

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2015年8月6日(06.08.2015)



(10) 国際公開番号
WO 2015/115084 A1

- (51) 国際特許分類:
G01F 1/684 (2006.01) G01F 1/692 (2006.01)
A01G 7/00 (2006.01) G01P 5/12 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2015/000325
- (22) 国際出願日: 2015年1月26日(26.01.2015)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2014-018226 2014年2月3日(03.02.2014) JP
- (71) 出願人: 国立大学法人香川大学(NATIONAL UNIVERSITY CORPORATION KAGAWA UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒7608521 香川県高松市幸町1番1号 Kagawa (JP).
- (72) 発明者: 下川 房男(SHIMOKAWA, Fusao); 〒7610396 香川県高松市林町2217番地20国立大学法人香川大学工学部内 Kagawa (JP). 高尾英邦(TAKAO, Hidekuni); 〒7610396 香川県高松市林町2217番地20国立大学法人香川大学工学部内 Kagawa (JP). 鈴木 孝明(SUZUKI, Takaaki); 〒7610396 香川県高松市林町2217番地20国立大学法人香川大学工学部内 Kagawa (JP). 小

林 剛(KOBAYASHI, Tsuyoshi); 〒7610795 香川県木田郡三木町池戸2393国立大学法人香川大学農学部内 Kagawa (JP). 片岡 郁雄(KATAOKA, Ikuo); 〒7610795 香川県木田郡三木町池戸2393国立大学法人香川大学農学部内 Kagawa (JP).

(74) 代理人: 特許業務法人山内特許事務所(YAMAUCHI PATENT ATTORNEYS); 〒7600023 香川県高松市寿町1丁目1番8号日本生命高松駅前ビル3階 Kagawa (JP).

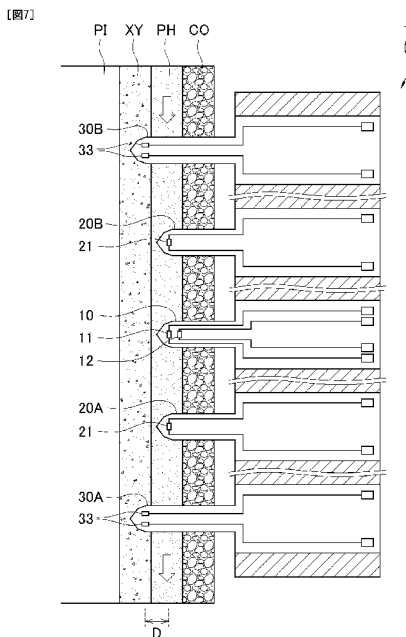
(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨー

[続葉有]

(54) Title: PLANT MOISTURE MOVEMENT STATE SENSOR

(54) 発明の名称: 植物水分動態センサ



(57) Abstract: The present invention provides a plant moisture movement state sensor capable of measuring the movement state of moisture flowing through the inside of a shoot end, peduncle, or other small plant part. A plant moisture movement state sensor is provided with a heater-equipped temperature probe (10) provided with a temperature sensor (11) and a heater (12), a temperature probe (20) provided with a temperature sensor (21), an electrical resistance probe (30) provided with electrodes (33) for electrical resistance measurement, and a support unit (80) for supporting the probes (10, 20, 30) in a state of parallel alignment. The location of a conducting vessel (XY) can be detected from the electrical resistance measured by the electrical resistance probe (30), and the temperature sensors (11, 21) can thus be accurately placed at the position of a sieve tube (PH) or the conducting vessel (XY). As a result, it is easy to attach a plant moisture movement state sensor (1) and the moisture movement state of a plant can be measured accurately.

(57) 要約: 新梢末端や果柄等の植物細部内を流れる水分動態を測定することができる植物水分動態センサを提供する。温度センサ11とヒータ12とが設けられたヒータ付温度プローブ10と、温度センサ21が設けられた温度プローブ20と、電気抵抗測定用電極33が設けられた電気抵抗プローブ30と、各プローブ10、20、30を平行に並べた状態で支持する支持部80とを備える。電気抵抗プローブ30で測定された電気抵抗から導管XYの位置を検出できるので、温度センサ11、21を篩管PHまたは導管XYの位置に正確に配置することができる。そのため、植物水分動態センサ1の取り付け作業が容易であり、植物の水分動態を精度よく測定することができる。



WO 2015/115084 A1

ロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG). 添付公開書類:
— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

明 細 書

発明の名称：植物水分動態センサ

技術分野

[0001] 本発明は、植物水分動態センサに関する。さらに詳しくは、植物の新梢末端等の細部における水分動態測定を行うことができる植物水分動態センサに関する。

背景技術

[0002] 作物や果樹等の生産では、生産性の観点から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う必要がある。このため、植物の生育に影響を与えず、その生育状態を的確に把握することが非常に重要となる。

[0003] 一般的に、多くの農業現場では、例えば無降雨日数に基づいた経験や勘によって植物の生育状態を把握しているというのが現状である。しかし、経験等に基づく方法によって植物の生育状況を管理するには、熟練が必要であり手間や時間がかかる。また、基準となる指標が個人的な経験等に基づくものである。したがって、このような経験等に基づいて植物の生育状態を把握する方法は、誰もが簡便に実施することは難しい。

[0004] 一方、近年、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を行うための様々な技術が開発されている。その中でグラニエ法を利用した測定方法が注目を集めている。この測定方法は、植物の樹液流量を直接測定することができるので、植物の生体情報をより正確に把握することができるという測定方法である（例えば、特許文献1）。

[0005] 特許文献1には、樹木の主幹にドリル等によって形成した孔の中に配置することができる棒状の温度センサおよび棒状のヒータ付センサを備えた装置が開示されている。そして、特許文献1には、この装置の両センサを樹木の辺材部に形成した孔の中に配置し、所定の時間経過後に両センサ間における温度差に基づいて樹木中を流れる樹液流量を測定するという技術が開示されている。

[0006] しかし、特許文献1の装置は、そもそも茎径が大きい樹木（具体的には、20cm以上）を測定するために開発されたものであり、装置に用いられる棒状のセンサもその大きさが直径2～3mm以上、長さ2～3cm以上となるように形成されている。このため、特許文献1の装置では、茎径が20cmよりも小さい植物には適用できない。しかも、樹液流量を測定するためには、ドリル等によって樹木に孔を形成する必要がある。このため、装置を設置した後、数日後でなければ、特許文献1の装置を用いて樹液流量を測定することができないし、樹木の表皮を削り取り、ドリルで孔を開けてセンサを挿入するため、破壊試験である。

[0007] そこで、茎径の小さな植物にも適用可能な装置が開発されている（例えば、特許文献2）。特許文献2には、平面視長方形の薄膜基材であって、縦（長手方向）の長さが約15～20mm程度、横の長さが10mm程度、厚さが数百 μm ～1mm程度の茎液流測定センサが開示されている。この茎液流測定センサは、基材上に一对の薄膜金属測温抵抗体とこの一对の抵抗体の間に薄膜金属ヒータが配設されている。そして、特許文献2には、この茎液流測定センサをトマトの茎の軸方向に沿って形成した切り込みに長手方向の面から約2/3程度挿入し、抵抗体とヒータが茎の内部の導管内に位置するように配置することによって、植物への悪影響を小さくしつつ、茎液流を測定することができる旨の記載がある。

先行技術文献

特許文献

[0008] 特許文献1：特開平6-273434号公報

特許文献2：特開2008-233047号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0009] 上述したように、植物の生育状態を把握するには、植物の樹液流量を直接測定することが重要である。特に、作物や果樹等の生産性および品質を向上

させる上では、植物の新梢末端や果柄等、作物や果樹等の近傍に位置する太さが数mm程度の植物細部中の水分の動き（つまり水分動態）を測定することが非常に重要である。

[0010] 特許文献2の茎液流測定センサは、特許文献1の装置に比べて小型化されているので茎径が20cmよりも小さな植物に対しても適用することが可能であり、植物へ取付ける際の測定対象部位の破壊も特許文献1の装置に比べて小さくなる。しかしながら、特許文献2の茎液流測定センサでは、茎に縦約20mm、深さ約5～10mmの切り込みを形成する必要があるため、茎径が数mmの新梢末端等へ取付けることができない。しかも、仮に取付けが可能であったとしても、特許文献2のセンサを取付ける際に新梢末端等植物の生育において重要となる部位に上記のごとき傷を形成するので、かかる傷が原因となる感染や枝枯れ等を引き起こす可能性がある。

[0011] 現状では、植物の新梢末端や果柄等の細部中の水分動態を測定することができる水分動態センサは開発されておらず、新梢末端等の細部に障害を与えることなく、細部中の水分動態を精度よく測定することができるセンサの開発が望まれている。

[0012] 本発明は上記事情に鑑み、新梢末端や果柄等の植物細部内を流れる水分（液体）の動態（水分動態）を、植物にダメージ(損傷)を与えることなく誰でも簡単に測定することができる植物水分動態センサを提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0013] 第1発明の植物水分動態センサは、植物中の水分動態を測定するためのセンサであって、温度センサとヒータとが設けられたヒータ付温度プローブと、温度センサが設けられた温度プローブと、電気抵抗測定用電極が設けられた電気抵抗プローブと、前記ヒータ付温度プローブ、前記温度プローブおよび前記電気抵抗プローブを平行に並べた状態で支持する支持部と、を備えることを特徴とする。

第2発明の植物水分動態センサは、第1発明において、前記電気抵抗測定

用電極および前記温度センサは、前記植物への突き刺し方向に異なる位置に配置されており、前記電気抵抗測定用電極を前記植物の導管の位置に配置した状態において、前記温度センサが該植物の篩管の位置に配置されることを特徴とする。

第3発明の植物水分動態センサは、第1発明において、前記温度センサおよび前記電気抵抗測定用電極は、前記植物への突き刺し方向に同位置に配置されていることを特徴とする。

第4発明の植物水分動態センサは、第1、第2または第3発明において、前記電気抵抗プローブが2つ備えられていることを特徴とする。

第5発明の植物水分動態センサは、第1、第2、第3または第4発明において、前記温度プローブが2つ備えられており、2つの前記温度プローブは、前記ヒータ付温度プローブを挟む位置に設けられていることを特徴とする。

第6発明の植物水分動態センサは、第1、第2、第3、第4または第5発明において、前記電気抵抗プローブは、前記ヒータ付温度プローブまたは前記温度プローブと一体のプローブとして形成されていることを特徴とする。

第7発明の植物水分動態センサは、第1、第2、第3、第4、第5または第6発明において、前記植物の樹液が流入する流路が形成された捕集プローブを備えることを特徴とする。

第8発明の植物水分動態センサは、第7発明において、前記捕集プローブは、前記ヒータ付温度プローブ、前記温度プローブ、または前記電気抵抗プローブと一体のプローブとして形成されていることを特徴とする。

第9発明の植物水分動態センサは、第1、第2、第3、第4、第5、第6、第7または第8発明において、前記ヒータ付温度プローブ、前記温度プローブ、前記電気抵抗プローブおよび前記支持部は、SOI基板で形成されており、前記ヒータ付温度プローブ、前記温度プローブおよび前記電気抵抗プローブは、前記支持部の縁に片持ち梁状に形成されていることを特徴とする。

発明の効果

[0014] 第1発明によれば、電気抵抗プローブで測定された電気抵抗から導管の位置を検出できるので、温度センサを師管または導管の位置に正確に配置することができる。そのため、植物水分動態センサの取り付け作業が容易であり、植物の水分動態を精度よく測定することができる。

第2発明によれば、プローブを植物に突き刺す際に、電気抵抗プローブが導管を検出する深さまで突き刺せば、温度センサを師管の位置に正確に配置することができる。そのため、植物水分動態センサの取り付け作業が容易であり、師管流の流量等を精度よく測定することができる。

第3発明によれば、プローブを植物に突き刺す際に、電気抵抗プローブが導管を検出する深さまで突き刺せば、温度センサを導管の位置に正確に配置することができる。そのため、植物水分動態センサの取り付け作業が容易であり、導管流の流量等を精度よく測定することができる。

第4発明によれば、プローブを植物に突き刺す際に、2つの電気抵抗プローブが導管を検出する深さまで突き刺せば、温度センサを師管または導管に沿って配置することができる。

第5発明によれば、2つの温度プローブで測定された温度を比較することで、樹液流の方向を特定できる。

第6発明によれば、プローブの本数を少なくできるので、植物水分動態センサを小型化することができる。また、プローブの本数を少なくできるので、植物に対するダメージをより小さくできる。

第7発明によれば、捕集プローブにより樹液を捕集できるので、樹液に含まれる栄養物質の分析に用いることができる。

第8発明によれば、プローブの本数を少なくできるので、植物水分動態センサを小型化することができる。また、プローブの本数を少なくできるので、植物に対するダメージをより小さくできる。

第9発明によれば、植物水分動態センサを小型化することができ、プローブを微細化できる。そのため、かかる植物水分動態センサを植物に設置して

も植物に対するダメージ(損傷)を小さくできるので、長期間設置しておくことができる。その結果、植物の水分動態を長期間に渡ってモニタリングすることができるので、植物の生育状態に合わせて適切な水分供給や養分補給(施肥)を行うことができる。

図面の簡単な説明

- [0015] [図1]第1実施形態に係る植物水分動態センサの平面図である。
- [図2]同植物水分動態センサの側面図である。
- [図3]同植物水分動態センサの温度センサを含む回路図である。
- [図4]同植物水分動態センサのヒータを含む回路図である。
- [図5]同植物水分動態センサの電気抵抗測定用電極を含む回路図である。
- [図6]同植物水分動態センサの使用状況の概略説明図である。
- [図7]同植物水分動態センサの使用状況の概略拡大説明図である。
- [図8]第2実施形態に係る植物水分動態センサの使用状況の概略拡大説明図である。
- [図9]第3実施形態に係る植物水分動態センサの使用状況の概略拡大説明図である。
- [図10]第4実施形態に係る植物水分動態センサの平面図である。
- [図11]第5実施形態に係る植物水分動態センサの平面図である。
- [図12]第7実施形態に係る植物水分動態センサの平面図である。
- [図13]図12におけるXIII-XIII線矢視断面図である。
- [図14]第8実施形態に係る植物水分動態センサの平面図である。
- [図15]図14におけるXV-XV線矢視断面図である。
- [図16]植物水分動態情報採取システムの概略説明図である。
- [図17]位置検出実験の実験装置の説明図である。
- [図18]針状電極の突き刺し深さと電気抵抗との関係を示すグラフである。
- [図19]実験に使用した擬似植物実験系の概略図である。
- [図20]ヒータ付温度プローブおよび温度プローブの温度の経時変化を示すグラフである。

[図21]流量とK値との関係を示すグラフである。

発明を実施するための形態

[0016] つぎに、本発明の実施形態を図面に基づき説明する。

本発明に係る植物水分動態センサは、植物中の水分動態を測定するためのセンサであって、植物の新梢の末端（以下、単に新梢末端という）や果柄等の植物の細部にも容易に取り付けることができ、かかる細部における水分動態測定を行うことができるセンサである。

[0017] 本発明に係る植物水分動態センサは、グラニエ法を利用して植物の水分動態を測定する。そこで、本発明に係る植物水分動態センサを説明する前に、グラニエ法の原理について簡単に説明する。

[0018] グラニエ法は、グラニエセンサを用いて樹液流量 F を算出する方法である。このグラニエセンサは、一対の棒状のプローブを備えている。この一対のプローブにはそれぞれ温度センサが設けられている。一対のプローブのうち、一方のプローブにはヒータが設けられている（以下、単にヒータ付温度プローブHPという）。他方のプローブは、リファレンス用として使用するプローブであり、単に温度プローブRPという。

[0019] 以下、グラニエセンサを樹木に設置して、樹木中の樹液流量 F を測定する方法について説明する。

[0020] まず、ドリル等によって樹木の主幹に2ヶ所の孔を形成する。それぞれの孔にグラニエセンサのヒータ付温度プローブHPと温度プローブRPを挿入して樹木に設置した後、1日以上静置する。グラニエセンサの温度プローブRPとヒータ付温度プローブHPは、樹液流の方向に沿って上流から下流に向かってこの順に配置する。つまり、樹液流が根本から末端に向かう方向である場合には、根本側の孔に温度プローブRPを挿入し、末端側の孔にヒータ付温度プローブHPを挿入する。

[0021] つぎに、グラニエセンサのヒータ付温度プローブHPのヒータを作動させる。そうすると、一対のプローブHP、RPに設けられた温度センサ間には温度差 ΔT が生じる。下記数1に示すように、この温度差 ΔT は樹液流速 u の関

数となるので、かかる関数に基づけば、温度差 ΔT から樹液流速 u を算出することができる。

[数1]

$$u = \frac{1}{\alpha} \left\{ \frac{\Delta T(0) - \Delta T(u)}{\Delta T(u)} \right\}^{\frac{1}{\beta}} = \frac{1}{\alpha} K^{\frac{1}{\beta}}$$

ここで、 u は平均樹液流速[m/s]、 $\Delta T(u)$ は平均樹液流速が u の時のヒータ付温度プローブHPと温度プローブRPの温度差[°C]、 $\Delta T(0)$ は ΔT の最大温度[°C]、 α と β は観測データから得られる係数である。

[0022] また、下記数2に基づき、樹液流速 u から樹液流量 F を算出することができる。

[数2]

$$F = u \times S$$

ここで、 F は樹液流量[m³/s]、 S はプローブHP、RPが幹の円周方向に形成する断面積[m²]である。

[0023] 例えば、樹木中に流れる樹液流量 F が多い（樹液流速 u が速い）場合、グラニエセンサの一对のプローブHP、RPに設けられた温度センサ間の温度差 ΔT は小さくなる。なぜなら、ヒータ付温度プローブHPには、ヒータによって一定の熱がかけられるが、ヒータ付温度プローブHPの近傍を流れる多量の樹液によって熱が運び去られるからである。一方、樹液流量 F が少ない（樹液流速 u が遅い）場合、グラニエセンサの一对のプローブHP、RPに設けられた温度センサ間の温度差 ΔT は大きくなる。なぜなら、ヒータ付温度プローブHPには、ヒータによって一定の熱がかけられるが、ヒータ付温度プローブHPの近傍を流れる樹液が少ないので、ヒータ付温度プローブHPに供給された熱が樹液によって運び去られず溜まったような状態となるからである。

[0024] <第1実施形態>

つぎに、本発明の第1実施形態に係る植物水分動態センサ1について説明

する。

本実施形態に係る植物水分動態センサ1は、特に師管流の方向および流量（流速）を測定するのに適したセンサである。

[0025] 図1および図2に示すように、植物水分動態センサ1は、1つのヒータ付温度プローブ10と、一对の温度プローブ20A、20Bと、一对の電気抵抗プローブ30A、30Bと、支持部80とを備えている。各プローブ10、20A、20B、30A、30Bは、それらを同一平面内で平行に並べた状態で、その基端が支持部80に支持されている。これらのプローブ10、20A、20B、30A、30Bを植物に突き刺すことで、植物に植物水分動態センサ1が設置される。

[0026] プローブ10、20A、20B、30A、30Bおよび支持部80は、フォトリソグラフィや、エッチング、スパッタ法や真空蒸着法等の薄膜形成を用いたMEMS技術を用いて、SOI基板を加工することで形成されている。

[0027] ここで、SOI基板は、支持基板SBと活性層ALとの間に酸化膜層BLが挟まった3層構造を有している。支持基板SBは、シリコン(Si)で形成されており、400~500 μm の厚みを有する。活性層ALは、シリコン(Si)で形成されており、約10 μm の厚みを有する。酸化膜層BLは、二酸化ケイ素(SiO_2)で形成されており、0.1~1 μm の厚みを有する。活性層ALは熱伝導性を有し、酸化膜層BLは熱および電気を通しにくい絶縁体である。

[0028] (支持部)

支持部80は、プローブ10、20A、20B、30A、30Bを支持する部材である。支持部80は、平面視長方形の板材であり、片方の長辺部に全てのプローブ10、20A、20B、30A、30Bが支持されている。支持部80は、その長手方向の長さが全てのプローブ10、20A、20B、30A、30Bを後述の軸間距離Wで配置できる長さを有していればよく、短手方向の長さは特に限定されない。

[0029] 例えば、隣り合うプローブ10、20A、20B、30A、30Bの軸間

距離Wが約2mmの場合、支持部80は、平面視において、長手方向の長さが約12mm、短手方向の長さが約8mmとなるように形成することができる。支持部80の厚みはSOI基板の厚みと同じである。つまり、支持部80は、平面視において一辺が数mm程度の長さであって、厚さが1mm以下となるように形成されている。

[0030] (プローブ)

各プローブ10、20A、20B、30A、30Bは、薄板で形成された棒状の部材であり、支持部80の縁（長辺部）に片持ち梁状に形成されている。各プローブ10、20A、20B、30A、30Bは、活性層ALと、酸化膜層BLと、支持基板SBの上部とから構成されている。すなわち、支持基板SBの下部が除去されており、SOI基板の厚みより薄く形成されている。各プローブ10、20A、20B、30A、30Bの厚みは特に限定されないが、例えば、40~200 μm である。厚みが40 μm 以上であれば強度が十分であり、プローブ10、20A、20B、30A、30Bを植物に挿抜する際に折れる恐れがない。また、植物の種類にもよるが導管XYや師管PHの太さは100~200 μm 程度であるため、厚みが200 μm 以下であればプローブ10、20A、20B、30A、30Bを導管XYや師管PHに刺してもそれらを塞ぐことを抑制できる。

[0031] 各プローブ10、20A、20B、30A、30Bは、その寸法が、植物の新梢末端や果柄等、莖径または軸径が数mm程度の植物の細部に突き刺して配置することができる寸法に形成されている。具体的には、長さ（軸方向に基端から先端までの長さ）と幅が、植物の細部に突き刺して設置した状態において、その先端部が植物の細部の導管XYおよび／または師管PHに配置し得るような長さ（例えば、50 μm ~1mm）、幅（例えば、50~300 μm ）に形成されている。

[0032] 各プローブ10、20A、20B、30A、30Bの先端部は三角形状等、尖った形に形成されているのが好ましい。プローブ10、20A、20B、30A、30Bの先端部が尖った形に形成されていれば、プローブ10、

20A、20B、30A、30Bを植物の細部に挿入するときの挿入抵抗を小さくすることができる。つまり、プローブ10、20A、20B、30A、30Bを植物の細部にスムーズに突き刺して設置することができる。このため、プローブ10、20A、20B、30A、30Bを植物の細部に突き刺す際にプローブ10、20A、20B、30A、30Bの先端部が破損等することを防止することができる。

[0033] (ヒータ付温度プローブ)

ヒータ付温度プローブ10には、温度センサ11とヒータ12とが設けられている。ヒータ付温度プローブ10の寸法は、例えば、長さが300 μ m、幅が200 μ mである。

[0034] 温度センサ11は、温度を感知する機能を有しており、上記のごときヒータ付温度プローブ10の先端部に配設することができる大きさのものであれば、特に限定されない。例えば、酸化拡散炉を用いたpn接合ダイオードによって形成したものを温度センサ11として採用することができる。

[0035] ヒータ12は、ヒータ付温度プローブ10に熱を供給することができる機能を有しており、上記のごときヒータ付温度プローブ10に配設することができる大きさのものであれば、特に限定されない。例えば、酸化拡散炉を用いたpn接合ダイオードによって形成したものをヒータ12として採用することができる。なお、ヒータ12はヒータ付温度プローブ10に熱を供給することができる位置に配設されればよく、先端部に配設されなくてもよい。

[0036] (温度プローブ)

一对の温度プローブ20A、20Bには、それぞれ温度センサ21が設けられている。各温度プローブ20A、20Bの寸法は、ヒータ付温度プローブ10の寸法と同じとすればよく、例えば、長さが300 μ m、幅が200 μ mである。温度センサ21は、ヒータ付温度プローブ10の温度センサ11と同様のものを採用することができる。

[0037] 植物水分動態センサ1には、2つの温度プローブ20A、20Bが備えられている。この2つの温度プローブ20A、20Bは、ヒータ付温度プローブ

ブ10を挟む位置に設けられている。すなわち、温度プローブ20A、ヒータ付温度プローブ10、温度プローブ20Bの順に設けられている。

[0038] (電気抵抗プローブ)

一对の電気抵抗プローブ30A、30Bには、それぞれ一对の電気抵抗測定用電極33、33が設けられている。各電気抵抗プローブ30A、30Bの寸法は、長さが、ヒータ付温度プローブ10および温度プローブ20A、20Bの長さよりも長く形成されており、例えば、長さが400 μ m、幅が200 μ mである。

[0039] 一对の電気抵抗測定用電極33、33は、その電気抵抗測定用電極33、33間に存在する物質、例えば植物の師管液や導管液の電気抵抗を測定するための電極である。電気抵抗測定用電極33、33は、上記のごとき電気抵抗プローブ30A、30Bの先端部に配設することができる大きさのものであれば、特に限定されない。例えば、アルミニウム(Al)薄板を電気抵抗測定用電極33として採用することができる。

[0040] 前述のごとく、各電気抵抗プローブ30A、30Bの長さは、ヒータ付温度プローブ10および温度プローブ20A、20Bの長さよりも長く形成されている。具体的には、各電気抵抗プローブ30A、30Bの長さは、ヒータ付温度プローブ10および温度プローブ20A、20Bの長さよりも、測定対象となる植物の師管PHの中心と導管XYの中心との距離の分だけ長く形成されている。この長さの差は、測定対象となる植物の種類や茎の太さによるが、例えば50~300 μ mに設定される。

[0041] 電気抵抗プローブ30A、30Bはヒータ付温度プローブ10および温度プローブ20A、20Bよりも長く形成されており、電気抵抗プローブ30A、30Bの先端部には電気抵抗測定用電極33が、ヒータ付温度プローブ10および温度プローブ20A、20Bの先端部には温度センサ11、21が配設されている。そのため、電気抵抗測定用電極33および温度センサ11、21は、測定対象となる植物への突き刺し方向(各プローブ10、20A、20B、30A、30Bの軸方向)に、距離Dを有して異なる位置に配

置されている。そして、電気抵抗測定用電極 33 は、温度センサ 11、21 に比べて、プローブ 10、20A、20B、30A、30B の基端からの距離が長く、植物のより深い位置に達するよう配置されている。

[0042] このように、電気抵抗測定用電極 33 と温度センサ 11、21 との間に距離 D を有することにより、プローブ 10、20A、20B、30A、30B を植物に突き刺し、電気抵抗測定用電極 33 を植物の導管 XY の位置に配置した状態とすれば、温度センサ 11、21 が植物の師管 PH の位置に配置される。換言すれば、電気抵抗測定用電極 33 と温度センサ 11、21 との間の距離 D は、電気抵抗測定用電極 33 を植物の導管 XY の位置に配置した状態において、温度センサ 11、21 が植物の師管 PH の位置に配置されるよう設定される。この距離 D は、測定対象となる植物の種類や茎の太さによるが、例えば 50~300 μm に設定される。

[0043] 植物水分動態センサ 1 には、2つの電気抵抗プローブ 30A、30B が備えられている。この2つの電気抵抗プローブ 30A、30B は、ヒータ付温度プローブ 10 および温度プローブ 20A、20B を挟む位置に設けられている。すなわち、電気抵抗プローブ 30A、温度プローブ 20A、ヒータ付温度プローブ 10、温度プローブ 20B、電気抵抗プローブ 30B の順に設けられている。

[0044] (データロガー)

植物水分動態センサ 1 に設けられた温度センサ 11、21、ヒータ 12、および電気抵抗測定用電極 33 は、データロガー DR に接続され、電力の供給および各種データの収集が行われる。

[0045] 各プローブ 10、20A、20B、30A、30B を構成する活性層 AL は、支持部 80 を構成する活性層 AL と繋がっており、一体となっている。また、支持部 80 において、各プローブ 10、20A、20B、30A、30B に接続された活性層 AL は、それぞれの間の活性層 AL が除去されており、熱的および電氣的に絶縁性を有する酸化膜層 BL が介在している。すなわち、各プローブ 10、20A、20B、30A、30B の活性層 AL は、

酸化膜層Bにより、熱的にも電氣的にも独立している。

- [0046] 支持部80の活性層AL上には、電極パッド11e、21e、12e、33eが配設されており、それぞれ前記温度センサ11、21、ヒータ12、電気抵抗測定用電極33と接続されている。
- [0047] 具体的には、ヒータ付温度プローブ10を構成する活性層ALと一体となった支持部80の活性層AL上には、温度センサ11用の一對の電極パッド11e、11eと、ヒータ12用の一對の電極パッド12e、12eが配設されている。温度センサ11は、その(pn接合ダイオードの)陽極および陰極が、それぞれ電極パッド11eと配線を介して接続されている。また、ヒータ12は、その(pn接合ダイオードの)陽極および陰極が、それぞれ電極パッド12eと配線を介して接続されている。
- [0048] 各温度プローブ20A、20Bを構成する活性層ALと一体となった支持部80の活性層AL上には、それぞれ温度センサ21用の一對の電極パッド21e、21eが配設されている。温度センサ21は、その(pn接合ダイオードの)陽極および陰極が、それぞれ電極パッド21eと配線を介して接続されている。
- [0049] 各電気抵抗プローブ30A、30Bを構成する活性層ALと一体となった支持部80の活性層AL上には、それぞれ電気抵抗測定用電極33、33用の一對の電極パッド33e、33eが配設されている。一對の電気抵抗測定用電極33、33は、それぞれ電極パッド33eと配線を介して接続されている。
- [0050] 電極パッド11e、12e、21e、33eおよび配線は、前記電気抵抗測定用電極33とともに、例えば以下の方法で形成される。まず、酸化炉を用いて活性層AL上に絶縁膜(SiO₂)を形成する。その後、温度センサ11、21およびヒータ12との導通に必要なコンタクト形成とあわせて、電気抵抗測定用電極33、電極パッド11e、12e、21e、33eおよび配線を、フォトファブリケーション技術を用いて形成する。
- [0051] 図3に示すように、データロガーDRは定電流源91と、電圧計92とを

備えている。定電流源 91 は、電極パッド 11e、11e (21e、21e) の間に接続されており、pn 接合ダイオードである温度センサ 11 (21) に順方向に定電流を供給している。また、電圧計 92 は、電極パッド 11e、11e (21e、21e) の間に接続されており、pn 接合ダイオードである温度センサ 11 (21) の陽極 - 陰極間の電圧を測定している。

[0052] ダイオードの順方向特性は温度によって変化し、ダイオードに一定の電流を流すと温度変化に伴って電圧が変化することが知られている。上記のように、電圧計 92 で温度センサ 11 (21) の電圧を測定することで、温度を算出することができる。

[0053] 図 4 に示すように、データロガー DR は直流定電圧源 93 を備えている。直流定電圧源 93 は、電極パッド 12e、12e の間に接続されており、pn 接合ダイオードであるヒータ 12 に順方向に定電圧を供給している。ヒータ 12 に電流を流すことで、熱を発生することができる。

[0054] 図 5 に示すように、データロガー DR は交流電源 94 と、電流計 95 とを備えている。交流電源 94 および電流計 95 は、電極パッド 33e、33e の間に直列に接続されており、交流電源 94 で一对の電気抵抗測定用電極 33、33 間に電流を供給し、電流計 95 で一对の電気抵抗測定用電極 33、33 間に流れる電流を測定している。オームの法則を基に、電流計 95 で測定した電流から、一对の電気抵抗測定用電極 33、33 間の電気抵抗を算出することができる。

[0055] (製造方法)

前述のごとく、植物水分動態センサ 1 は MEMS 技術を用いて、SOI 基板を加工することで形成されている。以下では、各プローブ 10、20A、20B、30A、30B および支持部 80 を MEMS 技術に用いて形成する方法について簡単に説明する。

[0056] まず、SOI 基板の活性層 AL 上に、酸化拡散炉を用いて温度センサ 11、21 およびヒータ 12 としての pn 接合ダイオードを形成する。具体的には、活性層 AL 上に拡散用ホール (p 形) を形成した後、n 拡散 (n 形) を

形成する。つぎに、pn接合ダイオードのコンタクト形成と、電気抵抗測定用電極33、電極パッド11e、12e、21e、33eおよび配線の形成を行う。具体的には、スパッタ法や蒸着法を用いて活性層AL上にAl薄膜を堆積させる。Al薄膜上にレジストを塗布して、コンタクト形成と、電気抵抗測定用電極33、電極パッド11e、12e、21e、33eおよび配線の形成を行う。

[0057] つぎに、SOI基板の表面上にプローブ形状のフォトリソグラフィを行い、ICP-RIE等のドライエッチングを用いて酸化膜層BLまでエッチングを行い、プローブ形状の原形を形成する。その後、プローブ10、20A、20B、30A、30Bが片持ち梁状になるように、SOI基板の裏面の一部をエッチバックする。

[0058] なお、植物水分動態センサ1は、上述した寸法および機能を有するように形成することができれば、MEMS技術以外の方法で形成してもよいし、素材もSOI基板に限定されない。

[0059] つぎに、植物水分動態センサ1によって植物の水分動態を測定する方法について以下説明する。

(取り付け方法)

まず、測定対象となる植物の新梢末端に、植物水分動態センサ1を取り付ける。

具体的には、図6に示すように、植物水分動態センサ1の全てのプローブ10、20A、20B、30A、30Bを植物の細部に突き刺して取り付ける。このとき、上述したグラニエ法と同様に植物の細部中に流れる水分（液体）の流れ方向に沿って、すなわち導管XYおよび師管PHに沿って、プローブ10、20A、20B、30A、30Bを配置する。なお、温度プローブ20A、20Bのどちらを末端側または根本側にするかは問わない。

[0060] 図7に示すように、プローブ10、20A、20B、30A、30Bを植物の細部に突き刺していくと、電気抵抗プローブ30A、30Bに設けられた電気抵抗測定用電極33は、植物の皮層COおよび師管PHを通り、導管

X Yに達する。さらに、深く突き刺していくと、電気抵抗測定用電極 3 3は、植物の髄 P Iに達する。

[0061] ここで、導管 X Yに流れる導管液にはミネラルが含まれているため、その他の部分（皮層 C O、師管 P H、髄 P I等）に含まれる水分に比べて電気抵抗が低いという性質を有する。これを利用して、電気抵抗プローブ 3 0 A、3 0 Bで測定された電気抵抗が低くなる深さまでプローブ 1 0、2 0 A、2 0 B、3 0 A、3 0 Bを突き刺せば、電気抵抗測定用電極 3 3を導管 X Yの位置に配置することができる。

[0062] また、前述のごとく、電気抵抗測定用電極 3 3および温度センサ 1 1、2 1は、突き刺し方向に距離 Dを有して配置されている。そのため、電気抵抗測定用電極 3 3を導管 X Yの位置に配置した状態とすれば、自ずと温度センサ 1 1、2 1が植物の師管 P Hの位置に配置される。

[0063] 以上のように、プローブ 1 0、2 0 A、2 0 B、3 0 A、3 0 Bを植物に突き刺すだけで植物に植物水分動態センサ 1を設置することができる。そのため、従来の植物の水分動態を測定するためのセンサのように、植物に設置するために茎にドリルで孔を開けたり、植物に切り込み等を形成したりする操作が不要となるので、植物水分動態センサ 1の植物への取り付け作業が容易である。

[0064] しかも、電気抵抗プローブ 3 0 A、3 0 Bは導管 X Yの位置検出機能を有し、電気抵抗プローブ 3 0 A、3 0 Bで測定された電気抵抗から導管 X Yの位置を検出できる。プローブ 1 0、2 0 A、2 0 B、3 0 A、3 0 Bを植物に突き刺す際に、電気抵抗プローブ 3 0 A、3 0 Bが導管 X Yを検出する深さまで突き刺せば、温度センサ 1 1、2 1を師管 P Hの位置に正確に配置することができる。そのため、プローブ 1 0、2 0 A、2 0 B、3 0 A、3 0 Bを植物に突き刺す深さをマイクロメータ等の特殊機器を用いて計測する必要がなく、植物水分動態センサ 1の取り付け作業が容易である。その結果、後述の植物の水分動態（本実施形態においては師管流の流量等）を精度よく測定することができる。

[0065] 電気抵抗プローブ30を1つのみ備える形態としてもよいが、本実施形態の植物水分動態センサ1のように2つの電気抵抗プローブ30A、30Bを備える方が好ましい。プローブ10、20A、20B、30A、30Bを植物に突き刺す際に、2つの電気抵抗プローブ30A、30Bが同時に導管XYを検出する深さまで突き刺せば、温度センサ11、21を師管PHに沿って配置することができるからである。

[0066] 特に、本実施形態のように、2つの電気抵抗プローブ30A、30Bを、ヒータ付温度プローブ10および温度プローブ20A、20Bを挟む位置、すなわち、外側の位置に設ければ、2つの電気抵抗プローブ30A、30Bの間の距離が長くなり、より正確に温度センサ11、21を師管PHに沿って配置することができる。

[0067] (測定方法)

つぎに、植物に取り付けた植物水分動態センサ1を用いて植物の水分動態を測定する。

まず、ヒータ付温度プローブ10に設けられたヒータ12を作動させる。ヒータ12を作動すれば、ヒータ12から供給された熱エネルギーは、ヒータ付温度プローブ10に供給される。ヒータ付温度プローブ10に供給された熱エネルギーは、ヒータ付温度プローブ10の表面から師管PH内を流れる師管液に放出される。

[0068] このときのヒータ付温度プローブ10および温度プローブ20A、20Bの温度は、温度センサ11、21によって測定することができる。そして、2つの温度プローブ20A、20Bで測定された温度を比較することで、師管流の方向を特定できる。

[0069] なぜなら、2つの温度プローブ20A、20Bは、ヒータ付温度プローブ10を挟む位置に設けられているので、師管液が植物の末端から根本に向かって(図7における白抜き矢印の向き)流れている場合、根本側に位置する温度プローブ20Aは、ヒータ付温度プローブ10により昇温された師管液により暖められ、末端側の温度プローブ20Bに比べて温度が高くなるから

である。

- [0070] 逆に、師管液が植物の根本から末端に向かって流れている場合、末端側に位置する温度プローブ20Bは、ヒータ付温度プローブ10により昇温された師管液により暖められ、根本側の温度プローブ20Aに比べて温度が高く検出される。
- [0071] すなわち、師管流の方向は、温度の低い温度プローブ20B（20A）から温度の高い温度プローブ20A（20B）に向かう方向であると特定できる。
- [0072] 一般に、導管流は植物の根本から末端に向かって流れるが、師管流の方向は植物の外形から把握することはできない。しかし、植物水分動態センサ1によれば、師管流の方向を特定することができる。
- [0073] つぎに、ヒータ付温度プローブ10および温度プローブ20A、20Bで測定した温度から、上述したグラニエ法に基づいて新梢末端内を流れる師管流の流量（流速）を測定する。ここで、2つの温度プローブ20A、20Bのうち、温度の低い温度プローブ20B（20A）と、ヒータ付温度プローブ10との温度差を基に計算する。温度の低い温度プローブ20B（20A）は、ヒータ付温度プローブ10よりも師管流の上流側に配置されているからである。
- [0074] 例えば、師管流の流量が多い（流速が速い）場合には、ヒータ付温度プローブ10の近傍の師管液は、常に新しい師管液に置き換えられた状態となる。このため、ヒータ付温度プローブ10に供給する熱エネルギーを一定とすれば、ヒータ付温度プローブ10の温度は、ヒータ付温度プローブ10の近傍の師管液によって運び去られる。一方、師管流の流量が少ない（流速が遅い）場合には、ヒータ付温度プローブ10の近傍の師管液は、滞留したような状態となるので、ヒータ付温度プローブ10に供給する熱エネルギーを一定とすれば、ヒータ付温度プローブ10の温度は、蓄積されたような状態となる。
- [0075] したがって、師管流の流速および流量を、ヒータ付温度プローブ10と温

度プローブ20B(20A)との間の温度差 ΔT を測定することによって算出することができる。

[0076] なお、ヒータ12からヒータ付温度プローブ10に供給された熱エネルギーは、温度プローブ20A、20Bに供給されない。なぜなら、酸化膜層BLによって、ヒータ12から供給された熱エネルギーが隣の温度プローブ20A、20Bに供給されるのを遮断するからである。

[0077] 植物水分動態センサ1をSOI基板で形成することにより、植物水分動態センサ1を小型化することができ、プローブ10、20A、20B、30A、30Bを微細化できる。そのため、かかる植物水分動態センサ1を植物に設置しても植物に対するダメージ(損傷)を小さくできるので、長期間設置しておくことができる。その結果、植物の水分動態を長期間に渡ってモニタリングすることができるので、植物の生育状態に合わせて適切な水分供給や養分補給(施肥)を行うことができる。

[0078] また、プローブ10、20A、20B、30A、30Bが微細化されているので、プローブ10、20A、20B、30A、30Bを植物に突き刺して設置しても、植物に与えるストレスを小さくすることができる。換言すれば、プローブ10、20A、20B、30A、30Bの設置前後における植物の設置部位内の水分動態の変動を小さくできる。このため、プローブ10、20A、20B、30A、30Bを植物に設置したのち、すぐに設置部位内を流れる水分(液体)の水分動態を測定することができる。しかも、従来のセンサでは設置することが困難であった植物の新梢末端や果柄等の細部にも容易に取付けることができる。

[0079] ヒータ付温度プローブ10および温度プローブ20A、20Bは、軸間距離Wが、プローブ10、20A、20Bを植物の細部に取付けた状態において、かかる細部内を流れる水分(液体)の流量(流速)を測定することができる距離となるように形成する。具体的には、各プローブ10、20A、20Bの軸間距離Wが1~20mmであればよい。

[0080] 軸間距離Wが1mmよりも短い場合には、ヒータ12から供給された熱エネルギー

ギが植物の組織等を介して温度プローブ20A、20Bに供給される可能性がある。一方、軸間距離Wが20mmよりも長くなる場合には植物の細部内を流れる水分（液体）の流れを精度よく検出できない可能性がある。軸間距離Wを上述した範囲とすれば、植物の新梢末端等の細部にプローブ10、20A、20Bを設置した状態において、水分動態を精度よく測定することができる。

[0081] なお、プローブ10、20A、20B、30A、30Bの軸間距離Wは、全て同じになるようにしてもよいし、それぞれ異なるようにしてもよい。

[0082] 植物水分動態センサ1を用いて植物の水分動態測定を行うことで、植物の生育状態に合わせて最も適切な時期に灌水や養分補給を行なうことが可能となる。その結果、作物や果樹等の収穫量の増大を図ることができる。また、植物の新梢末端や果柄の水分量測定が可能のため、的確な灌水制御（水資源の有効利用）を行なうことができる。そのため、果樹栽培の高品質（果実糖度が高い）・安定生産（品質が揃った）等、高付加価値栽培が実現できる。

[0083] <第2実施形態>

つぎに、本発明の第2実施形態に係る植物水分動態センサ2について説明する。

本実施形態に係る植物水分動態センサ2は、特に導管流の方向および流量（流速）を測定するのに適したセンサである。

[0084] 図8に示すように、植物水分動態センサ2は、第1実施形態に係る植物水分動態センサ1において、全てのプローブ10、20A、20B、30A、30Bの長さを同じに形成した形態である。各プローブ10、20A、20B、30A、30Bの寸法は、例えば、長さが400 μ m、幅が200 μ mである。

[0085] 全てのプローブ10、20A、20B、30A、30Bの長さが同じであり、ヒータ付温度プローブ10および温度プローブ20A、20Bの先端部には温度センサ11、21が、電気抵抗プローブ30A、30Bの先端部には電気抵抗測定用電極33が配設されている。そのため、温度センサ11、21および電気抵抗測定用電極33は、測定対象となる植物への突き刺し方

向に同位置に配置されている。

[0086] このように、温度センサ 11、21 と電気抵抗測定用電極 33 とが同位置に配置されていることにより、プローブ 10、20A、20B、30A、30B を植物に突き刺し、電気抵抗測定用電極 33 を植物の導管 X Y の位置に配置した状態とすれば、温度センサ 11、21 が植物の導管 X Y の位置に配置される。

[0087] その余の構成は第 1 実施形態に係る植物水分動態センサ 1 と同様であるので同一部材に同一符号を付して説明を省略する。

[0088] 測定対象となる植物の新梢末端に、植物水分動態センサ 2 を取り付けるには、全てのプローブ 10、20A、20B、30A、30B を植物の細部に突き刺せばよい。その際に、電気抵抗プローブ 30A、30B が導管 X Y を検出する深さまで突き刺せば、温度センサ 11、21 を導管 X Y の位置に正確に配置することができる。そのため、植物水分動態センサ 2 の取り付け作業が容易であり、導管流の流量等を精度よく測定することができる。

[0089] また、プローブ 10、20A、20B、30A、30B を植物に突き刺す際に、2 つの電気抵抗プローブ 30A、30B が導管 X Y を検出する深さまで突き刺せば、温度センサ 11、21 を導管 X Y に沿って配置することができる。

[0090] ヒータ付温度プローブ 10 に設けられたヒータ 12 を作動させ、2 つの温度プローブ 20A、20B で測定された温度を比較することで、導管流の方向を特定できる。また、2 つの温度プローブ 20A、20B のうち、温度の低い温度プローブ 20A (20B) と、ヒータ付温度プローブ 10 との温度差を基に、導管流の流量 (流速) を測定できる。

[0091] <第 3 実施形態>

つぎに、本発明の第 3 実施形態に係る植物水分動態センサ 3 について説明する。

本実施形態に係る植物水分動態センサ 3 は、特に導管流の流量 (流速) を測定するのに適したセンサである。

- [0092] 図9に示すように、植物水分動態センサ3は、第2実施形態に係る植物水分動態センサ2において、温度プローブ20を1つとした形態である。すなわち、植物水分動態センサ3は、1つのヒータ付温度プローブ10と、1つの温度プローブ20と、一对の電気抵抗プローブ30A、30Bとを備えている。
- [0093] 全てのプローブ10、20、30A、30Bの長さは同じであり、ヒータ付温度プローブ10および温度プローブ20の先端部には温度センサ11、21が、電気抵抗プローブ30A、30Bの先端部には電気抵抗測定用電極33が配設されている。そのため、温度センサ11、21および電気抵抗測定用電極33は、測定対象となる植物への突き刺し方向に同位置に配置されている。
- [0094] その余の構成は第1実施形態に係る植物水分動態センサ1と同様であるので同一部材に同一符号を付して説明を省略する。
- [0095] 測定対象となる植物の新梢末端に、植物水分動態センサ3を取り付けるには、全てのプローブ10、20、30A、30Bを植物の細部に突き刺せばよい。ここで、導管流の上流側に温度プローブ20を配置し、下流側にヒータ付温度プローブ10を配置する。一般に、導管流は植物の根本から末端に向かって流ることが知られている。そのため、植物の根本側に温度プローブ20を配置し、末端側にヒータ付温度プローブ10を配置すればよい。
- [0096] プローブ10、20、30A、30Bを植物に突き刺す際に、電気抵抗プローブ30A、30Bが導管XYを検出する深さまで突き刺せば、温度センサ11、21を導管XYの位置に正確に配置することができる。そのため、植物水分動態センサ3の取り付け作業が容易であり、導管流の流量を精度よく測定することができる。
- [0097] また、プローブ10、20、30A、30Bを植物に突き刺す際に、2つの電気抵抗プローブ30A、30Bが導管XYを検出する深さまで突き刺せば、温度センサ11、21を導管XYに沿って配置することができる。
- [0098] ヒータ付温度プローブ10に設けられたヒータ12を作動させれば、ヒ-

タ付温度プローブ10と温度プローブ20との温度差から、導管流の流量（流速）を測定できる。

[0099] <第4実施形態>

つぎに、本発明の第4実施形態に係る植物水分動態センサ4について説明する。

本実施形態に係る植物水分動態センサ4は、特に師管流の方向および流量（流速）を測定するのに適したセンサである。

[0100] 図10に示すように、植物水分動態センサ4は、第1実施形態に係る植物水分動態センサ1において、電気抵抗プローブ30A、30Bと温度プローブ20A、20Bとが一体のプローブとして形成された、電気抵抗兼温度プローブ40A、40Bを備える形態である。すなわち、植物水分動態センサ4は、1つのヒータ付温度プローブ10と、一对の電気抵抗兼温度プローブ40A、40Bとを備えている。

[0101] ヒータ付温度プローブ10の寸法は、例えば、長さが300 μ m、幅が200 μ mである。電気抵抗兼温度プローブ40A、40Bの寸法は、長さが、ヒータ付温度プローブ10の長さよりも長く形成されており、例えば、長さが400 μ m、幅が200 μ mである。

[0102] ヒータ付温度プローブ10の先端部には温度センサ11が配設されている。また、各電気抵抗兼温度プローブ40A、40Bの先端部には一对の電気抵抗測定用電極33、33が配設されており、植物への突き刺し方向においてヒータ付温度プローブ10の温度センサ11と同位置に温度センサ21が配設されている。すなわち、電気抵抗測定用電極33および温度センサ11、21は、測定対象となる植物への突き刺し方向に、距離Dを有して異なる位置に配置されている。

[0103] その余の構成は第1実施形態に係る植物水分動態センサ1と同様であるので同一部材に同一符号を付して説明を省略する。

[0104] 測定対象となる植物の新梢末端に、植物水分動態センサ4を取り付けるには、全てのプローブ10、40A、40Bを植物の細部に突き刺せばよい。

その際に、電気抵抗兼温度プローブ40A、40Bが導管XYを検出する深さまで突き刺せば、温度センサ11、21を師管PHの位置に正確に配置することができる。そのため、植物水分動態センサ5の取り付け作業が容易であり、師管流の流量等を精度よく測定することができる。

[0105] ヒータ付温度プローブ10に設けられたヒータ12を作動させ、2つの電気抵抗兼温度プローブ40A、40Bで測定された温度を比較することで、師管流の方向を特定できる。また、2つの電気抵抗兼温度プローブ40A、40Bのうち、温度の低い電気抵抗兼温度プローブ40A（40B）と、ヒータ付温度プローブ10との温度差を基に、師管流の流量（流速）を測定できる。

[0106] 本実施形態によれば、プローブ10、40A、40Bの本数を少なくできるので、植物水分動態センサ4を小型化することができる。また、プローブ10、40A、40Bの本数が少ないので、植物に対するダメージ（損傷）をより小さくできる。

[0107] <第5実施形態>

つぎに、本発明の第5実施形態に係る植物水分動態センサ5について説明する。

本実施形態に係る植物水分動態センサ4は、特に導管流の方向および流量（流速）を測定するのに適したセンサである。

[0108] 図11に示すように、植物水分動態センサ5は、第2実施形態に係る植物水分動態センサ2において、電気抵抗プローブ30A、30Bと温度プローブ20A、20Bとが一体のプローブとして形成された、電気抵抗兼温度プローブ40A、40Bを備える形態である。すなわち、植物水分動態センサ5は、1つのヒータ付温度プローブ10と、一对の電気抵抗兼温度プローブ40A、40Bとを備えている。

[0109] ヒータ付温度プローブ10と電気抵抗兼温度プローブ40A、40Bの寸法は同じであり、例えば、長さが400 μ m、幅が200 μ mである。ヒータ付温度プローブ10の先端部には温度センサ11が配設されている。また、各電気

抵抗兼温度プローブ40A、40Bの先端部には一对の電気抵抗測定用電極33、33と、温度センサ21が配設されている。すなわち、電気抵抗測定用電極33および温度センサ11、21は、測定対象となる植物への突き刺し方向に同位置に配置されている。

[0110] その余の構成は第2実施形態に係る植物水分動態センサ2と同様であるので同一部材に同一符号を付して説明を省略する。

[0111] 測定対象となる植物の新梢末端に、植物水分動態センサ5を取り付けるには、全てのプローブ10、40A、40Bを植物の細部に突き刺せばよい。その際に、電気抵抗兼温度プローブ40A、40Bが導管XYを検出する深さまで突き刺せば、温度センサ11、21を導管XYの位置に正確に配置することができる。そのため、植物水分動態センサ5の取り付け作業が容易であり、師管流の流量等を精度よく測定することができる。

[0112] ヒータ付温度プローブ10に設けられたヒータ12を作動させ、2つの電気抵抗兼温度プローブ40A、40Bで測定された温度を比較することで、導管流の方向を特定できる。また、2つの電気抵抗兼温度プローブ40A、40Bのうち、温度の低い電気抵抗兼温度プローブ40A（40B）と、ヒータ付温度プローブ10との温度差を基に、導管流の流量（流速）を測定できる。

[0113] 本実施形態によれば、プローブ10、40A、40Bの本数を少なくできるので、植物水分動態センサ5を小型化することができる。また、プローブ10、40A、40Bの本数が少ないので、植物に対するダメージ(損傷)をより小さくできる。

[0114] <第6実施形態>

上記第4、第5実施形態では、電気抵抗プローブ30と温度プローブ20を一体のプローブとして形成したが、電気抵抗プローブ30とヒータ付温度プローブ10とを一体のプローブとして形成してもよい。

[0115] このような形態でも、プローブの本数を少なくできるので、植物水分動態センサを小型化することができる。また、プローブの本数が少ないので、植

物に対するダメージ(損傷)をより小さくできる。

[0116] <第7実施形態>

つぎに、本発明の第7実施形態に係る植物水分動態センサ7について説明する。

本実施形態に係る植物水分動態センサ7は、樹液の栄養物質を分析するのに適したセンサである。

[0117] 図12および図13に示すように、植物水分動態センサ7は捕集プローブ50を備えている。なお、図示しないが、植物水分動態センサ7には、上記第1～第6実施形態と同様にヒータ付温度プローブ10と、温度プローブ20と、電気抵抗プローブ30とが備えられている。捕集プローブ50は、他のプローブ10、20、30とともに、それらを同一平面内で平行に並べた状態で、その基端が支持部80に支持されている。これらのプローブ10、20、30、50を植物に突き刺すことで、植物に植物水分動態センサ7が設置される。

[0118] 捕集プローブ50は、他のプローブ10、20、30と略同寸法のプローブである。捕集プローブ50の表面、すなわち活性層ALの表面には、その軸心に沿って、溝状の流路51が形成されている。また、支持部80には、その表裏を貫通する貫通孔52が形成されている。流路51は、捕集プローブ50の先端から末端に掛けて形成されおり、さらに支持部80の貫通孔52にまで達している。

[0119] 流路51および貫通孔52の形成は、例えば以下の方法で行われる。まず、捕集プローブ50と支持部80の表面上に、流路51および貫通孔52用のレジストパターンを形成する。つぎに、ウェットエッチングまたはドライエッチングにより、流路51および貫通孔52を形成する。その後、不要になったレジストパターンを除去する。

[0120] 捕集プローブ50を測定対象となる植物に突き刺して、その先端を植物の導管XYに配置すると、導管液が流路51に流入して貫通孔52に導かれる。また、捕集プローブ50の先端を植物の師管PHに配置すると、師管液が

流路 5 1 に流入して貫通孔 5 2 に導かれる。貫通孔 5 2 に導かれた樹液（導管液または師管液）は、支持部 8 0 の裏面に接続されたポンプ等により回収することができる。このように、植物の樹液を、流路 5 1 を介して捕集することができる。

[0121] 捕集された樹液は、研究室等に持ち帰って液体クロマトグラフィー等の装置で分析することにより、栄養物質等を分析することができる。このように、捕集プローブ 5 0 により樹液を捕集できるので、樹液に含まれる栄養物質の分析に用いることができる。

[0122] <第 8 実施形態>

第 7 実施形態では、捕集プローブ 5 0 を他のプローブ 1 0、2 0、3 0 とは独立のプローブとしたが、捕集プローブ 5 0 をヒータ付温度プローブ 1 0、温度プローブ 2 0、または電気抵抗プローブ 3 0 と一体のプローブとして形成してもよい。

[0123] 図 1 4 および図 1 5 に示す例は、捕集プローブ 5 0 と温度プローブ 2 0 とを一体のプローブとした、捕集兼温度プローブ 6 0 を備える形態である。捕集兼温度プローブ 6 0 の内部には、その軸心に沿って、流路 5 1 が形成されている。すなわち、捕集兼温度プローブ 6 0 は中空針状に形成されている。また、捕集兼温度プローブ 6 0 の表面には、温度センサ 2 1 および電極パッド 2 1 e に接続される配線が配設されている。

[0124] 本実施形態の植物水分動態センサ 8 は、ホウケイ酸ガラス基板 G B とシリコン基板 S L とを貼りあわせた構造を有する。ホウケイ酸ガラス基板 G B の表面に流路 5 1 用の溝を形成し、その上にシリコン基板 S L を張り付けることで、捕集兼温度プローブ 6 0 に内包された流路 5 1 が形成される。また、ホウケイ酸ガラス基板 G B には、流路 5 1 と連通した貫通孔 5 2 も形成されている。

[0125] シリコン基板 S L の表面に温度センサ 2 1 および配線を配設することで、捕集兼温度プローブ 6 0 が形成される。シリコン基板 S L の表面に配設する部材を変更することで、捕集プローブ 5 0 とヒータ付温度プローブ 1 0 とを

一体化したプローブとすることもできるし、捕集プローブ50と電気抵抗プローブ30とを一体化したプローブとすることもできる。

[0126] 本実施形態によれば、プローブの本数を少なくできるので、植物水分動態センサ8を小型化することができる。また、プローブの本数が少ないので、植物に対するダメージ(損傷)をより小さくできる。

[0127] <その他の実施形態>

上記実施形態では、プローブを平板状の支持部80の表面に平行な片持ち梁状に形成しているが、これに代えて、プローブを平板状の支持部80の表面に垂直に立設するよう形成してもよい。このようなプローブは、例えば以下の方法で形成できる。まず、Si基板上にプローブの形状の型となるレジストマスクを形成した後、結晶異方性エッチングにより円錐形状加工を行う。その後、垂直方向性エッチングにより円筒形状を形成する。最後に、不要となるマスク材料を除去することによって、プローブを形成する。

[0128] また、上記実施形態では、植物の新梢末端等の細部における水分動態測定を行うためにMEMS技術を用いて小型のセンサとしたが、樹木の幹等の水分動態測定を行う目的であれば、MEMS技術を用いることなく従来のセンサと同様の寸法を有するセンサとしてもよい。

[0129] <植物水分動態情報採取システム>

上述の植物水分動態センサ1~8(以下、単に植物水分動態センサ1とする。)は、植物の新梢末端等の細部内を流れる水分(液体)の流量(流速)等の測定データを配線や無線通信機等を介してサーバ装置等に送信し、集中管理することで、植物に水分供給や養分補給(施肥)等を行うのに役立てることができる。

[0130] 以下では、農業現場等で、複数の植物水分動態センサ1で測定した植物水分動態情報をサーバ装置で集中管理するための植物水分動態情報採取システムを説明する。

[0131] 図16に示すように、農業現場の複数の植物に対して、複数の植物水分動態センサ1が取り付けられる。植物水分動態センサ1は、一の植物の複数箇

所に取り付けてもよいし、複数の植物の全てに、または一部の標本に取り付けてもよい。

[0132] 各植物水分動態センサ 1 には、データロガー D R が接続されており、電力の供給および各種データの収集が行われる。このデータロガー D R は、前述の定電流源 9 1、電圧計 9 2、直流定電圧源 9 3、交流電源 9 4、および電流計 9 5 に加えて無線通信機が内蔵されている。

[0133] 農業現場に隣接した建屋内等に植物水分動態情報を集中管理するためのサーバ装置 S V が設けられている。このサーバ装置 S V にも無線通信機が接続されており、データロガー D R と無線通信できるよう構成されている。

[0134] 各データロガー D R は、植物水分動態センサ 1 の測定データを、無線通信機を介してサーバ装置 S V に送信する。サーバ装置 S V は受信した測定データを集中管理する。サーバ装置 S V で測定データを分析することで、植物に水分供給や養分補給（施肥）等を行うのに役立てることができる。

実施例

[0135] 本発明の植物水分動態センサの有効性を確認するために、下記の試験を行った。

[0136] （温度センサの温度特性実験）

まず、温度センサの温度特性実験を行った。

その結果、温度センサは、16.6~75.7℃の範囲において、感度-5.6mv/℃で測定可能であることが確認できた。

[0137] （ヒータの温度上昇実験）

つぎに、ヒータの温度上昇実験を行った。

その結果、ヒータは、310mWの直流電圧を印加することで、常温~67℃まで昇温できることが確認できた。

[0138] （位置検出実験）

つぎに、電気抵抗による位置検出の実験を行った。

図 1 7 に示す実験装置を作成した。実験装置は、一对の針状電極と、マイクログローブと、マルチメータとを備えている。針状電極の直径は0.55mmであ

る。一对の針状電極をマルチメータで植物に突き刺し、針状電極間の電気抵抗をマルチメータで測定した。

[0139] 図18は、針状電極の突き刺し深さと電気抵抗との関係を示すグラフである。図18から分かるように、深さ約150~300 μm の範囲の電気抵抗は、それ以外の範囲の電気抵抗に比べて低い。導管に流れる導管液にはミネラルが含まれているため、その他の部分に含まれる水分に比べて電気抵抗が低いという性質を有する。したがって、この電気抵抗が低い範囲が導管の範囲であると考えられる。以上より、電気抵抗プローブで測定された電気抵抗から導管の位置を検出できることが確認できた。

[0140] (樹液流の方向、流量測定実験)

つぎに、樹液流の方向、流量測定実験を行った。

図19に示す疑似植物実験系を用いて実験を行った。この疑似植物実験系では、シリコンチューブ(直径1mm、厚さ0.2mm)の中に、マイクロシリンジポンプで水を流し込むことで疑似的な維管束を形成した。この疑似的な維管束に、上記第1実施形態に係る植物水分動態センサ1のプローブを突き刺した。シリコンチューブ内の流量はマイクロシリンジポンプにより精密に制御することができる。植物水分動態センサには、温度センサのための定電流源、ヒータのための直流電源、およびデータ取得のためのデータロガーを接続した。

[0141] 図20は、シリンジポンプの流量(平均樹液流速)を100 $\mu\text{m}/\text{s}$ とした場合における、ヒータ付温度プローブ10および温度プローブ20A、20Bの温度の計測開始時の温度からの時間変化を示すグラフである。図20から分かるように、上流側の温度プローブ20Aは下流側の温度プローブ20Bに比べて温度が低い。このことから、2つの温度プローブ20A、20Bで測定された温度を比較することで、樹液流の方向を特定できることが確認された。

[0142] 図21は、マイクロシリンジポンプの流量(平均樹液流速 u)とK値との関係を示すグラフである。ここで、K値は、ヒータ付温度プローブ10と上

流側の温度プローブ20Aの温度差から得られる(数1参照)。測定されたK値をカーブフィッティングすることにより、数1の係数 $1/\alpha$ 、 $1/\beta$ は、それぞれ0.095、0.828と定められた。このことから、樹液流の流量を測定できることが確認された。

産業上の利用可能性

[0143] 本発明の植物水分動態センサは、植物の水分動態を測定することに適している。

符号の説明

- [0144] 1～8 植物水分動態センサ
- 10 ヒータ付温度プローブ
 - 11 温度センサ
 - 12 ヒータ
 - 20 温度プローブ
 - 21 温度センサ
 - 30 電気抵抗プローブ
 - 33 電気抵抗測定用電極
 - 40 電気抵抗兼温度プローブ
 - 50 捕集プローブ
 - 51 流路
 - 52 貫通孔
 - 60 捕集兼温度プローブ
 - 80 支持部

請求の範囲

- [請求項1] 植物中の水分動態を測定するためのセンサであって、
温度センサとヒータとが設けられたヒータ付温度プローブと、
温度センサが設けられた温度プローブと、
電気抵抗測定用電極が設けられた電気抵抗プローブと、
前記ヒータ付温度プローブ、前記温度プローブおよび前記電気抵抗プローブを平行に並べた状態で支持する支持部と、を備える
ことを特徴とする植物水分動態センサ。
- [請求項2] 前記電気抵抗測定用電極および前記温度センサは、前記植物への突き刺し方向に異なる位置に配置されており、
前記電気抵抗測定用電極を前記植物の導管の位置に配置した状態において、前記温度センサが該植物の師管の位置に配置される
ことを特徴とする請求項1記載の植物水分動態センサ。
- [請求項3] 前記温度センサおよび前記電気抵抗測定用電極は、前記植物への突き刺し方向に同位置に配置されている
ことを特徴とする請求項1記載の植物水分動態センサ
- [請求項4] 前記電気抵抗プローブが2つ備えられている
ことを特徴とする請求項1、2または3記載の植物水分動態センサ。
- [請求項5] 前記温度プローブが2つ備えられており、
2つの前記温度プローブは、前記ヒータ付温度プローブを挟む位置に設けられている
ことを特徴とする請求項1、2、3または4記載の植物水分動態センサ。
- [請求項6] 前記電気抵抗プローブは、前記ヒータ付温度プローブまたは前記温度プローブと一体のプローブとして形成されている
ことを特徴とする請求項1、2、3、4または5記載の植物水分動態センサ。
- [請求項7] 前記植物の樹液が流入する流路が形成された捕集プローブを備える

ことを特徴とする請求項 1、2、3、4、5 または 6 記載の植物水分動態センサ。

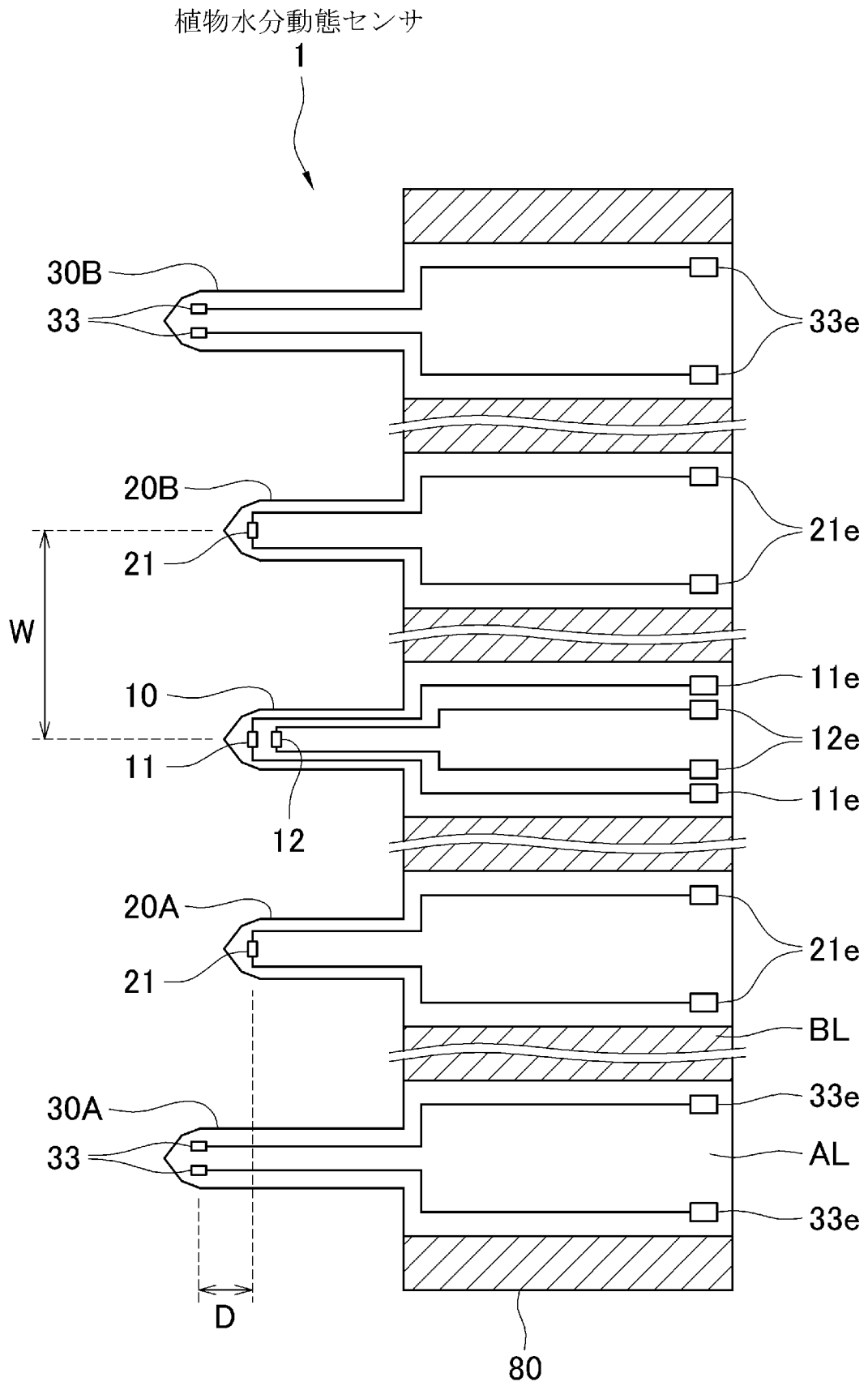
[請求項8] 前記捕集プローブは、前記ヒータ付温度プローブ、前記温度プローブ、または前記電気抵抗プローブと一体のプローブとして形成されている

ことを特徴とする請求項 7 記載の植物水分動態センサ。

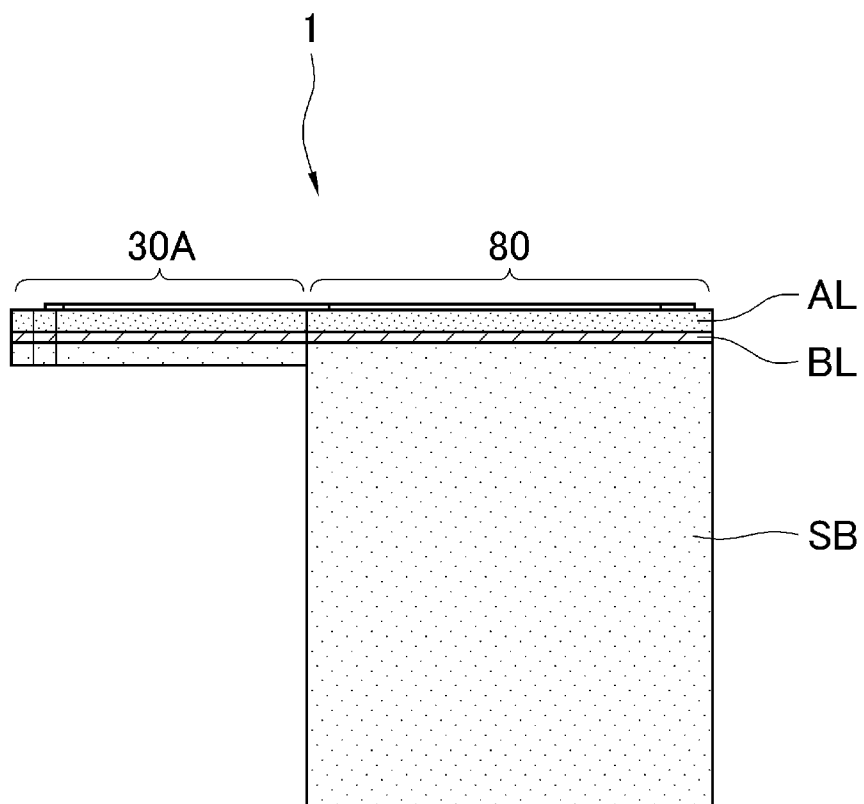
[請求項9] 前記ヒータ付温度プローブ、前記温度プローブ、前記電気抵抗プローブおよび前記支持部は、SOI 基板で形成されており、前記ヒータ付温度プローブ、前記温度プローブおよび前記電気抵抗プローブは、前記支持部の縁に片持ち梁状に形成されている

ことを特徴とする請求項 1、2、3、4、5、6、7 または 8 記載の植物水分動態センサ。

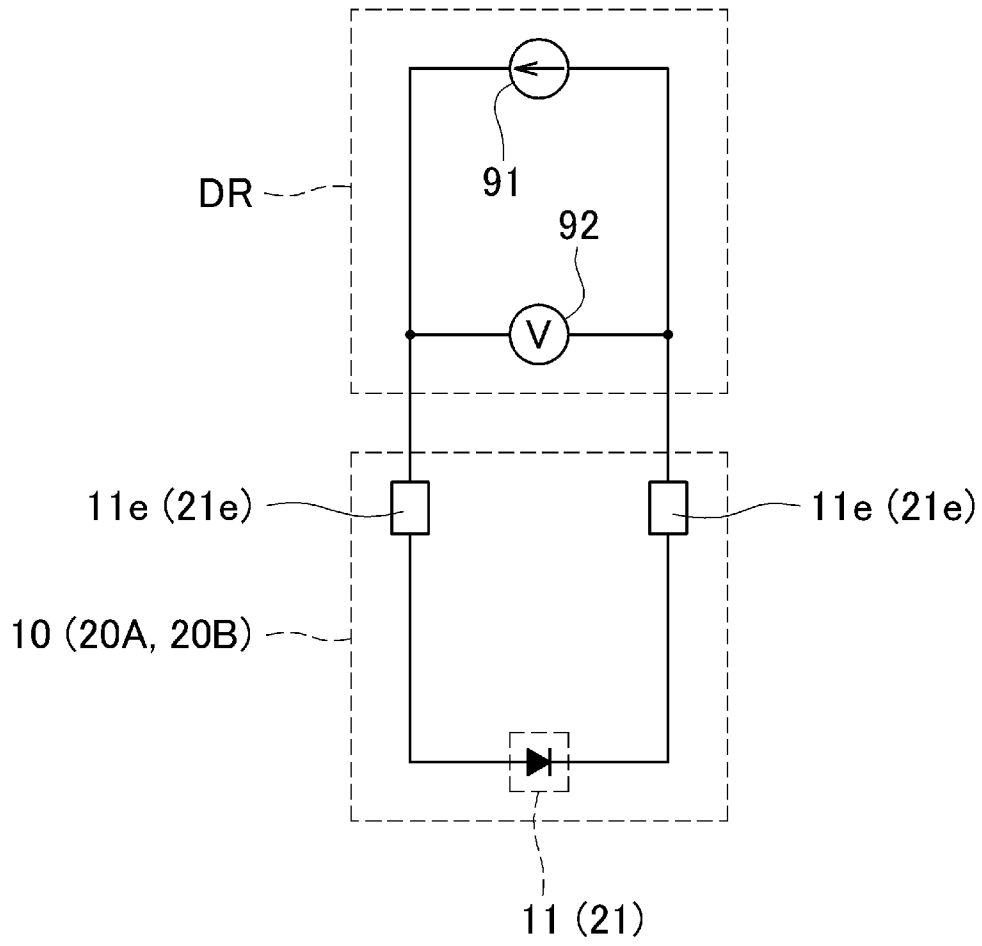
[図1]



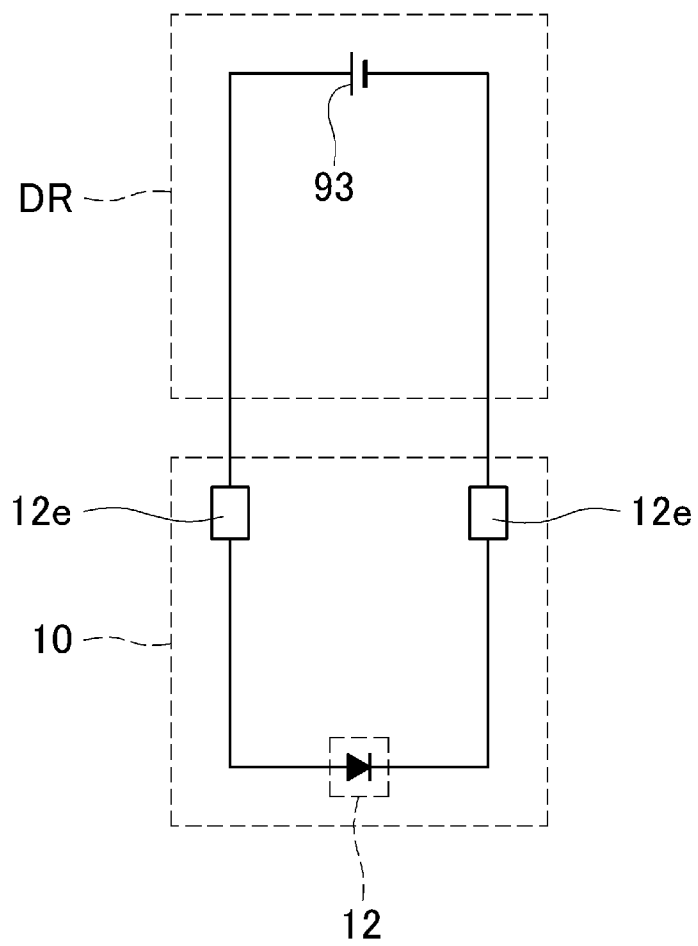
[図2]



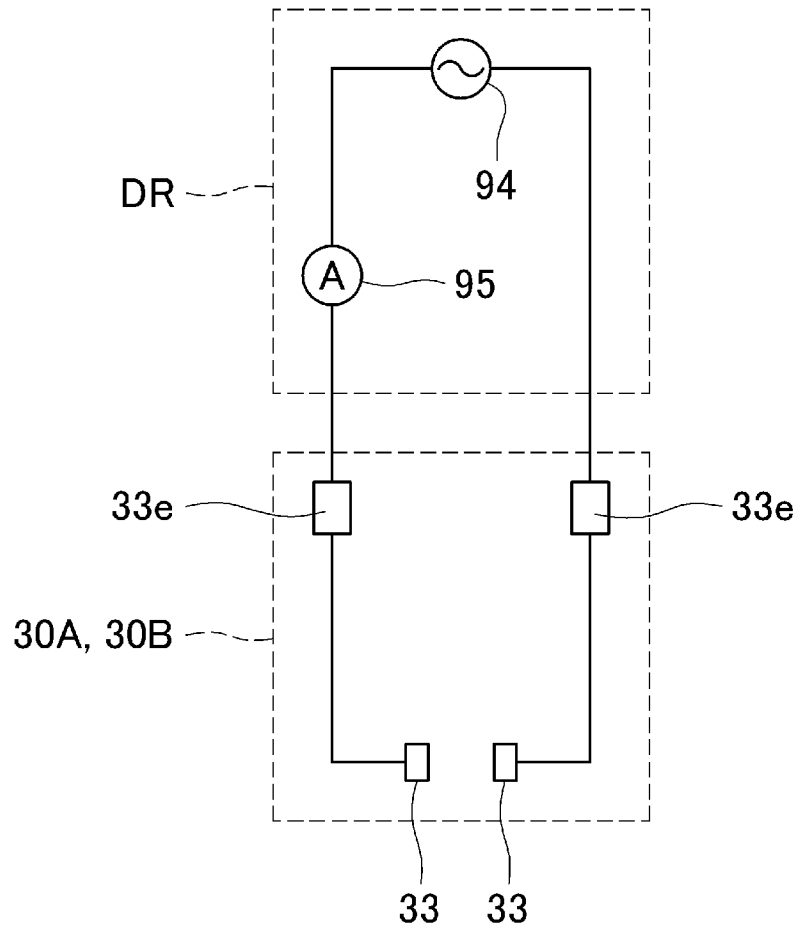
[図3]



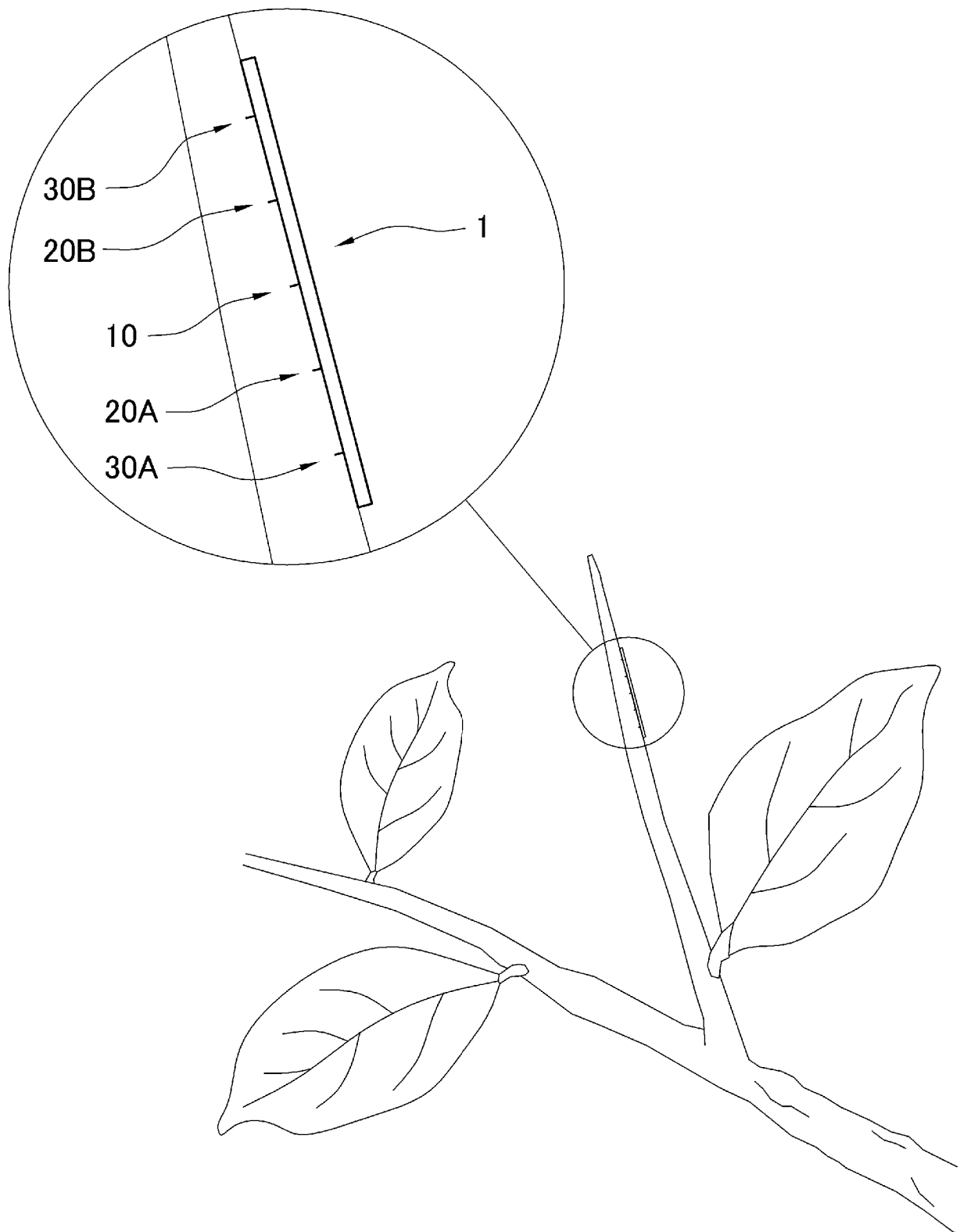
[図4]



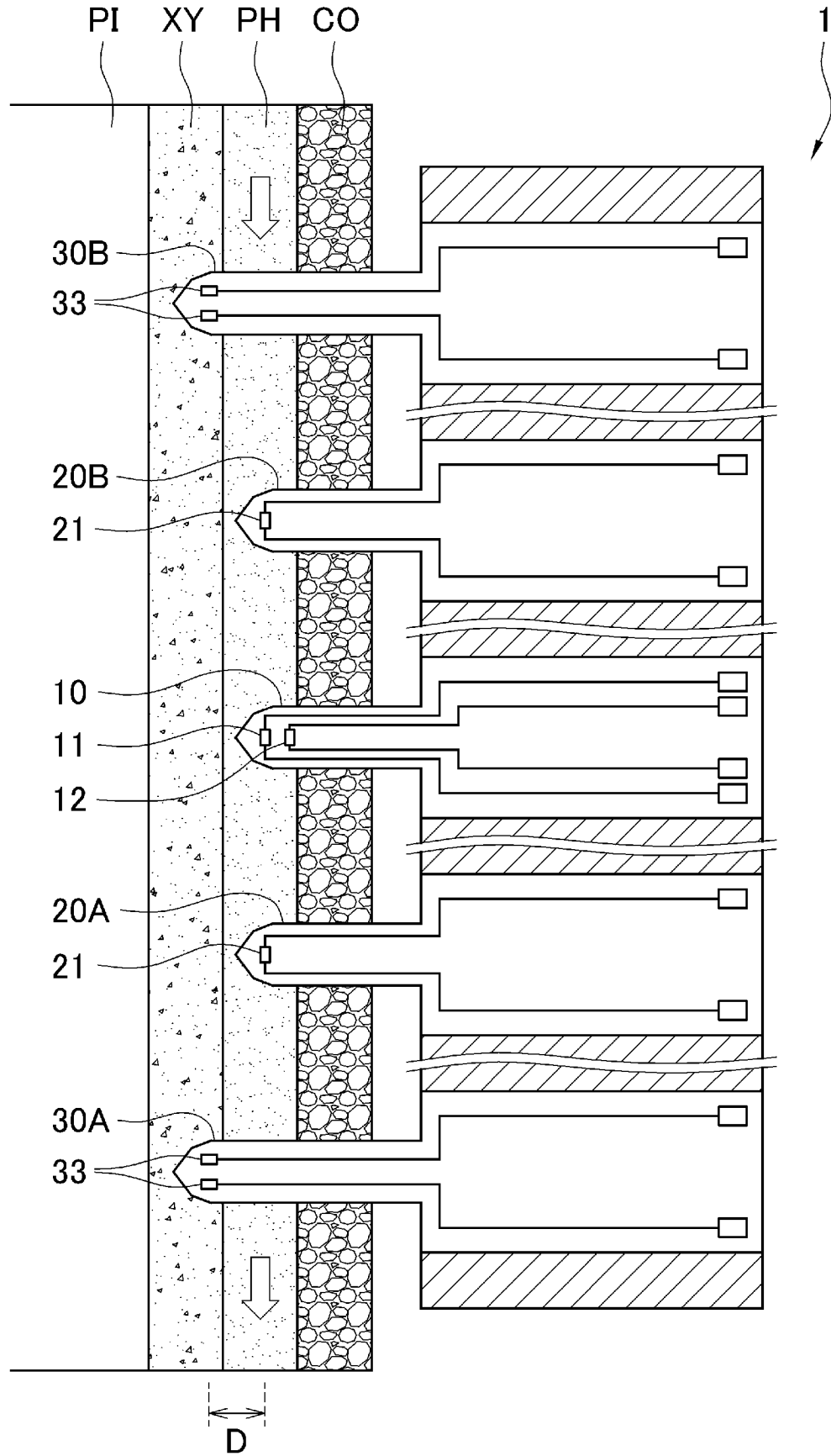
[図5]



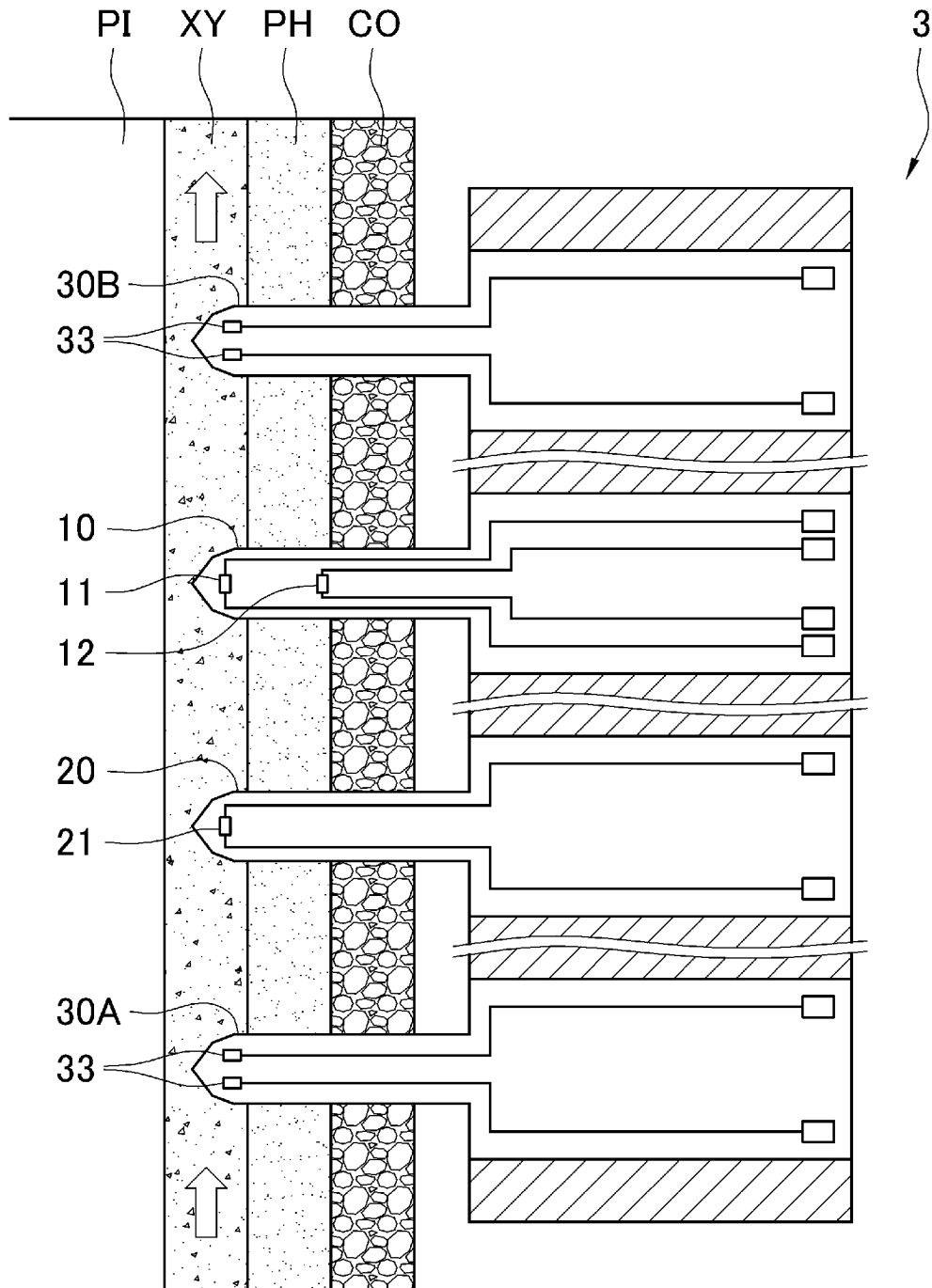
[図6]



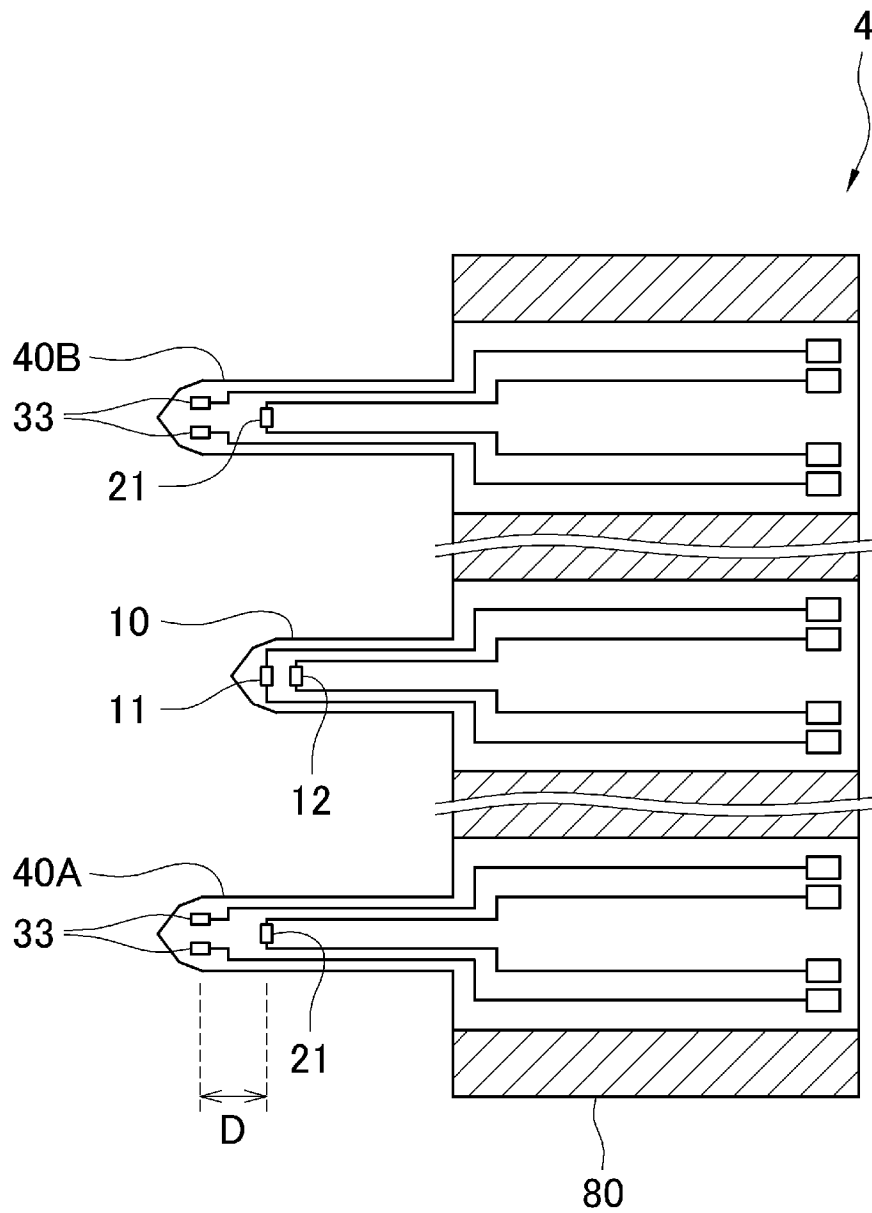
[図7]



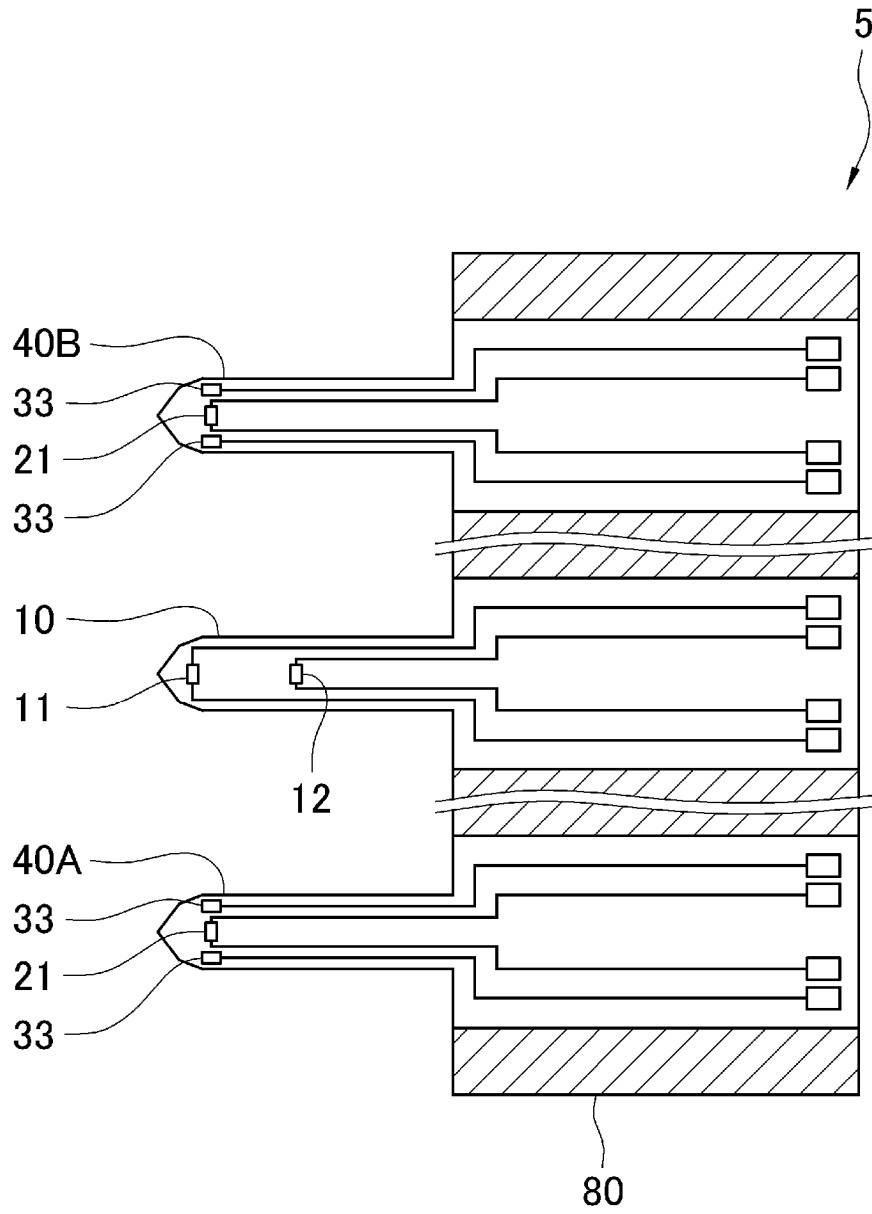
[図9]



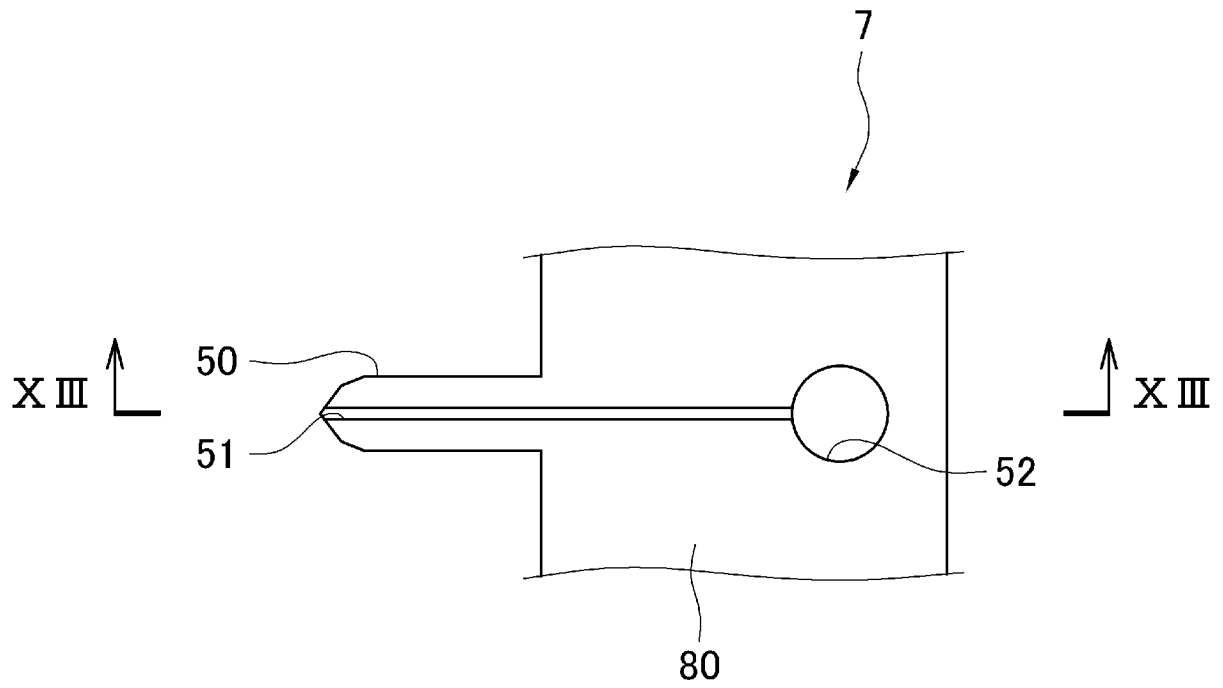
[図10]



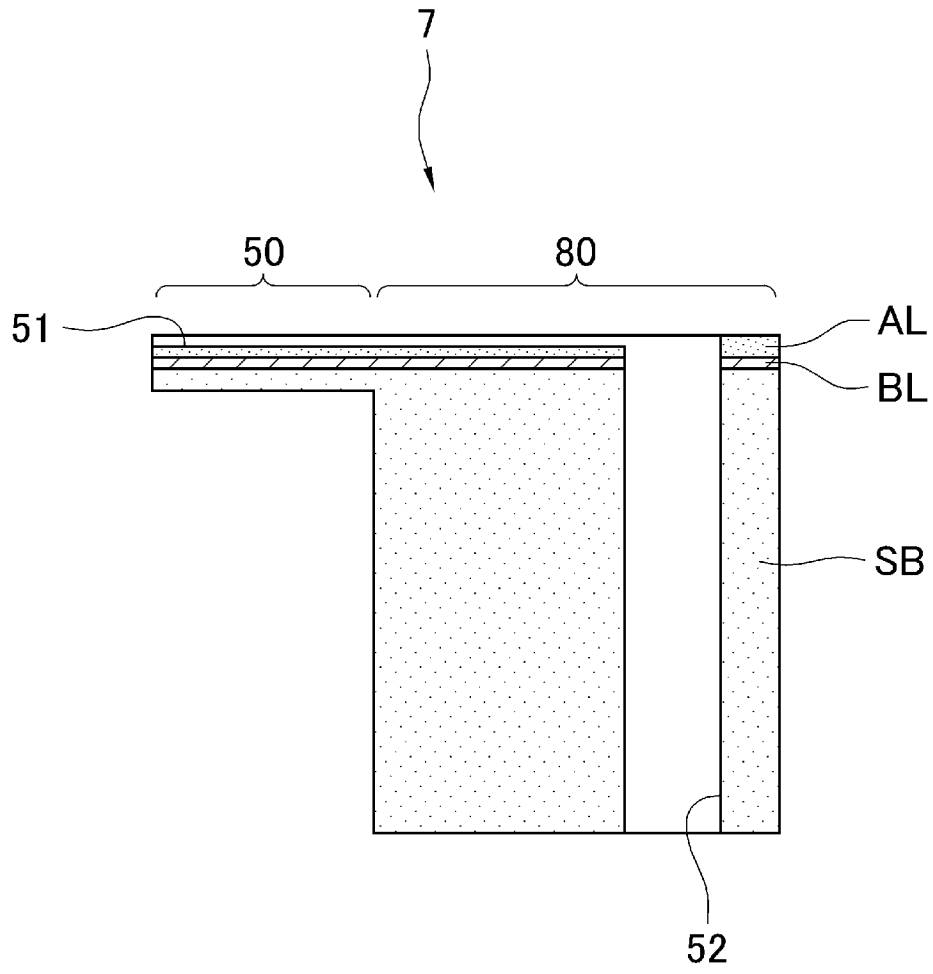
[図11]



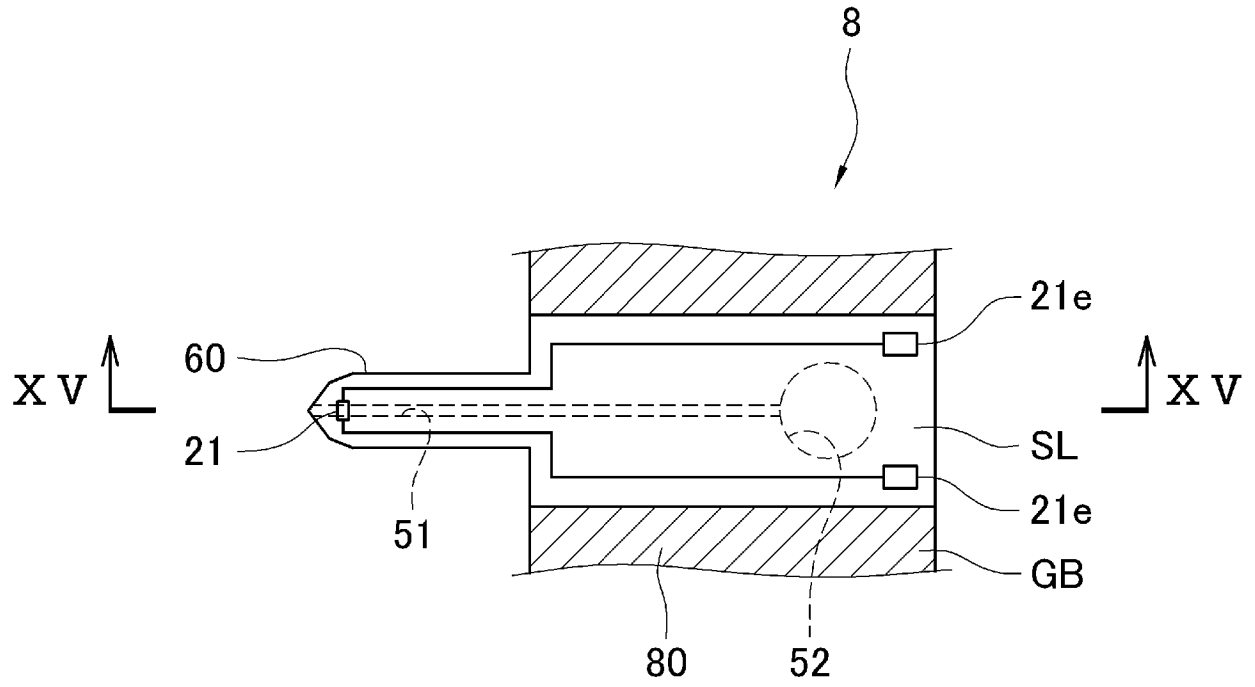
[図12]



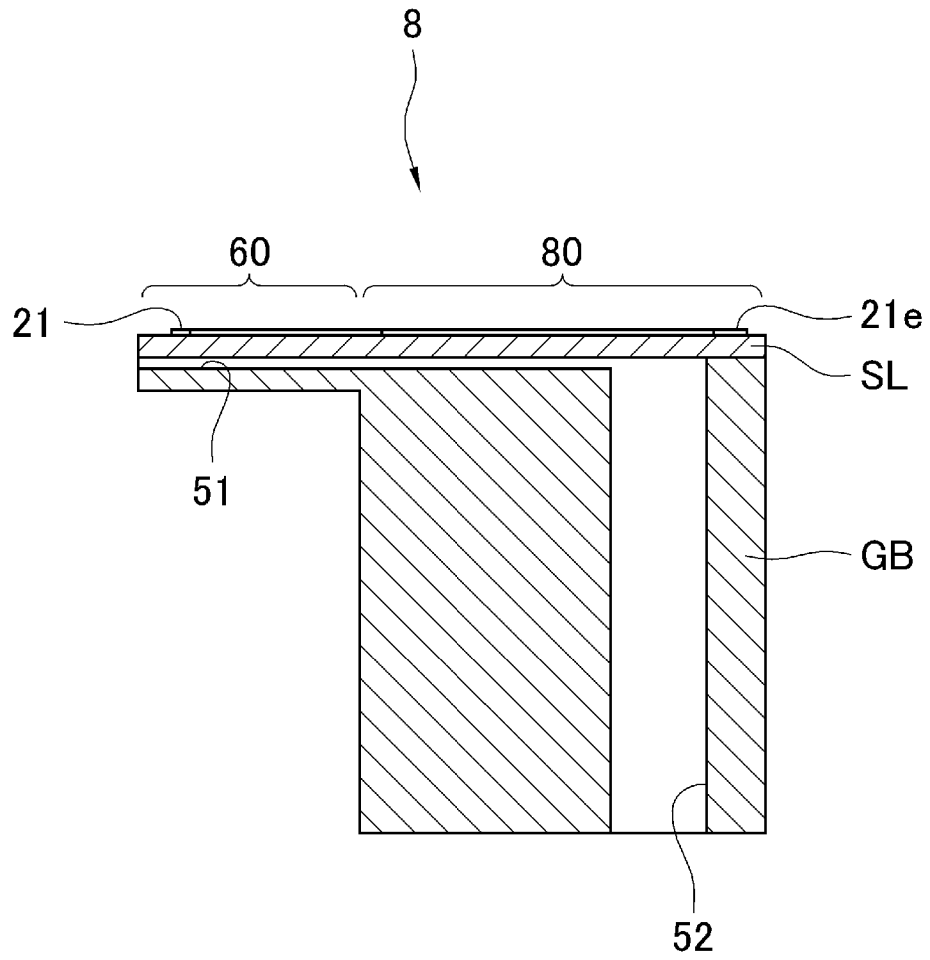
[図13]



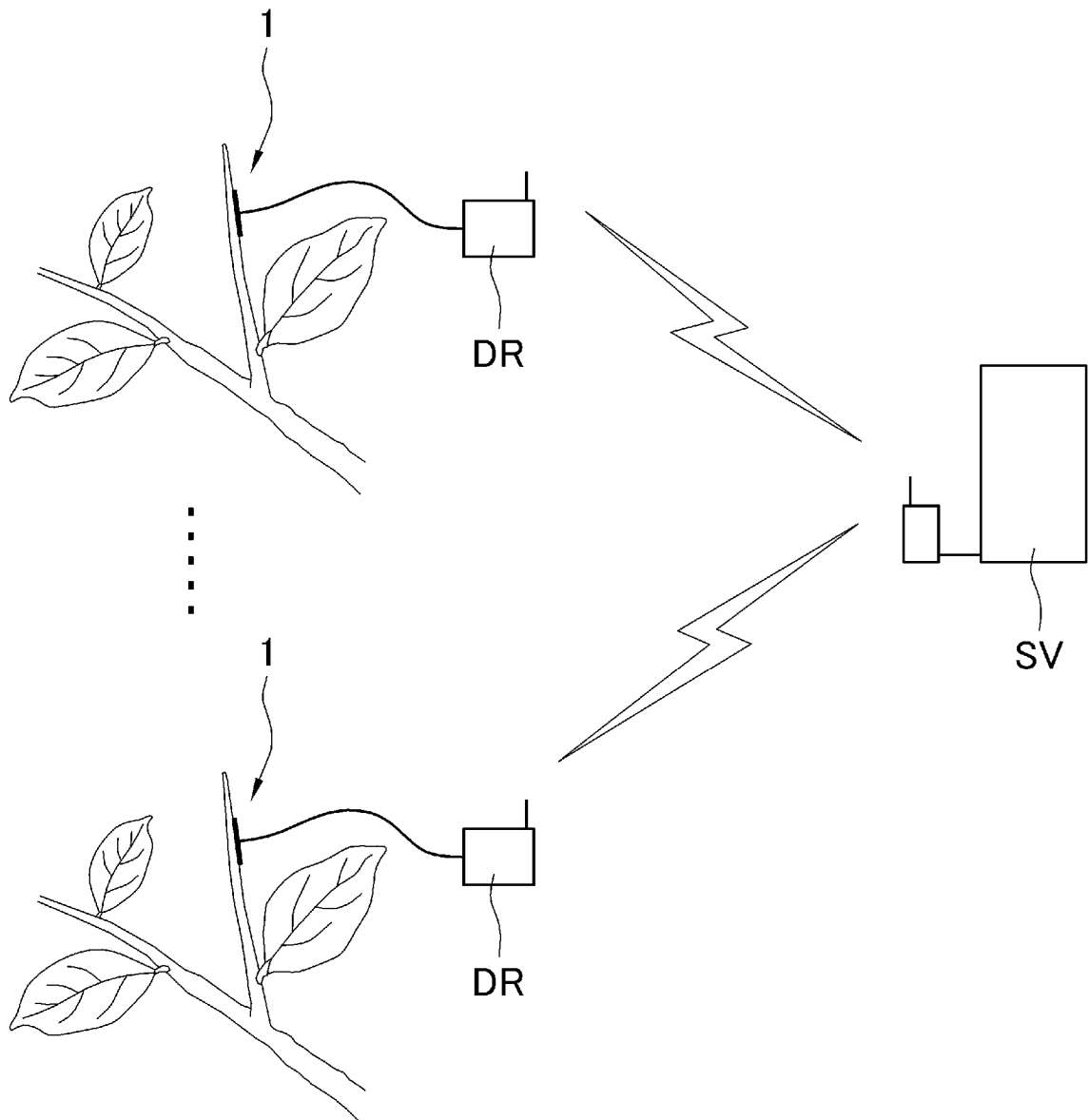
[図14]



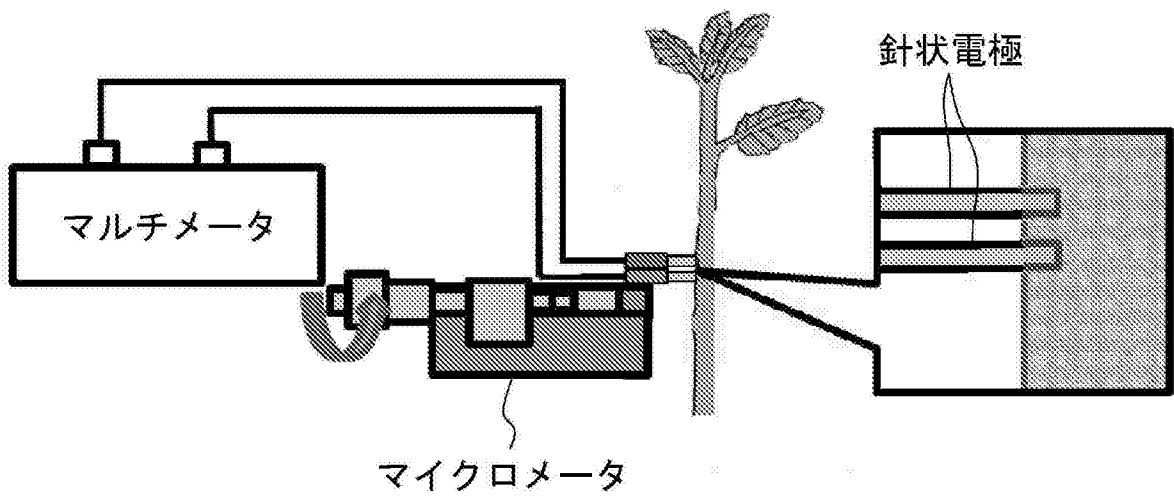
[図15]



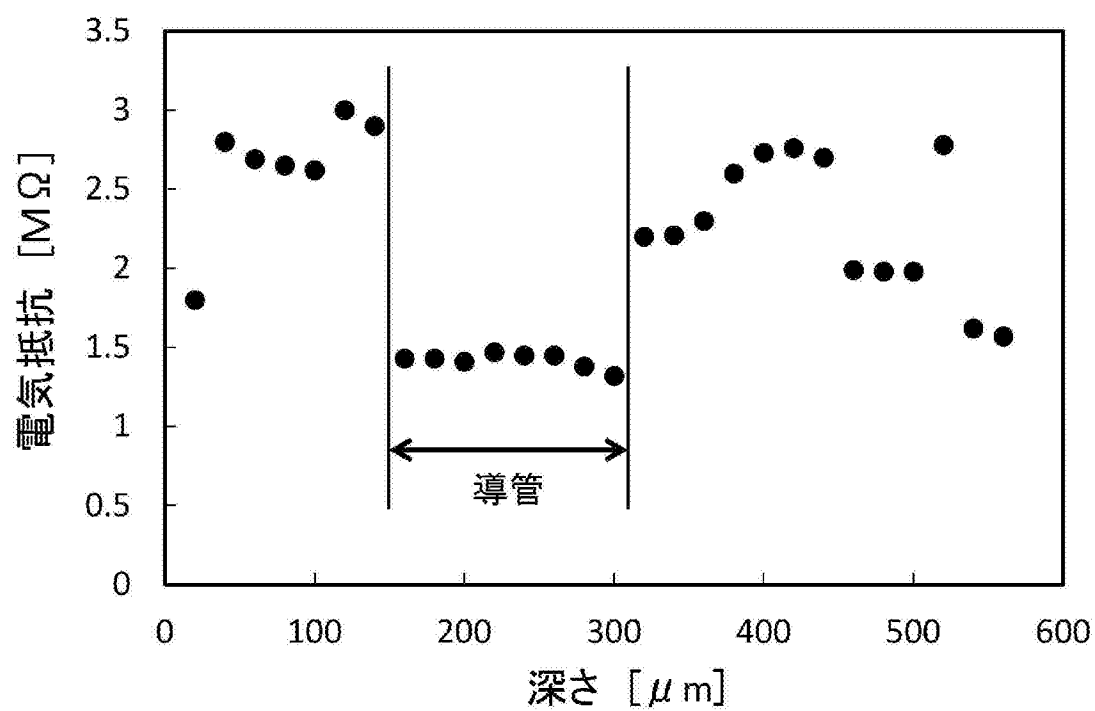
[図16]



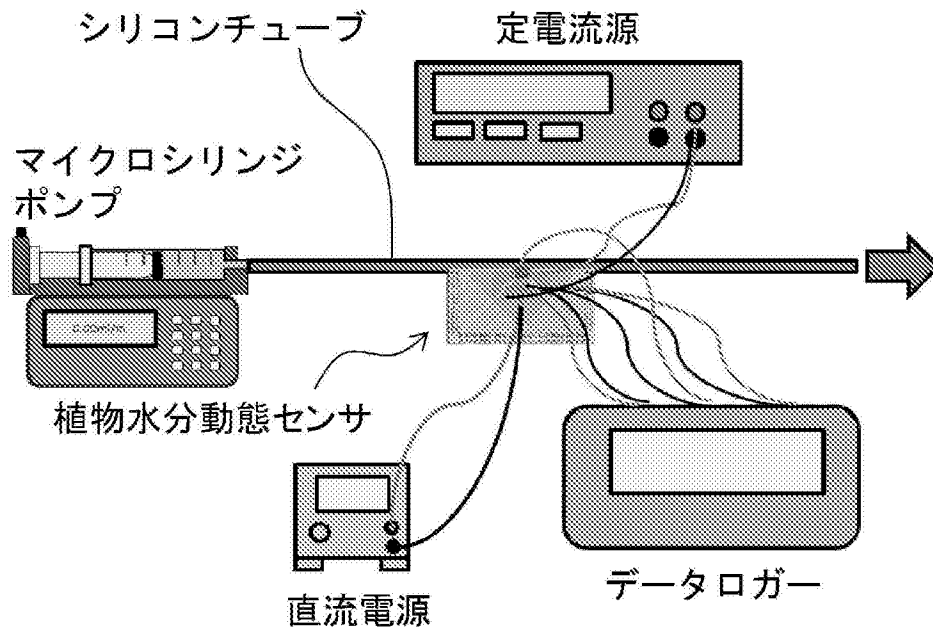
[図17]



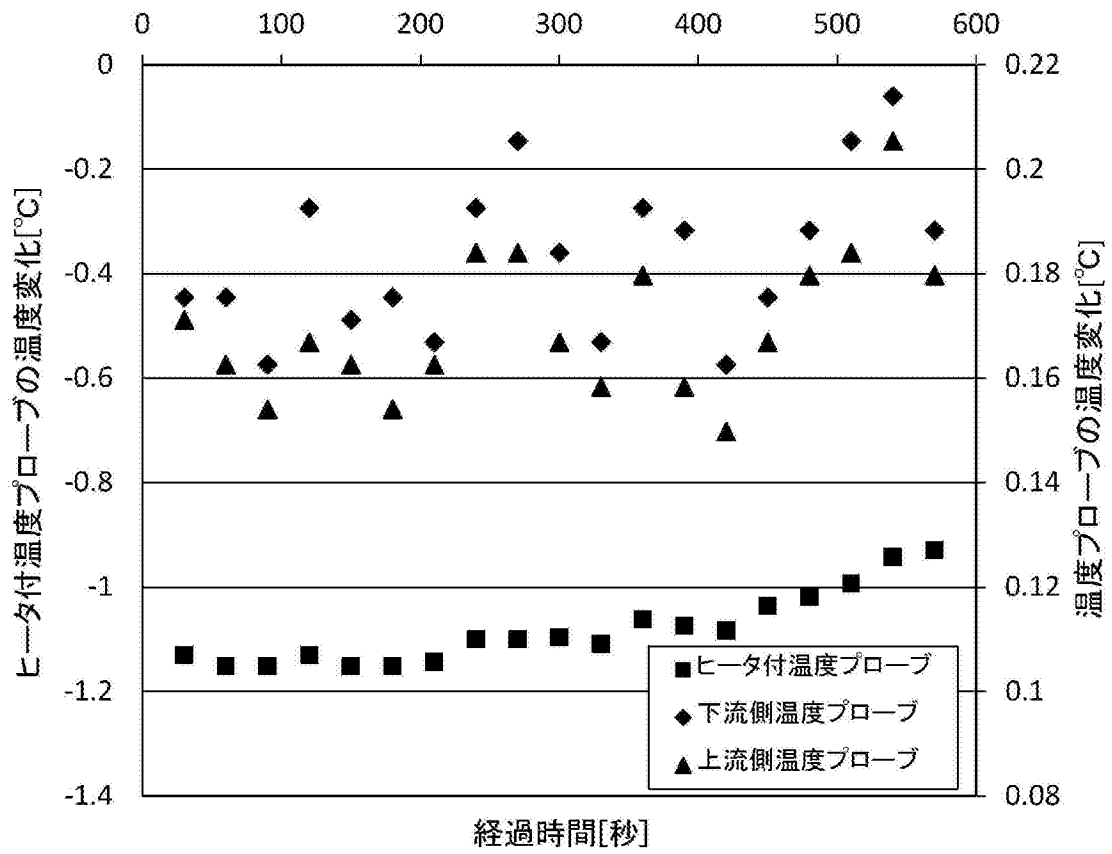
[図18]



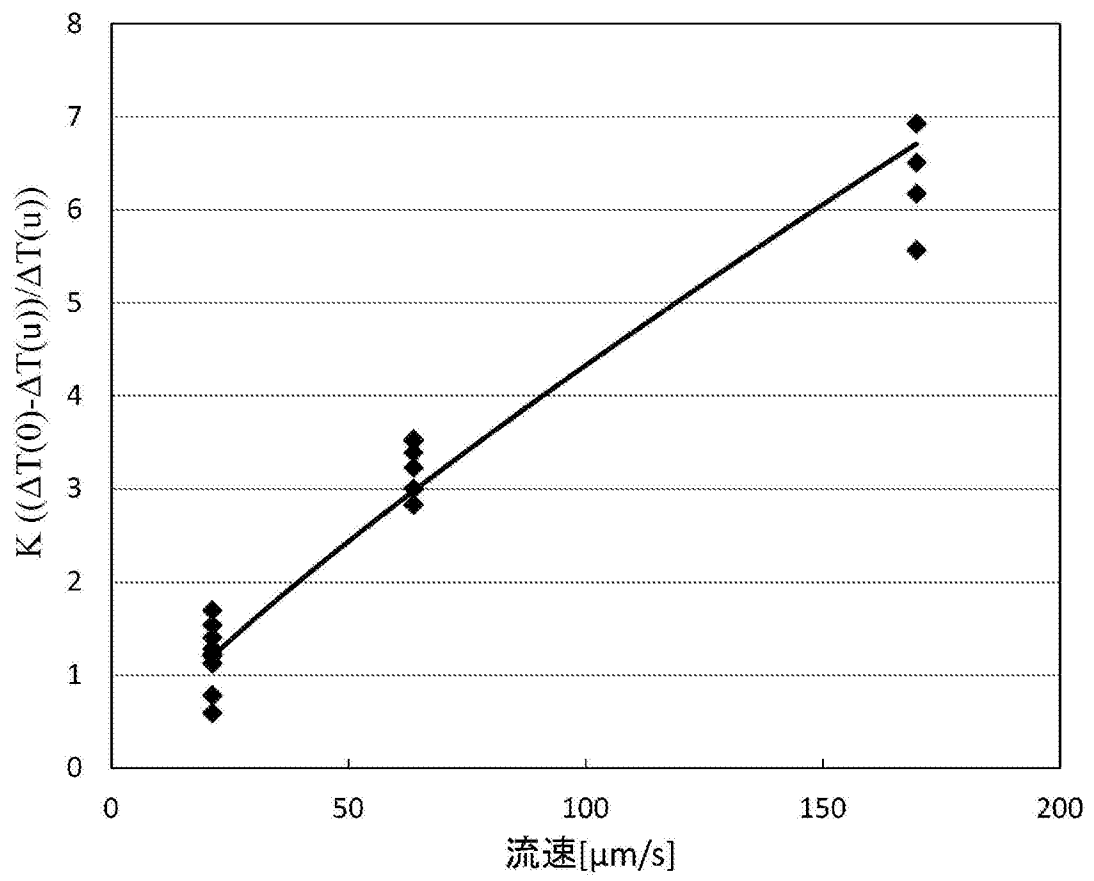
[図19]



[図20]



[図21]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2015/000325

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
G01F1/684(2006.01)i, A01G7/00(2006.01)i, G01F1/692(2006.01)i, G01P5/12(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G01F1/68, A01G7/00, G01P5/10

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2015
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2015	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2015

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	Makoto Ochi et al., Fabrication of micro sap flow sensor by using MEMS technology, The 29th Sensor Symposium on Sensors, Micromachines and Applied Systems, Toshio Shimada Secretary, IEEJ, 2012.10.22, page 173	1-9

Further documents are listed in the continuation of Box C. See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 04 February 2015 (04.02.15)	Date of mailing of the international search report 17 February 2015 (17.02.15)
--	---

Name and mailing address of the ISA/ Japan Patent Office 3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915, Japan	Authorized officer Telephone No.
--	---

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） Int.Cl. G01F1/684(2006.01)i, A01G7/00(2006.01)i, G01F1/692(2006.01)i, G01P5/12(2006.01)i		
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC）） Int.Cl. G01F1/68, A01G7/00, G01P5/10		
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1922-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-2015年 日本国実用新案登録公報 1996-2015年 日本国登録実用新案公報 1994-2015年		
国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）		
C. 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	Makoto Ochi 他, Fabrication of micro sap flow sensor by using MEMS technology, The 29th Sensor Symposium on S ensors, Micromachines and Appli ed Systems, Toshio Shimada Secretary, IEEJ, 2012.10.22, 173頁	1-9
<input type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。		
<input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。		
* 引用文献のカテゴリー 「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す） 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願		
の日の後に公表された文献 「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの 「&」同一パテントファミリー文献		
国際調査を完了した日 04.02.2015	国際調査報告の発送日 17.02.2015	
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁（ISA/J P） 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	特許庁審査官（権限のある職員） 森 雅之 電話番号 03-3581-1101 内線 3216	2F 8505