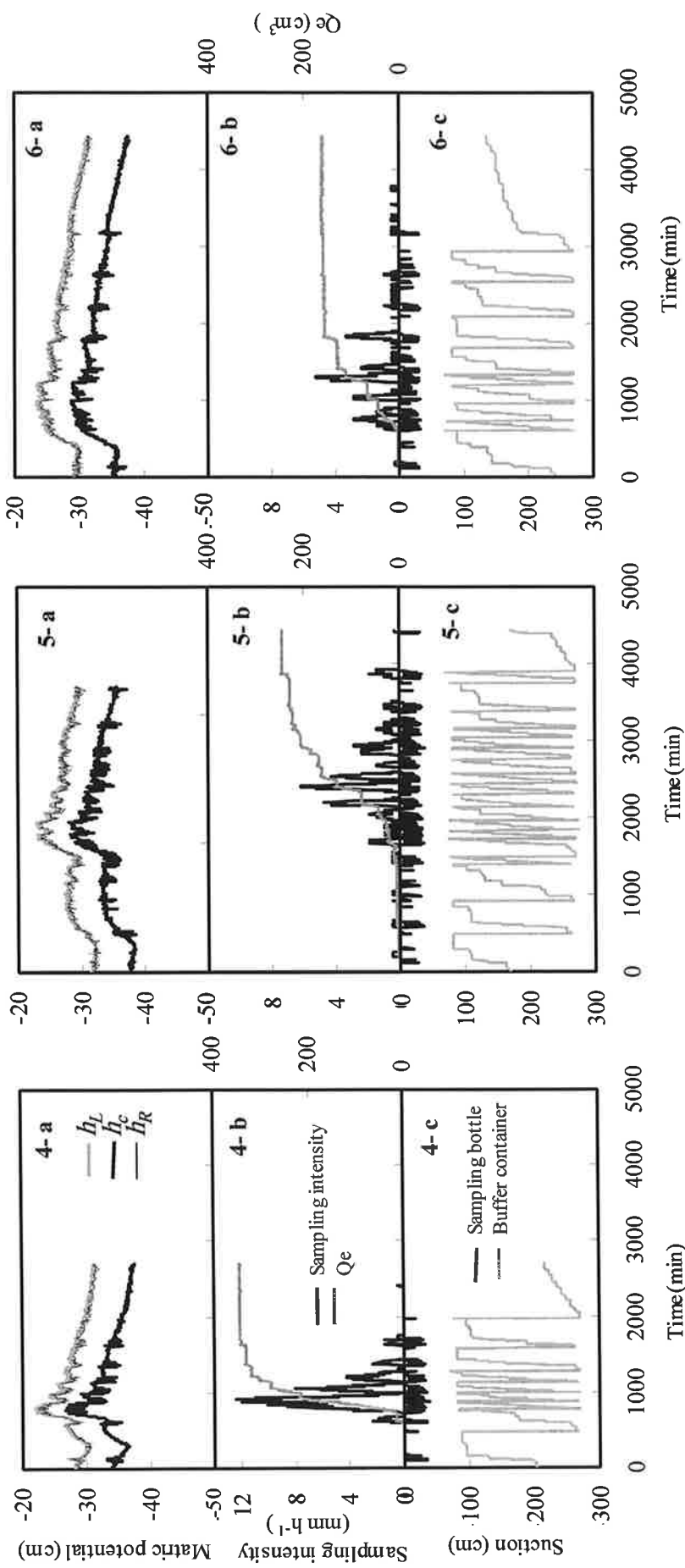


Fig. 3.3 Infiltration water sampling by SCFS under short-term rainfall.

- a: Matric potential for suction control.
- b: Sampling intensity and cumulative amount of sampling water(Q_e).
- c: Suction in the sampling bottle and the buffer container.

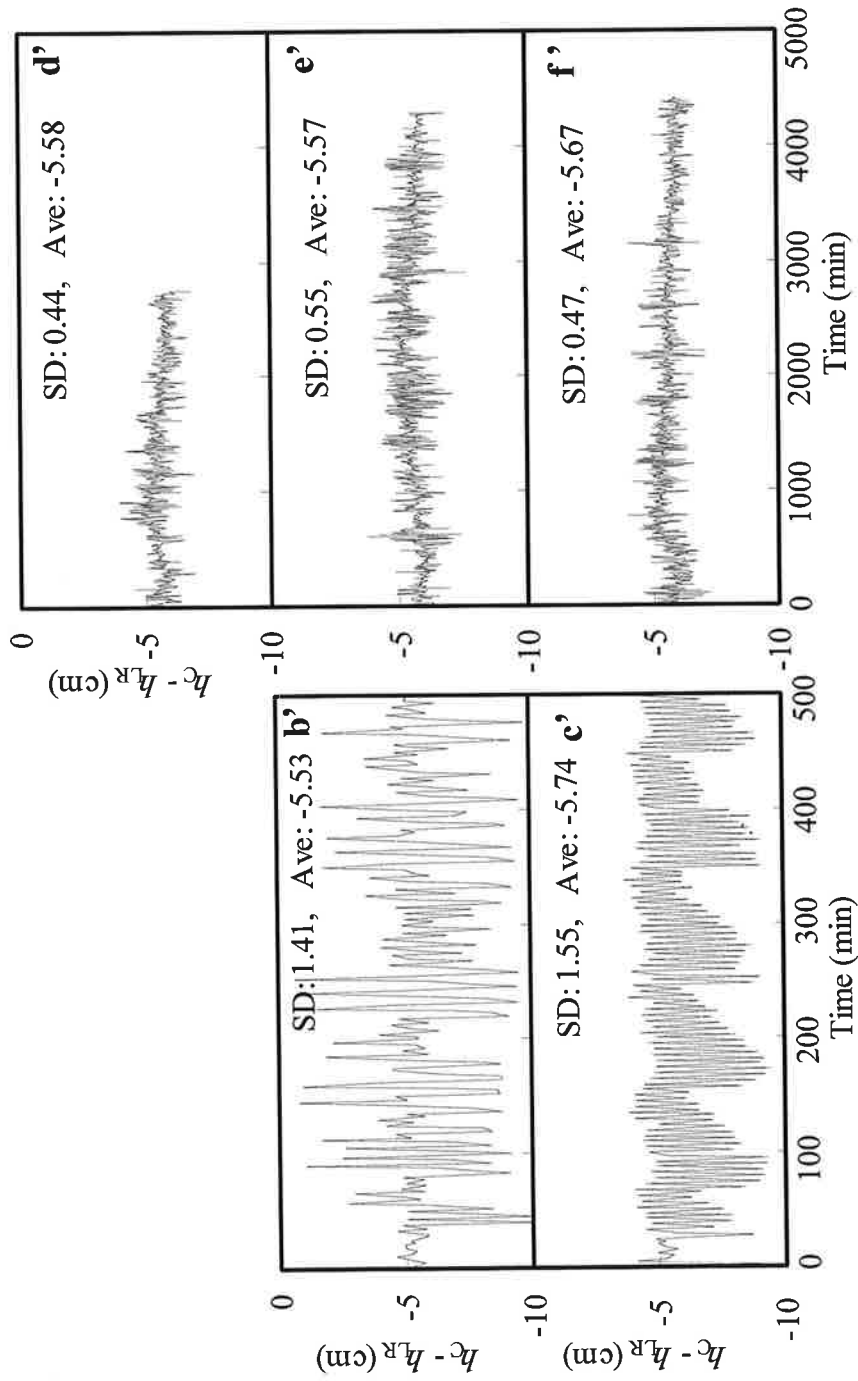


Fig. 3.4 Changes in the criteria for suction control ($h_c - h_{LR}$).
 (b')Run-2 (c')Run-3 (d')Run-4 (e')Run-5 (f')Run-6 in the soil column experiment.

第IV章

ラッキョウ栽培下の 砂丘砂圃場における下方浸透水モニタリング

4. 1 はじめに

土壌中の窒素源に水が加われば、硝酸態窒素の溶脱の可能性があり(Jury et al. 1999), 陰イオンで土壌に吸着されにくい硝酸態窒素は地下水にまで容易に達する。硝酸態窒素による地下水汚染は、我々の生活と密接な関係にある生活排水や農業の生産活動に起因する化学肥料および家畜廃棄物などが汚染源と考えられており、汚染源が広範囲にわたると共に、汚染源そのものを特定することが極めて困難である(小川 2000)。また、硝酸態窒素の溶脱には施肥履歴や土壌の種類、気候などが影響(Maeda et al. 2003 ; Sano et al. 2004)することが知られている。Babiker et al.(2004)は、特に日本の野菜栽培畑における地下水中の硝酸態窒素濃度が、水田や市街地と比較して明らかに高くなっていることを報告した。硝酸態窒素による地下水の汚染は砂質土壌の地域で主要な問題となっており(Sparks 2003), 透水性が高く、肥料の溶脱リスクも高い砂質土壌では厳格な水管理と施肥管理が求められ、特に根群域下に流出する浸透水の管理が必要となっている。また、砂丘農地の土壌溶液および地下水質調査において硝酸態窒素濃度の上昇が認められることは、多くの研究者によって既に報告が為されている(例えば、本名 2004 ; 農業研究センター 1999)。

本章では、ラッキョウ栽培下の砂丘砂圃場で SCFS による下方浸透水量の正確な測定を行い、さらに SCFS で採取した浸透水の水質についても考察した。砂質圃場における根群域下への肥料成分溶脱を把握し、適切な灌漑・施肥管理の提案を行うことを目的とした。各種センサー技術で溶質移動を捉え、SCFS で浸透水中の溶存物質の特定を行うような、不飽和砂質土壌中の下方浸透水モニタリングシステムの構築を目指した。

4. 2 実験方法

4. 2. 1 実験圃場の概要

鳥取大学乾燥地研究センター内(35°32'N, 134°13'E)の圃場にて実験を行った。実験圃場の土壌は、前述の室内実験で使用した土壌と同じ鳥取砂丘砂(第Ⅱ章 2.3.1)であり、深度 60 cm までの乾燥密度は $1.49 \sim 1.56 \text{ Mg m}^{-3}$ 、圃場容水量は $0.074 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ である(Dehghanisanij et al. 2004)。実験区は $200 \text{ cm} \times 200 \text{ cm}$ とし、実験区の概観は写真(Fig.4.1)で示す。

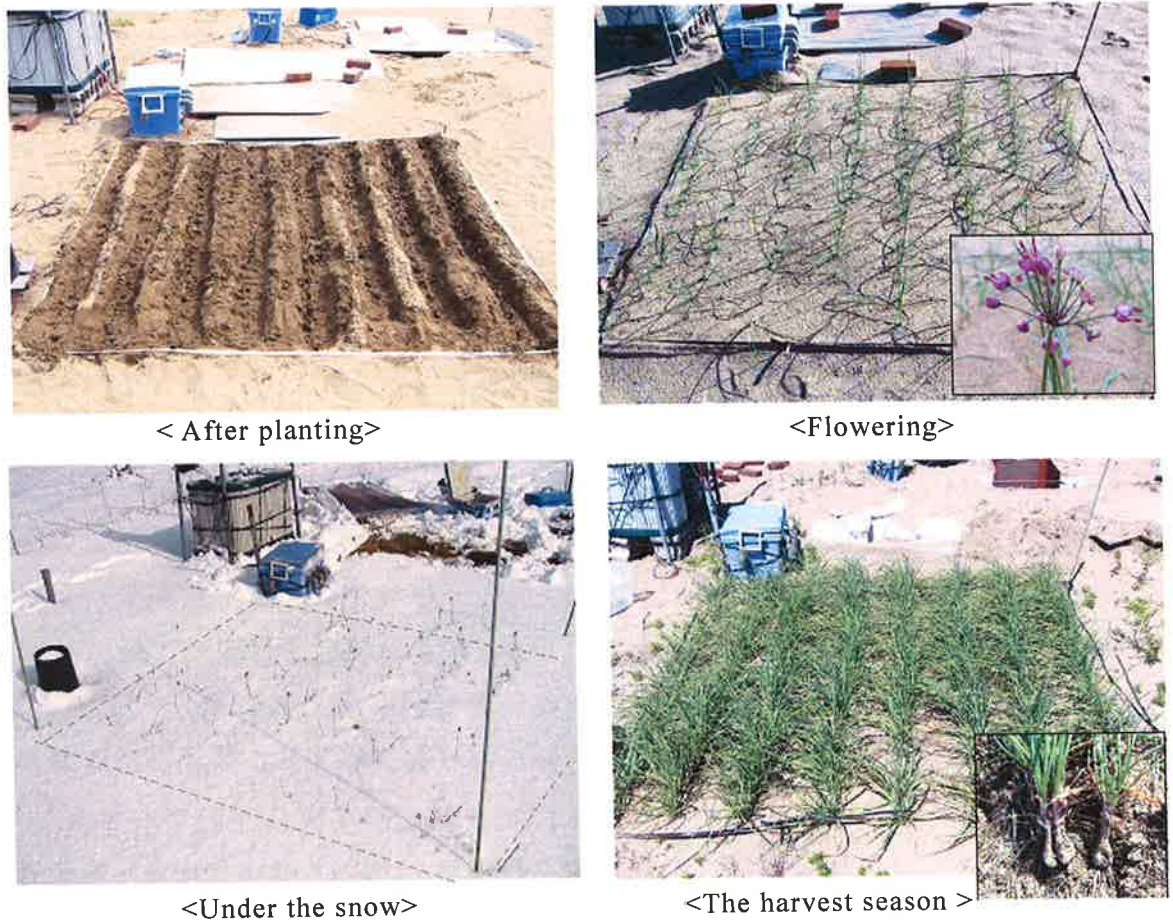


Fig. 4.1 Photos of the experimental plot.

4. 2. 2 測定機器の設置

圃場においても、砂質土壌における下方浸透水の採取のために開発した SCFS(詳述は第Ⅱ章)を使用した。2004年6月15日に観測ピット(70×80×120 cm; Fig.4.2)を、6月21日に採水フィルター部(SFD)および TDR センサー4本、テンシオメータ4本を埋設した。第Ⅲ章に記した室内カラム実験と同様、SFDはフィルターが50 cm 深になるように、吸引判定用のテンシオメータ3本は47.5 cm 深となるよう設置した。埋設した機器の配置は Fig.4.3 のとおりである。埋設作業に伴う土壌の攪乱は最小限となるように注意し、栽培実験の開始は埋設日から約2ヶ月後とした。フィルター直上には吸引判定用テンシオメータ(h_c)に影響のない程度(約1 cm)に洗浄砂を入れ、フィルターの目詰まりを防止した。採取した浸透水の電気伝導度(EC)をモニターするため、自作の4極塩分センサーを途中に挿入した採水チューブを観測ピット内に引き入れ、SFDのフィルターより5 cm 下で滴下するよう採水容器、電子天秤を観測ピット内に設置した(Fig.4.2, 4.3)。深度別の TDR センサーおよびテンシオメータ、電子天秤の測定は1時間毎に行い、センサー類の測定・記録装置および AVS は地表に設置した。

4. 2. 3 採水効率の算出

SCFSの圃場における長期採水性能について、灌漑や降雨条件の異なる期間(Run)を選出して採水効率(WCE)を算出することで評価した。WCEの算出は室内実験における採水性能評価(第Ⅲ章 3.2.2)と同様、フラックスを比較する(1)式を用いた。国土交通省鳥取河川国道事務所の雨量データ(<http://www.tottori-mlit.go.jp>)を降雨強度 q_i (mm h^{-1})として使用するとともに、Runごとの降雨フラックス q_r (cm h^{-1})算出時にも用いた。圃場において根群域下に流出した実際の排水量を測定することは困難で算出するあつたため、水収支に関する(2)式は使用せず、深度別に埋設した TDR センサーの測定値から算出する深度0~50 cmの水分貯留量変化 q_s (cm h^{-1})のみ考慮した。また、Kimura et al.(2004)は鳥取砂丘砂の晴天時の土壌面蒸発量は1 mm 以下であることを報告しており、本実験における WCE の算出は灌漑や降雨時のものであることから蒸発量については無視できると判断した。



<Outline>



<Inside, sampling bottle and balance>

Fig. 4.2 Photos of the observation pit.

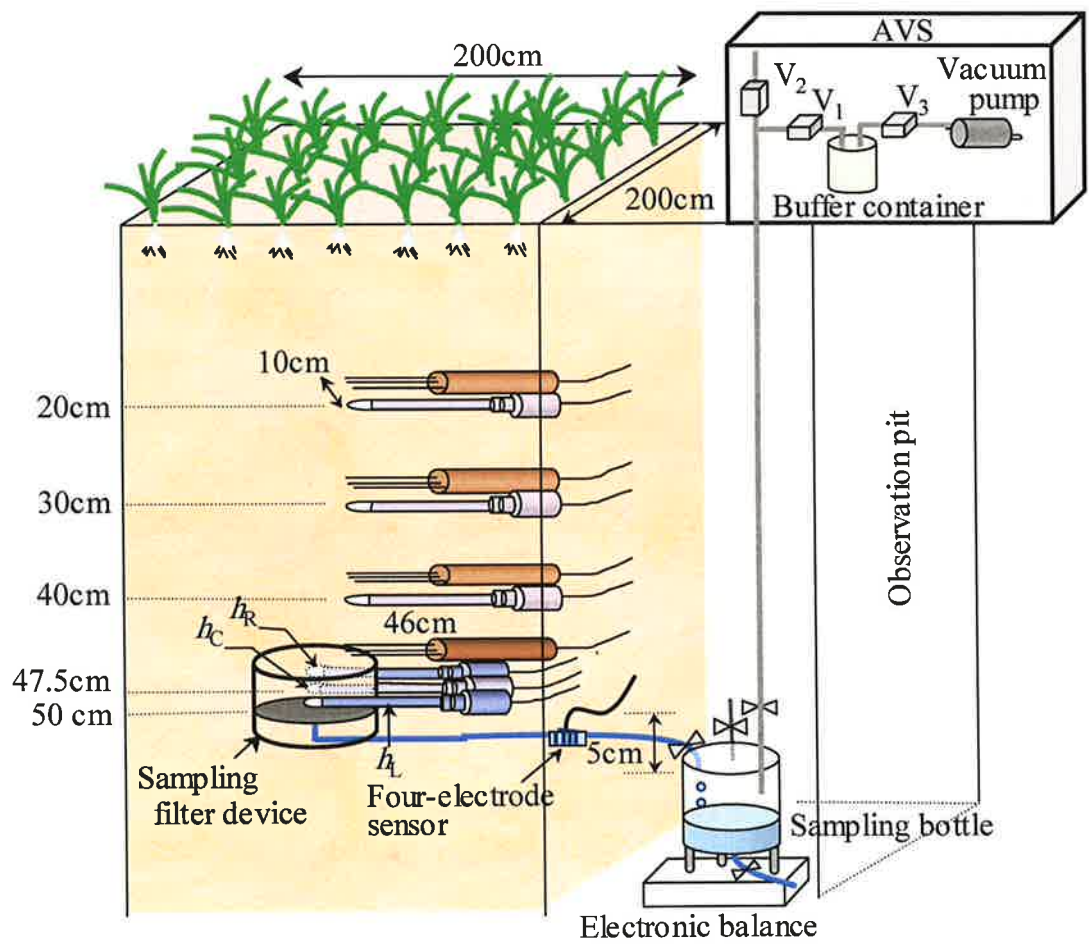


Fig. 4.3 Schematic representation of the filed experimental design.

4. 2. 4 定植・灌漑および施肥条件

実験区におけるラッキョウの栽培方法は、鳥取県福部村ラッキョウ指導者協議会編集の平成 17 年産砂丘ラッキョウ栽培基準(栽培暦)を参考にした。2004 年 8 月 18 日に 5 種類の基肥を混入し、8 月 22 日にラッキョウ 160 株(10 a 当たり 400~500 kg)を定植した。追肥は定植から 10, 30, 50, 70, 90 日後,さらに 215 日後(収穫 2 ヶ月前)の計 6 回行った。基肥および追肥として施された各肥料の成分量は Table4.1 のとおりであり、主要成分量は実験区(4 m²)あたりおよそ窒素 0.9 kg, 燐 1.8 kg, 加里 1.3 kg である。定植後から 1 ヶ月半は 12 mm(降雨量分を差し引く)を 2 日に一度ジョロで灌水した。灌水時には、気象省気象観測電子閲覧室の雨量データ(<http://www.data.kishou.go.jp/>)を参考にした。ラッキョウの収穫は 2005 年 5 月 25 日に行い、収穫量は 780 株であった。

4. 2. 5 データおよび浸透水の回収と水質分析

SCFS の採水容器内に溜まった浸透水の水量は電子天秤を観測ピット内で不定期に回収した。浸透水の回収作業では、4 つのコックの開閉(Fig.4.3)が必要であり、この際に採水容器内が大気圧となる。浸透水のサンプルを回収後、pH をハンディ pH メーター(twin-pH ; HORIBA), EC を EC メーター(3551-10D ; HORIBA), 硝酸イオン(NO₃⁻)濃度をコンパクトイオンメーター(CARDY, C-141 ; HORIBA)によって現場で簡易測定した。回収した浸透水の水質の概要を把握した上で、さらに実験室内においてイオンクロマトグラフィー(PIA-1000 ; Shimadzu)を利用して各種陰イオン濃度を測定した。

Table 4.1 Components of basal and top-dressed fertilizers.

Applied time	Fertilizer	Frequency of application (time)	Amount (kg/10a)	Major Components	Ratio (w%)
Basal	Compost	1	1000	Organic matter	30
Basal	Magnesium-Lime	1	80	Alkalinity	55
				Soluble magnesium	16
Basal	Fused magnesium phosphate	1	40	Soluble phosphate	35
				Soluble magnesium	4.5
Basal	Minerals	1	40	Alkalinity	40
				Citric acid-soluble magnesium	2
				Lime	35-38
				Silicic acid	17-20
				Iron	13-18
				Manganese	2-4
				Phosphate	1.2-2
				Potassium	0.1-0.5
				Boron/Molybdenum	Small amount
Basal Top-4	Blended fertilizer	1	80	Nitrogen	10
				Phosphate	8
				Potassium	10
Top-1,2,3,6*	Blended fertilizer	4	90	Ammonium nitrogen	13
				Soluble phosphate	16
				Water-soluble potassium	16
Top-3,6	Compound fertilizer	2	40	Phosphate	20
				Potassium	20
				Soluble magnesium	4
Top-5,6	Magnesium sulfate	1	20	Soluble magnesium	25

*Topdressing, Top-1 to 6 was denoted 10, 30, 50, 70, 90, 215 days after the planting.

4. 2. 6 観測井の設置と土壌抽出液・地下水の水質分析

実験区は過去三年間、作物の栽培履歴がない圃場内に設けた。ラッキョウ栽培前および収穫後に実験区内の三ヶ所・二深度(20, 50 cm 深)から土壌サンプルを採取し、1:5 法(中野ら 1999)により抽出した土壌溶液の水質分析を行った。上述 4. 2. 5 と同様の方法により pH, EC, NO₃⁻濃度を測定した(Table4.2)。

また、SCFS で採水した下方浸透水の水質と、降雨の影響が日単位で現れる地下水の水質とを比較するため、実験区のそばに深さ 6.5 m の観測井を設置した。井戸の内径は 5 cm で、下端に 70 cm 幅のスクリーンをつけた(Fig.4.4)。観測井の掘削は集塵機を用いた簡易ボーリング法(河合ら 2005 ; Fig.4.4)で行い、表層から基盤(650 cm 深)までは砂質土壌が続いた。掘削中 50 cm ごとに土壌サンプルを採取し、実験区内の土壌サンプルと同様に土壌溶液の抽出・分析を行った(Table4.2)。観測井からの地下水の採取は、多量の降雨記録後で且つ 50 mL 以上採取可能だった場合のみ不定期に行い、その水質分析(4.2.5 と同様)を行った。

Table 4.2 Properties of extracted solution from sandy soil samples (average values are shown) at different depths. Before and after cultivation.

Soil sampling depth	pH		EC _{1:5} (dS m ⁻¹)		NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	
	Before	After	Before	After	Before	After
Experimental plot:						
20 cm depth	6.3	6.1	0.226	0.042	9.3	9.3
Experimental plot:						
50 cm depth	6.5	6.4	0.235	0.013	9.7	10.7
Well:						
0 to 650 cm depth, Ave.	6.9	---	0.059	---	9.8	---



<A working scene>



<A part of the well screen>

Fig. 4.4 Photos of the observation well.

4. 2. 7 センサー類の校正および配線

SCFSによって採取した下方浸透水は採水チューブを通して観測ピット内の採水容器に集められる。その採取チューブの途中には、0.1 cm 径のステンレスロッド4本をアクリルパイプ(外径 1.4 cm×長さ 6.5 cm)に挿入して作製した4極塩分センサーを取り付けた。この4極塩分センサーは Wenner-array と呼ばれる配列(Mori et al. 2003)で、溶液濃度および EC 値が既知の NaCl 溶液を用いて校正し(井上・塩沢 1994)、センサー定数を得た。

実験圃場において、深度 50 cm までの土壌水分貯留量の変化を算出し、また下方浸透水の到達をモニターするため、深度別に TDR センサーおよびテンシオメータを Fig.4.3 のように埋設した。各センサーの校正は次のように行った。

TDR センサー(SK-TDR 1006-18T;サンケイ理化)は直径 1.8 cm のパイプに長さ 6 cm のロッド 3 本が平行に並んだものを使用した。TDR センサーにより深度 20, 30, 40, 46 cm における土壌中の体積含水率(θ), 見かけの電気伝導度(EC_b) および温度(T)を測定した。その測定値と Rhoades et al.(1976)の(3)式を用いて土壌溶液中の電気伝導度(EC_w)を算出した。

$$EC_b = (a\theta^2 + b\theta) EC_w + EC_s \quad \dots \dots \dots (3)$$

二つの定数(a, b)は, EC_w が既知の試料を用いて θ に対する EC_b を測定する校正実験(Inoue et al. 2000)の結果から算出した。また, EC_s は土粒子表面の電気伝導度であり, 本実験で使用した鳥取砂丘砂の場合はこの値をゼロ(Mori et al. 2003)として取り扱った。TDR センサーの測定原理および測定方法については登尾(2003), Dehghanisanij et al. (2004)に, EC_w の算出については Amente et al.(2000)に詳述されており, それらを参考にした。

テンシオメータ(UNUC;サンケイ理化)は圧力変換器一体型(井上 1994)で, 予め脱気し, センサーごとに校正曲線を得ている。校正実験は脱気水で満たしたセンサー固定タンクと水位調整タンクを用いて吸引圧水頭 0~80 cm の範囲で行った。TDR センサー(熱電対を含む)はマルチプレクサー(SDMX; Campbell Scientific)および TDR100(Campbell Scientific)を, テンシオメータはリレー式電源ボックス(サンケイ理化)を介して 1 台のデータロガー(CR10X; Campbell Scientific)に接続した。土壌中に埋設したセンサーを除いた部分は全てクーラーボックス内に収納して地表に設置し, 計測時間間隔は 1 時間とした。

なお, 各種センサーの計測に用いたデータロガープログラムおよび配線図は付録に示した。

4. 3 結果および考察

4. 3. 1 圃場における SCFS の採水効率

圃場における SCFS の採水性能評価は, 灌漑あるいは降雨のある時期のみを選出して行った。本章では, 基肥混入日からの 50 日間(2004 年 8 月 18 日~10 月 7 日)について注視し, Fig.4.5 に採水状況を示した。Fig.4.5-a は降雨・灌漑量($mm\ h^{-1}$), Fig.4.5-b は深度別のマトリックポテンシャル(cm), Fig.4.5-c は吸引判定に用いた 47.5 cm 深のマトリックポテンシャル(cm), Fig.4.5-d は SCFS による採水強度($mm\ h^{-1}$)を示している。

Table 4.3 Water-collecting efficiency of SCFS.

Run	1	1'	2	2'	3	3'
Run period (h)	47	18	58	71	22	40
q_r (cm h ⁻¹)	0.031	0.153	0.096	0.196	0.171	0.090
Q_e (cm ³)	217.4	71.2	761.1	1083.5	389.9	352.4
q_e (cm h ⁻¹)	0.059	0.050	0.176	0.194	0.226	0.158
q_s (cm h ⁻¹)	-0.028	0.108	-0.057	-0.016	-0.055	-0.054
WCE (%)	100.7	113.4	114.7	91.7	100.4	109.6

50 日間における降雨・灌漑は、降雨強度や先行降雨・灌漑の有無などから (1) 先行降雨後の降雨あるいは灌漑、(2) 灌漑後に降雨、(3) 集中豪雨、(4) 先行降雨のない状態からの降雨あるいは灌漑で浸透水の発生無し、以上の 4 つのグループに分けた。続いて(1)~(3)の各グループから 2 回ずつ、計 6 つの条件(Fig.4.5-a)を選んで WCE を算出し、92~115%という高い WCE を得た(Table4.3)。

WCE が最も 100%に近かったのは(1)と(2)に分類されるような降雨条件の時であった。つまり先行降雨に続いて灌漑があった場合(Run-1)と先行降雨後に降雨のあった場合(Run-1')であり、それぞれ WCE は 100.7%、113.4%と高かった。同様に、灌漑後に連続降雨が記録された場合(Run-3, Run-3')も WCE が 100.4%あるいは 109.6%と高い結果となった。いずれの場合も先行降雨や灌漑によって土壌水分量が高くなっている時に WCE が良い結果であった。粗砂では降雨の後、表層の水分量がある一定値以上の時だけに活発な下方浸透を生じることが、不飽和透水係数との関係からも明らかにされており(田中 2001)、先行の降雨あるいは灌漑によって土壌中の毛管間隙が水理学的に連続している場合に、SCFS は最も効率よく浸透水を採取可能であったといえる。一方、台風により降雨強度(q_i)が 20 mm h⁻¹以上となった Run-2 では、WCE が 100%を超え、最も採水が過剰であった。しかし同様に $q_i > 20$ mm h⁻¹となった Run-2'では、Run-2 に反して WCE が 100%以下となった。Run-2'のように WCE が 100%未滿となるのは降雨強度が 20 mm h⁻¹以上の時のみであり、SCFS の最高採水強度が 12 mm h⁻¹であること(Fig.4.5-d)から、浸透速度に採水が追いついていない可能性がある。

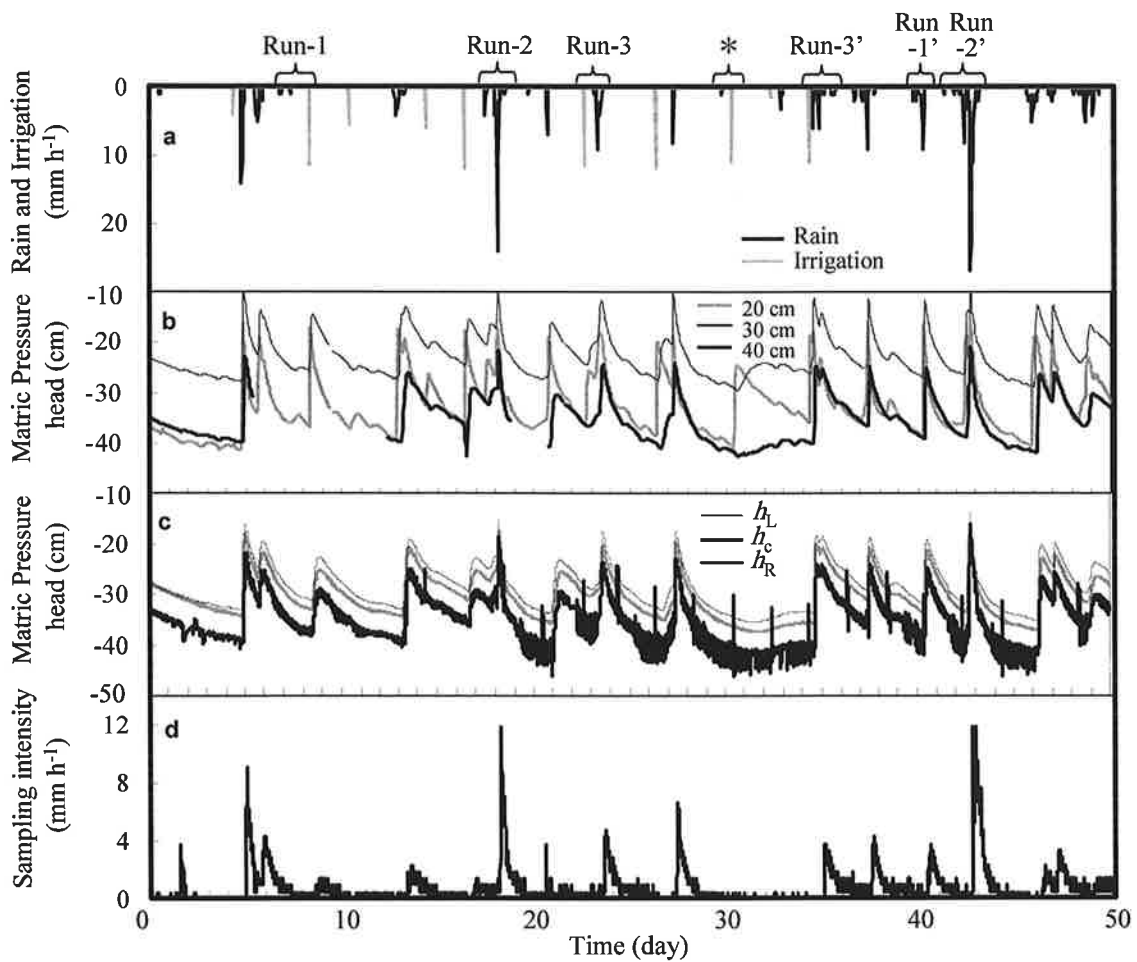


Fig. 4.5 Properties of infiltration water sampled by SCFS during a 50-day period (Aug.18th 2004 ~ Oct. 7th 2004).

a: Rainfall and irrigation amount.

b: Matric pressure head at each depth.

c: Matric pressure head at 47.5 cm depth for suction control (h_L , h_R :out of the filter, h_C :above the filter).

d: Sampling intensity of SCFS.

降雨の無い日が続き、栽培暦にしたがって灌漑を行った場合(Fig.4.5-a-*)、40 cm 深のマトリックポテンシャルの値は上昇せず(Fig.4.5-b)、吸引判定用のテンシオメータでも浸透水の到達を記録していないため(Fig.4.5-c)、SCFS は採水を行っていない(Fig.4.5-d)。しかし、灌漑直後に降雨があれば、SCFS は採水を行っている。本実験区においては 30 cm 深のマトリックポテンシャルが -20 cm 以上になった場合のみ、根群域下への下方浸透が発生していた。つまり、栽培暦に準じて灌漑を行うのみであれば、根群域下への浸透は抑制されることが明らかとなった。

SCFS は $0.48\sim 0.96\text{ mm h}^{-1}$ の低い採水強度(Fig.4.5-d)で降雨・灌漑の無い時期にも採水を行っていることがしばしば確認され、毛管水まで集めてしまうために採水過剰となる場合が多かった。SCFS が過剰に浸透水を採取してしまう理由の一つは吸引判定用テンシオメータの測定精度、特にフィルター直上の h_c の変動(Fig.4.5-c)にある。降雨強度が低く、土壌水分量も低い場合に h_c の変動幅は大きくなった。フィルターにサクションがかかった際に h_c が最も影響を受けるため吸引判定にエラーが生じるのであるが、SCFS のようにサクションをかける採水装置を使用する以上は避けられない問題といえる。また採水過剰となるもう一つの理由は、SCFS によって採取した下方浸透水を水質分析のために回収する際、採水容器内が大気圧となり、それが一時的ではあるがフィルターサクションおよび h_c の値に影響したためと考えられた。この問題が発生しているのは Fig.4.5-c で h_c のみが急上昇している時である。SCFS の採水効率を上げるために改良すべき課題である。

適用した土壌の種類や採水効率の算出方法は異なるが、既往の研究においても様々な採水装置の性能評価が為されている。Siemens and Kaupenjohann(2004)は細砂土において三種類のサンプラーの採水性能を比較し、サクシヨンプレートサンプラーについては灌漑強度の高い場合に 115%、低い場合に 107%の採水効率であったと考察している。さらに、小杉(2000)は森林土壌における採水率が 63%、Lentz and Kincaid(2003)は Portneuf シルトローム土において 144%という値を報告している。これらの結果と同等あるいはそれ以上に、SCFS の採水効率は高かった。微妙なサクション制御が要求される砂質土壌における採水であったことも考慮に入れると、根群域下に浸透が発生した際に SCFS は非常に効率のよい採水を行ったと言える。本実験では、作物栽培下の農地における下方浸透水の採水状況を詳細に考察し、栽培暦どおりの灌漑が行われていれば、

肥料の溶脱量も制御されることが示唆された。しかし今後は、さらに肥料溶脱を防止するため、先行降雨量のみでなく、予測される降雨量も考慮に入れて灌漑水量を決定する必要がある。

4. 3. 2 センサーで捉える土壌中の溶質移動

溶質移動現象を把握するために土壌溶液中の溶質濃度を測定することは容易ではなかった。しかし、TDR法を用いることで、これまで困難であった不飽和土壌中においても水分と溶質含量の両方をほぼ同時に、しかも単一プローブで測定可能となり、土壌中における水分や溶質の挙動を把握することが可能となった(登尾ら 2005)。本実験圃場にも深度別に4本のTDRセンサーを埋設し、土壌水分量(θ ; Fig.4.6-b)および電気伝導度(EC_b ; Fig.4.6-c)を測定した。採水効率の算出時と同様に基肥混入日からの50日間(2004年8月18日~10月7日)について、それぞれの経時変化を示した。また、深度別に θ (Fig.4.6-b)のデータと(3)式から土壌溶液中の電気伝導度(EC_w)も算出し、40および46cm深の結果をFig.4.6-dに示した。 EC_b の変化(Fig.4.6-c)は、SCFSで採取後にECメーターにより測定した下方浸透水中の電気伝導度($EC_{iw-bottle}$; Fig.4.6-d)と同様の傾向にあり、本実験圃場における溶質移動、あるいは肥料溶脱傾向は EC_b の変化から推測可能であった。 EC_b は水分量に左右されるため、溶質移動の指標とされるべきは EC_w (Fig.4.6-d)の変化であるが、 θ の測定精度の影響(Mori et al. 2003)を大きく受けたため、Fig.4.6-dから肥料溶脱傾向を把握することは困難であった。本来ならば EC_w と $EC_{iw-bottle}$ が同様の傾向を示すはずであるが、本実験結果では EC_w の変動が非常に大きく、比較が不可能であった。したがって、溶質移動モニタリングのためには EC_w より EC_b を指標とする方が良い場合もあることが示された。センサーは溶質移動傾向の把握に適した技術であるが、土壌環境の詳細なモニタリングのためには、センサー技術のみよりも、浸透水を直接採水する技術と併用し、浸透水の更なる分析を行う方が良い(Siemens and Kaupenjohann 2004)。

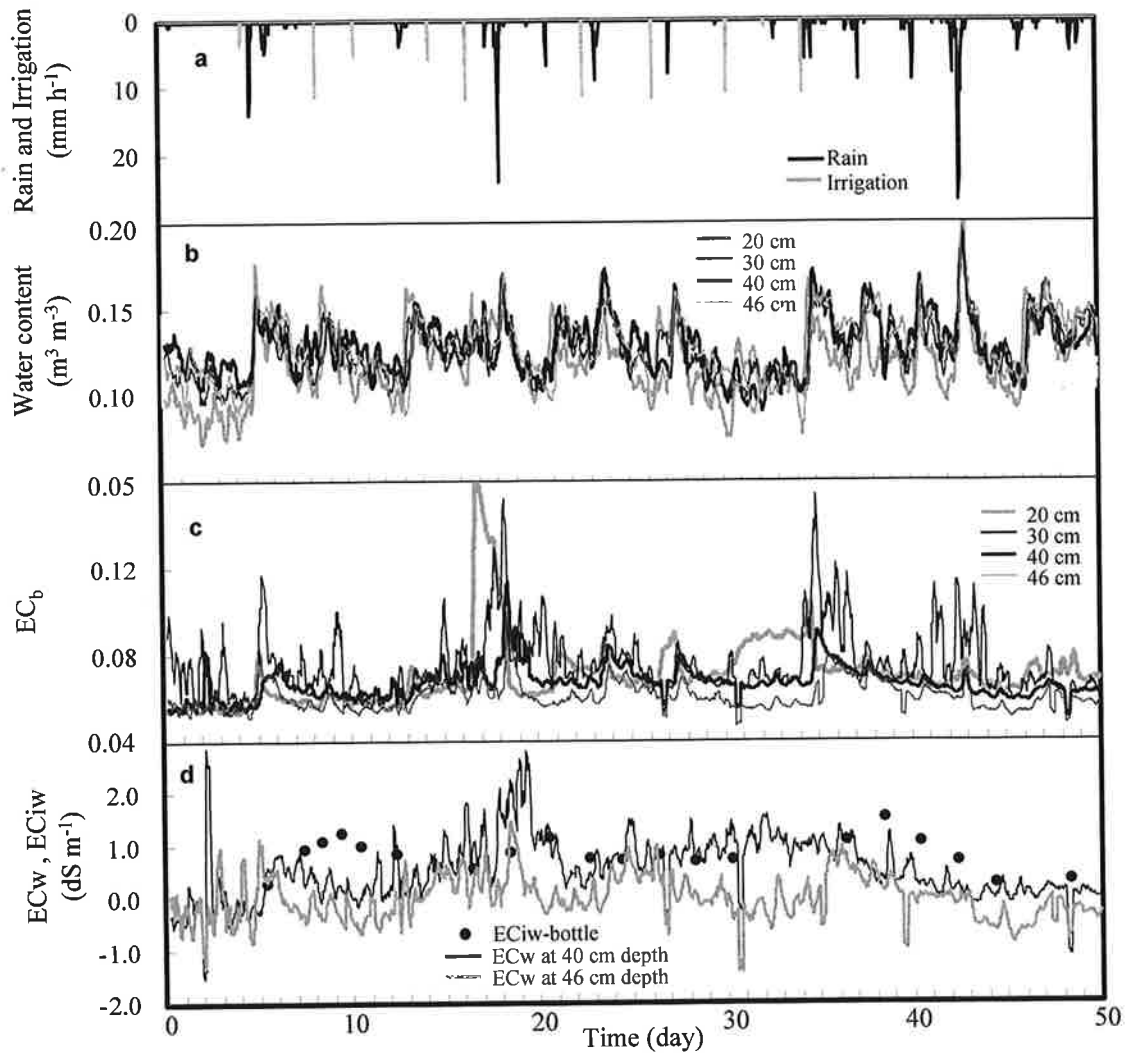


Fig. 4.6 Variations in water content and electrical conductivity measured by TDR sensors during a 50-day period (Aug.18th 2004 ~ Oct. 7th 2004).

a: Rainfall and irrigation amount.

b: Water content at each depth.

c: EC of bulk soil (EC_b) at each depth.

d: EC in soil solution (EC_w) and infiltration water ($EC_{iw-bottle}$).

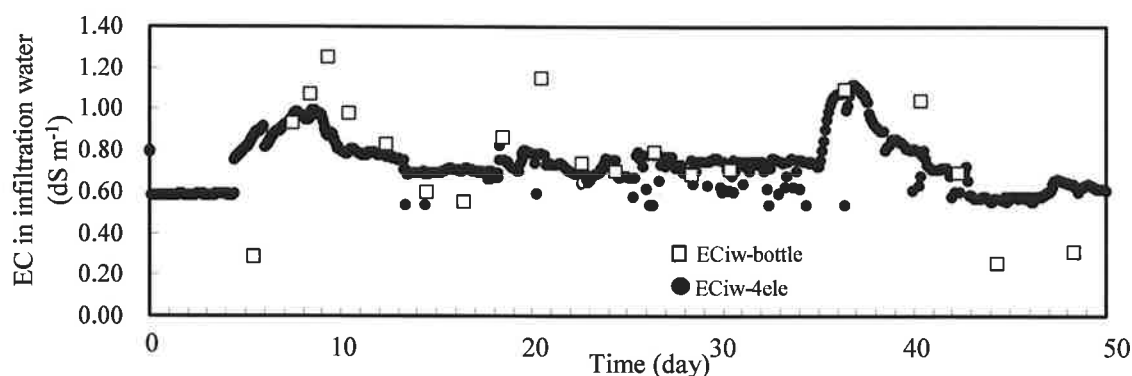


Fig. 4.7 Variation in the EC of infiltration water measured with the four-electrode sensor in the sampling tube ($EC_{iw-4ele}$) and with the EC meter in the sampling bottle ($EC_{iw-bottle}$).

Fig.4.7 に $EC_{iw-bottle}$ と SCFS の採水チューブ内に挿入した 4 極塩分センサーでモニターした下方浸透水中の電気伝導度($EC_{iw-4ele}$)を示した。採水容器から回収して測定した $EC_{iw-bottle}$ とセンサーで自動記録される $EC_{iw-4ele}$ は、その変動傾向がよく一致しており、採水チューブでのセンサーによるモニタリングの有用性を示している。しかし、Fig.4.7 には示されていないが、4 極塩分センサーはしばしば極端に低い値を記録し、測定エラーとなることもあった。これは採水チューブ内に空気が侵入したためであるが、チューブの端に電磁弁を追加してそれを防ぐことで、 $EC_{iw-4ele}$ の測定精度を高めることが可能と考えられる。

4. 3. 3 下方浸透水と地下水における硝酸態窒素濃度の違い

Table4.4 では、SCFS で採取した下方浸透水および観測井から採取した地下水中の硝酸態窒素濃度を、地下水が採取可能となった 6 日間について比較した。施肥の影響が強い 10 月および 11 月には下方浸透水中の硝酸態窒素濃度の方が地下水中のそれよりも高い。一方、施肥が無く、融雪のあった 3 月には両方の水中で同程度の硝酸態窒素が検出されている。さらに収穫前の最後の追肥によって、4 月・5 月に再び下方浸透水中の硝酸態窒素濃度の上昇が認められた。下方浸透水の水質分析を行った結果(Fig.4.8-b)にも、施肥から硝酸態窒素の溶脱が起こるまでに時間がかかることが示されている。

Table 4.4 NO₃⁻ concentration and EC in groundwater (EC_{gw}) and infiltration water (EC_{iw-bottle}).

Date (days*)	Groundwater		Infiltration water	
	NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	EC _{gw} (dS m ⁻¹)	NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	EC _{iw-bottle} (dS m ⁻¹)
30 th Oct. (74)	25	0.111	43	0.291
7 th Nov. (82)	15	0.121	95	0.793
16 th Mar. (202)	12	0.117	10	0.069
26 th Mar. (212)	16	0.124	11	0.077
1 st Apr. (218)	18	0.134	12	0.736
21 st May (269)	14	0.110	19	0.740

*The numbers in the parentheses after the date denote the days after basal fertilizer application.

地下水涵養量が多いときに硝酸態窒素の溶脱も促進されることや、その濃度の希釈が起こることが報告されており(小川 2000)、本実験からも同様の結果が得られた。また、施肥・灌漑のない時期の EC の変化も、地下水(EC_{gw})より下方浸透水(EC_{iw-bottle})で明確に表れている(Table4.4)。

4. 3. 4 肥料成分の溶脱傾向

基肥混入日からの 50 日間(2004 年 8 月 18 日～10 月 7 日)について、イオンクロマトグラフを用いて分析した下方浸透水中の陰イオン濃度の経時変化を Fig.4.8 に示した。比較のために、EC_{iw-bottle} のデータも併記した。各種陰イオン濃度を合算した値と変動傾向がよく一致する EC_{iw-bottle} は、基肥施用から 5 日後のまとまった降雨(Fig.4.8-a)直後にすばやく上昇した。EC_{iw-bottle} は 20 日後にも再び上昇しており(Fig.4.8-b)、これは 1 回目の追肥および、ラッキョウの発芽後に来襲した台風による降雨の影響と考えられた。

Table4.2 で示していたように、基肥施用前の土壌抽出液中の硝酸態窒素濃度は 10 mg L⁻¹ 以下であったが、基肥や追肥後に SCFS で採取した下方浸透水中では、最高 297 mg L⁻¹ に達するほどにその濃度が上昇した(Fig.4.8-b)。硝酸態窒素濃度の上昇は、ラッキョウ栽培期間中、施肥を行うたびに観察された。硝酸イオン濃度と電気伝導度(EC)との間には相関があることが知られており、しばしば EC データから硝酸態窒素濃度を算出することも行われている(Nissen et al. 1998 ; 登尾ら 2005)。しかし、本実験結果(Fig.4.8-b)において、EC_{iw-bottle} と硝酸態窒素濃度のピークは異なっており、これは EC_{iw-bottle} が他の陰イオン(SO₄²⁻や Cl⁻)の影響を受けているためと考えられた。

基肥には硫酸アンモニウムや塩化カリウムが含まれていた(Table 4.1)ことから、硫酸イオン(SO_4^{2-})や塩化物イオン(Cl^-)濃度は、その施用から 10 日後に上昇した。 SO_4^{2-} および Cl^- は植物に利用されず、土壌にも吸着保持されにくい。それらは 1 回目の追肥後(基肥施用から 20 日目)および 2 回目の追肥後(40 日目)にも濃度上昇が認められ、施肥後の激しい降雨が SO_4^{2-} や Cl^- の溶脱を促進させていた。具体的データを掲載していないが、実験期間中の下方浸透水中の pH はほぼ 7.0 であったにも関わらず、基肥混入から 40 日目には pH が 6.1 にまで低下した。 $\text{EC}_{\text{iw-bottle}}$ のみならず、pH も溶脱した陰イオン、特に SO_4^{2-} および Cl^- に影響されていた。リン酸イオン(PO_4^{3-})や亜硝酸イオン(NO_2^-)など他の陰イオンについては、低濃度(5 mg L^{-1} 以下)あるいは検出されないことが多かった。

一般に、肥料成分の溶脱量は浸透水量に比例する。Fig. 4.8 に示されているように、降雨強度 q_i が 10 mm h^{-1} 以上となるような豪雨の際に、肥料成分の溶脱による土壌や地下水の汚染リスクは高まることが示唆された。一方、ジョロを用いた灌漑のみでは根群域下への肥料溶脱は少ない(Fig. 4.5-*, Fig. 4.8)。栽培暦の灌漑計画どおりに灌漑を行えば、肥料の溶脱は最小限に留められるが、予想の困難な降雨が灌漑直後に続く場合に根群域下へ肥料が溶脱してしまうことが明らかとなった。また、鳥取県のラッキョウの砂丘畑栽培では、追肥として化学肥料を散布したまま土壌と混和せずに放置する。これにより土壌溶液への溶け込みを遅らせ、重力水に溶け込んでからの土壌中の溶脱距離を長くすることで、肥料成分が作物に吸収され易くなるよう工夫されている(藤井 1997)ため、施肥計画も栽培暦に準じて行えば、肥料成分の溶脱量は少ないはずである。施肥・灌漑計画を検討する際、通常は植物や土壌の乾燥重量などのデータが用いられるが、本実験のように下方浸透水を直接採水しモニタリングを行うことで、さらに詳細なデータを得て綿密な計画を立てることが可能となる。希釈やタイムラグの影響があることから、農地からの環境負荷量を地下水の水質データのみから算出することは容易ではない(鈴木・志賀 2004)。しかし、それらの影響なく下方浸透水の直接採水・分析が可能であることも SCFS を用いたモニタリングシステムの利点である。

4. 3. 5 冬期の採水および肥料溶脱

本実験を行った鳥取市において、2004 年 12 月末から 2005 年 3 月の積算降雪量は 2040 mm、最深積雪は 510 mm、降雪記録日数は 23 日であった。これ

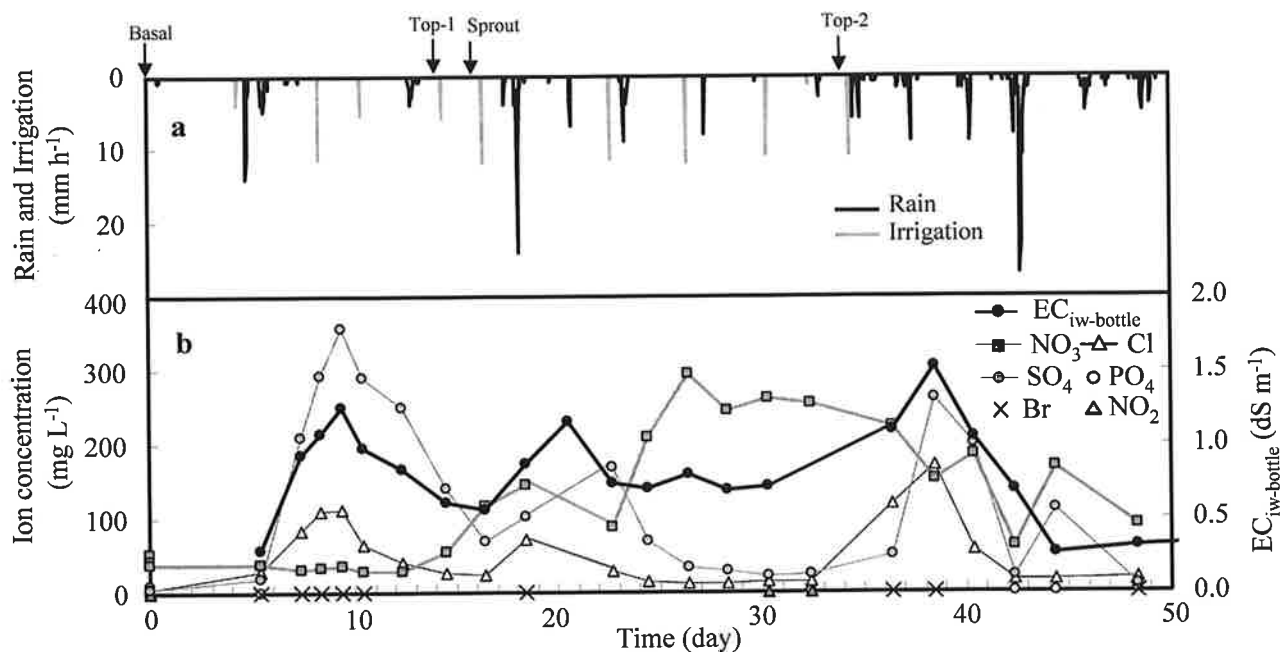


Fig. 4.8 Quality of collected infiltration water during a 50-day period (Aug.18th 2004 ~ Oct. 7th 2004). **a:** Rainfall, irrigation and fertilization. **b:** Anion concentrations and EC in the sampling bottle ($EC_{iw-bottle}$).

は北海道の事例(早川ら 2002 ; Nagumo et al. 2004)と比較するほどの降雪量ではなく、鳥取市においては融雪水の硝酸態窒素溶脱への影響は少ないものと推察された。しかし、硝酸態窒素の溶脱は地域の降水パターンに強く依存し、日本では梅雨、台風、融雪融凍による水流出が地域を特徴付け、硝酸態窒素の溶脱もそれに左右されている(波多野 2002)ことから、鳥取市の事例として、本実験期間中の冬期の積雪・融雪および降雨による根群域下への下方浸透水量や水質についても考察を行うこととした。ラッキョウは約1年かけて栽培される作物であり、冬期の3,4ヶ月間は生育停滞期となることから、施肥および灌漑は行われない(栽培暦参照)。その期間のうち、2004年12月23日から2005年2月10日までの50日間について、Fig.4.9に降雨・降雪量($mm\ h^{-1}$; Fig.4.9-a)および47.5 cm 深の吸引判定用テンシオメータの測定値(Fig.4.9-b), SCFSによる採水強度(Fig.4.9-c)を示した。また Fig.4.10 に、基肥混入から収穫までの実験期間全体の施肥やラッキョウの生育状況、および下方浸透水中の各種陰イオン濃度と $EC_{iw-bottle}$ の結果を示した。

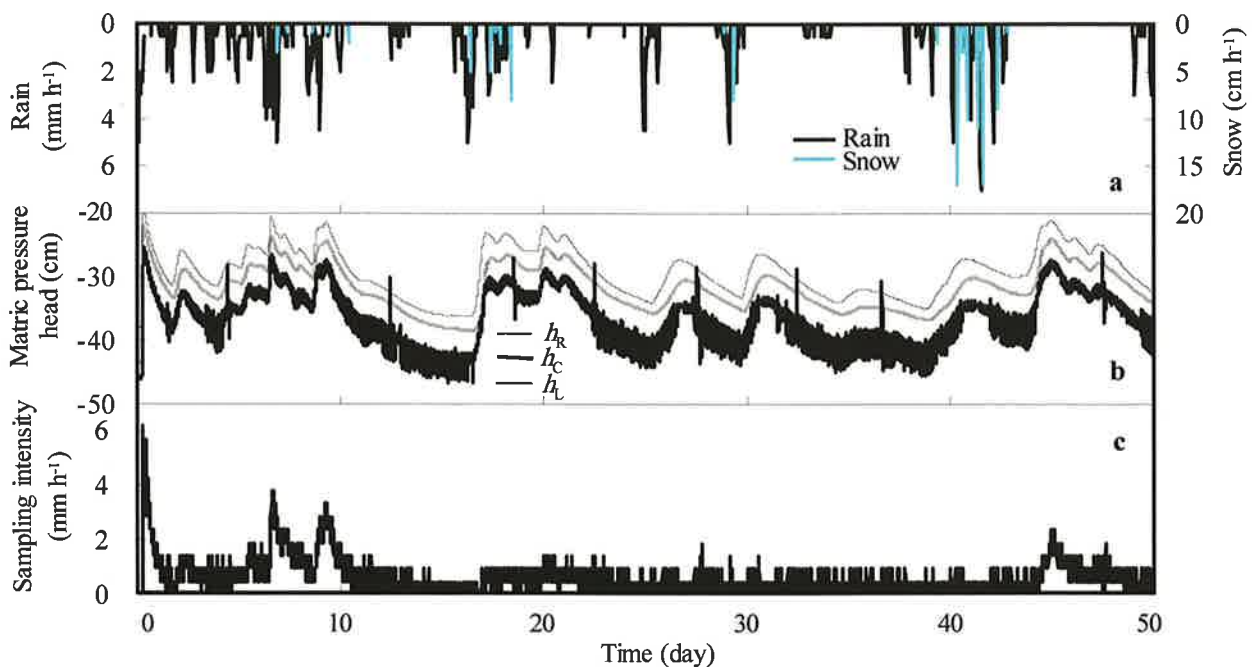


Fig. 4.9 Properties of infiltration water sampled by SCFS during a 50-day period (Dec.23th 2004 ~ Feb. 10th 2005).

a: Rainfall and snow amount. **b:** Matric pressure head at 47.5 cm depth for suction control (h_L , h_R :out of the filter, h_C :above the filter).

c: Sampling intensity by SCFS.

冬期の 50 日間では、降雨強度 5 mm h^{-1} 程度の降雨が頻繁に記録され (Fig.4.9-a), 積算降水量は夏期 (Fig.4.5-a) と比較すると多かった。しかし、47.5 cm 深のテンシオメータの測定値変化 (Fig.4.9-b) を見ると、この深度に到達する下方浸透水の発生 (h_C と h_L や h_R との差が小さくなる) 頻度は低く、したがって SCFS による採水頻度 (Fig.4.9-c) も低かった。また、 $0.48 \sim 0.96 \text{ mm h}^{-1}$ 程度の低い採水強度で長時間の採水が続く場合が多く観察された (Fig.4.9-c)。冬期の 40 日目頃には 15 cm を超える降雪も記録されているが、採水強度は最高 2.4 mm h^{-1} (Fig.4.9-c) であり、融雪に伴う下方浸透水の発生が少ないことを示している。SCFS による下方浸透水の採水状況を示した冬期 (Fig.4.9) の 50 日間は、Fig.4.10 において色付きにした部分にあたる。5 回目までの追肥の影響により 11 月に SO_4^{2-} , Cl^- および NO_3^- 濃度が上昇した後、降雨・降雪のみで施肥のなかった期

間中に全ての陰イオン濃度は低下し、硝酸態窒素濃度も 3 mg L^{-1} 以下の状態が続いた(Fig.4.10). 考察した冬期の 50 日間においては降雨や降雪・融雪に伴う下方浸透水量は少なく、溶脱する各種陰イオン濃度も低かったことから、栽培層に準じたラッキョウ栽培を行っている限り、下層土や地下水への肥料成分溶脱による負荷は抑制されるものと考えられた. 3 月末に行った 6 回目の追肥の影響が下方浸透水中に表れたのが 4 月中旬であり、以降も作物に利用されない SO_4^{2-} , Cl^- の溶脱が続いた. ラッキョウ収穫後は、それまで土壌表面を覆っていた葉身が無いため、さらに残存成分の溶脱が促進された可能性がある.

4. 4 まとめ

SCFS は砂質圃場においても効率の良い採水を行っているが、降雨強度や先行降雨の有無が採水効率に大きく影響していた. 本実験圃場は砂質土壌であり、降水量および施肥量が多く、浅い根群域であるという硝酸態窒素の溶脱が起こるような様々な要因(鈴木・志賀 2004)があったが、深度別に挿入した各種センサーの測定値と SCFS の採水結果から、規定量の施肥や灌漑を行っていれば肥料の溶脱量は抑えられることが示唆された. 一方、灌漑直後に予測・管理不可能な降雨があった場合、あるいは先行降雨後に強い降雨が続いた場合に根群域下への下方浸透が発生しやすく、肥料溶脱量も増えることが推察された. また、ラッキョウの生育停滞期で追肥のない期間において、降雨や降雪に伴う下方浸透水の発生および各種陰イオンの溶脱は少ないことが明らかとなった.

深度別の TDR センサーによる土壌溶液中の EC 測定では、 EC_w が土壌水分量(θ)の測定精度の影響を大きく受けたため、溶質移動傾向を捉える指標として利用しにくい結果となってしまったが、 EC_b の変化からはその傾向をモニターすることが可能であった. さらに、SCFS の採水チューブ内に挿入した 4 極塩分センサーを用いて浸透水中の EC 変化をモニタリングすること、SCFS で直接採水した浸透水を分析することで、その水質変化を詳細に把握することが可能であった. センサーを用いて土壌中の溶質移動傾向を捉え、SCFS によって下方浸透水の水量および水質の両方を把握することが可能なモニタリングシステムを構築できた. 今後は、センサー技術と SCFS のような採水装置を併用したモニタリングシステムから得られたデータを、施肥・灌漑計画にどのように反映させていくかが課題である.

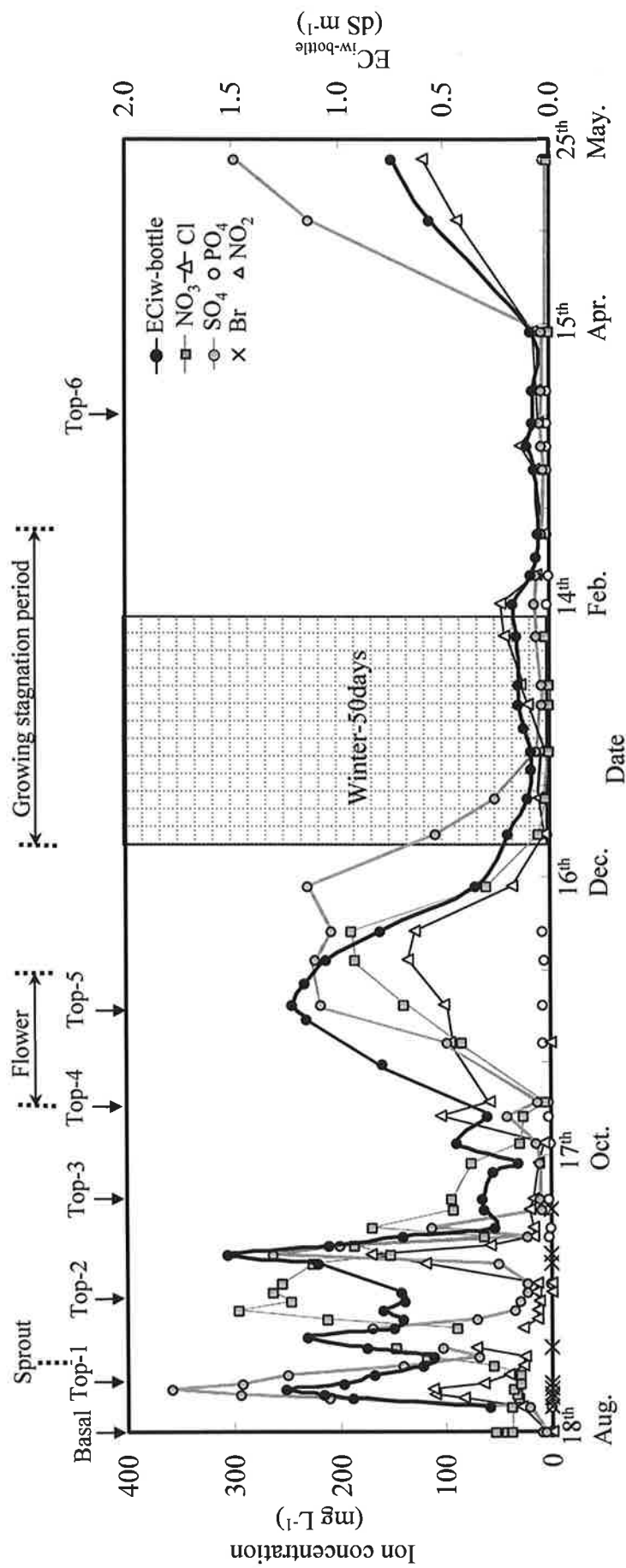


Fig. 4.10 Quality of collected infiltration water during cultivation of scallion (Aug.18th 2004 ~ May. 25th 2004).

第V章

サクシオン固定型サンプラーによる 砂丘砂圃場での下方浸透水モニタリング

5. 1 はじめに

砂質土壌において下方浸透水を採取する場合には、第III章でその採水性能の高さが明らかとなったように、SCFSが有用である。しかし、フィルターサクシオンを自動制御するためのシステムはコストが高く、適用土壌やフィルターの種類を変更するとデータロガープログラムの変更なども必要となる。一方、採水効率はやや低下するが、コストを抑え、ある一定のサクシオンをかけて下方浸透水を採取可能な装置としてウィックサンプラー(例えば, Holder et al. 1991 ; Zhu et al. 2002)やテンションサンプラー(Haines et al. 1982), サクシオンライシメータ(Landon et al. 1999)などがある。また、これらサクシオン固定型のサンプラーで採取した浸透水の水質について考察した研究は多いが、砂質土壌における採水性能評価を行った事例は少ない。

そこで、本章ではSCFSよりも安価で簡易な方法で砂質土壌中の下方浸透水を採取する方法について検討するべく、サクシオン固定型サンプラーを用いたモニタリングを行った。裸地砂丘砂圃場において、サクシオン固定型サンプラーで下方浸透水を採取し、その採水性能を評価した。サクシオン制御型のSCFSとサクシオン固定型サンプラーとの採水状況を比較することで、安価な採水装置による不飽和砂質土壌中の下方浸透水モニタリングの可能性を検討した。また、肥料溶脱状況についても前章のラッキョウ栽培区と裸地区とで比較した。

5. 2 実験方法

本実験は第IV章で詳述した砂丘砂圃場と同じ条件下で行った(第IV章 4.2.1)。ただし、ラッキョウ栽培の無い裸地区とし、埋設した下方浸透水採取装置がSCFSではなくサクシオン固定型のサンプラーである。本実験で使用したサクシオン固定型サンプラーは、第II章で詳述したSCFSのSFD部分(Fig.2.2)と全

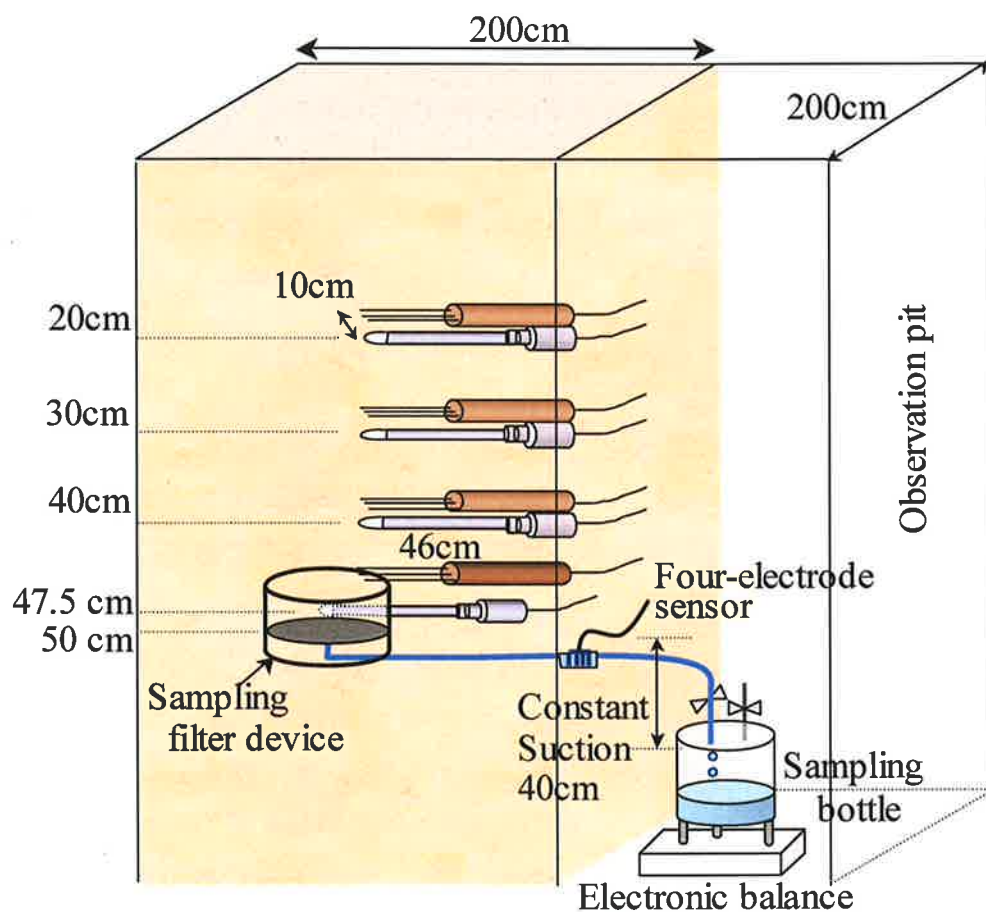


Fig. 5.1 Schematic representation of the field experimental design
(Fixed-suction sampler, No-planting).

く同じ構造のものを用い、水理的連続を保った採水チューブの長さに応じた一定のサクションがガラスフィルター(G4)にかかるようにした。

2004年7月22日に観測ピット(80×80×120 cm)を設置した。7月26日に TDR センサー4本とテンシオメータ4本を各深度に、また SFD が 50 cm 深になるよう埋設した。埋設した機器の配置は Fig.5.1 のとおりである。採取した浸透水の電気伝導度(EC)をモニターするため、自作の4極塩分センサーを途中に挿入した採水チューブを観測ピット内に引き入れ、SFD のフィルターより 40 cm 下で滴下するよう採水容器、電子天秤を観測ピット内に設置した。つまり、本実験ではフィルターサクションが 40 cm 固定のサンプラーを用いたことになる。サクション固定型サンプラーの採水性能については、SCFS と同様に(1)式を用いて(第III章 3.2.2)採水効率(WCE)を算出して評価した(第IV章 4.2.3)。なお、裸

地区に設置した天秤が正常に反応・記録測定可能であった期間を選んで WCE の算出を行うこととした。

本章の実験対象は裸地区であるが、施肥・灌漑条件については、ラッキョウ栽培下(第IV章)と全く同じ(4.2.4)とした。また、採取した浸透水の回収や水質分析方法(4.2.5)、センサー類の校正や配線(4.2.7)についても同様である。

5. 3 結果および考察

5. 3. 1 サクション固定型サンプラーの採水効率

砂丘砂圃場の裸地区における、サクション固定型サンプラーの下方浸透水採取性能を採水効率(WCE)を算出して評価した。Table5.1 に選出した4つの期間(Run)の計算結果を SCFS の WCE と共に示した。サクション固定型サンプラーは全ての Run において WCE が 100%を超え、浸透水に対して採水が過剰であることが明らかとなった。SCFS の WCE と比較すると、サクション 40 cm が常にフィルターにかかっているサクション固定型サンプラーの場合は、SCFS の 1.5~2 倍の浸透水・土壌水を集水してしまうことが明らかである。猪迫ら(2005)も、同圃場内でガラス繊維糸を使ったウィックサンプラーで一定サクションをかけて採水を行い、採水量が過剰となったことを報告している。サクション固定型サンプラーは、浸透が起こった場合は常に採水過剰という傾向にある一方、降雨や灌漑の無い日が続く、フィルター直上のマトリックポテンシャルが設定したフィルターサクション値以上に乾燥すると、採水チューブ内の水が逆流して空気が侵入し、水理的に不連続となった結果、採水が不可能となった。図には示していないが、本実験中ではサンプラー埋設後の 8 月下旬および 2 月下旬以降に採水不能となった。その場合はフィルターの空気侵入値以上の圧力をかけて採水チューブの端から給水し、再び水理的連続にして採水を再開させた。これらのことから、透水性が高く浸透速度が速い砂質土壌においては、40 cm の一定サクションで下方浸透水を長期的に採水することが困難であることが示唆された。

Fig.5.2 には、SCFS を設置した区(Fig.5.2-a,b)およびサクション固定型サンプラーを設置した区(Fig.5.2-c,d)における、深度別のマトリックポテンシャル(a,c)および土壌水分量(b,d)の経時変化を示した。比較のため、SCFS の区もラッキョウ栽培前の裸地であった期間のデータを用いた。頻繁にサクション制御

の行われる SCFS のフィルター直上では 47.5 cm 深のマトリックポテンシャルが細かく変化(Fig.5.2-a)するのに対し、サクシオン固定型の場合は滑らかな変化(Fig.5.2-c)であった。また、SCFS では各深度の土壌水分量がほぼ同じ、且つ変動幅が小さい(Fig.5.2-b)のに対し、サクシオン固定型では 40 cm 深の土壌水分量が常に多く、変動幅も大きかった(Fig.5.2-d)。降雨があった場合、サクシオン固定型の区において浸透水の到達および通過が早いことが Fig.5.2-c から明らかであった。しかし、これは装置やセンサー埋設時の土壌の攪乱による影響の可能性もある。

Table 5.1 Water-collecting efficiency of Fixed-suction sampler (F) and SCFS (S).

Run ^r	1-F	1-S	2-F	2-S	3-F	3-S	4-F	4-S
Run term (h)	48	48	47	47	47	47	141	141
q_r (cm h ⁻¹)	0.106	0.106	0.306	0.306	0.306	0.306	0.071	0.071
Q_e (cm ³)	708.6	614.8	2343.5	1057.2	2709.4	1319.7	1350.4	1248.4
q_e (cm h ⁻¹)	0.188	0.163	0.635	0.287	0.473	0.230	0.122	0.113
q_s (cm h ⁻¹)	-0.020	0.008	-0.003	-0.020	0.032	0.025	0.007	0.014
WCE (%)	149.2	142.4	207.3	93.53	234.8	110.2	191.1	198.8

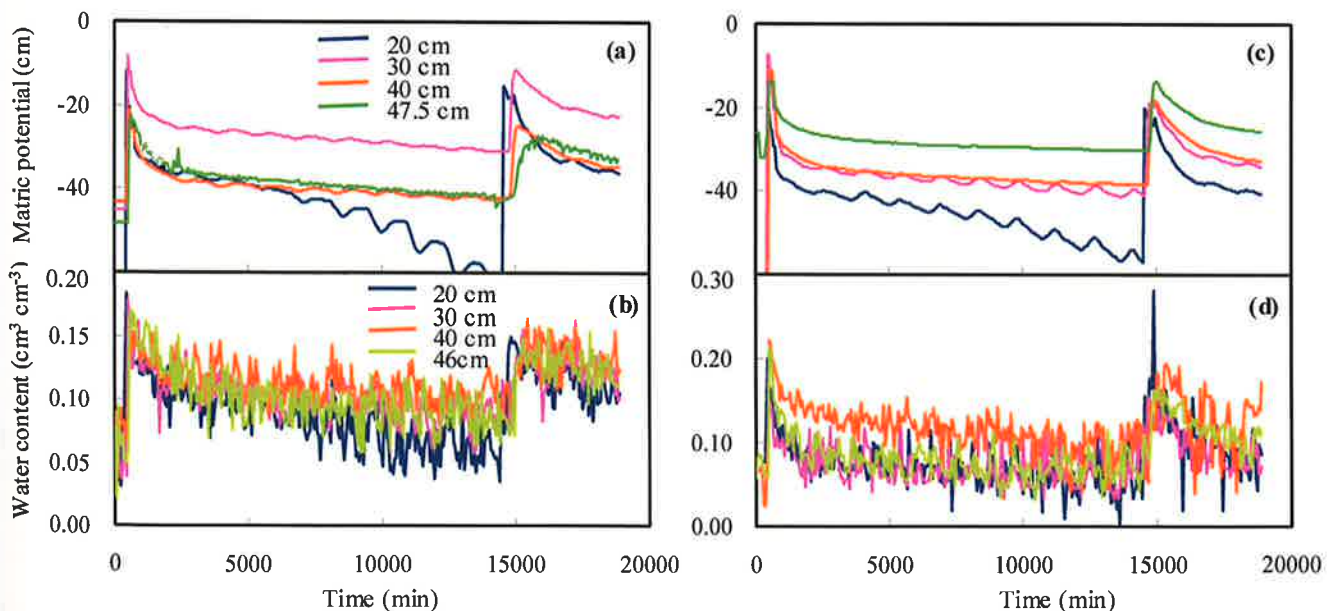


Fig. 5.2 Changes in the matric potential and soil water content of each depth. SCFS plot (a) (b), Fixed-suction sampler plot(c) (d).

5. 3. 2 裸地区における溶質移動と肥料成分の溶脱傾向

SCFS の区ではラッキョウが栽培されているため一概には比較できないが、参考として、Fig.5.3 にサクシオン固定型サンプラーおよび SCFS で採取した下方浸透水の電気伝導度($EC_{iw-bottle}$)の経時変化(実験期間全体)を示した。サクシオン固定型サンプラーで測定した浸透水の $EC_{iw-bottle}$ は SCFS の $EC_{iw-bottle}$ よりも高い傾向にあった。浸透水の陰イオン濃度変化の詳細を見てみると(Fig.5.4), 基肥や追肥、灌漑と台風による降雨などが記録された 10 月中旬までに、陰イオンが特に高濃度で溶脱していることが明らかである。作物栽培を行っていない裸地区に、栽培区と同等の施肥を行っていることから、溶脱量が多くなるのは当然の結果であるが、硝酸態窒素(NO_3^-)濃度は最高 933 mg L^{-1} にまで達した。この結果から、多量の肥料や家畜排泄物などが裸地に存在すれば降雨によって様々な物質が溶脱し、地下水汚染のリスクも高まることが容易に想像できる。施肥や灌漑の無い冬期(12 月中旬から 3 月)では、サクシオン固定型の区で $EC_{iw-bottle}$ がやや高いまま推移した(Fig.5.3)が、各種陰イオン濃度の低下は、SCFS を設置しラッキョウを栽培した区と同様であった(Fig.5.4 および Fig.4.10)。

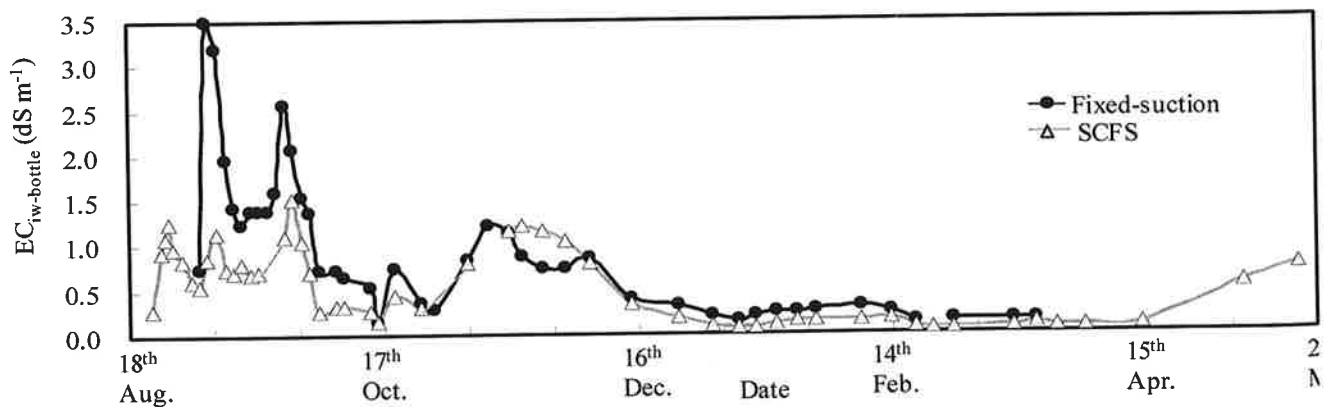


Fig. 5.3 Changes in $EC_{iw-bottle}$ collected by fixed-suction sampler and SCFS during field experiment (Aug.18th 2004 ~ May. 25th 2005).

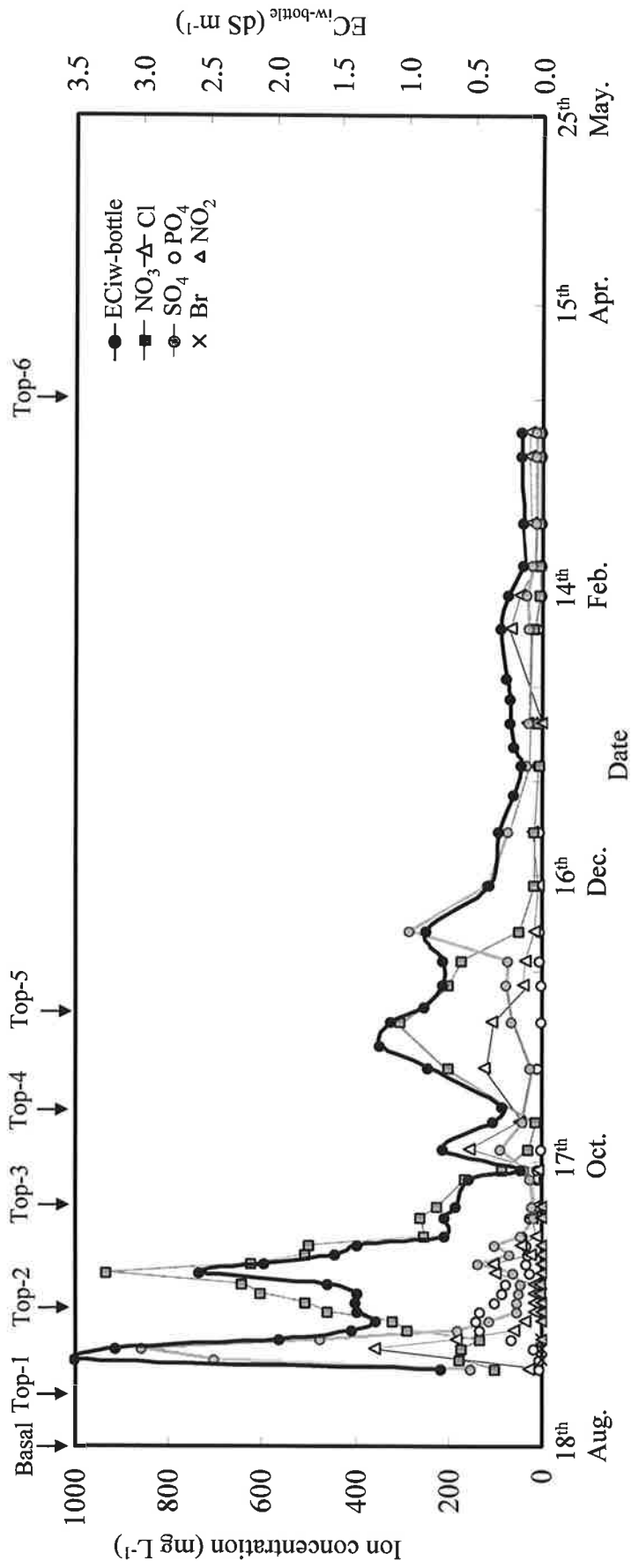


Fig. 5.4 Quality of infiltration water collected by fixed-suction sampler during field experiment (Aug. 18th 2004 ~ May. 25th 2005).

5. 4 まとめ

砂丘砂裸地圃場において、サクシオン固定型サンプラーを用いた下方浸透水モニタリングを行い、その採水性能および有用性を検討した。サクシオン固定型サンプラーの採水効率は149～235%であり、SCFSよりも採水過剰傾向にあった。これは設定したサクシオンが40 cmでは大きすぎたと考えられた。また、サクシオン固定型サンプラー周辺の土壤水分量およびマトリックポテンシャルの変化を見ると、フィルターより10 cm程度上の土壤水分量が常に高く、変動も大きいことが明らかとなった。サクシオン固定型サンプラーを埋設した区においては、下方浸透水が深度50 cmに到達するまでの速度が速い。さらに深度40 cm付近で土壤水分量が高い状態が続くことから、一度採水が始まると採水継続時間も長い傾向にあり、これも採水過剰の一因と考えられた。砂質土壤のように透水性の高い土壤においては、サクシオン固定型サンプラーでは装置の毛管水切断によって採水が不可能となる。コストを考慮してサクシオン固定型サンプラーを砂質土壤で使用する場合には、設定するサクシオン値の検討を充分に行う必要があり、また、降雨強度・浸透速度に応じた採水が困難であるために採水過剰となることは避けられない。砂質土壤、とくに砂丘砂において下方浸透水量の測定をサクシオン固定型サンプラーで行うと、その測定精度が落ちることが予想される。

第VI章

自動サクシオン制御型サンプラーの実用化への提案

6.1 はじめに

三木(2002)は、土性の異なる6種の土壌で簡易テンションフリーライシメータを用いた下方浸透水採取を行い、この装置は飽和透水係数が $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{ cm s}^{-1}$ の灰色台地土で最も採水率が高くなることを示している。また、小杉(2000)あるいはKosugi and Katsuyama(2004)では、森林土壌で多孔質板フィルターに強いサクシオン(最高450 cm)をかけて採水を行っている。このように、各装置がどのような土壌における採水に適しているかを把握し、採水率が低くなる可能性があれば、装置を変更あるいは改良しなければならない。これまで述べてきたように、SCFSはわずかなサクシオン変化に対して土壌水分量が大きく変化してしまう砂質土壌において、効率の良い下方浸透水の採取を行うために開発した採水装置である。しかし、SCFSを様々な土壌に適用させていくことも検討する必要がある。SCFSを開発する際、フィルターに適用するサクシオンが採水装置周辺に及ぼす影響をシミュレーションによって予測し、効率の良い採水が可能になるようサクシオン制御に工夫を加えた。第II章では、どのようなサクシオン制御が砂質土壌での採水に適したのかを具体的に示した。また、効率の良い下方浸透水の採取を行うためには、採水に使用するフィルターの種類や採水を行う不飽和土壌の種類によって、フィルターにかけるサクシオンの値やその制御プログラムを変更する必要があることが明らかとなった。

そこで本章では、採水フィルターの種類や採水を行う不飽和土壌の種類を変えてシミュレーションを行った。具体的には、砂質土壌に対してガラスフィルター以外の採水フィルターを使用することや、ガラスフィルターを砂質土とは土性の異なる土壌で使用する場合を想定した。サクシオンをかけて下方浸透水を採水する際に、採水装置周辺のマトリックポテンシャルと土壌水分量がどのように変化するかを予測し、SCFSのようなサクシオン制御型の採水装置を様々な土壌に適用させる際に留意すべきサクシオン制御法を示した。

フィールドには様々な要因により刻々と変化する貴重な土壌情報のうち、セ

ンサーを用いて電気信号に変換できるものは、現地に設置されたデータロガーに記録される(溝口ら 2003)。第IV章、第V章で詳述したように、本研究では砂丘砂圃場における実験の際に、浸透水の EC をモニターする 4 極塩分センサーや浸透水量測定のための電子天秤、深度別に挿入したテンシオメータや TDR センサーなどにより得られた全ての情報を 3 台のデータロガーに記録した。データロガーの発達により膨大なデータを 1 年以上にわたって記録可能となったわけであるが、観測途中で起こる不測のトラブルによる情報の損失を防ぐために、定期的なデータ回収とメンテナンスが必要である(溝口ら 2003)。気象観測では、このような情報損失の問題を解決するために、データロガーに蓄積された情報を遠隔操作で取得するシステムが実用化されており、土壌水分量のデータも含めたシステムを溝口ら(2003)が、また、海外での適用方法とその結果については伊藤ら(2003)が報告している。

本研究で使用した、様々な測定機器から構成されるモニタリングシステムは、交流電源とバッテリー電源の両方を使用していたが、全てをバッテリーの直流電源で作動させるように改良可能である。また SCFS により採取した下方浸透水を、データ計測後に自動排水させるような改良を行うことで、今後は頻繁に足を運ぶことが困難なフィールドにおいても、下方浸透水のモニタリングが可能となる。そこで、携帯電話を用いて遠隔地からフィールドに設置したモニタリングシステムのデータを回収することを試みた。また、ある設定値になると携帯電話に警告を出すプログラムを作成した。実際のデータ回収方法を詳述すると共に、データ回収まで含めたモニタリングシステムの構築について検討した。

6. 2 実験方法

6. 2. 1 シミュレーション設定条件

SCFS は、土壌中に埋設するフィルター部分(SFD, 孔径 5~10 μm ガラスフィルター)と、フィルター下端の圧力を自動制御する部分(AVS)から成る。SFD のフィルター直上に設置したテンシオメータで測定するマトリックポテンシャル(h_C)と、同深度のフィルター外のマトリックポテンシャル(h_L , h_R)の平均値(h_{LR})との差($h_C - h_{LR}$)を吸引判定値とし、5 分間に 1 度の判定に基づいてフィルターサクションが AVS により制御され、採水を行う(SCFS の制御について

詳述は第Ⅱ章 2.2). サクションをかけた採水が SFD 周辺の土壤に及ぼす影響を HYDRUS-2D(ver.2.05)で予測した. 現実には, SCFS はマトリックポテンシャル変化に応じてフィルターサクションを自動制御しているが, シミュレーションでは同様の条件選定が困難であったことから, 砂質土壤の場合(第Ⅱ章 2.3.3)を基本とし, 次のような設定とした.

1メッシュを1cmとして縦50cm×横20cmの鉛直二次元断面を作成し, 4cmの側壁を設けたフィルターが各種土壤中に埋設されているとした. フィルター内外には, 吸引判定用のテンシオメータのように観測点を設け, その地点のマトリックポテンシャルの経時変化を注視した. フィルターサクションは50cm一定とした. HYDRUS-2D で入力した物質の各パラメータ(van Genuchten-Mualem Model)は, Table6.1 に示した. 表中の(3),(4)の土壤についてはHYDRUS-2D で土性を選択した際に自動的に入力される値であり, (6),(7)のフィルターは第Ⅱ章 2.4.1 に示した結果を参考として, α (空気侵入値の逆数)や K_s (飽和透水係数)を決定した. なお, Table6.1 に示したパラメータで計算を実行できないことが稀にあり, その場合はn値を小さくして計算した. 初期の水分条件を飽和とし, フィルター外側の境界条件もサクション50cm一定として1日排水させた後, 降雨強度20mm h⁻¹の連続降雨が1日発生したと仮定し, その2日間の計算を行った.

Table 6.1. Input parameters for HYDRUS-2D simulation.

Materials	θ_r [cm ³ cm ⁻³]	θ_s [cm ³ cm ⁻³]	α [cm ⁻¹]	n	K_s [cm day ⁻¹]
(1) Sidewall	0.0637	0.355	0.018	1.27	0.10
(2) Dune sand	0.0486	0.413	0.03	5.5	760.48
(3) Loam	0.078	0.43	0.036	1.56	24.96
(4) Silt Loam	0.067	0.45	0.02	1.41	10.8
(5) G4 filter	0.0283	0.33	0.01	5.0	50.97
(6) Porous plate	0.0283	0.33	0.0020	4.5	2.59
(7) 1.2 μ m-Membrane	0.0283	0.33	0.0025	4.5	1.21

6. 2. 2 遠隔操作によるデータ回収システム

データロガー(CR10X ; Campbell Scientific), アンテナ付携帯電話データ通信コントローラ (C-KMI10 ; クリマテック), 長距離通信用インターフェース(SC932A ; Campbell Scientific), 携帯電話(D253i ; NTT DoCoMo), バッテリーは測定対象地に設置した(Fig.6.3). 通信ソフト PC208W(Campbell Scientific)インストール済みのコンピュータ, モデム, RS-232C ケーブルを研究室内に用意した.

配線図および携帯電話制御のプログラム例に命令の説明を加えたものを, それぞれ Fig.6.3, 6.4 に示した. 携帯電話のデータ通信コントローラは, 携帯電話を内蔵したモデムであり, RS-232C 変換ケーブルを介してデータロガーと, また同軸ケーブルを介して室外アンテナと繋がる. CR10X の 5V 用コントロールポートから通信コントローラを経由して, 携帯電話に電力が供給される.

6. 3 結果および考察

6. 3. 1 フィルター直上に土壌水分量の低い部分が残される現象

砂質土壌での下方浸透水採取に最も適するフィルターとして, 第II章 2.4.1 でガラスフィルター(以下 G4 フィルター)を選出した. 砂丘砂土壌中で G4 フィルターにサクションをかけて浸透水を採取する場合, 浸潤前線とフィルターとの間に特に水分量の低い不飽和部分を取り残された(第II章 2.4.2). この現象が発生するメカニズムを, マトリックポテンシャルの経時変化(Fig.6.1-a)から推察した.

まず, 飽和状態から一定サクションをかけて排水が行われる際に, フィルター直上のマトリックポテンシャル(h_c)が先に低下するが, その後は再分布により SFD 内外でマトリックポテンシャルが等しくなる. しかしその後, 降雨が浸透してくると, SFD 外の空気は下方へと移動するのに対し, フィルター直上の空気のみが浸潤前線とフィルターとの間に取り残され, 水分量の低い不飽和部分が封じ込められた状態となる. したがって, 連続降雨下においても h_c が h_L や h_R よりも低い状態で平衡となっていた. これは G4 フィルターと砂質土壌という組み合わせであれば, 排水と降雨が繰り返された場合にも観察される現象であった.

6. 3. 2 様々なフィルターの砂質土壌への適用

SCFS の採水フィルター部分(SFD)は交換・変更が容易であり，透水性や空気侵入値を考慮して G4 フィルター以外のものを用いることも可能である．そこで，吸引法や土壌カラム実験でよく用いられる多孔質板(セラミック板；地盤工学会 2004)やマルチステップ流出法(Fujimaki and Inoue 2003)で用いられるメンブレンフィルターを砂質土壌で使用した場合を想定したシミュレーションを行った．

G4 フィルターを用いた採水と全く同じ条件で，より透水性の低いフィルター(Table6.1-(6)多孔質板(7)メンブレン)を用いた場合，多孔質板(Fig.6.1-b) および $1.2 \mu\text{m}$ メンブレンフィルター(Fig.6.1-c)のどちらの場合も，フィルター直上の土壌水分量が周囲の土壌より増加した． 20 mm h^{-1} 連続降雨下の観測点のマトリックポテンシャルは，フィルター直上(h_c)がフィルター外(h_L , h_R)よりも多孔質板で 3.1 cm ，メンブレンで 4.6 cm 高かった．G4 フィルターを用いた際に観察されたような，フィルター直上に水分量の低い部分を取り残される現象(Fig.6.1-a)は起こらなかった．また，メンブレンフィルターに対して 90 cm 以上のサクションをかけると，フィルター直上の水分が増加しなかった． 100 cm のサクションをかけた場合の様子を Fig.6.1-d に示したが，この図から明らかのように， 20 mm h^{-1} 連続降雨下でも h_c と h_L , h_R がほぼ等しくなった．したがって，砂質土壌において G4 フィルターより透水性の低い採水フィルターを使用する際には，SCFS の吸引判定値を $(h_c - h_{LR}) = 0$ とし，且つ強め(90 cm 以上)のサクションを瞬間的にかけるような制御を行うべきである．

6. 3. 3 ガラスフィルターを用いた様々な土壌での採水

G4 フィルターを用いた SCFS は透水性の高い砂質土壌における採水に適した装置であるが，これを透水性の低い土壌中で使用する場合に，どのような変更・改良が必要となるかを検討した．Table6.1 に示した土性の異なる 3 種の土壌，砂丘砂(2)，壤土(3)，シルト質壤土(4)に G4 フィルターを設置した場合のシミュレーション結果を Fig.6.2 に示した．

降雨に伴い下方浸透水がフィルター深度に到達すると，フィルター内外のマトリックポテンシャル差($h_c - h_{LR}$)が小さくなり，さらに連続降雨下では h_c が h_L や h_R よりも低い状態で，壤土は 10 cm ，シルト質壤土は 9.2 cm の差を保って平衡となった．砂質土壌の場合(Fig.6.2-a)と同様，壤土(Fig.6.2-b)およびシル

ト質壤土(Fig.6.2-c)においてもフィルター直上に水分量の特に低い不飽和部分の封じ込めが起こっていることから、この現象は、どのような土壤中においても G4 フィルターにサクションをかけた場合に発生し、透水性の高いフィルター特有の現象であることが示唆された。図には示していないが、SFD の 4 cm の側壁の高さを変化させてシミュレーションを行っても同様の結果が得られ、側壁の有無に関わらずこの現象が観察されたことから、G4 フィルターの透水性が影響していると考えられた。多孔質板は通水抵抗を持つため、サクションの強度に応じて板の上下の圧力差が変化し、計測間隔が長く吸引時間が短い場合に、浸透速度への対応の遅れが指摘されている(小杉 2000)。一方、G4 フィルターの場合は、フィルターにかけるサクションがすぐに反映されてフィルター直上の土壤に変化をもたらすことから、封じ込め現象が起こるものと考えられた。

G4 フィルターと各土壤の飽和透水係数の差が大きくなれば、連続降雨下のマトリックポテンシャル差($h_C - h_{LR}$)も大きくなった。G4 フィルターの空気侵入値が 100 cm 程度であるため、強いサクションをかけて採水するとフィルターが不飽和となるリスクが高くなる。G4 フィルターを各土壤中で使用するには、吸引判定値を砂質土壤ならば($h_C - h_{LR}$) ≥ -5 cm、より透水性の低い土壤中では($h_C - h_{LR}$) ≥ -10 cm に変更する必要がある。

Siemens and Kaupenjohann(2004)は、細砂土壤($K_s=200\sim 1000$ cm day⁻¹)で G4 フィルターよりも透水性の低い焼結ガラスフィルター($K_s=31.2$ cm day⁻¹)を用いた採水を行い、フィルターにかけられたサクション値は不明だが、 h_C を h_{LR} と等しく制御する方法で 107~118%の採水率を上げている。また、フィルター直上で装置を避けるような横方向への浸透水の流れが起こったことを報告している。本章では、G4 フィルターを用いた SCFS の様々な土壤への適用をシミュレーション結果から推察するのみであった。今後は、実際に各種土壤中で浸透水の採取を行った場合に、装置周辺の土壤水分量がどのように変化するか、採水効率を高くするためのサクション制御方法について、カラムや圃場における実験で明らかにすべきである。

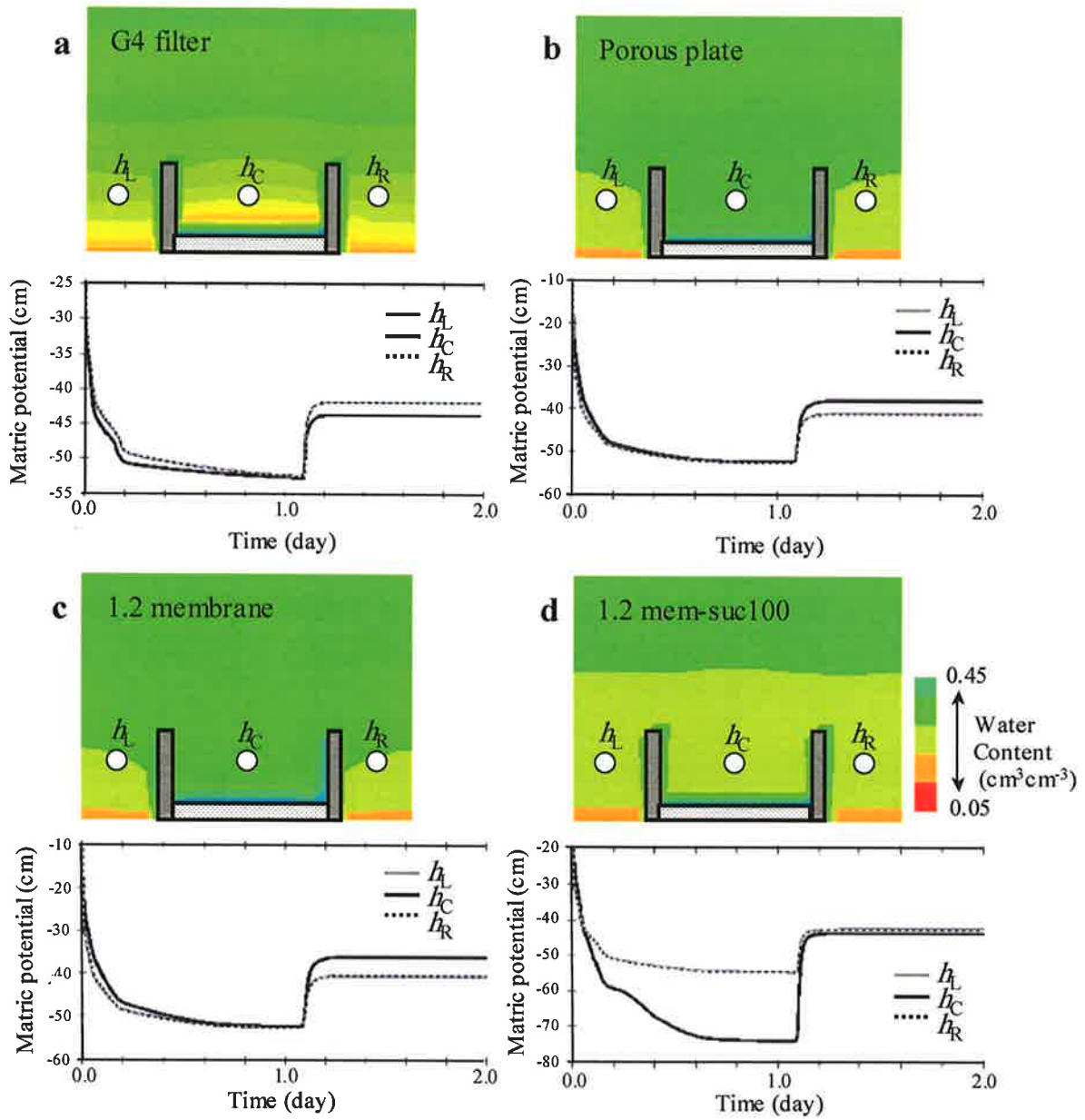


Fig. 6.1 Simulation results with 50 cm constant suction at the various filter, G4(a), Porous plate(b), 1.2 μ m membrane(c) in sandy soil. (d) is a case of the 100 cm constant suction at the 1.2 μ m membrane. Soil water content under continuous rainfall with 20 mm h⁻¹ and changes of the matric potential inside and outside of the SFD.

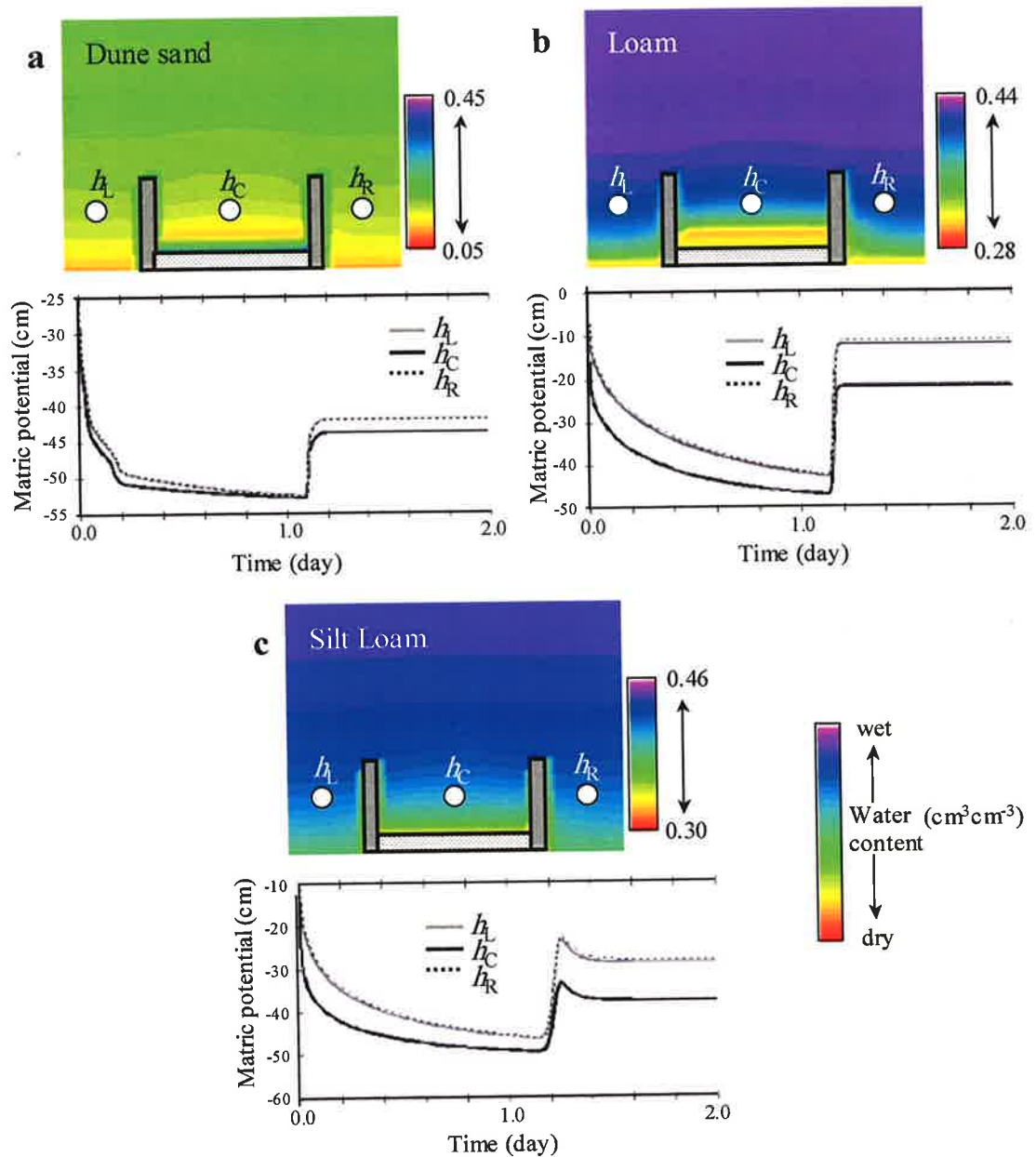


Fig. 6.2 Simulation results with 50 cm constant suction at the G4 filter in different soil types, Dune sand(a), Loam(b), Silt Loam(c). Soil water content under continuous rainfall with 20 mm h^{-1} and changes of the matric potential inside and outside of the SFD.

6. 3. 4 遠隔操作によるモニタリングデータの回収

遠隔地からデータロガーに記録されたデータの回収を行うこと、および、データロガーがある設定値を記録した場合に、遠隔地の携帯電話を鳴らすというシステムを試行した。

まず、測定対象地に設置している携帯電話の電源を、ある一定時間だけ入れるというプログラムを作成し(Fig.6.5)、データロガーにプログラムを送信した後、長距離インターフェースを接続した(Fig.6.3, 6.4)。次に、電話回線を用意し、外付けモデム経由でデータロガーと通信する機能を標準装備している通信ソフト(PC208W)を起動した。これらを用いて、携帯電話に電源が入っている間(Fig.6.5 では毎日午前 11 時から午後 2 時までの 3 時間)、データロガーに記録されるデータを確認することやデータの回収が可能となった。通信ソフトの操作画面の一例を Fig.6.6 に示した。データ通信を確実にを行うためには、携帯電話のメール受信や留守番電話などの機能を予め解除し、パケットサイズや応答時間を最適条件に調整する必要がある(溝口ら 2003)。携帯電話の電波状態によっては繋がりにくい場合もある。また、内線電話から 0 発信で外線に繋ぐ場合も、交換機の特性によって繋がらない可能性があり、これらの作業はユーザの利用環境に合わせて試行錯誤で行う必要があることが溝口ら(2003)に指摘されているが、本実験においても、内線電話を利用してのデータ回収はうまくいかなかった。

本論文の第IV章で詳述した下方浸透水モニタリングシステムを、容易に足を運ぶことのできない圃場に設置した際には、雨量計が降雨を記録したり、SCFS の採水容器内に設置した水位計測用のセンサーが設定値以上を記録した時に、携帯電話を鳴らすことで採水の時期を知ることが可能であれば、頻繁に圃場へ行く必要がなくて便利である。本節で述べたデータ回収システムに、さらにスルーコネクションアダプター(BE32B ; Campbell Scientific)を接続することで、通信コントローラに接続している携帯電話から別の携帯電話を鳴らすことが可能となった。熱電対を用いて室温を測定し、30℃以上を記録した場合に知らせるプログラム例とその配線図などは付録 4 に掲載した。このコールバックと呼ばれるプログラムを拡張することで、記録したデータそのものを自動で携帯電話に転送することも可能である。コールバックプログラムは短く(付録 4)それほど難解ではないため、容易に各種機器の計測プログラムの中に組み込むことができる。問題はシステムの設置圃場の通信状態、つまり携帯電話を使

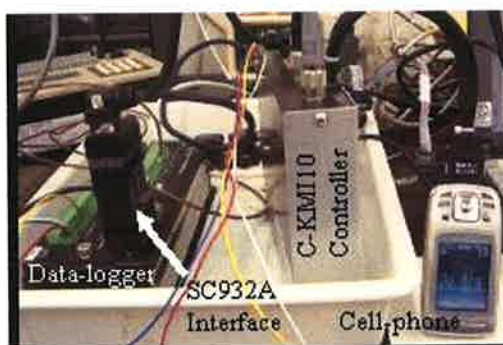


Fig. 6.3 Photo of the data-collecting system using cellular phone.

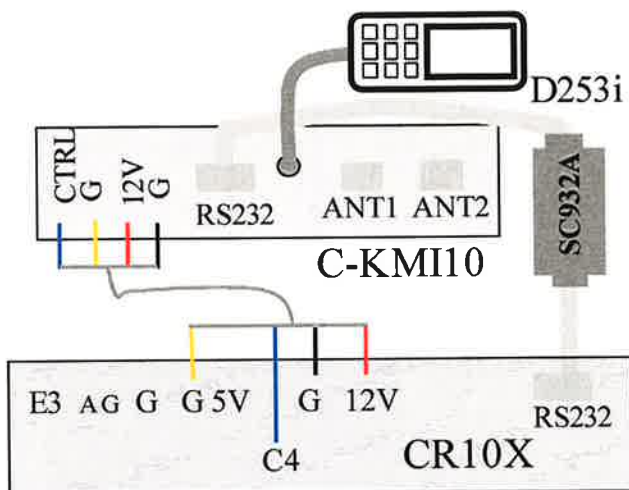


Fig. 6.4 A wiring diagram of the data-collecting system using a cellular phone.

*Table 1 Program	プログラム全体測定間隔
01: 20 Execution Interval (seconds)	1. 20秒
----- Cell Phone control -----	-----
1: If Flag/Port (P91)	通信コントローラ作動
1: 21 Do if Flag 1 is Low	Flag1 が OFF ならば
2: 30 Then Do	次を実行せよ
2: Do (P86)	
1: 44 Set Port 4 High	C4 を ON 通信コントロール ON
3: Do (P86)	
1: 11 Set Flag 1 High	Flag1 を ON にする
4: End (P95)	
;---AM11:00~PM14:00 only power on-----	-----
5: If time is (P92)	決められた時間だけ電源を入れる
1: 660 Minutes (Seconds --) into a	
2: 840 Interval (same units as above)	660~840 分は C4 を ON
3: 44 Set Port 4 High	
6: If time is (P92)	
1: 840 Minutes (Seconds --) into a	
2: 1440 Interval (same units as above)	840~1440 分は C4 を OFF
3: 54 Set Port 4 Low	

Fig. 6.5 Sample program for the data-collection using a cellular phone with wiring shown in Fig.6.4.

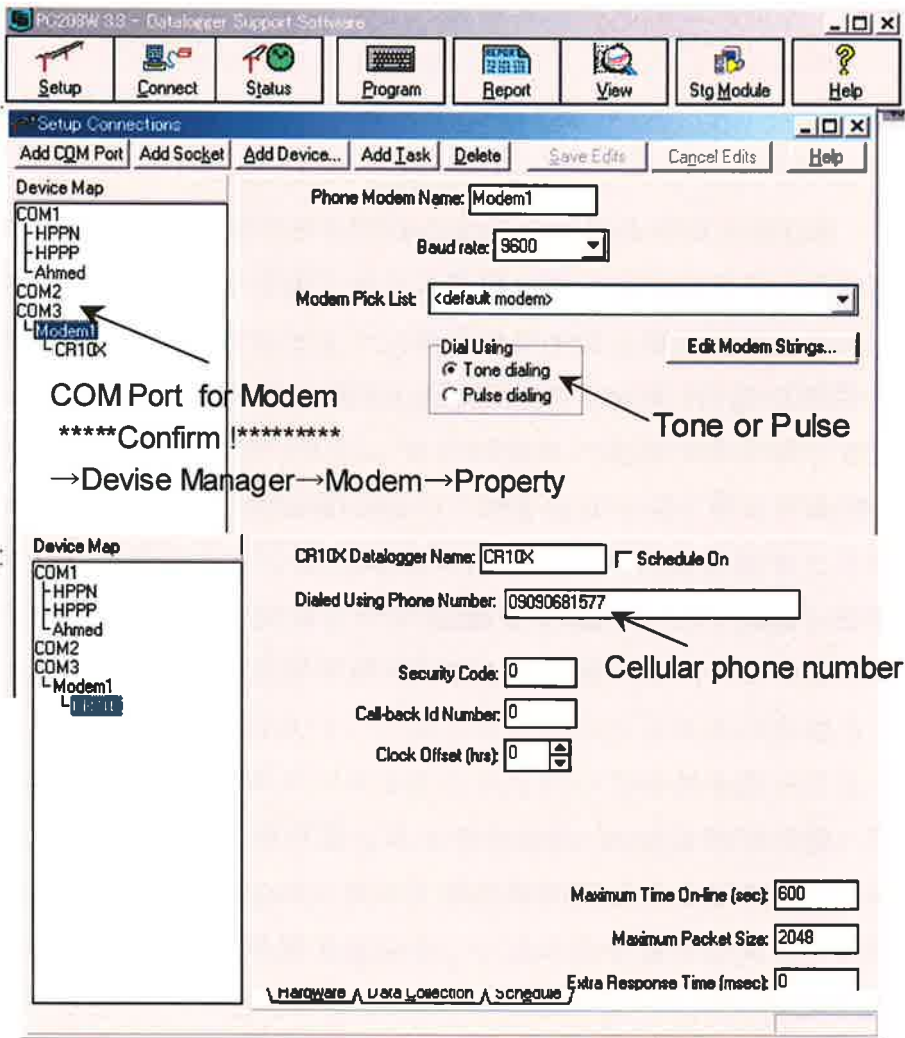


Fig. 6.6 The screen of PC208W for data-collection using a cellular phone.

用できる場所であるか否かである。

6. 4 まとめ

本章では、Suction Controlled Flux Sampler (SCFS)を含む、下方浸透水をモニタリングシステムの実用化に必要な留意点を示した。

フィルターや土壌の種類を変えてシミュレーションを行い、採水装置周辺の土壌水分量の変化やマトリックポテンシャルの変化から、SCFSを様々な土壌に適用させる可能性を検討した。一般に、フィルターにサクションをかけて下方浸透水を採取する際、様々なフィルターが使用されており、またフィルター直上のマトリックポテンシャルを周囲の土壌と全く同じになるよう制御する採水基準が用いられている。しかし、砂質土壌においては、浸潤前線または排水後退線の移動の結果、水分量が特に低い不飽和部分がG4フィルター直上に取り残される場合があることが明らかとなっていた(第II章)。砂質土壌でG4フィルターよりも透水性の低いフィルターを用いた場合は、この封じ込め現象が発生せず、吸引判定値を $(h_c - h_{LR}) = 0$ とし、且つ強め(90 cm以上)のサクションを瞬間的にかけるような制御が必要である。G4フィルターを壤土あるいはシルト質壤土に埋設した場合にも、この現象が観察され、G4フィルターの透水性の高さがフィルター直上に不飽和部分を作る要因となっていると考えられた。土壌とフィルターの組み合わせ、あるいはフィルターにかけるサクションの大きさが採水装置周辺の土壌水分に変化をもたらすため、流線を乱さずに浸透水を採水するには、シミュレーション結果を反映させ、それぞれの状況に応じた厳密なサクション制御を行う必要があることが明らかとなった。

容易に足を運ぶことができないフィールドにも下方浸透水モニタリングシステムを設置し、遠く離れた研究室から携帯電話を利用してデータを回収することを想定し、携帯電話データ通信コントローラを利用したシステムを構築した。アンテナ付携帯電話データ通信コントローラ、長距離通信用インターフェースおよびスルーコネクションアダプターを追加することで、モニタリングシステムのコストが上がるが、各種計測機器の測定データを遠隔地からモニターすること、およびデータを回収することが可能となった。また、採取した下方浸透水を回収に行く頻度を下げることのできるコールバックシステムの有用性についても確認することができた。

第七章

総合考察

様々な環境負荷物質による土壌や地下水の汚染問題が起こり、汚染防止の観点からも現象の予測が必要とされるようになった。しかし、汚染物質は土壌中を等しく移動するのではなく、土壌孔隙の不均一性の影響を強く受けて、予測し得ないような汚染が多く見られる(長谷川 2002)。汚染の発生や拡大を予測し、適切な対策を施すためにも、まずは現象の観察つまりモニタリングが重要であり、本研究では、根群域からの下方浸透水モニタリングを行った。自動でサクションを制御することにより、下方浸透水の流線を乱すことなく最も効率よく採取可能な装置を開発し、その装置と各種センサー技術とを併用したシステムの構築を目指した。

第II章では、僅かなサクション変化で大きく土壌水分量が変化するような砂質土壌においても、浸透水を採取可能な装置(Suction-Controlled Flux Sampler, SCFS)を開発した。既存のサクション制御型サンプラーの改良から始めることとし、まずはフィルターの選定を行い、透水性や空気侵入値、目詰まりについて考慮した結果、孔径5~10 μm のガラスフィルターが最適であると判断した。次に、シミュレーションを行い、採水のためにかけるサクションが、採水フィルター周辺の土壌水分量に与える影響を予測した。その結果、サクションをかけた採水を行うことでフィルター直上に特に土壌水分量の低い不飽和部分が形成され、次の浸透水の到達時にもそれが取り残されていることが明らかとなった。シミュレーション結果を考慮に入れると、SCFSの採水吸引判定値($h_c - h_{LR}$)を、周囲と同じというよりはわずかに(5 cm)乾燥側に設定するほうが良いことを示した。また、弱いサクションをかけるためにバッファー容器を採用し、土壌組成の違いに応じ、バッファー容器を設けることによってフィルターにかけるサクションを調整できることが明らかとなった。

砂質土壌での浸透水採取に適するよう開発したSCFSの、採水性能の評価を第III章で行った。鳥取砂丘砂を充填した土壌カラム内にSCFSを埋設し、連続降雨の定常状態下および短期降雨の非定常状態下における採水効率を算出した。この室内土壌カラム実験から、94~121%の高い採水効率が算出され、SCFS

は効率の良い採水を行っていることが明らかとなった。また、改良を加えた自動サクション制御システムの有用性を確認できた。

第IV章では、SCFSの砂質圃場における採水性能の評価、およびラッキョウ栽培下で1年間にわたる根群域からの肥料成分溶脱測定を行った。SCFSは砂質圃場においても採水効率92~115%を記録し、効率の良い採水を行ったことが明らかとなった。しかし、実際の圃場においては、降雨強度や先行降雨の有無が採水効率に大きく影響していた。深度別に挿入した各種センサーの測定値とSCFSの採水結果から、規定量の施肥や灌漑を行っていれば肥料の溶脱量は抑えられることが示唆された。一方、灌漑直後に予測・管理不可能な降雨があった場合、あるいは先行降雨後に強い降雨が続いた場合に根群域からの下方浸透が発生しやすく、肥料溶脱量も増えることが推察された。また、ラッキョウの生育停滞期で追肥のない期間において、降雨や降雪に伴う下方浸透水の発生および各種陰イオンの溶脱は少ないことが明らかとなった。深度別のTDRセンサーによる土壌溶液中のEC測定では、 EC_w が土壌水分量(θ)の測定精度の影響を大きく受けたため、溶質移動傾向を捉える指標として利用しにくい結果となってしまったが、 EC_b の変化からでも、その傾向をモニターすることが可能であった。さらに、SCFSの採水チューブ内に挿入した4極塩分センサーを用いて浸透水中のEC変化をモニタリングすること、SCFSで直接採水した浸透水を分析することで、その水質変化を詳細に把握することが可能であった。センサーを用いて土壌中の溶質移動傾向を捉え、SCFSによって下方浸透水の水量および水質の両方を把握することが可能なモニタリングシステムを構築できた。

SCFSは、室内実験および圃場実験の両方で高い採水効率をあげ、下方浸透水の採水性能の高さを示した。しかし、自動でサクションを制御するために様々な装置から構成された結果、コストが高く、採水面積を十分に確保することが難しい。そこで、より安価な浸透水採取装置の開発とその採水性能評価を第V章で行った。サクション固定型サンプラーの採水効率は149~235%であり、砂質土壌に対して設定したサクションが40cmでは大きすぎたため、SCFSよりも採水過剰傾向にあった。サクション固定型サンプラーを埋設した区においては、下方浸透水がフィルターの埋設深度50cmに到達するまでの速度が速

い。さらに深度 40 cm 付近で土壌水分量が高い状態が続くことから、一度採水が始まると採水継続時間も長くなる傾向にあり、これも採水過剰の一因と考えられた。また、砂質土壌のように透水性の高い土壌においては、サクシオン固定型サンプラーの毛管水切断によって採水が不可能となる問題点も明らかとなった。コストを考慮してサクシオン固定型サンプラーを砂質土壌で使用する場合には、設定するサクシオン値の検討を充分に行う必要がある。また降雨強度・浸透速度に応じた採水が困難であるために、採水過剰となることは避けられないことが示された。

第VI章では、SCFS を含む下方浸透水モニタリングシステムの実用化に際し、留意すべきサクシオン制御法やシステムの拡張について示した。まず、フィルターや土壌の種類を変えてシミュレーションを行い、サクシオンをかけて浸透水を採取する際の装置周辺の土壌水分量変化やマトリックポテンシャル変化から、SCFS を様々な土壌に適用させる可能性を検討した。砂質土壌に対してガラスフィルター以外の採水フィルターを使用することや、ガラスフィルターを砂質とは土性の異なる土壌で使用する場合を想定した。砂質土壌で G4 フィルターよりも透水性の低いフィルターを用いた場合は、フィルター直上で水分量が多くなり易いことから、吸引判定値を $(h_c - h_{LR}) = 0$ とし、且つ強め(90 cm 以上)のサクシオンを瞬間的にかけるような制御が必要である。砂質土壌中で G4 フィルターを用いると、浸潤前線または排水後退線の移動の結果、水分量が特に低い不飽和部分がフィルター直上に取り残される。G4 フィルターを壤土あるいはシルト質壤土に埋設した場合にも、同様の現象が観察され、G4 フィルターの透水性の高さがフィルター直上に不飽和部分を作る要因となっていると考えられた。土壌とフィルターの組み合わせ、あるいはフィルターにかけるサクシオンの大きさが採水装置周辺の土壌水分に影響を与える。流線を乱さずに浸透水を採水するには、シミュレーション結果を反映させ、それぞれの状況に応じた厳密なサクシオン制御を行う必要があることが明らかとなった。

さらに、下方浸透水モニタリングシステムを拡張し、容易に足を運ぶことができないフィールドにも応用させることを検討した。アンテナ付携帯電話データ通信コントローラ、長距離通信用インターフェースなどを追加することで、モニタリングシステムのコストが上がるが、各種計測機器の測定データを遠隔地からモニターおよび回収可能となった。また、採取した下方浸透水を回収に

行く頻度を下げることのできるコールバックシステムの有用性についても確認することができた。

本研究では、根群域からの下方浸透水の水量および水質の両方をより正確に測定できる自動サクション制御型サンプラー、SCFSを開発し、SCFSとセンサー技術を併用したモニタリングシステムによって、ラッキョウ栽培下の砂質土壌の根群域からの肥料成分の溶脱傾向を測定した。SCFSの性能は、室内カラム実験において採水効率を算出し、さらにサクション固定型サンプラーと比較することによって評価した。また、シミュレーション実験により様々な土壌への適用性の検討、さらに屋外での下方浸透水モニタリングの際に必要なとされる技術の試行まで行うことができた。土壌や地下水汚染を引き起こす前に予防的な措置を施す際や、効率的で適切な灌漑および施肥管理の在り方を提案する際の一助となるシステムを構築できたと考えている。今後は、SCFSを用いて、砂質土壌以外の様々な不飽和土壌中の下方浸透水モニタリングを行い、シミュレーション結果と比較することも必要である。また、圃場実験で得られた結果を灌漑や施肥などの作物栽培計画に具体的に反映させ、硝酸態窒素など環境負荷物質による土壌および地下水の汚染軽減に努めたい。

— 付 録 —

付録 1. 略号一覧

SCFS		サクションコントロールフラックスサンプラー, Suction-Controlled Flux Sampler
AVS		自動圧力制御システム, Automated Vacuum System
SFD		採水フィルタ一部, Sampling Filter Devise
WCE	[%]	採水効率, Water-Collecting Efficiency
CWS	[%]	土壌カラム全体の水分貯留量変化, Changes in Water Storage in the column
EC	[dS m ⁻¹]	電気伝導度
EC _w	[dS m ⁻¹]	土壌溶液中の電気伝導度
EC _b	[dS m ⁻¹]	土壌中のバルクの電気伝導度
EC _s	[dS m ⁻¹]	土粒子表面の電気伝導度
EC _{iw-4ele}	[dS m ⁻¹]	4 極塩分センサーで測定した浸透水中の電気伝導度
EC _{iw-bottle}	[dS m ⁻¹]	EC メータで測定した浸透水中の電気伝導度
h_c	[cm]	フィルタ一直上のマトリックポテンシャル
h_{LR}	[cm]	自然土壌中のマトリックポテンシャルの平均値
$(h_c - h_{LR})$	[cm]	吸引判定値
q_i	[mm h ⁻¹]	降雨強度
Q_r	[cm ³]	積算降雨量
q_r	[cm h ⁻¹]	降雨フラックス
Q_e	[cm ³]	積算採水量
q_e	[cm h ⁻¹]	採水フラックス
Q_d	[cm ³]	カラムからの積算排水量
q_s	[cm h ⁻¹]	0~50cm 深における単位時間の水分貯留量変化
α	[cm ⁻¹]	空気侵入値の逆数
n		van Genuchten パラメータ
K_s	[cm s ⁻¹]	飽和透水係数
θ	[cm ³ cm ⁻³]	体積含水率
θ_s	[cm ³ cm ⁻³]	飽和体積含水率
θ_r	[cm ³ cm ⁻³]	残留体積含水率

付録2・第Ⅱ章
Suction Controlled Flux Sampler (SCFS)の自動サクション制御プログラム

*Table 1 Program	プログラム実行時間間隔
01: 0.5 Execution Interval (seconds)	1. 0.5秒

;Measuring of the scale -----	電子天秤による浸透水量の計測
1: Volt (Diff) (P2)	1. 測定回数 1回
1: 1 Repts	2. 測定範囲 2500mV
2: 25 2500 mV 60 Hz Rejection Range	3. DIFFチャンネル DIFF 6
3: 6 DIFF Channel	4. 記録番号 22 : Drainage
4: 22 Loc [Drainage]	
5: 1.0 Mult	
6: 0.0 Offset	

;Automated Vacuum System-----	自動サクション制御-----
2: If time is (P92)	
1: 0 Minutes (Seconds --) into a	正時 5 分ごとに Flag 1 ON
2: 5 Interval (same units as above)	
3: 11 Set Flag 1 High	
3: If Flag/Port (P91)	
1: 11 Do if Flag 1 is High	Flag1 が ON ならば
2: 30 Then Do	
4: Z=Z+1 (P32)	カウント 1 を 1 つあげる
1: 1 Z Loc [Count1]	
5: End (P95)	
6: If (X<=>F) (P89)	
1: 1 X Loc [Count1]	
2: 1 =	カウント 1 が 301 になったら
3: 301 F	
4: 30 Then Do	
7: Do (P86)	
1: 12 Set Flag 2 High	Flag2 を ON
8: Do (P86)	
1: 21 Set Flag 1 Low	Flag1 を OFF
9: Z=F (P30)	
1: 0 F	カウント 1 をゼロに戻す
2: 0 Exponent of 10	
3: 1 Z Loc [Count1]	
10: End (P95)	
11: If Flag/Port (P91)	
1: 12 Do if Flag 2 is High	Flag2 が ON ならば
2: 30 Then Do	
12: Z=Z+1 (P32)	
1: 2 Z Loc [Count2]	カウント 2 を 1 つ上げる
13: Do (P86)	
1: 41 Set Port 1 High	C1をON 電源ボックスに12Vを与える

14: Volt (Diff) (P2)
 1: 1 Repts
 2: 3 25 mV Slow Range
 3: 1 DIFF Channel
 4: 6 Loc [Head1024L]
 5: 11.981 Mult
 6: 2.892 Offset

15: Volt (Diff) (P2)
 1: 1 Repts
 2: 3 25 mV Slow Range
 3: 2 DIFF Channel
 4: 7 Loc [Head1023C]
 5: 12.531 Mult
 6: 3.8943 Offset

16: Volt (Diff) (P2)
 1: 1 Repts
 2: 3 25 mV Slow Range
 3: 3 DIFF Channel
 4: 8 Loc [Head1025R]
 5: 12.959 Mult
 6: 5.566 Offset

17: If time is (P92)
 1: 30 -- Minutes (Seconds --) into a
 2: 60 Interval (same units as above)
 3: 10 Set Output Flag High (Flag 0)

18: Set Active Storage Area (P80)
 1: 3 Input Storage Area
 2: 9 Loc [h1]

19: Average (P71)
 1: 3 Repts
 2: 6 Loc [Head1024L]

20: Z=X+Y (P33)
 1: 9 X Loc [h1]
 2: 11 Y Loc [h3]
 3: 12 Z Loc [h1h3]

21: Z=X*F (P37)
 1: 10 X Loc [h2]
 2: 2 F
 3: 13 Z Loc [h22]

22: Z=X-Y (P35)
 1: 13 X Loc [h22]
 2: 12 Y Loc [h1h3]
 3: 14 Z Loc [Head]

23: Volt (Diff) (P2)
 1: 1 Repts
 2: 4 250 mV Slow Range
 3: 4 DIFF Channel
 4: 15 Loc [Suction]
 5: 20.166 Mult
 6: 49.846 Offset

テンシオメータ No.1024 の測定
 測定範囲 25mV
 DIFF チャンネル DIFF 1
 記録番号 6 : Head1024L
 校正値 $Y = \text{Mult} \times X + \text{Offset}$
 出力 mV→cmH₂O

テンシオメータ No.1023 の測定
 Ch2→Loc.7 「Head1023C」
 出力 mV→cmH₂O

テンシオメータ No.1025 の測定
 Ch3→Loc.8 「Head1025R」
 出力 mV→cmH₂O

測定値を正時 30 秒遅れ
 60 秒間隔で出力せよ

Loc.9 に Head1024L の平均値を
 h1 として表示
 Loc.10 に Head1023C の平均値 h2 として
 Loc.11 に Head1025R の平均値 h3 として

Loc.12 に h1 と h3 の和を
 (h1+h3)

Loc.13 に h2 の 2 倍を
 (2h2)

Loc.14 に内外のテンシオメータの差を
 (Head=2h2-(H1+H3))

採水容器内の圧力測定
 Ch4→Loc.15 「Suction」
 UNSUC No.1029 校正値
 出力 mV→cmH₂O

```

24: Volt (Diff) (P2)
  1: 1      Reps
  2: 5      2500 mV Slow Range
  3: 5      DIFF Channel
  4: 16     Loc [ Reservoir ]
  5: 20.148 Mult
  6: 117.06 Offset

25: If time is (P92)
  1: 30     -- Minutes (Seconds --) into a
  2: 60     Interval (same units as above)
  3: 10     Set Output Flag High (Flag 0)

26: Set Active Storage Area (P80)
  1: 3      Input Storage Area
  2: 17     Loc [ AveSuc ]

27: Average (P71)
  1: 2      Reps
  2: 15     Loc [ Suction ]

28: Z=X*F (P37)
  1: 17     X Loc [ AveSuc ]
  2: 2      F
  3: 19     Z Loc [ AveSuc2 ]

29: Z=X-Y (P35)
  1: 18     X Loc [ AveRes ]
  2: 19     Y Loc [ AveSuc2 ]
  3: 20     Z Loc [ Press ]

30: End (P95)

31: If (X<=>F)(P89)
  1: 2      X Loc [ Count2 ]
  2: 1      =
  3: 401    F
  4: 30     Then Do

32: Do (P86)
  1: 10     Set Output Flag High (Flag 0)

33: Set Active Storage Area (P80)
  1: 1      Final Storage Area 1
  2: 1      Array ID

34: Real Time (P77)
  1: 110 Day,Hour/Minute (midnight = 0000)

35: Z=Z+1 (P32)
  1: 21     Z Loc [ RecordNo_ ]

36: Sample (P70)
  1: 1      Reps
  2: 21     Loc [ RecordNo_ ]

37: Sample (P70)
  1: 1      Reps
  2: 9      Loc [ h1 ]

```

バッファ容器内の圧力測定
Ch5→Loc.16 「Reservoir」
UNSUC No.1030 校正値
出力 mV→cmH₂O

測定値を正時 30 秒遅れで
60 秒間隔に出力

Suction 平均値を Loc.17 : AveSuc に表示
Resovior 平均値を Loc.18 : AveRes に表示

Loc.19 に 2 倍の AveSuc

Loc.20 に Press=AveRes-2AveSuc

カウント 2 が 401 のとき

出力スイッチを ON

最終貯蔵の ID を 1 にする

日付/時刻を読む

レコードカウントを 1 つあげる

Loc.21 にレコードカウントの表示記録

Loc.9 に h1 の値を記録

38: Sample (P70)		
1: 1	Reps	
2: 10	Loc [h2	] Loc.10 に h2 の値を記録
39: Sample (P70)		
1: 1	Reps	
2: 11	Loc [h3	] Loc.11 に h3 の値を記録
40: Sample (P70)		
1: 1	Reps	
2: 14	Loc [Head	] Loc.14 に Head の値を記録
41: Sample (P70)		
1: 1	Reps	
2: 17	Loc [AveSuc	] Loc.17 に AveSuc の値を記録
42: Sample (P70)		
1: 1	Reps	
2: 18	Loc [AveRes	] Loc.18 に AveRes の値を記録
43: Sample (P70)		
1: 1	Reps	
2: 22	Loc [Drainage	] Loc.22 に Drainage の値を記録
44: End (P95)		
45: If (X<=>F) (P89)		
1: 2	X Loc [Count2	] カウント 2 が 421 ならば
2: 1	=	
3: 421	F	
4: 30	Then Do	
46: Do (P86)		
1: 22	Set Flag 2 Low	Flag 2 を OFF
47: Z=F (P30)		
1: 0.0	F	
2: 00	Exponent of 10	カウント 2 をゼロに戻す
3: 2	Z Loc [Count2]
48: End (P95)		
49: If (X<=>F) (P89)		
1: 1	X Loc [Count1	] カウント 1 が 115 より小さければ
2: 4	<	プログラムの最後へ
3: 115	F	
4: 0	Go to end of Program Table	
50: If (X<=>F) (P89)		
1: 1	X Loc [Count1	] カウント 1 が 135 より小さければ
2: 4	<	
3: 135	F	
4: 30	Then Do	
51: If (X<=>F) (P89)		
1: 14	X Loc [Head	] 内外のテンシオ値の差が-10 以上ならば
2: 3	>=	(内側が湿っている)
3: -10	F	
4: 30	Then Do	

```

52: If (X<=>F) (P89)
1: 15 X Loc [ Suction ]
2: 3 >=
3: -60 F
4: 30 Then Do

53: Do (P86)
1: 47 Set Port 7 High

54: Z=Z+1 (P32)
1: 3 Z Loc [ SucCount ]

55: If (X<=>F) (P89)
1: 3 X Loc [ SucCount ]
2: 2 <
3: 30 F
4: 0 Go to end of Program Table

```

採水容器の圧力が-60 以上ならば

C7 を ON(採水容器・フィルター減圧)

サクシオンカウントを1つあげる

サクシオンカウントが30 でなければ
プログラムの最後へ

56: End (P95)

57: End (P95)

```

58: If (X<=>F) (P89)
1: 14 X Loc [ Head ]
2: 4 <
3: -10 F
4: 30 Then Do

```

内外のテンシオ値の差が-10 より小なら
(内側が乾いている)

```

59: If (X<=>F) (P89)
1: 15 X Loc [ Suction ]
2: 4 <
3: -10 F
4: 30 Then Do

```

採水容器の圧力が-10 より小さいならば

```

60: Do (P86)
1: 48 Set Port 8 High

```

C8 を ON(採水容器を大気圧に)

```

61: Z=Z+1 (P32)
1: 5 Z Loc [ AirCount ]

```

エアーカウントを1つあげる

```

62: If (X<=>F) (P89)
1: 5 X Loc [ AirCount ]
2: 2 <
3: 10 F
4: 0 Go to end of Program Table

```

エアーカウントが10 でなければ
プログラムの最後へ

63: End (P95)

64: End (P95)

65: End (P95)

```

66: Do (P86)
1: 58 Set Port 8 Low

```

C8 を OFF(採水容器大気開放終了)

```

67: Z=F (P30)
1: 0 F
2: 0 Exponent of 10
3: 5 Z Loc [ AirCount ]

```

エアーカウントをゼロに戻す

```

68: Do (P86)
1: 57 Set Port 7 Low

```

C7 を OFF(採水容器減圧終了)

69: Z=F (P30)		
1: 0	F	
2: 0	Exponent of 10	
3: 3	Z Loc [SucCount]	サクションカウントをゼロに戻す
70: If (X<=>F) (P89)		
1: 1	X Loc [Count1]	
2: 4	<	
3: 200	F	カウント 1 が 200 より小なら
4: 0	Go to end of Program Table	プログラムの最後へ
71: If (X<=>F) (P89)		
1: 16	X Loc [Reservoir]	
2: 3	>=	
3: -80	F	
4: 30	Then Do	バッファ容器圧力が-80 以上なら
72: If (X<=>F) (P89)		
1: 1	X Loc [Count1]	
2: 4	<	
3: 220	F	カウント 1 が 220 よりも小なら
4: 30	Then Do	
73: Z=Z+1 (P32)		
1: 4	Z Loc [ResCount]	リザーバークウントを1つあげる
74: Do (P86)		
1: 46	Set Port 6 High	C6 を ON (真空ポンプ ON)
75: If (X<=>F) (P89)		
1: 4	X Loc [ResCount]	
2: 4	<	
3: 6	F	リザーバークウントが6 より小なら
4: 0	Go to end of Program Table	プログラムの最後へ
76: Do (P86)		
1: 45	Set Port 5 High	C5 を ON (バッファ容器を減圧)
77: Do (P86)		
1: 0	Go to end of Program Table	プログラムの最後へ
78: End (P95)		
79: Do (P86)		
1: 55	Set Port 5 Low	C5 を OFF (バッファ容器減圧終了)
80: Do (P86)		
1: 56	Set Port 6 Low	C6 を OFF (真空ポンプ OFF)
81: Z=F (P30)		
1: 0.0	F	
2: 00	Exponent of 10	
3: 4	Z Loc [ResCount]	リザーバークウントをゼロに戻す
82: End (P95)		

付録3・第IV章 砂丘砂圃場における下方浸透水モニタリングシステム

- ・ 転倒マス雨量計(1台)
- ・ 浸透水量測定用電子天秤(1台)
- ・ SCFS採取チューブの4極塩分センサー(1本)
- ・ 深度別テンシオメータ(4本×2区)
- ・ 深度別TDRセンサー (4本×2区)
- ・ 深度別地温測定熱電対(4本×2区)

*Table 1 Program

<pre> 01: 60 Execution Interval (seconds) ;Rain-collector (1time 0.2mm)----- 1: Pulse (P3) 1: 1 Reps 2: 1 Pulse Channel 1 3: 2 Switch Closure, All Counts 4: 35 Loc [__Rain__] 5: 0.2 Mult 6: 0.0 Offset ;----- 2: If time is (P92) 1: 0000 Minutes (Seconds --) into a 2: 60 Interval (same units as above) 3: 30 Then Do ;Measuring Temp of TCR----- 3: Temp (107) (P11) 1: 1 Reps 2: 10 SE Channel 3: 3 Excite all reps w/E3 4: 1 Loc [RefTemp] 5: 1.0 Mult 6: 0.0 Offset ;Measuring Temp of Multiplexer<AM16/32>---- 4: Do (P86) 1: 44 Set Port 4 High ;----- 5: Beginning of Loop (P87) 1: 0 Delay 2: 8 Loop Count ;----- 6: Do (P86) 1: 75 Pulse Port 5 ;----- 7: Excitation with Delay (P22) 1: 3 Ex Channel 2: 0 Delay W/Ex (units = 0.01 sec) 3: 2 Delay After Ex (units = 0.01 sec) 4: 0 mV Excitation ;----- 8: Thermocouple Temp (DIFF) (P14) 1: 1 Reps 2: 1 2.5 mV Slow Range 3: 1 DIFF Channel 4: 1 Type T (Copper-Constantan) 5: 1 Ref Temp (Deg. C) Loc [RefTemp] 6: 2 -- Loc [Temp1] 7: 1.0 Mult 8: 0.0 Offset ;----- 9: End (P95) ;----- 10: Do (P86) 1: 54 Set Port 4 Low </pre>	<pre> プログラム全体測定間隔 1. 60秒 ----- 雨量計による降雨量測定 1. 測定回数 1回 2. パルスチャンネル指定 P 1 ----- 4. 記録番号 35 : Rain 5. 1パルス0.2mmとして算出 ----- 60分毎に以下の計測を行え ----- TCR(零点温度補償サーミスター)の計測 1. 測定回数 1回 2. シングルチャンネル SE10 3. Exチャンネル E3 4. 記録番号 1 : RefTemp ----- 熱電対8本の計測 C4 high プレクサーの電源ON ----- 以下の作業を8回繰り返す ----- C5 high プレクサーの時間を合わせる ----- 0.02秒ずつ時間をずらして計測 ----- 熱電対による温度計測 1. 測定回数 1回 2. 2.5mVの範囲で測定 3. DIFFチャンネル DIFF 1に接続 4. 熱電対の種類 銅コンスタンタン 5. 基準温度との比較 RefTempを基準 6. 記録番号 2 : Temp1から順に ----- 繰り返し作業の終了 ----- C4 low プレクサーの電源OFF </pre>
---	---

;Measuring Electric scale No.1-----

11: Volt (Diff) (P2)
 1: 1 Repts
 2: 5 2500 mV Slow Range
 3: 6 DIFF Channel
 4: 37 Loc [Scale]
 5: 1.0 Mult
 6: 0.0 Offset

;4-ele sensor measuring-----

11: Full Bridge w/mv Excit (P9)
 1: 1 Repts
 2: 25 2500 mV 60 Hz Rejection Ex Range
 3: 25 2500 mV 60 Hz Rejection Br Range
 4: 2 DIFF Channel
 5: 1 Excite all reps w/Exchan 1
 6: 2500 mV Excitation
 7: 34 Loc [DrainEC]
 8: 1.0 Mult
 9: 0.0 Offset

;Mesuring Water Content by TDR-----

12: TDR100 Measurement (P119)
 1: 00 SDM Address
 2: 00 Output Option
 3: 1001 MMMP Mux & Probe Selection
 4: 4 Waveform Averaging
 5: 1 Vp
 6: 250 Points
 7: 7 Cable Length (meters)
 8: 7 Window Length (meters)
 9: 0.06 Probe Length (meters)
 10: 0.079 Probe Offset (meters)
 11: 10 Loc [WCAA _____]
 12: 1.0 Mult
 13: 0.0 Offset

;Mesuring Bulk Electrical Conductivity by TDR-----

20: TDR100 Measurement (P119)
 1: 00 SDM Address
 2: 3 Electrical Conductivity
 3: 1001 MMMP Mux & Probe Selection
 4: 4 Waveform Averaging
 5: 1 Vp
 6: 251 Points
 7: 7 Cable Length (meters)
 8: 7 Window Length (meters)
 9: 0.06 Probe Length (meters)
 10: 0.079 Probe Offset (meters)
 11: 18 Loc [ECAA _____]
 12: 9.6232 Mult
 13: 0.0 Offset

;Mesuring Pressure Head by Mini Tensiometer-----

28: Do (P86)
 1: 46 Set Port 6 High

 29: Dn (P86)
 1: 47 Set Port 7 High

 電子天秤の測定

1. 測定回数 1回
 2. 測定範囲 2500mV
 3. DIFFチャンネル DIFF 6
 4. 記録番号 37 : Scale

 採水チューブ内4極塩分センサーの計測
 FullBridgeプログラム

1. 測定回数 1回
 2. 出力2500mVの範囲
 3. "
 4. DIFFチャンネル DIFF 2に接続
 5. EXチャンネル E1
 6. Excitation電力 2500mV
 7. 記録番号 34 : DrainEC

 TDRによる土壌水分量の計測

1. TDR100のアドレス 00
 2. 測定の種類 00 : 水分測定
 3. センサーのチャンネル 1列目1ch
 4. 波形のスタート位置 4m
 5. Vp 1
 6. 計測ポイント数 250
 7. ケーブルの長さ 7m
 8. 波形測定範囲 7m
 9. センサープローブ長さ 0.06m
 10. センサー固有値 0.079
 11. 記録番号 10 : WCAA

*これをセンサーごとに入力繰り返し

 TDRによる電気伝導度の計測

1. TDR100のアドレス 00
 2. 測定の種類 3 : EC測定
 3. センサーのチャンネル 1列目1ch
 4. 波形のスタート位置 4m
 5. Vp 1
 6. 計測ポイント数 250
 7. ケーブルの長さ 7m
 8. 波形測定範囲 7m
 9. センサープローブ長さ 0.06m
 10. センサー固有値 0.079
 11. 記録番号 18 : ECAA
 12. ECのセンサー固有値 9.6632

*これをセンサーごとに入力繰り返し

 テンシオメータの測定

C6 high 電源ボックス電源ON

 C7 high プレクサーの電源ON

30: Excitation with Delay (P22)	
1: 2 Ex Channel	
2: 0 Delay W/Ex (units = 0.01 sec)	0.02秒ずつ時間をずらして計測
3: 2 Delay After Ex (units = 0.01 sec)	
4: 0000 mV Excitation	
31: Beginning of Loop (P87)	
1: 0 Delay	以下の作業を8回繰り返す
2: 8 Loop Count	
32: Do (P86)	
1: 78 Pulse Port 8	C8 high プレクサーの時間合わせ
33: Volt (Diff) (P2)	
1: 1 Repts	電圧測定
2: 5 2500 mV Slow Range	1. 測定回数 1回
3: 4 DIFF Channel	2. 測定範囲 2500mV
4: 26 -- Loc [UN1056]	3. DIFFチャンネル DIFF 4
5: 1 Mult	4. 記録番号 26 : UN1056から順に
6: 0 Offset	
34: End (P95)	繰り返し作業の終了
35: Do (P86)	
1: 56 Set Port 6 Low	C6 low 電源ボックス電源OFF
36: Do (P86)	
1: 57 Set Port 7 Low	C7 low プレクサーの電源OFF
;Recording into Datalogger-----	
37: Do (P86)	測定データの出力記録
1: 10 Set Output Flag High (Flag 0)	データを出力記録せよ
38: Set Active Storage Area (P80)	
1: 1 Final Storage Area 1	記録するエリア1番
2: 1 Array ID	
39: Resolution (P78)	
1: 1 High Resolution	測定精度を高める
40: Real Time (P77)	
1: 1111 Year,Day,Hour/Minute,Seconds	日時分秒の記録
41: Totalize (P72)	
1: 1 Repts	データの積算
2: 35 Loc [__Rain__]	記録番号35 雨量データを積算
42: Sample (P70)	
1: 36 Repts	記録する全データ数
2: 1 Loc [RefTemp]	
43: End (P95)	終了・ここまでを行ったらプログラム2に戻る

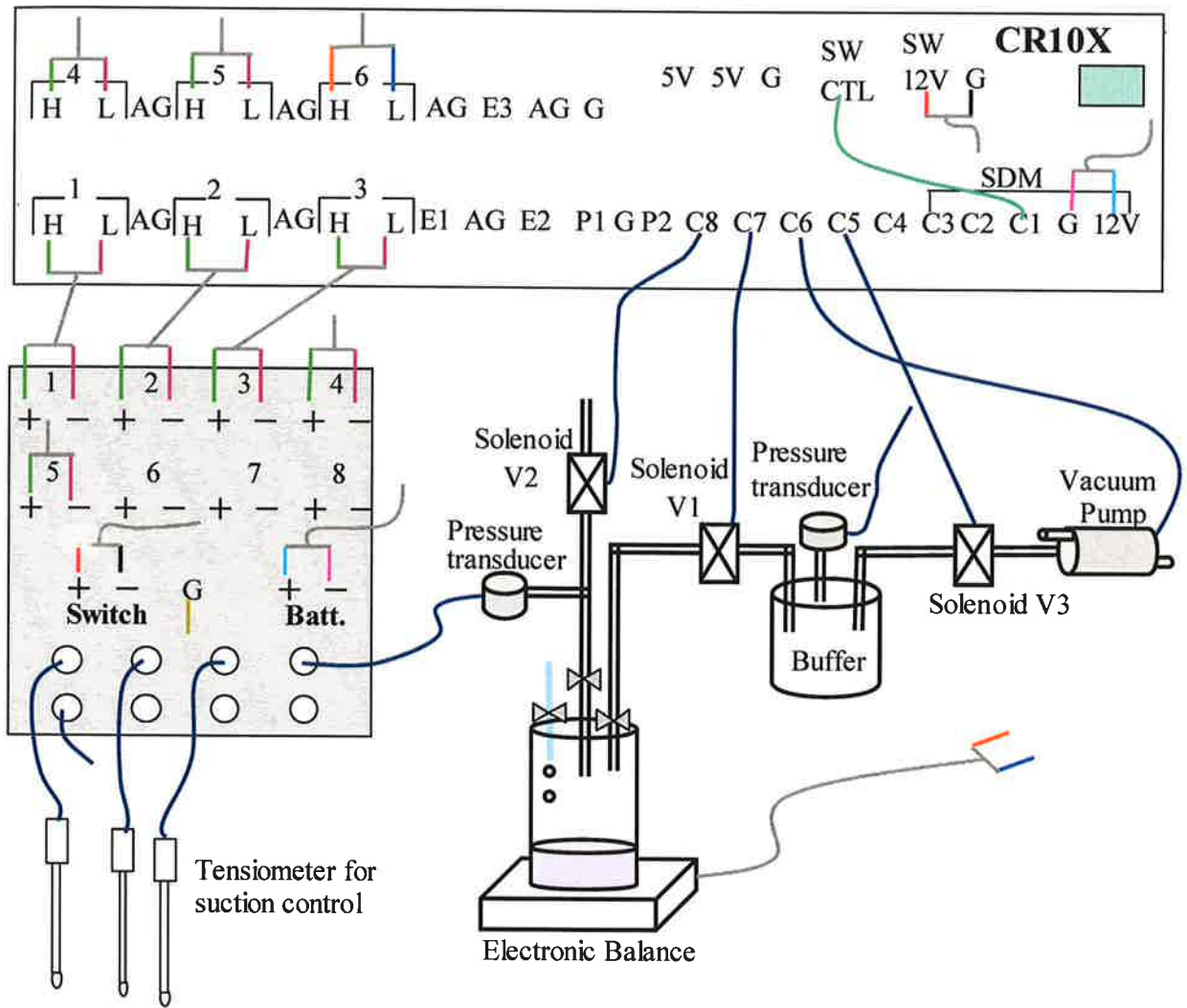


Fig. A-1 A wiring diagram of the Automated Vacuum System (AVS).

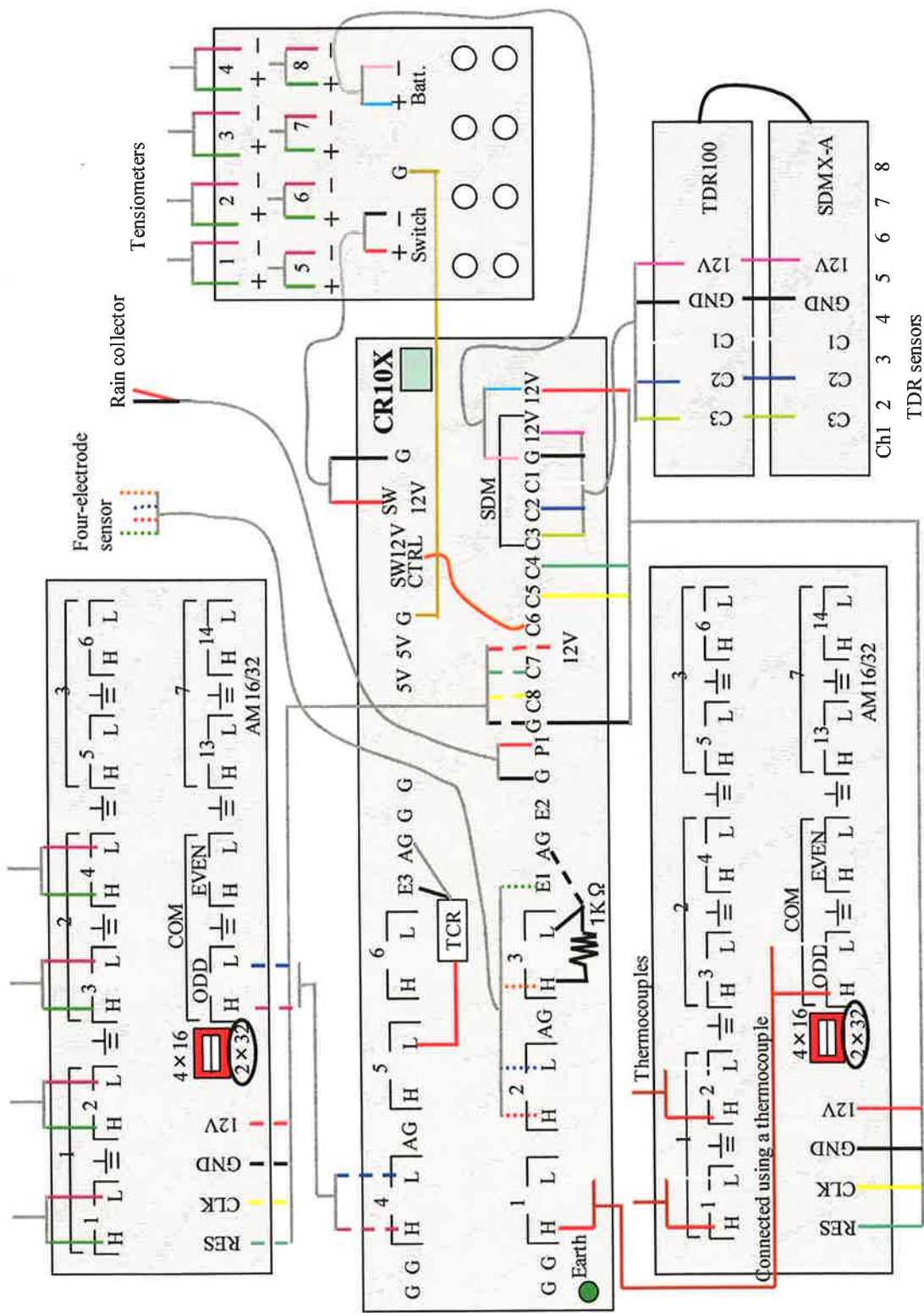


Fig. A-2. A wiring diagram of the several sensors.

付録4・第VI章 SCFSの応用 ーある値を記録すると携帯電話に連絡が入るシステムー
データロガーおよび通信コントローラ、熱電対

*Table 1 Program

```

01: 120 Execution Interval (seconds)
; Measuring of the Battery Voltage-----
1: Batt Voltage (P10)
  1: 1      Loc [ Batt      ]
; Measuring of the internal Temp-----
2: Internal Temperature (P17)
  1: 2      Loc [ RefTemp   ]
; Measuring of the Air Temp-----
3: Thermocouple Temp (DIFF) (P14)
  1: 1      Repts
  2: 1      2.5 mV Slow Range
  3: 5      DIFF Channel
  4: 1      Type T (Copper-Constantan)
  5: 2      Ref Temp (Deg. C) Loc [ RefTemp ]
  6: 4      Loc [ Temp      ]
  7: 1      Mult
  8: 0      Offset
; Recording measured values-----
4: Do (P86)
  1: 10     Set Output Flag High (Flag 0)
5: Sample (P70)
  1: 4      Repts
  2: 1      Loc [ Batt      ]
; Dial indispensable condition-----
6: If (X<=>F) (P89)
  1: 4      X Loc [ __Temp__ ]
  2: 3      >=
  3: 30     F
  4: 30     Then Do
7: Do (P86)
  1: 11     Set Flag 1 High
8: Else (P94)
9: Do (P86)
  1: 21     Set Flag 1 Low
10: End (P95)
; Call back program-----
11: If Flag/Port (P91)
  1: 11     Do if Flag 1 is High
  2: 30     Then Do

```

プログラム全体測定間隔

1. 120秒

バッテリー測定

1. 記録番号 1: バッテリー値

パネル内部温度測定

1. 記録番号 2: RefTemp

熱電対による温度計測

7. 測定回数 1回
8. 2.5mVの範囲で測定
9. DIFFチャンネル DIFF 5に接続
10. 熱電対の種類 銅コンスタンタン
11. 基準温度との比較 RefTempを基準
12. 記録番号 4: Temp

測定データを出力せよ

測定値の記録

1. 記録データ数 4個
2. 記録番号1から順に

コールバックの条件設定

Loc 4に記録される温度のデータが
30 以上であれば
実行

Flag1 ON

そうでなければ (Temp が 30 未満なら)

Flag1 OFF

条件設定終了

もし Flag1 が ON になったら

次のことを実行せよ

12: Send Printer Character (P98)

1: 42 Printer/9600 Baud

13: Extended Parameters 4 Digit (P68)

- 1: 65 Option
- 2: 84 Option
- 3: 81 Option
- 4: 48 Option
- 5: 13 Option
- 6: 0 Option
- 7: 0 Option
- 8: 0 Option

14: Excitation with Delay (P22)

- 1: 1 Ex Channel
- 2: 0 Delay W/Ex (units = 0.01 sec)
- 3: 1000 Delay After Ex (units = 0.01 sec)
- 4: 0 mV Excitation

15: Send Printer Character (P98)

1: 42 Printer/9600 Baud

16: Extended Parameters 4 Digit (P68)

- 1: 65 Option
- 2: 84 Option
- 3: 68 Option
- 4: 84 Option
- 5: 48 Option
- 6: 57 Option
- 7: 48 Option
- 8: 56 Option

17: Extended Parameters 4 Digit (P68)

- 1: 50 Option
- 2: 52 Option
- 3: 56 Option
- 4: 57 Option
- 5: 49 Option
- 6: 54 Option
- 7: 52 Option
- 8: 13 Option

18: End (P95)

PC への文字列送信

Call Back を行え

(Data-Call Back 42 9600Baud Rate, Table12-6,12-7)

P68 の行で右クリック

* Help - ASCII Characters - Tables を参照に文字
あるいは数字の入力

65:A 84:T 81:Q 48:0 13:Finish
(13 は送信文字列終了の意味)

10 秒時間をずらして以下を行う

PC・携帯への文字列送信

Call Back を行え

(CR10X マニュアル,

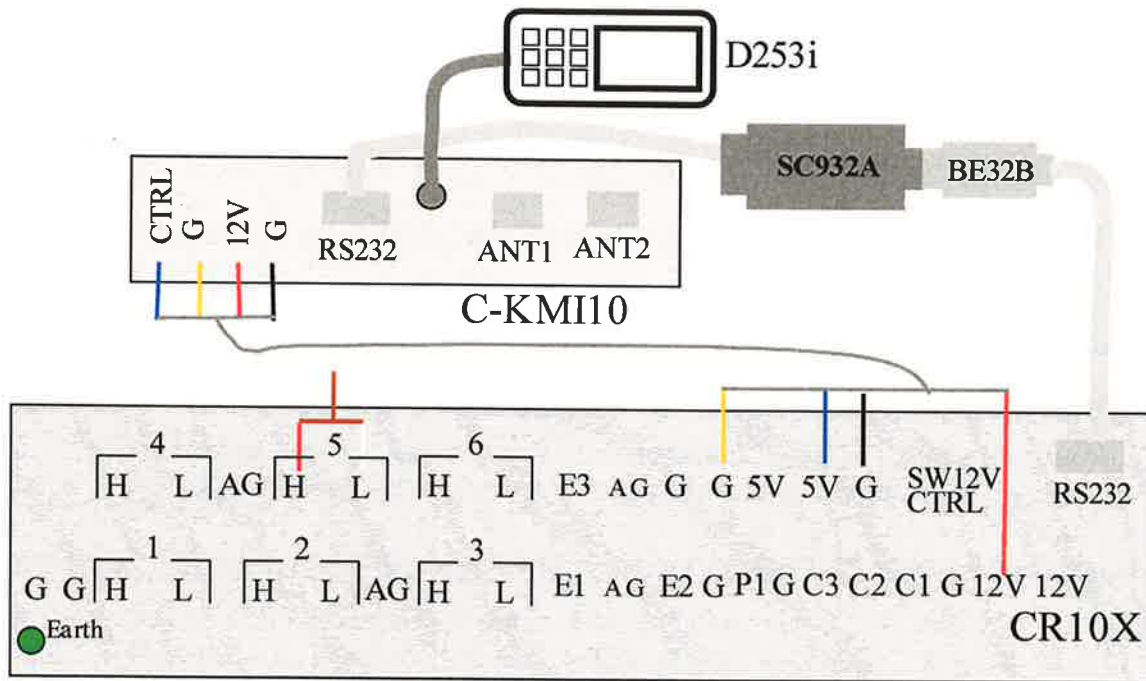
Data-Call Back 42 9600Baud Rate, Table12-6,12-7)

P68 の行で右クリック

* Help - ASCII Characters - Tables を参照に文字
あるいは数字の入力

- | | | | |
|-------|---|---|---------------------------|
| 1: 65 | A | } | 携帯電話会社によって
決定される 4 文字 |
| 2: 84 | T | | |
| 3: 68 | D | | |
| 4: 84 | T | | |
| 5: 48 | 0 | } | Call-Back アラート先
携帯電話番号 |
| 6: 57 | 9 | | |
| 7: 48 | 0 | | |
| 8: | | } | 文字列送信終了 |
| 1: | | | |
| 2: | | | |
| 3: | | | |
| 4: | | | |
| 5: | | | |
| 6: | | | |
| 7: | | | |
| 8: 13 | | | |

終了



EDLOG Help

ファイル(F) 編集(E) しており(M) ヘルプ(H)

目次(C) | 検索(S) | 戻る(B) | ヒストリ(T)

Instruction 68 -- Extended Parameter, 4-digit

A Processing Instruction that is used immediately after [Instruction 15](#), [Instruction 97](#), [Instruction 98](#), or [Instruction 100](#) to enter a variable number of parameters. This instruction can be entered several times in a sequence.

Used After Instruction 15

Instruction 68 is used to apply ASCII filters to the received data allowing the beginning of the actual data set to be located. Multiple filters can be applied if the data are imbedded in a long string. This instruction is used to enter the ASCII characters for the values you want to use as a filter; separate filters by a zero. For more information, see [Filter Example](#).

Used After Instruction 97

Instruction 68 is for entering RF IDs, phone numbers, and optional modem command strings. For more information, see [Parameter Entries](#).

Used After Instruction 98

Instruction 68 is for entering the decimal values for the ASCII characters; there is a 255 character limit.

Used After Instruction 100

Instruction 68 is used to manually override the 1502B front panel settings which are normally controlled automatically by the datalogger in conjunction with [Instruction 100](#). Instruction 68 affects only the [Instruction 100](#) that immediately precedes it. For more information, see:

Decimal Characters

The following tables lists the decimal characters that represent the ASCII character

- [Table 1](#) -- lists CONTROL, SPACE, and DEL characters
- [Table 2](#) -- lists punctuation and mathematical symbols
- [Table 3](#) -- lists numbers
- [Table 4](#) -- lists letters

* P68 の行で右クリック
Help—ASCII Characters—Tables
を参照に文字あるいは数字の入力

Table 3 -- Decimal Characters for Numbers

Decimal	ASCII Characters
48	0
49	1
50	2
51	3
52	4
53	5
54	6
55	7
56	8
57	9

Fig. A-3 A wiring diagram of the call-back system and help for ASCII characters input.

一 謝 辞 一

本研究を遂行するにあたり、鳥取大学乾燥地研究センター 井上光弘助教授、島根大学生物資源科学部 森也寸志助教授に、多大なるご指導ご鞭撻を賜りました。深甚なる感謝の意を表します。鳥取大学乾燥地研究センター 山本太平教授をはじめ、諸先生方および職員の皆様には、研究環境の整備や本論文の取りまとめに御配慮いただきました。山口大学農学部 西山壮一教授、鳥取大学農学部 猪迫耕二助教授には貴重な御意見を賜りました。心より感謝申し上げます。

実験の実施等の際し、鳥取大学乾燥地研究センターの研究員の方々、土地保全研究室の諸兄妹に貴重な助言と激励、ご協力をいただきました。深く感謝の意を表します。最後に、研究の遂行に種々の御配慮をいただいた皆様と家族に感謝いたします。

— 引用文献 —

- Amente G, Baker JM, and Reece CF(2000): Estimation of soil solution electrical conductivity from bulk soil electrical conductivity in sandy soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, 1931-1939
- Babiker IS, Mohamed MAA, Terao H, Kato K, and Ohta K(2004): Assessment of groundwater contamination by nitrate leaching from intensive vegetable cultivation using geographical information system. *Environ. Int.*, 29, 1009-1017
- Barzegar AR, Herbert SJ, Hashemi AM, and Hu CS(2004): Passive pan sampler for vadose zone leachate collection. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68, 744-749
- Boll J, Steenhuis TS, and Selker JS(1992): Fiberglass wicks for sampling of water and solutes in the vadose zone. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 701-707
- Bowman MS, Clune TS, and Sutton BG(2002): A modified ceramic sampler and lysimeter design for improved monitoring of soil leachates. *Water Res.*, 36, 799-804
- Brandi-Dohrn FM, Dick RP, Hess M, and Selker JS(1996-a): Field evaluation of passive capillary samplers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60, 1705-1713
- Brandi-Dohrn FM, Dick RP, Hess M, and Selker JS(1996-b): Suction cup sampler bias in leaching characterization of an undisturbed field soil. *Water Resour. Res.*, 32, 1173-1182
- Brye KR, Norman JM, Bundy LG, and Gower ST(1999): An equilibrium tension lysimeter for measuring drainage through soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63, 536-543
- Dehghanisanij H, Yamamoto T, and Inoue M(2004): Practical aspect of TDR for simultaneous measurements of water and solute in a dune sand field. *J. Jpn. Soc. Soil Phys.*, 98, 21-30
- 遠藤常嘉・本名俊正・井上光弘・井上敦央・本城和則・藤巻晴行・山本定博・山本太平(2003): 砂質土壌下における連続および間断灌漑に伴う塩と水の動態—塩分動態モニタリングシステムの適用—. 日本砂丘学会誌, 49(3), 105-112
- Flury M, Yates MV, and Jury WA(1999): Numerical analysis of the effect of the

- lower boundary condition on solute transport in lysimeters. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63, 1493-1499
- 藤井信一郎(1997): 砂丘地農業の土壤保全と肥培管理. 日本砂丘学会誌, 44(2), 49-55
- Fujimaki H and Inoue M(2003): Reevaluation of the multistep outflow method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Vadose Zone J.*, 2, 409-415
- Gee WG, Zhang ZF, and Ward AL(2003): A modified vadose zone fluxmeter with solution collection capability. *Vadose Zone J.*, 2, 627-632
- Goyne KW, Day RL, and Chorover J(2000): Artifacts caused by collection of soil solution with passive capillary samplers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, 1330-1336
- Haines BL, Waide JB, and Todd RL(1982): Soil solution nutrient concentrations sampled with tension and zero-tension lysimeters-Report of discrepancies-. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46, 658-660
- Hart GL and Lowery B(1997): Axial-radial influence of porous cup soil solution samplers in a sandy soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61, 1765-1773
- 長谷川周一(2002): I. 土壤浸透水のモニタリングと予測, 環境負荷を予測する, 長谷川周一・波多野隆介・岡崎正規編著, pp.13-14, 博友社, 東京
- 波多野隆介(2002): IV. 暗渠排水を利用した硝酸溶脱のモニタリングとモデリングー灰色低地土タマネギ畑におけるケーススタディーー, 環境負荷を予測する, 長谷川周一・波多野隆介・岡崎正規編著, pp.57-74, 博友社, 東京
- 早川嘉彦・金澤健二・寶示戸雅之(2002): VI. 畑地からの硝酸態窒素の流出を抑制するー草地緩衝帯の必要幅の算出ー, 環境負荷を予測する, 長谷川周一・波多野隆介・岡崎正規編著, pp.98-102, 博友社, 東京
- Holder M, Brown KW, Thomas JC, Zabcik D, and Murray HE(1991): Capillary-wick unsaturated zone soil pore water sampler. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55, 1195-1202
- 本名俊正(2004): 鳥取県の砂丘農業地帯における地下水汚染の実態解明とその対策. 平成 15 年度地域貢献特別支援事業費事業報告書, pp114-119, 鳥取大学地域貢献推進室.
- 猪迫耕二・田熊勝利・井上光弘・東直子・米澤昌都(2005): ウィックサンブラ

- 一による砂丘畑降下浸透水の採取について, 第 52 回日本砂丘学会講演
要旨集, 12-13
- 井上光弘(1994): 埋設型土壤感圧水分センサー. 日本砂丘学会誌, 41(2), 74-79
- 井上光弘・塩沢昌(1994): 4 極法による土壤カラム内の電気伝導度測定とその応用. 土壤の物理性, 70, 23-28
- Inoue M and Dirksen C(2000): An Automatically operated soil water flux meter of improved design. *In Proc. of JSIDRE annual meeting, 636-637, The Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering.*
- Inoue M, Šimůnek J, Shiozawa S, and Hopmans JW(2000): Simultaneous estimation of soil hydraulic and solute transport parameters from transient infiltration experiments. *Advances in Water Resources, 23, 677-688*
- 伊藤良栄・溝口勝・平藤雅之・深津時宏・木浦卓治・亀岡孝治(2003): VPN を利用した遠隔地土壤環境モニタリング. 平成 15 年度農業土木学会講演要旨集, 940-941
- Jemison Jr. JM and Fox RH(1992): Estimation of zero-tension pan lysimeter collection efficiency. *Soil Sci.*, 154, 85-94
- 地盤工学会(2004): 不飽和地盤の挙動と評価. pp.56-67, 報光社, 東京
- Jury WA, Gardner WR, and Gardner WH(1991): Groundwater contamination: Solute transport in soil. *In Soil Physics, 5th Ed., p159-164, John Wiley & Sons, Inc., New York*
- 金子文宜(2002): II. 黒ボク露地畑における硝酸態窒素溶脱のモニタリング, 環境負荷を予測する. 長谷川周一・波多野隆介・岡崎正規編著, pp.37-44, 博友社, 東京
- 環境土壤学編集委員会(1998): 豊かな土づくりをめざして—環境土壤学—. pp.98-99, 農業土木学会, 東京
- 河合隆行・神近牧男・木村玲二・多田泰之・小玉芳敬・佐倉保夫(2006): 集塵機を用いた砂地における簡易ボーリング法. 日本砂丘学会誌, 52(3), (印刷中)
- Kimura R, Kamichika M, Takayama N, Matsuoka N, and Zhang X(2004): Heat balance and soil moisture in the Loess Plateau, China. *J. Agric. Meteorol.*, 60, 103-110
- Klute A, and Dirksen C(1986): Hydraulic conductivities and diffusivity: Laboratory

- methods. *In* Methods of soil analysis. Part 1. 2nd Ed. Physical and Mineralogical Methods. A. Klute.(ed.), pp.687-734, ASA-SSSA, Madison, WI
- 小杉賢一朗(2000): 不飽和土壌中の鉛直浸透水の不攪乱採取手法の開発. 水文・水資源学会誌, 13(6), 462-471
- Kosugi K and Katsuyama M(2004): Controlled-suction period lysimeter for measuring vertical water flux and convective chemical fluxes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68, 371-382
- Landon MK, Delin GN, Komor SC, and Regan CP(1999): Comparison of the stable-isotopic composition of soil water collected from suction lysimeters, wick samplers, and cores in a sandy unsaturated zone. *J. Hydrol.*, 224, 45-54
- Lentz RD and Kincaid DC(2003): An automated vacuum extraction control system for soil water percolation samplers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67, 100-106
- Maeda M, Liyanage BC, and Ozaki Y(1999): Water collection efficiency of wick samplers under steady state flow conditions. *Soil Sci. Plant Nutri.*, 45(2), 485-492
- Maeda M, Zhao B, Ozaki Y, and Yoneyama T(2003): Nitrate leaching in an Andisol treated with different types of fertilizers. *Environmental Pollution*, 121, 477-487
- 松本聰(1993): 砂丘土壌における有機物施用の意義. 日本砂丘学会誌, 40(2), 77-80
- McGuire PE, Lowery B, and Helmke PA(1992): Potential sampling error-Trace metal adsorption on vacuum porous cup sampler. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 74-82
- Mertens J, Barkle GF, and Stenger R(2005): Numerical analysis to investigate the effects of the design and installation of equilibrium tension plate lysimeters on leachate volume. *Vadose Zone J.*, 4, 488-499
- 三木直倫(2002): III.硝酸態窒素の土層内動態をモニタリングする, 環境負荷を予測する, 長谷川周一・波多野隆介・岡崎正規編著, pp.13-14, 博友社, 東京
- 溝口勝・三上正洋・石井悟(2003): 携帯電話を利用した土壌情報モニタリングシステム. 土壌の物理性, 92, 25-30
- 森也寸志・木原康孝・井上光弘・福島晟(2001): マルチステップ流出法による

- 不攪乱土壌の不飽和透水係数の推定. 農業土木論文集, 213, 61-68
- Mori Y, Hopmans JW, Mortensen AP, and Kluitenberg GJ(2003): Multi-functional heat pulse probe for the simultaneous measurement of soil water content, solute concentration, and heat transport parameters. *Vadose Zone J.*, 2, 561-571
- Nagumo T, Woli KP, and Hatano R(2004): Evaluating the contribution of point and non-point sources of nitrogen pollution in stream water in a rural area of central Hokkaido, Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 50, 109-117
- 中野政詩・宮崎毅・塩沢昌・西村拓(1995): 土壌物理環境測定法, pp.89-102, 東京大学出版会, 東京
- 中村公人・三野徹・廣野祐平(2003): 畑地における窒素の挙動とその制御(3)ー畑地土壌中の浸透過程における窒素動態ー. 畑地農業, 536, 2-9
- 中尾友紀・猪迫耕二・井上光弘・田熊勝利(2003): フラックスメータによる砂中降下浸透水の採取効率. 平成 15 年度農業土木学会講演要旨集, 334-335
- Nissen HH, Moldrup P, and Henriksen K(1998): Time domain reflectometry measurement of nitrate transport in manure-amended soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62, 99-109
- 登尾浩助(2003): 実践 TDR 法活用 - 土壌中の水分・塩分量の同時測定 - . 土壌の物理性, 93, 57-65
- 登尾浩助・颯田尚哉・古賀潔・馬場秀和・向井田善朗(2005): TDR 法を使った不飽和土壌中における水分・硝酸態窒素含量の測定. 土木学会論文集, 783, 15-21
- 農業研究センター(1999): 畑地からの硝酸態窒素溶脱量のモニタリングに関する実務問題検討会. pp.45-49, 155-159. 農林水産省, 農業研究センター土壌肥料部.
- 小川吉雄(2000): 地下水の硝酸汚染と農法転換. p.25, pp.66-82, 農山漁村文化協会, 東京
- 岡崎正規(2002): 土壌の汚染と浄化の問題. 土壌の物理性, 90, 21-26
- Rhoades JD and Oster JD(1986): Solute content, *In* Methods of soil analysis. Part 1. 2nd Ed. Physical and Mineralogical Methods. A. Klute.(ed.), pp.985-1006, ASA-SSSA, Madison, WI

- Rhoades JD, Raats PAC, and Prather RJ(1976): Effects of liquidphase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40, 651-655
- Sano S, Yanai J, and Kosaki T(2004): Evaluation of soil nitrogen status in Japanese agricultural lands with reference to land use and soil types. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 50, 501-510
- Schoen R, Gaudet JP, and Bariac T(1999): Preferential flow and solute transport in a large lysimeter, under controlled boundary conditions. *J. Hydrol.*, 215, 70-81
- Siemens J and Kaupenjohann M(2003): Dissolved organic carbon is released from sealings and glues of pore-water samplers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67, 795-797
- Siemens J and Kaupenjohann M(2004): Comparison of three methods for field measurement of solute leaching in a sandy soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68, 1191-1196
- Šimůnek, J., Sejna, M., and van Genuchten, M.Th.(1999): The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 2.0. IGWMC-TPS-53, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado
- Sparks DL (2003): Contaminants in waters and soils: Environmental soil chemistry an over view. *In Environmental Soil Chemistry*, 2nd Ed., p.4-19, Academic Press, London
- Spalding RF, Watts DG, Schepers JS, Burbach ME, Exner ME, Poreda RJ, and Martin GE(2001): Controlling nitrate leaching in irrigated agriculture. *J. Environ. Qual.*, 30, 1184-1194
- 鈴木慶次郎・志賀弘行(2004): 浸透水の硝酸性窒素濃度から見た網走地域の黒ボク土畑における投入窒素限界量. *日本土壤肥料学雑誌*, 75(1), 45-52
- 田中正(2001): 4.地下水の自然涵養, 雨水浸透・地下水涵養, 日本地下水学会編, pp.50-57, 理工図書, 東京
- Toride N, Inoue M, and Leij FJ(2003): Hydrodynamic dispersion in an unsaturated dune sand. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67, 703-712
- 取出伸夫・井上光弘監訳(2004): Modelling variably saturated flow with HYDRUS-2D(Japanese translation). HYDRUS-2D による土中の不飽和流

れの計算. pp.1.1-1.53, 農業土木学会土壌物理研究部会 HYDRUS グループ

van Grinsven JJM, Booltink HWG, Dirksen C, van Breemen N, Bongers N, and Waringa N(1988): Automated in situ measurement of unsaturated soil water flux. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52, 1215-1218

Wagenet RJ(1986): Water and solute flux, *In* Methods of soil analysis. Part 1. 2nd Ed. Physical and Mineralogical Methods. A. Klute.(ed.), pp.1055-1062, ASA-SSSA, Madison, WI

矢野友久・井上光弘・小谷佳人(1983): 砂質土壌の土壌水分特性曲線とその温度依存性について. 鳥取大砂丘研報, 22, 1-8

Zhu Y, Fox RH, and Toth JD(2002): Leachate collection efficiency of zero-tension pan passive capillary fiberglass wick lysimeters. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66, 37-43

— 摘 要 —

農地からの硝酸態窒素を始めとする肥料成分の流出が、地下水など水環境に及ぼす影響は大きい。世界的に見れば、乾燥・半乾燥地域の土性は砂質土壤であることが多いが、近年、透水性が高く、肥料の溶脱リスクの高い砂質圃場においても灌漑・施肥技術の発達により営農活動が可能になっている。そのため、砂質圃場の根群域からの下方浸透水量・水質を正確に把握して土壤および地下水の汚染過程を解明し、硝酸態窒素など環境負荷物質による汚染防止のための適切な施肥管理や水管理を行うことが求められている。下方浸透水の水量測定だけでなく水質分析も行うためには、土壤中を移動する下方浸透水を採取する必要がある。本研究では、自動でサクションを制御することにより、下方浸透水の流線を乱すことなく最も効率よく採取可能な装置を開発し、その装置と各種センサー技術とを併用したシステムを用いて、不飽和土壤中の根群域からの下方浸透水モニタリングを行った。

わずかなサクション変化で大きく土壤水分量が増えるような砂質土壤においても、浸透水を採取可能な装置、Suction-Controlled Flux Sampler(SCFS)を開発した。まずはフィルターの選定を行い、透水性や空気侵入値、目詰まりについて考慮した結果、孔径 5~10 μm のガラスフィルター(G4 フィルター)が砂質土壤には最適であると判断した。採水のためにかけるサクションが、採水フィルター周辺の土壤水分量に与える影響を予測したシミュレーション結果からは、フィルター直上に土壤水分量の低い不飽和部分が残ることが示唆された。SCFS の採水吸引判定値($h_C - h_{LR}$)を周囲と同じというよりは、わずかに(5 cm)乾燥側に設定するほうが流線を乱さずに採水可能と考えられた。また、土壤組成の違いに応じてバッファー容器を設けることによって、採水フィルターにかけるサクションを調整できることが明らかとなった。次に、鳥取砂丘砂を充填した土壤カラムを用いて、採水効率を算出することで SCFS の採水性能を評価した。連続降雨の定常状態および短期降雨の非定常状態において、SCFS は 94~121%の高い採水効率を記録し、不飽和の砂質土壤中でも効率の良い浸透水採取が可能であった。

続いて、SCFS の砂質圃場における採水性能の評価、およびラッキョウ栽培下で 1 年間にわたる根群域からの肥料成分溶脱の測定を行った。SCFS は砂質圃場においても 92~115%という高い採水効率を記録したが、降雨強度や先行降雨の有無が採水効率に大きく影響していた。深度別に挿入した各種センサーの測定値と SCFS の採水結果から、規定量の施肥や灌漑を行っていれば肥料の溶脱量は抑えられることが示唆された。一方、灌漑直後に予測・管理不可能な降雨があった場合、あるいは先行降雨後に強い降雨が続いた場合に、根群域下への下方浸透が発生しや

すく、肥料溶脱量も増えることが推察された。また、ラッキョウの生育停滞期で追肥のない期間において、降雨や降雪に伴う下方浸透水の発生および各種陰イオンの溶脱は少ないことが明らかとなった。深度別の TDR センサーや、SCFS の採水チューブ内に挿入した 4 極塩分センサーを用いて、土壌溶液中および浸透水中の電気伝導度の変化をモニターした。さらに浸透水の水質分析結果から、肥料成分の溶脱を詳細に把握することが可能であった。

SCFS より簡易で安価なサクシオン固定型サンプラーの砂質土壌における有用性を検討した結果、その採水効率は 149~235%であった。砂質土壌に対して設定したサクシオンが 40 cm では大きすぎたため、SCFS よりも採水過剰傾向にあった。サクシオン固定型サンプラーでは、一度採水が始まると採水継続時間も長く、これも採水過剰の一因と考えられた。また、サクシオン固定型サンプラーは、砂質のように透水性の高い土壌では装置の毛管水切断によって採水不能となるリスクが高いことも明らかとなった。コストを考えてサクシオン固定型サンプラーを砂質土壌で使用する場合には、設定するサクシオン値の検討を充分に行う必要があり、また降雨強度・浸透速度に応じた採水が困難であるために、採水過剰となり易いことが示唆された。

最後に、SCFS を含む下方浸透水モニタリングシステムを、実用化するにあたって留意すべきサクシオン制御法について示した。フィルターや土壌の種類を替えてシミュレーションを行ったところ、砂質土壌で G4 フィルターよりも透水性の低いフィルターを用いた場合は、吸引判定値を $(h_c - h_{LR}) = 0$ とし、且つ強め(90 cm 以上)のサクシオンを瞬間的にかけるような制御が必要であった。さらに G4 フィルターの透水性の高さが、サクシオンを適用した際にフィルター直上に土壌水分量の低い不飽和部分を作る要因となっていると考えられた。土壌とフィルターの組み合わせ、あるいはフィルターにかけるサクシオンの大きさが採水装置周辺の土壌水分に変化をもたらすため、流線を乱さずに浸透水を採水するには、シミュレーション結果を反映させ、それぞれの状況に応じた厳密なサクシオン制御を行う必要があることが明らかとなった。下方浸透水モニタリングシステムに、さらにアンテナ付携帯電話データ通信コントローラなどを追加することで、各種計測機器の測定データを遠隔地からモニターおよび回収可能となった。また、浸透水サンプルを回収に行く頻度を下げるために、コールバックシステムを用いることの有用性を確認することができた。

土壌や地下水汚染を引き起こす前に予防的な措置を施す際や、効率的で適切な灌漑および施肥管理の在り方を提案する際の一助となる、下方浸透水モニタリングシステムを構築できたと考えている。

— SUMMARY —

A sandy field has the potential hazard of nitrate contamination because of its low fertilizer holding capacity. Therefore fertilizer leaching should be well controlled in such a soil. The development of a direct soil water sampler is necessary to examine solute transport and fertilizer leaching in the vadose zone, since soil water reflects timely monitoring of data more accurately than groundwater.

A Suction-Controlled Flux Sampler (SCFS) consisting of an Automated Vacuum System (AVS) and a Sampling Filter Device (SFD) was developed for accurate measurement of water flux from the root zone. Knowing that the water content in sandy field is highly sensitive to suction change, a buffer container was placed between the pump and a sampling bottle to apply moderate suction and avoid accidental over-sucking. SFD with a glass filter (5-10 μm -pore size) was placed into a dune sand column and the performance of SCFS was evaluated under various rainfall conditions. The boundary condition for effective water sampling was examined in detail by using computer simulation and we observed that an unsaturated zone was created above the filter. The results indicated that selection of a suitable sampling filter and boundary condition was required. Water-Collecting Efficiency (WCE) of SCFS was excellent when the filter suction was controlled at 0 to 51 cm. Lower suction was preferred because the sandy soil showed large drainage with relatively small suction change. SCFS with the newly developed AVS could cope with stormy-rainfall as well as continuous long-term rainfall and the resulting WCE was from 94 to 109 %. This showed that SCFS collected infiltrated water effectively without disturbing the infiltration streamline.

We monitored fertilizer leaching in an unsaturated sandy field during the rainy season, while evaluating the sampling performance of SCFS for the sampling of infiltration water. SCFS directly collected the infiltration water effectively over a period of several months in the sandy field and recorded WCE from 92 to 115 % under various infiltration conditions during a period of 50 days. WCE was affected by the rainfall intensity as well as by previous rainfall, which enhanced WCE. The results obtained from the use of SCFS and several sensors demonstrated that the

amount of leached water remained low as long as irrigation was applied according to the cultivation manual. However, an unexpected heavy rainfall event led to fertilizer leaching. The trend in fertilizer leaching was effectively monitored by several sensors inserted into the soils, while detailed analysis of the components was performed after collection by using SCFS. Direct access to infiltration water enabled us to examine the infiltration process and carefully observe variations in the amounts of discharged anions.

A Fixed-Suction Sampler (FSS) is a simple and low cost device. When a constant 40 cm-suction was applied to FSS in a sandy field, the WCE varied from 149 to 235 %. The FSS collected a large amount of soil water, since the applied suction (40 cm) was inadequate for a sandy soil, and the sampling period was longer than that of SCFS. However it could not collect infiltration water in proportion to rainfall intensity and infiltration rate. In addition, sampling was not restored once the hydraulic connectivity was cut. Applied suction should be well examined when FSS is used in an unsaturated soil.

We investigated the applicability of the infiltration water sampling using SCFS in various soils. Simulation results from HYDRUS-2D model indicated that once the matric potential above the filter decreased rapidly by suction application, a zone of low water content was formed above the filter. When the next infiltration water approached the filter, still low water content zone was packed between the filter and the infiltration water. This phenomenon was also observed when a glass filter was applied to loam and silt loam soils. A porous plate and membrane filters which have low permeability, showed contrasting results. These results indicated that selection of a suitable sampling filter and the boundary condition are required, when the suction-controlled sampler was applied to various soils. Because the filter permeability and soil properties affected the criterion for suction control, their combination and the existence of air between the filter and soil should be considered.

The sensor-equipped monitoring system together with SCFS is suitable for precise management of fertilizer and irrigation application. We could establish a monitoring system for infiltration water in unsaturated soils.

—学会誌公表論文—

1. 東 直子・森 也寸志・井上光弘.
自動サクション制御による不飽和砂質土壌中の下方浸透水採取装置の開発.
土壌の物理性, 101号, 27-35. 2005年11月 (第II章, 第III章)
2. Naoko Higashi, Yasushi Mori and Mitsuhiro Inoue.
Measurement of fertilizer leaching from the root zone using an automated infiltration
soil water sampler in an unsaturated sandy field.
Soil Science and Plant Nutrition, 51(7), 1023-1033. 2005年12月 (第IV章)

—参考論文—

1. Naoko Higashi, Yasushi Mori, Koji Inosako and Mitsuhiro Inoue.
Infiltration water sampling using an automated suction-controlled flux sampler in an
unsaturated sandy soil. (閲読中)
Vadose Zone Journal. (第II章, 第III章)
2. 東 直子・森 也寸志・井上光弘.
不飽和土壌中の下方浸透水採取のための効果的なサクション制御法. (閲読中)
水文・水資源学会誌, 19号(3), 印刷中. 2006年5月 (第VI章)