

平成 22 年 6 月 15 日現在

研究種目：基盤研究 (B)
 研究期間：2006～2009
 課題番号：18380140
 研究課題名 (和文) センサネット技術を利用した寒冷地土壌表層における面的な水循環変動プロセスの解明
 研究課題名 (英文) Elucidation of water cycle variation process in top soil in cold region using sensor network technology
 研究代表者
 溝口 勝 (MIZOGUCHI MASARU)
 東京大学・大学院情報学環・教授
 研究者番号：00181917

研究成果の概要 (和文)：衛星による地球規模の土壌水分観測研究を発展させるためには、メソスケール領域における土壌水分観測法の開発が不可欠である。しかし、農地の表層土壌水分量は被覆の状態や土壌の性質の違いにより不均一に変化するため、その測定が難しい。そこで、本研究では、センサネット技術を用いて、寒冷地土壌の凍結と融解過程における水分動態を面的に把握し、畑土壌で生じている水循環変動プロセスの解明に役立つ手法を開発した。

研究成果の概要 (英文)：In order to promote the study of soil moisture measurement in global scale using satellite, we need to develop a new method for soil moisture measurement in meso scale. Soil moisture in agricultural field is distributed heterogeneously according to plant coverage of soil and soil properties. In this study, we developed a sensor network technology to measure two-dimensional changing of soil moisture and analyze water cycle in a freezing and thawing agricultural field.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2007 年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2008 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2009 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
総計	15,700,000	4,710,000	20,410,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業土木学・農村計画学

キーワード：センサネット, 土壌, 寒冷地, 水循環, 地球観測

1. 研究開始当初の背景

表面と大気の接地境界層における水とエネルギーの移動現象に関する物理学的な理解は、地球温暖化や地球規模水循環変動のメカニズムを解明する上で重要である。こうした観点からここ数年国際的な共同プロジェ

クトにより広域的な現地観測が進められている。しかし、その多くの研究は地表面を大気側の境界条件として扱い、広域に設置された1点の観測データのみを基準にしたもので、地中で起こっている現象(水・物質循環とエネルギーの循環)に着目した研究は少な

い。しかし、実際の地表面は表面被覆の状態や土壌の性質など、数メートル離れるだけでその特性が不均一に変化している。特に、広大な寒冷地の土壌に関しては、冬期の土壌凍結と春期の土壌融解を伴うために、農地の表層における水分動態を面的に推定することが難しい。

一方、近年の土壌水分測定技術に関する進展は目覚しく、ハンディでかつ廉価な土壌水分センサ等が研究者の間で使われ始めている。しかしながら、こうした土壌水分センサを使って農地の表層土壌水分量を面的に測定する方法は確立されていない。

2. 研究の目的

本研究では、近年急速に開発が進んでいるセンサネットワーク技術を利用して、寒冷地表層土壌の凍結と融解過程における水分動態を面的に把握し、衛星から得られるリモートセンシングデータと組み合わせることにより、畑土壌で生じている水循環変動プロセスの解明に役立てる。

3. 研究の方法

(1) センサネットワーク技術の評価

農地土壌水分を面的に測定するために利用可能な数種類のセンサネットワーク技術の評価する。また、使用する土壌水分センサの個体間のばらつきと簡易キャリブレーション法について検討する。

(2) フィールドサーバによる畑の土壌水分モニタリング

群馬県嬭恋村のキャベツ畑にフィールドサーバと呼ばれるセンサネットワーク機器を設置し、圃場の地表面の状況をモニタリングする。モニタリングデータを、インターネット経由でリアルタイムに研究室サーバに蓄積する。観測期間は定期的に現地へ赴き機器のメンテナンスを行うとともに、必要に応じて土壌調査を実施する。

(3) フィールドルータによる畑の土壌水分モニタリング

フィールドルータをキャベツ畑に設置し、圃場の地表面の状況をモニタリングする。モニタリングデータを準リアルタイムに研究室サーバに蓄積し、データ解析に供する。

(4) 衛星データを用いた土壌水分推定

キャベツの生育状況に応じた表面植生の分光反射特性を測定する。また、AVNIR-2 データからキャベツの生長に応じて変化する畑の被覆率を推定する。さらに ALOS/PALSAR を用いてキャベツ畑の広域土壌水分量を推定する。

(5) 表層土壌水分の動態モデル

センサネットワーク技術を用いて測定した土壌水分量や衛星データを用いて推定した土壌水分量データに基づいて、表層土壌水分の動

態をモデル化する。

4. 研究成果

(1) センサネットワーク技術の評価

① 通信方式の比較

3つの通信規格 (WiFi, Zigbee, Bluetooth) について、群馬県嬭恋村の畑で試験した結果、WiFi と Bluetooth の方式が有効であることがわかった。

② 現地モニタリング方法の比較

従来、土壌水分センサとデータロガーを用いた測定では、機器設置後、定期的にユーザが現地へ赴き、土壌水分センサ→データロガー→PC という流れでデータを取得していた。それに対して、本研究で採用したフィールドセンサネットワーク技術は、データロガーに通信機能を付加し、インターネットに接続し、データをサーバに転送し、ユーザがそのサーバから自分の PC にデータを取り出す方式である。

WiFi 通信に基づく現地モニタリング装置として、リアルタイム性を求める場合にはフィールドサーバが有効である。しかし、この方式では電源と通信が常時確保されていることが必須である。

遠隔農地土壌モニタリングに必要な最低限の機能は、設置して現地から戻った後で、データが取れているかどうかを確認できること、仮にデータが取れていないときでもその原因を推測できることである。そこで、本研究では、遠隔地の気象・画像・土壌水分データを研究室で準リアルタイムに取得できる新たな現地モニタリング装置 : Field Network System (FNS) を開発した。

このシステムは、ネットワークアダプタ (NA) とフィールドルータ (FR) で構成される。NA は、シリアル通信ポートを持つデータロガーに Bluetooth を用いて通信機能を付加するための機器で、Bluetooth Serial 変換アダプタ、小型バッテリー (容量 240 mAh)、太陽パネル (1 W) で構成される。また、FR は、現地からデータをインターネット経由でサーバに転送するための機器で、Micro-PC (Linux)、USB モデム、USB Bluetooth ドングル、小型バッテリー (容量 2.6 Ah)、チャージコントローラー、太陽パネル (6 W)、タイマー、ステータスランプ (LED)、Web カメラで構成される。

現地試験の結果、確実なデータ取得を求める場合には、フィールドサーバよりもフィールドルータによる現地モニタリングの方が有効であることがわかった。

③ 土壌水分センサのキャリブレーション法

ハンディでかつ廉価な 3 種類の土壌水分センサー (各 10 本) に対する空気、水、砂 (風乾および飽和) の出力値を測定し、センサの個体間のばらつきを把握し、不良センサの除外方法と簡易キャリブレーション法に

ついて検討した。その結果、土壌水分センサを使用する前に、標準試料を用いて不良センサを事前に取り除くことでセンサの信頼性を向上させること、正確な土壌水分量を得るためには少なくとも絶乾と飽和状態の土壌に対する出力値を用いて適切な換算式を与えることが必要であることがわかった。

(2) フィールドサーバによる畑の土壌水分モニタリング

①観測対象地と方法

2007年11月16日に群馬県嬭恋村のキャベツ畑の斜面にフィールドサーバ（以下FS）を設置した。FSで現地の気温、湿度、日射量、アルbedo等の気象データと土壌データ（土壌水分量と地温）を測定した。測定されたデータと画像がインターネットを経由して研究サーバに保存された。また、土壌水分量をEC-5、土壌温度をEC-Thermo（共にDecagon社製）を用いて測定した。埋設深さは4, 8, 16, 32cmである。

②地温とアルbedoの変化

2007年11月17日から2008年1月2日までの地温変化とアルbedoの関係を図1に示す。黒ボク土と雪面のアルbedoの値は大きく異なるため、ここでのアルbedoの急激な上昇は積雪によるものである。これはFSの画像からも確認された。表層4cm, 8cm, 16cmの地温は12/5頃までは日変動していたが、それ以降は変動が小さくなり、12/13以降は変動しなくなった。アルbedoが12/4や12/13に急激に高くなったことから判断して、これは積雪によって地表面が被覆され、太陽光による日射を反射し、エネルギー入射が小さくなったことに起因していると考えられる。

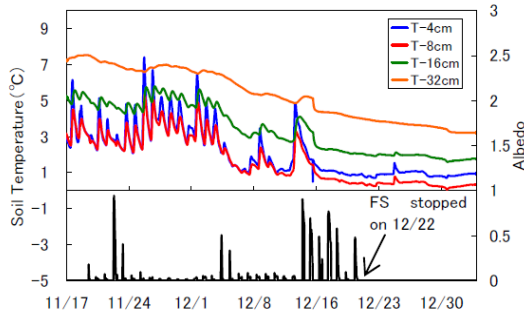


図1 地温の時間変化とアルbedo

③土壌水分量の変化

2007年11月17日から2008年1月2日までの斜面の上流側の土壌水分量の変化を図2に示す。11/19, 12/17, 12/29の土壌水分量は、16時頃に急激に上昇した。FSの画像からこれは融雪水による上昇であることが確認できた（図3）。

また、12/17の18時から12/23の10時まで、深さ4cmの土壌水分量が大きく上昇した。（図2）これが、土壌水分量が飽和近傍にな

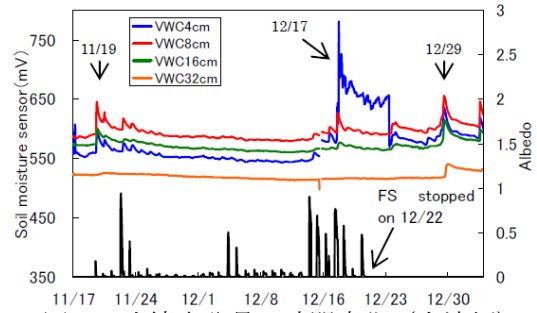


図2 土壌水分量の時間変化（上流側）

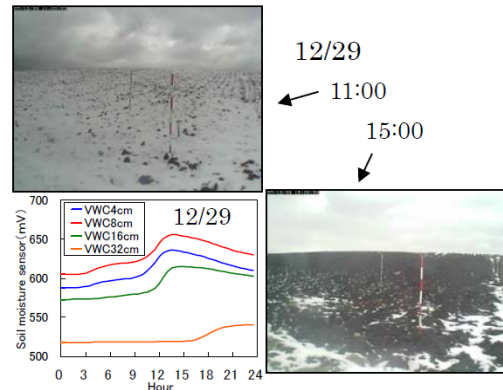


図3 FS画像と土壌水分変動(2007.12.29)

ると出力に乱れが生じやすいというEC-5の性質によるものなのか、冬期の畑に起こる何か特別な現象なのか、今後さらなる検討が必要である。

④土壌水分量の変動

斜面下流側のFSで測定した土壌水分量の変化（2007/11/20～12/21）を図4に示す。積雪期に入った直後の12/13から激しい変動が起こるようになった。殆どの場合、日の出直後に最小値を、夕方から日没にかけて最大値を記録した。このことは、積雪期間中は日中の積雪融解による土壌水分量の増加と日没後の地下浸透による減少が交互に起きており、非常に激しい日変動が起きていることを示している。

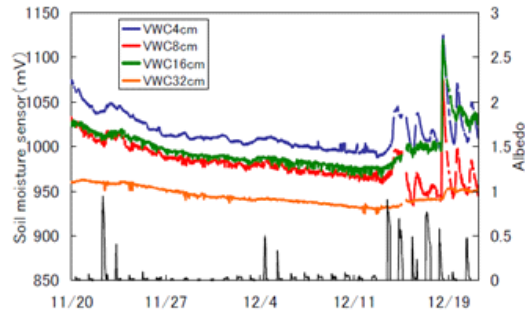


図4 土壌水分量の時間変化（下流側）

⑤FSの画像による分析

本研究で取り入れたFSの画像は、積雪状況・融雪時の確認において多大な成果を發揮した。積雪と融雪の繰り返しを画像上で確認

し、数値データと合わせてことによって、冬期の畑中における土壌水分動態をよりリアルに知ることができた。図5はFSによって定期的に撮影される土壌表面の画像である。この画像で土壌表層は乾燥し、畝間は飽和に近い水分量であることがわかる。このように冬期の寒冷地畑土壌は極端な乾燥状態と湿润状態が混在していることが確認できた。この乾湿状態が早春の畑土壌流亡に関係していると考えられる。



図5 FSによって撮影された土壌表面

⑥まとめ

数値情報にフィールドサーバの視覚情報を加えることで冬期間中の斜面畑の表面および土中の水分状態を詳細にモニタリングすることができた。今後は冬期間中の畑土壌の乾湿状態が春期の土壌流亡に与える影響を明らかにする必要がある。

(3) フィールドルータによる畑の土壌水分モニタリング

①観測対象地と方法

2009年12月4日に群馬県嬭恋村のキャベツ畑 (N36° 30' 49.42", E138° 27' 36.71" ; 257m×55m) に土壌水分センサ40本 (EC-5; Decagon社製37本, 簡易土壌抵抗計; 自作3本) とデータロガー (Em5b; Decagon社製) 10台を設置した。この畑はキャベツの収穫後、11月に耕起後整地され、南方向に緩く傾斜し、北西側長辺は道路に接し、その他の辺は切土された法面になっている。この畑中央にFRを設置し、そこを中心に長辺方向 (x方向) に50m間隔で6台、短辺方向 (y方向) に10m間隔で4台のEm5bとNAを設置した。各Em5bから4m離れた、x方向から0, 90, 180, 270度の位置に4本の土壌水分センサを地表面4-9cmの深さに鉛直方向に挿入した。土壌水分は1時間間隔でデータロガーに記録される。畑には、気象計とWebカメラを設置し、気象条件と現場の状況を記録した。これらのデータはFRにより1日1回自動回収される。

②現地土壌水分の変化 (図6)

土壌水分データは、10地点中9地点からほぼ毎日観測結果を得ることができた。一例

として、A地点における土壌水分の変化を示す。図中には気象データと画像データを合わせて示した。12月6日から12日は土壌水分の変動が激しかった。6日、9日、12日の画像 (12:00撮影) から畑では積雪と融雪を繰り返していたことがわかる。したがって、この期間の土壌水分の変動は融雪水の浸入や土壌の凍結・融解によるものと思われる。12月12日から18日には土壌水分が急激に減少した。日平均気温が12月13日から-0.1℃となり、12月18日には-6.4℃まで低下していたことから、この土壌水分の急激な減少は土壌が凍結したことによるものと考えられる。この傾向は他の地点でも同様にみられた。

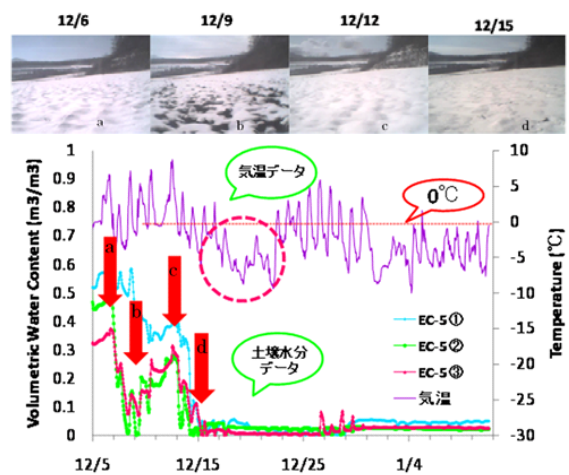


図6 A地点における土壌水分と気温の変化

③畑表層の面的土壌水分

図7は、クリッキング法を用いて作成した畑表層の土壌水分分布図である。それぞれ12:00の観測データである。色が濃くなるほど土壌水分が多いことを示している。図中左が道路側である。また、図の下には道路側から東方向にみた畑の12:00の画像を並べて表示した。

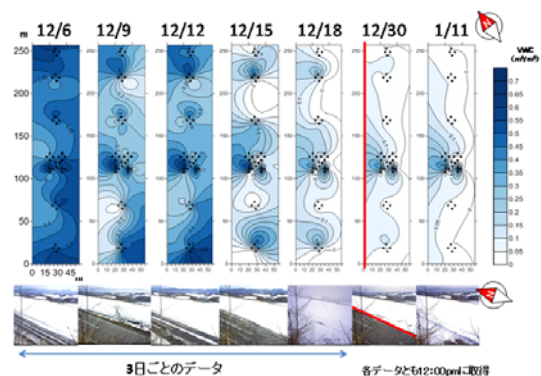


図7 畑表層の土壌水分分布図 (2009.12-2010.1)

土壌水分分布図をみると、12月6日の時点では右側 (道路と反対側) の土壌水分が多いが、1月11日には逆に右側の土壌水分が減少

している。これは12月15日以前には畑の緩やかな傾斜により土壌水分が右側に集まっているが、12月15日頃から右側の方から凍結が進行したためと思われる。このように畑一面でも偏った凍結パターンを示した理由として、畑の右側の法面は積雪して白いままであるに対し、左側の道路では一時的に消雪し黒色の路面を出して太陽熱を吸収しやすく、道路側の畑の平均地温が高めになっていたことが考えられる。残念ながら、今回の実験では地温の面的な分布は測定しなかったが、データロガーに温度センサを追加すれば、FNSによって土壌水分と地温を同時に測定することが可能である。

④まとめ

FNSを用いて畑表層の面的な土壌水分観測を行った。その結果、FNSは面的な土壌水分観測畑の土壌水分測定に有用であること、面的にみた場合、冬期の畑土壌の凍結の仕方に偏りがあることがわかった。

(4)衛星データによる土壌水分量の面的把握

キャベツの生育状況に応じた表面植生の分光反射特性を測定した。衛星画像から得られた5種類の分光反射スペクトルをミクセル分解することにより、農地の作物と土壌の構成割合を推定するアルゴリズムを作成した。また、AVNIR-2データを用いてキャベツの生長に応じて変化する畑の被覆率を推定するアルゴリズムを用いて、画素内のカテゴリの被覆率を推定しキャベツ被覆率マップを作成した。さらに、ALOS/PALSARを用いてキャベツ畑の広域土壌水分量を推定し、現地観測データと比較する手法について検討した。ここでは、ALOS/PALSARについての成果を記述する。

①観測対象地と方法

群馬県吾妻郡嬭恋村のキャベツ畑（撮影時は裸地）で、2008年7月3日13時10分のALOS撮影時刻に合わせて、1枚の畑の中の29プロットで表層土壌（0-5cm）を採取し、含水比を測定した。プロット間は10m間隔である。これらのサンプリングプロットの緯度経度をGPSで測定し、その値に合わせて撮影されたPALSAR画像から、各プロットの後方散乱係数を抽出した。PALSARの偏波はHHとHVを使用した。本サイトは、一定の傾斜上に存在し、また整備直後で地表面は均質となっていたことから、傾斜および地表面粗度が後方散乱係数に与える影響は無視した。また、同時刻に、キャベツ栽培下で地表面被覆率の異なる5つの畑で、表層土壌のサンプリング、GPSでの緯度経度測定、およびデジタルカメラでの地表面の撮影を行った。地表面画像に2値画像処理を施し、キャベツによる地表面の被覆率を計算した。被覆率および含水比をPALSARの後方散乱係数と比較し、その傾向を

分析した。

②含水比とPALSARの後方散乱係数との関係

1枚の畑中29箇所の含水比とPALSARの後方散乱係数との関係を図8に表した。1枚の圃場内であっても、地表面付近の含水比は、0.57-0.81g/g（乾燥密度を0.65g/cm³とすると、体積含水率0.37-0.53cm³/cm³）の間にばらついていて、一方、後方散乱係数は、HHが-11から-22の間で、HVは-23から-30の間で変化し、含水比との明らかな相関関係を見るには至らなかった。これは、PALSARがより深い土層の土壌水分量まで対象としており、表層土壌のサンプリングだけでは相関性を十分に表現し切れなかったためと考えられる。また、今回短時間内に多くのプロットにてサンプリングを行ったため、含水比のみを測定したが、実際の水分量の指標となる体積含水率は、（含水比）×（乾燥密度）で表されるため、表層土壌に乾燥密度のばらつきがあった場合に、含水比は土壌水分量の指標としては不十分である。以上のことを考慮し、2008年8月18日のALOS撮影時に同圃場にて鉛直方向の体積含水率の測定を行った。

今後は傾斜影響の補正を行う必要があり、地表面の比誘電率が場所に依らず一定とみなせる、冬期の土壌凍結および積雪条件下でのPALSAR画像の解析が必要である。

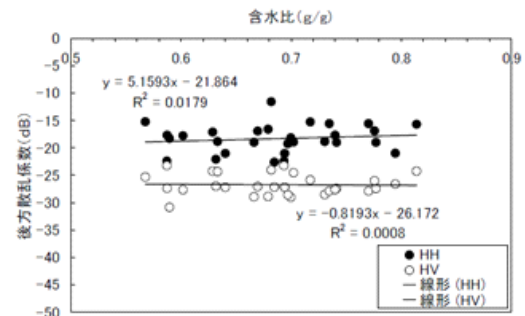


図8 含水比と後方散乱係数の関係

③まとめ

本研究では、表層土壌の含水比と後方散乱係数の間に相関関係は見られなかった。また、キャベツによる地表面被覆率が後方散乱係数に影響を与える可能性が示された。今後は、鉛直深さごとの体積含水率の測定をALOS撮影時に行い、PALSARの影響深度および体積含水率との相関性を検討する必要がある。

(5) 表層土壌水分の動態モデル

傾斜地でのキャベツ栽培を主とする嬭恋地区の土地利用の特性を考慮して、土壌侵食量の推定に展開可能なWEPPモデルを選び、現地土壌に適用すべきパラメータについて検討した。また、冬期に畑地に形成される凍土層の初期水分や乾燥密度が地表面流出に与える影響について検討した。しかし、当初の予想以上に、フィールドセンサネット技術

の評価に時間がかかり、残念ながら実際に取得したデータに基づいて寒冷地土壌表層における土壌水分の動態をモデル化するには至らなかった。しかしながら、(3)で述べた寒冷地畑表層土壌における面的な土壌水分の挙動は、本研究で開発したフィールドネットワークシステム (FNS) があればこそ観測できた貴重なデータである。このシステムは、携帯電話の電波が届く地域であればどこでも使えるので、従来型のデータロガーを利用している多くのフィールド観測研究者にとって強力なツールとなるものと思われる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

① Kazuo Oki, Shoichi Mitsuishi, Tetsu Ito, and Masaru Mizoguchi: An Agricultural Monitoring System Based on the Use of Remotely Sensed Imagery and Field Server Web Camera Data, *GIScience & Remote Sensing*, 査読有, 46(3), 2009, pp.305-314.

② 溝口勝、フィールドサーバによる農地情報モニタリング、「農業農村工学分野における情報化」社団法人農業農村情報工学会農業農村情報研究部会編、農業農村整備情報センター発行、127-13、査読無

③ Masaru Mizoguchi, Shoichi Mitsuishi, Tetsu Ito, Kazuo Oki, Seishi Ninomiya, Masayuki Hirafuji, Tokihiro Fukatsu, Takuji Kiura, Kei Tanaka, Hitoshi Toritani, Hiromasa Hamada, and Kiyoshi Honda: Real-time monitoring of soil information in agricultural fields in Asia using Field server, *Proceedings of 1st Global workshop on High Resolution Digital Soil Sensing and Mapping*, 2, 19-24, Sydney-Australia (2008)、査読有

[学会発表] (計 24 件)

① 山下彩香・溝口勝・三石正一・伊藤哲、センサネットを用いた畑表層の面的土壌水分観測、平成 22 年度農業農村工学会、2010 年 8 月 31 日、神戸大学

② Masaru MIZOGUCHI, Tetsu ITO, Shoichi MITSUISHI: Ubiquitous Monitoring of Agricultural Fields in Asia for Safe Agricultural Production Management, *International Society of Paddy and Water Environment Engineering* 2009 年 10 月 7-9 日, Bogor, Indonesia

③ 溝口勝・石渡一嘉・小野寺政勝・三石正一、NOE を用いた土壌水分モニタリングキットの開発、土壌物理学会、2009 年 10 月 24 日、明治大学

④ 西村拓・蒲地紀幸・井本博美・宮崎毅、融解期の凍土の水食機構、土壌物理学会、2009 年 10 月 24 日、明治大学

⑤ 小島悠揮・溝口勝、高冷地キャベツ栽培時の土壌水分量および土壌溶液 EC の変化、平成 21 年度農業農村工学会、2009 年 8 月 5 日、筑波大学

⑥ 西村拓・蒲地紀幸・宮崎毅、融解期の凍土の受食性と土壌の物理性、日本沙漠学会第 20 回学術大会、2009 年 5 月 23 日、森林総合研究所 (つくば)

⑦ 小島悠揮・沖一雄・登尾浩助・溝口勝、ALOS/PALSAR を用いた高冷地キャベツ畑の広域土壌水分量の推定、第 50 回土壌物理学会シンポジウム、2008 年 10 月 18 日、三重大学

⑧ 片町健太郎・伊藤大輝・溝口勝、センサネットワーク技術による面的な土壌水分測定手法の開発、2008 土壌水分ワークショップ、2008 年 3 月 26 日、東京

⑨ 小島悠揮・溝口勝、フィールドサーバによる高冷地キャベツ畑土壌の IT モニタリング、土壌水分ワークショップ、2008 年 3 月 26 日、東京

⑩ 三石正一・溝口勝、デカゴン土壌水分センサの個体間のばらつきと簡易キャリブレーション法に関する一考察、第 49 回土壌物理学会シンポジウム、2007 年 10 月 13 日、福岡

[図書] (計 1 件)

① 溝口勝、農地は水のコントロールが命、水の知 (分担執筆)、沖大幹監修, pp. 53-70, 化学同人 (2010)

[その他]

関連のホームページ:

<http://www.iai.ga.a.u-tokyo.ac.jp/mizo/research/fieldinfomatics>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

溝口 勝 (MIZOGUCHI MASARU)
東京大学・大学院情報学環・教授
研究者番号: 00181917

(2) 研究分担者

沖 一雄 (OKI KAZUO)
東京大学・生産技術研究所・講師
研究者番号: 50292628

(3) 研究分担者

登尾 浩助 (NOBORIO KOUSUKE)
明治大学・農学部・教授
研究者番号: 60311544

(4) 研究分担者

西村 拓 (NISHIMURA TAKU)
東京大学・大学院農学生命科学研究科・准教授
研究者番号: 40237730