

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6007454号
(P6007454)

(45) 発行日 平成28年10月12日(2016.10.12)

(24) 登録日 平成28年9月23日(2016.9.23)

(51) Int.Cl. F 1
 GO 1 N 19/10 (2006.01) GO 1 N 19/10 A
 GO 1 N 33/24 (2006.01) GO 1 N 33/24 E

請求項の数 7 (全 18 頁)

(21) 出願番号	特願2012-183383 (P2012-183383)	(73) 特許権者	505374783 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 茨城県那珂郡東海村大字舟石川765番地 1
(22) 出願日	平成24年8月22日(2012.8.22)	(73) 特許権者	504147243 国立大学法人 岡山大学 岡山県岡山市北区津島中一丁目1番1号
(65) 公開番号	特開2014-41054 (P2014-41054A)	(73) 特許権者	000001373 鹿島建設株式会社 東京都港区元赤坂一丁目3番1号
(43) 公開日	平成26年3月6日(2014.3.6)	(73) 特許権者	512052764 株式会社アサノ大成基礎エンジニアリング 東京都台東区北上野二丁目8番7号
審査請求日	平成27年8月13日(2015.8.13)	(74) 代理人	110000442 特許業務法人 武和国際特許事務所 最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 水分センサ

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

吸水あるいは乾燥の状態によって膨潤・収縮する膨潤材料と、
 その膨潤材料を充填・保持する膨潤材料保持部と、
 その膨潤材料保持部に充填された前記膨潤材料の吸水による膨潤圧で弾性変形するメン
 ブレムと、

そのメンブレムの歪量を検出する圧力センサを備え、
前記圧力センサは、前記メンブレムの歪量を検出するセンサ部を設けた光ファイバーを
 有し、前記メンブレムの弾性変形によって生じる歪が前記光ファイバーの光軸方向に作用
 するように構成され、

前記膨潤材料保持部は、両端に開口部を有する筒形をしており、
 その膨潤材料保持部の一方の開口部が前記メンブレムによって閉塞され、
 前記圧力センサを収納したケーシングの開口部が、前記膨潤材料ならびに前記メンブレ
 ム付きの前記膨潤材料保持部によって閉塞され、

前記膨潤材料保持部の周壁と前記メンブレムによって形成される断面形状が凹状の空間
 部に前記膨潤材料が充填されて、

水分が含有される被測定物の面に前記膨潤材料保持部の他方の開口部を当接して、前記
 膨潤材料の一部を前記被測定物の面に直接接触させることを特徴とする水分センサ。

【請求項2】

請求項1に記載の水分センサにおいて、

前記ケーシングがコップ形をしており、そのケーシングの開口部が、前記膨潤材料ならびに前記メンブレン付きの前記膨潤材料保持部によって閉塞され、

前記圧力センサが、

側面形状が略コ字状をした変位－歪変換部材を有し、その変位－歪変換部材の一端が前記メンブレンに取り付けられ、変位－歪変換部材の他端が前記ケーシングの底部に取り付けられて、

前記変位－歪変換部材の中間部で一方側に突出した橋状部の側面に、前記光ファイバーのセンサ部が貼り付けられていることを特徴とする水分センサ。

【請求項 3】

請求項 1 に記載の水分センサにおいて、

前記ケーシングがコップ形をしており、そのケーシングの開口部が、前記膨潤材料ならびに前記メンブレン付きの前記膨潤材料保持部によって閉塞され、

前記圧力センサが、

前記メンブレンから前記ケーシングの底部に向けて取り付けられた変位伝達部材と、前記ケーシングの底部から前記変位伝達部材に向けて取り付けられたファイバー支持部材と、

前記変位伝達部材と前記ファイバー支持部材の間に形成された隙間部に前記センサ部が配置されるように、前記変位伝達部材から前記ファイバー支持部材に掛けて固定された光ファイバーから構成されていることを特徴とする水分センサ。

【請求項 4】

請求項 1 ないし 3 のいずれか 1 項に記載の水分センサにおいて、

前記センサ部が、当該光ファイバーのコア部の光軸線上に屈折率の異なる回折格子を一定の間隔で並設した構成になっていることを特徴とする水分センサ。

【請求項 5】

前記請求項 4 に記載のセンサ部が 1 本の光ファイバーに対して任意の間隔をおいて複数個取り付けることができることを特徴とする水分センサ。

【請求項 6】

請求項 1 ないし 5 のいずれか 1 項に記載の水分センサにおいて、

前記センサ部が、当該光ファイバーのコア部の光軸線上に第 1 の半透過ミラーと第 2 の半透過ミラーを空隙を介して対向・配置して、前記第 1 の半透過ミラーで反射した第 1 の反射光と、前記第 2 の半透過ミラーで反射した第 2 の反射光を、波長毎に分離して干渉させる構成になっていることを特徴とする水分センサ。

【請求項 7】

請求項 1 ないし 6 のいずれか 1 項に記載の水分センサにおいて、

前記膨潤材料が、ウレタン系の膨潤性ゴム材料であることを特徴とする水分センサ。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、例えば土中の水分量などを検出・測定する水分センサに係り、特に受感部に水分量に応じて膨潤・収縮する膨潤材料（以下、膨潤材料と略記する）を用いた水分センサに関するものである。

【背景技術】

【0002】

放射性廃棄物の地層処分における安全評価や地下空洞の建設では、地下水流動場を把握することは非常に重要である。表層地盤の不飽和帯における土壌水分の観測を行うことで、直接的にその地点の地下水涵養量を求めることができる。また、廃棄体周辺の粘土（ベントナイト）で作られた緩衝材層への水分の侵入を検出・計測することも重要となる。

【0003】

従来、土中の水分量などを検出・測定する方法として、ADR や FDR などの誘電率を利用した電気式センサが用いられていたが、下記のような問題点を有している。

10

20

30

40

50

【0004】

(a) 電氣的ノイズに弱いので、例えば変電所、送電線あるいは特殊な工場の付近などでは、ノイズ対策が必要であり、場合によればモニタリングができないことがある。

(b) 微弱でも電流が流れるので、防爆が要求される場所や環境では使用できない。

(c) 長期間使用して伝送ケーブルの絶縁性が低下してくると、データの信頼性が問題となる。

(d) 伝送ケーブルが比較的太いので、多点計測の場合には膨大な伝送ケーブルの引き回しが必要となり、センサの配置などが煩雑で、場合によっては構造物本体に弱部を形成することになる。

(e) 落雷でセンサならびに測定システムにダメージを受けやすく、最悪の場合は全壊することもある。

10

【0005】

これに対して光ファイバーを用いた測定システムでは前述した電氣的手法の欠点を解消して、下記のような特長があり、次世代のモニタリングシステムとして有望視されている。

【0006】

(a) 電氣的ノイズの影響が一切ない。

(b) 本質的に完全防爆であるから、使用環境に制限されることがない。

(c) 電氣的な絶縁不良は発生しない。

(d) 光ファイバーは緩衝層を含めた外径が通常、0.25mmと電線に比べて細いので、ケーブルの引き回しが問題にはならない。

20

(e) 本質的に絶縁体なので落雷による影響はない。

【0007】

従来、土壌水分などの観測において光ファイバーを用いた方法としては、例えば下記のような非特許文献3, 4などを挙げるができる。

非特許文献3: Alessi, R.S., L. Prunty: Soil-water Determination Using Fiber Optics, Soil Sci, Soc. Am, Vol. 50, pp. 860-863, 1986.

この非特許文献3に記載の研究では、光ファイバーセンサにより、ガラスビーズと砂質土に対して含水量を測定している。具体的には、容器内に試料を詰め、空気圧を増加させて水分量を調整した上で、得られた電圧と圧力及び体積含水率のそれぞれの関係から、線形関係で相関できる結果を得ている。

30

【0008】

非特許文献4: Texier, S., S. Pamukcu, J. Toulouse: Advances in subsurface water content measurement with a distributed Brillouin scattering fiber-optic sensor, Proceedings of SPIE, Vol. 5855, pp. 555-558, 2005.

この非特許文献4に記載の研究では、分布型ブルリアン散乱光ファイバーセンサを用いて低透水性物質の水分を吸収し、ポリマーが膨潤することによる光ファイバーの引っ張り歪、ポリマーが乾燥することによる光ファイバーの圧縮歪をブルリアン散乱シフトとして、そのシフト量を計測している。

またその他に土中の水分センサに関しては、例えば下記特許文献1, 2ならびに非特許文献1, 2などを挙げるができる。

40

【先行技術文献】

【特許文献】

【0009】

【特許文献1】特開2005-351663号公報

【特許文献2】特開2005-127744号公報

【非特許文献】

【0010】

【非特許文献1】2009年10月15～17日 公益社団法人 日本地下水学会 秋季講演会講演要旨「15. 光ファイバー式圧力計を用いた土中水分量計測に関する研究」

50

【非特許文献2】2010年11月11～13日 公益社団法人 日本地下水学会 秋季講演会講演要旨「15. 光ファイバー土中水分計の開発に関わる水膨潤材料の検討」

【非特許文献3】Alessi, R.S., L. Prunty : Soil-water Determination Using Fiber Optics, Soil Sci, Soc. Am, Vol. 50, pp. 860-863, 1986.

【非特許文献4】Texier, S., S. Pamukcu, J. Toulouse: Advances in subsurface water content measurement with a distributed Brillouin scattering fiber-optic sensor, Proceedings of SPIE, Vol. 5855, pp. 555-558, 2005.

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0011】

前記特許文献1, 2ならびに非特許文献1～4には、後述する本発明に係る水分センサの具体的な構造などについては記載されていない。

【0012】

また、前記非特許文献3の従来技術では、直径約1mmの光ファイバーセンサでの水分量を測定する手法としての課題を有しており、過渡的に局所的な値を求める可能性があることが記載されている。

さらに、前記非特許文献4の従来技術では、計測可能な含水率が0～30%の範囲であり、飽和状態に近い含水率の計測は難しいことが記載されている。

本発明の目的は、このような従来技術の欠点を解消し、正確に水分量の測定が可能で実用的な水分センサを提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0013】

前記目的を達成するため本発明の第1の手段は、
吸水あるいは乾燥の状態によって膨潤・収縮する膨潤材料と、
その膨潤材料を充填・保持する膨潤材料保持部と、
その膨潤材料保持部に充填された前記膨潤材料の吸水による膨潤圧で弾性変形するメンブレンと、

そのメンブレンの歪量を検出する圧力センサを備え、
前記圧力センサは、前記メンブレンの歪量を検出するセンサ部を設けた光ファイバーを有し、前記メンブレンの弾性変形によって生じる歪が前記光ファイバーの光軸方向に作用するように構成され、

前記膨潤材料保持部は、両端に開口部を有する筒形をしており、
その膨潤材料保持部の一方の開口部が前記メンブレンによって閉塞され、
前記圧力センサを収納したケーシングの開口部が、前記膨潤材料ならびに前記メンブレン付きの前記膨潤材料保持部によって閉塞され、

前記膨潤材料保持部の周壁と前記メンブレンによって形成される断面形状が凹状の空間部内に前記膨潤材料が充填されて、

水分が含有される被測定物の面に前記膨潤材料保持部の他方の開口部を当接して、前記膨潤材料の一部を前記被測定物の面に直接接触させることを特徴とするものである。

【0014】

本発明の第2の手段は前記第1の手段において、
前記ケーシングがコップ形をしており、そのケーシングの開口部が、前記膨潤材料ならびに前記メンブレン付きの前記膨潤材料保持部によって閉塞され、

前記圧力センサが、
側面形状が略コ字状をした変位-歪変換部材を有し、その変位-歪変換部材の一端が前記メンブレンに取り付けられ、変位-歪変換部材の他端が前記ケーシングの底部に取り付けられて、

前記変位-歪変換部材の中間部で一方側に突出した橋状部の側面に、前記光ファイバーのセンサ部が貼り付けられていることを特徴とするものである。

【0015】

10

20

30

40

50

本発明の第3の手段は前記第1の手段において、
前記ケーシングがコップ形をしており、そのケーシングの開口部が、前記膨潤材料なら
 びに前記メンブレン付きの前記膨潤材料保持部によって閉塞され、
前記圧力センサが、
前記メンブレンから前記ケーシングの底部に向けて取り付けられた変位伝達部材と、
前記ケーシングの底部から前記変位伝達部材に向けて取り付けられたファイバー支持部
 材と、
前記変位伝達部材と前記ファイバー支持部材の間に形成された隙間部に前記センサ部が
 配置されるように、前記変位伝達部材から前記ファイバー支持部材に掛けて固定された光
 ファイバーから構成されていることを特徴とするものである。

10

【0016】

本発明の第4の手段は前記第1ないし第3のいずれかの手段において、
前記センサ部が、当該光ファイバーのコア部の光軸線上に屈折率の異なる回折格子を一
 定の間隔で並設した構成によっていることを特徴とするものである。

【0017】

本発明の第5の手段は、
前記第4の手段に記載のセンサ部が1本の光ファイバーに対して任意の間隔をおいて複
 数個取り付けることができることを特徴とするものである。

【0018】

本発明の第6の手段は前記第1ないし第5のいずれかの手段において、
前記センサ部が、当該光ファイバーのコア部の光軸線上に第1の半透過ミラーと第2の
 半透過ミラーを空隙を介して対向・配置して、前記第1の半透過ミラーで反射した第1の
 反射光と、前記第2の半透過ミラーで反射した第2の反射光を、波長毎に分離して干渉さ
 せる構成になっていることを特徴とするものである。

20

【0019】

本発明の第7の手段は前記第1ないし第6のいずれかの手段において、
前記膨潤材料が、ウレタン系の膨潤性ゴム材料であることを特徴とするものである。

【発明の効果】

【0024】

本発明は前述のような構成になっており、正確に水分量の測定が可能で実用的な水分セ
 ンサを提供することができる。

30

【図面の簡単な説明】

【0025】

【図1】本発明の第1実施例に係る水分センサの断面図である。

【図2】その第1実施例に係る水分センサの膨潤・収縮試験を行った結果を示す特性図で
 ある。

【図3】本発明の第2実施例に係る水分センサの断面図である。

【図4】F B G方式における光ファイバー式圧力センサの原理説明図で、(a)は複数個
 のF B Gセンサ部を備えた光ファイバーの側面図、(b)はF B Gセンサ部の内部の状態
 を示す拡大図である。

40

【図5】F B Gセンサ部の構成図である。

【図6】F B Gセンサ部に入射される入力光、F B Gセンサ部で反射される反射光、F B
 Gセンサ部を透過する透過光の波形図である。

【図7】F P Iセンサ部の構成図である。

【図8】各膨潤材料の試料No.と材料名と材料形状をまとめた図表である。

【図9】各膨潤材料の膨潤性、収縮性、耐久性、加工性ならびに水質依存性について検討
 した結果をまとめた図表である。

【図10】各膨潤材料について膨潤・収縮特性試験を行った結果をまとめた図表である。

【図11】試料No. 9, 11, 13の膨潤材料について、繰り返し膨潤・収縮試験を行
 った結果をまとめた図表である。

50

【図 1 2】本発明における圧力センサの第 1 の具体例を示す水分センサの断面図である。

【図 1 3】本発明における圧力センサの第 2 の具体例を示す水分センサの断面図である。

【図 1 4】本発明における圧力センサの第 3 の具体例を示す水分センサの断面図である。

【図 1 5】本発明の実施例に係る F B G 方式の複数個の水分センサ部を土中に埋設して水分量を計測する多連装計測が可能な水分センサ群を示す概略構成図である。

【図 1 6】本発明の実施例に係る F B G 方式あるいは F P I 方式の複数個の水分センサ部を土中に埋設して水分量を計測する水分センサ群を示す概略構成図である。

【図 1 7】本発明の第 3 実施例に係るコンクリート中の水分量を測定する水分センサの一部断面図である。

【発明を実施するための形態】

10

【0026】

(光ファイバー式圧力センサの原理)

光ファイバーを用いた水分センサを検討する上で、計測システムの精度や大きさなどを考慮すると、F B G 方式または F P I 方式が例えば O T D R 方式、B-O T D R 方式、R-O T D R 方式などの他の方式に比べて特に好適である。

前記 F B G は、Fiber Bragg Grating の略で、光ファイバーのコア部の一部に回折格子と呼ばれる屈折率の異なる部分を一定間隔で格子状に並べることにより、その間隔に比例した特定の波長の光だけが反射される。この部分を F B G センサ部として利用するものである。真空中の光の速度に対応した反射波長 λ_0 は、下記 (1) 式によって示される。

$$\lambda_0 = 2 n D \cdot \cdot \cdot (1)$$

20

式中 λ_0 は反射波長、 n は屈折率、 D は回折格子の間隔である。

【0027】

また、波長、圧力、温度の関係は下記 (2) 式によって示される。

$$(\partial \lambda / \lambda) = A \varepsilon + B d T \cdot \cdot \cdot (2)$$

式中 λ は波長、 A 、 B は係数、 ε は歪、 T は温度である。

【0028】

このように反射波長 λ_0 は (1) 式により回折格子の間隔 D が伸縮すると、それに応じて反射波長 λ_0 が変化する。従ってこの反射波長 λ_0 を計測すれば F B G 歪 ε が分かる。その歪 ε に基づいて圧力の大きさを知ることができる。なお、屈折率 n は温度 T によって変化する。

30

【0029】

次に本発明の実施例を図面と共に説明する。

図 4 は、F B G 方式における光ファイバー式圧力センサの原理説明図で、同図 (a) は複数個の F B G センサ部を備えた光ファイバーの側面図、同図 (b) は F B G センサ部の内部の状態を示す拡大図である。図 5 は F B G 圧力・温度センサの一例を示す構成図、図 6 は F B G センサ部に入射される入力光、F B G センサ部の回折格子で反射される反射光、F B G センサ部の回折格子を透過する透過光の波形図である。

【0030】

図 4 (a) に示すように、1 本の光ファイバー 1 の光軸方向に沿って任意の間隔において複数個 (例えば 6 ~ 7 個) の F B G センサ部 2 を設けることができる。本実施例で用いる光ファイバー 1 は、緩衝層 3 b (図 4 (b) 参照) を含めて外径が 0.25 mm である。

40

【0031】

前記 F B G センサ部 2 の内部には図 4 (b) に示すように、光ファイバー 1 のコア部 3 a に屈折率の異なる回折格子 4 が光軸方向に一定間隔で並設されている。この F B G センサ部 2 は、光ファイバー 1 の先端部あるいは光ファイバー 1 の途中の任意の箇所を特殊加工することにより形成される。

【0032】

前記 F B G センサ部 2 に入射される入力光 5 は図 6 (a) に示すような波長波形を有し、その入力光 5 の一部は F B G センサ部 2 の回折格子 4 で反射され、反射光 6 として戻る

50

。この反射光 6 は、図 6 (b) に示すような波長波形を有している。

【0033】

F B G センサ部 2 の回折格子 4 を透過した透過光 7 は図 6 (c) に示すように、当該 F B G センサ部 2 に入射された入力光 5 から F B G センサ部 2 で反射した反射光 6 が部分的に抜け落ちた形の波長波形となり、次に波長の異なる隣の F B G センサ部 2 に入力光 5 としてそのまま入射される仕組みになっている。

【0034】

このようなことから F B G 方式の圧力センサには、レーザー光のような単一波長ではなく、幅広い周波数帯域を有する広帯域光が用いられ、実用的には 1 本の光ファイバー 1 で 6 ~ 7 点の多連装計測が可能であり、F B G 方式の大きな特長となっている。

10

【0035】

F B G センサ部 2 の具体的な構成は図 5 に示すように、光ファイバー 1 がステンレス管などの保護チューブ 8 内に収納されており、保護チューブ 8 の一方の開口端は薄い弾性変形可能なメンブレン 9 の固定により閉塞されている。このメンブレン 9 の内面に光ファイバー 1 の先端部が接着剤などによって固定 10 され、また、光ファイバー 1 の F B G センサ部 2 以外の箇所が保護チューブ 8 の内周面に接着剤などによって固定 10 されている。前記保護チューブ 8 は、合成樹脂や合成ゴムなどの電気絶縁性チューブで構成されている。

【0036】

F B G センサ部 2 には予め光軸方向に沿って引っ張り応力が掛けられており、図 5 に示すようにメンブレン 9 に圧力 11 が作用するとメンブレン 9 の中央部が F B G センサ部 2 側に押圧変形され、その度合により F B G センサ部 2 が歪、F B G センサ部 2 で生じる反射光 6 (図 4 (b) 参照) の波長が変化する。

20

【0037】

前記 F P I は、Fabry-Perot Interferometer の略で、図 7 は F P I センサ部の構成図である。

【0038】

図 7 に示すように、光ファイバー 1 の光軸線上に、2 枚の第 1 の半透過ミラー 12 a と第 2 の半透過ミラー 12 b が空隙 13 を介して対向・配置されている。第 1 の半透過ミラー 12 a は伝播用光ファイバー 1 a に支持され、第 2 の半透過ミラー 12 b は反射用光ファイバー 1 b に支持されている。この F P I センサ部は、光ファイバー 1 の先端部を特殊加工することによって形成される。

30

【0039】

白色光を入力光 5 として入射し、そして第 1 の半透過ミラー 12 a で反射した第 1 の反射光 6 a と、第 2 の半透過ミラー 12 b で反射した第 2 の反射光 6 b を、波長毎に分離して干渉させる方式である。

【0040】

前記空隙 13 (0 ~ 数十 μm) が空洞長 (I) となり、センサ内部では伝播用光ファイバー 1 a と反射用光ファイバー 1 b が 3 ~ 10 mm のゲージ長 (Lg) で、保護チューブ 8 あるいはメンブレン 9 に固定 10 されている。水圧 11 にともなう圧力は、ゲージ長 (Lg) に対する空洞長 (I) の比率 (I / Lg) として測定される。単純な干渉では、出力は縞模様として現れるから、縞模様上の縞数を数えることで圧力を計測することができる。

40

【0041】

この F P I 方式における光ファイバー式圧力センサは、 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ の高精度測定が可能で、分解性能ならびに温度特性も優れており、動的な変化の計測ができる。

【0042】

本発明に係る光ファイバーを用いた水分センサの測定原理は、前述の光ファイバーを用いた F B G 方式または F P I 方式の圧力センサを、土中水分量の変化に応じて伸縮させることで測定するものである。そのため水分センサのセンサ部を効果的に伸縮させるのに膨

50

潤材料が用いられる。

【0043】

(膨潤材料の選択)

一般に膨潤材料は、合成ゴム、スポンジ状ゴム、高吸水高吸湿繊維（不織布）、高分子ポリマーの4種類に分類される。図8は各膨潤材料の試料No.と材料名（記号で簡略表示）と材料形状をまとめた図表、図9は各膨潤材料の膨潤性、収縮性、耐久性、加工性ならびに水質依存性について検討した結果をまとめた図表である。

【0044】

図8に示すように試料No. 1～9の合成ゴムに関しては、材料形状が固形状（試料No. 1, 2）、ペースト状（試料No. 3, 4）、ウレタン原液からなる液状（試料No. 5～9）のものがある。また、図9に示す高分子ポリマーは紙おむつなどに使用される材料であり、膨潤性は他の材料に比べて優れているが、収縮性に関しては前記試料No. 5～9の液状合成ゴムよりも劣り、膨潤特性は水質に強く依存するという欠点があり、水分センサ用としては不適合と判断した。そのため図8には高分子ポリマーを掲載していない。

10

【0045】

次に図8に示す試料No. 1～13について膨潤・収縮特性試験を行い、その結果を図10にまとめて示した。この膨潤・収縮特性試験は、各材料からなる供試体を開放した（拘束しない）状態で蒸留水に浸漬して膨潤させ、その後に乾燥収縮させて、そのときの体積変化量を測定した。体積変化は、供試体に付けたマーカーを基準にその変化量をノギス

20

【0046】

この膨潤・収縮特性試験の結果、試料No. 1（固形状合成ゴム）、2（固形状合成ゴム）、3（ペースト状合成ゴム）、4（ペースト状合成ゴム）、10（スポンジ状ゴム）、12（スポンジ状ゴム）は、膨潤過程で4～8日以上、収縮過程で3～5日以上長時間を要した。土中の水分量を計測するセンサとしては、反応時間が非常に重要な要素である。従って、これらの材料は水分センサの膨潤材料としては不適合と判断した。

【0047】

試料No. 5（液状合成ゴム）、6（液状合成ゴム）は、膨潤体積倍率が1.02～1.05倍と他の膨潤材料と比較して小さい。試料No. 7（液状合成ゴム）は、材料が硬化しなかったため、膨潤材料から除外した。試料No. 8（液状合成ゴム）は、膨潤および収縮時間は1日で、膨潤体積倍率も3.4倍と比較的大きい値であったが、収縮過程において初期よりも材料が収縮したため、膨潤材料から除外した。

30

【0048】

試料No. 9（液状合成ゴム）、13（不織布）は、膨潤過程で数秒～1日で膨潤し、収縮過程では1日で収縮して反応時間は短時間であった。また試料No. 11（スポンジ状ゴム）は、1日で膨潤し、収縮過程においては2日を要したが、膨潤体積倍率においては2倍以上の高倍率であり、水分センサの受感部に圧力を与えるものとして好適であると判断した。これらの判定結果は、図10の判定の欄に記載されている。

【0049】

次に試料No. 9, 11, 13の3種類の膨潤材料について、繰り返し膨潤・収縮試験を行い、その結果を図11に示す。この試験方法は、膨潤・収縮過程における測定時間をそれぞれ1日と設定し、供試体を拘束しない状態で膨潤・収縮を5回繰り返して、体積変化量の経時変化を測定した。

40

【0050】

この図から明らかのように、試料No. 11, 13は、形状の再現性が得られず、重量も減少する傾向を示した。この原因として、膨潤・収縮を繰り返すことにより、材料中の高吸水性樹脂が溶出していることが考えられる。これに対して試料No. 9は形状の再現性があり、水分センサ受感部の膨潤材料として安定した材料であることを確認した。本実施例で使用する試料No. 9はウレタン系の膨潤性ゴム材料で、例えば株式会社アデカ

50

商品名 A-50N などがある。この商品名 A-50N は、ウレタンプレポリマーと可塑剤とトルエンジイソシアネートを含んだウレタン系の液状ゴム材料である。

【0051】

本発明の光ファイバーを用いた水分センサは、図5あるいは図7で説明した光ファイバー式圧力センサの原理を応用した水分センサである。例えば土中の水分センサのように土圧や耐久性の面で様々な影響があることから、土中への設置を考慮した構造になっている。

【0052】

(第1実施例)

図1は、本発明の第1実施例に係る水分センサの断面図である。

10

図1に示すように、コップ形をした例えばステンレス鋼などの金属あるいは硬質合成樹脂からなるケーシング21の下端開口部は、蓋形をした例えばステンレス鋼あるいは硬質合成樹脂などの剛性材料からなる保持ブロック22で閉塞されている。具体的には、ケーシング21の下端開口部に保持ブロック22が螺合されている。保持ブロック22の略中央部には平面形状が円形で容器型(断面凹型)をした収納部23が一体に設けられており、収納部23はケーシング21の下端部よりも若干突出して凸型構造になっている。

【0053】

その収納部23の底部ならびに周壁には、孔径が例えば1~2mm程度の多数の透孔24が形成されている。

収納部23の内側には、ウレタン系の膨潤性ゴム材料からなる前記試料No.9の膨潤材料25が充填されている。断面凹型をした収納部23の上方開口部は、薄くて弾性変形可能な金属製のメンブレン26によって閉塞されている。メンブレン26の周辺部は、収納部23の開口部に固定されている。

20

【0054】

後述するメンブレン26の押圧変形は、ケーシング21内に収納されている圧力センサ27によって検出される。本発明で適用される圧力センサ27の具体的な構成については後で説明する。

【0055】

この水分センサを土中に埋設すると、土中の水分28が収納部23の底部ならびに周壁の透孔24から内部に浸透して、それを膨潤材料25が吸収して膨潤し、その膨潤圧29によってメンブレン26の中央部が盛り上がるように押圧変形される。

30

【0056】

そしてこのメンブレン26の押し上げ力30(圧力)大きさは圧力センサ27によって計測され、それによって土中の水分量が検出できる。

【0057】

土中の水分量が多いと、膨潤材料25は多量の水分を吸収して大きく膨潤し、その膨潤圧29によりメンブレン26の押し上げ力30は大きい。反対に土中の水分量が少ないと、膨潤材料25の吸水に伴う膨潤圧29は低く、押し上げ力30は小さい。

【0058】

図2は、外径6mm、高さ4.5mmの収納部23に膨潤材料25を充填した圧力発生部を有する水分センサの膨潤・収縮試験を行った結果を示す特性図である。この試験は、恒温室内の温度を23℃、湿度を50%と一定にし、蒸留水を入れた容器内に水分センサを浸漬させて、膨潤圧力の経時変化を見たものである。

40

【0059】

この膨潤・収縮試験の結果、膨潤時間は約10時間、膨潤圧力は4.5MPaで、短時間で膨潤し、膨潤圧力も十分であることから、土中水分センサとして好適であることが分かった。なお、圧力発生部における膨潤材料25の充填量を調整することにより、膨潤圧力の調整が可能である。

【0060】

本実施例では保持ブロック22の略中央部に収納部23を設けて、その収納部23が保

50

持ブロック 2 2 の底部から突出した凸状構造になっているが、全体が容器状をした保持ブロック 2 2 を用いて、その容器状保持ブロック 2 2 の底部あるいは必要に応じて周壁部に、多数の透孔 2 4 を形成することも可能である。

【0061】

(第 2 実施例)

図 3 は、本発明の第 2 実施例に係る水分センサの断面図である。本実施例で前記第 1 実施例と相違する点は、圧力発生部の構成である。

【0062】

ケーシング 2 1 の下端開口部に装着される保持ブロック 2 2 が、例えばステンレス鋼などの金属からなる筒体 3 1 と、その筒体 3 1 の下端開口部を閉塞する円盤状の硬質多孔質体 3 2 から構成されている。この多孔質体 3 2 は、所定の大きさの金属粒子を互いに焼結したポーラスメタルからなり、径が 1 ~ 2 mm 程度の連続した細孔を有し、複数本のネジ 3 3 によって筒体 3 1 に固定されている。

10

【0063】

この多孔質体 3 2 の上面と筒体 3 1 の内周面によって形成される空間部内には、ウレタン系の膨潤性ゴム材料からなる前記試料 No. 9 の膨潤材料 2 5 が充填されている。保持ブロック 2 2 (筒体 3 1) の上端開口部は、薄くて弾性変形可能なメンブレン 2 6 によって閉塞されており、メンブレン 2 6 の周辺部は保持ブロック 2 2 (筒体 3 1) の上端開口部に固定されている。

20

【0064】

この水分センサを土中に埋設していると、土中の水分 2 8 が多孔質体 3 2 の細孔から内部に浸透して、それを膨潤材料 2 5 が吸収して膨潤し、その膨潤圧 2 9 によってメンブレン 2 6 の中央部が盛り上がるように押圧変形される。

【0065】

そしてこのメンブレン 2 6 の押し上げ力 3 0 の大きさは圧力センサ 2 7 によって計測され、それによって土中の水分量が検出できる。

【0066】

本実施例では金属焼結体からなる多孔質体を用いたが、無機粒子の焼結体からなる透水性の多孔質体を用いることも可能である。

また本実施例では円盤状の多孔質体 3 2 を用いたが、例えば底部と周壁部とを一体に形成した容器状の多孔質体を用いることも可能である。

30

【0067】

図 1 2 は圧力センサ 2 7 の第 1 の具体例を示す水分センサの断面図で、この具体例では F B G 方式の圧力センサが用いられている。

図 1 2 に示すように、側面形状が略コ字状をした金属板からなる変位-歪変換部材 3 3 がケーシング 2 1 内に配置されており、変位-歪変換部材 3 3 の一端 3 4 a がメンブレン 2 6 の中央部に接合され、変位-歪変換部材 3 3 の他端 3 4 b がケーシング 2 1 の底部 3 5 に接合されている。

【0068】

この変位-歪変換部材 3 3 の中間部で一方側に突出した橋状部 3 6 の側面に、光ファイバー 1 の先端部に設けられた F B G 圧力センサ部 2 が、張力を付与した状態で貼り付けられている。

40

【0069】

前述のように土中の水分 2 8 を膨潤材料 2 5 が吸収して膨潤し、その膨潤圧 2 9 によってメンブレン 2 6 の中央部が盛り上がるように押圧変形すると、その押し上げ力 3 0 は変位-歪変換部材 3 3 に作用して、変位-歪変換部材 3 3 の橋状部 3 6 が外側に向けて湾曲する。この橋状部 3 6 には光ファイバー 1 の F B G 圧力センサ部 2 が貼り付けられているため、橋状部 3 6 の湾曲度合いから歪量を検出することができる。

なお、土中の水分量と歪量との関係は予め把握されており、歪量を検出すると土中の水分量が分かるようになっている。

50

【0070】

図13は圧力センサ27の第2の具体例を示す水分センサの断面図で、この具体例でもF B G方式の圧力センサが用いられている。

この具体例の場合図13に示すように、メンブレン26の中央部からケーシング21の底部35に向けて金属板からなる変位伝達部材37が立設されている。また、ケーシング21の底部35から前記変位伝達部材37に向けて金属板からなるファイバー支持部材38が垂設されており、変位伝達部材37とファイバー支持部材38の間には隙間部39が形成されている。

【0071】

そして光ファイバー1の先端部が変位伝達部材37からファイバー支持部材38に掛けて貼り付けられており、光ファイバー1に設けられたF B G圧力センサ部2が隙間部39の位置において、張力を付与した状態で架設されている。

10

【0072】

この具体例の場合、土中水分28の吸収に伴う膨潤材料25の膨潤圧29によってメンブレン26の中央部が盛り上がり、その押し上げ力30（圧力）は変位伝達部材37を介して光ファイバー1のF B G圧力センサ部2に伝達され、メンブレン26の歪量を検出することができる。

【0073】

前記第1ならびに第2の具体例における変位—歪変換部材33ならびに変位伝達部材37は、メンブレン26の歪をF B G圧力センサ部2の光軸方向に伝達する機能を有している。

20

【0074】

図14は圧力センサ27の第3の具体例を示す水分センサの断面図で、この具体例では歪ゲージ式の圧力センサが用いられている。

この具体例の場合図14に示すように、メンブレン26の上面に抵抗ブリッジからなる歪ゲージ40が貼られており、押し上げ力30によって変化するメンブレン26の歪量を電圧変化として検出することができる。

【0075】

なお、メンブレン26の位置によって歪量が違う場合があるため、複数個所（本具体例では4個所）にわたって歪ゲージ40を貼り着けて、検出値の偏りを抑制している。図中の41は中継基板、42はセンサケーブルである。

30

【0076】

前記具体例では、F B G方式の圧力センサや電気式圧力センサを用いた場合について説明したが、本発明はF P I方式、O T D R方式、B—O T D R方式のなどの他の光学式センサを用いる場合、あるいは不純物拡散によって形成されたシリコンゲージが形成されたシリコンチップを有する半導体式圧力センサを用いる場合にも適用可能である。

【0077】

図15は、F B G方式の複数個（本実施例7個）の水分センサ部47a～47gを土中45の深さ方向に連続して埋設することにより、各深さでの水分量を計測する多連装計測が可能な水分センサ群を示している。なお、図中の符号25はセンサ内部に装填された膨潤材料、26はメンブレンである。

40

【0078】

図15に示すように、各水分センサ部47a～47gを様々な方向に向けて埋設することにより、土中45のあらゆる方面の水分量計測が可能となる。

【0079】

各水分センサ部47a～47gからのデータは計測装置43に入力されて土中45の水分量が計測され、得られた計測データは記録装置44に記録されて、土中水分量の監視が行われる。

【0080】

本実施例のように土中45の深さ方向に所定の間隔をおいて複数個の水分センサ部47

50

a～47gを埋設しておけば降水46の土中45での浸透状況を直接的確に把握することができる。

【0081】

図16は、FBG方式あるいはFPI方式の複数個の水分センサ部48a～48cを土中45に個別に埋設して、土中45の水分量を計測する水分センサ群を示している。この場合、各水分センサ部48a～48cの深さを変えて土中45に埋設しているが、同じ深さで埋設位置をそれぞれ変えることも可能である。

【0082】

この場合も各水分センサ部48a～48cのデータは計測装置43に入力されて土中45の水分量が計測され、得られた計測データは記録装置44に記録されて、土中水分量の監視が行われる。

10

【0083】

前記個々の水分センサ部47、48は、図1または図3に示す構造を有している。

また、個々の水分センサ部47、48は、監視対象領域の土中に孔を形成して、その孔の中に水分センサ部を埋め込むことができる。また、廃棄体周辺に緩衝材層を設ける場合には、緩衝材層を形成する際に粘土（ベントナイト）と一緒に水分センサ部をそれぞれの位置・向きに配置して、水分センサ付きの緩衝材層を形成することもできる。

【0084】

前記実施例では土中の水分量を計測する場合について説明したが、本発明は例えば硬化後のコンクリートに孔を開けて、その孔に水分センサを埋めて、コンクリート中の水分量など他の対象物中の水分の検出・測定にも適用可能である。

20

【0085】

図17は、本発明の第3の実施例に係るコンクリート中の水分量を測定する水分センサの一部断面図である。

コップ形をしたケーシング21の下端開口部には両端に開口部を有する筒形の保持ブロック22が装着され、保持ブロック22の高さ方向の中間部内側はメンブレン26によって閉塞されており、メンブレン26の周辺部はその保持ブロック22の中間部に固定されている。

【0086】

ケーシング21の内側には前記具体例で説明したうちの1つの圧力センサ27が装着されている。保持ブロック22の略下半分の内周面とメンブレン26の下面によって形成される断面形状が凹状の空間部内には、ウレタン系の膨潤性ゴム材料からなる前記試料No. 9の膨潤材料25が充填されている。

30

【0087】

この膨潤材料25を充填した保持ブロック22の下端開口部を、水分量を測定しようとするコンクリート49の面50に当接して、前記下端開口部をコンクリート面50に接着剤51で固定する。そのため膨潤材料25の一部が、コンクリート面50に直接接触する構造になる。

【0088】

コンクリート49中の水分28は保持ブロック22の下端開口部から膨潤材料25に吸収され、それに伴って発生する膨潤圧29はメンブレン26に作用し、メンブレン26の歪量が圧力センサ27によって計測され、コンクリート49中の水分量が検出できる。

40

【0089】

なお、図1に示す収納部23の透孔24内、あるいは図3に示す多孔質体32内の細孔内に水分28が溜まるが、この実施例の場合は膨潤材料25がコンクリート面50に直接接触しているため、膨潤材料25に直に吸収されるという特長を有している。

【符号の説明】

【0090】

- 1：光ファイバー、
- 2：FBGセンサ部、

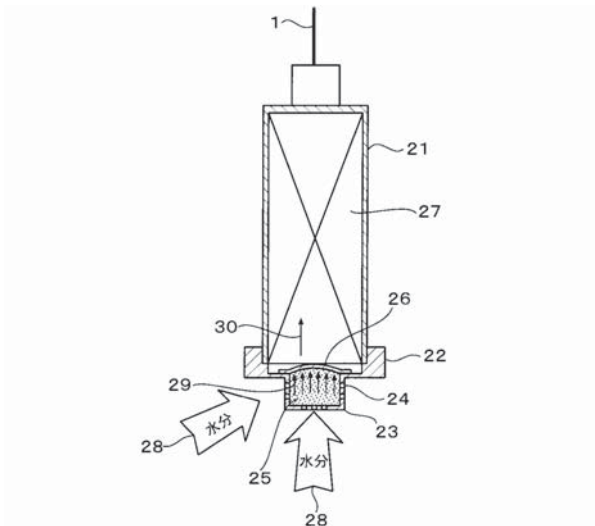
50

- 4：回折格子、
- 5：入力光、
- 6：反射光、
- 7：透過光、
- 9：メンブレン、
- 11：圧力、
- 12a：第1の半透過ミラー、
- 12b：第2の半透過ミラー、
- 13：空隙、
- 21：ケーシング、
- 22：保持ブロック、
- 23：収納部、
- 24：透孔、
- 25：膨潤材料、
- 26：メンブレン、
- 27：圧力センサ、
- 28：水分、
- 29：膨潤圧、
- 30：押し上げ力、
- 31：筒体、
- 32：多孔質体、
- 45：土中、
- 47, 48：水分センサ部。

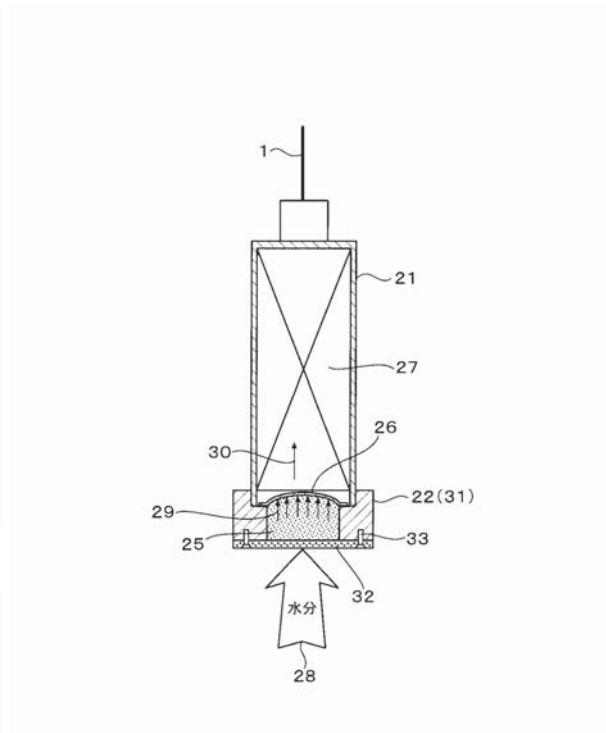
10

20

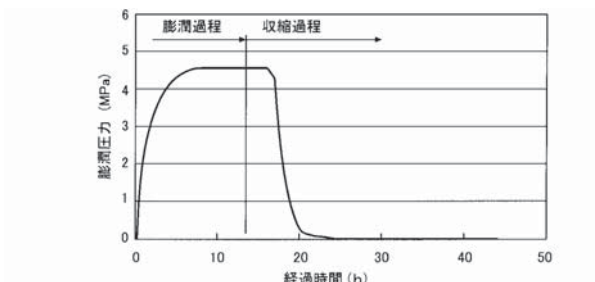
【図1】



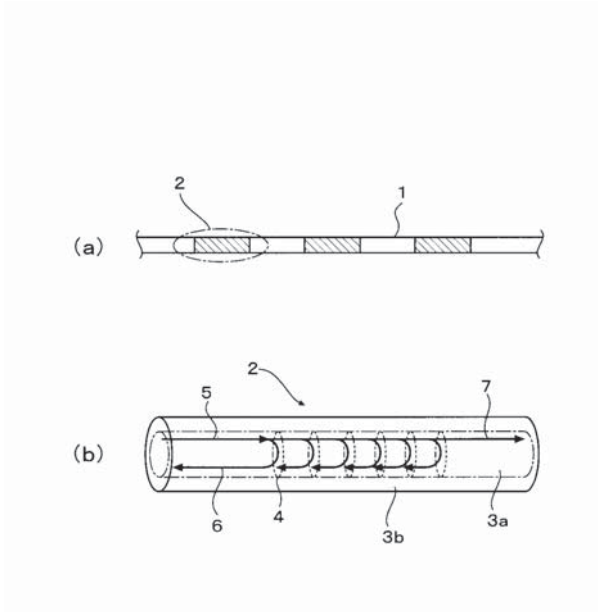
【図3】



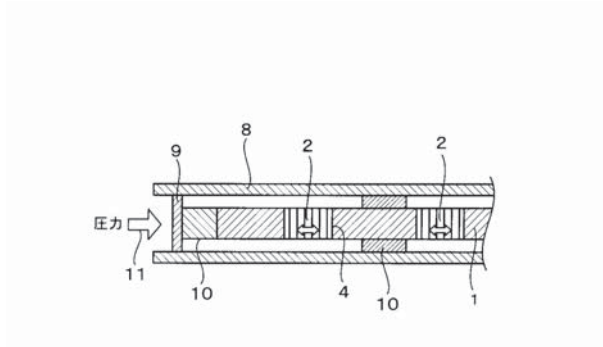
【図2】



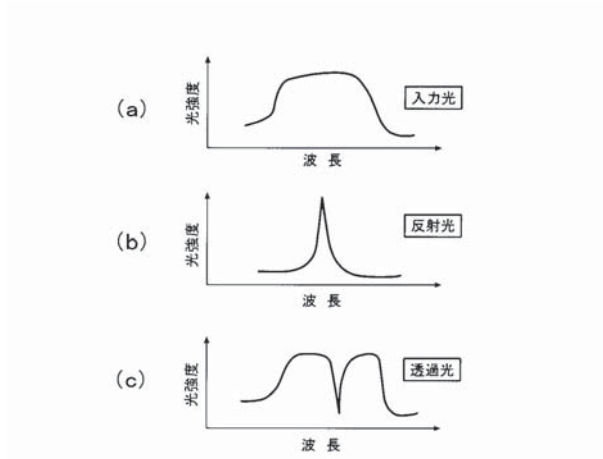
【図4】



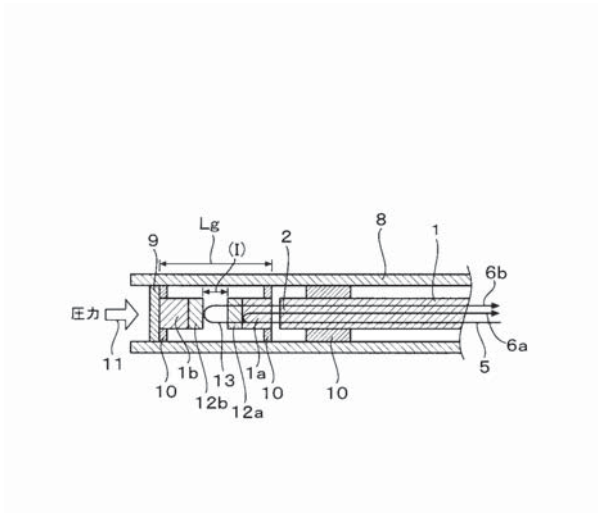
【図5】



【図6】



【図7】



【図8】

No.	材料名	材料形状
1	So1	合成ゴム (圓形状)
2	So2	合成ゴム (圓形状)
3	Pa1	合成ゴム (ペースト状)
4	Pa2	合成ゴム (ペースト状)
5	L10	合成ゴム (液状)
6	L11	合成ゴム (液状)
7	L13	合成ゴム (液状)
8	L30	合成ゴム (液状)
9	L50	合成ゴム (液状)
10	Sp1	スポンジ状ゴム
11	Sp2	スポンジ状ゴム
12	Sp3	スポンジ状ゴム
13	Nw	不織布

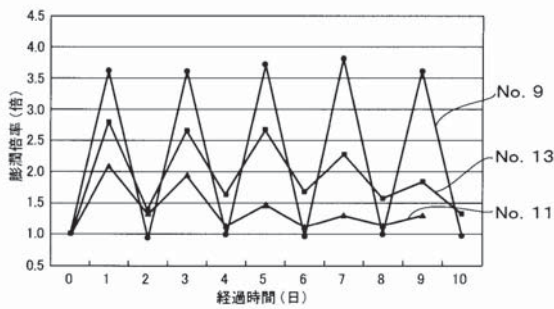
【図 9】

材料分類		材料検討結果				
		膨潤性	収縮性	耐久性	加工性	水質依存性
合成ゴム	固形状	△	△	○	○	○
	ペースト状					
	液状					
スポンジ状ゴム	○	○	○	○	○	
高吸水高吸湿繊維(不織布)	○	○	○	△	○	
高分子ポリマー	◎	×	△	○	×	

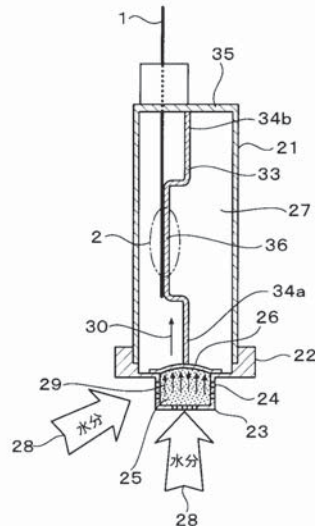
【図 10】

No.	材料名	材料形状	膨潤過程		収縮過程		判定	
			経過時間	倍率	経過時間	体積収縮状況		
1	So1	合成ゴム (固形状)	4日	1.9倍 (4日時点)	3日以上	3日で初期に戻らず	x	
2	So2	合成ゴム (固形状)	8日以上	1.9倍 (8日時点)	5日以上	5日で初期に戻らず	x	
3	Pa1	合成ゴム (ペースト状)	4日	1.7倍 (4日時点)	3日	初期と同様	x	
4	Pa2	合成ゴム (ペースト状)	4日	2.0倍 (4日時点)	3日	初期より若干増	x	
5	L10	合成ゴム (液状)	1日	1.02倍 (1日時点)	1日	初期と同様	-	
6	L11	合成ゴム (液状)	1日	1.05倍 (1日時点)	1日	初期と同様	-	
7	L13	合成ゴム (液状)	材料が硬化せず、除外					-
8	L30	合成ゴム (液状)	1日	3.4倍 (1日時点)	1日	初期より収縮	x	
9	L50	合成ゴム (液状)	1日	3.8倍 (1日時点)	1日	初期と同様	○	
10	Sp1	スポンジ状ゴム	8日以上	1.9倍 (8日時点)	1日	初期より収縮	x	
11	Sp2	スポンジ状ゴム	1日	2.3倍 (1日時点)	2日	形状変形あり	△	
12	Sp3	スポンジ状ゴム	8日以上	1.6倍 (8日時点)	5日以上	5日で初期に戻らず	x	
13	Nw	不織布	数秒	3.0倍 (瞬時)	1日	形状変形あり	○	

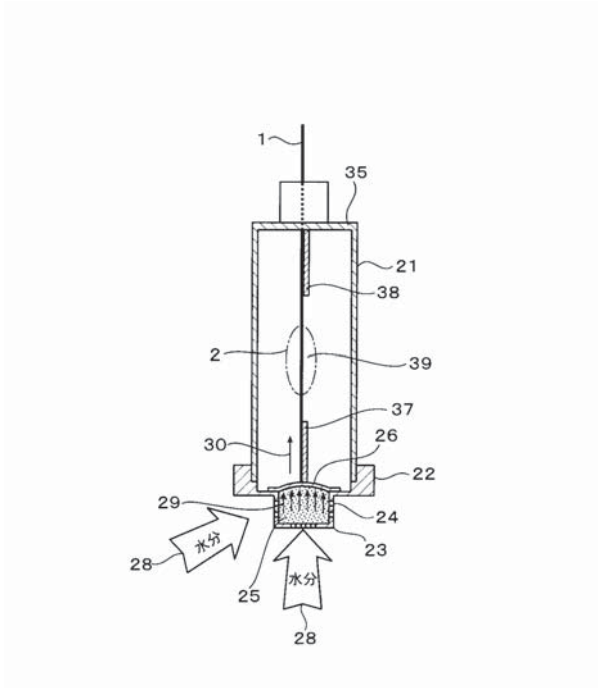
【図 11】



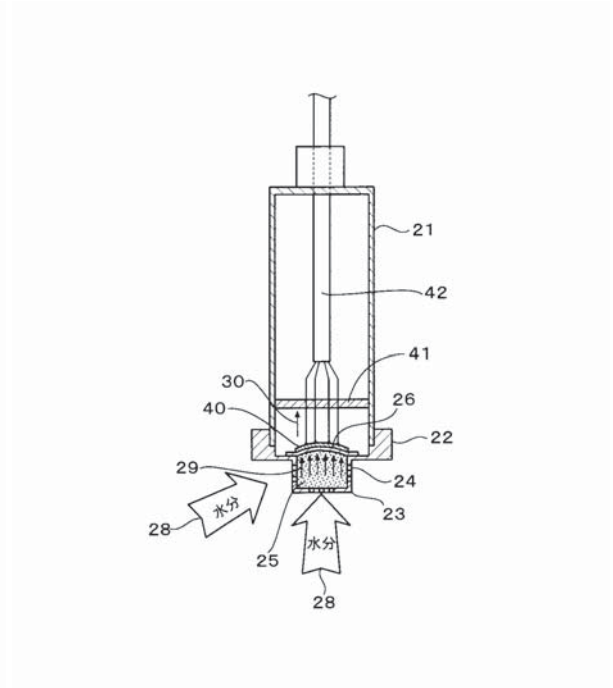
【図 12】



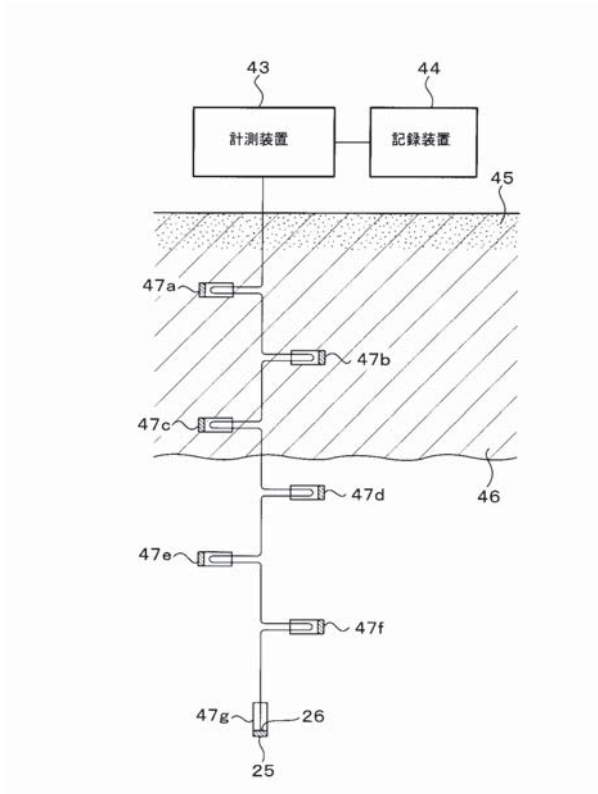
【図 1 3】



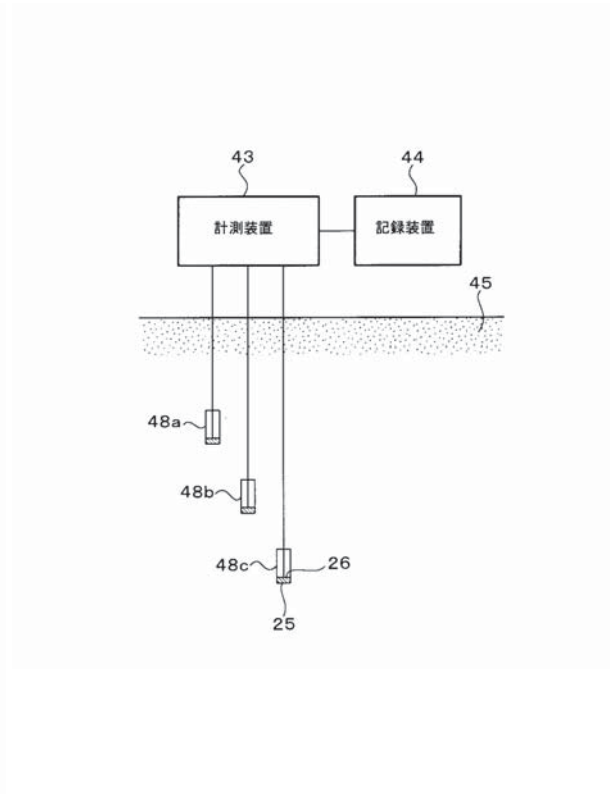
【図 1 4】



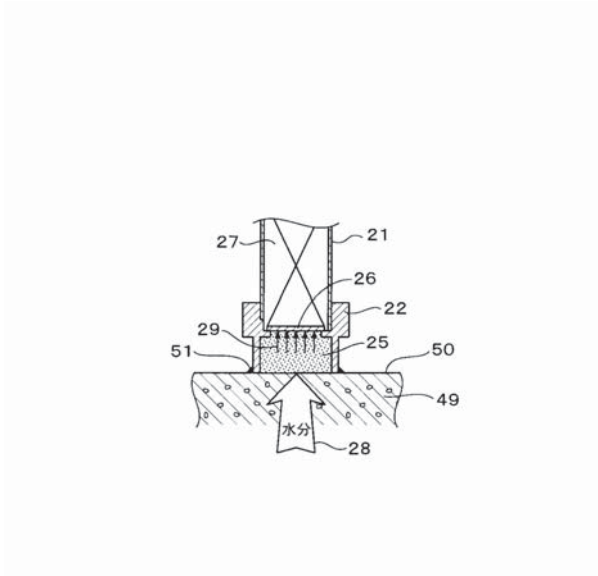
【図 1 5】



【図 1 6】



【図 17】



フロントページの続き

- (72)発明者 山本 陽一
北海道天塩郡幌延町北進432番2 独立行政法人日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター内
- (72)発明者 國丸 貴紀
岐阜県土岐市京町定林寺959番地31 独立行政法人日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター内
- (72)発明者 前川 恵輔
茨城県那珂郡東海村村松4番33 独立行政法人日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター核燃料サイクル工学研究所内
- (72)発明者 西垣 誠
岡山県岡山市北区津島中一丁目1番1号 国立大学法人岡山大学内
- (72)発明者 小松 満
岡山県岡山市北区津島中一丁目1番1号 国立大学法人岡山大学内
- (72)発明者 瀬尾 昭治
東京都港区元赤坂一丁目3番1号 鹿島建設株式会社内
- (72)発明者 戸井田 克
東京都港区元赤坂一丁目3番1号 鹿島建設株式会社内
- (72)発明者 田岸 宏孝
東京都文京区千駄木三丁目43番3号 株式会社アサノ大成基礎エンジニアリング内
- (72)発明者 竹延 千良
東京都文京区千駄木三丁目43番3号 株式会社アサノ大成基礎エンジニアリング内

審査官 北川 創

- (56)参考文献 特開昭62-294939 (JP, A)
特開昭63-200062 (JP, A)
特開2008-107295 (JP, A)
特開昭56-089056 (JP, A)
特開2010-237205 (JP, A)
特開平02-156135 (JP, A)
特開2002-116094 (JP, A)
米国特許第05243670 (US, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01N 19/10
G01N 33/24
G01N 7/00 - 7/22
G01L 9/00 - 9/18