

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2018-151226

(P2018-151226A)

(43) 公開日 平成30年9月27日 (2018.9.27)

(51) Int.Cl.

G01P 5/12 (2006.01)

F I

G O 1 P 5/12

C

テーマコード (参考)

審査請求 未請求 請求項の数 20 O L (全 23 頁)

(21) 出願番号 特願2017-46926 (P2017-46926)
 (22) 出願日 平成29年3月13日 (2017.3.13)

(71) 出願人 304028346
 国立大学法人 香川大学
 香川県高松市幸町1番1号
 (74) 代理人 110001704
 特許業務法人山内特許事務所
 (72) 発明者 下川 房男
 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
 (72) 発明者 中田 匡祐
 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
 (72) 発明者 高尾 英邦
 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

最終頁に続く

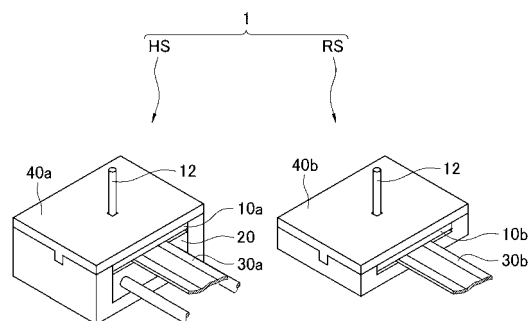
(54) 【発明の名称】 維管束液流速センサ、および維管束液流速センサの製造方法

(57) 【要約】

【課題】 植物の茎等の維管束液の流速を測定できる寸法を有しつつ、安価に製造できる維管束液流速センサを提供する。

【解決手段】 維管束液流速センサ1はヒータセンサHSとリファレンスセンサRSとを備える。ヒータセンサHSは、伝熱板11とプローブ12とからなる第1プローブ部10aと、ヒータ20と、第1温度センサ30aと、伝熱板11、ヒータ20、および第1温度センサ30aを内部に収納する第1筐体40aとを備える。リファレンスセンサRSは、伝熱板11とプローブ12とからなる第2プローブ部10bと、第2温度センサ30bと、伝熱板11、および第2温度センサ30bを内部に収納する第2筐体40bとを備える。第1プローブ部10aおよび第2プローブ部10bは、それぞれ金属材料で形成されている。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

ヒータセンサと、
リファレンスセンサと、を備え、
前記ヒータセンサは、
伝熱板と、該伝熱板に立設されたプローブとからなる第 1 プローブ部と、
前記第 1 プローブ部の前記伝熱板に熱を供給するヒータと、
前記第 1 プローブ部の前記伝熱板の温度を測定する第 1 温度センサと、
前記第 1 プローブ部の前記伝熱板、前記ヒータ、および前記第 1 温度センサを内部に収納
するとともに、前記第 1 プローブ部の前記プローブを外部に露出させる第 1 筐体と、を備
え、
前記リファレンスセンサは、
伝熱板と、該伝熱板に立設されたプローブとからなる第 2 プローブ部と、
前記第 2 プローブ部の前記伝熱板の温度を測定する第 2 温度センサと、
前記第 2 プローブ部の前記伝熱板、および前記第 2 温度センサを内部に収納するとともに
、前記第 2 プローブ部の前記プローブを外部に露出させる第 2 筐体と、を備え、
前記第 1 プローブ部の前記プローブと前記第 2 プローブ部の前記プローブとは長さが同一
であり、
前記第 1 プローブ部および前記第 2 プローブ部は、それぞれ金属材料で形成されている
ことを特徴とする維管束液流速センサ。

10

20

【請求項 2】

前記第 1 プローブ部の前記プローブおよび前記第 2 プローブ部の前記プローブは、それ
ぞれ長さが 1 mm ~ 5 mm である
ことを特徴とする請求項 1 記載の維管束液流速センサ。

【請求項 3】

前記第 1 筐体と前記第 2 筐体とが一体化した筐体を備え、
前記第 1 プローブ部の前記プローブおよび前記第 2 プローブ部の前記プローブが前記筐体
の一面に並んで配置されている
ことを特徴とする請求項 1 または 2 記載の維管束液流速センサ。

30

【請求項 4】

前記リファレンスセンサを 2 つ備える
ことを特徴とする請求項 1 または 2 記載の維管束液流速センサ。

【請求項 5】

前記第 1 筐体と 2 つの前記第 2 筐体とが一体化した筐体を備え、
前記第 1 プローブ部の前記プローブおよび 2 つの前記第 2 プローブ部の前記プローブが前
記筐体の一面に並んで配置されており、
2 つの前記第 2 プローブ部の前記プローブは前記第 1 プローブ部の前記プローブを挟む位
置に配置されている
ことを特徴とする請求項 4 記載の維管束液流速センサ。

40

【請求項 6】

前記第 1 プローブ部および前記第 2 プローブ部は、それぞれ、単一の金属板を機械加工
して前記伝熱板および前記プローブを形成したものである
ことを特徴とする請求項 1、2、3、4 または 5 記載の維管束液流速センサ。

【請求項 7】

前記第 1 プローブ部および前記第 2 プローブ部は、それぞれ、伝熱板相当部分とプロー
ブ相当部分とを有する単一の金属板からなり、前記伝熱板相当部分と前記プローブ相当部
分との接続部が折り曲げられたものである
ことを特徴とする請求項 6 記載の維管束液流速センサ。

【請求項 8】

前記第 1 プローブ部および前記第 2 プローブ部は、それぞれ、単一の金属板の一部を突

50

出させて前記伝熱板および前記プローブを形成したものである
ことを特徴とする請求項 6 記載の維管束液流速センサ。

【請求項 9】

前記第 1 プローブ部および前記第 2 プローブ部は、それぞれ、金属板からなる伝熱板相当部分に金属線材からなるプローブ相当部分を接合したものである
ことを特徴とする請求項 1、2、3、4 または 5 記載の維管束液流速センサ。

【請求項 10】

前記ヒータは前記第 1 プローブ部の前記伝熱板と同一またはそれより広い面積を有することを特徴とする請求項 1、2、3、4、5、6、7、8 または 9 記載の維管束液流速センサ。

10

【請求項 11】

前記第 1 温度センサおよび前記第 2 温度センサは、それぞれシート状素材に温度検出素子を設けたものである
ことを特徴とする請求項 1、2、3、4、5、6、7、8、9 または 10 記載の維管束液流速センサ。

【請求項 12】

前記ヒータおよび前記第 1 温度センサは、前記第 1 プローブ部の前記伝熱板と同一またはそれより広い面積を有する半導体基板に形成されている
ことを特徴とする請求項 1、2、3、4、5、6、7、8 または 9 記載の維管束液流速センサ。

20

【請求項 13】

前記 2 温度センサは、前記第 2 プローブ部の前記伝熱板と同一またはそれより広い面積を有する半導体基板に形成されている
ことを特徴とする請求項 1、2、3、4、5、6、7、8 または 9 記載の維管束液流速センサ。

【請求項 14】

前記第 1 筐体および前記第 2 筐体は、それぞれ前記第 1 プローブ部および前記第 2 プローブ部よりも熱伝導率の低い材料で形成されている
ことを特徴とする請求項 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12 または 13 記載の維管束液流速センサ。

30

【請求項 15】

金属材料を用いて、伝熱板と、該伝熱板に立設されたプローブとからなるプローブ部を複数形成して第 1 プローブ部と第 2 プローブ部とを得るプローブ部形成工程と、
前記第 1 プローブ部の前記伝熱板にヒータと第 1 温度センサとを設け、前記第 1 プローブ部の前記プローブを外部に露出させるように、前記第 1 プローブ部の前記伝熱板、前記ヒータ、および前記第 1 温度センサを第 1 筐体の内部に収納することでヒータセンサを組み立てるヒータセンサ組立工程と、
前記第 2 プローブ部の前記伝熱板に第 2 温度センサを設け、前記第 2 プローブ部の前記プローブを外部に露出させるように、前記第 2 プローブ部の前記伝熱板、および前記第 2 温度センサを第 2 筐体の内部に収納することでリファレンスセンサを組み立てるリファレンスセンサ組立工程と、を備える
ことを特徴とする維管束液流速センサの製造方法。

40

【請求項 16】

前記プローブ部形成工程は、
金属板を加工して伝熱板相当部分とプローブ相当部分とを形成する板加工工程と、
前記伝熱板相当部分と前記プローブ相当部分との接続部を曲げ加工する曲げ工程と、を備える
ことを特徴とする請求項 15 記載の維管束液流速センサの製造方法。

【請求項 17】

前記板加工工程は、前記金属板をレーザ加工により切断して前記伝熱板相当部分と前記

50

プローブ相当部分とを形成する

ことを特徴とする請求項 16 記載の維管束液流速センサの製造方法。

【請求項 18】

前記板加工工程は、前記金属板をプレス加工により打抜いて前記伝熱板相当部分と前記プローブ相当部分とを形成する

ことを特徴とする請求項 16 記載の維管束液流速センサの製造方法。

【請求項 19】

前記プローブ部形成工程は、金属板に深絞り加工を施して前記プローブを突出させる工程を備える

ことを特徴とする請求項 15 記載の維管束液流速センサの製造方法。

10

【請求項 20】

前記プローブ部形成工程は、

金属板を切断して伝熱板相当部分を形成する工程と、

金属線材を切断してプローブ相当部分を形成する工程と、

前記伝熱板相当部分に前記プローブ相当部分を接合する工程と、を備える

ことを特徴とする請求項 15 記載の維管束液流速センサの製造方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、維管束液流速センサ、および維管束液流速センサの製造方法に関する。さらに詳しくは、植物の新梢やそれにつながる茎等の維管束液の流速を測定する維管束液流速センサ、およびその維管束液流速センサの製造方法に関する。

20

【背景技術】

【0002】

作物や果樹等の生産では、生産性向上をはかる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、植物の生育を阻害せずに、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】

一般に、多くの農業現場では、無降雨日数、天候、気温の変化等に基づいて、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。

30

【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。その中でグラニ工法を利用した測定方法が注目を集めている。また、ヒートパルス法により樹液の流速を測定する方法も知られている（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穴の中に配置することができる棒状の 3 本の温度センサおよび 1 本の棒状ヒータを備えた装置が開示されている。そして、特許文献 1 には、この装置の温度センサおよび棒状ヒータを樹木の辺材部に形成した穴の中に配置し、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の流速を測定するという技術が開示されている。

40

【0006】

しかし、特許文献 1 の装置は、そもそも茎径が比較的大きい樹木中を流れる樹液の流速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はある程度の大きさを有する。このため、特許文献 1 の装置は、新梢やそれにつながる茎等であって、茎径が数 mm 程度のものには適用が困難である。

【0007】

50

植物の生育状態を把握するには、植物の維管束液の流量を把握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、それにつながる茎等、太さが数mm程度のものの維管束液の流量を把握することが非常に重要である。

【0008】

そこで、本願発明者は、新梢末端や果柄等の植物細部内を流れる維管束液の動態（水分や養液の動態）を測定できる植物水分動態センサを考案している（特許文献2）。特許文献2には、新梢末端や果柄等に突き刺すことができる寸法に形成されたプローブを備える植物水分動態センサが開示されている。プローブを植物の茎等に突き刺して配置し、グラニ工法を利用して水分動態（維管束液の流量および方向）を測定できる。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【0009】

【特許文献1】特開平6-273434号公報

【特許文献2】特開2014-211407号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0010】

特許文献2の植物水分動態センサはMEMS技術により半導体基板を加工することにより形成される。したがって、少量生産の場合には製造コストが高くなる。

20

【0011】

また、MEMS技術により半導体基板を加工してプローブを形成する場合、通常、プローブの長さは数百 μm である。しかし、茎の外皮から維管束までの距離が1mmを超える植物も多く存在する。この場合、従来の植物水分動態センサでは維管束液の動態を測定できない。

【0012】

本発明は上記事情に鑑み、植物の茎等の維管束液の流速を測定できる寸法を有しつつ、安価に製造できる維管束液流速センサ、およびその維管束液流速センサの製造方法を提供することを目的とする。

また、外皮から維管束までの距離が長い植物であっても、維管束液の流速を測定できる維管束液流速センサ、およびその維管束液流速センサの製造方法を提供することを目的とする。

30

【課題を解決するための手段】

【0013】

第1発明の維管束液流速センサは、ヒータセンサと、リファレンスセンサと、を備え、前記ヒータセンサは、伝熱板と、該伝熱板に立設されたプローブとからなる第1プローブ部と、前記第1プローブ部の前記伝熱板に熱を供給するヒータと、前記第1プローブ部の前記伝熱板の温度を測定する第1温度センサと、前記第1プローブ部の前記伝熱板、前記ヒータ、および前記第1温度センサを内部に収納するとともに、前記第1プローブ部の前記プローブを外部に露出させる第1筐体と、を備え、前記リファレンスセンサは、伝熱板と、該伝熱板に立設されたプローブとからなる第2プローブ部と、前記第2プローブ部の前記伝熱板の温度を測定する第2温度センサと、前記第2プローブ部の前記伝熱板、および前記第2温度センサを内部に収納するとともに、前記第2プローブ部の前記プローブを外部に露出させる第2筐体と、を備え、前記第1プローブ部の前記プローブと前記第2プローブ部の前記プローブとは長さが同一であり、前記第1プローブ部および前記第2プローブ部は、それぞれ金属材料で形成されていることを特徴とする。

40

第2発明の維管束液流速センサは、第1発明において、前記第1プローブ部の前記プローブおよび前記第2プローブ部の前記プローブは、それぞれ長さが1mm~5mmであることを特徴とする。

第3発明の維管束液流速センサは、第1または第2発明において、前記第1筐体と前記

50

第 2 筐体とが一体化した筐体を備え、前記第 1 プローブ部の前記プローブおよび前記第 2 プローブ部の前記プローブが前記筐体の一の面に並んで配置されていることを特徴とする。

第 4 発明の維管束液流速センサは、第 1 または第 2 発明において、前記リファレンスセンサを 2 つ備えることを特徴とする。

第 5 発明の維管束液流速センサは、第 4 発明において、前記第 1 筐体と 2 つの前記第 2 筐体とが一体化した筐体を備え、前記第 1 プローブ部の前記プローブおよび 2 つの前記第 2 プローブ部の前記プローブが前記筐体の一の面に並んで配置されており、2 つの前記第 2 プローブ部の前記プローブは前記第 1 プローブ部の前記プローブを挟む位置に配置されていることを特徴とする。

10

第 6 発明の維管束液流速センサは、第 1、第 2、第 3、第 4 または第 5 発明において、前記第 1 プローブ部および前記第 2 プローブ部は、それぞれ、単一の金属板を機械加工して前記伝熱板および前記プローブを形成したものであることを特徴とする。

第 7 発明の維管束液流速センサは、第 6 発明において、前記第 1 プローブ部および前記第 2 プローブ部は、それぞれ、伝熱板相当部分とプローブ相当部分とを有する単一の金属板からなり、前記伝熱板相当部分と前記プローブ相当部分との接続部が折り曲げられたものであることを特徴とする。

第 8 発明の維管束液流速センサは、第 6 発明において、前記第 1 プローブ部および前記第 2 プローブ部は、それぞれ、単一の金属板の一部を突出させて前記伝熱板および前記プローブを形成したものであることを特徴とする。

20

第 9 発明の維管束液流速センサは、第 1、第 2、第 3、第 4 または第 5 発明において、前記第 1 プローブ部および前記第 2 プローブ部は、それぞれ、金属板からなる伝熱板相当部分に金属線材からなるプローブ相当部分を接合したものであることを特徴とする。

第 10 発明の維管束液流速センサは、第 1、第 2、第 3、第 4、第 5、第 6、第 7、第 8 または第 9 発明において、前記ヒータは前記第 1 プローブ部の前記伝熱板と同一またはそれより広い面積を有することを特徴とする。

第 11 発明の維管束液流速センサは、第 1、第 2、第 3、第 4、第 5、第 6、第 7、第 8、第 9 または第 10 発明において、前記第 1 温度センサおよび前記第 2 温度センサは、それぞれシート状素材に温度検出素子を設けたものであることを特徴とする。

第 12 発明の維管束液流速センサは、第 1、第 2、第 3、第 4、第 5、第 6、第 7、第 8 または第 9 発明において、前記ヒータおよび前記第 1 温度センサは、前記第 1 プローブ部の前記伝熱板と同一またはそれより広い面積を有する半導体基板に形成されていることを特徴とする。

30

第 13 発明の維管束液流速センサは、第 1、第 2、第 3、第 4、第 5、第 6、第 7、第 8 または第 9 発明において、前記 2 温度センサは、前記第 2 プローブ部の前記伝熱板と同一またはそれより広い面積を有する半導体基板に形成されていることを特徴とする。

第 14 発明の維管束液流速センサは、第 1、第 2、第 3、第 4、第 5、第 6、第 7、第 8、第 9、第 10、第 11、第 12 または第 13 発明において、前記第 1 筐体および前記第 2 筐体は、それぞれ前記第 1 プローブ部および前記第 2 プローブ部よりも熱伝導率の低い材料で形成されていることを特徴とする。

40

第 15 発明の維管束液流速センサの製造方法は、金属材料を用いて、伝熱板と、該伝熱板に立設されたプローブとからなるプローブ部を複数形成して第 1 プローブ部と第 2 プローブ部とを得るプローブ部形成工程と、前記第 1 プローブ部の前記伝熱板にヒータと第 1 温度センサとを設け、前記第 1 プローブ部の前記プローブを外部に露出させるように、前記第 1 プローブ部の前記伝熱板、前記ヒータ、および前記第 1 温度センサを第 1 筐体の内部に収納することでヒータセンサを組み立てるヒータセンサ組立工程と、前記第 2 プローブ部の前記伝熱板に第 2 温度センサを設け、前記第 2 プローブ部の前記プローブを外部に露出させるように、前記第 2 プローブ部の前記伝熱板、および前記第 2 温度センサを第 2 筐体の内部に収納することでリファレンスセンサを組み立てるリファレンスセンサ組立工程と、を備えることを特徴とする。

50

第16発明の維管束液流速センサの製造方法は、第15発明において、前記プローブ部形成工程は、金属板を加工して伝熱板相当部分とプローブ相当部分とを形成する板加工工程と、前記伝熱板相当部分と前記プローブ相当部分との接続部を曲げ加工する曲げ工程と、を備えることを特徴とする。

第17発明の維管束液流速センサの製造方法は、第16発明において、前記板加工工程は、前記金属板をレーザ加工により切断して前記伝熱板相当部分と前記プローブ相当部分とを形成することを特徴とする。

第18発明の維管束液流速センサの製造方法は、第16発明において、前記板加工工程は、前記金属板をプレス加工により打抜いて前記伝熱板相当部分と前記プローブ相当部分とを形成することを特徴とする。

第19発明の維管束液流速センサの製造方法は、第15発明において、前記プローブ部形成工程は、金属板に深絞り加工を施して前記プローブを突出させる工程を備えることを特徴とする。

第20発明の維管束液流速センサの製造方法は、第15発明において、前記プローブ部形成工程は、金属板を切断して伝熱板相当部分を形成する工程と、金属線材を切断してプローブ相当部分を形成する工程と、前記伝熱板相当部分に前記プローブ相当部分を接合する工程と、を備えることを特徴とする。

【発明の効果】

【0014】

第1発明によれば、プローブが立設する伝熱板にヒータおよび温度センサが設けられた構成であるので、ヒータおよび温度センサをプローブに直接設ける構成に比べて、プローブとヒータとの間およびプローブと温度センサとの間で熱が伝わりやすく、プローブを小型化できる。そのため、植物の細部における維管束液の流速を測定できる。また、維管束液流速センサは単純な構成であるので、安価に製造できる。

第2発明によれば、プローブの長さが1mm～5mmであるので、外皮から維管束までの距離が長い植物であっても、維管束液の流速を測定できる。

第3発明によれば、ヒータセンサとリファレンスセンサとが一体形成されているので、維管束液流速センサの植物への取り付けが行いやすい。

第4発明によれば、リファレンスセンサを2つ備えるので、維管束液の流れる方向も測定できる。

第5発明によれば、ヒータセンサとリファレンスセンサとが一体形成されているので、維管束液流速センサの植物への取り付けが行いやすい。

第6発明によれば、プローブ部が単一の金属板から形成されるので、プローブ部を安価に製造できる。

第7発明によれば、金属板を曲げ加工してプローブ部を形成するので、プローブ部を安価に製造できる。

第8発明によれば、金属板の一部を突出させてプローブ部を形成するので、プローブ部を安価に製造できる。

第9発明によれば、金属板と金属線材とからプローブ部を形成するので、プローブ部を安価に製造できる。

第10発明によれば、ヒータと伝熱板との接触面積が広くなり、ヒータの熱をプローブ部に効率よく供給できる。

第11発明によれば、市販のフィルム温度センサを用いるので、維管束液流速センサを安価に製造できる。

第12発明によれば、半導体基板にヒータおよび第1温度センサを形成することで小型化できる。また、製造コストを抑えることができる。

第13発明によれば、半導体基板に第2温度センサを形成することで小型化できる。また、製造コストを抑えることができる。

第14発明によれば、筐体が熱伝導率の低い材料で形成されているので断熱性が高い。

第15発明によれば、構成部材が単純であり、製造工程も簡単であるので、維管束液流

10

20

30

40

50

速センサを安価に製造できる。

第16発明によれば、金属板を曲げ加工してプローブ部を形成するので、プローブ部を安価に製造できる。

第17発明によれば、金属板をレーザ加工してプローブ部を形成するので、プローブ部を安価に製造できる。

第18発明によれば、金属板を打抜いてプローブ部を形成するので、プローブ部を安価に製造できる。

第19発明によれば、金属板を深絞り加工してプローブ部を形成するので、プローブ部を安価に製造できる。

第20発明によれば、金属板と金属線材とからプローブ部を形成するので、プローブ部を安価に製造できる。

【図面の簡単な説明】

【0015】

【図1】本発明の第1実施形態にかかる維管束液流速センサの斜視図である。

【図2】同維管束液流速センサの分解斜視図である。

【図3】(A)図はレーザ加工の説明図である。(B)図は曲げ加工の説明図である。(C)図はプローブ部の斜視図である。

【図4】(A)図はレーザ加工の説明図である。(B)図はプローブ部の斜視図である。

【図5】(A)図はレーザ加工の説明図である。(B)図はプローブ部の斜視図である。

【図6】(A)図は打抜きの説明図である。(B)図は曲げ加工の説明図である。(C)図はプローブ部の斜視図である。

【図7】(A)図は深絞り加工の説明図である。(B)図はプローブ部の斜視図である。

【図8】(A)図は金属板および金属線材の加工の説明図である。(B)図はプローブ部の斜視図である。

【図9】植物に取り付けられた維管束液流速センサの説明図である。

【図10】本発明の第2実施形態にかかる維管束液流速センサの縦断面図である。

【図11】本発明の第3実施形態にかかる維管束液流速センサの縦断面図である。

【図12】本発明の第4実施形態にかかる維管束液流速センサの縦断面図である。

【図13】疑似植物実験系の説明図である。

【図14】疑似植物実験により得られたシリコンチューブ内の流速 u と K 値との関係を示すグラフである。

【図15】実植物実験により得られた経過時間と道管液の流速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。

〔第1実施形態〕

本発明の第1実施形態に係る維管束液流速センサ1は、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容易に取り付けることができる。維管束液流速センサ1は植物の細部における維管束液の流速を測定する機能を有する。

【0017】

(グラニエ法)

維管束液流速センサ1は、グラニエ法を利用して植物の維管束液の流速を測定する。そこで、グラニエ法により樹木中を流れる樹液の流速を求め、流速から流量を求める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。グラニエセンサは、一对の棒状のプローブを備えている。一对のプローブにはそれぞれ温度センサが設けられている。一对のプローブのうち、一方のプローブにはヒータが設けられている。温度センサとヒータとを有するプローブをヒータプローブHPという。他方のプローブは

10

20

30

40

50

、リファレンス用として使用するプローブである。温度センサのみを有するプローブをリファレンスプローブ R P という。

【 0 0 1 9 】

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。

【 0 0 2 0 】

まず、ドリル等によって樹木の主幹に 2 ヶ所の穴を形成する。それぞれの穴にグラニエセンサのヒータプローブ H P とリファレンスプローブ R P とを挿入して樹木に設置した後、1 日以上静置する。グラニエセンサのリファレンスプローブ R P とヒータプローブ H P とは、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、根本側の穴にリファレンスプローブ R P を挿入し、末端側の穴にヒータプローブ H P を挿入する。

10

【 0 0 2 1 】

つぎに、グラニエセンサのヒータプローブ H P のヒータを作動させる。そうすると、一对のプローブ H P 、 R P に設けられた温度センサ間には温度差 T が生じる。下記数式 (1) に示すように、この温度差 T 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 T から樹液流速 u を算出することができる。

【 数 1 】

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

20

ここで、 u は平均樹液流速 [m / s]、 $T(u)$ は平均樹液流速が u の時のヒータプローブ H P とリファレンスプローブ R P の温度差 []、 $T(0)$ は T の最大温度 []、 α と β は観測データから得られる係数である。

【 0 0 2 2 】

また、下記数式 (2) に基づき、樹液流速 u から樹液流量 F を算出できる。

【 数 2 】

$$F = u \times S \dots (2)$$

30

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

【 0 0 2 3 】

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 H P 、 R P に設けられた温度センサ間の温度差 T は小さくなる。なぜなら、ヒータプローブ H P には、ヒータによって一定の熱がかけられるが、ヒータプローブ H P 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 H P 、 R P に設けられた温度センサ間の温度差 T は大きくなる。なぜなら、ヒータプローブ H P には、ヒータによって一定の熱がかけられるが、ヒータプローブ H P の近傍を流れる樹液が少ないので、ヒータプローブ H P 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。

40

【 0 0 2 4 】

(維管束液流速センサ)

つぎに、本実施形態の維管束液流速センサ 1 を説明する。

図 1 および図 2 に示すように、維管束液流速センサ 1 はヒータセンサ H S とリファレンスセンサ R S とからなる。

【 0 0 2 5 】

ヒータセンサ H S は第 1 プローブ部 1 0 a 、ヒータ 2 0 、第 1 温度センサ 3 0 a 、およ

50

び第1筐体40aから構成されている。第1プローブ部10aは伝熱板11と、伝熱板11に立設されたプローブ12とからなる。伝熱板11の形状は特に限定されないが、例えば矩形である。伝熱板11の寸法は、例えば縦、横の寸法が2mm~10mmである。

【0026】

プローブ12は棒状の部材である。プローブ12は円柱形であってもよいし、角柱形であってもよい。プローブ12は植物の新梢末端や果柄等の植物の茎に突き刺して配置できる寸法に形成されている。本実施形態の維管束液流速センサ1は、茎径または軸径が、例えば1mm~10mm程度の植物を測定対象とする。プローブ12の長さは、植物の茎等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茎等の道管や師管に配置され得る長さである。したがって、プローブ12の長さは、例えば0.5mm~5mmとすることが好ましい。

10

【0027】

プローブ12は細いほど植物に対するダメージ(損傷)を小さくできる。プローブ12が円柱形の場合、その直径を、例えば100 μ m~1,000 μ mとすることが好ましい。ただし、プローブ12の直径は必ずしもこれに限定されない。測定対象とする植物の茎径によってはプローブ12の直径を1,000 μ mより大きくしてもよいし、100 μ mより小さくしてもよい。プローブ12が四角柱形の場合、その横断面の縦横寸法の比率は1:1~1:3とすることが好ましい。

【0028】

第1プローブ部10aは熱伝導率の高い金属材料で形成されている。すなわち、伝熱板11は金属板で形成されており、プローブ12は金属針で形成されている。第1プローブ部10aを形成する金属は特に限定されないが、熱伝導率が高く、植物の細部への突き刺しに耐え得る強度を有する金属、例えばステンレス鋼、アルミニウム、アルミニウム合金、鋼、鉄、チタンが用いられる。また、第1プローブ部10aの素材として、飲料缶等に用いられるスチール板、アルミニウム板等、市販の金属板を用いることができる。

20

【0029】

なお、伝熱板11に対するプローブ12の位置は特に限定されない。伝熱板11の中央にプローブ12が立設してもよいし、伝熱板11の端にプローブ12が立設してもよい。

【0030】

ヒータ20は熱を発する機能を有する部材である。ヒータ20により第1プローブ部10aに熱を供給する。ヒータ20は伝熱板11に熱を供給できる態様で伝熱板11に設けられる。ヒータ20は伝熱板11に直接接触するよう設けられてもよいし、他の部材を介して間接的に設けられてもよい。

30

【0031】

ヒータ20としては、伝熱板11と面接触する面を有するものが好ましい。また、伝熱板11と同程度の形状、寸法を有するものが好ましい。特に、ヒータ20は伝熱板11と同一、またはそれより広い面積を有することが好ましい。そうすれば、ヒータ20と伝熱板11との接触面積が広くなり、ヒータ20の熱を第1プローブ部10aに効率よく供給できる。

【0032】

ヒータ20としてマイクロセラミックヒータを用いることができる。マイクロセラミックヒータは直方体形の発熱部を有している。発熱部は発熱体を酸化アルミニウム等のセラミック材料で覆って形成されている。マイクロセラミックヒータは発熱部が種々の寸法のもので市販されている。ヒータ20として市販のマイクロセラミックヒータを用いれば、維管束液流速センサ1を安価に製造できる。

40

【0033】

伝熱板11とヒータ20との間に熱伝導性の高いシートを挟んでもよい。このようにすれば、ヒータ20で発生した熱を伝熱板11に対してより効率的に伝えることができる。このようなシートとして、窒化ホウ素等の高熱伝導性フィラーを添加した樹脂シート、スーパーグラファイトシート等が挙げられる。

50

【0034】

第1温度センサ30aは温度を測定する機能を有する部材である。第1温度センサ30aにより第1プローブ部10aの温度を測定する。第1温度センサ30aは伝熱板11の温度を測定できる態様で伝熱板11に設けられる。第1温度センサ30aは伝熱板11に直接接触するよう設けられてもよいし、他の部材を介して間接的に設けられてもよい。

【0035】

第1温度センサ30aとしてシート状素材に温度検出素子を設けたもの、例えばフィルム温度センサを用いることができる。この種の温度センサは、例えばポリイミド等のシート状素材で熱電対を挟み込んだ構成である。熱電対として、例えば白金白金ロジウム、クロメルアルメル等、種々の組合せの材料を用いることができる。また、熱電対に代えて、白金、ニッケル、銅等の測温抵抗体、またはサーミスタを用いてもよい。薄膜技術によりシート状素材の表面に熱電対や抵抗体を形成してもよい。なお、第1温度センサ30aとして市販のフィルム温度センサを用いれば、維管束液流速センサ1を安価に製造できる。

10

【0036】

第1筐体40aは本体部41と蓋部42とからなる。本体部41の内部にヒータ20、第1温度センサ30a、および第1プローブ部10aを納め、蓋部42を閉めることでヒータセンサHSが組み立てられる。蓋部42には孔43が形成されている。プローブ12は孔43を通して、第1筐体40aの外部に露出する。したがって、ヒータセンサHSが組み立てられた状態では、第1筐体40aの内部には伝熱板11、ヒータ20、および第1温度センサ30aが収納され、プローブ12のみが第1筐体40aの外部に露出する。

20

【0037】

第1筐体40aはその内部に収納した各種部材を外部環境から断熱する機能と、防水、防湿機能とを有する。例えば、雨や風の影響により、第1プローブ部10aの温度が変化したり、ヒータ20の熱が奪われたりすることを抑制する。また、雨が降った場合に、水分が第1筐体40aの内部に侵入することを抑制する。これにより、維管束液流速センサ1としての測定精度を向上できる。

【0038】

第1筐体40aは第1プローブ部10aよりも熱伝導率の低い材料、例えば樹脂で形成するのが好ましい。第1筐体40aを熱伝導率の低い材料で形成すれば断熱性を高くできる。また、第1筐体40aを樹脂で形成すれば、第1筐体40aを安価に製造できる。

30

【0039】

なお、伝熱板11に対するヒータ20および第1温度センサ30aの位置は特に限定されない。ヒータ20、第1温度センサ30a、伝熱板11をこの順に積層してもよい。伝熱板11の上面側(プローブ12側)にヒータ20および第1温度センサ30aを配置してもよい。

【0040】

ヒータ20および第1温度センサ30aの一方を伝熱板11の下面側に配置し、他方を伝熱板11の上面側に配置してもよい。そうすれば、ヒータ20と伝熱板11との接触面積、第1温度センサ30aと伝熱板11との接触面積がともに広がる。その結果、第1プローブ部10aとヒータ20との間、および第1プローブ部10aと第1温度センサ30aとの間で熱が伝わりやすくなる。特に、フィルム温度センサの構成部材であるフレキシブルプリント基板は断熱性の高いポリイミドで形成されていることが多い。そのため、ヒータ20と伝熱板11との間にフィルム温度センサが挟まった状態であると、ヒータ20の熱が第1プローブ部10aに伝わりに難くなる。このような場合に、第1温度センサ30aを伝熱板11の上面側に配置すれば、ヒータ20の熱が第1プローブ部10aに伝わりにやすくなる。

40

【0041】

リファレンスセンサRSは第2プローブ部10b、第2温度センサ30b、および第2筐体40bから構成されている。第2プローブ部10bは伝熱板11と、伝熱板11に立

50

設されたプローブ12とからなる。

【0042】

リファレンスセンサRS用の第2プローブ部10bとしてヒータセンサHS用の第1プローブ部10aと同一構成のものを用いることができる。ヒータセンサHS用の第1プローブ部10aおよびリファレンスセンサRS用の第2プローブ部10bとして、通常は同一形状、同一寸法のもので用いられる。第1プローブ部10aおよび第2プローブ部10bの両プローブ12、12の先端部を植物の道管または師管に配置することから、両プローブ12、12は長さが同一である必要がある。以下、第1プローブ部10aと第2プローブ部10bとを区別しない場合、単にプローブ部10と称する。

【0043】

第2温度センサ30bは温度を測定する機能を有する部材である。第2温度センサ30bにより第2プローブ部10bの温度を測定する。第2温度センサ30bは伝熱板11の温度を測定できる態様で伝熱板11に設けられる。第2温度センサ30bは伝熱板11に直接接触するよう設けられてもよいし、他の部材を介して間接的に設けられてもよい。第2温度センサ30bとして、第1温度センサ30aと同一構成のもの、例えばシート状素材に温度検出素子を設けたものを用いることができる。

【0044】

第2筐体40bは本体部41と蓋部42とからなる。本体部41の内部に第2温度センサ30b、および第2プローブ部10bを納め、蓋部42を閉めることでリファレンスセンサRSが組み立てられる。蓋部42には孔43が形成されている。プローブ12は孔43を通過して、第2筐体40bの外部に露出する。したがって、リファレンスセンサRSが組み立てられた状態では、第2筐体40bの内部には伝熱板11、および第2温度センサ30bが収納され、プローブ12のみが第2筐体40bの外部に露出する。

【0045】

第2筐体40bはその内部に収納した各種部材を外部環境から断熱する機能と、防水、防湿機能とを有する。例えば、雨や風の影響により、第2プローブ部10bの温度が変化することを抑制する。また、雨が降った場合に、水分が第2筐体40bの内部に侵入することを抑制する。これにより、維管束液流速センサ1としての測定精度を向上できる。

【0046】

第2筐体40bは第2プローブ部10bよりも熱伝導率の低い材料、例えば樹脂で形成するのが好ましい。第2筐体40bを熱伝導率の低い材料で形成すれば断熱性を高くできる。また、第2筐体40bを樹脂で形成すれば、第2筐体40bを安価に製造できる。

【0047】

なお、伝熱板11に対する第2温度センサ30bの位置は特に限定されない。伝熱板11の下面側に第2温度センサ30bを配置してもよいし、伝熱板11の上面側に第2温度センサ30bを配置してもよい。

【0048】

(製造方法)

つぎに、維管束液流速センサ1の製造方法を説明する。

維管束液流速センサ1は大きく分けて、(I)プローブ部形成工程と、(II)ヒータセンサ組立工程と、(III)リファレンスセンサ組立工程とを経て製造される。以下、順に説明する。

【0049】

(I)プローブ部形成工程

プローブ部形成工程は金属材料を用いてプローブ部10を複数形成する工程である。この工程により、2つのプローブ部10、すなわち、ヒータセンサHS用の第1プローブ部10aと、リファレンスセンサRS用の第2プローブ部10bとを得る。

【0050】

プローブ部形成工程として4種類の方法、すなわち(1)レーザ加工による方法、(2)打抜きによる方法、(3)深絞り加工による方法、(4)線材を用いた方法がある。こ

10

20

30

40

50

のうち、(1)、(2)、(3)は、単一の金属板を機械加工して伝熱板11およびプローブ12を形成する方法である。以下、それぞれの方法を説明する。なおプローブ部10は(1)~(4)のいずれかの方法で形成すればよく、また、他の方法で形成してもよい。

【0051】

(1) レーザ加工による方法

まず、図3(A)に示すように、金属板50をレーザ加工により切断して伝熱板相当部分51と、プローブ相当部分52とを形成する(板加工工程)。より詳細には、矩形の金属板50の2つの角部を矩形に切断し(図3(A)における一点鎖線に沿って切断し)、その角部を除去する(図3(A)におけるハッチング部分を除去する)。金属板50として

10

【0052】

つぎに、図3(B)に示すように、V字形の凹部を有する金型61とV字形の先端部を有するパンチ62とで金属板50を挟み、伝熱板相当部分51とプローブ相当部分52との接続部を曲げ加工する(曲げ工程)。

【0053】

そうすると、図3(C)に示す形状のプローブ部10が形成される。このプローブ部10は、伝熱板相当部分51とプローブ相当部分52とを有する単一の金属板50からなり、伝熱板相当部分51とプローブ相当部分52との接続部が折り曲げられたものである。この方法によれば、プローブ12が伝熱板11の端に配置される。また、プローブ12は角柱形となる。プローブ12の厚みは金属板50と同一である。

20

【0054】

プローブ部10が単一の金属板50から形成されるので、プローブ部10を安価に製造できる。金属板50をレーザ加工し、曲げ加工してプローブ部10を形成するので、プローブ部10を安価に製造できる。また、伝熱板11とプローブ12とが一体形成されるので、プローブ部10が破損しにくい。

【0055】

なお、金属板50の切断位置は図3(A)に限定されない。図4(A)に示すように、矩形の金属板50の縁部を一端から中央まで切断(図4(A)における一点鎖線に沿って切断)してもよい。プローブ相当部分52を起立させれば、図4(B)に示す形状のプローブ部10が形成される。

30

【0056】

図5(A)に示すように、矩形の金属板50の一辺の中央から金属板50の中心まで二筋切断(図5(A)における一点鎖線に沿って切断)してもよい。プローブ相当部分52を起立させれば、図5(B)に示す形状のプローブ部10が形成される。この場合、プローブ12が伝熱板11の中央に配置される。

【0057】

(2) 打抜きによる方法

まず、図6(A)に示すように、金属板50をプレス加工により打抜いて伝熱板相当部分51と、プローブ相当部分52とを形成する(板加工工程)。より詳細には、伝熱板相当部分51の端にプローブ相当部分52が接続した形状となるように金属板50を打抜く。打抜きには上記の形状の打抜きができる金型が用いられる。

40

【0058】

つぎに、図6(B)に示すように、V字形の凹部を有する金型61とV字形の先端部を有するパンチ62とで金属板50を挟み、伝熱板相当部分51とプローブ相当部分52との接続部を曲げ加工する(曲げ工程)。

【0059】

そうすると、図6(C)に示す形状のプローブ部10が形成される。このプローブ部10は、伝熱板相当部分51とプローブ相当部分52とを有する単一の金属板50からなり

50

、伝熱板相当部分 5 1 とプローブ相当部分 5 2 との接続部が折り曲げられたものである。この方法によれば、プローブ 1 2 が伝熱板 1 1 の端に配置される。また、プローブ 1 2 は角柱形となる。

【 0 0 6 0 】

金属板 5 0 を打抜き、曲げ加工してプローブ部 1 0 を形成するので、大量生産に向いており、プローブ部 1 0 を安価に製造できる。また、伝熱板 1 1 とプローブ 1 2 とが一体形成されるので、プローブ部 1 0 が破損しにくい。

【 0 0 6 1 】

(3) 深絞り加工による方法

図 7 (A) に示すように、金属板 5 0 をダイス 6 3 としわ抑え板 6 4 とで挟み、針状のパンチ 6 5 を用いて深絞り加工を施すことで、プローブ 1 2 を突出させる。そうすると、図 7 (B) に示す形状のプローブ部 1 0 が形成される。このプローブ部 1 0 は単一の金属板 5 0 の一部を突出させて伝熱板 1 1 およびプローブ 1 2 を形成したものである。この方法によれば、プローブ 1 2 を伝熱板 1 1 の中央に配置できる。深絞り加工により金属板 5 0 の一部を突出させてプローブ部 1 0 を形成するので、プローブ部 1 0 を安価に製造できる。また、伝熱板 1 1 とプローブ 1 2 とが一体形成されるので、プローブ部 1 0 が破損しにくい。

【 0 0 6 2 】

(4) 線材を用いた方法

まず、図 8 (A) に示すように、金属板を切断して伝熱板相当部分 5 1 を形成する。また、金属線材を所定長さで切断してプローブ相当部分 5 2 を形成する。つぎに、伝熱板相当部分 5 1 にプローブ相当部分 5 2 を立設させた状態で接合する。ここで、伝熱板相当部分 5 1 に孔 5 1 h を形成し、プローブ相当部分 5 2 の端部を孔 5 1 h に挿入することが好ましい。金属線材としてはステンレス鋼線、アルミニウム線、鉄線、銅線、真鍮線、チタン線、タングステン線等、一般に線材として用いられるものであれば特に限定されずに用いられる。伝熱板相当部分 5 1 とプローブ相当部分 5 2 との接合方法は特に限定されないが、溶接、ろう接、嵌め合いによる方法、接着剤を用いた方法等が挙げられる。

【 0 0 6 3 】

そうすると、図 8 (B) に示す形状のプローブ部 1 0 が形成される。このプローブ部 1 0 は金属板からなる伝熱板相当部分 5 1 に金属線材からなるプローブ相当部分 5 2 を接合したものである。この方法によれば、プローブ 1 2 を伝熱板 1 1 の中央に配置できる。また、プローブ 1 2 を円柱形にできる。金属板と金属線材とからプローブ部 1 0 を形成するので、プローブ部 1 0 を安価に製造できる。しかも、金属線材の切断位置を変えるだけで、プローブ 1 2 の長さを自由に設定できる。

【 0 0 6 4 】

(II) ヒータセンサ組立工程

ヒータセンサ組立工程は各種構成部材からヒータセンサ H S を組み立てる工程である。図 2 に示すように、第 1 筐体 4 0 a の本体部 4 1 の内部にヒータ 2 0、第 1 温度センサ 3 0 a、および第 1 プローブ部 1 0 a を納め、蓋部 4 2 を閉めることでヒータセンサ H S が組み立てられる。プローブ 1 2 は蓋部 4 2 の孔 4 3 を通って、第 1 筐体 4 0 a の外部に露出する。伝熱板 1 1、ヒータ 2 0、および第 1 温度センサ 3 0 a を第 1 筐体 4 0 a の内部に収納することで、伝熱板 1 1 にヒータ 2 0 と第 1 温度センサ 3 0 a とが設けられる。

【 0 0 6 5 】

(III) リファレンスセンサ組立工程

リファレンスセンサ組立工程は各種構成部材からリファレンスセンサ R S を組み立てる工程である。第 2 筐体 4 0 b の本体部 4 1 の内部に第 2 温度センサ 3 0 b、および第 2 プローブ部 1 0 b を納め、蓋部 4 2 を閉めることでリファレンスセンサ R S が組み立てられる。プローブ 1 2 は蓋部 4 2 の孔 4 3 を通って、第 2 筐体 4 0 b の外部に露出する。伝熱板 1 1、および第 2 温度センサ 3 0 b を第 2 筐体 4 0 b の内部に収納することで、伝熱板 1 1 に第 2 温度センサ 3 0 b が設けられる。

10

20

30

40

50

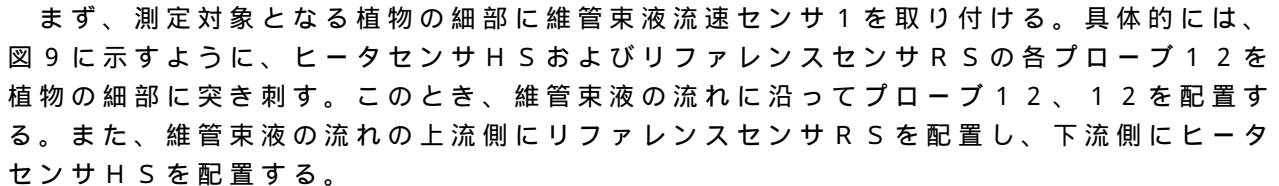
【 0 0 6 6 】

以上のように、維管束液流速センサ 1 は構成部材が単純であり、製造工程も簡単である。そのため、維管束液流速センサ 1 を安価に製造できる。また、維管束液流速センサ 1 は、植物の茎径にあわせてプローブ 1 2 の長さを任意に設定できる。そのため、種々の茎径の植物の維管束液の流速を測定できる。

【 0 0 6 7 】

(使用方法)

つぎに、維管束液流速センサ 1 の使用方法を説明する。

まず、測定対象となる植物の細部に維管束液流速センサ 1 を取り付ける。具体的には、 図 9 に示すように、ヒータセンサ H S およびリファレンスセンサ R S の各プローブ 1 2 を植物の細部に突き刺す。このとき、維管束液の流れに沿ってプローブ 1 2、1 2 を配置する。また、維管束液の流れの上流側にリファレンスセンサ R S を配置し、下流側にヒータセンサ H S を配置する。

10

【 0 0 6 8 】

道管液の流量を測定する場合、各プローブ 1 2 の先端部を道管 X Y に配置する。また、通常道管液が流れる方向は植物の根元側から末端側であるので、リファレンスセンサ R S を根元側に配置し、ヒータセンサ H S を末端側に配置する。

【 0 0 6 9 】

つぎに、ヒータセンサ H S に設けられたヒータ 2 0 を作動させる。ヒータ 2 0 を作動すれば、ヒータ 2 0 から供給された熱エネルギーは、ヒータセンサ H S のプローブ 1 2 に供給される。ヒータセンサ H S のプローブ 1 2 に供給された熱エネルギーは、プローブ 1 2 の表面から道管 X Y を流れる道管液に放出される。

20

【 0 0 7 0 】

つぎに、ヒータセンサ H S およびリファレンスセンサ R S で測定した温度から、上述したグラニエ法に基づいて道管液の流量（流速）を測定する。例えば、道管液の流量が多い（流速が速い）場合には、ヒータセンサ H S のプローブ 1 2 の近傍の道管液は、常に新しい道管液に置き換えられた状態となる。そのため、プローブ 1 2 に供給する熱エネルギーを一定とすれば、プローブ 1 2 の温度は低くなる。一方、道管液の流量が少ない（流速が遅い）場合には、ヒータセンサ H S のプローブ 1 2 の近傍の道管液は、滞留したような状態となる。そのため、プローブ 1 2 に供給する熱エネルギーを一定とすれば、プローブ 1 2 の温度は高くなる。

30

【 0 0 7 1 】

したがって、ヒータセンサ H S およびリファレンスセンサ R S で測定した温度の温度差 T から道管液の流速および流量を算出できる。なお、ヒータセンサ H S およびリファレンスセンサ R S の各プローブ 1 2 の先端部を師管 P H に配置すれば、師管液の流速および流量を求めることができる。

【 0 0 7 2 】

なお、本実施形態の維管束液流速センサ 1 は、ヒートパルス法によっても維管束液の流速を測定できる。

【 0 0 7 3 】

維管束液流速センサ 1 は、プローブ 1 2 を支持する伝熱板 1 1 にヒータ 2 0 および温度センサ 3 0 a、3 0 b が設けられた構成である。ヒータおよび温度センサをプローブに直接設ける従来の構成に比べて、プローブ 1 2 とヒータ 2 0 との間およびプローブ 1 2 と温度センサ 3 0 a、3 0 b との間で熱が伝わりやすい。そのため、プローブ 1 2 を小型化でき、植物の細部における維管束液の流速を測定できる。

40

【 0 0 7 4 】

また、プローブ 1 2 を小型化できることから、プローブ 1 2 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 1 2 の設置前後における植物の設置部位内の維管束液の動態の変動を小さくできる。このため、プローブ 1 2 を植物に突き刺したのち、すぐに設置部位内を流れる維管束液の動態を測定す

50

ることができる。

【0075】

さらに、プローブ12を小型化できることから、維管束液流速センサ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、長期間設置させておくことができる。その結果、植物の維管束液の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。

【0076】

維管束液流速センサ1を用いて植物の維管束液の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。

【0077】

本実施形態の維管束液流速センサ1は機械加工によりプローブ部10を形成するので、プローブ12を比較的長く(例えば、1mm~5mm)形成できる。そのため、外皮から道管XYまでの距離が長い植物であっても、維管束液の流速を測定できる。

【0078】

〔第2実施形態〕

つぎに、第2実施形態に係る維管束液流速センサ2を説明する。

図10に示すように、維管束液流速センサ2はヒータセンサHSとリファレンスセンサRSとからなる。

【0079】

ヒータセンサHSは第1プローブ部10a、ヒータ・温度センサユニット31、および第1筐体40aから構成されている。ヒータ・温度センサユニット31は半導体基板にヒータ20および第1温度センサ30aが形成されたものである。ヒータ・温度センサユニット31は伝熱板11と同一、またはそれより広い面積を有することが好ましい。

【0080】

ヒータ20として半導体基板に形成したpn接合ダイオードを用いることができる。半導体基板上に拡散用ホール(p型)を形成した後、n拡散(n型)を形成することで、pn接合ダイオードを形成できる。半導体基板上にPt(白金)、NiCr(ニクロム)、またはITO(インジウムスズ酸化材料)の薄膜を蒸着やスパッタリング等により形成し、所定の形状に加工することで、ヒータ20を形成してもよい。第1温度センサ30aとして半導体基板に形成したpn接合ダイオードを用いることができる。薄膜技術により半導体基板上に熱電対または测温抵抗体となる金属膜を形成してもよい。

【0081】

リファレンスセンサRSは第2プローブ部10b、温度センサユニット32、および第2筐体40bから構成されている。温度センサユニット32は半導体基板に第2温度センサ30bが形成されたものである。温度センサユニット32は伝熱板11と同一、またはそれより広い面積を有することが好ましい。第2温度センサ30bとして半導体基板に形成したpn接合ダイオードを用いることができる。薄膜技術により半導体基板上に熱電対または测温抵抗体となる金属膜を形成してもよい。

【0082】

半導体基板にヒータ20および温度センサ30a、30bを形成することで、ヒータセンサHSおよびリファレンスセンサRSを小型化できる。また、ヒータ・温度センサユニット31および温度センサユニット32を量産することで、製造コストを抑えることができる。

【0083】

〔第3実施形態〕

つぎに、第3実施形態に係る維管束液流速センサ3を説明する。

図 1 1 に示すように、維管束液流速センサ 3 はヒータセンサ H S とリファレンスセンサ R S とが一体となったものである。維管束液流速センサ 3 はヒータセンサ H S を構成する第 1 筐体と、リファレンスセンサ R S を構成する第 2 筐体とが一体化した筐体 4 0 を備える。また、第 1 プローブ部 1 0 a のプローブ 1 2 と、第 2 プローブ部 1 0 b のプローブ 1 2 とが筐体 4 0 の一の面に並んで配置されている。

【 0 0 8 4 】

2 つのプローブ 1 2、1 2 が一の筐体 4 0 に配置されているので、ヒータセンサ H S とリファレンスセンサ R S とが一体化した状態となっている。そのため、維管束液流速センサ 3 の植物への取り付けが行いやすい。

【 0 0 8 5 】

なお、プローブ部 1 0 として伝熱板 1 1 の端にプローブ 1 2 が立設したものを用いれば、2 つのプローブ 1 2 を近接させて配置できる。

【 0 0 8 6 】

〔第 4 実施形態〕

つぎに、第 4 実施形態に係る維管束液流速センサ 4 を説明する。

図 1 2 に示すように、維管束液流速センサ 4 は 1 つのヒータセンサ H S と 2 つのリファレンスセンサ R S とからなる。すなわち、維管束液流速センサ 4 は 3 つのプローブ部 1 0 を備えており、そのうちの 1 つがヒータセンサ H S として、2 つがリファレンスセンサ R S として用いられている。

【 0 0 8 7 】

維管束液流速センサ 4 はヒータセンサ H S を構成する第 1 筐体と、2 つのリファレンスセンサ R S を構成する 2 つの第 2 筐体とが一体化した筐体 4 0 を備える。また、第 1 プローブ部 1 0 a のプローブ 1 2 と、2 つの第 2 プローブ部 1 0 b、1 0 b のプローブ 1 2、1 2 とが筐体 4 0 の一の面に並んで配置されている。2 つの第 2 プローブ部 1 0 b、1 0 b のプローブ 1 2、1 2 は第 1 プローブ部 1 0 a のプローブ 1 2 を挟む位置に設けられている。

【 0 0 8 8 】

維管束液流速センサ 4 は維管束液の流量だけでなく、維管束液の流れる方向も測定できる。しかも、維管束液流速センサ 4 はヒータセンサ H S とリファレンスセンサ R S とが一体化形成された構成であるため、植物への取り付けが行いやすい。

【 0 0 8 9 】

維管束液流速センサ 4 は 3 つのプローブ 1 2 が維管束液の流れに沿うように植物に取り付けられる。ヒータセンサ H S に設けられたヒータ 2 0 を作動させた後、ヒータセンサ H S および 2 つのリファレンスセンサ R S で温度を測定する。2 つのリファレンスセンサ R S で測定された温度を比較することで維管束液の方向を特定できる。

【 0 0 9 0 】

2 つのリファレンスセンサ R S はヒータセンサ H S を挟む位置に設けられているので、維管束液の下流側に位置するリファレンスセンサ R S のプローブ 1 2 は、ヒータセンサ H S により昇温された維管束液により暖められる。その結果、維管束液の下流側に位置するリファレンスセンサ R S のプローブ 1 2 は、上流側に位置するリファレンスセンサ R S のプローブ 1 2 よりも温度が高くなる。

【 0 0 9 1 】

これを利用して、2 つのリファレンスセンサ R S で測定された温度を比較し、維管束液の流れる方向を特定する。維管束液の流れる方向は温度の低いリファレンスセンサ R S から温度の高いリファレンスセンサ R S に向かう方向である。

【実施例】

【 0 0 9 2 】

図 1 に示す維管束液流速センサ 1 を用いて、擬似植物実験および実植物実験を行った。

【 0 0 9 3 】

(擬似植物実験)

10

20

30

40

50

図 1 3 に示す疑似植物実験系を用いて実験を行った。シリコンチューブ（内径 2 mm、外径 3 mm）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、ヒータセンサ H S およびリファレンスセンサ R S の各プローブ 1 2 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できる。ヒータセンサ H S のヒータ 2 0 の電源としてファンクションジェネレータを用いた。ヒータセンサ H S およびリファレンスセンサ R S の温度センサ 3 0 a、3 0 b からデータを取得するためデータロガーを用いた。

【 0 0 9 4 】

図 1 4 はシリコンチューブ内の流速 u と K 値との関係を示すグラフである。シリコンチューブ内の流速 u はマイクロシリンジポンプの流量から求められる。 K 値は第 1 温度センサ 3 0 a と第 2 温度センサ 3 0 b との温度差から求められる（数式（1）参照）。測定値を数式（1）を用いてフィッティングし係数を求めた。その結果、以下の値が得られた。これより、維管束液流速センサ 1 を用いて、維管束液の流量を測定できることが確認できた。

$$1 / \quad = 6 . 2 0 \times 1 0^{-4}$$

$$1 / \quad = 0 . 9 2$$

【 0 0 9 5 】

（実植物実験）

測定対象の植物としてユーパトリウムを用いた。ユーパトリウムの茎にヒータセンサ H S およびリファレンスセンサ R S の各プローブ 1 2 を突き刺した。この際、各プローブ 1 2 の先端部が道管に配置されるようにした。ヒータセンサ H S のヒータ 2 0 の電源としてファンクションジェネレータを用いた。ヒータセンサ H S およびリファレンスセンサ R S の温度センサ 3 0 a、3 0 b からデータを取得するためデータロガーを用いた。

【 0 0 9 6 】

維管束液流速センサ 1 により道管液の流速を測定しながら、夜の再現と、昼の再現を行った。夜の再現はユーパトリウムの周囲をダンボールで覆い遮光することにより行った。昼の再現はダンボールを取り外し、ユーパトリウムに蛍光灯の光を照射することにより行った。まず夜の再現を 1 時間行い、つぎに昼の再現を 1 時間おこない、つぎに夜の再現を 1 5 分行った。

【 0 0 9 7 】

図 1 5 は経過時間と道管液の流速との関係を示すグラフである。図 1 5 から分かるように、遮光している間は道管液の流速が遅くなり、蛍光灯の光を照射している間は道管液の流速が速くなる。一般に、植物に光を照射すると、植物が光合成を行い、水を吸い上げるため、道管液の流速が速くなる。本実験によりこのような植物の性質を再現できることが確認できた。また、維管束液流速センサ 1 により道管液の流速をリアルタイムで測定できることが確認できた。

【 符号の説明 】

【 0 0 9 8 】

1、2、3、4 維管束液流速センサ

H S ヒータセンサ

1 0 a 第 1 プローブ部

1 1 伝熱板

1 2 プローブ

2 0 ヒータ

3 0 a 第 1 温度センサ

4 0 a 第 1 筐体

R S リファレンスセンサ

1 0 b 第 2 プローブ部

3 0 b 第 2 温度センサ

4 0 b 第 2 筐体

10

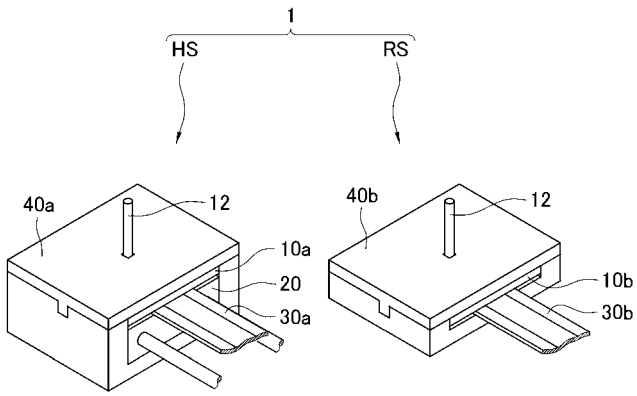
20

30

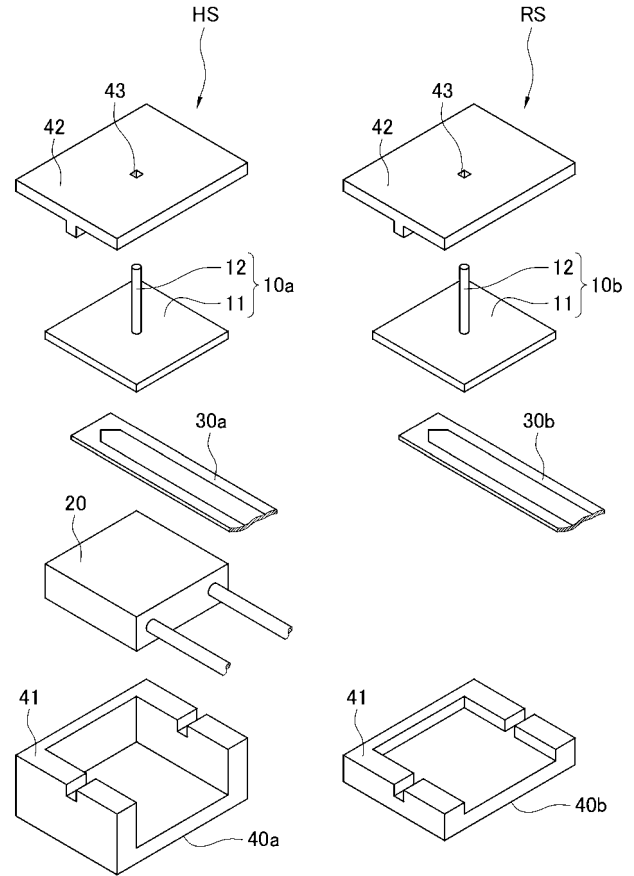
40

50

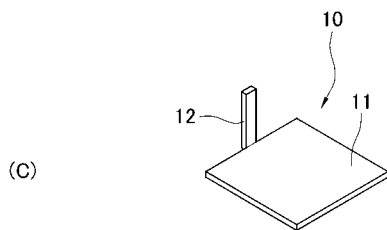
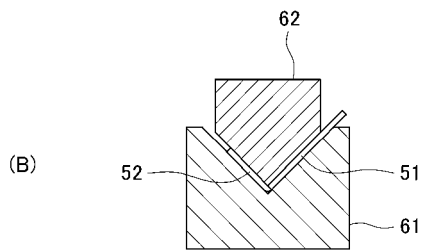
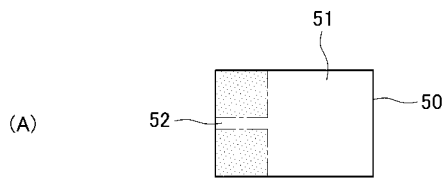
【 図 1 】



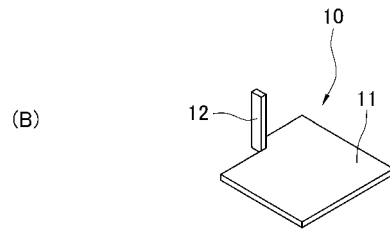
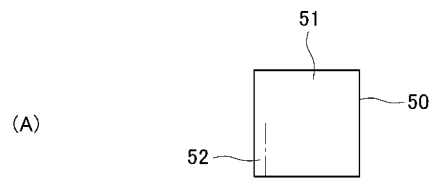
【 図 2 】



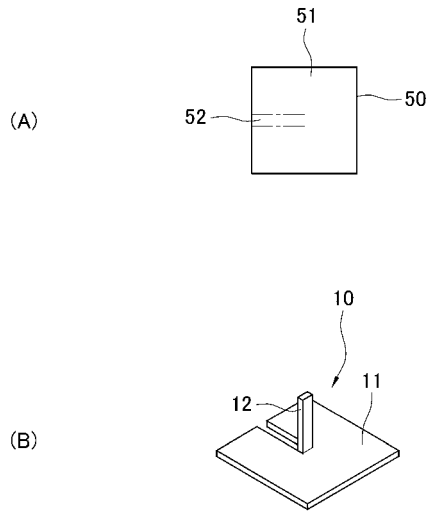
【 図 3 】



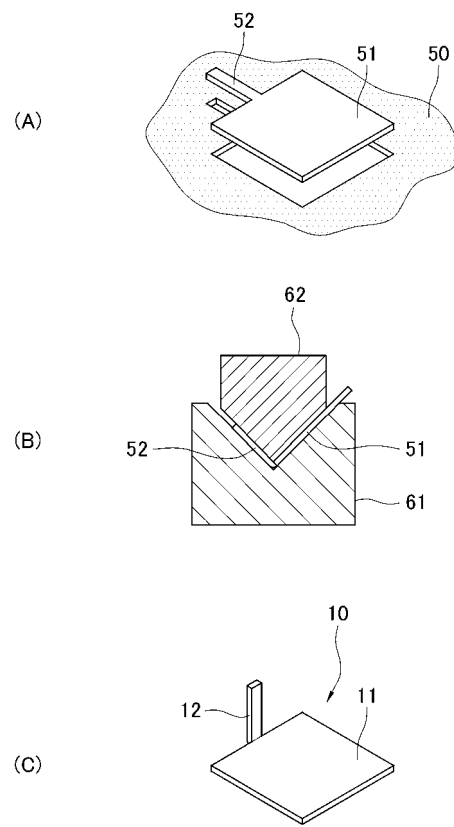
【 図 4 】



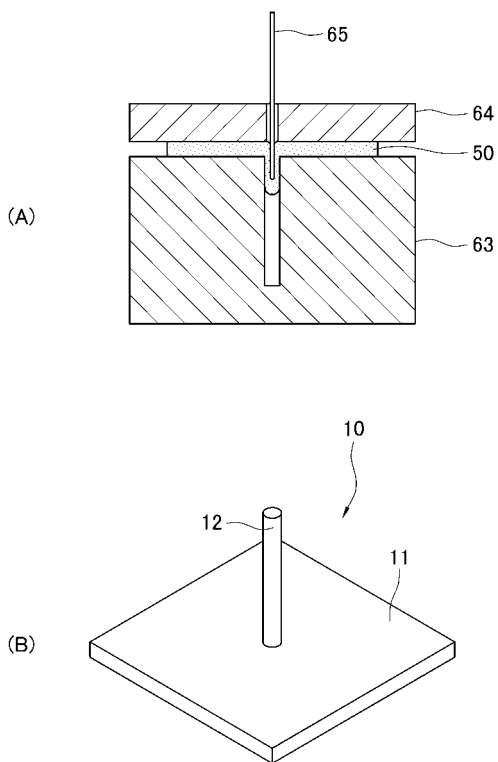
【 図 5 】



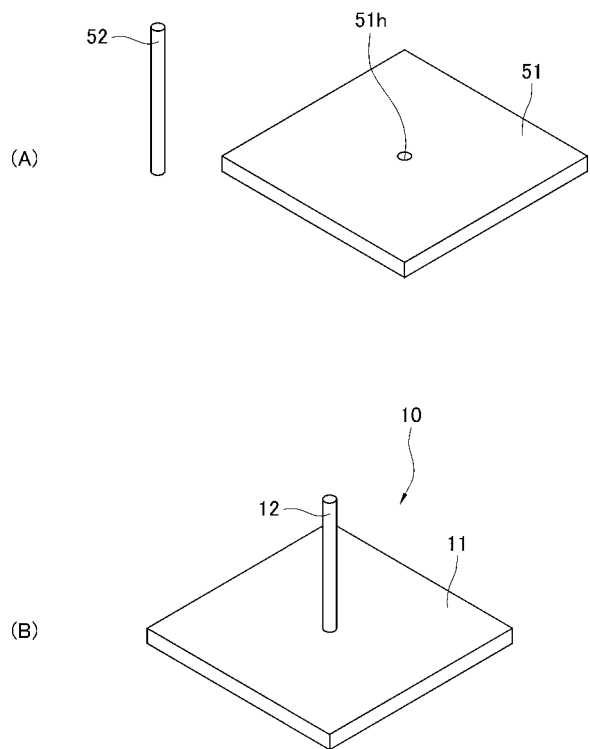
【 図 6 】



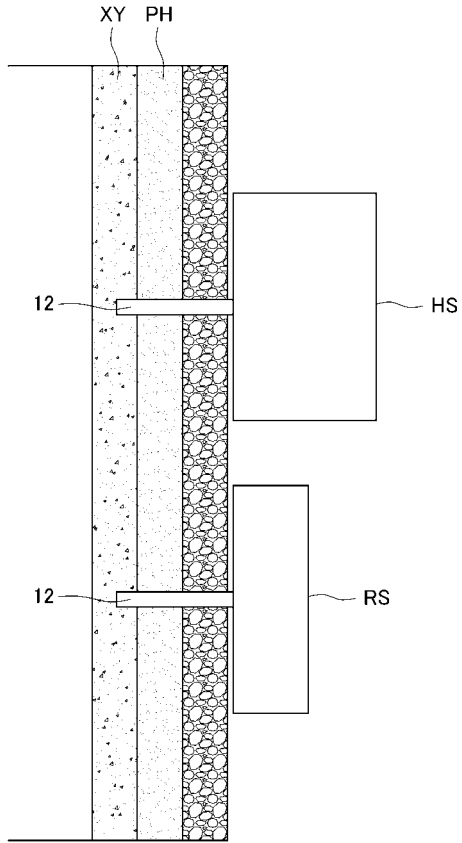
【 図 7 】



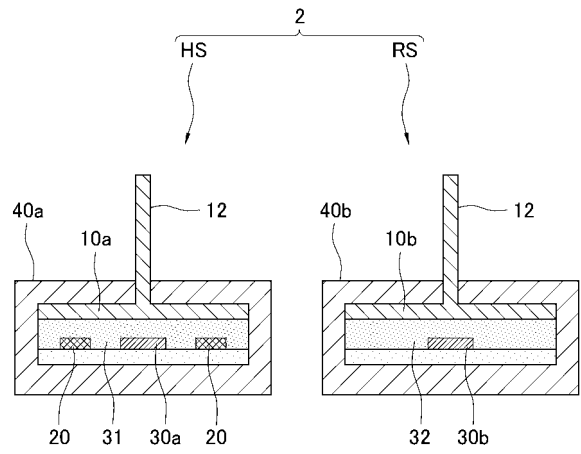
【 図 8 】



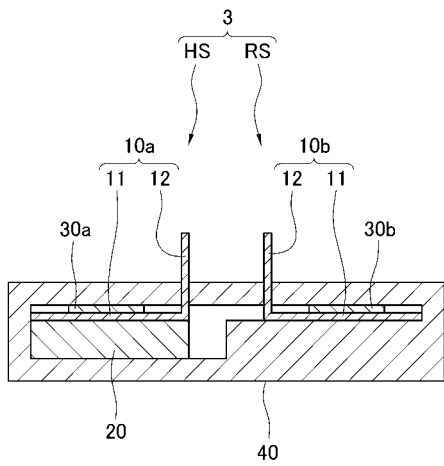
【 図 9 】



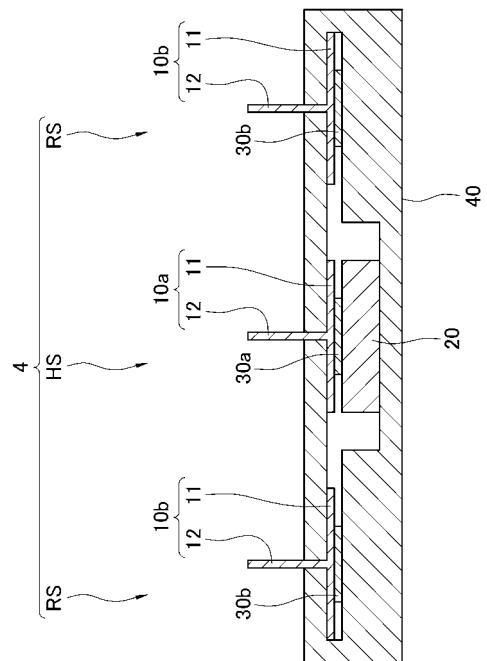
【 図 1 0 】



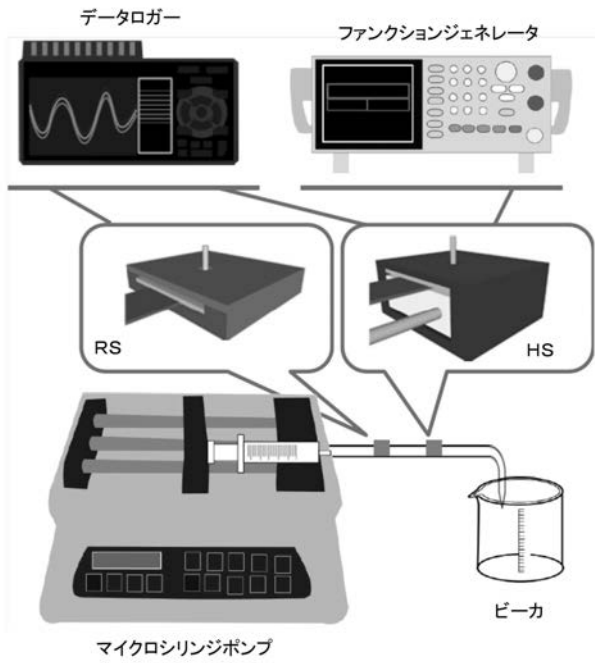
【 図 1 1 】



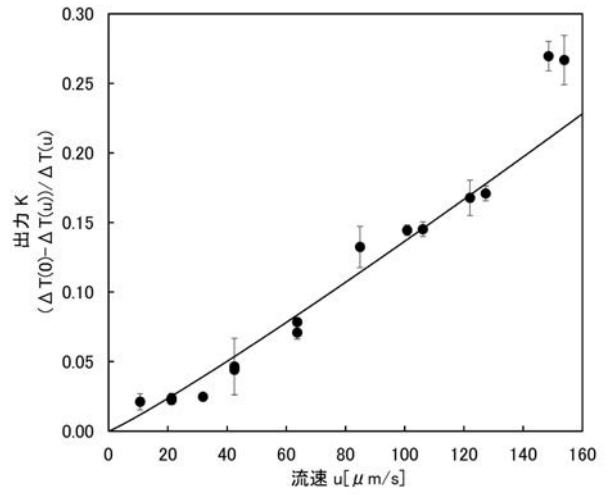
【 図 1 2 】



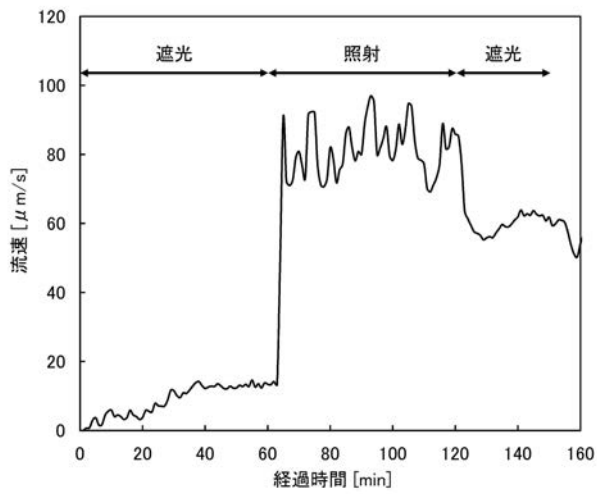
【 図 1 3 】



【 図 1 4 】



【 図 1 5 】



フロントページの続き

- (72)発明者 寺尾 京平
香川県高松市林町2 2 1 7番地2 0 国立大学法人香川大学工学部内
- (72)発明者 吉村 英徳
香川県高松市林町2 2 1 7番地2 0 国立大学法人香川大学工学部内
- (72)発明者 石塚 裕己
香川県高松市林町2 2 1 7番地2 0 国立大学法人香川大学工学部内
- (72)発明者 小林 剛
香川県木田郡三木町池戸2 3 9 3 国立大学法人香川大学農学部内
- (72)発明者 片岡 郁雄
香川県木田郡三木町池戸2 3 9 3 国立大学法人香川大学農学部内