

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K17785

研究課題名(和文)植物栽培培地内可視化のための小型かつ高性能な水分量・イオン濃度センサ研究開発

研究課題名(英文) Study of a miniaturized and high performed water-content and ion-concentration sensor for visualization in plant medium cultures

研究代表者

二川 雅登(Masato, Futagawa)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：90607871

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：これまで、培地内直接計測を目指した半導体型の小型水分量・イオン濃度センサの開発を行ってきた。外乱ノイズの除去、低水分量・低イオン濃度計測を可能とし、微弱な電流の検知が必要な低い水分量の土壌で計測できる高感度検出型土中水分量・イオン濃度センサの実現を目指した。センサチップ内部でリーク電流が混入する電極部に保護電極を配置した新たなセンサ構造を提案しデバイス製作を行った。また、ノイズに強い計測方法を実現するため、複数の周波数で計測できる新たなセンサシステムの開発を行った。モデル培地を用い、センサシステムから得られるデータとの線形性、信頼性評価を行い、良好な結果をえることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来のセンサでは、20%より低い培地内水分量ではバラツキが大きく計測が困難であったが、新センサシステムでは、5%以下まで高い相関性を持つ計測を実現でき、農業分野での小型培地にも直接挿入可能なセンサシステムを完成させることができた。また、このセンサは他分野でも活用でき、高速道路法面に水分量センサを設置して観測の実施も行った。6か月以上の長期間の観測を確認し、地下水位の変動を土中水分量として可視化可能であることを確認することができた。幅広い分野での適用が可能であり、これまで得ることができなかった原位置での長期計測が可能なセンサシステムが実現できた。

研究成果の概要(英文)：I have developed a miniaturized semiconductor type water-content and ion-concentration sensor to measure in medium culture directly. I proposed a highly sensitive water content and ion-concentration sensor which was capable to measure low water content, to detect a weak electric current. I fabricated a proposal sensor chip with new structure which protected the flow through the sensor substrate to electrode. And new sensor system, which capable to operate several kinds of frequency, was developed for realization of a noise resistant measurement method. I performed linearity and reliability evaluations with the data obtained from the sensor system using the model medium. I succeed to obtain the good results from their examinations.

研究分野：半導体デバイス

キーワード：半導体型センサチップ 土中水分量 イオン濃度 オンサイトモニタリング センサシステム インピーダンス計測

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

農業分野において熟練の農家の“勘と経験”を数値化し、収量の増加や高付加価値作物生産、気象変動迅速対応による安定生産を実現しつつある。トマト栽培などの施設園芸では、根の水分・養分吸収量を制御するため、培地を小さくし過剰な養分供給を抑え気温・日射量などの気象条件に合わせた培地内環境の精密制御栽培（少量培地栽培）が主流になっている。既存の水分量センサや養分濃度センサ（すなわちイオン濃度センサ）はサイズが大きく、根の近傍の養分供給・吸収量の計測や、少量培地内への設置が困難であった。

研究代表者は培地内直接計測を目指した半導体型の小型水分量・イオン濃度センサの開発を行ってきた。現場計測を行っていく中、外乱ノイズでインピーダンス計測の位相計測が大きく乱れ、特に水分量 30 %以下や水道水以下の低イオン濃度で検出が困難となっていた。位相計測には電圧と電流の時間遅れを直接検出する I-V 法<sup>①</sup>や、基準発振器と比較する自動平衡ブリッジ法<sup>②</sup>、共振法<sup>③</sup>などがある。これらは単一周波数を精度よく計測することが可能であるが、ランダムに発生する外乱ノイズとの区別が困難であった。そのため、外乱ノイズの除去、低水分量・低イオン濃度計測を可能とし、全範囲を計測できるセンサの実現が急務となった。

### 2. 研究の目的

本研究では、電圧と電流の比であるインピーダンス  $|Z|$  の周波数微分を用いノイズに強い検出方法を確立すると共に、半導体チップ内部を流れるリーク成分を減少させる新たなセンサデバイスを製作することにより、低水分量・低イオン濃度でも土壌インピーダンスが計測可能なセンサシステムを構築することを目的とする。

### 3. 研究の方法

これまででは、図 1(a)に示すようにセンサチップ内部を流れるリーク電流が計測電流に混入し水分量・イオン濃度計測を困難にしていた。そこで、図 1(b)に示すように電圧印可部と電流受信部を分離し、受信部の電位を GND に固定化できるデバイスを製作した。受信部と半導体基板との間に保護電極を追加した構造にし、受信部と保護電極を常に同一電位（GND 電位）に保つよう設定する。同一電位に保たれた電極間は電流が流れないため、基板内を流れるリーク成分は保護電極から GND へ排出される。このリーク成分の影響を 1/10 以下にし、計測信号のみを受信部で検出することで、低水分量・低イオン濃度の計測限界の大幅な改善を可能としている。平行して  $|Z|$  周波数微分法を確立し、3 種類以上の異なる培地を用い、同一関数として扱えるか検証した。

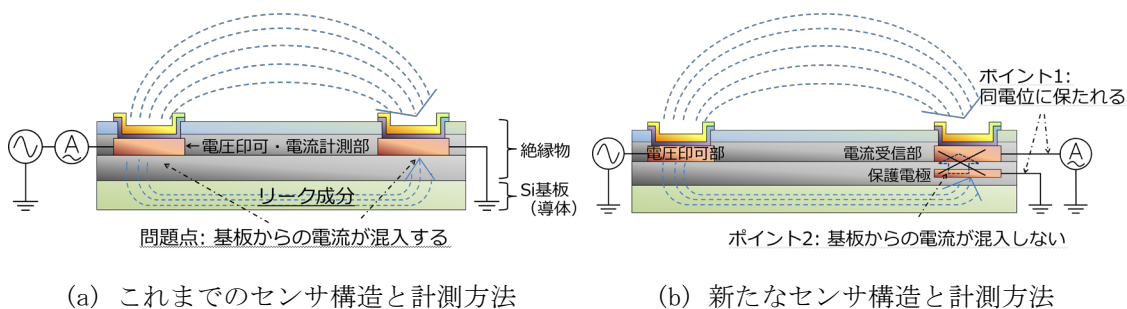


図 1 微弱信号検出のためのセンサチップの改良点

### 4. 研究成果

リーク電流が混入する電極部に保護電極を配置した新たなセンサ構造を提案しデバイス開発を行った。このセンサチップの写真を図 2 に示す。このセンサチップを駆動させ、 $|Z|$  周波数微

分法を実現するためには、オペアンプ型電流計と複数の周波数で計測できる新たなセンサシステムの開発が必要であった。そこで、これまでに開発してきた単一周波数（10 kHz）で動作させるセンサ駆動回路を元に、2種類の周波数（10 kHz と 100 kHz）を発振・検出でき、保護電極が駆動できるように、電流検出部をオペアンプの仮想接地機能としノイズ除去のためのフィルタの調整を行うことにより、新たなセンサ制御基盤の設計・開発を実現した。また、現地計測を視野にいれ、ソーラーパネルなどの電力で駆動できるように、待機時の低消費電力化も併せて行い、冬などの日射量の少ない時期でもメンテナンスが不要なシステムを開発することができた。開発したセンサチップ及び計測用の回路を用い、培地に含ませる水の量を調整した3種類のモデル培地を使って、計測値と理論値、そして従来センサとの比較を行った。この内の1種類の培地に対する計測結果を図3に示す。

これらの結果より、当初目的とする外乱ノイズに強く低水分・低イオン濃度培地でも計測できるセンサシステムの構築に成功することができた。この成果を学術論文誌への投稿し掲載された<sup>④</sup>。また、他分野へ応用展開を行い、高速道路法面などでの地下水位長期モニタリングなどへの寄与も実現した<sup>⑤⑥</sup>。

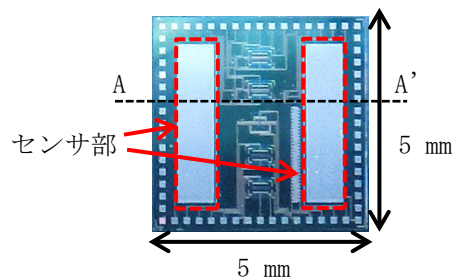


図2 センサチップ写真

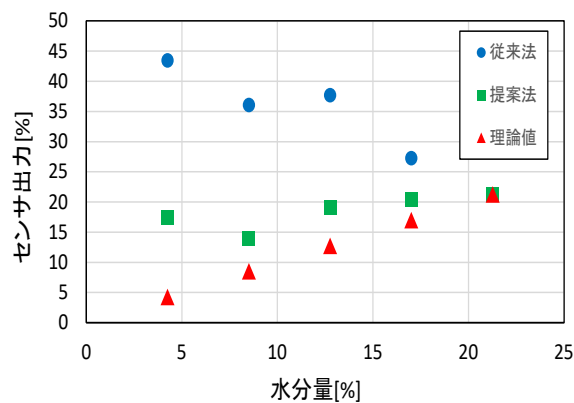


図3 低水分量培地での計測結果

<引用文献>

- ① D. Gupta, C. A. Ammersfeld, P. G. Vashi, J. King, S. L. Dahlk, J. F. Grutsch, C. G. Lis, "Bioelectrical impedance phase angle in clinical practice: implications for prognosis in stage IIIIB and I non-small cell lung cancer", BMC Cancer, vol.9, 2009, pp. 1-6.
- ② V. Dumbrava, L. Svilainis, "The Automated Complex Impedance Measurement System", Electronics and electronics and engineering, no. 4, 2007, pp. 59-62.
- ③ W. Wu, Y. He, T. Tand, F. Blaabjerg, "A New Design Method for the Passive Damped

LCL and LLCL Filter-Based Single-Phase Grid-Tied Inverter”, *Industrial Electronics, IEEE*, vol. 60, issue 10, 2013, pp. 4339-4350.

- ④ Masato Futagawa, Shin Ogasahara, Tatsumi Ito, Mitsuru Komatsu, Yasushi Fuwa, Harutoyo Hirano, Ippei Akita, Kenichiro Kusano, Minoru Watanabe, “Fabrication of a Low Leakage Current Type Impedance Sensor with Shielding Structures to Detect a Low Water Content of Soil for Slope Failure Prognostics”, *Sensors & Actuators: A. Physical*, Vol. 271, 2018, pp. 383-388
- ⑤ 二川 雅登、小松 満、藤原 優、高速道路路面地下水監視に向けた高感度小型水分量センサ計測回路の開発、*電気学会論文誌E*、 Vol. 1139、No. 9、2019、pp. 283-288.
- ⑥ 小松 満、二川 雅登、藤原 優、田久 勉、小型半導体チップセンサを用いた土中水分量のトモグラフィ計測に関する室内実験、*地盤工学会ジャーナル*、Vol. 15、No. 1、2020、pp. 199-211.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Futagawa Masato, Komatsu Mitsuru, Fujiwara Yu	4. 巻 139
2. 論文標題 Fabrication of a High-sensitive Small Signal Processing Circuit to Monitor Groundwater in Slope of Highway Road	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines	6. 最初と最後の頁 283 ~ 288
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejsmas.139.283	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 KOMATSU Mitsuru, FUTAGAWA Masato, FUJIWARA Yu, TAKYU Tsutomu	4. 巻 15
2. 論文標題 Laboratory experiment of the tomography measurement using a new microchip soil moisture sensor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Geotechnical Journal	6. 最初と最後の頁 199 ~ 211
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3208/jgs.15.199	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 小松 満, 二川雅登, 藤原 優, 田岸宏孝	4. 巻 67(7)
2. 論文標題 半導体センサを用いた土中水分分布の計測技術	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 地盤工学会誌	6. 最初と最後の頁 30-31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Futagawa Masato, Ogasahara Shin, Ito Tatsumi, Komatsu Mitsuru, Fuwa Yasushi, Hirano Harutoyo, Akita Ippei, Kusano Kenichiro, Watanabe Minoru	4. 巻 271
2. 論文標題 Fabrication of a low leakage current type impedance sensor with shielding structures to detect a low water content of soil for slope failure prognostics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A: Physical	6. 最初と最後の頁 383 ~ 388
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sna.2017.12.022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yasushi Fuwa, Masato Futagawa, Mitsuru Komatsu
2. 発表標題 Establishment of Technology for Constructing Sensor Networks to Support Safe and Secure Areas in Collaboration with the Local Government
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 二川雅登
2. 発表標題 小さなセンサで大きな領域を測る！多機能型土中水分量センサ開発と防災・農業分野での適用事例紹介
3. 学会等名 令和元年度科学技術交流会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 二川雅登
2. 発表標題 培地・溶液中のカリウムイオン濃度リアルタイム検出センサの開発
3. 学会等名 2019年度日本土壌肥料学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masato Futagawa
2. 発表標題 Study of a Semiconductor Type Multimodal Sensor to Monitor Soil Conditions in Agriculture and Disaster Prevention fields
3. 学会等名 BIT's 8th Annual World Congress of Advanced Materials Japan 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 寺岡 佑起, 長屋 昇吾, 安富 啓太, 大多 哲史, 平野 陽豊, 川人 祥二, 二川 雅登
2. 発表標題 土壌過渡応答特性を利用した土中水分量・イオン濃度計測システムの開発
3. 学会等名 第36回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久田裕史, 藤原優, 二川雅登, 小松満
2. 発表標題 半導体センサを用いた盛土内水分量評価の現地適用性検証
3. 学会等名 第33回日本道路会議
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 二川雅登
2. 発表標題 防災のためのマルチモーダルセンサに関する研究と高速道路沿線への適用事例
3. 学会等名 令和元年度防災総合センター研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久田裕史, 藤原優, 二川雅登, 小松満
2. 発表標題 盛土の排水対策前後における半導体センサを用いた土中水分量の評価
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 寺岡佑起、長屋昇吾、安富啓太、平野陽豊、川人祥二、二川雅登
2. 発表標題 水分量・イオン濃度センサ用フィードバック型インピーダンス計測回路チップの製作
3. 学会等名 令和元年度電気学会E部門総合研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 峰松 泰浩, 山本 将也, 大多 哲史, 平野 陽豊, 二川 雅登
2. 発表標題 22.土中水分量広範囲計測に向けた精密時間同期が不要なインピーダンス計測に関する研究
3. 学会等名 第35回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masato Futagawa, Shin Ogasahara, Tatsumi Ito, Mitsuru Komatsu, Yasushi Fuwa, Harutoyo Hirano, Ippei Akita, Kenichiro Kusano, and Minoru Watanabe
2. 発表標題 Fabrication of a Low Leakage Current Type Impedance Sensor to Monitor Soil Water Content for Slope Failure Prognostics
3. 学会等名 The 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長屋 昇吾、安富 啓太、平野 陽豊、川人 祥二、二川 雅登
2. 発表標題 土壌培地内計測を目指した土中水分量・イオン濃度センサ用 インピーダンス計測回路チップの製作と評価
3. 学会等名 第34回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 上村 深介、許山 久美子、平野 陽豊、渡辺 実、小松 満、二川 雅登
2. 発表標題 半導体型pH センサによる低水分量土壌pH 計測に関する研究
3. 学会等名 第34回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 二川 雅登、許山 久美子、平野 陽豊、渡辺 実、小松満
2. 発表標題 ISFET 型pH センサを用いた低水分量土壌でのpH 計測に関する研究
3. 学会等名 平成29年電気学会 E 部門総合研究会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 二川雅登	4. 発行年 2019年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 222
3. 書名 暮らしと人を見守る水センシング技術	

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 土壌評価センサ、土壌評価システム及び土壌評価センサ用の電極及びインピーダンス特性を得る装置	発明者 二川雅登	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-198529	出願年 2018年	国内・外国の別 国内
産業財産権の名称 土壌センサ及び土壌計測方法	発明者 二川雅登、川人祥二、安富啓太	権利者 静岡大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2017-204337	出願年 2017年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

静岡大学三川研究室ホームページ  
<https://wpp.shizuoka.ac.jp/futagawa/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----