(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
2022年2月24日(24.02.2022)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2022/039007 A1

(51) 国際特許分類:
A01G 7/00 (2006.01) *G01N 27/02* (2006.01)

(21) 国際出願番号： PCT/JP2021/028568

(22) 国際出願日： 2021年8月2日(02.08.2021)

(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 2020-138022 2020年8月18日(18.08.2020) 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).

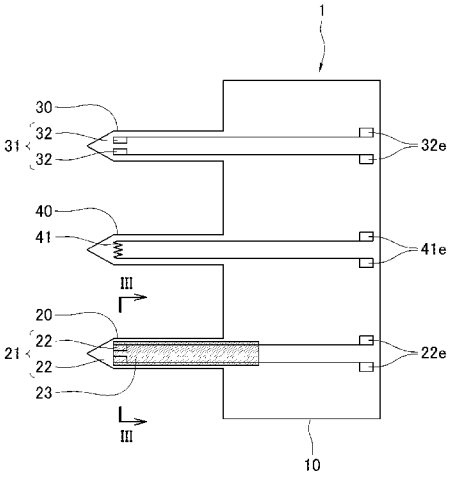
(72) 発明者: 下川 房男 (**SHIMOKAWA Fusao**); 〒7610396 香川県高松市林町２２１７番地２０ 国立大学法人香川大学創造工学部内 Kagawa (JP). 飯尾 郁也(**INO Fumiya**); 〒7610396 香川県高松市林町２２１７番地２０ 国立大学法人香川大学創造工学部内 Kagawa (JP).

(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, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, 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, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(54) **Title:** PLANT WATER CONTENT SENSOR AND PLANT WATER CONTENT MEASUREMENT METHOD

(54) 発明の名称： 植物水分含有量センサおよび植物水分含有量測定方法



(57) **Abstract:** Provided are a plant water content sensor and a plant water content measurement method whereby the water content of a plant can be measured in a non-destructive manner. The plant water content sensor (1) comprises: a water content probe (20) that has provided therein a read electrode pair (21) comprising a pair of electrodes (22, 22) that are arranged having a prescribed interval therebetween, said water content probe also comprising a water-sensitive film (23) bridging the pair of electrodes (22, 22); and a support (10) that supports the water content probe (20). The water content probe (20) is inserted into the plant and the water content of the plant can be measured by reading the impedance or capacitance from the read electrode pair (21).

(57) 要約：非破壊で植物の水分含有量を測定できる植物水分含有量センサおよび植物水分含有量測定方法を提供する。植物水分含有量センサ（１）は、所定の間隔を空けて配置された一対の電極（２２）、（２２）からなる読出電極対（２１）と、一対の電極（２２）、（２２）に架け渡された感水膜（２３）とが設けられた水分含有量プローブ（２０）と、水分含有量プローブ（２０）を支持する支持部（１０）とを備える。水分含有量プローブ（２０）を植物に突き刺し、読出電極対（２１）からインピーダンスまたは静電容量を読み出すことで、植物の水分含有量を測定できる。

WO 2022/039007 A1

［続葉有］

(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:

一 国際調査報告(条約第21条(3))

明　細　書

発明の名称 ：

植物水分含有量センサおよび植物水分含有量測定方法

技術分野

[0001] 本発明は、植物水分含有量センサおよび植物水分含有量測定方法に関する。さらに詳しくは、本発明は、植物の水分含有量の測定に用いられるセンサおよび方法に関する。

背景技術

[0002] 作物、果樹の生産においては、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と養分補給を行なうことが望まれる。しかし、多くの農業現場では、無降雨日数などに基づき、経験と勘によって灌水と養分補給を行なっているのが現状である。このような経験に依存した方法は、熟練が必要であり手間と時間がかかる。また、基準となる指標が個人的な経験であるため、誰もが簡便に実施することは難しい。

[0003] 近年、スマートアグリなど、情報技術を農業に導入する動きが活発になっている。情報技術により、人に依存することなく、植物の生理的情報に基づいて、最適な生産が行なわれることが期待されている。

[0004] 灌水管理に必要となる植物の生理的情報として維管束液流量と水分含有量が挙げられる。特に、作物、果樹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、果柄など、植物の細部における維管束液流量と水分含有量を測定することが重要である。このうち、植物の細部における維管束液流量については、それを測定するセンサが、本願発明者により既に提案されている（特許文献１）。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献1：特開２０１５－１４５８１０号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] 一方、草本植物の水分含有量を測定する方法は、現在のところ、植物を磨り潰して加熱乾燥前後の重量変化から水分含有量を測定する破壊法しか知られていない。したがって、植物を育成しながら、その植物の水分含有量を測定することはできない。

[0007] 本発明は上記事情に鑑み、非破壊で植物の水分含有量を測定できる植物水分含有量センサおよび植物水分含有量測定方法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

[0008] 第１態様の植物水分含有量センサは、所定の間隔を空けて配置された一対の電極からなる読出電極対と、前記一対の電極に架け渡された感水膜とが設けられた水分含有量プローブと、前記水分含有量プローブを支持する支持部と、を備えることを特徴とする。

第２態様の植物水分含有量センサは、第１態様において、所定の間隔を空けて配置された一対の電極からなる電気伝導率電極対が設けられた電気伝導率プローブを備え、前記電気伝導率プローブは前記水分含有量プローブと平行に並んだ状態で前記支持部に支持されていることを特徴とする。

第３態様の植物水分含有量センサは、第１または第２態様において、温度センサが設けられた温度プローブを備え、前記温度プローブは前記水分含有量プローブと平行に並んだ状態で前記支持部に支持されていることを特徴とする。

第４態様の植物水分含有量センサは、第１～第３態様のいずれかにおいて、前記感水膜はポリイミドで形成されていることを特徴とする。

第５態様の植物水分含有量センサは、第１～第４態様において、前記感水膜の表面は親水化処理されていることを特徴とする。

第６態様の植物水分含有量センサは、第１～第５態様のいずれかにおいて、前記感水膜は前記読出電極対の配置部から前記水分含有量プローブの基端部にわたって設けられていることを特徴とする。

第７態様の植物水分含有量センサは、第１～第６態様のいずれかにおいて、前記水分含有量プローブの先端角度は４０～６０°であることを特徴とする。

第８態様の植物水分含有量センサは、第２態様において、前記電気伝導率プローブは複数の前記電気伝導率電極対を有し、複数の前記電気伝導率電極対は前記電気伝導率プローブの軸方向に並んで配置されていることを特徴とする。

第９態様の植物水分含有量センサは、第３態様において、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を備え、前記ヒータ付温度プローブは前記温度プローブと平行に並んだ状態で前記支持部に支持されていることを特徴とする。

第１０態様の植物水分含有量測定方法は、所定の間隔を空けて配置された一対の電極からなる読出電極対と、前記一対の電極に架け渡された感水膜とが設けられた水分含有量プローブを植物に突き刺し、前記読出電極対を構成する前記一対の電極間のインピーダンスを測定し、式（１）に基づいて、インピーダンス測定値から前記植物の水分含有量を求めることを特徴とする。

$$Z = Z_0 \times 10^{-B \cdot WC} \quad (1)$$

ここで、Ｚはインピーダンス測定値、Z_0は前記感水膜が水分を吸収していない場合のインピーダンス、Ｂはセンサ感度係数、ＷＣは水分含有量である。

第１１態様の植物水分含有量測定方法は、第１０態様において、所定の間隔を空けて配置された一対の電極からなる電気伝導率電極対が設けられた電気伝導率プローブを前記植物に突き刺し、前記電気伝導率電極対を構成する前記一対の電極間の電気抵抗から電気伝導率を求め、電気伝導率測定値から式（１）中のセンサ感度係数Ｂを求めることを特徴とする。

第１２態様の植物水分含有量測定方法は、第１１態様において、式（２）に基づいて、前記電気伝導率測定値から前記センサ感度係数Ｂを求めること

を特徴とする。

$$B = a\sigma + b \quad (2)$$

ここで、Ｂはセンサ感度係数、σは電気伝導率、ａ、ｂは予め定められた係数である。

第１３態様の植物水分含有量測定方法は、所定の間隔を空けて配置された一対の電極からなる読出電極対と、前記一対の電極に架け渡された感水膜とが設けられた水分含有量プローブを植物に突き刺し、前記読出電極対を構成する前記一対の電極間の静電容量を測定し、静電容量測定値から前記植物の水分含有量を求めることを特徴とする。

第１４態様の植物水分含有量測定方法は、第１３態様において、所定の間隔を空けて配置された一対の電極からなる電気伝導率電極対が設けられた電気伝導率プローブを前記植物に突き刺し、前記電気伝導率電極対を構成する前記一対の電極間の電気抵抗から電気伝導率を求め、前記静電容量測定値および電気伝導率測定値から前記植物の水分含有量を求めることを特徴とする。

第１５態様の植物水分含有量測定方法は、第１１、第１２または第１４態様において、温度センサが設けられた温度プローブを植物に突き刺し、前記温度センサで温度を測定し、温度測定値を用いて前記電気伝導率測定値を補償することを特徴とする。

発明の効果

[0009] 第１態様によれば、水分含有量プローブを植物に突き刺し、読出電極対からインピーダンスまたは静電容量を読み出すことで、植物の水分含有量を測定できる。

第２態様によれば、電気伝導率プローブにより測定した植物内の水分の電気伝導率に基づき水分含有量測定値を補償することで、植物の水分含有量を精度良く測定できる。

第３態様によれば、温度プローブにより測定した植物内の水分の温度に基づき水分含有量測定値電または電気伝導率測定値を補償することで、植物の

水分含有量を精度良く測定できる。

第４態様は、感水膜がポリイミドで形成されているので、感水膜が植物内の水分に溶解しにくく、長期間の測定が可能である。

第５態様によれば、感水膜の表面が親水化されているので、水分含有量測定の応答速度が速くなる。

第６態様によれば、感水膜の一部が植物の外側に配置されるので、感水膜からの脱水がスムーズに行なわれ、水分含有量が減少する際の応答速度が速くなる。

第７態様によれば、水分含有量プローブの先端部が鋭利であるので、植物に突き刺した際に、植物内の水分が流出することを抑制できる。そのため、植物の水分含有量を精度良く測定できる。

第８態様によれば、電気伝導率電極対が電気伝導率プローブの軸方向に並んで配置されているので、植物内部の電気伝導率分布が分かり、道管の位置を正確に判別できる。

第９態様によれば、植物の水分含有量に加え、維管束液流量を測定できるので、植物の水分動態を多角的に把握できる。

第１０態様によれば、水分含有量プローブの読出電極対から読み出したインピーダンスから植物の水分含有量を求めることができる。

第１１、第１２態様のいずれにおいても、電気伝導率プローブで測定した植物内の水分の電気伝導率に基づき水分含有量測定値を補償することで、植物の水分含有量を精度良く測定できる。

第１３態様によれば、水分含有量プローブの読出電極対から読み出した静電容量から植物の水分含有量を求めることができる。

第１４態様によれば、電気伝導率プローブで測定した植物内の水分の電気伝導率に基づき水分含有量測定値を補償することで、植物の水分含有量を精度良く測定できる。

第１５態様によれば、温度プローブで測定した植物内の水分の温度に基づき電気伝導率測定値を補償することで、植物の水分含有量を精度良く測定で

きる。

図面の簡単な説明

[0010] [図1]第１実施形態に係る植物水分含有量センサの平面図である。

[図2]第１実施形態に係る植物水分含有量センサの側面図である。

[図3]図１におけるIII-III線矢視断面図である。

[図4]第１実施形態に係る植物水分含有量センサの使用状態説明図である。

[図5]第２実施形態に係る植物水分含有量センサの平面図である。

[図6]第３実施形態に係る植物水分含有量センサの平面図である。

[図7]プローブの先端角度θ、幅W、厚さＴの説明図である。

[図8]応答特性の試験結果を示すグラフである。

[図9]水分含有量とインピーダンスとの関係を示すグラフである。

[図10]生育環境下のトマトの水分含有量（インピーダンス）の時間変化を示すグラフである。

[図11]水分含有量とインピーダンスとの関係を示すグラフである。

[図12]電気伝導率とセンサ感度係数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

[0011] 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実施形態に係る植物水分含有量センサ１は、植物の新梢末端、果柄など、植物の細部に取り付けることができる。植物水分含有量センサ１は植物の細部における水分含有量を測定する機能を有する。

[0012] （植物水分含有量センサ）

まず、植物水分含有量センサ１の構成を説明する。

図１に示すように、植物水分含有量センサ１は支持部１０を備えている。支持部１０には、水分含有量プローブ２０、電気伝導率プローブ３０および温度プローブ４０が設けられている。これらのプローブ２０、３０、４０を植物に突き刺すことで、植物に植物水分含有量センサ１が取り付けられる。

[0013] 水分含有量プローブ２０は植物の水分含有量測定に用いられる。電気伝導

率プローブ３０は植物内の水分の電気伝導率測定に用いられる。測定された電気伝導率は水分含有量測定値の補償に用いられる。したがって、電気伝導率による補償の必要がない場合などには、植物水分含有量センサ１に電気伝導率プローブ３０を設けなくてもよい。温度プローブ４０は植物内の水分の温度測定に用いられる。測定された温度は水分含有量測定値および電気伝導率測定値のいずれか一方または両方の補償に用いられる。したがって、温度による補償の必要がない場合などには、植物水分含有量センサ１に温度プローブ４０を設けなくてもよい。

[0014] プローブ２０、３０、４０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１０に支持されている。プローブ２０、３０、４０の並び順は特に限定されない。ただし、水分含有量測定値および電気伝導率測定値の両方を温度補償する場合には、温度プローブ４０を水分含有量プローブ２０および電気伝導率プローブ３０の両方の近くに配置することが好ましい。すなわち、温度プローブ４０を水分含有量プローブ２０と電気伝導率プローブ３０との間に配置することが好ましい。

[0015] 支持部１０およびプローブ２０、３０、４０は半導体基板を加工することで形成されている。半導体基板として、シリコン基板、ＳＯＩ（Silicon on Insulator）基板などが挙げられる。半導体基板の加工には、フォトリソグラフィ、エッチングのほか、スパッタ法、蒸着法などの薄膜形成を用いたＭＥＭＳ技術が用いられる。

[0016] ・支持部

支持部１０はプローブ２０、３０、４０を支持する部材である。支持部１０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２０、３０、４０が支持されている。支持部１０はその長手方向の長さが全てのプローブ２０、３０、４０を所定の間隔で配置できる長さを有していればよい。支持部１０の短手方向の長さは特に限定されない。

[0017] ・プローブ

各プローブ２０、３０、４０は、棒状の部材であり、支持部１０の縁（長

辺部）に片持ち梁状に設けられている。各プローブ２０、３０、４０の先端部は三角形など、尖った形に形成されているのが好ましい。プローブ２０、３０、４０の先端部が尖った形であれば、プローブ２０、３０、４０を植物の細部に突き刺すときの刺入抵抗を小さくできる。

[0018] 具体的には、各プローブ２０、３０、４０の先端角度は４０～６０°が好ましい。プローブ２０、３０、４０を植物に突き刺すと、突き刺した部分とその周囲の細胞が破壊され、植物内の水分が流出することがある。水分が流出した分、水分含有量の測定値が実態よりも小さくなる。プローブ２０、３０、４０の先端部を鋭利にするほど、植物内の水分の流出を抑制できる。プローブ２０、３０、４０の先端角度が６０°以下であれば、先端部が十分に鋭利であるので、植物に突き刺した際に、植物内の水分が流出することを抑制できる。そのため、植物の水分含有量を精度良く測定できる。一方、プローブ２０、３０、４０の先端角度を小さくしすぎると、プローブ２０、３０、４０の幅が細くなり後述の素子を搭載する面積を確保できなくなるか、軸方向の長さが長くなりすぎる。プローブ２０、３０、４０の先端角度を４０°以上とすれば、プローブ２０、３０、４０の幅および長さを適度な寸法にできる。

[0019] 各プローブ２０、３０、４０は、植物の新梢末端、果柄など、茎径または軸径が数ｍｍ程度の植物の細部に突き刺して配置できる寸法に形成されている。各プローブ２０、３０、４０の長さ（軸方向に基端から先端までの長さ）は、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道管または師管に配置され得る寸法に形成されている。例えば、各プローブ２０、３０、４０の長さは５０～１，５００μｍである。

[0020] 各プローブ２０、３０、４０の幅は、特に限定されないが、例えば５０～５００μｍである。プローブ２０、３０、４０の幅が狭いほど、植物に与える損傷を小さくできる。

[0021] 図２に示すように、各プローブ２０、３０、４０は、半導体基板ＳＳの下部を除去することにより、支持部１０の厚さよりも薄く形成されている。各

プローブ２０、３０、４０の厚さは植物の師管および道管の幅よりも薄く設定されている。各プローブ２０、３０、４０の厚さは測定対象となる植物の種類および茎の太さによるが、例えば５０～３００μｍである。厚さが５０μｍ以上であれば強度が十分であり、プローブ２０、３０、４０を植物の茎など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道管および師管の太さは１００～４００μｍ程度であるため、厚さが３００μｍ以下であればプローブ２０、３０、４０を道管または師管に刺してもそれらを塞ぐことを抑制できる。

[0022] 各プローブ２０、３０、４０の厚さは５０～１００μｍとすることがより好ましい。プローブ２０、３０、４０が薄いほど植物に与える損傷を小さくできる。各プローブ２０、３０、４０の厚さを１００μｍ以下にすれば、植物内の水分が流出することを抑制でき、植物の水分含有量を精度良く測定できる。

[0023] このような形状を有するプローブ２０、３０、４０は、例えば、以下の手順で形成される。半導体基板ＳＳにプローブ形状のフォトリソグラフィを行ない、ＩＣＰ－ＲＩＥなどのドライエッチングにより不要部分を除去してプローブ形状の原形を形成する。つぎに、プローブ２０、３０、４０が片持ち梁状になるように、半導体基板ＳＳを裏面からエッチングする。この工程では、ＩＣＰ－ＲＩＥなどのドライエッチングが用いられる。半導体基板ＳＳを裏面からエッチングしていき、プローブ２０、３０、４０が分離された段階でエッチングを終了する。これにより、片持ち梁状のプローブ２０、３０、４０を形成できる。

[0024] ・水分含有量プローブ

図１に示すように、水分含有量プローブ２０の先端部には読出電極対２１が設けられている。読出電極対２１は所定の間隔を空けて配置された一対の電極２２、２２からなる。支持部１０の上面には２つの電極２２に配線を介して接続された２つの電極パッド２２ｅ、２２ｅが配設されている。また、水分含有量プローブ２０には感水膜２３が設けられている。

[0025] 水分含有量プローブ２０を植物に突き刺すと、植物内の水分が感水膜２３に吸収される。感水膜２３に吸収された水分の量を電極２２、２２間のインピーダンスまたは静電容量として読み出す。これにより、植物の水分含有量を測定できる。

[0026] 図３に示すように、水分含有量プローブ２０を構成する半導体基板ＳＳの表面に一対の電極２２、２２が形成されている。電極２２は水分含有量プローブ２０の先端部に配設できる大きさのものであれば、特に限定されない。電極２２は、例えば、スパッタ法、蒸着法などにより半導体基板ＳＳ上にＡｕ、ＡｌなどのＡｕ、Ａｌなどの金属薄膜を堆積させることにより形成される。

[0027] 感水膜２３は一対の電極２２、２２の上に、それらに架け渡されるよう形成されている。感水膜２３は水分を吸収する機能を有し、水よりも比誘電率が低い素材で形成されている。本明細書において「感水膜」とは、水分を吸収する機能を有し、水よりも比誘電率が低い素材で形成された膜を意味する。温度２０℃における水の比誘電率は約８０であるから、感水膜２３の比誘電率は８０よりも小さければよい。ただし、感水膜２３の比誘電率と水の比誘電率との差が大きいほど水分含有量の測定精度が高くなることから、感水膜２３の比誘電率は１～３が好ましい。

[0028] 感水膜２３の素材は、水に不溶であり、熱的・化学的に安定であることが好ましい。感水膜２３の素材として、塩化リチウム、金属酸化物、セラミックス、高分子材料などを用いることができる。ただし、塩化リチウムは植物に対する毒性があることから、植物への適用性に優れているとはいえない。金属酸化物、セラミックスとして酸化アルミニウム（Al_2O_3）、二酸化ケイ素（SiO_2）が挙げられる。金属酸化物およびセラミックスは水に不溶である。ただし、金属酸化物およびセラミックスは材質が硬く、製作工程時に高温の熱処理が必要である。これに対して、高分子材料は植物への適用性に優れ、また材質が柔らかい。高分子材料としてポリイミド、ポリビニルアルコールなどが挙げられる。これらの中でも、半導体Ｓｉ基板上への搭載のしやすさの観点から、ポリイミドが好ましい。また、ポリイミドは水に溶けにく

いため、植物内の水分の長期測定に適している。そのため、感水膜２３をポリイミドで形成すれば、感水膜２３が植物内の水分に溶解しにくく、長期間の測定が可能である。

[0029] 高分子材料で感水膜２３を形成する場合、感水膜２３の表面を親水化処理してもよい。そうすれば、感水膜２３に植物内の水分が吸収されやすくなり、水分含有量測定の応答速度が速くなる。例えば、ポリイミドで感水膜２３を形成する場合、感水膜２３の表面を酸素プラズマ処理すればよい。ポリイミドの表面を酸素プラズマ処理すると、カルボニル基が導入されポリイミドの表面が親水化される。また、ポリイミドの表面積が増加するという効果もある。感水膜２３が親水化されるとともに表面積が増加するので、感水膜２３に植物内の水分が吸収されやすくなり、水分含有量測定の応答速度が速くなる。

[0030] ・電気伝導率プローブ

図１に示すように、電気伝導率プローブ３０の先端部には電気伝導率電極対３１が設けられている。電気伝導率電極対３１は所定の間隔を空けて配置された一対の電極３２、３２からなる。電気伝導率電極対３１は電極３２、３２間に存在する水分（維管束液など）の電気伝導率を測定するためのものである。電極３２は電気伝導率プローブ３０の先端部に配設できる大きさのものであれば、特に限定されない。電極３２は、例えば、スパッタ法、蒸着法などにより半導体基板ＳＳ上にＡｕ、ＡＩなどの金属薄膜を堆積させることにより形成される。

[0031] 支持部１０の上面には２つの電極３２、３２に配線を介して接続された２つの電極パッド３２ｅ、３２ｅが配設されている。電気伝導率は交流二電極法により測定できる。すなわち、一対の電極３２、３２に対応する一対の電極パッド３２ｅ、３２ｅの間には、交流電源と電流計とが直列に接続される。交流電源で電極３２、３２間に電流を供給し、電流計で電極３２、３２間に流れる電流を測定する。オームの法則の基づき、電流計で測定した電流から、電極３２、３２間の電気抵抗を算出し、電気抵抗から電気伝導率を求め

る。

[0032] 植物内の水分の電気伝導率を測定するには、電気伝導率の測定レンジが少なくとも０～１０ｍＳ／ｃｍであることが好ましい。交流二電極法による電気伝導率の測定レンジは、電極対のセル定数Ｋに依存する。ここで、セル定数Ｋは電極間距離Ｌを電極表面積Ｓで除して求められる。すなわち、電気伝導率の測定レンジは電極３２の形状に依存する。電極３２の形状は、立体電極、櫛歯電極、平面電極など、種々の形状から選択できる。

[0033] ・温度プローブ

温度プローブ４０の先端部には温度センサ４１が設けられている。温度センサ４１は、温度を感知する機能を有しており、温度プローブ４０の先端部に配設できる大きさのものであれば、特に限定されない。温度センサ４１として、測温抵抗体、ｐｎ接合ダイオード、熱電対などを採用できる。植物水分含有量センサ１は屋外で使用されることが想定されるため、温度センサ４１として光依存性のない測温抵抗体を用いることが好ましい。また、支持部１０の上面には温度センサ４１に配線を介して接続された２つの電極パッド４１ｅ、４１ｅが配設されている。

[0034] 測温抵抗体は、例えば、スパッタ法、蒸着法などにより半導体基板ＳＳ上にＡｕなどの測温抵抗体として適した金属の薄膜を堆積させることにより形成される。測温抵抗体は温度の上昇とともに電気抵抗が増加する。２つの電極パッド４１ｅ、４１ｅの間には定電流源が接続される。定電流源で測温抵抗体に定電流を供給し、電圧計で電圧を測定する。電圧計で測定した電圧から、温度を算出できる。

[0035] なお、水分含有量プローブ２０、電気伝導率プローブ３０、温度プローブ４０をそれぞれ別のプローブとして構成してもよいし、それらの一部または全部を単一のプローブとして構成してもよい。すなわち、一本のプローブに読出電極対２１、感水膜２３、電気伝導率電極対３１、温度センサ４１の全てを搭載してもよい。

[0036] （製造方法）

つぎに、植物水分含有量センサ１の製造方法の一例を説明する。

まず、シリコン基板の表面をウェット酸化し、酸化膜を形成する。つぎに、酸化膜上に接着層としてＣｒをスパッタリングし、接着層上にＡｕをスパッタリングして、各種の電極、測温抵抗体および配線を形成する。つぎに、レジストを塗布して配線保護膜を形成する。つぎに、ポリイミドを塗布して感水膜２３を形成する。最後にドライエッチングによりシリコン基板の不要部分を除去してプローブ２０、３０、４０を形成する。

[0037] なお、植物水分含有量センサ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、素材もシリコン基板に限定されない。

[0038] （植物水分含有量測定方法）

つぎに、植物水分含有量センサ１による水分含有量の測定方法を説明する。

[0039] ・取り付け

まず、測定対象となる植物の新梢末端、果柄などに、植物水分含有量センサ１を取り付ける。具体的には、図４に示すように、植物水分含有量センサ１の全てのプローブ２０、３０、４０を植物に突き刺して取り付ける。このとき、植物の道管ＸＹおよび師管ＰＨに沿って、プローブ２０、３０、４０を配置する。

[0040] プローブ２０、３０、４０を植物に突き刺していくと、プローブ２０、３０、４０の先端部は植物の皮層ＣＯを通り、師管ＰＨに達する。さらに、深く突き刺していくと、プローブ２０、３０、４０の先端部は、道管ＸＹに達し、つぎに髄ＰＩに達する。植物内の水分の電気伝導率は、土壌から吸水した水分、すなわち道管液に依存するところが大きい。そのため、電気伝導率プローブ３０および温度プローブ４０は道管ＸＹに配置することが好ましい。

[0041] ところで、感水膜２３は少なくとも読出電極対２１を覆う領域に形成されていればよい。ただし、感水膜２３は読出電極対２１の配置部から水分含有

量プローブ２０の基端部にわたって設けることが好ましい。また、感水膜２３は水分含有量プローブ２０の基端部からさらに支持部１０上面の一部領域を覆うように設けることがより好ましい。このようにすれば、感水膜２３の一部が植物の外側に配置される。

[0042] 感水膜２３は植物内の水分量に応じて水分を吸収する。植物内の水分の減少を捉えるには、感水膜２３が吸収していた水分を脱水する必要がある。感水膜２３の一部が植物の外側に配置されていれば、この外気に触れる部分から脱水が促進される。感水膜２３からの脱水がスムーズに行なわれるため、水分含有量が減少する際の応答速度が速くなる。

[0043] ・水分含有量測定（インピーダンスによる方法）

水分含有量プローブ２０を植物に突き刺すと、植物内の水分が感水膜２３に吸収される。植物内の水分量に応じて感水膜２３に吸収される水分量が変化する。また、感水膜２３に吸収される水分量に応じて読出電極対２１を構成する電極２２、２２間のインピーダンスが変化する。

[0044] 電極２２、２２間のインピーダンスＺ［ｋΩ］と植物の水分含有量ＷＣ［％］との関係は式（１）で表される。

[数1]

$$Z = Z_0 \times 10^{-B \cdot WC} \quad (1)$$

ここで、Z_0は感水膜２３が水分を吸収していない場合のインピーダンス［ｋΩ］、Ｂはセンサの感度を表す係数である。

[0045] Z_0およびＢは予め試験により求められる。植物の水分含有量の測定時には電極２２、２２間のインピーダンスＺを測定する。そして、式（１）に基づいて、インピーダンス測定値Ｚから植物の水分含有量ＷＣを求める。

[0046] ・水分含有量測定（静電容量による方法）

感水膜２３に吸収される水分量が増加すると、読出電極対２１を構成する電極２２、２２間の静電容量が増加するという関係がある。特に、感水膜２３の素材を適切に選択すれば、感水膜２３に吸収される水分量と電極２２、

２２間の静電容量とは線形関係となる。この関係を予め試験により求めておく。植物の水分含有量の測定時には電極２２、２２間の静電容量Ｃを測定する。そして、静電容量と水分含有量との関係に基づいて、静電容量測定値Ｃから植物の水分含有量ＷＣを求める。

[0047] 以上のように、水分含有量プローブ２０を植物に突き刺し、読出電極対２１からインピーダンスまたは静電容量を読み出すことで、植物の水分含有量を測定できる。

[0048] ・電気伝導率補償

水分含有量プローブ２０により得られた水分含有量測定値は、植物内の水分の電気伝導率に依存する。そのため、水分含有量測定値を電気伝導率で補償することが好ましい。植物内の水分（主に道管液）の電気伝導率は電気伝導率プローブ３０の電気伝導率電極対３１により測定できる。電気伝導率プローブ３０により測定した電気伝導率に基づき水分含有量測定値を補償する。これにより、植物の水分含有量を精度良く測定できる。

[0049] 例えば、水分含有量を電極２２、２２間のインピーダンスから求める場合、予め種々の電気伝導率の溶液を用いて式（１）中のセンサ感度係数Ｂを求めておく。植物の水分含有量の測定時には、これと同時に植物内の水分の電気伝導率を測定する。測定された電気伝導率に対応するセンサ感度係数Ｂを適用した式（１）に基づき、インピーダンスＺから植物の水分含有量ＷＣを求める。このように、電気伝導率測定値からセンサ感度係数Ｂを求めることで、水分含有量測定値を補償できる。

[0050] また、本願発明者らは、センサ感度係数Ｂは電気伝導率σに線形依存するとの知見を得ている。したがって、予め種々の電気伝導率σの溶液を用いて水分含有量プローブ２０によりインピーダンスＺを測定し、式（１）中のセンサ感度係数Ｂを求めておき、電気伝導率σとセンサ感度係数Ｂとの関係を一次関数でフィッティングする。つまり、以下の式（２）で表される電気伝導率σとセンサ感度係数Ｂとの関係式のうち係数ａおよびｂを求めておく。

[数2]

$$B = a\sigma + b \quad (2)$$

[0051] 植物の水分含有量の測定時には、水分含有量プローブ２０によりインピーダンスＺを測定するとともに、電気伝導率プローブ３０で電気伝導率σを測定する。式（２）に基づいて、電気伝導率測定値σからセンサ感度係数Ｂを求める。求めたセンサ感度係数Ｂを適用した式（１）に基づき、インピーダンスＺから植物の水分含有量ＷＣを求める。

[0052] 水分含有量を電極２２、２２間の静電容量から求める場合も同様に、予め種々の電気伝導率の溶液を用いて、感水膜２３に吸収される水分量と電極２２、２２間の静電容量との関係を求めておく。植物の水分含有量の測定時には、これと同時に植物の水分の電気伝導率を測定する。測定された電気伝導率に対応する水分量－静電容量の関係に基づき、静電容量Ｃから植物の水分含有量ＷＣを求める。

[0053] なお、植物内の水分の電気伝導率は、それ自体、植物の生産に有用な生理的情報である。電気伝導率プローブ３０の先端部を道管ＸＹに配置すれば、道管液の電気伝導率を測定できる。土壌に散布された肥料は微生物によって硝酸性窒素などの塩分に分解される。また、塩分濃度と電気伝導率とは正の相関がある。そのため、道管液の電気伝導率を測定することで、植物に取り込まれた栄養物質を定量化できる。

[0054] ・温度補償

電気伝導率プローブ３０により得られた電気伝導率測定値は温度に依存する。一般に、電気伝導率測定値は１℃ごとに１～３％変化する。そのため、電気伝導率測定値を温度補償することが好ましい。植物内の水分（主に道管液）の温度は温度プローブ４０の温度センサ４１により測定できる。温度プローブ４０により測定した温度に基づき電気伝導率測定値を補償する。これにより、植物内の水分の電気伝導率を精度良く求めることができる。温度補償後の電気伝導率を用いて水分含有量測定をさらに補償することで、水分含有量を精度良く求めることができる。

[0055] 電気伝導率測定値の温度補償は、例えば、以下の手順で行なう。すなわち、式（３）に基づき、電気伝導率測定値を基準温度２５℃での電気伝導率σ_{25}［Ｓ／ｍ］に変換する。ここで、αは温度係数、Ｔは測定対象液の温度［℃］、σは電気伝導率測定値［Ｓ／ｍ］である。

[数3]

$$\sigma_{25} = \alpha|25 - T|\sigma \quad (3)$$

[0056] 温度係数αは式（４）から求められる。ここで、T_1は２５℃およびT_2以外の温度［℃］、T_2は２５℃およびT_1以外の温度［℃］、σ_1はT_1での電気伝導率測定値［Ｓ／ｍ］、σ_2はT_2での電気伝導率測定値［Ｓ／ｍ］である。

[数4]

$$\alpha = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{[\sigma_2(T_1 - 25) - \sigma_1(T_2 - 25)]} \quad (4)$$

[0057] 感水膜２３をポリイミドで形成した場合、水分含有量プローブ２０で測定される水分含有量測定値は温度に依存しない。しかし、感水膜２３を他の素材で形成した場合、水分含有量測定値が温度に依存することがある。このような場合には、水分含有量測定値を温度補償してもよい。すなわち、温度プローブ４０により測定した温度に基づき水分含有量測定値を直接補償する。これにより、水分含有量を精度良く測定できる。

[0058] 植物水分含有量センサ１を用いれば、植物の水分含有量、特に、植物の新梢末端、果柄など、植物の細部における水分含有量を非破壊で測定できる。例えば、トマトは水分ストレスをかけて生育すれば、糖度が高まることが知られている。植物水分含有量センサ１を用いれば、極度な水分不足や、果実への維管束液の急激な流れによる実割れを回避する指標が得られるため、適度な水分ストレスを与えることができる。このように、作物、果樹の高品質、安定的な生産に活用できる。

[0059] 〔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含有量センサ２を説明する

。

図５に示すように、本実施形態の植物水分含有量センサ２は、電気伝導率プローブ３０が他のプローブ２０、４０よりも長く形成されている。また、電気伝導率プローブ３０には複数の電気伝導率電極対３１が軸方向に並んで配置されている。

[0060] 図５に示す例では、電気伝導率プローブ３０に２つの電気伝導率電極対３１が設けられている。基端部側の電気伝導率電極対３１は、温度プローブ４０の温度センサ４１と、植物への突き刺し方向にほぼ同位置に配置されている。先端側の電気伝導率電極対３１は、植物に突き刺した際に、温度センサ４１よりも深い位置に配置される。

[0061] 道管液には硝酸性窒素などの塩分が含まれているため、その他の部分（皮層ＣＯ、師管ＰＨ、髄ＰＩ等）に含まれる水分に比べて電気伝導率が高いという性質を有する。電気伝導率プローブ３０を突き刺していくと、植物内部の電気伝導率分布が分かり、道管ＸＹの位置を正確に判別できる。基端部側の電気伝導率電極対３１が道管ＸＹに配置されるようにすれば、プローブ２０、３０、４０を適切な突き刺し量にできる。

[0062] 〔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含有量センサ３を説明する。植物水分含有量センサ３は、植物の水分含有量に加え、維管束液流量を測定する機能を有する。

[0063] （植物水分含有量センサ）

図６に示すように、本実施形態の植物水分含有量センサ３は第１実施形態の植物水分含有量センサ１において、温度プローブ４０を第１温度プローブ４０Ａと第２温度プローブ４０Ｂの２つとし、ヒータ付温度プローブ５０を追加したものである。その余の構成は第１実施形態と同様であるので、同一部材に同一符号を付して説明を省略する。

[0064] 第１、第２温度プローブ４０Ａ、４０Ｂとヒータ付温度プローブ５０とは組となって維管束液流量の測定に用いられる。第１温度プローブ４０Ａで測

定された温度は、水分含有量測定値および電気伝導率測定値の温度補償にも用いられる。

[0065] 第１、第２温度プローブ４０Ａ、４０Ｂおよびヒータ付温度プローブ５０は、その他のプローブ２０、３０とともに、同一平面内で平行に並べた状態で、その基端が支持部１０に支持されている。第１、第２温度プローブ４０Ａ、４０Ｂは、ヒータ付温度プローブ５０を挟む位置に設けられている。また、第１、第２温度プローブ４０Ａ、４０Ｂおよびヒータ付温度プローブ５０は、その他のプローブ２０、３０と同様の形状、寸法を有する。

[0066] ・温度プローブ

第１、第２温度プローブ４０Ａ、４０Ｂは、それぞれ、第１実施形態の温度プローブ４０と同様の構成を有する。すなわち、第１、第２温度プローブ４０Ａ、４０Ｂは、それぞれ、先端部に温度センサ４１が設けられている。温度センサ４１により維管束液の温度を測定できる。

[0067] ・ヒータ付温度プローブ

ヒータ付温度プローブ５０の先端部には温度センサ５１が設けられている。温度センサ５１として温度プローブ４０の温度センサ４１と同様のものを採用できる。支持部１０の上面には、温度センサ５１に配線を介して接続された２つの電極パッド５１ｅが配設されている。温度プローブ４０の温度センサ４１と同様の方法で、温度センサ５１により温度を測定できる。

[0068] また、ヒータ付温度プローブ５０にはヒータ５２が設けられている。ヒータ５２はヒータ付温度プローブ５０に熱を供給できればよく、その位置は先端部に限定されない。ヒータ５２は、ヒータ付温度プローブ５０に配設できる大きさのものであれば、特に限定されない。例えば、酸化拡散炉を用いて形成したｐｎ接合ダイオードをヒータ５２として採用できる。また、Ｐｔ（白金）、ＮｉＣｒ（ニクロム）、またはＩＴＯ（インジウムスズ酸化材料）の薄膜をスパッタ法、蒸着法などにより形成し、所定の形状に加工することで、ヒータ５２を形成してもよい。

[0069] 支持部１０の上面にはヒータ５２に配線を介して接続された２つの電極パ

ッド５２ｅが配設されている。２つの電極パッド５２ｅ、５２ｅの間には、直流定電圧源が接続される。直流定電圧源でｐｎ接合ダイオードであるヒータ５２に順方向に定電圧を供給する。ヒータ５２に電流を流すことで、熱を発することができる。

[0070]（測定方法）

つぎに、植物水分含有量センサ３による維管束液流量の測定方法を説明する。

[0071] 図６に示すように、植物水分含有量センサ３は、全てのプローブ２０、３０、４０Ａ、４０Ｂ、５０を植物に突き刺して取り付ける。師管液の流量を測定する場合には、第１、第２温度プローブ４０Ａ、４０Ｂおよびヒータ付温度プローブ５０の先端部を師管ＰＨに配置する。道管液の流量を測定する場合には、第１、第２温度プローブ４０Ａ、４０Ｂおよびヒータ付温度プローブ５０の先端部を道管ＸＹに配置する。以下、道管液の流量を測定する場合を例に説明する。

[0072] まず、ヒータ付温度プローブ５０に設けられたヒータ５２を作動させる。ヒータ５２を作動すれば、ヒータ５２から供給された熱エネルギがヒータ付温度プローブ５０に供給される。ヒータ付温度プローブ５０に供給された熱エネルギは、ヒータ付温度プローブ５０の表面から道管ＸＹ内を流れる道管液に放出される。

[0073] このときの第１、第２温度プローブ４０Ａ、４０Ｂおよびヒータ付温度プローブ５０の温度を、温度センサ４１、４１、５１によって測定する。そして、第１温度プローブ４０Ａと第２温度プローブ４０Ｂの温度を比較することで、道管流の方向を特定する。

[0074] 仮に、道管流の方向が図６において上向きであるとする。第１、第２温度プローブ４０Ａ、４０Ｂは、ヒータ付温度プローブ５０を挟む位置に設けられている。道管液はヒータ付温度プローブ５０により昇温される。そのため、ヒータ付温度プローブ５０の下流に配置された第１温度プローブ４０Ａで測定される温度は、上流に配置された第２温度プローブ４０Ｂで測定される

温度に比べて高くなる。これを利用すれば、道管流の方向は、温度の低い第２温度プローブ４０Ｂから温度の高い第１温度プローブ４０Ａに向かう方向であると特定できる。

[0075] つぎに、第１、第２温度プローブ４０Ａ、４０Ｂおよびヒータ付温度プローブ５０で測定した温度から、グラニエ法に基づいて道管液の流量を測定する。ここで、第１、第２温度プローブ４０Ａ、４０Ｂのうち温度の低い第２温度プローブ４０Ｂと、ヒータ付温度プローブ５０との温度差を基に計算する。温度の低い第２温度プローブ４０Ｂは、ヒータ付温度プローブ５０よりも道管流の上流に配置されている。

[0076] 例えば、道管液の流量が多い（流速が速い）場合には、ヒータ付温度プローブ５０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、ヒータ付温度プローブ５０に供給する熱エネルギを一定とすれば、ヒータ付温度プローブ５０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、ヒータ付温度プローブ５０の近傍の道管液は、滞留したような状態となる。そのため、ヒータ付温度プローブ５０に供給する熱エネルギを一定とすれば、ヒータ付温度プローブ５０の温度は高くなる。

[0077] したがって、第２温度プローブ４０Ｂとヒータ付温度プローブ５０との間の温度差ΔＴから道管液の流速を求めることができる。具体的には、式（５）に示すように、温度差ΔＴは流速ｕの関数となる。かかる関数に基づけば、温度差ΔＴから流速ｕを算出できる。

[数5]

$$u = \frac{1}{\alpha}\left\{\frac{\Delta T(0) - \Delta T(u)}{\Delta T(u)}\right\}^{\frac{1}{\beta}} \quad (5)$$

ここで、ｕは平均流速［ｍ／ｓ］、ΔＴ(ｕ)は平均流速がｕの時の温度プローブ４０Ｂとヒータ付温度プローブ５０との温度差［℃］、ΔＴ(０)はΔＴ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。

[0078] また、式（６）に基づき、流速ｕから流量Ｆを算出できる。

[数6]

$$F = u \times S \quad (6)$$

ここで、Ｆは流量［m^3／ｓ］、Ｓは道管の断面積［m^2］である。

[0079] なお、第１、第２温度プローブ４０Ａ、４０Ｂおよびヒータ付温度プローブ５０の先端部を植物の師管ＰＨに配置すれば、師管流の方向とともに、師管液の流速および流量を求めることができる。また、植物水分含有量センサ３は、ヒートパルス法によっても維管束液の流量を測定できる。植物水分含有量センサ３に設けられる温度プローブ４０を１つとしてもよい。このような構成でも維管束液の流量を測定できる。

[0080] このように、植物水分含有量センサ３は、植物の水分含有量に加え、維管束液流量を測定できる。そのため、植物の水分動態を多角的に把握でき、植物の状態がより詳しく分かる。

実施例

[0081]（先端角度）

まず、プローブの先端角度について試験を行なった。

図７に示すように、シリコン基板を用いて平板状のプローブを製作した。図７に示すように、プローブの先端角度θ、幅W、厚さＴを定義する。先端角度θが１３６°、１２０°、９０°、６０°の４つのプローブを製作した。いずれのプローブも幅Wは４８０μｍ、厚さＴは３００μｍである。

[0082] 植物と同程度のヤング率（２．２ＭＰａ）を有する試料（ＰＤＭＳ：Polydimethylsiloxane、デュポン・東レ・スペシャルティ・マテリアル株式会社）を用意した。各プローブを試料に挿入した際の抵抗力を力覚センサ（ＤｙｎＰｉｃｋ　ＷＥＦ－６Ａ、株式会社ワコーテック）を用いて測定した。その結果、プローブが試料に突き刺さる際の刺入抵抗は表１のとおりであった。表１より、プローブの先端角度θを小さくするほど刺入抵抗が小さくなることが分かる。

[表1]

先端角度θ［degree］	刺入抵抗［N］
136	1.72
120	1.51
90	1.21
60	0.74

[0083] つぎに、各プローブをキュウリの茎に突き刺した際の様子を顕微鏡で観察した。先端角度θが１３６°、１２０°、９０°のプローブの場合、茎の変形および茎からの水分の流出が確認された。一方、先端角度θが６０°のプローブの場合、茎の変形も茎からの水分の流出も確認されなかった。これより、プローブの先端角度θを６０°以下にすれば、植物に突き刺した際に、植物内の水分が流出することを抑制できることが確認された。

[0084] （センサの製作）

つぎに、シリコン基板を用いて図１に示す構成の植物水分含有量センサを製作した。

各プローブの先端角度θは６０°、幅Wは４８０μｍ、厚さＴは３００μｍ、長さ（軸方向に基端から先端までの長さ）は１，２００μｍである。各種の電極、測温抵抗体および配線をＡｕで形成した。感水膜をポリイミドで形成した。

[0085] （応答特性）

つぎに、製作した植物水分含有量センサの応答特性を評価した。

脱脂綿に０．０５ｍｏｌ／ＬのＫＣｌ溶液を含ませ、電子天秤（ＡＵＷ２２０Ｄ、株式会社島津製作所、以下同じ。）を用いて水分含有量を９０％または６０％に調整した２種類の脱脂綿を用意した。

[0086] 各脱脂綿を水分含有量プローブの感水膜に接触させ、一定時間の後除去する作業を行なった。この間に水分含有量プローブで測定されたインピーダンスの時間変化を図８のグラフに示す。

[0087] 図８のグラフより、インピーダンスの測定値は脱脂綿を感水膜に接触させてから約２０秒で安定する。また、インピーダンスの測定値は脱脂綿を感水膜から除去してから約３０秒で安定する。これより、水分含有量プローブの応答速度は約３０秒であることが分かる。植物の灌水のタイムスケール（数時間）と比較すれば、応答速度は十分に速いといえる。

[0088] また、脱脂綿を感水膜に接触させてインピーダンスの測定値が安定した後、脱脂綿を除去するまでの間はインピーダンスの測定値がほぼ一定である。これより、水分含有量測定の安定性があることが確認された。さらに、脱脂綿を感水膜から除去した後のインピーダンスは、脱脂綿を感水膜に接触させる前の値まで戻る。これより、水分含有量の十分な再現性を有することが確認された。以上より、水分含有量プローブは良好な応答特性を有することが確認された。

[0089] （キャリブレーション）

つぎに、水分含有量測定のキャリブレーションを行なった。

電子天秤上に設置したトマト（Solanum Lycopersicum L.、以下同じ。）の切り枝に植物水分含有量センサを取り付けた。乾燥に伴う切り枝の水分含有量の時間変化を電子天秤で測定した。また、水分含有量プローブでインピーダンスの時間変化を測定した。その結果を図９に示す。また、電気伝導率プローブで切り枝内の水分の電気伝導率をしたところ４．８ｍＳ／ｃｍであった。温度プローブで切り枝内の水分の温度をしたところ２６℃であった。

[0090] 図９のグラフから分かるように、水分含有量の変化に伴ってインピーダンスが指数的に変化する。測定点を式（１）でフィッティングしたところ、Z_0＝１．２７×１０^3、Ｂ＝０．０１６５であった。また、一般的な植物の水分含有量は９８～６０％である。図９のグラフより、植物水分含有量センサは、一般的な植物の水分含有量の範囲をカバーする１００～４０％の範囲の水分含有量を測定できることが確認された。

[0091] （生育環境下での測定）

つぎに、生育環境下のトマトを用いて水分含有量の測定を行なった。

培養土(４２００３６、ＤＣＭホールディングス株式会社)に播種し、人工気象器（ＮＣ－ＨＣ、株式会社日本医化器械製作所）で生育したトマトの茎に植物水分含有量センサを取り付けた。ここで、植物水分含有量センサの取り付け位置を土壌表面から１５０ｍｍの位置とした。人工気象器内の環境を温度２５℃、湿度７０％、二酸化炭素濃度５００ｐｐｍに設定した。実時刻に合わせて人工気象器内の光量を変化させた。測定開始時と５日経過時の２回のみ５００ｍＬの水分を与える水ストレス栽培を行なった。この間に植物水分含有量センサで測定した水分含有量の時間変化を図１０に示す。

[0092] 図１０より、水分含有量は、昼夜に応じて変化し、また日を追うごとに減少していく。また、測定開始時の水やり後の水分含有量と、５日経過時の水やり後の水分含有量は同程度である。この水分含有量の変化は、降雨によって変化する植物の水分含有量の変化を再現したものといえる。これより、植物水分含有量センサは非破壊で植物の水分含有量をリアルタイムで測定できることが確認された。

[0093] （電気伝導率補償）

つぎに、式（１）中のセンサ感度係数Ｂと電気伝導率σとの関係を確認した。

電気伝導率σを１．９、５．４、９．７ｍＳ／ｃｍに調整した３種類のＫＣｌ溶液を準備した。脱脂綿にＫＣｌ溶液を含ませ、電子天秤を用いて水分含有量を測定した。また、脱脂綿を水分含有量プローブの感水膜に接触させ、インピーダンスを測定した。この操作を３種類のＫＣｌ溶液それぞれについて、脱脂綿の水分含有量を変化させつつ行なった。その結果得られた水分含有量とインピーダンスとの関係を図１１に示す。

[0094] 図１１に示す測定点を式（１）でフィッティングし、センサ感度係数Ｂを求めた。図１２にＫＣｌ溶液の電気伝導率σとセンサ感度係数Ｂとの関係を示す。図１２より、電気伝導率σとセンサ感度係数Ｂとは線形関係にあることが分かる。図１２に示す測定点を一次関数でフィッティングしたところ、製作した水分含有量プローブにおいては、式（２）中の各係数は、ａ＝０．

０００６、ｂ＝０．００６４と求められた。

[0095] 以上より、予め試験などによりセンサ感度係数Ｂと電気伝導率σとの関係式を求めておけば、水分含有量プローブで得られた水分含有量測定値を電気伝導率で補償できることが確認された。

符号の説明

[0096] １、２、３ 植物水分含有量センサ

１０ 支持部

２０ 水分含有量プローブ

２１ 読出電極対

２２ 電極

２３ 感水膜

３０ 電気伝導率プローブ

３１ 電気伝導率電極対

３２ 電極

４０ 温度プローブ

４１ 温度センサ

請求の範囲

[請求項1] 所定の間隔を空けて配置された一対の電極からなる読出電極対と、前記一対の電極に架け渡された感水膜とが設けられた水分含有量プローブと、

前記水分含有量プローブを支持する支持部と、を備える

ことを特徴とする植物水分含有量センサ。

[請求項2] 所定の間隔を空けて配置された一対の電極からなる電気伝導率電極対が設けられた電気伝導率プローブを備え、

前記電気伝導率プローブは前記水分含有量プローブと平行に並んだ状態で前記支持部に支持されている

ことを特徴とする請求項１記載の植物水分含有量センサ。

[請求項3] 温度センサが設けられた温度プローブを備え、

前記温度プローブは前記水分含有量プローブと平行に並んだ状態で前記支持部に支持されている

ことを特徴とする請求項１または２記載の植物水分含有量センサ。

[請求項4] 前記感水膜はポリイミドで形成されている

ことを特徴とする請求項１～３のいずれかに記載の植物水分含有量センサ。

[請求項5] 前記感水膜の表面は親水化処理されている

ことを特徴とする請求項１～４記載の植物水分含有量センサ。

[請求項6] 前記感水膜は前記読出電極対の配置部から前記水分含有量プローブの基端部にわたって設けられている

ことを特徴とする請求項１～５のいずれかに記載の植物水分含有量センサ。

[請求項7] 前記水分含有量プローブの先端角度は４０～６０°である

ことを特徴とする請求項１～６のいずれかに記載の植物水分含有量センサ。

[請求項8] 前記電気伝導率プローブは複数の前記電気伝導率電極対を有し、

複数の前記電気伝導率電極対は前記電気伝導率プローブの軸方向に並んで配置されている

ことを特徴とする請求項２記載の植物水分含有量センサ。

[請求項9] 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を備え、

前記ヒータ付温度プローブは前記温度プローブと平行に並んだ状態で前記支持部に支持されている

ことを特徴とする請求項３記載の植物水分含有量センサ。

[請求項10] 所定の間隔を空けて配置された一対の電極からなる読出電極対と、前記一対の電極に架け渡された感水膜とが設けられた水分含有量プローブを植物に突き刺し、

前記読出電極対を構成する前記一対の電極間のインピーダンスを測定し、

式（１）に基づいて、インピーダンス測定値から前記植物の水分含有量を求める

ことを特徴とする植物水分含有量測定方法。

$$Z = Z_0 \times 10^{-B \cdot WC} \quad (1)$$

ここで、Ｚはインピーダンス測定値、Z_0は前記感水膜が水分を吸収していない場合のインピーダンス、Ｂはセンサ感度係数、ＷＣは水分含有量である。

[請求項11] 所定の間隔を空けて配置された一対の電極からなる電気伝導率電極対が設けられた電気伝導率プローブを前記植物に突き刺し、

前記電気伝導率電極対を構成する前記一対の電極間の電気抵抗から電気伝導率を求め、

電気伝導率測定値から式（１）中のセンサ感度係数Ｂを求める

ことを特徴とする請求項１０記載の植物水分含有量測定方法。

[請求項12] 式（２）に基づいて、前記電気伝導率測定値から前記センサ感度係数Ｂを求める

ことを特徴とする請求項１１記載の植物水分含有量測定方法。

$$B = a\sigma + b \quad (2)$$

ここで、Ｂはセンサ感度係数、σは電気伝導率、ａ、ｂは予め定められた係数である。

[請求項13] 所定の間隔を空けて配置された一対の電極からなる読出電極対と、前記一対の電極に架け渡された感水膜とが設けられた水分含有量プローブを植物に突き刺し、

前記読出電極対を構成する前記一対の電極間の静電容量を測定し、

静電容量測定値から前記植物の水分含有量を求める

ことを特徴とする植物水分含有量測定方法。

[請求項14] 所定の間隔を空けて配置された一対の電極からなる電気伝導率電極対が設けられた電気伝導率プローブを前記植物に突き刺し、

前記電気伝導率電極対を構成する前記一対の電極間の電気抵抗から電気伝導率を求め、

前記静電容量測定値および電気伝導率測定値から前記植物の水分含有量を求める

ことを特徴とする請求項１３記載の植物水分含有量測定方法。

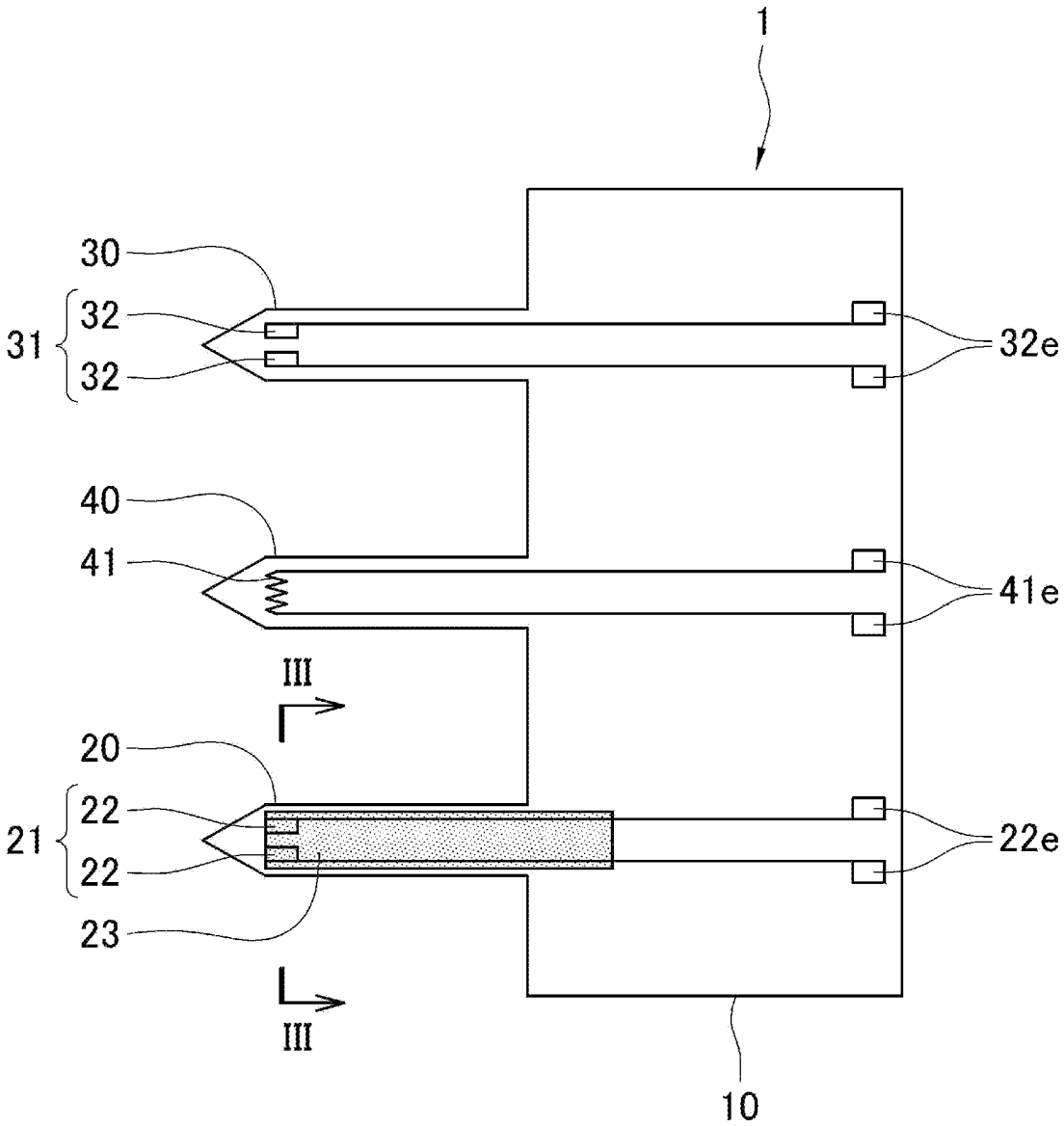
[請求項15] 温度センサが設けられた温度プローブを植物に突き刺し、

前記温度センサで温度を測定し、

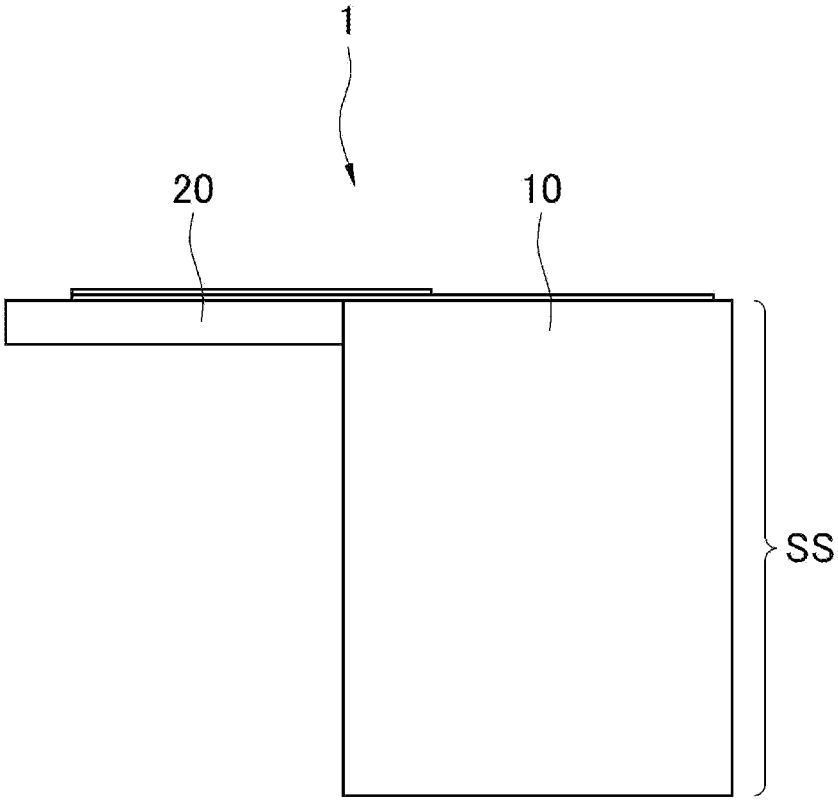
温度測定値を用いて前記電気伝導率測定値を補償する

ことを特徴とする請求項１１、１２または１４記載の植物水分含有量測定方法。

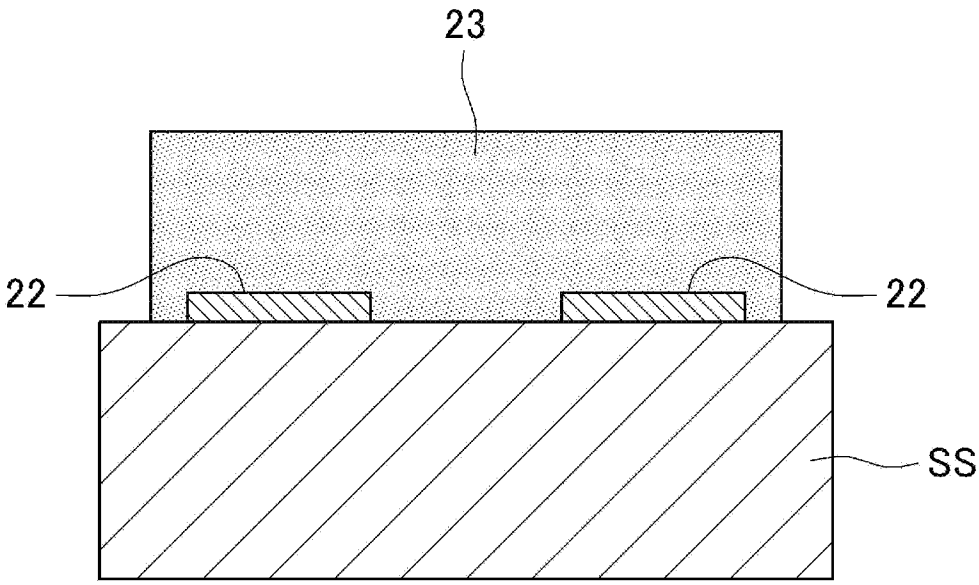
[図1]



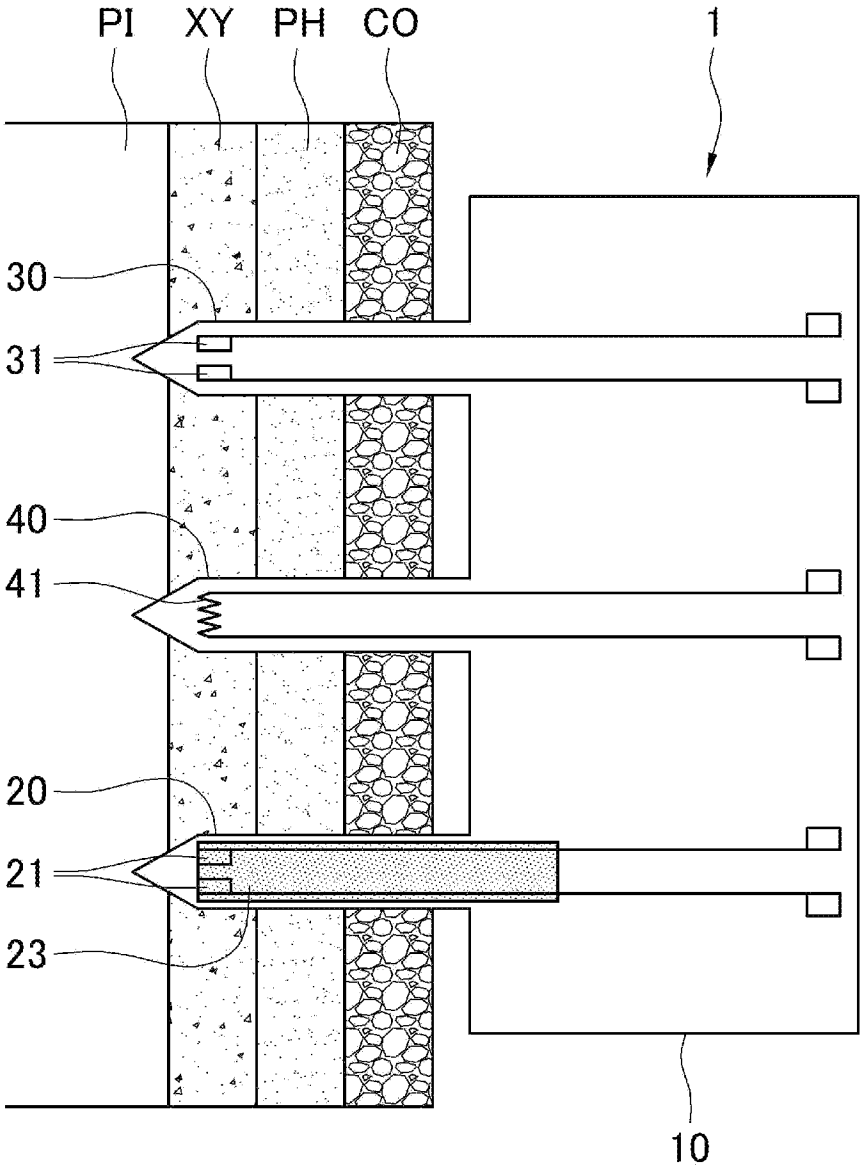
[図2]



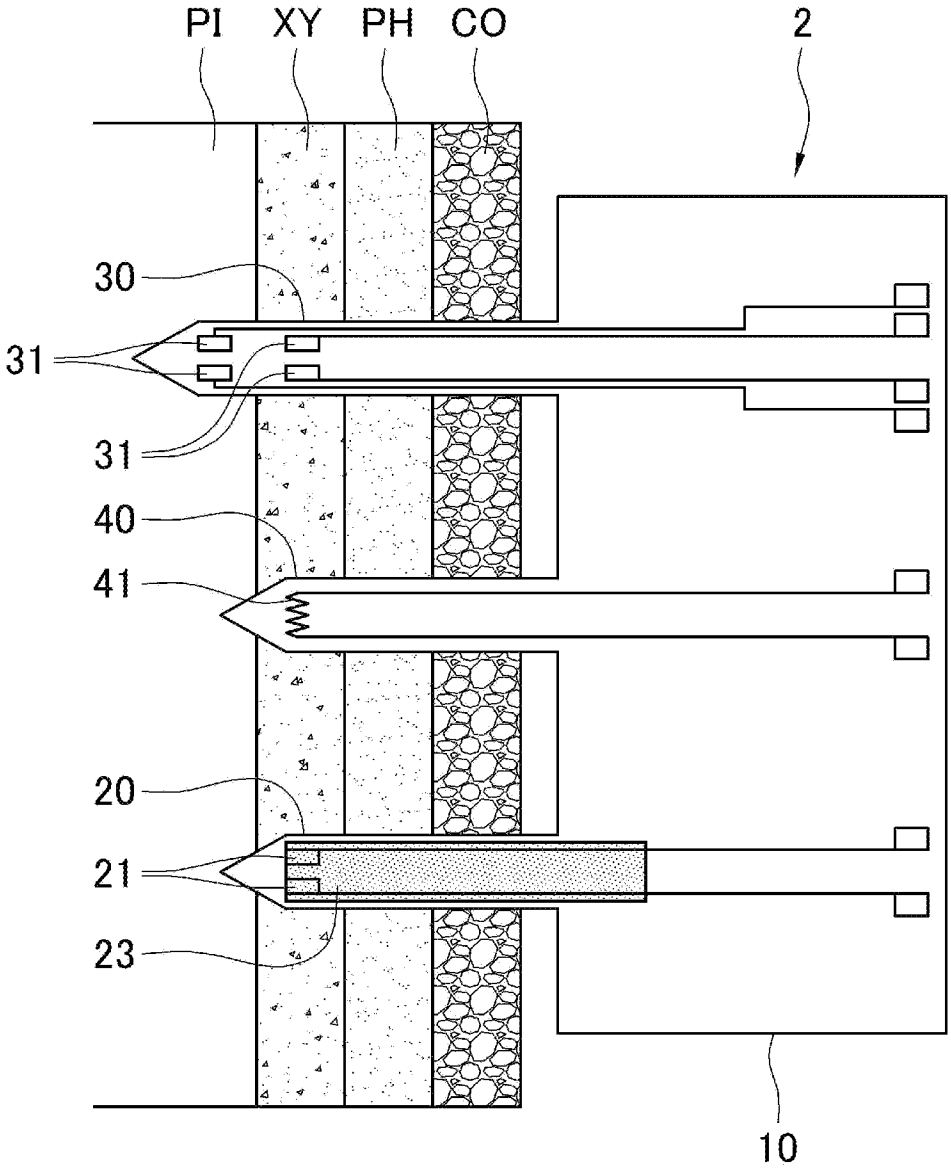
[図3]



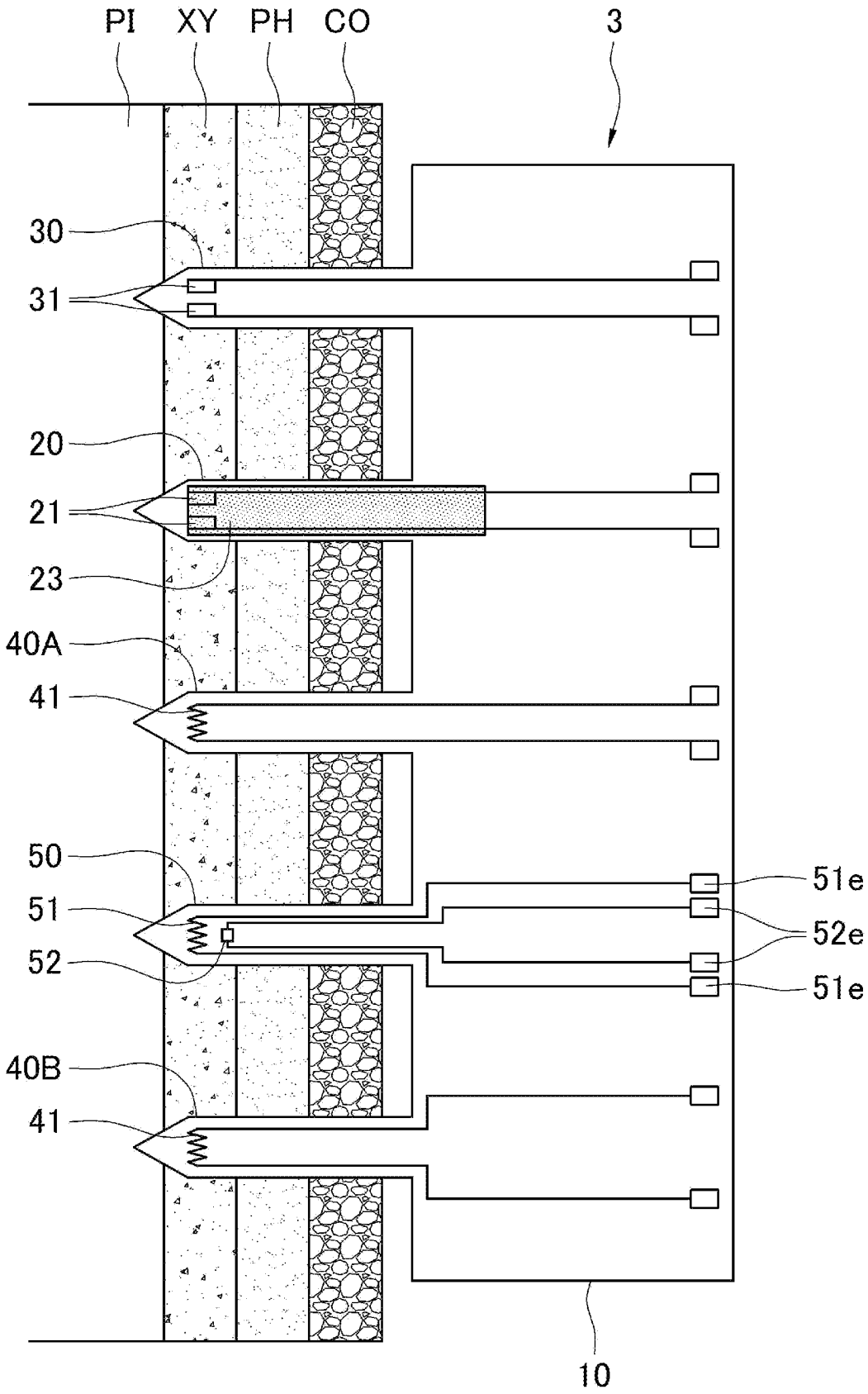
[図4]



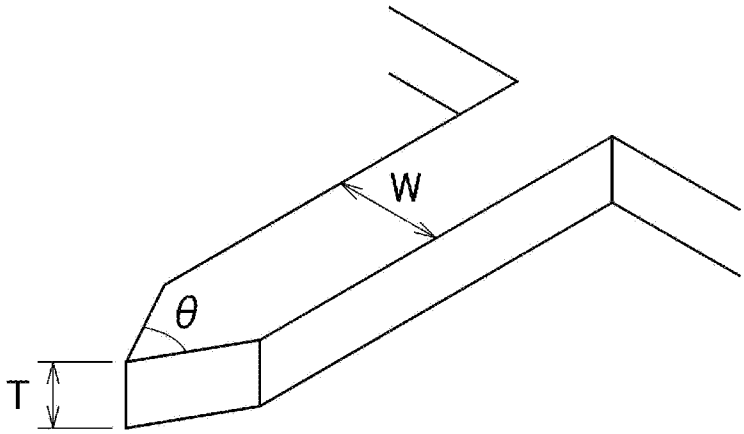
[図5]



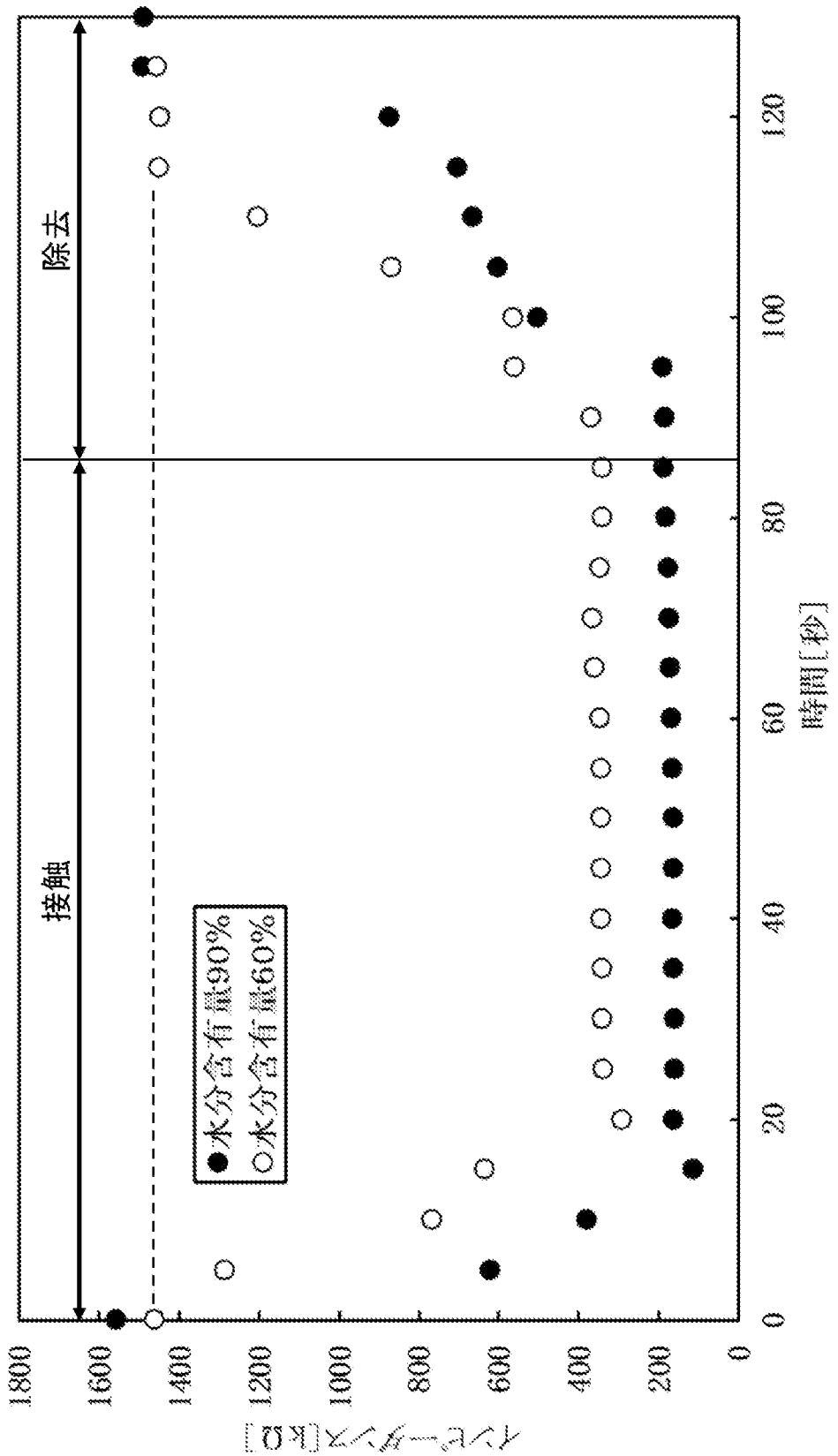
[図6]



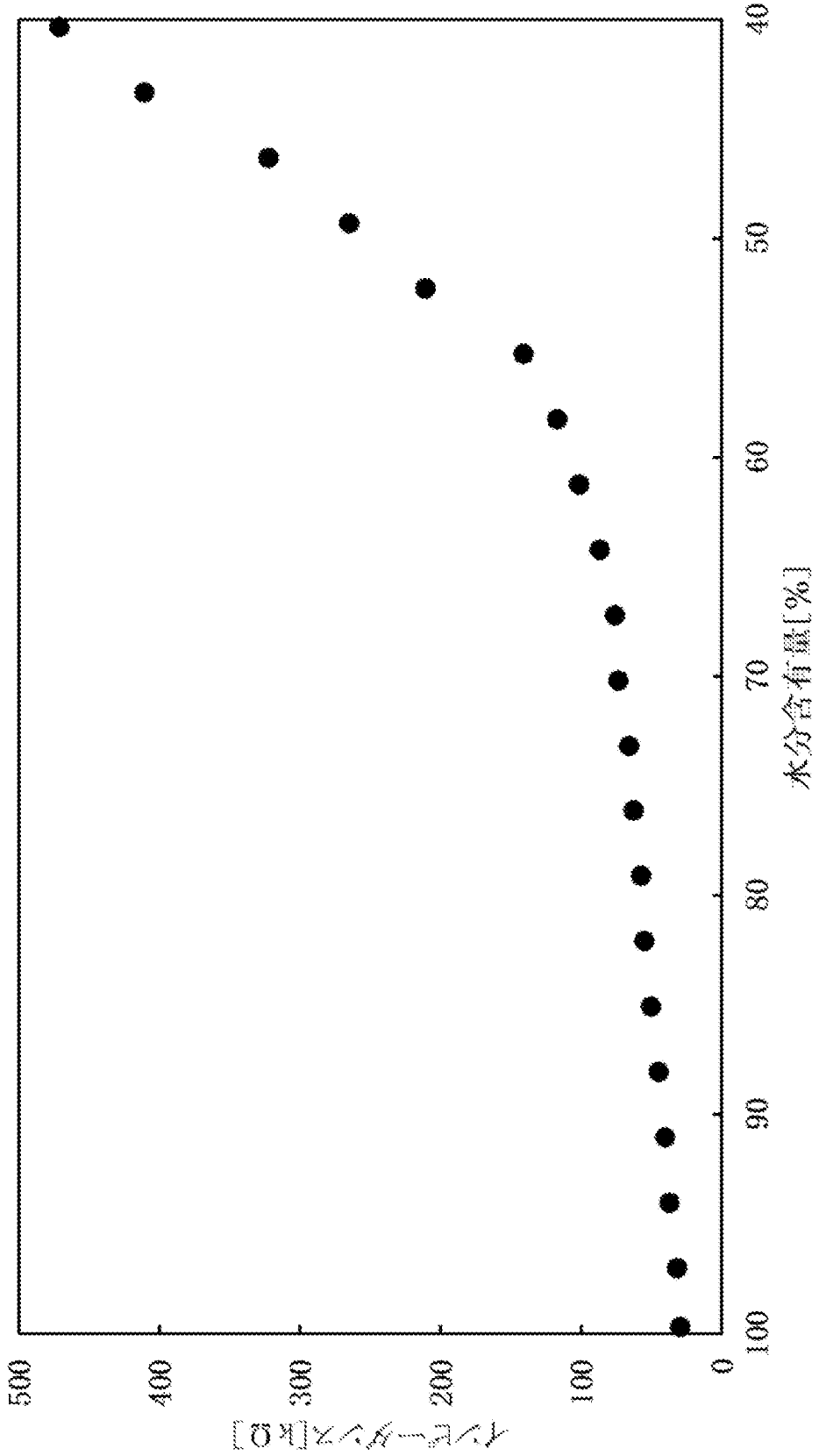
[図7]



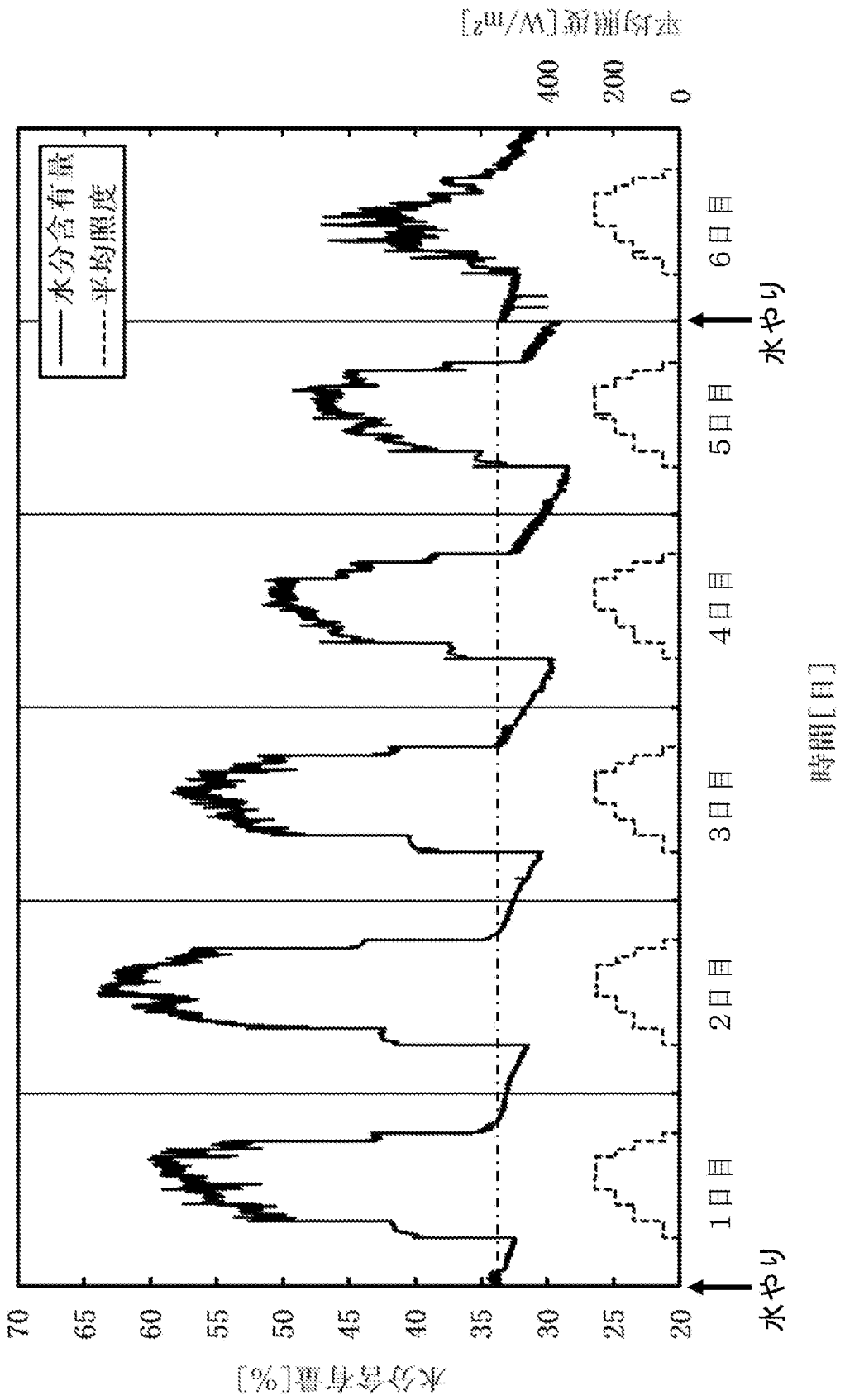
[図8]


除去
接触
●水分含有量90%
○水分含有量60%
インピーダンス[kΩ]
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
0
20
40
60
80
100
120
時間[秒]

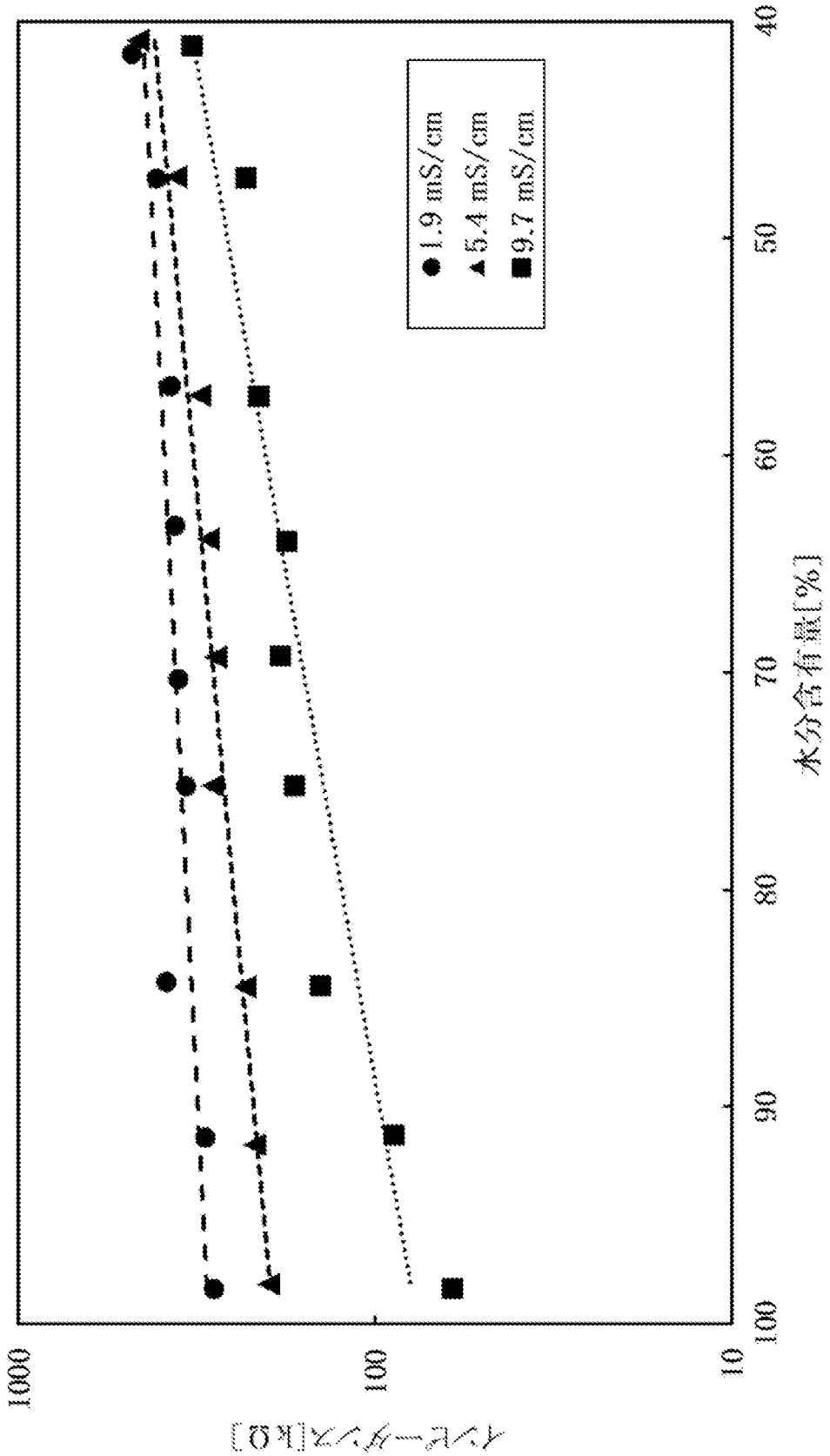
[図9]



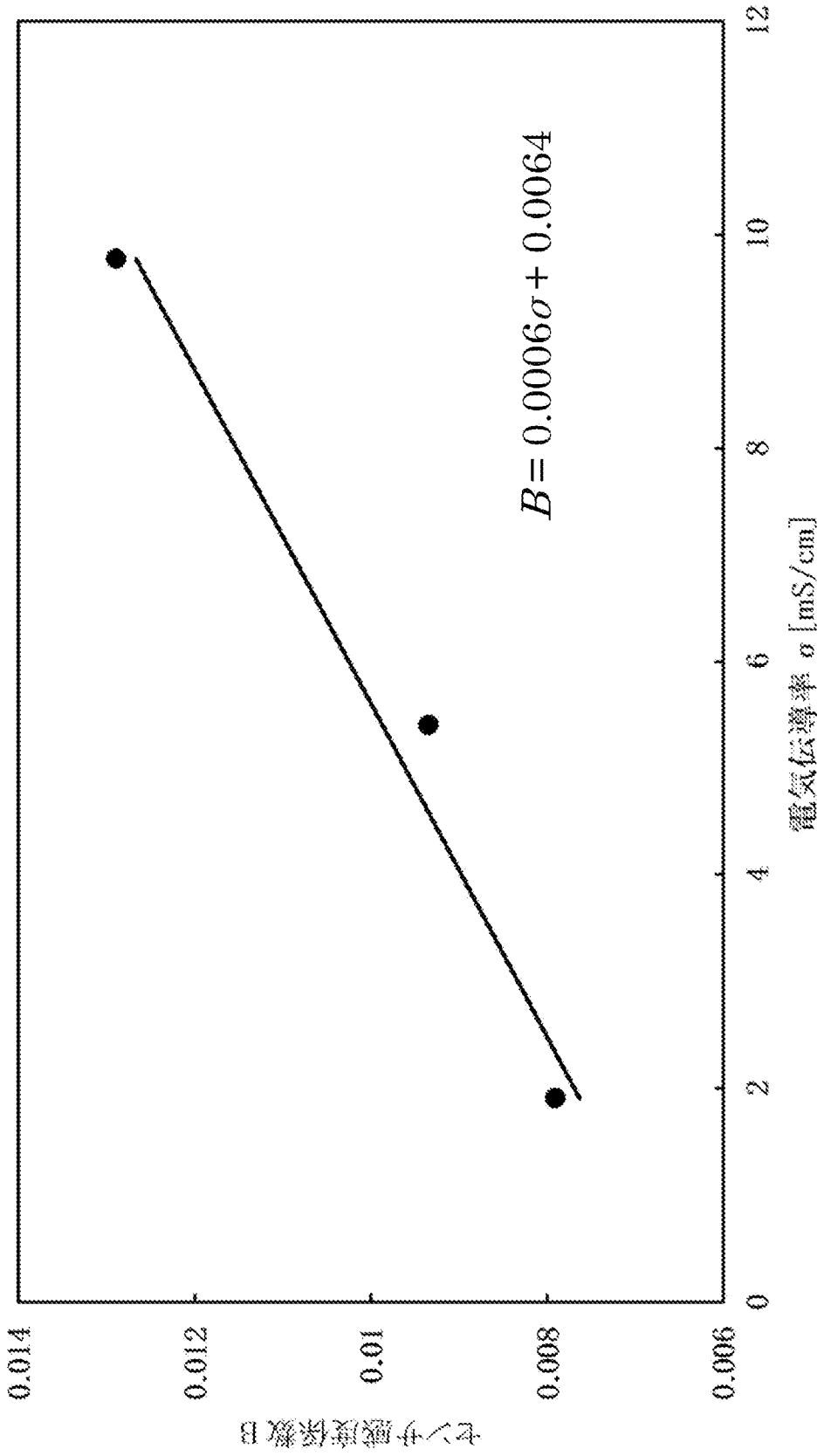
[図10]


水分含有量[%]
70
65
60
55
50
45
40
35
30
25
20
水やり
水やり
1日目
2日目
3日目
4日目
5日目
6日目
時間[日]
水分含有量
平均照度
平均照度[W/m²]
400
200
0

[図11]


1000
100
10
インピーダンス[kΩ]
40
50
60
70
80
90
100
水分含有量[%]
●1.9 mS/cm
▲5.4 mS/cm
■9.7 mS/cm

[図12]


$B = 0.0006\sigma + 0.0064$
ビン中感度係数 B
0.014
0.012
0.01
0.008
0.006
0
2
4
6
8
10
12
電気伝導率 σ [mS/cm]

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2021/028568

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

A01G 7/00(2006.01)i; ***G01N 27/02***(2006.01)i
FI: G01N27/02 B; A01G7/00 603

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)

A01G7/00, G01N27/00-G01N27/10, G01N27/14-G01N27/24

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

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996
Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2021
Registered utility model specifications of Japan 1996-2021
Published registered utility model applications of Japan 1994-2021

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.
X	JP 2010-266324 A (KEIO GIJUKU) 25 November 2010 (2010-11-25) paragraphs [0025]-[0051], fig. 2-13	1, 4-7, 10
Y		2-3, 8-9, 13-15
A		11-12
Y	WO 2018/079186 A1 (KAGAWA UNIVERSITY) 03 May 2018 (2018-05-03) paragraphs [0019]-[0119], fig. 1-15	2-3, 8-9
Y	JP 2015-145810 A (KAGAWA UNIVERSITY) 13 August 2015 (2015-08-13) paragraphs [0016]-[0082], fig. 1-7	2-3, 9
Y	高橋伸英　他, 植物の水分状態と電気インピーダンスの関係, 第４８回自動制御連合講演会, 2005, pp. 499-500, (TAKAHASHI, Nobuhide et al., A relationship of electrical impedance to water status of plant, 48th Proceedings of the Japan Joint Automatic Control Conference) fig. 4-7	13-15
Y	JP 51-16995 A (JAPAN RADIO CO., LTD.) 10 February 1976 (1976-02-10) page 1, lower left column to page 3, upper right column, fig. 1-4	13-15

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

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"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)
"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
"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
"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
"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
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
07 October 2021	**19 October 2021**
Name and mailing address of the ISA/JP **Japan Patent Office (ISA/JP)** **3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915** **Japan**	Authorized officer Telephone No.

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	US 2014/0109658 A1 (KAH, JR. Carl L. C.) 24 April 2014 (2014-04-24) paragraphs [0021]-[0031], fig. 1-3	13-15
Y	KR 10-2018-0038206 A (UNIVERSITY-INDUSTRY COOPERATION GROUP OF KYUNG HEE UNIVERSITY) 16 April 2018 (2018-04-16) paragraphs [0041]-[0151], fig. 1-9	13-15
Y	US 5621669 A (BJORNSSON, Eyjolf S.) 15 April 1997 (1997-04-15) column 22	15
Y	CN 106932447 A (JIANGSU UNIVERSITY) 07 July 2017 (2017-07-07) paragraphs [0019]-[0022], [0047]-[0049]	15
Y	CN 107796854 A (BEIJING FORESTRY UNIVERSITY) 13 March 2018 (2018-03-13) claim 7	15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/JP2021/028568

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
JP 2010-266324 A	25 November 2010	(Family: none)	
WO 2018/079186 A1	03 May 2018	US 2019/0274259 A1 paragraphs [0113]-[0238], fig. 1-15	
JP 2015-145810 A	13 August 2015	US 2017/0010296 A1 paragraphs [0053]-[0133], fig. 1-7 WO 2015/115084 A1 EP 3104135 A1	
JP 51-16995 A	10 February 1976	(Family: none)	
US 2014/0109658 A1	24 April 2014	(Family: none)	
KR 10-2018-0038206 A	16 April 2018	(Family: none)	
US 5621669 A	15 April 1997	(Family: none)	
CN 106932447 A	07 July 2017	(Family: none)	
CN 107796854 A	13 March 2018	(Family: none)	

国際調査報告

国際出願番号
PCT/JP2021/028568

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

A01G 7/00(2006.01)i; G01N 27/02(2006.01)i
FI: G01N27/02 B; A01G7/00 603

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））

A01G7/00, G01N27/00-G01N27/10, G01N27/14-G01N27/24

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	１９７１－２０２１年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２０２１年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２０２１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
X	JP 2010-266324 A (学校法人慶應義塾) 25.11.2010 (2010-11-25) 段落［００２５］－［００５１］、図２－１３	1, 4-7, 10
Y		2-3, 8-9, 13-15
A		11-12
Y	WO 2018/079186 A1 (国立大学法人香川大学) 03.05.2018 (2018-05-03) 段落［００１９］－［０１１９］、図１－１５	2-3, 8-9
Y	JP 2015-145810 A (国立大学法人 香川大学) 13.08.2015 (2015-08-13) 段落［００１６］－［００８２］、図１－７	2-3, 9
Y	高橋伸英　他, 植物の水分状態と電気インピーダンスの関係, 第４８回自動制御連合講演会, 2005, pp.499-500 図４－７	13-15
Y	JP 51-16995 A (日本無線株式会社) 10.02.1976 (1976-02-10) 第１頁左下欄－第3頁右上欄、図１－４	13-15
Y	US 2014/0109658 A1 (KAH, JR. CARL L.C.) 24.04.2014 (2014-04-24) 段落［００２１］－［００３１］、図１－３	13-15

☑ Ｃ欄の続きにも文献が列挙されている。

☑ 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抵触するものではなく、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	国際調査報告の発送日
07.10.2021	19.10.2021

名称及びあて先
日本国特許庁(ISA/JP)
〒100-8915
日本国
東京都千代田区霞が関三丁目４番３号

権限のある職員（特許庁審査官）
小澤　瞬 2W 6003

電話番号 03-3581-1101 内線 3258

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
Y	KR 10-2018-0038206 A (UNIVERSITY-INDUSTRY COOPERATION GROUP OF KYUNG HEE UNIVERSITY) 16.04.2018 (2018-04-16) 段落［００４１］－［０１５１］、図１－９	13-15
Y	US 5621669 A (BJORNSSON; EYJOLF S.) 15.04.1997 (1997-04-15) 第２２欄	15
Y	CN 106932447 A (JIANGSU UNIVERSITY) 07.07.2017 (2017-07-07) 段落［００１９］－［００２２］、［００４７］－［００４９］	15
Y	CN 107796854 A (BEIJING FORESTRY UNIVERSITY) 13.03.2018 (2018-03-13) 請求項７	15

国際調査報告
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号
PCT/JP2021/028568

引用文献	公表日	パテントファミリー文献	公表日
JP 2010-266324 A	25.11.2010	（ファミリーなし）	
WO 2018/079186 A1	03.05.2018	US 2019/0274259 A1 段落［０１１３］－［０２３８］、図１－１５	
JP 2015-145810 A	13.08.2015	US 2017/0010296 A1 段落［００５３］－［０１３３］、図１－７ WO 2015/115084 A1 EP 3104135 A1	
JP 51-16995 A	10.02.1976	（ファミリーなし）	
US 2014/0109658 A1	24.04.2014	（ファミリーなし）	
KR 10-2018-0038206 A	16.04.2018	（ファミリーなし）	
US 5621669 A	15.04.1997	（ファミリーなし）	
CN 106932447 A	07.07.2017	（ファミリーなし）	
CN 107796854 A	13.03.2018	（ファミリーなし）	