

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 14 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24510169

研究課題名(和文) グラニエ法をベ - スにした植物生体情報計測用マイクロ水分動態センサに関する研究

研究課題名(英文) Micro scale sap flow sensor based on Granier sensor for measuring biological information of plant branches

研究代表者

下川 房男(Shimokawa, Fusao)

香川大学・工学部・教授

研究者番号：90580598

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、グラニエセンサに着目し、それをベ - スに超小型化(従来比:1/10)・1チップ上への機能集積化(5mm角のSiチップ上に、マイクロプロ - プ、温度センサ、薄膜ヒ - タ等の主要構成要素を一体形成)した超小型の植物水分動態センサを提案するとともに、MEMS技術を駆使して、センサのプロトタイプ製作に成功した。また、製作したセンサを用いて、微量流量(流速:0～150 $\mu\text{m/s}$)の測定が可能であることを明らかにするとともに、実際の植物体としてレタスを用いて、流速の一日の変化を調べ、植物で一般的に観測される蒸散量の日変化の傾向と良く一致する結果が得られる等、センサの実用性を示唆する学術デ - タを取得した。

研究成果の概要(英文)：We developed a micro sap flow sensor using the measuring principle of the Granier's method by applying MEMS technology. By using the micro fabrication techniques, we fabricated an integrated micro sap flow sensor consisting of micro probes, temperature sensor and thin-film micro heater on a Si substrate. The fabricated micro sensor was reduced to 1/10 the size of a conventional Granier sensor (diameter: 2mm, length:20 mm). To investigate the use of the proposed sensor in measuring the actual sap flow amount of plants, an experimental system (to control the flow inside a tube) imitating a plant's stem was fabricated. As the result, we demonstrated the use of the sensor in obtaining sap flow amount data (0～150 $\mu\text{m/s}$), similar to the use of a conventional sensor. By using a fabricated micro sensor, a normal diurnal sap flow pattern was observed in model plant. Therefore, we successfully demonstrated the applicability of the proposed sensor to an actual plant.

研究分野：MEMS

キーワード：農業ICT 植物生体情報計測 MEMS マイクロセンサ 水分動態 新梢末端 微量流量 高速応答性

1. 研究開始当初の背景

作物、果樹の生産では、植物の生育状態に合わせて適切な時期に灌水や養分補給を行なう必要があり、このためには、植物の生育に影響を与えず、その生育状態を的確にモニタリングするセンシング技術が不可欠である。これに対し、大半の農業現場では、無降雨日数に基づき、経験や勘に頼った灌水や養分補給が行なわれているのが現状である。植物の生体情報に基づいて作物や果樹の水分制御や施肥管理が実現できれば、作物の生産性向上や高品質果実の安定生産に繋がることから、本研究に関わる植物水分動態センサの実用化が強く求められている。

一方、従来のグラニエ法を用いた植物水分動態センサは、センサのプローブ径 ϕ が約2mm、プローブ長が2~3cm程度であり、太い樹木(直径 ϕ が20cm程度)を対象としたものである。このため、最も重要となる植物の新梢末端や果柄等の細部(茎の直径 ϕ が数mm以下)の水分動態については、これまで直接測定することができなかった。

2. 研究の目的

本研究では、MEMS技術を駆使することにより、従来にない超小型の植物水分動態センサ(従来に比べ寸法が1/10、プローブ径 ϕ :約0.1~0.2mm、プローブ長:0.3~0.5mm程度)を実現し、更なるそのセンサを用いて、植物の新梢末端や果柄等の細部の水分動態の測定を行なうとともに、流速(流量)測定に関する高速応答性等、センサの有用性を実証することにある。

3. 研究の方法

(1) 研究の基本的な進め方

本研究では、保有するMEMS関連の基盤技術とそれをベースにしたプロセス技術の高度化・最適化により、超小型の植物水分動態センサのプロトタイプを実現する。更に、このセンサを用いて、擬似植物実験系(流量制御可能なマイクロシリンジポンプと ϕ 1mm程度の細径チューブ、マイクロ電子天秤等から構成)とモデル植物(サニーレタス)において、水分動態測定を行なう。

(2) 提案した超小型の植物水分動態センサ

図1に、本研究で提案した超小型の植物水分動態センサの概略構成を示す。提案したセンサは、従来のグラニエ法によるセンサの構成要素であるヒータ付き温度センサとリファレンス用の温度センサから成り、保有するMEMS技術を駆使し、細径の(a)マイクロプローブ、(b)薄膜ヒータ、(c)温度センサ(pn接合ダイオード)等をSiチップ上に一括形成したものである。この水分動態センサでは、二つのセンサ間の温度差 T が流速 U の関数となることを利用し、流速 U とプローブが茎の円周方向に作る断面積 S との積から、流量 $F(=U \times S)$ を算出する。

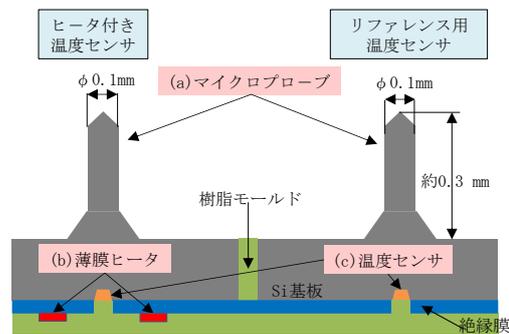


図1 本研究で提案した超小型の植物水分動態センサ

4. 研究成果

(1) センサの製作プロセスとプロトタイプ

本研究のセンサの製作には、さまざまなセンサやアクチュエータ等の製作に用いられている半導体微細加工技術(フォトリソグラフィ、エッチング、薄膜形成等)を応用したMEMS技術を用いた。

具体的には、二つのSiのドライエッチング技術(①プローブの先端部:RIE(Reactive Ion Etching)装置による結晶異方性エッチング、②プローブの柱状構造:ICP-RIE(Inductive Coupled Plasma-Reactive Ion Etching)装置による垂直方向性エッチング)を組み合わせることで、目標としたプローブ形状(先端部が針状で、その他が柱状構造)と寸法(プローブ径 ϕ :約0.1mm、プローブ長さ:約0.3mm)のマイクロプローブを実現した(図2)。

更に、フォトリソグラフィ・エッチング・薄膜形成(拡散を含む)を駆使して、薄膜ヒータや温度センサ(pn接合ダイオード)を5nm程度のSiチップ上に機能集積化した超小型の植物水分動態センサのプロトタイプの製作に成功した。

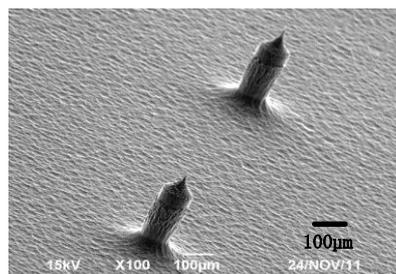


図2 マイクロプローブ部のSEM外観写真

図3は、これらのセンサのキーコンポーネント(①マイクロプローブ、②薄膜ヒータ、③温度センサ)の製作方法について纏めたものである。同図(a)は、マイクロプローブの形成に用いたプローブ面、また同図(b)は、薄膜ヒータや温度センサの形成に用いたセンサ面のプロセスフローである。尚、薄膜ヒータや温度センサが形成されたセンサ面は、マイクロプローブが形成されたプローブ面の裏面側にあたる。

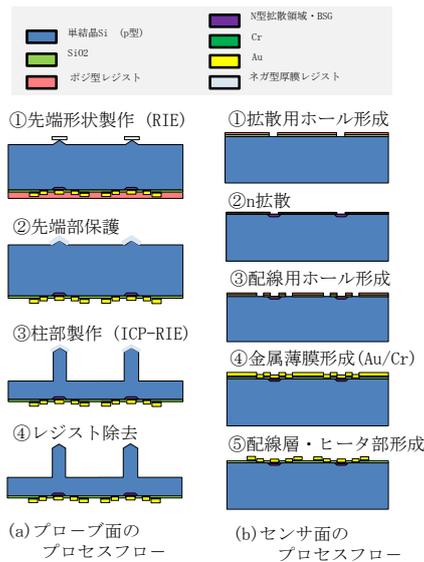


図3 センサの製作プロセス

(2) 製作したセンサの基本特性

図4は、製作した薄膜ヒータの特性に関して、プローブ部の温度(赤外線サーモグラフィにより非接触で測定)と薄膜ヒータの駆動電圧との関係を示したものである。一般的な従来のグラニエセンサでは、プローブ温度を概ね40~50℃まで上昇させて用いていることから、本センサにおいても、その温度を目標値とした。

その結果、本センサに搭載した薄膜ヒータにおいても、流量データの取得に十分な温度出力(室温~70℃までの昇温)が得られていること、更に駆動電圧によってプローブ部の温度制御ができることが確認できた。また、薄膜ヒータの駆動に必要な消費電力も、従来のセンサと同等の0.2W程度(@DC3V駆動)であることから、本センサにおいても、従来センサと同様に、植物への深刻な熱的なダメージはないものと推測される。

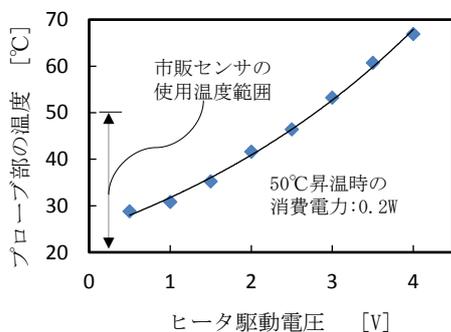


図4 薄膜ヒータの基本特性

更に、図5は、本センサに内蔵した温度センサの特性評価で結果である。図より、製作した温度センサは、図4で示した薄膜ヒータの昇温範囲において、温度測定が可能となった(約20~85℃の範囲での温度センサの感度: $-4.4\text{mV}/^\circ\text{C}$)。

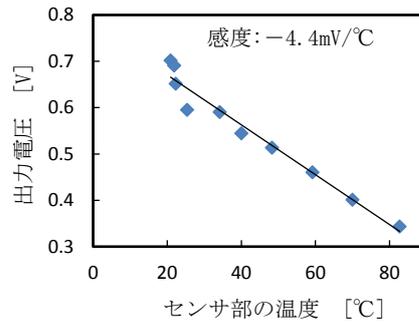


図5 温度センサの基本特性

以上のことから、製作した超小型の植物水分動態センサでは、目標としたセンサ仕様を満足する基本性能が得られていることが確認できた。

(3) 擬似植物実験系の構築と微量流量測定

本研究で製作したセンサを用いて、植物の水分動態測定を行なうには、任意の流量を安定して流すことができ、然もその流量の絶対値を検出可能な測定機材等が組み込まれた擬似植物実験系の構築が必要である。

本研究で製作した擬似植物実験系は、①マイクロシリンジポンプ、②擬似的な植物維管束となる直径 $\phi 1\text{mm}$ ・肉厚0.1mmのシリコンチューブ、更に③チューブから流れ出る流量の絶対値測定を行なうために最少表示が0.01mgの精度を有するマイクロ電子天秤から構成される(図6)。実験では、シリコンチューブ内におが屑を詰め込み、その中に水を流し込むことで擬似的な植物維管束を形成し、そこに本研究で製作したセンサを挿し込み、微量流量の測定を行った。

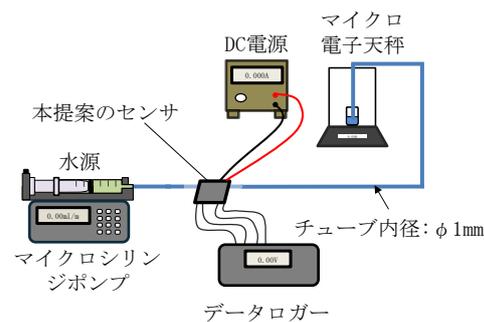


図6 擬似植物実験系の概略構成

図7は、Granierによって、さまざまな植物等で計測された流量測定結果¹⁾と、本研究のセンサを用いて上記の擬似植物実験系で測定した流量測定結果とを、図中に合わせて示したものである。両者の回帰曲線の係数の値は異なるものの、本研究のセンサにおいても、従来のグラニエセンサと同様に、センサの出力の大小から流速を算出できることが明らかとなった(本研究の超小型センサで取得可能な流速の範囲は、従来センサと同様、0~150 $\mu\text{m/s}$ である)。

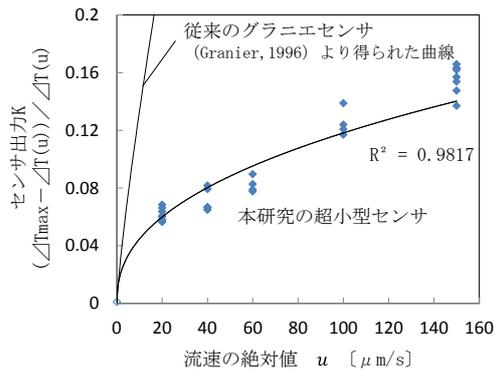


図7 グラニエセンサ(リファレンス)と本研究の超小型の植物水分動態センサによる流速測定結果の比較

これらのことから、一般的なグラニエセンサ(植物の主幹部に設置)と本研究の超小型の植物水分動態センサを組み合わせて用いることで、さまざまな環境下での植物の主幹部と新梢末端や器官細部(本研究で提案したセンサを多点配置)での道管流量の相関関係の把握や、植物全体での水分動態に関する学術的なデータの取得が可能になると考えられる。

(4)モデル植物での水分動態測定

図8は、モデル植物として、サニーレタス为例に取り上げ、本センサを用いて、流速(流量)の一日の変化を調べた実験結果の一例である。用いた植物は、活発に栄養成長段階にあり、実験室でガラス窓を介した自然光条件のもとで計測した。尚、製作したセンサのプロブは、葉の表面の真中にある主脈部に、表皮からプロブが完全に埋まるまで突き刺した。得られた実験結果は、植物で一般的に観測されている蒸散量の日中変化とも傾向が良く一致していることが確認できた。

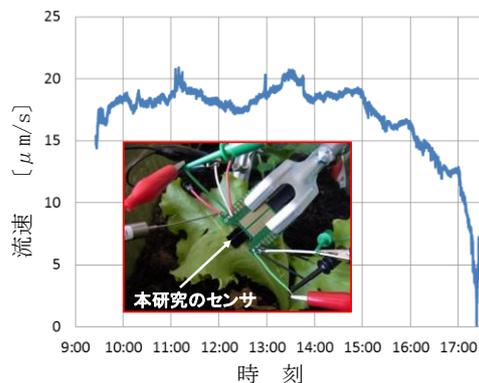


図8 本研究のセンサを用いてサニーレタスで測定された流速(流量)の日中変化

また、本研究のセンサでは、植物体にプロブを挿入してから、直ちに測定が開始でき(数十秒以下)、かつそれ以降は、安定な流速を示した。このことから、本研究のセンサは、植物の新梢末端や果柄等の細部の水分動態測定に関して、高速応答性(センサの有用性)を有することが実証された(従来のグラニエ

センサでは、通常、センサを樹木に埋め込んで、固定してから、一昼夜してから安定な測定が可能となる)。

一方、気象観測データや栽培履歴等の管理されたサニーレタスの栽培において、定植時期と収穫時期前の土壌水分が少ない場合には、収量の激減や収穫時期の大幅な遅れが発生することが報告されている。本研究で提案した植物水分動態センサでは、土壌センサに比べて、より直接的に水分動態を管理できるため、植物の生体情報計測において有望なツールに成り得ると考えられる。

(5)まとめと今後の展望

本研究では、市販のグラニエセンサをベースに、MEMS技術を駆使して、従来の1/10の大きさで、かつ5mm程度のSiチップ上に機能を集積化した超小型の植物水分動態センサを初めて実現した。更に、擬似植物実験系やモデル植物を用いた水分動態に関する基本実験から、微小流量の測定(0~150 μm/s)が可能であることを確認した。このことから、本研究で提案した植物水分動態センサにより、これまで直接測定できなかった植物部位(新梢末端や器官細部等)の水分動態を、非破壊、かつ高解像度で測定できる可能性を明らかにした。

今後、モデル植物において、土壌センサと本研究の植物水分動態センサとの対応関係、更にこれらのセンサ情報や環境情報(温度、湿度、日射量等)と植物の生育状態・収量等に関する多角的なデータの取得・蓄積が必要と思われる。本研究で提案したセンサの実用性を高め、農業分野において、作物の生産性向上や高品質果実の安定生産等に資することができるように、研究開発を継続して推し進めていきたい。

<引用文献>

1) Granier, Sap flow measurement using the radial flowmeter technique, INRA-d' Ecophysiologie Forestière, Champagnoux, (1996).

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計7件)

- ① 矢野裕也, 寺尾京平, 鈴木孝明, 高尾英邦, 小林剛, 片岡郁雄, 下川房男, 植物新梢末端の師管流計測を目指した超小型師管流センサ(1) -師管流の向き, 師管流量の測定-, 日本生態学会第62回大会, PA1-084, 2015年3月18日~3月22日, 鹿児島大学 郡元キャンパス(鹿児島県・鹿児島市)。
- ② 米田 晃人, 矢野裕也, 寺尾京平, 鈴木孝明, 高尾英邦, 下川房男, 小林剛, 片岡郁雄, 植物新梢末端の師管流計測を目指した超小型師管流センサ(2) -師管液の抽出・成分測定-, 日本生態学会第62回大会, PA1-095, 2015年3月18日~3月22日。

日、鹿児島大学 郡元キャンパス（鹿児島県・鹿児島市）。

- ③ 下川房男, 小林剛, MEMS 技術を用いた超小型維管束（道管流・師管流）モリタリングセンサの研究（招待講演），日本生態学会第 61 回大会，企画集会 T15-4，2014 年 3 月 14 日～3 月 18 日，広島国際会議場（広島県・広島市）。
- ④ Y. Yano, M. Ochi, K. Terao, T. Suzuki, H. Takao, F. Shimokawa, T. Kobayashi, I. Kataoka, Microscale phloem flow sensor using MEMS technology for measuring biological information of plant branches, NANO-SciTech 2014 & IC-NET 2014 (Malaysia-Japan International Conference on Nanoscience, Nanotechnology and Nanoengineering 2014), Feb.28-Mar. 3, 2014, Shah Alam, Selangor, MALYSIA.
- ⑤ 越智誠, 矢野裕也, 寺尾京平, 鈴木孝明, 高尾英邦, 小林剛, 片岡郁雄, 下川房男, 植物末端の樹液流速の測定を目指した超小型道管流センサ, 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（電気学会 センサ・マイクロマシン部門）, 5PM3-PSS-129, 2013 年 11 月 5 日～7 日, 仙台国際センター（宮城県・仙台市）。
- ⑥ M. Ochi, T. Suzuki, H. Takao, F. Shimokawa, T. Kobayashi, I. Kataoka, Micro Sap Flow Sensor Using MEMS Technology for Application to Biological Information Measurement of Plants, Third International Conference on Plant Vascular Biology, P4-05, July 26-30, 2013, Helsinki, Finland.
- ⑦ M. Ochi, T. Suzuki, H. Takao, F. Shimokawa, T. Kobayashi, I. Kataoka, Fabrication of micro sap flow sensors by using MEMS technology, The 29th Sensor Symposium on Sensor, Micromachines and Applied Systems (2012 Annual Conference of Sensor and Micromachines Society, The Institute of Electrical Engineers of Japan), SPLN-7, October 22-24, 2012, Kitakyushu International Conference Center (Fukuoka Prefecture・Kitakyushu City).

〔産業財産権〕

○出願状況（計 3 件）

名称：植物水分動態センサ

発明者：下川房男, 高尾英邦, 鈴木孝明, 小林剛, 片岡郁雄

権利者：同上

種類：特許

番号：PCT/JP2015/000325

出願年月日：2015 年 1 月 26 日

国内外の別： 国外

名称：植物水分動態センサ

発明者：下川房男, 高尾英邦, 鈴木孝明, 小林剛, 片岡郁雄

権利者：同上

種類：特許

番号：特願 2014-18226

出願年月日：2014 年 2 月 3 日

国内外の別： 国内

名称：植物水分動態センサ

発明者：下川房男, 高尾英邦, 鈴木孝明, 小林剛, 片岡郁雄

権利者：同上

種類：特許

番号：特願 2013-89146

出願年月日：2013 年 4 月 22 日

国内外の別： 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

下川 房男 (SHIMOKAWA Fusao)

香川大学・工学部・教授

研究者番号：90580598

(2) 研究分担者

高尾 英邦 (TAKAO Hidekuni)

香川大学・工学部・教授

研究者番号：40314091

(3) 研究分担者

小林 剛 (KOBAYASHI Tsuyoshi)

香川大学・農学部・准教授

研究者番号：70346633