様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成　２７　年　　６　月　１６　日現在

機関番号：　１３８０１
研究種目：　若手研究(B)
研究期間：　2012～2014
課題番号：　２４７６０２７７

研究課題名（和文）植物の動的活動観察可能なイオン濃度・水分量同時計測センサ開発

研究課題名（英文）Development of an Ion Concentration and Water Content Simultaneous Monitoring Sensor for Real-Time Observation of Soil near Roots of Plants

研究代表者

二川　雅登（Futagawa, Masato）

静岡大学・工学研究科・准教授

研究者番号：９０６０７８７１

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、土壌中の水分量と、水分中のイオン濃度の情報を分離・計測できる手法の確立とセンサの実現を目指した。
土壌の電気的なモデル化を行うことで位相と振幅の絶対値により水分量とイオン濃度を分離して計測できることを証明した。Si-LSIプロセスを用いたセンサチップの製作を行い、位相センシング部と電気伝導度センシング部の2つを集積化することに成功した。製作したセンサを用い、バーミキュライト培地と食塩水を使って水分量変化とイオン濃度変化の実験を行った。その結果、水分量に影響を受けないイオン濃度計測を実現でき、水分量とイオン濃度の分離・計測可能なセンサを実現させることに成功した。

研究成果の概要（英文）：In this study, to monitor two kinds of information which are water content unaffected by ion concentration and ion concentration unaffected by water content, new measurement methods of them were established. A sensor chip to monitor them was fabricated.
Information of phases and amplitudes of impedance characteristics were proved that the water content and ion concentration can be measured by the information, using electrical models of soil. The sensor chip integrated with phase sensing area and electric conductivity sensing area was fabricated by Si-LSI process. The sensor performed to detect the ion concentration unaffected water content. I was successfully fabricated the water content and the ion concentration sensor chip for precision agriculture and disaster prevention fields.

研究分野：　半導体デバイス

キーワード：　位相　電気伝導度　水分量　イオン濃度　土壌　精密農業

１．研究開始当初の背景

（１）近年、「食の安全」「食の安定供給」などが強く言われており、様々な環境情報をリアルタイムに計測する必要性が高まっている。特に、土壌中に存在する水の体積の割合（水分量）と、窒素、リン、カリウムなど水分の中に含まれる電離したイオン全体の密度（イオン濃度）の把握は農業分野でとても重要な情報である。

（２）一般的に水分量の計測に用いられているテンシーメータはセンサ自体が大きく、根の近傍など細かな部位を計測するには不向きである。一方、電気的な計測でオンサイトモニタリングを行う場合、水分量とイオン濃度の切り分けが難しくなってくる。例えば、1 ℓ の容器にイオン濃度が 1 S/m となるよう食塩を入れたとき水の量が半分（すなわち水分量が 0.5 m3/m3）の場合には、容器全体で電気伝導度を計測すると 0.5 S/m となってしまい、お互いに干渉をしてしまうことが分かる。代表的な電気的計測方法としては Time-Domain-Reflection (TDR)方式[①②]が挙げられる。水の比誘電率が 81、土が 2～4、空気が 1 であるため、空間の静電容量を計測しその容量変化、すなわち比誘電率の変化をモニタすることによりその空間に占める水の割合（水分量）を算出している。しかし、イオン濃度の影響を避けるため数 GHz もの高い周波数で動作させているものの、完全にイオン濃度の影響をなくすことは出来ていなかった。また、センサの大きさも 2 cm より大きいものであった。

２．研究の目的

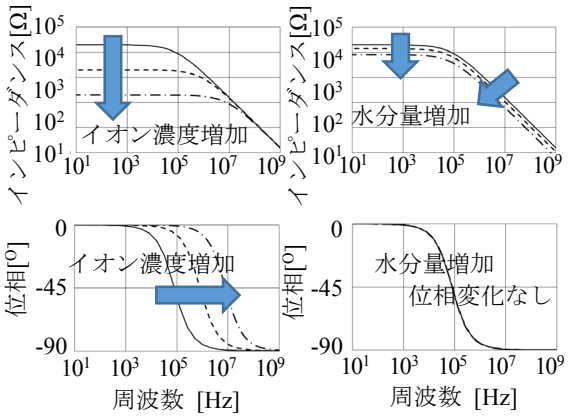
（１）本研究では、根の近傍など、小さなエリアを観察でき、水分量とイオン濃度の両方を測定することができる、新しい手法の小型マルチモーダルセンサを提案する。この方法は TDR より低い周波数で動作することができ、高周波にくらべ信号の回り込みが多いため電極をミリ単位にまで小さくしても計測可能であったり、システムの小型化が容易であったりといった特徴をもっている。

３．研究の方法

（１）新たな計測手法としてイオン濃度と電気伝導度を計測し、水分量の算出を行う方法を提案する。この方法の実験的証明を行い、計測可能範囲の算出を行うことで、センサデバイス設計に必要な条件を取得する。その後、土壌計測が可能な半導体センサデバイスを設計・製作し、土壌におけるイオン濃度、水分量計測を行う。

４．研究成果

（１）新しい計測手法となるイオン濃度計測は、印加電圧と試料に流れる電流の時間的な遅れを示す位相を使って計測する。図 1 にそのモデル図を示す。



(a)　イオン濃度変化　　(b)　水分量変化

図 1　イオン濃度、水分量に対するインピーダンス・位相変化

この図は、水の寄生素子を抵抗と容量の並列接続とモデル化した場合のインピーダンス特性である。この結果から、位相変化をモニタリングすることでイオン濃度を計測できることを導き出した。また、センサ素子に必要なパラメータを決定することができ、半導体を使ったセンサ素子の製作を行った。

（２）図 2 に示すように、土壌に直接挿入でき根の近傍などを計測できるセンサを開発した。半導体 CMOS プロセス技術を用い、シリコン基板上に Pt 電極エリアと位相プローブエリアを持つマルチモーダルセンサを製作した。

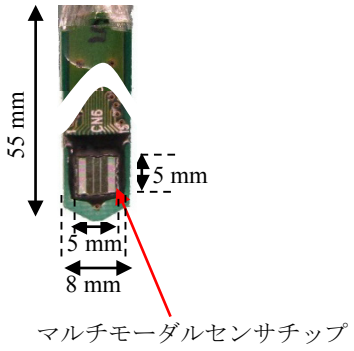
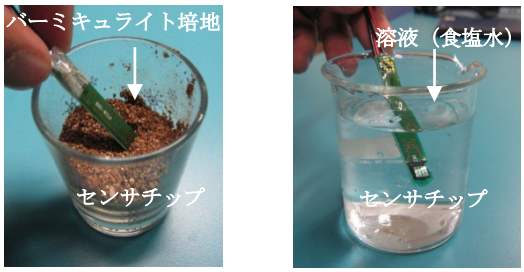


図 2　センサチップ写真

（３）Pt 電極を使った電気伝導度計測はこれまでの研究(3)で確認ができている。Pt 電極は、電極と水との界面に電気二重層を形成し直流では安定した計測ができないが、250 mV 振幅、10 kHz 正弦波を用いることにより 1 mS/m から 10 S/m までの幅広い計測が可能である。

（４）位相プローブエリアでは、Al 電極を 50 nm の窒化ケイ素膜(SiNx)で覆っている。これは、水から電極を守るためと、流れる電流を少なくするためである。特に、SiNx の容量成分が水の容量成分より大きくなるよう設計しており、対象物の計測に影響しないようにしている。また、Al 電極下の酸化膜は基板との絶縁を行っている。これは、測定対象物と基

板とが並列接続の関係となるため、基板側がより高いインピーダンスとなるよう、1μm と厚膜の SiO_2 を形成している。今回の実験では、最も幅広く水のイオン濃度が計測できるよう、振幅 250 mV、周波数 500 kHz の正弦波を用いている。5 mm 角のチップの中にこれら 2 つのセンサを配置しており、位相プローブセンサを挟む形で電気伝導度センサを配置することにより、同一の対象物を計測できるようにしている。



(a)　水分量依存性評価　　(b)　イオン濃度依存性評価

図 3　水分量及びイオン濃度計測風景

（5）図 3 に水分量依存性、イオン濃度依存性の計測風景をしめす。用いた溶液は食塩を溶かしており、イオン濃度を変化させている。この 2 種類の計測について、位相プローブセンサ、電気伝導度センサの特性を計測した。その結果を図 4、5 に示す。

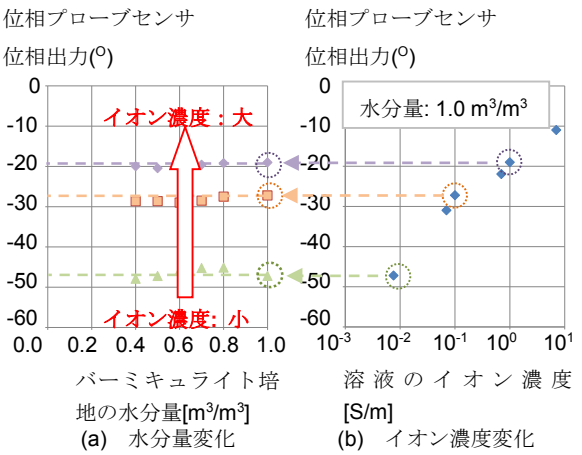


図 4　水分量及びイオン濃度計測風景

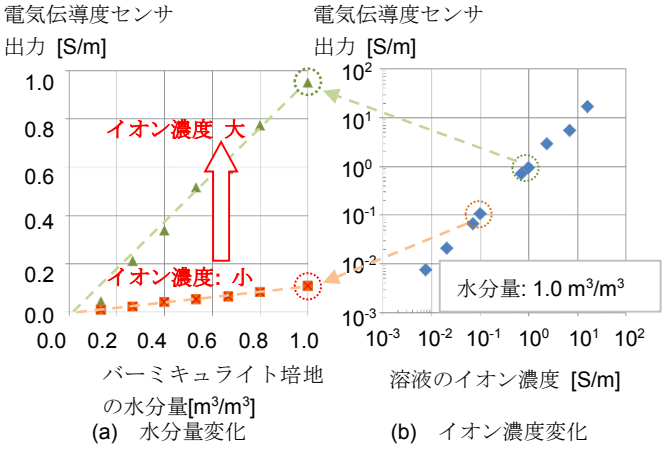


図 5　水分量及びイオン濃度計測風景

（6）図 4 は位相プローブのセンサ特性を示している。図 4(a)は水分量を変化させたときの計測値、図 4(b)は水だけの状態（すなわち水分量 1.0 m3/m3）で計測を行った結果である。この実験結果から、位相出力が水分量に影響せず、イオン濃度のみに変化することが分かる。図 5 は電気伝導度センサの特性を示している。同じく、図 5(a)は水分量を変化させたときの計測値、図 5(b)は水だけの状態で計測を行った結果である。この実験結果から、電気伝導度センサの出力は水分量とイオン濃度の両方に線形的に変化することが分かる。
これらの結果を用いることにより、マルチモーダルセンサは、イオン濃度に影響を受けない水分量の計測が実現できることを実証できた。

＜引用文献＞

① F. N. Dalton and M. Th. Van Genuchten, “The Time-Domain Reflectometry Method for Measureing Soil Water Content and Salinity”, Geoderma, Vol. 38, pp. 237-250, 1986.

② D. A. Robinson, T. J. Kelleners, J. D. Cooper, C. M. K. Gardner, P. Wilson, I. Lebron, and S. Logsdon, “Evaluation of Capacitance Probe Frequency Response Model Accounting for Bulk Electrical Conductivity”, Vadose Zone Journal, Vol. 4, No. 4, pp. 992-1003, 2005.

③ M.Futagawa, T.Iwasaki, T.Noda, H.Takao, and M. Ishida K.Sawada, “Miniaturization of Electrical Conductivity Sensors for a Multimodal Smart Microchip”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 48, pp. 04C184-1-4, 2009.

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計　4 件）

① H. Murata, M. Futagawa, T. Kumazaki, M. Saigusa, M. Ishida, K. Sawada, “Millimeter Scale Sensor Array System for Measuring the Electrical Conductivity Distribution in Soil”, Computers and Electronics in Agriculture, 査読有, Vol. 102, pp. 43-50, 2014. doi:10.1016/j.compag.2014.01.005.

② 二川 雅登, 小松 満, 鈴木 彦文, 竹下 祐二, 不破 泰, 澤田 和明, “小型ＥＣセンサを用いた斜面崩壊予測の開発”, 電気学会論文誌Ｅ（センサ・マイクロマシン部門誌）, 査読有, Vol. 133, No. 9, pp. 278-283, 2013. doi:10.1541/ieejsmas.133.278.

③ M. Futagawa, MD. I. Hussain, K. Kamado, F. Dasai, M. Ishida, K. Sawada, “An Integrated Multimodal Sensor for the On-site Monitoring of the Water Content and Nutrient Concentration of Soil by Measuring the Phase and Electrical Conductivity”, Sensors & Transducers Journal, 査読有, Vol. 14-1, pp. 160-173, 2012. http://www.sensorsportal.com/HTML/DIGE

ST/P_SI_189.htm

④ M. Futagawa, T. Iwasaki, H. Murata, M. Ishida, K. Sawada, “A Miniature Integrated Multimodal Sensor for Measuring pH, EC and Temperature for Precision Agriculture”, Sensors, 査読有, Vol. 12, Issue 6, pp. 8338-8354, 2012. doi:10.3390/s120608338.

〔学会発表〕（計 22 件）

① 二川雅登, 澤田和明, “土壌・培地内の直接計測に向けたオンサイトモニタリングセンサに関する研究”, 電子情報通信学会 知的環境とセンサネットワーク研究会, 機械振興会館(東京都港区), 2014 年 11 月 6 日-7 日.

② M. Futagawa and K. Sawada, “On-site Monitoring of Small Sized Medium Culture using Miniaturized Sensor Systems”, The Interdisciplinary Research and Global Outlook (IRAGO) Conference 2014, AIST (Tsukuba-city, Ibaraki, Japan), 6-7, Nov. 2014.

③ 二川 雅登, 小松 満, 鈴木 彦文, 竹下 祐二, 不破泰, 澤田和明, “斜面崩壊予知のための小型 EC センサの開発”, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学札幌キャンパス(北海道札幌市)、2014 年 9 月 17 日-20 日.

④ 村田光明, 二川 雅登, 熊崎忠, 三枝正彦, 石田誠, 澤田 和明, “土壌肥料濃度モニタリング用小型 EC センサアレイシステムの開発”, 第 30 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 仙台国際センター (宮城県仙台市), 2013 年 11 月 5 日-7 日.

⑤ 二川雅登、村田光明、 石田誠、 澤田和明, “土壌リアルタイム分析のための EC、温度、pH センサを集積化したマルチモーダルセンサの開発”, 2013 年度土壌物理学会大会, 福島大学 (福島県福島市), 2013 年 10 月 26 日-27 日.

⑥ 村田光明, 二川雅登, 熊崎忠, 三枝 正彦, 石田 誠, 澤田和明, “mm スケール EC センサアレイシステムを用いた肥料拡散係数の算出”, 2013 年度土壌物理学会大会, 福島大学 (福島県福島市), 2013 年 10 月 26 日-27 日.

⑦ H. Murata, M. Futagawa, T. Kumazaki, M. Saigusa, M. Ishida, K. Sawada, “Millimeter Scale Electrical Conductivity Sensor Array System for Measuring the Diffusion Coefficient of Soil in Real-time”, Interdisciplinary Research And Global Outlook (IRAGO) Conference 2013, Irago Sea-Park & Spa Hotel (Tahara, Aichi, Japan), 24-25 Oct. 2013.

⑧ 村田 光明, 二川 雅登, 熊崎 忠, 三枝正彦, 石田 誠, 澤田 和明 “小型 EC センサアレイシステムによる mm オーダーの肥料拡散モニタリングの実証”, 日本生物環境工学会 2013 年大会, 香川大学幸町キャンパス (香川県高松市) 2013 年 9 月 2 日-5 日.

⑨ H. Suzuki, D. K. Asano, M. Komatsu, Y. Takeshita, K. Sawada, M. Futagawa, H. Nose, Y. Fuwa, “Research on the Construction of an Ad-Hoc Network System for Flexibly Dealing with Disasters, International Technical Conference on Circuits/Systems”, Computers and Communications 2013 (ITC-CSCC 2013), Proceedings USB of ITC-CSCC 2013, S2, pp.24-27, The Ocean Resort (Yeosu, Korea), 30 June – 3 July , 2013.

⑩ M. Futagawa, Y. Ban, K. Kawashima, K. Sawada, “On-Site Monitoring of Soil Condition for Precision Agriculture by using Multimodal Micro-Chip Integrated with EC and Temperature Sensors”, The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, CCIB (Transducers 2013), (Barcelona, Spain) 16-20 June, 2013.

⑪ H. Suzuki, D. Kuroyanagi, D. K. Asano, M. Komatsu, Y. Takeshita, K. Sawada, M. Futagawa, H. Nose, Y. Fuwa, “Construction of a Sensor Network to Forecast Landslide Disasters - Sensor Terminal Development and On-Site Experiments”, The 11th International Conference on Wired/Wireless Internet Communications (WWIC 2013), LNCS 7889, pp.180-191, Palace of Grand Duke Vladimir (Saint-Petersburg, Russia), 5-7 June, 2013.

⑫ 二川 雅登, 番 喜宏, 川嶋 和子, 澤田 和明, “小型マルチモーダルセンサチップを用いたトマト栽培現場での EC・温度のリアルタイム計測”, 平成 25 年 電気学会全国大会, 名古屋大学 東山キャンパス(愛知県名古屋市), 2013 年 3 月 20 日-22 日.

⑬ 二川 雅登、澤田 和明, “土壌・培地のオンサイトモニタリングに向けた農業用マルチモーダルセンサの開発”, 電気学会研究会交通・電気鉄道・フィジカルセンサ合同研究会, 下呂市民会館 (岐阜県下呂市), 2013 年 3 月 4 日.

⑭ 鈴木 彦文, 黒柳 大治, D.K. Asano, 小松満, 竹下 祐二, 澤田 和明, 二川 雅登, 不破 泰, “Ad-Hoc ネットワークと EC センサーを用いた土砂災害予測センサーネットワークの構築について”, 電気情報通信学会 第 2 回 安全・安心な生活のための情報通信システム研究会, 新潟大学 駅南キャンパス (新潟県新潟市), 2012 年 11 月 15 日.

⑮ 二川 雅登, 番 喜宏, 川嶋 和子, 澤田 和明, “EC、pH、温度の同時計測が可能な農業用マルチモーダルセンサの開発とロックウールでの実証研究”, 日本生物環境工学会 2012 年大会, 東京大学農学

部 (東京都文京区), 2012 年 9 月 5 日.

⑯ M. Futagawa, MD. I. Hussain, K. Kamado, F. Dasai, M. Ishida, K. Sawada, “Multimodal Water Content and Nutrient Concentration Sensor for On-Site Soil Monitoring”, The Second International Conference on Sensor Device Technologies and Applications (SENSORDEVICES 2011), Novotel Nice Aeroport Cap 3000 (Nice, France), 21-26 August, 2011.

⑰ M. Futagawa, H. Murata, K. Kamado, M. Ishida, K. Sawada, “Real Time Monitoring of pH, Electrical Conductivity, and Temperature in a Rock Wool Mattress for Plant Culture using a Multimodal Sensor Chip”, The Asia-Pacific Interdisciplinary Research Conference 2011 (AP-IRC 2011), Toyohashi Univ. Tech. (Toyohashi, Japan), 17-18 Nov. 17-18, 2011.

⑱ H. Murata, M. Futagawa, K. Kamado, M. Ishida, and K. Sawada, “Measurement of soil fertilizer diffusion that uses small electrical conductivity sensor system”, The Asia-Pacific Interdisciplinary Research Conference 2011 (AP-IRC 2011), Toyohashi Univ. Tech. (Toyohashi, Japan), 17-18 Nov. 17-18, 2011.

⑲ 二川 雅登、Hussain MD. Iqramul、釜戸 敬太、太齋 文博、石田 誠、澤田 和明, “水分量・イオン密度計測可能な小型マルチモーダルセンサの製作”, 第 28 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, タワーホール舟堀 (東京都江戸川区), 2011 年 9 月 26 日-27 日.

⑳ Hussain Md. I., 二川 雅登, 釜戸 敬太, 川嶋 和子, 石田 誠, 澤田和明, “農業用スマート水分量と電気伝導度同時測定センサの製作”, 秋季第 72 回応用物理学会学術講演会, 山形大学小白川キャンパス (山形県山形市), 2011 年 8 月 29 日-9 月-2 日.

㉑ 二川雅登, 川嶋和子, 番喜宏, 澤田和明, “農業用マルチモーダルセンサの開発と施設トマト栽培における利用法の検討 1～半導体集積回路技術を用いた EC・温度同時計測可能な小型スマートセンサの開発～”, 日本生物環境工学会 2011 年札幌大会(北海道札幌市), 2011 年 9 月 6 日-8 日.

㉒ 川嶋和子, 番喜宏, 二川雅登, 澤田和明, “農業用マルチモーダルセンサの開発と施設トマト栽培における利用法の検討 1－小型センサを利用したトマト培地のＥＣ計測－”, 日本生物環境工学会 2011 年札幌大会(北海道札幌市), 2011 年 9 月 6 日-8 日.

〔図書〕（計 2 件）

① 二川雅登, 澤田和明, 石田誠, 他, 株式会社エヌ・ティー・エス, 感覚デバイス開発“農業用マルチモーダルセンサの開発”, pp. 385-395, 2014 年 11 月 (全 p.410 中 pp. 385-395 を担当).

② 二川雅登, 澤田和明, 他, 株式会社エヌ・ティー・エス, 植物工場生産システムと流通技術の最前線, “マルチモーダルセンサの開発”, pp. 137-145, 2013 年 4 月 (全 p.566 中 pp. 137-145 を担当)

〔産業財産権〕

○出願状況（計 2 件）

名称 : 水分検出装置、電気伝導度検出装置、センサネットワークシステム、プログラム、水分検出方法および電気伝導度検出方法
発明者：田向健吾、二川雅登、澤田和明
権利者 : (株)メガチップス, 豊橋技術科学大学
種類：特許
番号：特願 2012-068302
出願年月日：2012 年 3 月 23 日
国内外の別： 国内

名称 : 水分検出装置、電気伝導度検出装置、センサネットワークシステム、プログラム、水分検出方法および電気伝導度検出方法
発明者：田向健吾、二川雅登、澤田和明
権利者 : (株)メガチップス, 豊橋技術科学大学
種類：特許
番号：特願 2012-068303
出願年月日：2012 年 3 月 23 日
国内外の別： 国内

〔その他〕

ホームページ等

静岡大学　二川研究室
http://www.ipc.shizuoka.ac.jp/~t-futa/index.html

６．研究組織

(1)研究代表者

二川　雅登（FUTAGAWA, Masato）
静岡大学・大学院工学研究科
研究者番号：90607871