JAEA-Research 2012-001



# 土中水分観測手法としての光ファイバー計測技術の開発 (共同研究)

Developing the Soil Moisture Sensor using Optical Fiber Technique (Joint Research)

小松 淌	5 西	垣 誠	瀬尾	昭治	平田	洋一	
竹延日	F良	田岸 宏	孝	國丸	貴紀	前川	恵輔
山本 陽	昜—	戸井田	克	中野	勝志		

Mitsuru KOMATSU, Makoto NISHIGAKI, Shoji SENO, Yoichi HIRATA Kazuyoshi TAKENOBU, Hirotaka TAGISHI, Takanori KUNIMARU, Keisuke MAEKAWA Yoichi YAMAMOTO, Masaru TOIDA and Katsushi NAKANO

> 地層処分研究開発部門 幌延深地層研究ユニット

Horonobe Underground Research Unit Geological Isolation Research and Development Directorate

September 2012

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2012

# 土中水分観測手法としての光ファイバー計測技術の開発 (共同研究)

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門

幌延深地層研究ユニット

小松 満\*<sup>1</sup>, 西垣 誠\*<sup>1</sup>, 瀬尾 昭治\*<sup>2</sup>, 平田 洋一\*<sup>3</sup>, 竹延 千良\*<sup>3</sup>, 田岸 宏孝\*<sup>3</sup>, 國丸 貴紀<sup>+1</sup>, 前川 恵輔<sup>+2</sup>, 山本 陽一<sup>\*\*</sup>, 戸井田 克\*<sup>2</sup>, 中野 勝志\*<sup>3</sup>

#### (2012年1月4日 受理)

本研究は、地下水流動解析の上部境界条件として必要となる地下水涵養量を土壌に浸透した水 分量から求める手法に着目し、その算定手法の体系化と現場で安定して長期間計測可能なシステ ムの構築を目的として実施した。計測システムの開発においては、多点かつ長距離にわたる計測 が可能な光ファイバーの歪計測原理を、サクションによる圧力計測、土中湿度計測、吸水膨張材 を適用した体積含水率計測の3方式に適用する場合についてそれぞれ検討した。その結果、サク ションによる圧力計測方法(Type I)、吸水膨張材を適用した体積含水率計測方法(TypeIII)の 2種類の方法を用いた光ファイバー式土中水分計について実用化の目途を得た。

さらに,浅層における降水の土中への浸透量を直接的に計測する手法として,現地水分量の計 測結果から直接浸透量を算定する手法と,不飽和透水係数の値から浸透量を推定する手法につい て現地に計測機器を設置してその有効性を確認した。

本研究は、(独)日本原子力研究開発機構と岡山大学、鹿島建設(株)、(株)アサノ大成基礎エンジニアリ ングとの共同研究に基づいて実施したものである。

幌延深地層研究センター(駐在):〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進 432-2

+1 東濃地科学研究ユニット

- +2 地層処分基盤研究開発ユニット
- ※ 技術開発協力員
- \*1 岡山大学
- \*2 鹿島建設(株)
- \*3 (株)アサノ大成基礎エンジニアリング

#### JAEA-Research 2012-001

# Developing the Soil Moisture Sensor using Optical Fiber Technique (Joint Research)

Mitsuru KOMATSU<sup>\*1</sup>, Makoto NISHIGAKI<sup>\*1</sup>, Shoji SENO<sup>\*2</sup>, Yoichi HIRATA<sup>\*3</sup>, Kazuyoshi TAKENOBU<sup>\*3</sup>, Hirotaka TAGISHI<sup>\*3</sup>, Takanori KUNIMARU<sup>+1</sup>, Keisuke MAEKAWA<sup>+2</sup>, Yoichi YAMAMOTO<sup>\*\*</sup>, Masaru TOIDA<sup>\*2</sup> and Katsushi NAKANO<sup>\*3</sup>

> Horonobe Underground Research Unit Geological Isolation Research and Development Directorate Japan Atomic Energy Agency Horonobe-cho, Teshio-gun, Hokkaido

> > (Received January 4, 2012)

This research focused on methods of estimating the amounts of groundwater recharge, which are normally required as upper boundary conditions in groundwater flow analyses, based on measurements of infiltrating water in the ground, to systematize the methods and establish systems which are stable and measurable on site over a long time. Regarding developing measurement systems, fiber-optic strain measurement methods that enable multiple-point and long-distance measurement were used for measuring three quantities: suction pressure, soil moisture and volumetric water content rate obtained by applying water absorption swelling material, and each measurement was discussed. The results showed that the fiber-optic soil aquameter has two types of practical application: one for measuring suction pressure (Type I), and the other for measuring volumetric water content rate obtained by applying water absorption swelling material (Type III).

Furthermore, by using measurement instruments in actual fields, the validity of the two methods for estimating the rainfall infiltration capacities of shallow-layer soils, that is, estimating the capacities either directly by measurements of soil water or from unsaturated hydraulic conductivities, was confirmed.

Keywords: Soil Moisture Sensor, Optical Fiber Technique, Groundwater Recharge, Volumetric Moisture Content, Suction Measurement, Water Absorption Swelling Material

This study was conducted as the joint research project by JAEA, Okayama University, Kajima Corporation and Asano Taiseikiso Engineering Co., LTD.

- +1 Tono Geoscientific Research Unit
- +2 Geological Isolation Research Unit
- X Collaborating Engineer
- \*1 Okayama University
- \*2 Kajima Corporation
- \*3 Asano Taiseikiso Engineering Co., LTD.

# 目 次

1. 序論	1
1.1 研究の背景及び目的	1
1.2 光ファイバー計測技術の原理と応用	2
1.2.1 光ファイバー計測技術の整理	2
1.2.2 FBG 方式(Fiber Bragg Grating)	3
1.2.3 FPI 方式(Fabry-Perot Interferometer)	4
1.2.4 光ファイバー計測技術に関する従来の研究	5
1.3 原位置土中水分計測による地下水涵養量の評価方法	7
1.3.1 地下水涵養の評価方法	7
1.3.2 現地における水分量の計測手法及び降雨浸透挙動の評価方法	8
1.4 現状での課題の整理	9
第1章 参考文献	10
9 $ + フ - ノ ベー E カ 社) に ト ズ 合 E 社測 の 於 字 ( The s I )$	11
2. 元ノアイハー圧力計による負圧計測の使足(Type I)	11
2.1	11
2.2 負圧計例ビンリの仪止	11 19
2.3 主的校陷員圧計例码歌	11
2.4 ·先物可例	
<ol> <li>光ファイバー湿度計による適用性の検討(Type Ⅱ)</li> </ol>	16
<ol> <li>3. 光ファイバー湿度計による適用性の検討(TypeⅡ)</li> <li>3.1 概説</li> </ol>	16 16
<ol> <li>3. 光ファイバー湿度計による適用性の検討(TypeⅡ)</li> <li>3.1 概説</li> <li>3.2 室内試験による適用性の検討</li> </ol>	16 16 16
<ol> <li>3. 光ファイバー湿度計による適用性の検討(TypeⅡ)</li> <li>3.1 概説</li> <li>3.2 室内試験による適用性の検討</li> <li>3.3 数値解析による適用可能な吸収膨張材の水分特性に関する検討</li> </ol>	16 16 16 21
<ul> <li>3. 光ファイバー湿度計による適用性の検討(TypeⅡ)</li></ul>	16 16 16 21 24
<ul> <li>3. 光ファイバー湿度計による適用性の検討(TypeⅡ)</li></ul>	
<ul> <li>3. 光ファイバー湿度計による適用性の検討(TypeⅡ)</li></ul>	
<ul> <li>3. 光ファイバー湿度計による適用性の検討(Type II)</li> <li>3.1 概説</li> <li>3.2 室内試験による適用性の検討</li> <li>3.3 数値解析による適用可能な吸収膨張材の水分特性に関する検討</li> <li>第 3 章 参考文献</li> <li>4. 光ファイバー水分計測センサの開発(Type III)</li> <li>4.1 概説</li> <li>4.2 吸水膨潤材料調査</li> </ul>	16     16     16     16     21     24     25     2
<ul> <li>3. 光ファイバー湿度計による適用性の検討(TypeⅡ)</li></ul>	16     16     16     16     21     24     25     25     25     25     25     27
<ul> <li>3. 光ファイバー湿度計による適用性の検討(TypeI)</li> <li>3.1 概説</li> <li>3.2 室内試験による適用性の検討</li> <li>3.3 数値解析による適用可能な吸収膨張材の水分特性に関する検討</li> <li>第3章 参考文献</li> <li>4. 光ファイバー水分計測センサの開発(TypeII)</li> <li>4.1 概説</li> <li>4.2 吸水膨潤材料調査</li> <li>4.3 吸水膨潤材料検定</li> <li>4.3.1 膨潤・収縮特性試験</li> </ul>	16     16     16     11     21     22     25     25     25     25     27     27     27     27     27     27
<ol> <li>光ファイバー湿度計による適用性の検討(Type II)</li> <li>3.1 概説</li> <li>3.2 室内試験による適用性の検討</li></ol>	16     16     16     121     22     225     225     225     27     27     31
<ol> <li>光ファイバー湿度計による適用性の検討(TypeI)</li> <li>3.1 概説</li> <li>3.2 室内試験による適用性の検討</li> <li>3.3 数値解析による適用可能な吸収膨張材の水分特性に関する検討</li> <li>第 3 章 参考文献</li> <li>光ファイバー水分計測センサの開発(TypeII)</li> <li>4.1 概説</li> <li>4.2 吸水膨潤材料調査</li> <li>4.3 吸水膨潤材料検定</li> <li>4.3.1 膨潤・収縮特性試験</li> <li>4.3.2 繰返し膨潤・収縮試験</li> <li>4.3.3 膨潤圧試験</li> </ol>	16     16     16     121     22     225     225     225     27     27     27     31     32
<ol> <li>3. 光ファイバー湿度計による適用性の検討(TypeII)</li> <li>3.1 概説</li> <li>3.2 室内試験による適用性の検討</li> <li>3.3 数値解析による適用可能な吸収膨張材の水分特性に関する検討</li> <li>第 3 章 参考文献</li> <li>4. 光ファイバー水分計測センサの開発(TypeIII)</li> <li>4.1 概説</li> <li>4.2 吸水膨潤材料調査</li> <li>4.3 吸水膨潤材料検定</li> <li>4.3.1 膨潤・収縮特性試験</li> <li>4.3.2 繰返し膨潤・収縮試験</li> <li>4.3.3 膨潤圧試験</li> <li>4.3.4 繰り返し耐久性試験</li> </ol>	16     16     16     121     24     25     25     25     25     27     27     31     32     34
<ol> <li>3. 光ファイバー湿度計による適用性の検討(Type II)</li> <li>3.1 概説</li> <li>3.2 室内試験による適用性の検討</li> <li>3.3 数値解析による適用可能な吸収膨張材の水分特性に関する検討</li> <li>第 3 章 参考文献</li> <li>4. 光ファイバー水分計測センサの開発(Type II)</li> <li>4.1 概説</li> <li>4.2 吸水膨潤材料調査</li> <li>4.3 吸水膨潤材料検定</li> <li>4.3.1 膨潤・収縮特性試験</li> <li>4.3.2 繰返し膨潤・収縮試験</li> <li>4.3.3 膨潤圧試験</li> <li>4.3.4 繰り返し耐久性試験</li> <li>4.3.5 浸漬試験</li> </ol>	16     16     16     21     24     25     25     25     25     27     27     31     32     34     35
<ol> <li>3. 光ファイバー湿度計による適用性の検討(TypeⅡ)</li> <li>3.1 概説</li> <li>3.2 室内試験による適用性の検討</li> <li>3.3 数値解析による適用可能な吸収膨張材の水分特性に関する検討</li> <li>第 3 章 参考文献</li> <li>4. 光ファイバー水分計測センサの開発(TypeⅢ)</li> <li>4.1 概説</li> <li>4.2 吸水膨潤材料調査</li> <li>4.3 吸水膨潤材料検定</li> <li>4.3.1 膨潤・収縮特性試験</li> <li>4.3.2 繰返し膨潤・収縮試験</li> <li>4.3.3 膨潤圧試験</li> <li>4.3.4 繰り返し耐久性試験</li> <li>4.3.5 浸漬試験</li> <li>4.4 センサの基本形検討(TypeⅢ-0)</li> </ol>	16     16     16     21     24     25     25     25     25     27     27     31     32     34     35     37
<ol> <li>光ファイバー湿度計による適用性の検討(TypeI)</li> <li>3.1 概説</li> <li>3.2 室内試験による適用性の検討</li> <li>3.3 数値解析による適用可能な吸収膨張材の水分特性に関する検討</li> <li>第 3 章 参考文献</li> <li>光ファイバー水分計測センサの開発(TypeII)</li> <li>4.1 概説</li> <li>4.2 吸水膨潤材料調査</li> <li>4.3 吸水膨潤材料検定</li> <li>4.3.1 膨潤・収縮試験</li> <li>4.3.2 繰返し膨潤・収縮試験</li> <li>4.3.3 膨潤圧試験</li> <li>4.3.4 繰り返し耐久性試験</li> <li>4.3.5 浸漬試験</li> <li>4.4 センサの基本形検討(TypeII-0)</li> <li>4.5 プロトタイプセンサの製作(TypeII-A, TypeII-B)</li> </ol>	$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$

4	1.7 室内試験による適用性の検討	43
	4.7.1 TypeⅢの水中での膨潤・収縮試験	43
	4.7.2 TypeⅢ-B の土中での膨潤・収縮試験結果	51
5.	原位置土中水分計測による地下水涵養量の評価 (現場計測及び室内物性試験の実施)	54
5	5.1 概説	54
5	5.2 現場計測概要	55
5	5.3 室内試験による諸物性値の測定	56
	5.3.1 保水性試験	56
	5.3.2 加圧型変水位透水試験	57
	5.3.3 瞬時水分計測法(IPM)	
5	5.4 現場計測方法	60
5	5.5 現場計測結果及び考察	61
5	5.6 現場計測結果の妥当性の検証	65
	5.6.1 水分計に関する検証	65
	5.6.2 テンシオメーターに関する検証	65
	5.6.3 現地計測結果の検証(室内試験結果との比較)	69
5	3.7 地下水涵養量の試算	70
	5.7.1 水分量変化による地下水涵養量の試算	70
	5.7.2 不飽和透水係数による地下水涵養量の試算	71
	5.7.3 考察	71
5 5	第5章 参考文献	73
6.	結論と開発成果の反映	74
6	3.1 結論と今後の課題	74
6	3.2 開発成果の反映と光センシング技術の活用	75
5 5	<b>第6章 参考文献</b>	77

# CONTENTS

1. Introdu	action	1
1.1 Bac	kground and objectives	1
1.2 Prii	nciple and application of fiber optical measurement technology	2
1.2.1	Existing fiber optical measurement technology	2
<ol> <li>Introduction         <ol> <li>Introduction             <ol> <li>Principle and application of fiber optical measurement technology</li></ol></li></ol></li></ol>	3	
1.2.3	The FPI (Fabry-Perot Interferometer) system	4
1.2.4	Summary of previous studies on fiber optical measurement technology	5
1.3 Me	ethod of evaluating groundwater recharge quantity by in situ soil wa	ter
me	asurement	7
1.3.1	Method of evaluating groundwater recharge	7
1.3.2	Method of measuring moisture content in the field and evaluating rain	
	infiltration behavior	8
1.4 Out	line of present problems	9
Referer	nces	10
о <b>л</b> :		11
2. Testing	g of negative pressure measurement by optical fiber pressure gage (Type I)	11
2.1 Inti	roduction	11
2.2 Cal	ibration of the negative pressure measurement sensor	11
2.3 Lab	oratory test of negative pressure measurement in stages	
2.4 In-s	situ measurements	14
3. Exami	nation of applicability by optical fiber hygrometer (Type II)	16
3.1 Inti	roduction	16
3.2 Lab	poratory test on applicability	16
3.3 Nui	merical analysis of moisture characteristic of applicable water absorption	
sw	elling material	21
Referer	nces	24
( D 1		25
4. Develo	pment of optical fiber moisture metering sensor (Type III)	
4.1 Inti	roduction	
4.2 Sur	vey of materials which swell by water absorption	25
4.3 Exp	periment of materials which swell by water absorption	27
4.3.1	Swelling and shrinkage behavior test	27
4.3.2	Repeated swelling and shrinkage test	31
4.3.3	Swelling pressure test	32
4.3.4	Repeated durability test	34
4.3.5	Immersion test	35

4.4 Analysis of the sensor (Type III-0)	37
4.5 Production of prototype sensor (Type III-A, Type III-B)	40
4.6 Examination of basic specifications of the sensor	43
4.7 Examination of applicability in the laboratory test	43
4.7.1 Swelling and shrinkage test of Type III sensor underwater	43
$4.7.2$ Swelling and shrinkage test result of Type III-B sensor underground $\dots$	51
5. Estimation of groundwater recharge by in situ soil moisture measurement	
(In-situ investigation, laboratory physical property test)	54
5.1 Introduction	54
5.2 Overview of field measurement	55
5.3 Measurement of various physical properties by laboratory test	56
5.3.1 Water retention test	56
5.3.2 Pressurized variable head permeability test	57
5.3.3 Instantaneous profile method (IPM)	58
5.4 Field measurement method	60
5.5 Field measurement results and consideration	61
5.6 Verification of the validity of field measurement results	65
5.6.1 Verification of moisture sensor	65
5.6.2 Verification of tensiometer	65
5.6.3 Verification of field measurement results (comparison with laboratory tes	st
results)	69
5.7 Trial estimation of groundwater recharge	70
5.7.1 Trial estimation of groundwater recharge by moisture change	70
5.7.2 Trial estimation of groundwater recharge by unsaturated hydraulic	
conductivity	71
5.7.3 Considerations	71
References	73
6. Conclusions and review of development results	74
6.1 Conclusions and future tasks	74
6.2 Reflection of results and utilization of optical sensing technology	75
References	77

# 表目次

表	1.2 - 1	種々の光ファイバーセンシング方式	3
表	4.2-1	吸水膨潤材料の適応性評価結果一覧	.26
表	4.2-2	吸水膨潤材料一覧	
表	4.3-1	膨潤·収縮特性試験結果一覧	.30
表	4.3-2	吸水膨潤材一覧	.31
表	4.3-3	浸漬水一覧	.35
表	4.4-1	センサー覧	.37
表	4.4-2	試験ケース	.39
表	4.5-1	センサー覧	.42
表	4.7-1	評価試験結果一覧	.50
表	4.7-2	5号硅砂基本特性一覧	.51
表	5.3-1	現場 A 地点試料の土粒子密度と均等係数及び曲率係数	.56
表	5.4-1	観測項目および装置	.60
表	5.6-1	計測結果	.66
表	5.7 - 1	地下水涵養量の試算結果(A 地点: 2010/7/15~9/9)	.72
表	6.2-1	開発成果の反映:地層処分に関連した観測パラメータと計測方法(例)	.76

# 図目次

义	1.1-1	光ファイバーによる土中水分量測定技術の手法1
义	1.2 - 1	光ファイバーの断面2
义	1.2-2	光ファイバーの種類2
义	1.2-3	FBG 方式の原理
义	1.2-4	FBG 圧力計の構造
义	1.2-5	FPI 方式の原理
义	1.2-6	<b>FPI</b> 圧力計の構造4
义	1.3-1	発散ゼロフラックス面
义	2.2-1	光ファイバー圧力計の温度変化に対する応答12
义	2.2-2	光ファイバー圧力計の校正結果12
义	2.2-3	校正式の係数 (A, B)12
义	2.3-1	負圧計測実験概要図13
义	2.3-2	負圧計測実験結果(温度補正前)14
义	2.3-3	負圧計測実験結果(温度補正後)14
义	2.4-1	FPI 方式テンシオメーターの現地計測結果15
义	3.2-1	計測結果(気中)17
义	3.2-2	計測結果 (ch2・ch3 のみ水中)17
义	3.2-3	湿度変化と波長変化の相関17
义	3.2-4	温度変化と波長変化の相関17
义	3.2-5	温度と波長の関係の比較17
义	3.2-6	検定装置概略図18
义	3.2-7	検定試験装置概要図18
义	3.2-8	計測結果18
义	3.2-9	補正後の波長と排水量との関係18
义	3.2-10	浸潤と排水の連続計測結果19
义	3.2 - 11	計測値の経時変化
义	3.2 - 12	試験室内の温度・湿度変化
义	3.3-1	解析モデル図
义	3.3-2	解析メッシュ図
义	3.3-3	解析ケース(水分保持特性)
义	3.3-4	解析結果(case1:砂と同じ水分保持特性の場合)
义	3.3-5	解析結果(case2:砂よりもαが大きい場合)
义	3.3-6	解析結果 (case3:砂よりも $\alpha$ が小さい場合)
図	3.3-7	解析結果(case4:砂よりもnが小さい場合)23
図	3.3-8	解析結果 (case5:砂よりもnが大きい場合)

义	4.1-1	検討フロー	25
义	4.3-1	検定フロー	27
义	4.3-2	変位量の測定例	28
义	4.3-3	膨潤・収縮特性試験結果	29
义	4.3-4	繰り返し膨潤・収縮試験	31
义	4.3-5	試験装置概略図	32
义	4.3-6	膨潤力測定試験結果(単位面積当たりの膨潤圧)	33
义	4.3-7	膨潤力測定試験結果(単位体積当たりの膨潤力)	33
义	4.3-8	耐久性試験結果	34
义	4.3-9	浸漬試驗結果	36
义	4.4-1	水没試驗結果	38
义	4.4-2	現地土に対する適用試験結果	40
义	4.7-1	試験結果およびセンサ概略図(Type <b>Ⅲ</b> -A(1))	45
义	4.7-2	試験結果およびセンサ概略図(Type <b>Ⅲ</b> -A(2)大径)	46
义	4.7-3	試験結果およびセンサ概略図(TypeⅢ-A(2)小径)	46
义	4.7-4	試験結果およびセンサ概略図(Type <b>Ⅲ</b> -A(3)粗目)	47
义	4.7-5	試験結果およびセンサ概略図(TypeⅢ-A(3)細目)	47
义	4.7-6	試験結果およびセンサ概略図(Type <b>Ⅲ</b> -B(1)受感部大)	48
义	4.7-7	試験結果およびセンサ概略図(TypeⅢ-B(1)受感部小)	48
义	4.7-8	試験結果およびセンサ概略図(Type <b>Ⅲ</b> -B(2)厚み 2mm)	49
义	4.7-9	試験結果およびセンサ概略図 (Type <b>Ⅲ</b> -B(2)厚み 1mm)	49
义	4.7-10	5 号硅砂の粒径加積曲線	51
义	4.7-11	砂試料に対する適用試験概念図	52
义	4.7 - 12	砂試料に対する適用試験結果(Type <b>Ⅲ</b> -B(1))	53
义	5.1 - 1	地下水涵養量の推定	54
义	5.1 - 2	直接水分観測による地下水涵養量の推定フロー	54
义	5.2 - 1	現場観測位置図	55
义	5.3 - 1	粒径加積曲線(深度 30cm, 60cm)	56
义	5.3-2	間隙率分布	56
义	5.3-3	加圧板法による保水性試験装置	57
义	5.3-4	保水性試驗結果:現場A試料(深度 30cm, 60cm 採取)	57
义	5.3 - 5	加圧型変水位透水試験装置	58
义	5.3-6	加圧型変水位透水試験結果(20℃換算值):現場А試料	58
义	5.3-7	圧力制御型瞬時水分計測法 試験装置	59
义	5.3-8	計測結果	59
义	5.3-9	不飽和浸透特性	60
义	5.4-1	観測現場の概略図	60
义	5.5 - 1	水分量(体積含水率)の計測結果	62

义	5.5 - 2	圧力水頭の計測結果	.62
义	5.5 - 3	飽和度の経時結果	.63
义	5.5 - 4	水分量の経時変化(2010年)	.63
义	5.5 - 5	圧力水頭の経時変化(2010年)	.63
义	5.5-6	地中温度の測定結果	.64
义	5.5-7	間隙空気圧の経時変化:A地点(深度 60cm)	.64
义	5.6-1	水分計のキャリブレーション結果	.65
义	5.6-2	サクション測定装置	.66
図	5.6-3	水分特性曲線	.66
図	5.6-4	不凍液使用に対する圧力水頭の経時変化	.66
义	5.6-5	压力水頭計測結果(A 地点: 60cm 採取試料, Sr=55%)	.67
义	5.6-6	埋め戻し材(石膏)の妥当性についての検証	
		(A 地点:60cm 採取試料,Sr=50%)	.68
义	5.6-7	水分保持特性(A 地点)の比較 (IPM:瞬時水分計測法)	.69
义	5.6-8	水分保持特性の同定(A地点)	.69
义	5.6-9	不飽和透水係数(A地点)の比較	.69
义	$5.7 \cdot 1$	体積含水率の深度分布の経時変化(A地点)	.70
义	5.7-2	体積含水率の経時変化と涵養量の試算(A地点)	.71
义	5.7 - 3	飽和度の経時結果(A 地点)	.72
义	5.7-4	圧力水頭の経時結果(A地点)	.72
义	5.7 - 5	飽和度の深度分布(A 地点: 2010 年)	.72
义	5.7-6	水分保持特性(飽和度との関係)	.72
义	5.7-7	全水頭の深度分布(A 地点: 2010 年)	.72
义	6.2 - 1	開発成果の反映:	
		光ファイバー計測技術を適用した 処分場のモニタリングのイメージ	.76

# 写真目次

写真	2.2 - 1	压力計(左:FBG 方式,右:FPI 方式)	. 11
写真	2.2-2	アナライザー(左:FBG 方式,右:FPI 方式)	. 11
写真	2.3-1	負圧計測実験状況	.13
写真	2.4-1	FPI 用 1ch データロガー	.14
写真	2.4-2	現場計測状況	.14
写真	3.2 - 1	FBG 湿度センサ	.16
写真	3.2-2	センサと保護メッシュの 位置関係	.18
写真	3.2-3	Type Ⅱ 湿度センサ	.19
写真	3.2-4	電気式湿度センサ	.19
写真	3.2-5	各センサ(上から, TypeⅡ・ 電気式・水分計)	.20
写真	3.2-6	センサ設置状況	.20
写真	3.2-7	湿度センサ検定装置概要図	.20
写真	4.3-1	変位量の測定状況	.28
写真	4.3-2	膨潤圧試験状況	.32
写真	4.3-3	浸漬試験状況	.35
写真	4.4-1	TypeⅢ-0 の製作状況	.37
写真	4.4-2	FBG 計測装置	.38
写真	4.4-3	各種センサ	.38
写真	4.4-4	水没試験状況	.38
写真	4.4-5	試料のサクション測定状況	.39
写真	4.4-6	現地土に対する試験状況	.39
写真	4.7-1	恒温室	.44
写真	4.7-2	TypeⅢ-A(1)試験状況	.44
写真	4.7-3	TypeⅢ-A(2)試験状況	.44
写真	4.7-4	TypeⅢ-A(3)試験状況	.44
写真	4.7-5	TypeⅢ-B(1),(2)試験状況	.44
写真	4.7-6	試験状況	.52
写真	4.7-7	供試体寸法図	52
写真	$5.2 \cdot 1$	観測現場の状況	55
写真	$5.3 \cdot 1$	コアサンプラー(サンプリングチューブ:φ50×L300mm)	56
写真	5.3-2	試験状況	.57
写真	5.3 - 3	加圧型変水位透水試験状況	.58
写真	5.3-4	圧力制御型瞬時水分試験実施状況	.59
写真	5.4-1	センサ設置状況(現場 A 地点)	.61
写真	5.4-2	石膏埋め戻し状況(現場A地点)	.61
写真	5.6 - 1	不凍液の検討状況付	.66

写真 5.6-2	現場設置状況	67
写真 5.6-3	装置状況	67
写真 5.6-4	自動給水装置の検討状況	67
写真 5.6-5	石膏による埋め戻し状況	68
写真 5.6-6	サクション測定装置	68

### 1. 序論

#### 1.1 研究の背景及び目的

地層処分において大局的な地下水流動挙動を評価することはきわめて重要であるが,これを定 量的に評価する飽和・不飽和浸透流解析において,水理地質構造モデルの構築とともに,境界条 件の設定が重要である。具体的には,地下水流動解析の上部境界条件として必要となる地下水涵 養量であり,タンクモデル等を用いた予測手法はいくつか提案されているが,実際これらを利用 する際には不確実性を多く含むことから,対象領域において土壌に浸透した水分量から定量化す る手法が有効であると考えられる。つまり,土中水分量に着目した地下水涵養量の算定手法の体 系化が必要である。その中で,表層地盤の不飽和帯における土中水分観測は重要な調査技術であ り,本研究では現場で安定して長期間計測可能なシステムの構築を目的とした。

さらに、土中水分観測技術は岩盤における不飽和領域や人工バリアにおける緩衝材の水分挙動 のモニタリング技術への適用性も有望であると考えられる。そのため、現在、土中水分の高精度 な観測手法の開発が望まれている。これまで土中水分量はテンシオメーター法や誘電率を用いた 方法が適用されてきたが、これらは「点」としての情報のみであり、上記の課題に対してはある 程度「面」としての取り扱いが必要となる。そこで、多点かつ長距離にわたって計測が可能であ り、従来の測定機器と比較して水分分布を求める上での利点が多いと考えられている、光ファイ バーを用いた水分観測手法の開発を行った。

研究内容としては、計測システムの構築とその適用性の検討であり、光ファイバーによる歪みの計測原理を応用し、土中水分量測定手法の開発を目指した。その基礎的なアプローチとして、 図 1.1-1 に示すように、サクションによる圧力計測、土中湿度計測、吸水膨張材を適用した体積 含水率計測の3方向から検討した。

①Type I (サクション測定):研究代表者らは既に光ファイバー技術を応用した間隙水圧を測 定する計測システムを開発している。今回は、このシステムを不飽和領域に適用させるものであ り、基本的には、間隙水圧計測を不飽和状態にまで測定範囲を延長させ、土中水分をポテンシャ ルより換算することで算出した。

②Type II (土中湿度):海外で研究開発中の湿度センサを応用して土中湿度が水分量と平衡する際の変化量について検討した。

③TypeIII(体積含水率):光ファイバーに吸水膨張材を塗布して土中水分量と平衡する際のひ ずみ量を計測する方法についての可能性を探求した。





#### 1.2 光ファイバー計測技術の原理と応用

#### 1.2.1 光ファイバー計測技術の整理

光ファイバーは直径 125μm の毛髪程度の細いガラス繊維で、中心部は屈折率の異なるコアと 呼ばれる芯とその外周を覆うグラッドと呼ばれる鞘の二重構造により構成されている。コアは使 用する光に対して透過率が非常に高いガラスまたはプラスチックでできている。コアの屈折率は グラッドの屈折率よりやや大きく設計されており、全反射により光をコア内に閉じ込めて伝播す るため、極めて低損失な光の伝送路を形成している。グラッドの周囲は光ファイバーの補強、機 械特性の改善などのために使用目的に応じて各種の被覆層が施されている。図 1.2-1 に光ファイ バーの断面を示す。光ファイバーは、コアおよびグラッドの屈折率分布形状とコア内の経路によ り分類され、2 種類のモードがある<sup>1)</sup>。シングルモードは、コア径が 10μm 以下の細く 1 つのモ ードのレーザー光を伝送する。光の分散が少なく高速・長距離伝送ができるため、主に通信用と して利用され、主力を成している。マルチモードは、コア径が 50μmで、異なるモードの光が全 反射を繰り返しながら進む。内部での分散や、到達時間のズレが生じるため伝送距離が短い LAN などの内部通信に利用されている。図 1.2-2 に光ファイバーの種類を示す。





図 1.2-2 光ファイバーの種類

種々の土中水分のモニタリングに対して, 従来は ADR や FDR 等の誘電率を利用した電気式センサが用いられてきたが, それに対してはいくつかの問題点があり, その解決を要求されている。 以下に問題点とその解決策を述べる。

#### (1) 電気的計測システムの問題点

電気的手法は長い歴史を持ち,ほぼ完成の域に達しているといっても過言ではないが,電気ゆ えの避けられない以下のような欠点もある。

①電気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等ではノイズ対策に苦慮する。最悪の場合モニタリングできない。

②微弱であっても電流が流れるので防爆を要求される現場では使用できない。

③伝送ケーブルの絶縁が低下してくるとデータの信頼度が問題となる。

④伝送ケーブルが太いので多点計測になると膨大なケーブルの引き回しが必要となり、コストの面とともに場合によっては構造物本体の弱部を形成することがある。

⑤落雷でセンサとともに計測システムもダメージを受け最悪の場合が全壊することもある。

#### (2) 光ファイバーシステムの利点

上記の問題点に対して近年盛んに開発されている光ファイバーシステムでは電気的手法の欠点 を解消した以下のような利点があり、次世代のモニタリングシステムとして期待されている。

①電気的ノイズの影響が一切ない。

②本質完全防爆である。

③完全な水没は光ファイバーの寿命を縮めるが、電気的な意味での絶縁不良は発生し得ない。
 ④光ケーブルは緩衝層を含めた外径が 0.25mm と電線に比べて細いので、取り回しが問題とならない。

⑤本質的に絶縁体なので落雷による影響がない。

光ファイバー計測には大きく分けて能動的計測と、受動的計測の2つがある。能動的計測は例 えば FBG, BOTDR のように光ファイバーそれ自体がセンサとなるものである。一方、受動的計 測では光ファイバーは単に光伝送媒体として利用されるもので、FPI、蛍光光度計等がそれに当 たる。表 1.2-1 にファイバーセンシングについての方法と特徴をまとめたものを示す。本研究に おいて、光ファイバーを用いた圧力計に採用できる光計測システムを検討した際、精度、大きさ 等を考慮すると FBG と FPI の適用性が高い。以下にそれぞれについて説明する。

	FBG方式	B-OTDR方式	OTDR方式	R-OTDR方式	FPI方式
計測長 (伝送方法)	多点計測 (シングルモード)	任意区間で連続計測 (シングルモード)	任意区間で連続計測 (シングルモード)	任意区間で連続計測 (シングル/マルチ モード)	単点計測 (マルチモード)
計測項目 精度	ひずみ, 温度, 変位, 圧力 ±数μ~数10μ(ひ ずみ)	ひずみ, 温度, 変位 ±30~100 <i>μ</i>	ひずみ, 変位 0.1の判定(ひずみ発 生箇所)	温度±1~2℃ 測定範囲 -200℃~300℃	ひずみ(温度) ±0.1µ(ひずみ)
計測時間	1/1000秒~数秒 動的な変化の計測が 可能	5分~10分程度 穏やかな変化の計測 が可能	数秒~5分程度	10数秒~5分	動的な変化の計測が 可能
計測方法	点計測	線計測 (分布計測)	線計測 (分布計測)	線計測 (分布計測)	点計測
センサ	光ファイバーの任意 箇所を特殊加工し, センサとする	光ファイバー全長をセ ンサとして利用する	光ファイバー全長をセ ンサとして利用する	光ファイバー全長をセ ンサとして利用する	光ファイバーの先端 を特殊加工し, センサ とする
測定対象 アナライザ	ブラッグ波長測定器	ブリルアン散乱光 ひずみ/損失分布測 定器	レイリー散乱光 光パルス試験器	ラマン散乱光分布型 温度計	ファブリ・ペロー干渉波

表 1.2-1 種々の光ファイバーセンシング方式

#### 1.2.2 FBG 方式(Fiber Bragg Grating)

FBG<sup>1</sup>とは Fiber Bragg Grating の略で,光ファイバーのコア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て,その間隔に比例した特定の波長の波だけが反射 される。この部分を FBG センサとして利用する。

真空中の光の速度に対応した反射波長 Aoは

$$\lambda_0 = 2nD \tag{1.2-1}$$

で示され、波長、歪み、温度の関係は次式で示される。

$$\frac{\partial \lambda}{\lambda} = A \varepsilon + B dT \tag{1.2-2}$$

ここで、 $\lambda$ :波長、n:屈折率、D:回折格子間隔、 $\epsilon$ :歪み、T:温度、A,B:係数である。 この反射波長は式(1.2-1)より回折格子の間隔が伸縮すると、それに応じて波長が変化する。し

たがって、この反射波長を計測すれば FBG 部分の歪み量が分かる。なお、屈折率 n は温度によって変化する。FBG 方式の原理を図 1.2-3 に示す。FBG を透過した光は図中の透過光のように、 当該の FBG の反射波長が部分的に抜け落ちるがそれ以外は損失なく透過する。そのため、次の 波長の異なる FBG は同一光ファイバーで測定できることになる。この原理ゆえに異なる波長の FBG を用いれば1本のケーブルで実用上 6~7 点の多連装計測が可能となり、FBG の大きな特徴 となっている。また、ここで使用される入力光源は一般のレーザー光のような単一波長ではなく、 広帯域光源と呼ばれる幅広い周波数帯を有する特殊な光源である。

FBG 圧力計の構造を図 1.2・4 に示す。FBG には予め引っ張り応力がかけられている。メンブ レンに水圧がかかると内側に縮むので FBG が緩み波長が変化する。現状では、FBG の読み取り 精度は  $2\sim3\mu$ ,最大歪み  $3000\mu$ 程度であるので精度は 0.1%程度が限界である。圧力計の場合, 温度補償,校正係数誤差,さらに機械的精度が加わるのでこれより悪くなる。



#### 1.2.3 FPI 方式(Fabry-Perot Interferometer)

受動的変位センサである FPI 方式 2の原理を図 1.2-5 に示す。他の方法で用いるレーザー光に 替わって白色光を入射し,2 枚の互いに向かい合う半透過ミラーで反射した光をそれぞれの波長 毎に分離して干渉させる方式で,それらの間隔(0~数+µm)が空洞長(I)となる。センサ内部 は伝播用と半透過ミラーを設置した反射用の光ファイバーが 3~10mm のゲージ長(Lg)で固定 されており,ひずみはこれらの比(I/Lg)として測定される。単純な干渉では,出力は光の縞模 様であり, 縞数を数えることでひずみを計測することができる。前述した FBG と比較すると, FPI は精度,分解能及び,温度特性は勝るが,一方で多連装測定ができない欠点がある。実際の 圧力計においては,ミラーはメンブレンに直接貼ってあるので非接触であることに特徴がある。 図 1.2-6 に FPI 圧力計の構造を示す。

#### 1.2.4 光ファイバー計測技術に関する従来の研究

## (1) R.S.Alessi らの研究<sup>3)</sup>

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。結論として,光ファイバ ーによる土壌中の含水量の測定の可能性は示した上で,様々な分野への使用を目的とした研究が 必要であるとまとめている。また,直径 1mm の光ファイバーセンサで土中の水分量を測定する 手法としての問題点を示しており,過度に局所的な値を求めている可能性があると指摘している。

#### (2) F.J.Arregui らの研究<sup>4)</sup>

イオンの自己組織単層(ISAM:高分子電解質を基底とする陰イオンと陽イオン微粒子の連続 吸着による多層集積)の過程により形成されるファブリペロー式光ファイバー式湿度計の実験を 行っている。ファブリペローは前節でも記述した通り,2 つの反射率を持つ鏡状の材料で構成さ れ,鏡間の距離,屈折率によって反射光強度が変化する原理である。光ファイバー湿度計は2つ の鏡のうち1つの先端にISAM法で設けたフィルム層を施したものである。光源はLEDで,反 射光強度はパワーメーターによる測定により,相対湿度23%から100%までを2.25dBの変化で 扱うことができるとの結果をまとめている。

#### (3) T.L.Yeo らの研究<sup>5)</sup>

ポリマーコーティングされた FBG を用いた光ファイバーセンサを開発し,異なる間隙率のコ ンクリート供試体内の湿度検知に用いている。ポリマーコートの吸水材の伸縮により FBG に歪 みが発生し,センサとしてのブラッグ波長を変化させる。光信号は光スペクトル分析器 (OSA) を用いて測定されるが,干渉技術に基づいたファブリペローのような他の同様な波長を用いるこ とも可能であるとしている。ポリマーの膨張を有効な歪みに確実に変換するために,3 アミノプ ロピルトリエトキシシランのカップリング剤による繰り返しのコーティング過程の前に,光ファ イバーの表面をシリカ処理している。また,コンクリート供試体の中に埋め込まれるセンサの強 度を高めるために空気が循環するように開けられた孔をもつステンレスの金属管で保護されてい る。なお,湿度センサのキャリブレーションは飽和食塩水による手法により湿度制御室内で実施 されており,線形で近似できる結果を得ている。結論として,異なる水分量のコンクリート供試 体に対して測定した結果より,新たなモニタリング技術を示すことができたとまとめている。

#### (4) S.M.Murtry らの研究<sup>6)</sup>

低コヒーレンス干渉法を使用した湿度センシングのための材料評価をソルゲル,エアロゾル,

ポリマーフィルムに対して行っている。センサ部にファブリペロー干渉計を用いて,光路差を光 干渉としてフォトダイオードで検出されるように調整している。結果として,セルロースアセテ ートが最も良く,ソルゲルフィルムは良感度だが劣化が早く,エアロゾルフィルムは薄い材料を 用いれば十分な感度と反応時間が得られ,ポリビニルアセテートとポリアミドナイロンは光学的 に反応しないと述べている。

#### (5) S.Texier らの研究<sup>7)</sup>

分布型ブルリアン散乱光ファイバーセンサを用いた測定を行い,低透水性物質の水分を吸収し ポリマーが膨張することによるファイバーの引っ張り歪み,ポリマーが乾燥することによるファ イバーの圧縮歪み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。課題として,計 測可能な含水率が 0~30%までであり,飽和状態に近い含水率の計測が可能であるか不明である ことと,計測データそのものから含水率を判断できないと述べている。

#### (6) P.L.Swart らの研究<sup>8)</sup>

光ファイバー干渉計を用いたコンクリート中の含水率の測定を実施している。測定方法は、光 ファイバー芯線を2本埋め込んだコンクリートの供試体に衝撃波を与え、2本のファイバー間を 伝播する衝撃波の速度をマッハ・ツェンダー干渉計により観測している。結果として、湿潤試料 と乾燥試料では速度が異なる結果を得ているが、ターゲットに衝撃波を与える必要があること、 衝撃波を発生させる別の装置が必要であり、光ファイバー式遠隔計測には適さないことが課題で あるとまとめている。

#### (7) F.H.de Wild らの研究<sup>9)</sup>

電力ケーブルの温度,機械的ストレスおよび水分の計測に光学センサを適用する研究を行って いる。その中で,温度はラマン散乱,湿度は光ファイバーが水分増加すると伝達光が減衰する原 理によりブルリアン散乱を利用している。電線ケーブルのシース内部に4本のファイバーを設置 し,温度,湿度,歪みをそれぞれ ROTDR (ラマン),OTDR,BOTDR で測定しており,湿度セ ンサ用のファイバーはφ12mm の吸水材の内部にファイバーを通している。結果として,OTDR を使用することで伝達光の減衰を測定できることが判明している。具体的には、測定できる湿潤 部の最小規模は20cm,湿潤部が60cmより大きい場合において70%より高い相対湿度も読み取 ることができ,40cmの湿潤部の減衰はおよそ15dBの増加反応を示す結果を得ている。

#### (8) Y.Ren らの研究<sup>10)</sup>

対称構造の統合多層膜導波管を湿度検出のために開発している。この導波管を用い,水蒸気の 拡散によって引き起こされる縞の状態変化を計測し,コンパクトかつ使い捨て可能で,低価格な 光式計測装置を作り上げる有望な可能性を提示している。計測原理は,市販の2つのポリマー, ポリ塩化ビニル(4-vinylpyridine)(P-4VP),およびポリ塩化ビニル(メタクリル酸メチル)(PMMA) によって,5層重合体導波管を作成し,導波管の2つのクラッドに光源を当てると,ヤングの干 渉縞が現れる。また,ポリマー導波管が水分を吸収すると,導波管の屈折率が変化し,それが干 渉縞のシフトとして現れる。したがって、湿度濃度と干渉縞シフト量との相関から湿度計として の機能に応用できるとしている。

#### (9) K.M.Tan らの研究<sup>11)</sup>

ゼラチンコートした長周期ファイバーグレーティング(LPG:Long Period Grating)を用い た高相対湿度センサの開発を行っている。測定原理は、ポリマーが湿気を吸収することによって 透過光損失が生じ、LPGスペクトル(透過光ディップ)の変化レベルを測定するものである。結 果として、相対湿度±0.0083%の解像度および±0.25%の精度をそれぞれ達成することができて いるが、その一方、感度よく相対湿度を測れるのはRH90%からRH99%までであり、透過光デ ィップの変化と土中水分量との相関があるか不透明であることを課題として挙げている。

#### 1.3 原位置土中水分計測による地下水涵養量の評価方法

地下水流動解析の上部境界条件として地下水涵養量の設定は重要であり,地下水流動状況に直 接的な影響を及ぼしている。地下水涵養量の算定はこれまで主に,降雨量から表面流出量,蒸発 散量,土中貯留量を差し引くことで求められているが,特に蒸発散量や植生の影響を考慮した算 定は,多くの仮定を含んでいることや計測項目自体も多く,非常に労力が多いと言える。そこで, より簡便な手法として,土中水分量に着目した地下水涵養量の算定手法の体系化が必要である。 ここでは従来の研究について以下の観点でまとめる。

- 地下水涵養の評価方法
- ② 現地における水分量の計測手法及び降雨浸透挙動の評価方法

#### 1.3.1 地下水涵養の評価方法

表層における降雨浸透挙動について,図 1.3・1 に示すような発散ゼロフラックス面より下方へ 降下浸透した水は蒸発の作用を受けることなく,重力の作用によって下方に移動し,地下水を涵 養する成分となることが示されている<sup>12)</sup>。したがって,現地においてこの発散ゼロフラックス面 の位置を確認することが出来れば,地下水涵養量を不飽和透水係数から算定することが可能とな る。しかし,ゼロフラックス面を確認するには,深度方向の水頭分布を計測する必要があり,通 常はテンシオメーター等が用いられるが,脱気水の補給が必要であったり,セラミックと地盤の 接触状況に結果が大きく影響されたりするので,長期間安定して計測するには課題が多い。そこ で,水分量の計測結果から水分保持特性により深度方向の水頭分布を求めることも原理的には可 能であると考えられる。



図 1.3-1 発散ゼロフラックス面

地下水涵養の評価手法について、開發らは現地での水分量をモニタリングした結果より地下水 涵養量を推定している<sup>13)</sup>。具体的には、現地より採取した土試料に対して加圧膜法で水分保持特 性を求め、水分量から換算した吸引圧を用いて全水頭の深度分布を評価した。その結果、深度 10cm に発散ゼロフラックス面(それ以浅では、蒸発散に寄与する土中水分量が卓越する)が、 深度 40cm に収束ゼロフラックス面(土壌中に下向きの動水勾配領域と上向きのそれとが接する 境界面)があることを示している。なお、深度 10cm~20cm での飽和透水係数は 10<sup>-4</sup>cm/sec オ ーダーであり、比較的透水性の低いことが影響していることを指摘している。地下水涵養量につ いては、降水量から蒸発散量と深度 0cm~15cm の土中水分貯留量を差し引く水収支計算式から 推定しており、地下水涵養量に寄与している土中水は降水量の約数%であると試算している。最 後に、モニタリングデータが十分でない上に水収支計算に精度上の問題があることを今後の課題 として付け加えている。

一方,ゼロフラックス面以深での動水勾配から不飽和透水係数を用いて地下水涵養量を求めた 事例が報告されている<sup>14)</sup>。具体的には,本研究でも対象とした北海道幌延において,全水頭と深 度との関係から深度 1.25m 以深で平均動水勾配を 0.99 と算定しており,自然状態の透水係数か ら地下水流速を求めた結果,厳冬期でも平均的に 0.3~0.4mm/d 程度の涵養があるものと推察し ている。

#### 1.3.2 現地における水分量の計測手法及び降雨浸透挙動の評価方法

現地における水分量のモニタリング手法については、特に降雨による斜面崩壊の危険予知シス テムを確立しようとする研究で多く実施されている。例えば、西垣らは豪雨時の斜面安定性評価 システムを確立することを目的に、土中水分量を中心に各種の現場計測、数値解析を実施してい る<sup>15)</sup>。その結果として、水分計による計測方法が長期的な計測法として有効であることを示して いるが、予測システムの構築に対し、現場計測値と解析結果の整合性に問題が残った。また、体 積含水率の変化量を警報システムの指標に用いる上では、変化量に対する計測精度の向上が必要 であると結論付けている。さらに今後の課題としては、各層の不飽和浸透特性の精度を検証し、 初期条件を変化させて計測値と解析値を比較することと、様々な豪雨パターンに対して斜面内の 水分量の変化とともに、安定性を評価することを挙げている。 また,上本・森脇らは,まさ土斜面の降雨浸透特性に対する現地観測を実施し,その経時変化から水分特性曲線について考察している<sup>16)</sup>。その結果,実際の不飽和地盤で観測される水分特性曲線はいわゆる副走査曲線であり,先行降雨の影響や降雨状況の変化に伴い複雑な挙動を示すと結論付けている。

## 1.4 現状での課題の整理

本研究では、土中に浸透した水分量の変化量から直接地下水涵養量を推定する手法について検 討することを目的としているが、まずは、降雨時における不飽和浸透挙動の原位置モニタリング 手法についての妥当性を検証する必要がある。過去の事例で現地での水分量に対するモニタリン グが実施されているが、その測定精度についてはあまり検証されていない。

そこで、本研究で対象とする課題について下記にまとめる。

- 現地モニタリング結果の測定精度の検証として,現地採取試料に対する室内試験を実施しての 整合性を確認する。
- ② 現場における水分量計測データから直接涵養量を試算する手法についてまとめる。

#### 第1章 参考文献

- 独立行政法人土木研究所他:光ファイバーセンサを活用した道路斜面モニタリングに関する 共同研究報告書「光ファイバーセンサを活用した斜面崩壊モニタリングシステムの導入・運 用マニュアル(改訂版)」,独立行政法人土木研究所共同研究報告書 352 号, pp.144-156, 2007.
- 2) Choquet, P., M. Quirion, F. Juneau Advances in Fabry-Perot Fiber Optic Sensors and Instruments for Geotechnical Monitoring, Geotechnical News, March 2000.
- Alessi,R.S., L.Prunty :Soil-water Determination Using Fiber Optics, Soil Sci. Soc. Am, Vol.50, pp.860-863, 1986.
- 4) Arregui, F.J., Y.Liu, K.Lenahan, C.Holton, I.R.Matias, R.O.Claus Optical Fiber Humidity Sensor Formed by the Ionic Self-Assembly Monolayer Process, OFS-13, pp.236-239, 1999.
- Yeo,T.L., D.Eckstein, B McKinley, L F Boswell, T Sun and K T V Grattan: Fiber-Optic Sensor for the Monitoring of Moisture Moisture Ingress and Porosity of Concrete, Proceedings of SPIE, Vol.5855, pp.491-494, 2005.
- 6) Murtry,S.M., J.D.Wright, D.A.Jackson : Evaluation of materials for humidity sensing using low coherence interferometry, OFS-13, pp.264-267, 1999.
- Texier,S., S.Pamukcu, J.Toulouse :Advances in subsurface water-content measurement with a distributed Brillouin scattering fibre-optic sensor, Proceedings of SPIE, Vol.5855, pp.555-558, 2005.
- 8) Swart, P.L., R.Naude, B.M.Lacquet :Determining the moisture content in concrete with fibre optic interferometry, OFS-14, pp.1-19. pp.110-113, 2001.
- de Wild, F.H., P.Schmetz : The Application of Optical Sensors for Temperature, Mechanical Stress and Moisture in Energy Cables in The Netherlands, OFS-14, pp.820-823, 2001.
- 10) Ren, Y., P.Mormile, L.Petti, I.di Cibernetica, R.Ottica :Integrated Optical Humidity Sensor with Symmetric Waveguide Structure, OFS-14, pp.2-30, pp.504-507, 2001.
- Tan, K. M., S.C.Tjin, C.C.Chan, L.Mohanty, C.M.Tay 'High relative humidity sensing using gelatin-coated long period grating, Proceedings of SPIE, Vol.5855, pp.375-378, 2005.
- 12) 日本地下水学会編:雨水浸透·地下水涵養,理工図書, pp.40-64, 2001.
- 13) 開發一郎,山中勤,池淵周一,小尻利治:半乾燥地域平地での広域地下水涵養-モンゴル高 原での現地観測結果-,京都大学防災研究所年報,第47号B,2004.
- 14)池田光良,堀内康光,関根達夫:地下水位・土中水分観測システムの設置,JNC-TJ5410
   2004-014, 2005.
- 15) 西垣誠,小松満,龍満弘誠:豪雨時における斜面崩壊予測に関する基礎的研究,土と基礎, Vol.55, No.6, pp.24-26, 2007.
- 16) 上本雄也,森脇武夫,田中祐人:まさ土斜面の降雨浸透特性に対する現場観測,土木学会第
   65 回年次学術講演会,Ⅲ-128, pp.255-256, 2010.

# 2. 光ファイバー圧力計による負圧計測の検定(Type I)

#### 2.1 概説

既開発の光ファイバー圧力計は正圧領域の計測のみ適用されていることから、本研究では、こ れを不飽和領域に拡張するため、サクションの測定域の確認を踏まえて適用性の検証を行った。 なお、測定にはテンシオメーターに各圧力センサ(FBG 圧力計, FPI 圧力計, 間隙水圧計)を同 時に設置し、その経時変化を評価した。なお、光ファイバーセンサは温度変化に影響を受けるこ とから、温度補正の必要性がある。そこで、初期実験として光ファイバー圧力計の温度特性を調 べ、測定精度に与える影響について確認した。

#### 2.2 負圧計測センサの校正

光ファイバーは温度変化の影響を受けて伸縮するため、温度はひずみの測定に影響を及ぼす。 その影響を検討するため、水圧一定条件で温度を変化させた場合の出力値を確認した。用いた圧 力計とアナライザーを写真 2.2-1 及び写真 2.2-2 に、測定結果として温度変化に対する応答を図 2.2-1 に示す。FBG 方式は圧力を計測する波長と温度補正用の波長を有しているが、両者に若干 のタイムラグが生じることが判明した。これは、センサ内部への温度伝播による時間遅れである と考えられる。一方、FPI 方式ではこのようなタイムラグはほとんど確認されなかった。次に、 FBG 方式と FPI 方式の両圧力計について温度変化の影響を考慮した校正を行った結果を図 2.2-2 に示す。なお、FBG 方式の若干のタイムラグについては、実現象で急激な温度変化は生じ ないものとして、現時点では、測定結果はさほど大きく影響されないものと判断した。



写真 2.2-1 圧力計(左: FBG 方式,右: FPI 方式)



写真 2.2-2 アナライザー(左:FBG 方式,右:FPI 方式)



図 2.2-2 を基に作成した校正式を以下に表すとともに、校正式の係数 A,B を図 2.2-3 に示す。 FBG 圧力計: *P* = *A* λ + *B* 

$$A = 2.10t^{2} - 9.70 \times 10^{1}t + 4.03 \times 10^{3}$$
  

$$B = -3.30 \times 10^{3}t^{2} + 1.51 \times 10^{5}t + 6.25 \times 10^{5} \qquad (2.2-1)$$
  
FPI 圧力計:  $P = AV + B$   

$$A = 105.75t^{-0.0096} \quad (R^{2} = 0.62)$$

これらの校正式の係数を見ると、FBG 圧力計では傾き、切片とも2次変動しており、正確な補 正が困難であると判断せざるを得ない。しかし、実際の現場計測を考慮すると急激な温度変化や 水分変化が生じる場合は想定しにくいことから、FBG 圧力計でも適用性の可能性はあると言える。 一方、FPI 圧力計についての校正精度は FBG 圧力計に比べ高いものと思われる。

#### 2.3 室内段階負圧計測試験

先の校正は正圧領域で校正した結果であることから、ここでは実際にテンシオメーターに圧力 計を取り付け、不飽和試料の負圧計測を実施した。実験装置は図 2.3-1 及び写真 2.3-1 に示すよ うに、FBG 圧力計と FPI 圧力計及び間隙水圧計を同一のテンシオメーターに取り付けた。供試 体には水中落下法により詰めた豊浦標準砂を用い、テンシオメーターのセラミックカップの中心 部が底部にセラミックディスクを取り付けた φ 10cm、高さ 10cm のアクリル製カラムの中心にな るように設置した。計測方法は、排水タンクとの高さを段階的(12 時間毎)に増加させ、供試体 内に負圧を発生させることで、各計測器の出力値の経時変化を測定した。



図 2.3-1 負圧計測実験概要図

写真 2.3-1 負圧計測実験状況

まず,温度変化による計測値の変動挙動を比較するため、20℃(計測環境は20±1℃程度)に おける各センサの校正結果から負圧領域に外挿した値を用いて圧力水頭の経時変化に換算したも のを図 2.3・2 に示す。各センサの経時変化を見ると,計測開始後2日後辺りまでは類似した挙動 を示しているが、その後は大きな差異を生じている。間隙水圧計は温度変化には影響されないの で、その値を基準にすると、FBG 方式のほうが変動が顕著である。両圧力計の値が乖離し始めた のは気温下降開始時と一致している。気温が初期の温度に戻った7日後辺りでは FPI 方式の値が 間隙水圧計の挙動に近づいている。しかし、FBG 方式は依然として大きく乱れている。これは、 FBG 方式の温度に対する影響が FPI 方式に比べ大きいことを示している。

次に,前述のキャリブレーション結果を用いて温度補正を行った結果を図 2.3-3 に示す。大き く乱れていた両圧力計の経時変化は,間隙水圧計の挙動にほぼ収束し,同様の経時変化を示した。



### 2.4 現場計測

次に実際の現場における適用性について検討するため、2010 年 6 月下旬より、既に従来型の 圧力計による計測を先行して実施していた北海道天塩郡幌延町開進地区で現地観測を開始した。 FPI 方式の光ファイバー圧力計を写真 2.4-1 に示すバッテリー駆動型の 1ch ロガーに接続し、写 真 2.4-2 に示すように従来型のテンシオメーターに取り付けて、深度 60cm に設置した。



写真 2.4-1 FPI 用 1ch データロガー



写真 2.4-2 現場計測状況

測定結果を図 2.4-1 に示す。同深度(60cm)に設置した市販の圧力計によるテンシオメーター の値とほぼ同様の値を示しているものの,周期的な変化を示している。これは,温度変化による 影響であり,圧力計に設置した温度計により補正は行っていることから,外気温下に設置したデ ータロガーを含む計測機器全体の温度変化による影響とみられ,今後の対策が必要であることが 判明した。



図 2.4-1 FPI 方式テンシオメーターの現地計測結果

### 3. 光ファイバー湿度計による適用性の検討(Type I)

#### 3.1 概説

海外で開発中の光ファイバー湿度センサを応用して、土中湿度が水分量と平衡する際の変化 量について検定した。通常、土中の湿度は 100%に近いと考えられるが、浸潤ならびに排水に 伴う微小な変化をとらえることが出来れば、土中水分量との関係として評価することが可能と なる。また、ここで用いた光ファイバー湿度センサはひずみセンサに吸水膨張材を塗布したも のであり、土中湿度計の適用と併せて、TypeIII(土中水分量に直接反応させる方法)としても 検討するものである。つまり、土中湿度計としての適用のみならず、吸水膨張材の検討にもつ ながるものであることから、土中水分量と直接反応する材料に求められる特性について数値解 析を用いた検討を実施した。

#### 3.2 室内試験による適用性の検討

### (1) 基本性能 (気中・水中)の検定

海外(F社)で開発中の光ファイバー湿度計は,写真 3.2-1 に示すように,FBG 方式のひず みセンサに吸水膨張材を塗布したものであり,光ファイバーの約 15mm 程度が受感部となって おり,1m 程度の間隔で受感部が連装(10個)してある。



写真 3.2-1 FBG 湿度センサ

この湿度センサの初期性能検定として、まずは気中と水中での出力値を確認した。なお、センサの出力は水中が最も大きく、気中で最小となる。測定方法は、直列に連装している波長の異なるセンサを3本用意し、先端2本を測定用にし、残りの1本を室内温度計として使用した。 測定条件は温度を15℃から25℃の範囲で3段階変化させ、センサの経時変化を測定した。

水没前の3本のFBGセンサの結果を図 3.2-1 に,先端2本(ch2, ch3)を水没させた結果 を図 3.2-2 に示す。図 3.2-2 おいて,水没直後の2本のセンサの波長は増加しており,湿度100% となり水温変化のみに影響を受けている。そして,両図より湿度変化と波長変化の相関,温度 変化と波長変化の相関を図 3.2-3,図 3.2-4 に示す。これよりセンサの波長変化は湿度変化お よび温度変化には相関性があり,線形で近似できることが分かる。また,図 3.2-5 に各温度段 階での計測波長をもとに温度と波長の関係を比較したものを示す。気中と水中での波長の差が 最大変化量となることから,約0.25nm程度であることが分かる。



#### (2) 基本性能(土中)の検定

湿度センサを土中に埋設した場合の適用性について検討した。なお、センサは非常に細く脆いため、そのまま土中に埋めると土圧等の荷重により断裂する可能性があることから、図 3.2-6 のように長さ 10.5cm の金属メッシュで覆い強度を高めた。湿度センサとメッシュの位置関係 を写真 3.2-2 に示す。検定方法は図 3.2-7 のように水中落下法により豊浦砂を詰めたカラム内 に Type II センサを埋設し、水頭を徐々に下げて排水させた場合の出力値を確認した。検定結果

として、図 3.2-8 に FBG センサおよび供試体内の温度,試験室内の湿度の経時変化を示し, 供試体内温度,室内湿度の影響を補正した計測波長と排水量の関係を図 3.2-9 に示す。飽和状態の供試体に埋設したセンサの波長は 0.3nm 程度急増し,排水開始後約 2500 分後にはほぼ安定している。約 7300 分後には浸潤面はセンサの位置に達したものと考えられるが,波長は低下しなかった。この原因としては,供試体の湿度が排水後もほとんど変化していない可能性があり,微小の水分変化にセンサが反応することができていないことが考えられる。また,センサを保護するメッシュおよびメッシュと光ファイバーとの間に,水分を保持し続けたため水分変化に反応していない可能性もある。



図 3.2-6 検定装置概略図



写真 3.2-2 センサと保護メッシュの 位置関係







次に、供試体の初期状態を乾燥状態とし、浸潤後に排水を促した場合の波長の変化を測定した。その結果として、図 3.2-10 に波長の差として示す。浸潤過程においては試料中に設置したセンサムλ1に変化が認められたことから、センサ部分が浸潤したもの考えられる。しかし、結果として、排水過程においては前回同様、変化が見られず、水位変化との関係性を示すことが出来なかった。その原因として、保護メッシュと湿度センサが接触していた可能性があり、保護メッシュの構造を変更する必要があることが判明した。また、センサ保護の介在物の透過性を考慮すること、保護メッシュ等の介在物と試料の水分ポテンシャルのバランスを数値解析により求め、最適な吸水膨張材を適用する必要性があることが課題となった。



図 3.2-10 浸潤と排水の連続計測結果

さらに、上述の保護メッシュ内での湿度センサの固定位置を改良し、写真 3.2-3 に示すよう に金属製の多孔管中の両端に設置したキャップにセンサを固定して再度検定を行った。なお、 検定に当たっては、写真 3.2-4 に示す電気式の湿度センサにより土中内の湿度を測定した。こ れらを写真 3.2-5 に示すように水分計とともに束ね、写真 3.2-6 のように乾燥状態の豊浦砂を 詰めたカラムにセンサを埋設した。検定は、写真 3.2-7 のように最初にカラム下部から水を徐々 に浸潤させた後、徐々に排水させた時のセンサの出力値を計測した。その結果を図 3.2-11、試 験室内の温度と湿度変化を図 3.2-12 にそれぞれ示す。



写真 3.2-3 Type II 湿度センサ



### 写真 3.2-4 電気式湿度センサ

JAEA-Research 2012-001



写真 3.2-5 各センサ(上から, Type I・ 電気式・水分計)



写真 3.2-6 センサ設置状況



写真 3.2-7 湿度センサ検定装置概要図



図 3.2-11 において、まず光ファイバー湿度センサ(FBG)と電気式湿度センサの値はほぼ 一致しており、土中湿度を計測している状況を把握することが出来たが、湿度の値が 100%を 越えて上昇する挙動を示す箇所が認められた。これは、試験室内の温度と湿度環境変化である ことが分かる。一方、水分計(FDR)と比較すると、その挙動は一致しておらず、センサ設置 深度の水分量が上昇する前に湿度が上昇するとともに、排水に伴う湿度減少は確認できなかっ た。

したがって、Type II については適用性が認められず、土中への設置は断念することとした。

#### 3.3 数値解析による適用可能な吸収膨張材の水分特性に関する検討

水分計に用いる吸水膨張材は測定対象とする材質(砂・砂質土)の水分特性と比較的近いものが必要となるが、ここでは水分保持特性の差異が測定範囲や精度にどのように影響を及ぼすかについて数値解析を用いて検討した。数値解析には飽和一不飽和浸透流解析コード<sup>1)</sup>(AC-UNSAF2D:van-Genuchten モデル<sup>2)</sup>を取扱うため、一部改良)を用いた。解析に用いた

モデルは上述の検定で用いた室内試験用カラム(内径 $\phi$ 10×高さ 10cm)で中央部に吸水膨張 材(幅 1.0×高さ 0.4cm)を挿入していると仮定した。図 3.3-1 に示すように初期状態で乾燥 状態( $\phi$ =-70cm,  $\theta$ =0.022)の供試体中に供試体下部から 5.0cm の水頭で浸透させた後,今 度は供試体下部から-65cm の水頭で排水させた時の供試体中央部付近における水分挙動を評価 する。図 3.3-2 に示す解析メッシュ図(供試体の半断面)において,吸水膨張材の中央部(節 点 No.11)及び吸水膨張材と試料の境界部(節点 No.116),および同じ高さの試料内部(節点 No.137)における体積含水率の経時変化を求めた。なお,それぞれの節点座標は,供試体下部 中央を中心座標(x,y)=(0mm,0mm)として,No.11(0,50),No.116(5,50),No.137(10,50)である。 次に,解析条件を図 3.3-3 に示す。試料には先の試験と同じ豊浦砂を想定して van-Genuchten モデル 2)における形状パラメータの  $\alpha$  (図中では a として表現), n を同定<sup>30</sup>し,それぞれ 0.0218, 9.748 の値を得た。解析ケースとしては、この豊浦砂の水分保持特性を基に、吸水膨張材の水 分保持特性を変化させ、図 3.3-3 中に示すように case1 (砂と同じ場合)、case2・3 ( $\alpha$ の値を 変化)、case4・5 (n の値を変化)の5 ケースを実施した。

解析結果をそれぞれのケース毎に図 3.3-4~図 3.3-8 に示す。左側が浸潤過程,右側が排水 過程における各節点の経時変化である。豊浦砂と同じ水分保持特性の case1 においては当然同 じ経時変化を示すが,限界毛管高さを表現する形状パラメータ  $\alpha$  を大きく設定した case2 (限 界毛管高さが小さい場合)において変化量は砂と同様である一方で大きなタイムラグを生じて いる。また,  $\alpha$ を小さく設定した case3 (限界毛管高さが大きい場合)は変化量が小さい上に わずかに早く変化し始めており,砂と吸水膨張材の境界においてもその影響が若干見られる。 次に,形状パラメータ n を小さく変化させた case4 においては体積含水率の変化幅が若干小さ くなるものの水分挙動は砂とほぼ同様であり, n を大きく変化させた case5 においてもほぼ同 様と判断することができる。











図 3.3-4 解析結果 (case1:砂と同じ水分保持特性の場合)




上述の結果より,測定対象とする材質(砂・砂質土)の限界毛管高さと比較的近い特性が吸 水膨張材に必要とされることが明らかになった。なお,吸水膨張材の透水係数ならびに,間隙 率や有効飽和度も同様に測定範囲や精度に大きく影響を及ぼすことが想定されることから,水 分計としての吸水膨張材の適用において,水分保持特性と併せて定量的に評価する必要がある ことが判明した。

# 第3章 参考文献

- 赤井浩一,大西有三,西垣誠:有限要素法による飽和不飽和浸透流解析,土木学会論文報告集,第264号,pp.87-96,1977.
- 2) van Genuchten, M.Th.: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Science, Vol.44, pp.892-878, 1980.
- 3) 西垣誠, 竹下祐二:室内および原位置における不飽和浸透特性の試験および調査法に関す る研究, 岡山大学工学部土木工学科, pp.35-95, 1993.

# 4. 光ファイバー水分計測センサの開発(TypeIII)

#### 4.1 概説

光ファイバー水分計測センサ TypeIIIの測定原理は,光ファイバー式ひずみゲージを土中水分 量の変化に対応して伸縮させることで測定しようとするものである。そのため受感部を伸縮さ せるために用いる吸水膨潤材料の選定および,その基本特性の把握が重要となる。本章では, 図 4.1-1の検討フローに示すように,①センサ受感部に用いる吸水膨潤材料の情報収集および 適応性検討,②基本性能の確認およびセンサ受感部への適用性評価,③センサの試作および適 応性評価の3段階で実施した光ファイバー水分計測センサの開発結果について報告する。



#### 4.2 吸水膨潤材料調查

第1段階として,光ファイバー式ひずみゲージを伸縮させるためのセンサ受感部に用いる吸水膨潤材料の情報収集・材料選定を実施した。情報収集・材料選定は,文献やWEB情報で行い,材料メーカーへのヒアリングに基づき,材料の分類,膨潤・収縮性等の適応性に対する評価を行った。その評価結果を表 4.2-1 に示す。

吸水膨潤材料は、合成ゴム・スポンジ状ゴム・高吸水高吸湿繊維・高分子ポリマーの4種類 に分類される。合成ゴムに関しては、固形状・ペースト状・ウレタン液状があり、ペースト状 およびウレタン液状の合成ゴムについては、一般的に型などに流し込み硬化させ使用する材料 である。

高分子ポリマー材料は、紙おむつなどに利用されている材料で、膨潤性についてはどの材料 よりも優れているが、収縮に関してはウレタン液状に劣り、膨潤特性は水質にも強く依存する。 そのため、高分子ポリマー材料を除く、全 13 材料を対象に材料特性の評価試験を実施するこ ととした。 表 4.2-2 に選定した膨潤材の一覧表を示す。なお、No.5~8の膨潤材は、No.9 と同素材の材料で膨潤倍率が異なる材料であり、4.3 節の材料検定から追加した材料である。

材料分類			:	材料検討	b 結果		材料特性評価試験	
1214	イノ技	膨潤性	収縮性	耐久性	加工性	水質依存性	対象	種類
	固形ゴム						0	2
合成ゴム	ペースト状		0	0	0	0	2	
	ウレタン原液						0	1
スポンジ状ゴム		0	0	0	0	0	0	3
高吸水高吸湿繊維(不織布)		0	0	0	Δ	0	0	1
高分子ポリマー	_	Ø	×	Δ	0	×	×	_
							合計	9

表 4.2-1 吸水膨潤材料の適応性評価結果一覧

No.	材料名	材料形状	体積膨張率, 日数 (カタログ値)
1	So1	合成ゴム(固形)	2倍, (不明)
2	So2	合成ゴム(固形)	1.5倍, (15日)
3	Pa1	合成ゴム(ペースト)	2倍, (不明)
4	Pa2	合成ゴム(ペースト)	2倍, (15日)
5	L10	合成ゴム(液状)	約1倍,(不明)
6	L11	合成ゴム(液状)	約1.1倍, (1日)
7	L13	合成ゴム(液状)	約1.3倍, (2日)
8	L30	合成ゴム(液状)	約3倍,(1日)
9	L50	合成ゴム(液状)	5倍, (1日)
10	Sp1	スポンジゴム	2倍, (9日)
11	Sp2	スポンジゴム	1.5倍,(15日)
12	Sp3	スポンジゴム	3倍, (不明)
13	Nw	不繊布	不明, (瞬時)

表 4.2-2 吸水膨潤材料一覧

注(材料名) So:<u>So</u>lid(固形)

Pa :<u>Pa</u>ste(ペースト状)

L :<u>L</u>iquid(液状)

Sp :<u>Sp</u>onge(スポンジ状)

Nw:<u>N</u>onwoven Fabric(不織布)

## 4.3 吸水膨潤材料検定

図 4.3-1 に材料検定のフローを示す。第2段階として,選定した吸水膨潤材料の基本性能の 確認および,センサ受感部への適応性に対する評価を目的に下記に示す5項目の試験を実施し た。試験に用いる供試体のうち固形材料は定型に整形し,ペースト状および液体状の材料は定 型に固化させたのちに整形した。

各試験の目的および結果概要を以下に示す。



#### 4.3.1 膨潤·収縮特性試験

選定した吸水膨潤材料の膨潤・収縮特性の把握を目的に,経過時間に伴う体積膨潤量および体 積収縮量を測定した。

試験方法は,各材料を開放した(拘束しない)状態で蒸留水に浸漬して膨潤させた後に,乾燥収縮させ,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(まち針)を基準にその変化量をノギスで測定して体積膨潤倍率を算出した。

図 4.3-2 に変位量の測定例を示す。膨潤過程は,基本的に平衡状態に達するまで測定し,その後の収縮過程では,初期状態に戻るまで測定を継続した。また,試験環境は,膨潤過程は恒 温室,収縮過程では乾燥室で実施し,温度は23℃一定で試験を実施した。



図 4.3-2 変位量の測定例



写真 4.3-1 変位量の測定状況

膨潤・収縮特性試験結果を図 4.3-3 に示す。

膨潤・収縮特性試験おいて、著しく膨潤・収縮に時間を費やす材料や膨潤過程と収縮過程の時間差が大きい材料は、受感部材料としての反応時間および、センサ性能に大きく影響するため、以降の試験対象から除外した。

なお,吸水膨潤材料 No.5, 6, 8 は,試験途中から追加した材料で,秤で重量を計測して重 量倍率を算出した結果である。



表 4.3-1 に膨潤・収縮特性試験結果をまとめた。

その結果, No.1, 2, 3, 4, 10, 12の材料は, 膨潤過程で4~8日以上, 収縮過程では3~5 日以上の長時間を要した。土中の水分量を計測するセンサとしては, 反応時間は非常に重要な 要素である。したがって, これらの材料は土中水分センサ受感部の吸水膨潤材料としての適応 は困難と判断した。

No.5, 6, は, 重量倍率が 1.02~1.05 倍と他の吸水膨潤材料と比較して小さいので, FBG センサに直接塗布するタイプ(後述する TypeIII-0)に採用することとした。

No.7は、材料が硬化しなかったため、膨潤材料として除外した。

No.8 は、膨潤および収縮時間は、1 日で膨潤倍率も 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適用から除外した。

No.9, 13においては, 膨潤過程で数秒~1日で膨潤し, 収縮過程では1日で収縮し反応時間 は短時間であった。また, No.11においては1日で膨潤し, 収縮過程においては2日を要した が, 体積膨潤倍率においては2倍以上の倍率があり, 光ファイバーにひずみを与える応力とし ては十分期待できる。したがって, No.9, 11, 13の計3種類(液体の合成ゴム, スポンジゴ ム, 不織布)が土中水分センサの受感部材料として適応可能な材料と判断し, 以降の試験材料 として選定した。

No	++**) 々	++ **1 TZ 1/2	膨	潤過程		収縮過程	жи ф
NO.	竹科石	村 科 714 775 1天	経過時間	倍率	経過時間	体積収縮状況	刊化
1	So1	合成ゴム (固形)	4日	1.9倍 (4日時点)	3日以上	3日で初期に戻らず	×
2	So2	合成ゴム (固形)	8日以上	1.9倍 (8日時点)	5日以上	5日で初期に戻らず	×
3	Pa1	合成ゴム (ペースト)	4日	1.7倍 (4日時点)	3日	初期と同様	×
4	Pa2	合成ゴム (ペースト)	4日	2.0倍 (4日時点)	3日	初期より若干増	×
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	×
9	L50	合成ゴム (液状)	1日	3.8倍 (1日時点)	1日	初期と同様	0
10	Sp1	スポンジゴム	8日以上	1.3倍 (8日時点)	1日	初期より収縮	×
11	Sp2	スポンジゴム	1日	2.3倍 (1日時点)	2日	形状変形あり	Δ
12	Sp3	スポンジゴム	8日以上	1.6倍 (8日時点)	5日以上	5日で初期に戻らず	×
13	Nw	不繊布	数秒	3.0倍 (瞬時)	1日	形状変形あり	0

表 4.3-1 膨潤·収縮特性試験結果一覧

## 4.3.2 繰返し膨潤・収縮試験

次に再現性を確認する目的で、膨潤・収縮特性試験で選定した No.9, 11, 13 の 3 種類の材料を対象に繰返し膨潤・収縮試験を実施した。本試験に用いた吸水膨潤材料の一覧を表 4.3-2 に示す。

No.	材料名	材料形状	体積膨張率, 日数 (カタログ値)
9	L50	合成ゴム(液状)	5倍, (1日)
11	Sp2	スポンジゴム	1.5倍, (15日)
13	Nw	不繊布	不明, (瞬時)

表 4.3-2 吸水膨潤材一覧

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回繰返し,体積変化量の経時変化を測定した。なお,測定方法および 膨潤・収縮条件は,膨潤・収縮特性試験と同様とし試験を実施した。試験結果は,各段階での膨 潤率及び収縮率を算出するとともに,膨潤・収縮過程の状態変化を経時変化図としてとりまとめた。

図 4.3-4 に試験結果を示す。No.9 は, 5 回の繰り返しで再現性があり土中水分センサ受感部の吸水膨潤材料として安定した材料であることを確認した。

No.11 と No.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・収縮を繰り返す事により、材料中の高吸水性樹脂が溶出しいていることが考えられる。その結果、再現性が認められない No.11、13 については、以降の試験対象から除外し、受感部に採用する材料として No.9(合成ゴム)の1種類に絞り込んだ。



図 4.3-4 繰り返し膨潤・収縮試験

# 4.3.3 膨潤圧試験

繰返し膨潤・収縮試験で選定した No.9 の吸水膨潤材料を対象に,厚みの異なる3種類の吸水膨潤材料を用いて,圧力特性の把握を目的に膨潤圧試験を実施した。

図 4.3-5 に試験装置の概略図を示す。

試験方法は,浸透性が確保されたポーラス状のカップに No.9 の供試体を設置し,供試体を 拘束した状態で蒸留水へ浸漬させ,電子天秤で膨潤時の加重を測定し,経過時間に伴う材料の 膨潤圧力の変化状況を確認した。また,試験環境は,恒温室で温度は23℃一定で実施した。写 真 4.3-2 に試験状況を示す。



図 4.3-5 試験装置概略図



写真 4.3-2 膨潤圧試験状況

各材料の膨潤圧力を単位面積あたりの膨潤圧に換算した結果を図 4.3-6 に示す。

その結果, 膨潤速度は, 厚みの薄い 1.4mm の材料が最も速く, 次に 2.0mm, 2.5mm の順で あった。また, 材料の厚みと膨潤圧には相関性があり, どの厚みの材料も約 48 時間で膨潤は ほぼ収束した。

また,各材料の厚みが膨潤圧に与える影響を排除するため,単位体積あたりの膨潤力で整理 した結果を図 4.3-7 に示す。単位体積あたりの膨潤力は材料の厚みによらず,約 27000g/cm<sup>3</sup> であることを確認した。



図 4.3-7 膨潤力測定試験結果(単位体積当たりの膨潤力)

## 4.3.4 繰り返し耐久性試験

No.9 の吸水膨潤材料を対象に,繰り返し耐久性の確認を目的に,10 年を想定した10 回の温度変化に伴う膨潤圧の変化を確認した。なお、本試験は長期耐久性の試験ではなく、長期耐久性については、次項の浸漬試験で把握することとした。

試験方法は、膨潤圧試験と同様に浸透性が確保された容器内に No.9 の供試体を設置し、さらに供試体を蒸留水に浸漬させ、供試体を拘束した状態での温度変化に対する膨潤圧の測定を 実施した。設定温度は、土中温度環境を想定して 3~25℃の温度変化(25℃→15℃→3℃→15℃ →25℃)を6時間サイクルで13回繰返し試験を実施した。

図 4.3-8 に試験結果を示す。その結果,温度変化に伴い,鉄製のフレームが膨潤収縮した影響が見られるが,初期状態から膨潤圧は殆ど変化のないことを確認した。



## 4.3.5 浸漬試験

No.9 の吸水膨潤材料を対象に蒸留水および幌延のボーリング孔内水・雨水への長期間浸漬した場合,浸漬水が材料に与える長期耐久性能を把握するために浸漬試験を実施した。

試験方法は、蒸留水、幌延深地層研究計画で掘削したボーリング孔で採水した2種類の地下水(HDB-10, HDB-11 孔)および幌延町北進地区の雪解け水の計4種類の水に、定型に硬化させた供試体を開放状態で浸漬させ、約1ヵ月おきに11ヵ月後までの供試体の重量を測定した。表 4.3-3 に浸漬水の一覧表を示す。

膨潤前の材料重量を初期値として,測定した供試体の重量から膨潤重量倍率を算出し長期浸 漬状況を確認した。浸漬試験状況を写真 4.3-3 に示す。

		雪解け水	蒸留水	地一	下水
	百日	北准地区		HDB-10 孔	HDB-11 孔
	北進地区 SAB-2 付近	—	$(171 \sim 237 \text{m})$	$(445.8 \sim$	
			区間)	469.9m区間)	
ι.	pН	4.65	6.98	8.48	8.46
水匠	EC(mS/m)	3.65	64	2590	1734
貝	水温(EC 測定時,℃)	10.7	12.3	7.2	6.7

表 4.3-3 浸漬水一覧



写真 4.3-3 浸漬試験状況

図 4.3-9 に浸漬試験結果を示す。

No.9の材料を4種類の浸漬水に浸漬させ、8ヵ月間供試体の重量を計測した。

その結果, 膨潤重量倍率は, 各浸漬水において 8 ヶ月間までは 4.3~4.5(倍) で大きな差異 は認められなかったが, 11 ヶ月後には 7~8.5(倍) に大きく変化した。最も変化が大きいのは, HDB-10 で次に HDB-11>雪>蒸留水の順で, 各浸漬水の EC の大きい順であった。No.9 の材 料は, 長期浸漬により材料の特性が変化することを確認した。

浸漬試験の結果から、No.9の材料は8ヶ月間程度の安定性は確認されたが、それ以上の長期 安定性については膨潤倍率が水質により不安定になる課題があることが判明した。したがって、 TypeIIIの実用化にあたっては、水膨潤材材料の探索を継続し長期安定性に優れた材料を採用す ることが必要である。



図 4.3-9 浸漬試験結果

# 4.4 センサの基本形検討 (TypeⅢ-0)

Type II をベースとして,光ひずみ計に吸水膨潤材料を直接塗布し,土試料と直接接触させ, 水分量の違いに対してのひずみ変化を確認した。光ひずみ計に直接塗布する吸水膨潤材料は, 膨潤倍率が大きいと膨潤時に光ひずみ計から剥離し,また,光ひずみ計が破断する可能性があ ることから,膨潤倍率の小さいL10(1倍)とL11(1.1倍)を塗布した。Type III-0の製作は, 吸水膨潤材料の反応性を向上させるため,薄く塗布するように工夫した。製作方法は,光ひず み計に内径 1mm 程度のナイロンチューブを通し,注射器でナイロンチューブ内に吸水膨潤材 料を充填し,硬化させ製作した。写真 4.4-1に製作状況の写真を示す。また,センサには,FBG センサと FPI センサの2種類のタイプを製作した。製作した Type III-0のセンサー覧を表 4.4-1 に示す。

	ТуреШ		
センサータイプ	Туре	еШ−0	
	TypeⅢ-0(FBG)	TypeⅢ-0(FPI)	
概略図	FBGセンサ 膨潤材 水分	FPIセンサ 膨潤材 水分	
写真			
寸法	受感部 外径:2mm、長さ:20mm	受感部 外径:2mm、長さ:15mm	
材料名	L10 (膨潤倍率1倍)、	 L11 (膨潤倍率1.1倍)	
計測原理	・FGBセンサで直	[接ひずみを計測	
試験項目	<ul> <li>・膨潤・収縮試験</li> <li>・模擬地盤試験</li> <li>(砂質土、幌延の土)</li> </ul>	・膨潤・収縮試験	
備考	・FGBセンサ	部に直接塗布	





写真 4.4-1 Type II-0の製作状況

## (1) 水没試験

吸水膨潤材のひずみ量を測定するために,FBG 方式の TypeIII-0 を用いた。写真 4.4-2,写 真 4.4-3 にFBG 計測装置と試験に用いたセンサを示す。また,比較対象として Type II センサ として使用した光湿度センサを用いた。これらのセンサを写真 4.4-4 に示すようにステンレス 製のバット内にセンサを固定し,バット内を水で満たすことにより,出力値の変化を観察した。 なお,水圧の影響を取り除くために,吸水膨潤材を塗布していないひずみゲージについても同 様に測定した。図 4.4-1 に水深が約 2cm の試験結果を示す。各ひずみ量は吸水膨潤材を塗布し ていないひずみゲージの出力値を差し引いて表示している。ここで,ひずみ量の大きさは, L10・L11・光湿度センサの順となっており,L11 と L10 の膨潤率の違いが現れている。なお, L10 の膨潤率は約 1.0 倍であるが,若干のひずみを生じていることが分かる。なお,約 12 時 間後に排水した上で乾燥させると,いずれのひずみ量も初期値に戻ったことから,再現性が認 められた。



写真 4.4-2 FBG 計測装置 写真 4.4-3 各種センサ

写真 4.4-4 水没試験状況



図 4.4-1 水没試験結果

#### (2) 現地土に対する適用評価

水没試験での結果から,吸水膨潤材によるひずみ量の増加が認められたことから,今度は現 地土として前述の B 地点から採取した試料を用いて同様の試験を実施した。なお,吸水膨潤材 が水分を吸収する条件として,土試料との接触面での圧力バランスが大きく影響するものと推 察される。そこで,あらかじめ写真 4.4.5 に示すように種々の飽和度に調整した土試料の圧力 水頭をテンシオメーターで測定し,表 4.4.2 に示す圧力水頭の大きく異なる3種類の飽和度で 適用性を検討することとした。試験は写真 4.4.6 に示すように,センサ上に試料を撒いて,所 定の間隙率になるように締め固めた。そのため,個々のセンサに掛かる土圧が一定とは限らな いために,測定の初期や排土の際に局所的なひずみが生じる可能性がある。

連続して実施した3ケースの試験結果を図 4.4-2 に示す。飽和度の上昇に伴い,特にL11の ひずみ量が徐々に増加している様子が見られる。飽和度 40%ではL11,L10ともに初期に受け た土圧の影響と思われるひずみ量の低下(引っ張り)が徐々に元に戻っている。そして,飽和 度 50%では,L10では一度ひずみ量が増加した後で徐々に低下しており,L11と異なる結果を 示した。さらに,飽和度 60%では,いずれのセンサも膨潤挙動を示した。



写真 4.4-5 試料のサクション測定状況



写真 4.4-6 現地土に対する試験状況

表 4.4-2 試験ケース

試測	験ケース	飽和度Sr (%)	圧力水頭 ψ (cmH <sub>2</sub> 0)
1	水	_	2
2	<u>2</u> - 幌延土	40	-735
3		50	-396
4	(11-0. 53)	60	-57



図 4.4-2 現地土に対する適用試験結果

上図に示したように、水分量の異なる土試料に対して、膨潤量が異なる結果を示した。その 要因として、吸水膨潤材が水分を吸収する際の土試料との圧力バランスが挙げられる。つまり、 水分量の低い土試料においては、サクションが高いために、吸水膨潤材が水分を受け取ること が出来ない。一方、飽和度の高い土試料に対しては、逆に容易に水分を受け取ることが出来る。 つまり、今回の試験はごく基礎的なものであるが、光ファイバー式ひずみ計に吸水膨潤材を塗 布するという基本原理は土中水分量の測定に対する可能性を示しているものと判断することが 出来る。

今後の課題としては、上述のように今回のセンサを直接用いる場合は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プロトタイプセンサとして、フィルター を用いる方法や、ひずみゲージではなく、負圧測定に用いたような圧力センサを用いて膨潤圧 力を測定する方法が有効であると考えられる。

## 4.5 プロトタイプセンサの製作(TypeIII-A, TypeIII-B)

4.3 項までで,光ファイバー式ひずみ計を応用した土中水分センサの受感部に用いる吸水膨 潤材料を選定するため,その情報を収集し分析と評価を実施した。その結果,土中水分センサ 受感部の膨潤材としてサンプル No.9 (L50)の材料を選定した。そこで,土中水分センサ受感 部に用いる膨潤材の選定結果を受け,センサ受感部および土中水分センサを製作した。土中水 分センサは,FBG センサで直接ひずみを計測する Type III-A センサを3種類,吸水膨潤材料の 膨潤圧を計測する Type III-B センサを2種類,計5種類のタイプを製作した。

製作した土中水分センサおよびセンサ受感部の一覧を表 4.5-1 に示す。

TypeIII-A(1)は、ステンレスパイプの中に FBG センサを接着剤で固定し、吸水膨潤材料の膨 潤・収縮がステンレスパイプに歪みを与え、この歪みを FBG センサで計測する構造とした。 また、吸水膨潤材料の周辺は、円周方向の拘束力を持ちながら土中の水分の浸入を許し、かつ、 軸方向への力を与えるためにコイルを採用した。 TypeIII-A(2)は、中空のフィルター材に FBG センサを通し、フィルター内を吸水膨潤材料で 充填する構造で、フィルター材の端と FBG センサを接着剤で固定することで、FBG センサに 直接歪みを与える構造とした。また、フィルター材は、土中の水分の浸透性を確保するため、 樹脂系の焼結フィルターを採用した。

TypeIII-A(3)は、穴の開いた焼結フィルター材の中心に FBG センサを通し、フィルター材の 両端を接着剤で固定、フィルター材に吸水膨潤材料を浸透させ FBG センサとフィルター材お よび吸水膨潤材料を一体化する構造とした。また、フィルター材は、TypeIII-A(2)と同様に樹脂 系の焼結フィルターを採用した。

TypeIII-B(1)および TypeIII-B(2)は、水圧計の計測原理を利用し吸水膨潤材料の膨潤圧をメン ブレムが受け、メンブレムの歪みを計測する。受感部の形状は土中の水分と吸水膨潤材料が容 易に接触できるように、TypeIII-B(1)では凸型構造の穴あきコネクターを使用し、TypeIII-B(2) では土中との接触面積を大きくするため金属製のポーラスメタル(焼結フィルター)を利用し た。なお、今回の適用試験では電気式圧力計を用いたが、実用化に際しては光ファイバー式圧 力計を用いる予定である。

			ТуреШ		
ち くし しし		Type田-A(ひずみ計測式)		Type 田-B(滕	(潤圧計測式)
	TypeII-A(1)	Type II-A(2)	Type III-A(3)	TypeⅢ-B(1)	Type III-B(2)
戡	FBGセンサ ステンレス ステンレス 総調材 地間 加 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	FBGセンサ 推満剤 膨潤材 推測 2.1/Lター材 酸潤材 1.1/Lター材	FBG在之中 接着材 7-1/1/9村 (歐洲村名漫画)	FBGセンサ 膨満村 一 たンプレム 受感部 一 プロック 受感部 一 プロック の の の の の の の の の の の の の	FBGセンサ 膨潤材 酸潤材 酸潤材 一 メンプレム タ感部 プロック プロック プロック プロック プロック が デーラスタル ポーラスタル が、実用試験では電気式を用いる。
ነመ <u>ኛ</u> ቢተ					
Ч Ч	外径:18mm、長さ:65mm	①外径:10mm、 内径:4.8mm、長さ:12mm ②外径:8mm、 内径4mm、長さ:12mm	外径:5.2mm、長さ:10mm	受感部 ①外径:10.4mm、長さ:11mm ②外径:6mm、長さ:4.5mm	ポーラスメタル部 ①外径:28mm、厚み:1mm ②外径:28mm、厚み:2mm
材料名			No.9(L50):膨潤倍率5倍(カタログ値)		
計測原理	・ステンレスパイプのひず みをFBGセン サで計測	・FBGセンサで直接ひずみを計測	・FBGセンサで直接ひずみを計測	・膨潤材の膨潤圧がメンプレムが受 け、メンプレムのひずみを計測	・膨潤材の膨潤圧がメンプレムが受け、メンプレムのひずみを計測
試験項目	・膨潤・収縮試験	・膨け調・収縮詰取	・膨潤・収縮試験	·膨潤•収縮試験 •砂試料適用試験(砂質土)	・膨潤 ・収縮試験 ・砂試料適用試験(砂質土)
衝	・ステンレスパイプ内は、接着剤で充填	・中空フィルター材の中に膨潤材を充 填 ・FBGセンサ部に直接塗布	・フィルター村に膨潤材を浸透 ・FBGセンサ部に直接塗布 ・粗日、細日の2種類	・センサの応用例 ・膨潤材の厚み2種類	・センサの応用例 ・ポーラスメタルの厚み2種類

表 4.5-1 センサー覧

## 4.6 センサの基本仕様に対する検討

吸水膨潤材料 No.9 の検定結果を受け、土中水分センサの基本仕様について検討した結果を 以下にまとめる。

センサの反応性は、土中水分の計測精度に関わるため重要である。

これまでの試験結果より、反応性を向上するためには、受感部を小型化し吸水膨潤材料の体 積を小さくすることが有効である。さらにフィルター部の厚みを薄くすることで膨潤圧の伝達 が速くなり反応性も向上する。

センサの設置に関して、対象土質と受感部に空隙があると地下水の水みちとなり、土中の水 分量を正確に把握することが困難となることが想定される。したがって、センサの設置方法は、 貫入による設置方法が有効と考えられる。さらにセンサ先端を円錐型のコーン構造とし、貫入 抵抗の低減を図るとともに、貫入時の衝撃からセンサを守るための強度を確保することも重要 である。また、長期観測に耐えられよう耐腐食性・耐電食性も考慮し、センサを製作する必要 がある。

#### 4.7 室内試験による適用性の検討

製作した 5 つのセンサについて, 膨潤・収縮過程における FBG のひずみ量および膨潤圧を 計測し, 土中の水分量を測定するセンサとしての適応性について検討した。

#### 4.7.1 Type IIの水中での膨潤・収縮試験

試験方法は, 蒸留水を入れた容器内にセンサを浸漬させ, 膨潤圧力の経時変化を確認した。 また, 恒温室内の温度 23℃, 湿度 50%一定として試験を実施した。写真 4.7-1 に恒温室, 写 真 4.7-2, 写真 4.7-3, 写真 4.7-4, 写真 4.7-5 に各センサの試験状況を示す。

各センサの膨潤・収縮試験の結果を以下に示す。



写真 4.7-1 恒温室



写真 4.7-2 TypeⅢ-A(1)試験状況



写真 4.7-3 TypeⅢ-A(2)試験状況



写真 4.7-4 TypeⅢ-A(3)試験状況



写真 4.7-5 TypeⅢ-B(1),(2)試験状況

## (1) Type II-A の水中での膨潤・収縮試験結果

TypeIII-A(1), (2), (3)の試験結果を図 4.7-1~図 4.7-5 に示す。なお, 図の縦軸は吸水膨潤 材料の膨潤・収縮によって FBG センサに与えるひずみ量を波長で示したものである。

TypeIII-A(1)の膨潤試験結果を図 4.7-1 に示す。その結果,浸漬開始から 7 時間で波長は安定したが,その波長変化量は,0.5nm で FBG センサの歪み量としては小さく,十分な歪みをFBG センサに与えることができなかった。また,さらに浸漬を継続させたところ,吸水膨潤材料がコイルの隙間よりはみ出てしまった。歪み量を大きくする解決策としては,吸水膨潤材料の体積を大きくし,歪み量を大きくすることも考えられるが,体積を大きくした場合は,吸水膨潤材料の厚みが大きくなってしまい,吸水膨潤材料の反応時間が鈍くなる事が懸念される。したがって,TypeIII-A(1)の適応は困難と判断した。



図 4.7-1 試験結果およびセンサ概略図(TypeⅢ-A(1))

TypeIII-A(2)のセンサについて,外径の異なる 2 種類のフィルター材で膨潤収縮試験を実施 した結果を図 4.7-2,図 4.7-3 にそれぞれ示す。その結果,膨潤時間は 24~29 時間,波長変 化量は 8.2~14.0nm で歪み量としては大きい値を得ることができた。

FBG センサの波長変化量が 10nm を超えると FBG センサが破断する危険性がある。解決策 として、受感部の吸水膨潤材料の体積を調整することで歪み量を調整でき、さらに吸水膨潤材 料の厚みを薄くすることで膨潤反応時間も短縮することが可能であることから、土中水分セン サとして適応可能と判断した。



図 4.7-2 試験結果およびセンサ概略図 (Type III-A(2)大径)



図 4.7-3 試験結果およびセンサ概略図(TypeⅢ-A(2)小径)

TypeIII-A(3)のセンサについいて,目の粗さが異なる2種類のフィルター材で膨潤収縮試験 を実施した結果を図4.7-4,図4.7-5にそれぞれ示す。その結果,膨潤時間は16~17時間, 波長変化量は0.5~1.0nmで歪み量としては小さいものの,TypeIII-A(2)と同様に,受感部の吸 水膨潤材料の体積を調整することで歪み量を調整でき,さらに吸水膨潤材料の厚みを薄くする ことで膨潤反応時間も短縮することが可能であることから,土中水分センサとして適応可能と 判断した。





## (2) Type II-B の水中での膨潤・収縮試験結果

TypeⅢ-B(1)のセンサについて,大きさが異なる2種類の受感部で膨潤収縮試験を実施した結果を図 4.7-6,図 4.7-7 にそれぞれ示す。その結果,膨潤時間は 6~10 時間,膨潤圧は 2.8~ 4.5MPa で他のセンサと比べ短時間で膨潤し,膨潤圧力としても十分な膨潤力であることから, 土中水分センサとして適応可能と判断した。





図 4.7-6 試験結果およびセンサ概略図 (TypeⅢ-B(1)受感部大)

TypeIII-B(2)のセンサについて、受感部に装着した厚みが異なる 2 種類のポーラスメタルで 膨潤収縮試験を実施した結果を図 4.7-8、図 4.7-9 にそれぞれ示す。その結果、吸水膨潤材料 の膨潤圧力に耐えきれず、ポーラスメタル部に亀裂の発生や凸状に変形した。ポーラスメタル は、金属玉を焼結させた素材のため、吸水膨潤材料の膨潤圧力に対しては、強度不足であるこ とが判明した。解決策として、ポーラスメタルの剛性を向上させるため厚みをさらに厚くする ことが考えられるが、土中水分センサとしては、フィルター材の厚みが増すと、吸水膨潤材料 の反応時間が鈍くなることが懸念されるため、TypeIII-B(2)の適応は困難と判断した。



以上, TypeⅢ-A,Bの評価試験結果を表 4.7-1 にまとめた。

図 4.7-8 試験結果およびセンサ概略図(TypeIII-B(2)厚み 2mm)



図 4.7-9 試験結果およびセンサ概略図(TypeⅢ-B(2)厚み 1mm)

センサタイプ	初期から膨潤までの経過時間	膨潤時の波 長・膨潤圧	適用性
TypeIII-A(1)	7 時間	0.5nm	×
TypeⅢ-A(2)大径	24 時間	14.0nm	
TypeⅢ-A(2)小径	29 時間	8.2nm	0
TypeⅢ-A(3)粗目	17 時間	1.0nm	
TypeⅢ-A(3)細目	16 時間	0.5nm	0
TypeⅢ-B(1)受感部大	6 時間	2.8MPa	0
TypeⅢ-B(1)受感部小	10 時間	4.5MPa	0
TypeⅢ-B(2)厚み 2mm	20 時間	4.1MPa	~
TypeⅢ-B(2)厚み 1mm	50 時間	1.3MPa	~

表 4.7-1 評価試験結果一覧

#### 4.7.2 Type II-B の土中での膨潤・収縮試験結果

次に,TypeIII-B(1)のセンサについて,土中の水分量と膨潤・収縮との関係を簡易的に把握 することを目的に砂試料に対する適用試験を実施した。

試験方法は、5号硅砂で飽和度 10%、20%、30%の3条件の供試体を製作し、受感部の吸水 膨潤材料(No.9)を、乾燥状態(膨潤前)および、事前に蒸留水へ浸漬した膨潤状態(収縮前) の2種類を用意し、それぞれを水分量の異なる供試体へ設置し、膨潤・収縮圧力の経時変化を 計測した。なお、供試体は恒温室で温度(23℃)を一定とし、表面は乾燥防止のためパラフィ ンで養生した。

5号硅砂の基本特性を表 4.7-2 に, 粒径加積曲線を図 4.7-10 に示す。また, 写真 4.7-6 に試験状況, 写真 4.7-7 に供試体寸法図, 図 4.7-11 に試験概念図を示す。

	粘土分(%)	1	0.3
	シルト分(	%)	0.1
粒		全体	99.6
度	砂分(%)	(細砂分)	(18.9)
		(中砂分)	(80.2)
	礫分 (%)		0.0
土粒子の密度 ρ s g/cm <sup>3</sup>			2.659
最小乾燥密度 ρ dmin g/cm <sup>3</sup>			1.423
最大	乾燥密度 $\rho$ dn	<sub>nax</sub> g/cm <sup>3</sup>	1.684

表 4.7-2 5号硅砂基本特性一覧



図 4.7-10 5号硅砂の粒径加積曲線



写真 4.7-6 試験状況







図 4.7-12 に Type III-B(1)の試験結果を示す。全体的な傾向としては、センサ受感部の初期状態が膨潤状態・収縮状態のいずれの場合でも、地盤中の飽和度が高いほど膨潤圧力は高く、膨潤圧力と飽和度の相関関係(30%>20%>10%)となることが確認された。しかしながら、飽和度毎の膨潤圧力の変動に着目すると、飽和度 10%のケースでは、約 35 時間後に一定値に収束しているものの、飽和度 20%では収束する傾向にあるが一定値に収束するまでには非常に長時間を必要とすると想定される。さらに飽和度 30%では一定値に収束する傾向が認められない。

以上の結果から、一定の飽和度では膨潤材料の初期状態によらず一定値を示す結果が得られ たことから、センサ構造としての妥当性が示された。しかしながら、センサ実用化にあたって はさらに膨潤反応時間が短く、比較的高い飽和度でも膨潤圧力の変動がもう少し明確に現れる ような膨潤材料を選定する必要がある。

なお,飽和度 10%・20%において,時間が経過するとともに全体的に膨潤圧が低下している が,これは,模擬地盤の乾燥を防止するためのパラフィンが効かず,地盤の飽和度が低下した ことが原因であると考えられる。



図 4.7-12 砂試料に対する適用試験結果(TypeⅢ-B(1))

# 5. 原位置土中水分計測による地下水涵養量の評価 (現場計測及び室内物性試験の実施)

## 5.1 概説

地下水流動解析の上部境界条件として地下水涵養量の設定が重要であり、地下水流動状況に 直接的な影響を及ぼしている。地下水涵養量の算定はこれまで主に、式(5.1-1)に示すように降 雨量から表面流出量、蒸発散量、土中貯留量を差し引く形(図 5.1-1 参照)で求められている が、特に蒸発散量や植生の影響を考慮した算定は、多くの仮定を含んでいることや計測項目自 体も多く、非常に労力が多いと言える。

$$G = P - E - Q - \Delta S \tag{5.1-1}$$

ここで、G:地下水涵養量、P:降雨量、E:蒸発散量、Q:表面流出量、ΔS:貯留量である。 そこで、土中への浸透量を直接的に計測する手法について検討した。具体的には、図 5.1-2 に示すように現地における水分量の計測結果から直接涵養量を算定する手法と、さらに不飽和 透水係数の値から涵養量を推定する手法について検討する。後者については、現地のサンプリ ング試料に対して測定した水分保持特性から現地での水頭分布を推定することで、発散ゼロフ ラックス面<sup>1)</sup>(以下、単にゼロフラックス面と呼ぶ)を推定することができ、このゼロフラッ クス面以深では重力による作用のみ(動水勾配≒1)で鉛直浸透するため、涵養量は不飽和透 水係数に比例することで求まる。つまり、現地サンプリング試料から不飽和透水係数が求まれ ば、涵養量を簡易的に算定することが可能となる。



推定フロー

# 5.2 現場計測概要

現地観測は 2008 年 11 月より,図 5.2-1 に示す北海道天塩郡幌延町開進地区で開始した<sup>2)</sup>。現場は写真 5.2-1 に示すように,2箇所(A地点,B地点)を選定した。



2 5.2-1 現場観測位置図



写真 5.2-1 観測現場の状況

## 5.3 室内試験による諸物性値の測定

現地にて写真 5.3-1 に示す手動式コアサンプラーによる試料採取を実施した。その試料を基 に物理特性を測定した。表 5.3-1 に土粒子密度,図 5.3-1 に粒径加積曲線,図 5.3-2 に間隙率 の分布をそれぞれ示す。



写真 5.3-1 コアサンプラー(サンプリングチューブ:  $\phi$  50×L300mm)

採取深度GL-(m)	30cm	60cm
土粒子密度 <i>ρ</i> s	2.44	2.41
均等係数 Uc	74	190
曲率係数 Uc'	2.6	3.0

表 5.3-1 現場 A 地点試料の土粒子密度と均等係数及び曲率係数



次に,現場採取試料を現地の間隙率分布を基に再構成した供試体を用い,浸透特性(水分特性) 性曲線及び飽和・不飽和透水係数)を求める室内試験を実施した。

#### 5.3.1 保水性試験

水分特性曲線を測定する方法として、ここでは加圧板法を用いた。試験装置の概略を図 5.3-3 に、試験状況を写真 5.3-2 に示す。ここで用いたセラミックディスクの空気侵入値は 300kPa, 飽和透水係数は 3.38×10<sup>-7</sup>(cm/s)である。供試体は任意の含水率に調整した試料を、それぞれ 現地の間隙率に合わせて締め固めて作成し、二酸化炭素及び脱気水を通水し、さらに水中脱気 により、試験の初期状態を飽和とした。得られた結果を図 5.3-4 に示す。なお、ここで得られ たデータを基に van Genuchten モデル <sup>3</sup>に対して同定した結果を併記する。

#### 5.3.2 加圧型変水位透水試験

次に,透水係数の値を評価する目的で,まず飽和に近い領域での不飽和透水係数を加圧型変 水位透水試験 4により測定した。試験装置を図 5.3-5,写真 5.3-3に示す。直径 φ 100mm のア クリル製のカラム内に 50mm 高の供試体とし,供試体は保水性試験と同様に任意の含水率に調 整した試料を,それぞれ現地の間隙率に合わせて締め固めて作成した。

試験方法は、作成した供試体下部から徐々に注水した後、マリオットビュレットと排水タン クに背圧を掛けて供試体内部の飽和度を高めた状態で変水位透水試験の要領でビュレット内の 水位の時間的な低下量を求めた。なお、供試体の飽和度(Sr)は、マリオットサイフォン内の水 位低下量より次式を用いて得ることができる。

$$S_{r0} = \frac{1}{1 - H} - \frac{\Delta V(P_0 + \Delta P)}{V_v(\Delta P)}$$
(5.3-1)

ここで、 $S_{10}$ :初期の飽和度(%)、H: ヘンリー定数(=0.02:20°C)、 $\Delta V$ :  $\Delta P$ を作用させる ことにより、ビュレット内の水位の低下量より求めた供試体に流入した水量(m<sup>3</sup>)、 $V_v$ : 供試体 の間隙の体積(m<sup>3</sup>)、 $P_0$ : 大気圧(Pa)、 $\Delta P$ : 背圧(Pa)である。図 5.3-6 に試験結果を示す。両現 場の透水係数を比較すると約1オーダー程度の違いがあり、初期飽和度は現場 A の試料に対し ては約75~80%、現場 B の試料に対しては約85~90%程度となった。なお、背圧を100kPa 以上作用させたところ、両試料ともに約95%以上の飽和度に相当する透水係数が得られた。





写真 5.3-2 試験状況



図 5.3-4 保水性試験結果:現場 A 試料(深度 30cm, 60cm 採取)



図 5.3-5 加圧型変水位透水試験装置

写真 5.3-3 加圧型変水位透水試験状況



図 5.3-6 加圧型変水位透水試験結果(20℃換算值):現場 A 試料

## 5.3.3 瞬時水分計測法 (IPM)

図 5.3・6 に示した不飽和透水係数に対してさらに低い水分領域での値を求めることを目的と して、瞬時水分計測法 5による浸透試験を実施した。試験装置を図 5.3・7、写真 5.3・4 に示す。 直径 φ 100mm のアクリル製のカラム内に 600mm 高の供試体とし、供試体は B 地点の深度 60cm から採取した試料を用いい、初期飽和度が 50%になるように水分調整した上で、現地の 間隙率に合わせて締め固めて作成した。なお、水分量と圧力水頭の測定にはそれぞれ FDR-V 法 のと現地のテンシオメーターで使用している圧力センサにセラミックカップを接続したもの を用い、上部より 6cm 間隔で 5 点を測定した。試験方法としては、作成した供試体上部から一 定水位 (70cm) で注水した際の水分量と圧力水頭の経時変化を測定する。体積含水率の値が上 昇した後に一定値で安定したことを確認後、今度は上部よりコンプレッサーを用いて背圧を作 用させ、排水過程を測定した。




図 5.3-7 圧力制御型瞬時水分計測法 試験装置

写真 5.3-4 圧力制御型瞬時水分試験実施状況

浸潤過程の水分量と圧力水頭の計測結果を図 5.3-8 に示す。初期値にばらつきがあるものの, 注水に伴う値の上昇が認められた。この非定常データを用いて水分保持特性と不飽和透水係数 の不飽和浸透特性を算定した結果を図 5.3-9 に示す。浸潤に伴う体積含水率の増加量がごくわ ずかであったために,広範囲にわたる水分量に対する不飽和透水係数を求めることはできなか ったが,言い換えると,対象とした試料がわずかの水分量変化で急激なサクションの低下挙動 を示す傾向があることが示された。

浸潤過程の計測後,今度は上部から背圧 100kPa を掛けて体積含水率の変化を測定したところ,ほとんど変化は認められなかった。その理由としては,図 5.3-8(b)に示すように,体積含水率が 0.25 付近での排水には約 200kPa 以上の背圧が必要であり,今回用いた試料のようにシルト分を多く土に適用する場合において,浸潤過程と排水過程を連続して実施する上では,さらに高い水頭差で浸透させ,さらに浸潤後に通水により飽和度を高める必要があることが分かった。





図 5.3-9 不飽和浸透特性

### 5.4 現場計測方法

観測現場の概略を図 5.4-1, 各計測項目を表 5.4-1 に示す。現地では約2年間の計測を実施 し,主に3深度を対象としているが, A地点では2010年8月より深度120cmにも計測機器を 設置した。サンプリング時間は20分毎であり,1時間あたりの平均値に換算して結果を整理し た。なお,観測現場では降水量の観測を行っていないため,幌延市街地に設置されている気象 庁幌延地域雨量観測所の降水量データを利用した。



図 5.4-1 観測現場の概略図

## 表 5.4-1 観測項目および装置

① ADR 水分計(2 地点 3 深度: 30cm, 60cm, 90cm/120cm: A 地点のみ 2010 年追加)

テンシオメーター(2地点1深度:60cm/30cm・90cm・120cm:A地点のみ2010年追加)

- ③ 土中温度(2地点2深度:30cm,60cm)
- ④ 光ファイバー方式(FPI 方式)テンシオメーター(60cm: A 地点のみ 2010 年追加)
- ⑤ 間隙空気圧計(60cm: A 地点のみ 2010 年追加)



写真 5.4-1 センサ設置状況(現場 A 地点)

写真 5.4-2 石膏埋め戻し 状況(現場A地点)

写真 5.4-1 にセンサ設置状況を示す。ADR 水分計及びテンシオメーターは市販のものを用い <sup>7)</sup>,ボーリング孔内に設置する際には、写真 5.4-2 に示すように地盤との密着性と雨水の浸入 を防ぐ目的で低膨張性の石膏を用いた。なお、テンシオメーター用の脱気水自動給水装置(4 個)を製作し、2010年にA地点に設置した。

### 5.5 現場計測結果及び考察

水分量と圧力水頭の経時変化を図 5.5-1 及び図 5.5-2 にそれぞれ示す。また、図 5.5-3 に飽 和度に換算した結果を示す。降雨に伴い、30cm、60cm で反応が大きく現れている。また、90cm と 120cm の結果を見ると、9 月~10 月にかけて若干値が低下する時期が見られるが、概ね一 定の値を示したことから、90cm 以深では水分量の変化がほとんど無い事が判明した。季節的 な変動については概ね冬季が高く、4 月~5 月の春季に大幅な低下傾向が見られる。これは、 現地が 11 月末頃から 4 月上旬まで積雪で覆われていることが影響しており、融雪が終了した 時点から大幅に値が低下することが分かる。圧力水頭の計測については、遅れて開始されてお り、また当初は 60cm の 1 深度のみであるため、その傾向を年間を通じて評価することは難し い。



(b) B 地点 図 5.5-1 水分量(体積含水率)の計測結果



図 5.5-2 圧力水頭の計測結果



次に,2010年7月15日~9月2日の比較的降雨の多かった時期に注目して水分量と圧力水 頭の経時変化をまとめた結果を図 5.5-4,図 5.5-5に示す。B地点での変化がA地点に比べて 小さいのは斜面に垂直にセンサを設置していることから,実際にはより深い点を計測している ためである。また,A地点で8/18以前の圧力水頭データが欠測しているのはデータロガーの不 具合のためである。また,深度120cmで正圧を示している期間が現れているが、これはセンサ 設置に伴って発生した間隙水圧が消散するのに時間を要しているためであると考えられる。

また,その他の観測結果として,図 5.5-6 に地中温度の測定結果を示す。冬季は積雪で覆われているが、少なくとも 30cm 以深では氷点下にはなっていない。現在開発中の吸水膨張材を 用いた光ファイバー水分計では、光ファイバーによるひずみ計測自体で温度補正が必要なこと に加えて、吸水膨張材の温度変化による影響が懸念されることから、今後の検討において参考 になる。

最後に、間隙空気圧の経時変化を図 5.5-7 に示す。計器設置後から正圧を示している期間が 現れている。これはセンサ設置に伴って発生した空気圧が消散するのに時間を要しているため であると考えられ、センサ設置後に余分な空気圧を逃がす必要があることが判明した。9 月中 旬以降に上部に空気弁を取り付けた構造として再度測定し直した結果、降雨に反応して間隙空 気圧が上昇する挙動を示した。間隙空気圧の値としては、水頭換算で最大約 50cm 程度であり、 より精密な観測値を得るためには、テンシオメーターの測定値を補正する必要があることが示 唆された。



-64-

### 5.6 現場計測結果の妥当性の検証

地下水涵養量を直接水分量の測定結果から算定する際,結果の妥当性は現地計測での測定精 度に大きく左右されることとなる。そこで,水分計とテンシオメーターの計測において測定精 度に影響を及ぼす要因についてまとめるとともに,前節で測定した室内試験結果と現地計測値 の整合性を評価する。

#### 5.6.1 水分計に関する検証

図 5.6・1 に A 地点の試料に対する ADR 水分計(現地計測機器)と FDR-V 水分計(瞬時水 分計測法での計測機器)のキャリブレーション結果を示す。なお, Toppら<sup>80</sup>が示した校正曲線 を併記している。それぞれの計測値は,各深度の校正曲線を用いているが,現場採取試料を室 内で水分調整の後,再構成して作成した供試体に対して測定しているため,供試体の水分や局 所的な密度のばらつきによる誤差が含まれている可能性が否定できない。特に FDR-V 法では 体積含水率が 0.2~0.4 の範囲で値の急激な変化が生じており,測定値のわずかな誤差が体積含 水率の値に大きく影響することを踏まえて評価を行なう必要があることが分かる。



# 5.6.2 テンシオメーターに関する検証

### (1) 不凍液使用に対する検証

テンシオメーターの構造として、内部脱気水の凍結への対策が必要である。図 5.5-6 に示 したように地表面から少なくとも 20~30cm では凍結による影響は無いものと判断でき、テ ンシオメーターを地中に埋設する場合は、凍結への対策が不要であることがわかる。しかし、 今回用いたような従来タイプ(脱気水の交換を地上で行なう方式)では、気温が零下になる ことから凍結への対策が必要である。過去の研究では、セラミック内部に水を充填した際の 測定値と不凍液を充填した際の測定値が浸透ポテンシャルの違いにより差が出ることを示し ている <sup>9</sup>。具体的には、ポリエチレングリコール水溶液等の不凍液を用いて、図 5.6-2 の装 置を用いて圧力水頭の測定を行っており、図 5.6-3 の結果を得ている。ここでは、A 地点で 実際に用いている不凍液(ポリエチレングリコール 20%水溶液及び GD ブライン 900P(ゴ ードー製)希釈濃度 50%(凍結温度・29℃))による測定値補正の必要性について、写真 5.6-1 に示す現場と同タイプのテンシオメーターを設置して計測を行なった。試料はA地点の深度 60cmから採取したものを現場と同じ間隙率で飽和度 60%になるように締め固めて作成した。 計測は3本のテンシオメーターで行い,最初の6日間は全て脱気水で計測した。その後,そ れぞれの不凍液に交換した後,随時,テンシオメーター内部液を補充しながら計測を継続し た。

計測結果として, 圧力水頭の経時変化を図 5.6-4 に, 計測開始 6 日間経過後の値を初期値 として最終計測値の差をまとめたものを表 5.6-1 に示す。経時変化の挙動は,内部液を補充 する度に値が大きくなっているが,数日で元の値に戻る結果を得た。結果として,両不凍液 ともに浸透圧に相当する値の低下は微小であったことから,不凍液を使用した時期の現場測 定値の補正は行なわないことにした。



図 5.6-2 サクション測定装置<sup>9)</sup>

図 5.6-3 水分特性曲線<sup>9)</sup>



写真 5.6-1 不凍液の検討状況付



図 5.6-4 不凍液使用に対する圧力水頭の経時変化

表 5.6-1 計測結果

No.	種類	脱気水	最終値	差	浸透圧(cm)
1	ポリエチレングリコール	-12.39	-15.19	-2.80	3.61
2	不凍液(GDブライン900F	-9.70	-15.80	-6.11	0.30

### (2) 自動脱気水補給装置

テンシオメーター内部の脱気水が減少し,圧力計内との水の連続性が遮断されると正確な 圧力水頭の値が計測できない状況は,先の現場計測における経時変化からも示された。そこ で,定期的にテンシオメーター内部の脱気水を補充するシステムを試作し,写真 5.6・2 に示 すように A 地点に設置した。なお,システムの内部構造は写真 5.6・3 のように電磁バルブの 上に水タンクを設置した形となっている。そこで,あらかじめその有効性を確認するために, 写真 5.6・4 に示すように先の不凍液に対する検討と同様に 3 本のテンシオメーターを模擬地 盤に設置して,そのうち 2 本に自動給水装置を取り付け,約 2 日間毎に電磁バルブが開くよ う (開放時間は 1 回当たり 7 秒)に設定した。計測結果として図 5.6・5 が得られ,電磁バル ブ開放に伴う脱気水補充による値の上昇が見られたが,直ちに元の値に収束する結果が得ら れた。



写真 5.6-2 現場設置状況







写真 5.6-4 自動給水装置の 検討状況



図 5.6-5 圧力水頭計測結果(A地点:60cm 採取試料, Sr=55%)

(3) 埋め戻し材に対する検証

テンシオメーターをボーリング孔内に設置する際には、地盤との密着性の確保と雨水の浸入を防ぐことが重要であることから、その両方の条件を満たす目的で現場での設置の際には低膨張性の石膏を用いた。そこで、あらかじめ石膏による埋め戻しによる影響を調査することとし、先の模擬地盤に対して、写真 5.6-5 のように孔内にあらかじめ石膏を注入した後にテンシオメーターを挿入して測定を開始した。また、併せて、写真 5.6-6 に示すサクション 測定装置で計測値を検証した。図 5.6-6 に両装置で測定した結果を示す。サクション測定装置においても1つの圧力センサの先端に石膏を塗布して設置しているが、計測値に明確な差異が認められなかったことから、石膏の使用に対して特に問題がないことが判明した。なお、石膏の空気侵入値は約 200kPa 程度であり、セラミックと同様の性質を持っていることを別途、確認している。



写真 5.6-5 石膏による埋め戻し状況



写真 5.6-6 サクション測定装置







Pressure variable head permeability tes Fitted by VG model (a=0.069, n=1.867) Instantaneous profile method (Wetting)

0.45

Volumetric moisture content

0.50

0.40

不飽和透水係数(A地点)の比較

次に,現場計測結果と各室内試験結果との比較を行い,その整合性より現場計測値の妥当性 を検証することした。まず,図 5.6-7 に瞬時水分計測法で得られたA地点の試料に対する浸潤 過程の水分保持特性と降雨時のA地点での計測結果をプロットした。上述のように,水分計の 測定精度が最大10%程度の誤差を示す場合があることを考慮すると,ほぼ整合した結果とみな せることが出来る。また,図 5.6-8 にはA地点の試料に対して実施した加圧法による水分保持 特性を元に VG モデルにより推定した不飽和透水係数を示す。さらに,加圧型透水試験ならび に瞬時水分計測法,さらに現場計測の水分量と圧力水頭の非定常データから不飽和透水係数を 算定した結果を図 5.6-9 に示す。VG モデルの推定結果とは体積含水率が 0.3 付近で最大2オ ーダー程度の差異が現れたが,室内試験の結果と現場計測の非定常データから算定した不飽和 透水係数については,ばらつきがあるものの,ほぼ1オーダー程度の値を示す結果が得られた。

1.0E−09 L 0.20

5.6.3 現地計測結果の検証(室内試験結果との比較)

0 2 5

図 5.6-9

0.30

0.35

### 5.7 地下水涵養量の試算

# 5.7.1 水分量変化による地下水涵養量の試算

現地計測結果より,降雨後に体積含水率は一時的に増加し,その後時間を追って減少する。 そして,次の降雨が確認されると体積含水率は再度増加して,再び減少するという挙動を繰り 返す。そこで,体積含水率の減少量のみに着目し,その減少分が地盤内部に浸透していると仮 定してA地点での涵養量を算出した。なお,深度 30cm 以浅の水分量は蒸発散に寄与している ものと仮定した。つまり,地下水涵養量(GR)を次式で算定した。

 $GR = \Delta S_{i-ii}$ 

(5.7-1)

ここで、 $\Delta S_{i:i:}$ 降雨後の任意の時間における深度 i から ii までの体積含水率の減少分の総和 であり、例えば図 5.7-1 に示す各時刻で得られる体積含水率の深度分布の時刻  $t_1$  から  $t_2$  までに 変化した量(面積) である。



図 5.7-1 体積含水率の深度分布の経時変化(A地点)

A地点に対して実施した結果を図 5.7-2 に示す。4月の涵養量が多いのは12月~3月における降雪の影響であり、4月頃の融雪期に冬季の積雪分が地下水に涵養しているためである。



#### 5.7.2 不飽和透水係数による地下水涵養量の試算

次に, ゼロフラックス面の評価における地下水涵養量の評価のための過程について A 地点の 計測データを基に検討した。

図 5.7-3 に示す飽和度の経時変化を基に,主に図 5.7-4 で圧力水頭の結果が得られている期間を基に水分量の深度分布として整理した結果を図 5.7-5 に示す。さらに,これら飽和度の分布から図 5.7-6 の飽和度で整理した水分保持特性を用いて圧力水頭の深度分布を求めたもの(図中 SWCC)を図 5.7-7 に示す。また,同図には同時刻(12:00)に観測されたテンシオメーターによる圧力水頭の測定結果(図中 TM)も示している。水分量から換算した圧力水頭の値が小さく出ており,良好な一致は得られていないが,8/31 頃までは深度 120cm 付近にゼロフラックス面が存在しているものと推察される。そこで,この期間の深度 120cm の体積含水率の値に対応する不飽和透水係数から現場での不飽和透水係数の値を仮定し,7/15 からの 90 日間にゼロフラックス面が存在しているものとして地下水涵養量を試算すると表 5.7-1 の結果が得られている。

### 5.7.3 考察

上述の2つの手法によりA地点を対象として算定した地下水涵養量を比較すると、体積含水 率から算定した涵養量は降雨量に対して約10%程度、不飽和透水係数による評価では約30% 程度となり、約3倍程度の差異が認められた。この要因としては、体積含水率の減少量を算定 する際の誤差や不飽和透水係数の測定精度が影響しているものと考えられる。







表 5.7-1 地下水涵養量の試算結果(A地点: 2010/7/15~9/9)

欧水县		不飽和這	涵業具	際水具に対す				
	深度	仕建会上卖	不飽和透水係数	まった町	涵養	個食里	坪小里に刈り て 洒美昌 (0/)	
(mm)	(cm)	伴惧古水平	(cm/sec)	動水勾配	日数	(mm)	る個食里 (%)	
409	120	0.427	$1.68  imes 10^{-6}$	1.0	90	130.7	32.0	

## 第5章 参考文献

- 1) 日本地下水学会編:雨水浸透·地下水涵養,理工図書, pp.40-64, 2001.
- 小松満,西垣誠,瀬尾昭治,平田洋一,竹延千良,戸井田克,前川恵輔:原位置土中水分 計測による地下水涵養量の評価方法,日本地下水学会 2010 年秋季講演会講演要旨, pp.52-57, 2010.
- 3) M.Th.van Genuchten: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Science, Vol.44, pp.892-878, 1980.
- 西垣誠: 飽和・不飽和領域内の土中水の浸透特性に関する 2,3 の考察, 土質工学会論文報告集, Vol.23, No.3, pp.165-177, 1983.
- 5) 河野伊一郎, 西垣誠:室内試験法に関する 2,3 の考察, 土質工学会論文報告集, Vol.22, No.4, pp.181-189, 1982.
- 西垣誠,小松満,金萬鎰: FDR 法による土壌・地下水汚染のモニタリング手法に関する基礎的研究,地下水学会誌,第46巻,第2号,pp.145-157,2004.
- 7) 中島誠・井上光弘・澤田和男・クリスニコル: ADR 法による土中水分量の測定とキャリブ レーション,地下水学会誌,第40巻第4号, pp.509-519, 1998.
- Topp, G. C., J. L. Davies, & A. P. Annan: Electromagnetic determination of soil water content measurements in coaxial transmission lines. Water Resour. Res., Vol.16, pp.574-582, 1980.
- 9) 西垣誠,見掛信一郎,梅田美彦:不凍液を用いた地中のサクションの計測法,第26回土 質工学研究発表会講演概要集,pp.1073-1074,1991.

# 6. 結論と開発成果の反映

## 6.1 結論と今後の課題

本研究は、地下水流動解析の上部境界条件として必要となる地下水涵養量を土壌に浸透した 水分量から求める手法に着目し、その算定手法の体系化と現場で安定して長期間計測可能なシ ステムの構築を目的として実施した。計測システムの開発においては、多点かつ長距離にわた る計測が可能な光ファイバーの歪計測原理を、サクションによる圧力計測、土中湿度計測、吸 水膨張材を適用した体積含水率計測の3方式に適用する場合についてそれぞれ検討した。さら に、浅層における降水の土中への浸透量を直接的に計測する手法として、現地水分量の計測結 果から直接浸透量を算定する手法と、不飽和透水係数の値から浸透量を推定する手法について 現地に計測機器を設置してその有効性を確認した。

本研究で得られた知見を以下に総括し結論とする。

- 1) 光ファイバー式土中水分計の開発: Type I センサ(FPI 方式テンシオメーター) につい て室内試験での検定後,現地計測で適用性を評価した。その結果,従来型圧力センサと ほぼ同程度の測定値が得られた一方で,温度変化を考慮した校正式を適用したが,気温 の日変化の影響を受ける結果となり,測定システム(計測機器)を含めた温度校正が必 要であることが判明した。
- 2) 光ファイバー式土中水分計の開発: Type II センサ(土中湿度測定) について,室内試験 を用いて評価した結果,その適用性は認められなかった。
- 3) 光ファイバー式土中水分計の開発: TypeIIIセンサ(吸水膨潤材)について,吸水膨潤材料の検定と選定を行うとともに,直接塗布したセンサを用いて現場採取試料に対する適用性を検討し,適用の可能性について良好な結果を得た。さらに,2 種類のセンサ構造を検討し,実用化の目処を得た。しかしながら,TypeIIIセンサに採用した吸水膨張材の長期耐久性に課題があることが判明したため,それを克服する新しい吸水膨張材の探索及び選定を継続していく必要がある。
- 4) 浅地層における地下水涵養量を現地水分観測により求める手法について、水分算定法で 涵養量を試算した。また、不飽和透水係数算定法で涵養量を求めるプロセスを整理した。

以下に今後の課題をまとめる。

- 1) 試作した2種類のプロトタイプセンサの現地土への適用性。
- 2) TypeIIIセンサに用いる新しい吸水膨張材料の探索と選定。
- 3) 試算した涵養量の妥当性について、水収支法等を用いたケースとの比較。

## 6.2 開発成果の反映と光センシング技術の活用

地層処分分野への光センシング技術の適用によるメリットは、①大量の情報を迅速かつ確実 にコンパクトに集約して伝達できること、②地震等による構造物への影響を迅速に把握できる こと、③落雷などによる観測システムへの影響が少ないこと(サージ電流などによるダメージ を受けない)などが挙げられる。本研究で開発してきた光ファイバーを用いた土中水分計測セ ンサについても同様のメリットが期待できることから、地層処分に関連したその他の計測技術 への適用の可能性が広がる。

例えば,表 6.2・1 及び図 6.2・1 は地層処分におけるモニタリングパラメータと計測方法について整理するとともに,光センシング技術の適用先について検討を行ったものであるが,このように将来的には処分坑道の建設・操業・閉鎖後の各段階におけるモニタリング技術として光センシング技術の総合的な活用が期待される<sup>1)~3)</sup>。なお,本研究の開発成果は,図表中に示したとおり,緩衝材の水分量の計測や,再冠水に伴う埋め戻し材の水分量の計測等への展開が可能であると考えられる。今後,これらの計測技術としての展開も考慮した技術開発を継続的に実施していくことが重要であると考えられる。

モニタリングの目的	観測パラメータ	計測方法	光ファイバー 計測技術の適用	
	ひずみ	ひずみセンサ	0	
	腐食速度	腐食速度センサ	$\triangle$	
	温度	温度センサ	0	
肉毎けパッケージレ經衛せの米動	湿度	湿度センサ	0	
廃果体ハックークと被則内の手到	排水中の放射能(放射線量)	放射線測定機器	×	
	廃棄体から発生するガス	ガス分析器	×	
	再冠水に伴う緩衝材の膨潤圧	圧力センサ	0	
	再冠水に伴う緩衝材の水分量	水分計	0	$\leftarrow$
	温度	温度センサ	0	
	湿度	湿度センサ	0	
	坑道壁面の鉱物・化学・生物学的変化	鉱物分析等	×	
加八村送しての田辺のル尚的相互作用	冠水終了時点の処分坑道内の含水比	水分計	0	
処方巩迫とての同辺の化子的相互作用	冠水終了時点の処分坑道内の圧力	圧力センサ	0	、 閉
	冠水終了時点の処分坑道内のpH	pHセンサ	Δ	発
	冠水終了時点の処分坑道内のORP	ORPセンサ	Δ	R
	冠水終了時点の処分坑道内のDO	DOセンサ	Δ	12
	岩盤の温度	温度ヤンサ	0	果
	処分坑道の隙間の変形(方向・開口巾)	変位計	Ō	σ,
	岩盤応力の変化	ひずみ/荷重ヤンサ	Ö	12
	<u>通水量</u>	体積の計測、累積流量測定	Ă	
処分場構造物の劣化	支保の変形	ひずみ/荷重ヤンサ	0	
	地下施設内の温度	温度センサ	ŏ	先
	地下施設内の湿度	湿度センサ	ŏ	σ
	再冠水に伴う埋め戻し材の膨潤圧	圧力センサ	ŏ	10
	再冠水に伴う埋め戻し材の水分量	水分計	ŏ	<b>← 17</b>
		水圧センサ(深層)	ŏ	
	地下水の水圧(水位)と経路の変化	水位観測(浅層)	ŏ	
		テンシオメーター(十連)	ŏ	┙
		地下水サンプリング	-	•
		ローセンサ	^	
	地下水の地球化学特性の変化	ORPセンサ	$\overline{\Delta}$	
		DOセンサ		
地圏の変化		応力(荷重)センサ	ō	
	アクセス抗道等構造物の力学的変化	びずみセンサ	ŏ	
		AFセンサ	×	
	鉱物の変化	サンプリング	_	
	温度	温度センサ	0	
	应力	ひずみ/荷重センサ	ŏ	
	10.73	10.7.07/10主に2.7	~	
	気象水文	与多相测生器		
<b>境</b> 境テータベース	林下水涵券量	水分計	$\overset{\perp}{\bigcirc}$	<u> </u>
	26 1 7 7 7 四 2 里			<u> </u>

表 6.2-1 開発成果の反映:地層処分に関連した観測パラメータと計測方法(例)

【**凡例** ○:適用可能, △:今後の技術開発により将来的に適用の可能性あり, ×:適用不可能



図 6.2-1 開発成果の反映:光ファイバー計測技術を適用した 処分場のモニタリングのイメージ<sup>3)に加筆</sup>

# 第6章 参考文献

- 1) 操上広志,高橋美昭,吉澤勇二,三和公,赤村重紀,河野一輝:放射性廃棄物の地層処分 におけるモニタリングと初期ベースラインに関する検討,原子力発電環境整備機構技術報 告書, p.付(12), NUMO-TR-10-01, 2010.
- 2) IAEA: Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste, IAEA-TECDOC-1208, 2001.
- 3) 原子力発電環境整備機構:「知ってほしい 今、地層処分」放射性廃棄物の地層処分に向け た取り組み, NUMO パンフレット, p.8, 2010.

This is a blank page.

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例 表1. SI 基本単位

甘木県	SI 基本ì	単位
基个里	名称	記号
長さ	メートル	m
質 量	キログラム	kg
時 間	秒	s
電 流	アンペア	Α
熱力学温度	ケルビン	Κ
物質量	モル	mol
光 度	カンデラ	cd

	100		
组立量		SI 基本単位	
和立里		名称	記号
面	積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体	積五	立法メートル	m <sup>3</sup>
速さ,速	度 >	メートル毎秒	m/s
加速	度 >	メートル毎秒毎秒	$m/s^2$
波	数每	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度,質量密	度 =	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面 積 密	度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比 体	積ゴ	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密	度フ	アンペア毎平方メートル	$A/m^2$
磁界の強	さフ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> ,濃	度刊	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>

第一の「濃度」での「海」で「シートル」 mol/m<sup>3</sup> 量濃度にの、濃度モル毎立方メートル mol/m<sup>3</sup> 量濃度キログラム毎立法メートル  $g^{\dagger}$  かンデラ毎平方メートル  $cd/m^2$ 折率( $b^{\dagger}$ (数字の) 1 1 透磁率( $b^{\dagger}$ (数字の) 1 1 質 輝 屈 透磁 比

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのこと を表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

#### 表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

		SI 組立単位				
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方		
平 面 角	ヨラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m		
立 体 牟	コテラジアン <sup>(b)</sup>	$sr^{(c)}$	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>		
周 波 数	ベルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>		
力	ニュートン	Ν		m kg s <sup>'2</sup>		
圧力,応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>		
エネルギー,仕事,熱量	ビュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>		
仕事率, 工率, 放射束	モワット	W	J/s	$m^2 kg s^{\cdot 3}$		
電荷,電気量	ローロン	С		s A		
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>		
静電容量	マアラド	F	C/V	$m^{2} kg^{1} s^{4} A^{2}$		
電気抵抗	ī オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$		
コンダクタンフ	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$		
磁芽	ミウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$		
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>		
インダクタンフ	、ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$		
セルシウス温度	モルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K		
光 東	モルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd		
照度	レクス	lx	$lm/m^2$	m <sup>-2</sup> cd		
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>		
吸収線量,比エネルギー分与,	グレイ	Gv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>		
カーマ		сл <i>у</i>	0/11g	111 5		
線量当量,周辺線量当量,方向 性線量当量,個人線量当量,	シーベルト (g)	Sv	J/kg	$m^2 s^2$		
酸 素 活 相	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol		
				U 11101		

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (o)剤光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス選びを大しに使用される。セルシウス度とケルビンの 単位の大きさは同一である。したかって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば認った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはCIPM勧告2(CI-2002)を参照。

表4. 単位の	中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	SI 組立単位			
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方	
粘度	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>	
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>	
表 面 張 九	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>	
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>	
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	$rad/s^2$	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>	
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	$W/m^2$	kg s <sup>'3</sup>	
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{-2} K^{-1}$	
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$	
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{2}$	
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>	
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>	
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>	
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> sA	
表 面 電 荷	クーロン毎平方メートル	$C/m^2$	m <sup>-2</sup> sA	
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> sA	
誘 電 卒	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$	
透磁 卒	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>	
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$	
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^{2} kg s^{2} K^{1} mol^{1}$	
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> sA	
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 s^{-3}$	
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{2} kg s^{3} = m^2 kg s^{3}$	
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>	
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	$m^{3} s^{1} mol$	

表 5. SI 接頭語							
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号		
$10^{24}$	ヨ タ	Y	$10^{-1}$	デシ	d		
$10^{21}$	ゼタ	Z	$10^{.2}$	センチ	с		
$10^{18}$	エクサ	Е	$10^{-3}$	ミリ	m		
$10^{15}$	ペタ	Р	$10^{-6}$	マイクロ	μ		
$10^{12}$	テラ	Т	$10^{-9}$	ナノ	n		
$10^{9}$	ギガ	G	$10^{\cdot 12}$	ピョ	р		
$10^{6}$	メガ	М	$10^{.15}$	フェムト	f		
$10^{3}$	キロ	k	$10^{\cdot 18}$	アト	а		
$10^{2}$	ヘクト	h	$10^{.21}$	ゼプト	z		
$10^{1}$	デ カ	da	$10^{-24}$	ヨクト	У		

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位					
名称	記号	SI 単位による値			
分	min	1 min=60s			
時	h	1h =60 min=3600 s			
日	d	1 d=24 h=86 400 s			
度	۰	1°=(п/180) rad			
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad			
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad			
ヘクタール	ha	1ha=1hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>			
リットル	L, l	1L=11=1dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>			
トン	t	$1t=10^3 \text{ kg}$			

#### 表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

	表される数値が実験的に得られるもの						
名称				記号	SI 単位で表される数値		
電	子 オ	、ル	Ч	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J		
ダ	ル	ŀ	$\sim$	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg		
統-	一原子	質量単	〔位	u	1u=1 Da		
天	文	単	位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m		

	表8.SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位							
	名称		記号	SI 単位で表される数値				
バ	_	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 <sup>5</sup> Pa				
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa				
オン	グストロ・	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m				
海		里	М	1 M=1852m				
バ		$\sim$	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm)2=10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>				
1	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s				
ネ		パ	Np	ロ光伝しの粉はめた眼接は				
ベ		ル	В	51単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。				
デ	ジベ	ル	dB -	X19X ± 17 AC44 (* [X1])				

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位							
名称	記号	SI 単位で表される数値					
エルク	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J					
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N					
ポアフ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s					
ストークフ	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$					
スチルフ	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd} \text{ cm}^{2} = 10^{4} \text{ cd} \text{ m}^{2}$					
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm $^{2}$ 10 <sup>4</sup> lx					
ガル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{-2} = 10^{-2} \text{ ms}^{-2}$					
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$					
ガウジ	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$					
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe ≜ (10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>					
(a) 3 元系のCCS単位系とSIでけ直接比較できかいため 笑早 [ △							

3元系のCGS単位系とSI Cは は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例								
名称					記号	SI 単位で表される数値		
キ	ユ		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq		
$\nu$	$\sim$	ŀ	ゲ	$\sim$	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$		
ラ				ĸ	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy		
$\nu$				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv		
ガ		$\boldsymbol{\nu}$		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T		
フ	r		ル	i.		1フェルミ=1 fm=10-15m		
メー	ートル	系	カラッ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg		
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa		
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa		
力	Ц		IJ	_	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J(「熱化学」カロリー)		
ŝ	ク			$\sim$	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$		

この印刷物は再生紙を使用しています