

熱-水-応力連成試験設備(COUPLE)を用いた
室内試験結果に基づく
熱-水連成モデルの信頼性確認

Developing Confidence in a Coupled TH Model Based on the Results
of Experiment by Using Engineering Scale Test Facility, "COUPLE"

藤崎 淳 鈴木 英明 藤田 朝雄

Kiyoshi FUJISAKI, Hideaki SUZUKI and Tomoo FUJITA

地層処分研究開発部門
ニアフィールド研究グループ

Near-Field Research Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは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 (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
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
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

*〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

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

熱 - 水 - 応力連成試験設備 (COUPLE) を用いた室内試験結果に基づく
熱 - 水連成モデルの信頼性確認

日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット
藤崎 淳^{*}, 鈴木 英明^{*}, 藤田 朝雄

(2008 年 1 月 16 日受理)

人工バリア定置後のニアフィールドの変遷をモデル化するためには、その状態やプロセスの時間的、空間的変遷を把握することが必要である。しかしながら、ニアフィールドにおける連成現象は熱 - 水 - 応力 - 化学が相互に影響をおよぼしながら進行する複雑なものであるから、適用した連成モデルが現象を適切に表現可能か否かの判断は実現象との比較なしには困難である。それゆえ、モデルの信頼性確認のためには、室内あるいは原位置における連成試験結果との比較を行うことが必要である。このような観点から、室内における工学的規模の熱 - 水 - 応力連成試験設備 (COUPLE) を用いて連成試験を実施した。その結果、温度および緩衝材中の水分量について、有意なデータを得ることができた。さらに、連成モデルを用いて計算した緩衝材中の温度および水分量の変遷は試験結果と良い一致を示し、今回の連成モデルの適用性が示された。

Developing Confidence in a Coupled TH Model Based on the Results
of Experiment by Using Engineering Scale Test Facility, “COUPLE”

Kiyoshi FUJISAKI[※], Hideaki SUZUKI[※] and Tomoo FUJITA

Geological Isolation Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 16, 2008)

It is necessary to understand quantitative changes of near-field conditions and processes over time and space for modeling the near-field evolution after emplacement of engineered barriers. However, the coupled phenomena in near-field are complicated because thermo-, hydro-, mechanical, chemical processes will interact each other. The question is, therefore, whether the applied model will represent the coupled behavior adequately or not. In order to develop confidence in the modeling, it is necessary to compare with results of coupled behavior experiments in laboratory or in site. In this report, we evaluated the applicability of a coupled T-H model under the conditions of simulated near-field for the results of coupled T-H experiment in laboratory. As a result, it has been shown that the fitting by the modeling with the measured data is reasonable under this condition.

Keywords : Confidence Enhancement, Coupled TH Behavior, Engineering Scale Test, Numerical Analysis

※Collaborating Engineer : Waste Isolation Technology Section, Waste Management Department, Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories (Additional Post)

目 次

1. はじめに.....	1
2. 試験概要.....	2
2.1 試験装置.....	2
2.2 試験体.....	3
2.2.1 緩衝材.....	3
2.2.2 模擬岩体.....	4
2.3 連成試験条件.....	5
2.3.1 温度条件.....	5
2.3.2 水理条件.....	6
2.3.3 力学的条件.....	6
2.3.4 化学的条件.....	6
2.4 測定用センサー.....	6
2.4.1 測定用センサーのキャリブレーション.....	7
2.4.2 センサー設置および試験体設置.....	20
3. 連成試験結果.....	32
3.1 温度の結果.....	32
3.2 緩衝材水分量の測定結果.....	34
3.2.1 サイクロメータによる緩衝材水分量の推定値.....	34
3.2.2 湿度計による緩衝材水分量の推定値.....	36
3.2.3 熱伝導率測定センサーによる緩衝材水分量の推定値.....	37
3.3 膨潤応力測定について.....	38
4. 熱-水連成モデルの信頼性確認.....	39
4.1 緩衝材および模擬岩体の不飽和水理モデルのパラメータの設定.....	39
4.1.1 パラメータ設定のための浸潤試験.....	39
4.1.2 緩衝材の不飽和水理モデルのパラメータの設定.....	41
4.1.3 模擬岩体（モルタル）の不飽和水理モデルのパラメータの設定.....	43
4.2 温度勾配水分拡散モデル.....	50
4.2.1 Philip & de Vries モデル.....	50
4.2.2 既往の挙動試験結果を用いたモデルの信頼性確認.....	51
4.3 COUPLE 連成試験を対象とした熱 - 水連成解析.....	52
4.3.1 解析パラメータおよび解析メッシュ.....	52
4.3.2 初期条件および境界条件.....	54
4.3.3 解析結果と実測値との比較.....	54
5. まとめ.....	61
参考文献.....	62

Contents

1. Introduction	1
2. Test procedure	2
2.1 Test equipment	2
2.2 Test body	3
2.2.1 Buffer material	3
2.2.2 Simulated rock	4
2.3 Test conditions of coupled experiment	5
2.3.1 Thermal condition	5
2.3.2 Hydraulic condition	6
2.3.3 Mechanical condition	6
2.3.4 Chemical condition	6
2.4 Measuring sensors	6
2.4.1 Calibration of measuring sensors	7
2.4.2 Setting of sensors and test body	20
3. Measuring results of coupled experiment	32
3.1 Temperature	32
3.2 Water content of buffer material	34
3.2.1 Water content of buffer material obtained by psychrometer	34
3.2.2 Water content of buffer material obtained by hygrometer	36
3.2.3 Water content of buffer material obtained by thermal conductivity measuring sensor	37
3.3 Measuring of swelling pressure	38
4. Confidence enhancement for coupled thermal and hydraulic model	39
4.1 Model parameters of unsaturated hydraulic model for buffer material and simulated rock	39
4.1.1 Infiltration test for parameter calibration	39
4.1.2 Parameters of unsaturated hydraulic model for buffer material	41
4.1.3 Parameters of unsaturated hydraulic model for simulated rock	43
4.2 Thermal gradient water vapor diffusive model	50
4.2.1 Philip & de Vries model	50
4.2.2 Confidence enhancement for the model on existing test result	51
4.3 Coupled TH analysis for “COUPLE” experiment	52
4.3.1 Model parameters and FEM mesh	52
4.3.2 Initial and boundary conditions	54
4.3.3 Comparison of calculated and measured results	54
5. Conclusions	61
References	62

図目次

図 2-1 熱 - 水 - 応力連成試験装置概要図 (a) 平面図, (b) 断面図	2
図 2-2 緩衝材試験体概要図	4
図 2-3 試験条件概要図	5
図 2-4 ヒーター壁面設定温度の履歴	6
図 2-5 含水比-水分ポテンシャル出力関係 (T=90°C)	8
図 2-6 回帰分析結果 (T=22°C)	9
図 2-7 回帰分析結果 (T=70°C)	9
図 2-8 回帰分析結果 (T=80°C)	10
図 2-9 回帰分析結果 (T=90°C)	10
図 2-10 温度- θ 関係	11
図 2-11 含水比重回帰結果 (サイクロメータ)	12
図 2-12 含水比-相対湿度出力関係 (CHS-UPS)	12
図 2-13 回帰分析結果 (T=22°C)	13
図 2-14 回帰分析結果 (T=70°C)	13
図 2-15 回帰分析結果 (T=80°C)	14
図 2-16 回帰分析結果 (T=90°C)	14
図 2-17 温度-係数 α 関係	15
図 2-18 温度-係数 β 関係	15
図 2-19 温度-係数 γ 関係	16
図 2-20 含水比の多重回帰分析結果と実測値の比較 (TDK CHS-UPS)	16
図 2-21 含水比-相対湿度出力関係 (VAISALSA HMP233)	17
図 2-22 含水比の多重回帰分析結果と実測値との比較 (VAISALSA HMP233)	18
図 2-23 温度-零点移動量関係 (SST01, SST02, SST03)	19
図 2-24 温度-零点移動量関係 (SST04, SST05, SST06)	19
図 2-25 温度-零点移動量関係 (SST07, SST08, SST09, SST10)	20
図 2-26 緩衝材中センサー配置平面図 (1)	22
図 2-27 緩衝材中センサー配置平面図 (2)	23
図 2-28 緩衝材中センサー配置平面図 (3)	24
図 2-29 緩衝材中センサー配置平面図 (4)	25
図 2-30 緩衝材センサー配置断面図 (1)	26
図 2-31 緩衝材センサー配置断面図 (2)	27
図 2-32 緩衝材センサー配置断面図 (3)	28
図 2-33 緩衝材センサー配置断面図 (4)	29
図 2-34 模擬岩体中への熱電対センサーの配置	30
図 2-35 メカニカルパッカー構造図	31
図 3-1 温度経時変化 (G.L.-50mm)	32
図 3-2 温度経時変化 (G.L.-250mm)	32

図 3-3 温度経時変化 (G.L.-520mm)	33
図 3-4 温度経時変化 (G.L.-750mm)	33
図 3-5 温度経時変化 (G.L.-950mm)	34
図 3-6 温度空間分布 (試験開始から 1 年後)	34
図 3-7 サイクロメータによる含水比推定値 (G.L.-840mm~740mm)	35
図 3-8 サイクロメータによる含水比推定値 (G.L.-540mm~440mm)	35
図 3-9 サイクロメータによる含水比推定値 (G.L.-240mm~140mm)	36
図 3-10 湿度計 (CHS-UPS) による含水比推定値	36
図 3-11 湿度計 (HMP233) による含水比推定値	37
図 3-12 熱伝導率測定による含水比推定結果	38
図 4-1 複合供試体を用いた浸潤試験概略図	39
図 4-2 浸潤試験結果 (緩衝材のみ)	40
図 4-3 浸潤試験結果 (緩衝材+モルタル)	41
図 4-4 体積含水率-ポテンシャル関係 (実測値およびフィッティングカーブ)	42
図 4-5 直線モデル概念図	43
図 4-6 水飽和度の実測値と計算値の比較 (緩衝材のみ)	43
図 4-7 遠心法試験装置概略図	44
図 4-8 遠心機の固定式水平ローター部の例	46
図 4-9 排水量(積算)の経時変化	47
図 4-10 水分特性曲線	48
図 4-11 同定結果	49
図 4-12 実測値と計算値の比較 (緩衝材+モルタル供試体)	50
図 4-13 飽和度-温度勾配水分拡散係数関係	51
図 4-14 試験条件概要	52
図 4-15 計算値と実測値の比較 (96 時間後)	52
図 4-16 有限要素メッシュ	53
図 4-17 温度分布コンター図 (350 日後, 中心ヒータ設定温度 90°C)	54
図 4-18 温度分布コンター図 (ヒータ設定温度 85°C)	55
図 4-19 温度分布コンター図 (ヒータ設定温度 80°C)	55
図 4-20 温度分布コンター図 (ヒータ設定温度 75°C)	56
図 4-21 緩衝材中の温度分布の計算値と実測値の比較	56
図 4-22 水飽和度分布コンター図 (28 日後)	57
図 4-23 水飽和度分布コンター図 (84 日後)	58
図 4-24 水飽和度分布コンター図 (168 日後)	58
図 4-25 水飽和度分布コンター図 (350 日後)	59
図 4-26 サイクロメータ設置位置図	59
図 4-27 計算値と実測値の比較 (緩衝材中の水飽和度の経時変化)	60

表目次

表 2-1 緩衝材仕様.....	3
表 2-2 モルタル配合表.....	5
表 2-3 使用センサー一覧.....	7
表 2-4 各土圧計の係数 C_s 値一覧.....	20
表 4-1 浸潤試験の試験ケース.....	40
表 4-2 pF 試験結果.....	47
表 4-3 同定に用いた入力データ（既知パラメータ）.....	48
表 4-4 同定結果.....	49
表 4-5 連成解析に使用した各材料の物性値.....	53

写真目次

写真 2-1 緩衝材試験体セット完了状況.....	21
写真 2-2 緩衝材 - 模擬岩体隙間充填状況.....	21
写真 4-1 試験装置（外観）.....	44
写真 4-2 試験装置（供試体設置部）.....	45
写真 4-3 供試体設置状況.....	45

This is a blank page.

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分において、人工バリア定置後の廃棄体周辺では、ガラス固化体からの発熱、周辺岩盤から人工バリアへの地下水の浸潤、地下水浸潤による緩衝材の膨潤圧の発生、緩衝材間隙水化学の変化など、熱的、水理的、力学的、化学的なプロセスが相互に影響を及ぼしあう、複雑な場が形成されると予想される。

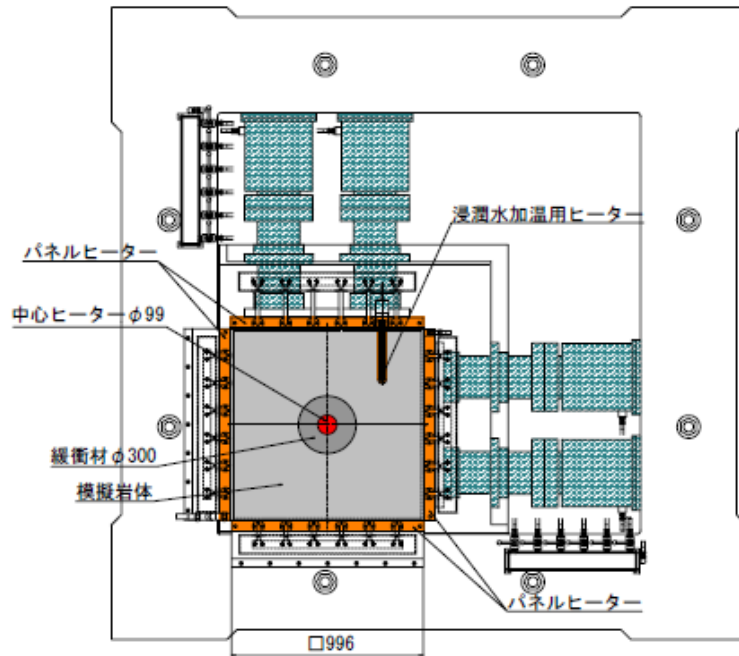
このようなニアフィールドの変遷をモデル化するためには、その状態やプロセスの時間的、空間的変遷を把握することが必要である。しかしながら、ニアフィールドにおける連成現象は熱 - 水 - 応力 - 化学が相互に影響をおよぼしながら進行する複雑なものであるから、適用した連成モデルが現象を適切に表現可能か否かの判断は実現象との比較なしには困難である。それゆえ、モデルの信頼性確認のためには、室内あるいは原位置における連成試験結果との比較を行うことが必要である。

本研究では、このような観点から、室内において工学的規模の熱 - 水 - 応力連成試験設備 (COUPLE) を用いて連成試験を実施し、試験体内部の温度、水分量等の時間的、空間的変遷を測定した。一方で、熱 - 水 - 化学連成モデルの信頼性確認の予備的検討として、この試験を熱 - 水連成モデルを用いて解析評価し、熱 - 水連成モデルの信頼性確認を行った。なお解析は、不飽和透水モデルおよび温度勾配水分拡散モデルを再検討し、要素試験等によりそれらの適用性を検証した上で実施した。

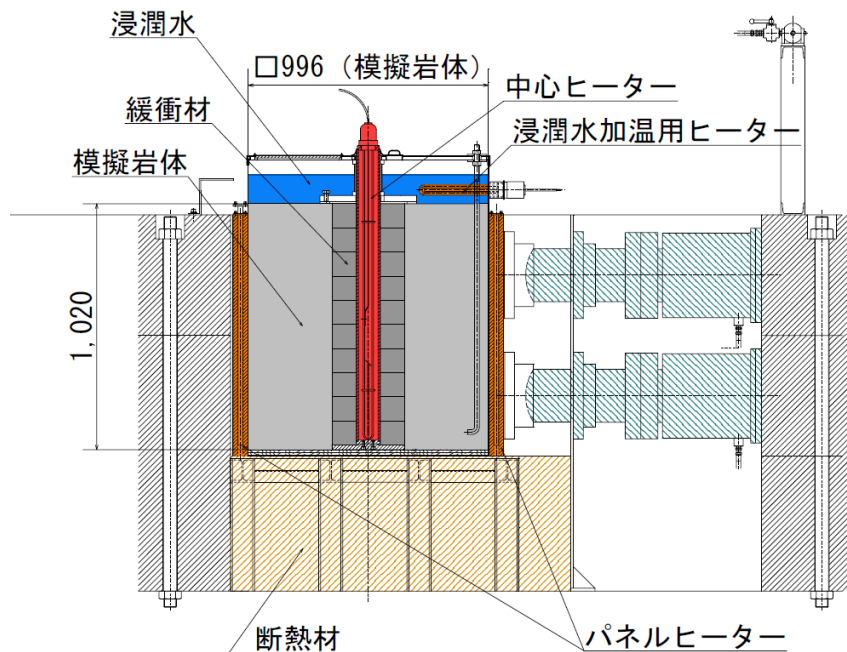
2. 試験概要

2.1 試験装置

熱 - 水 - 応力連成試験装置 (COUPLE) の概要図を図 2-1 に示す。



(a) 平面図



(b) 断面図

図 2-1 熱 - 水 - 応力連成試験装置概要図 (a) 平面図, (b) 断面図

この装置は、高レベル放射性廃棄物地層処分における、廃棄体周辺の連成現象（熱 - 水 - 応力連成挙動）を模擬した試験を実施するために製作されたものであり、試験体は廃棄体を模擬したステンレス製のヒータ、緩衝材（ベントナイト／ケイ砂混合土）、岩盤を模擬した模擬岩体（モルタル）からなる。模擬岩体の中心には $\phi=300\text{mm}$ の処分孔を模擬した空間があり、模擬廃棄体および緩衝材はその中に配置される構造となっている。試験体の上部には、モルタルと反応した高pH（25℃においてpH=約11.0）の溶液が湛えられており、この溶液は模擬岩体中を通過し緩衝材に浸潤する。また、この溶液は上部に設置されたカートリッジヒータにより温度を制御することが可能である。試験体側面は載荷板をジャッキで固定することで、緩衝材の膨潤あるいは温度上昇に伴う模擬岩体の変形を拘束することが可能である。また、これらの載荷板は内部に電気式のヒータを内蔵しており、温度制御することが可能となっている。試験体底部には構造上、高さ500mm程度の空間が生じるが、ここには断熱材を充填し、放熱を極力抑えるように努めた。

2.2 試験体

2.2.1 緩衝材

緩衝材はベントナイトとケイ砂を重量比7:3で混合し、乾燥密度 1.6Mgm^{-3} になるように圧縮成型したものを使用した。圧縮成型体は中空のドーナツ型であり、その1つあたりの寸法は外形 $\phi=290\text{mm}$ 、内径 $\phi=100\text{mm}$ 、高さ $=100\text{mm}$ である。試験では、このブロックを10個積み重ねて、高さ1,000mmの緩衝材試験体を製作した。表2-1に緩衝材の仕様を図2-2に緩衝材試験体の概要図を示す。

表 2-1 緩衝材仕様

項目	仕様	備考
原材料	ベントナイト	70wt%
	5号ケイ砂	15wt%
	3号ケイ砂	15wt%
真密度 (Mg m^{-3})	2.68	
乾燥密度 (Mg m^{-3})	1.60	
空隙率 (-)	0.403	
初期含水比 (%)	13.0	

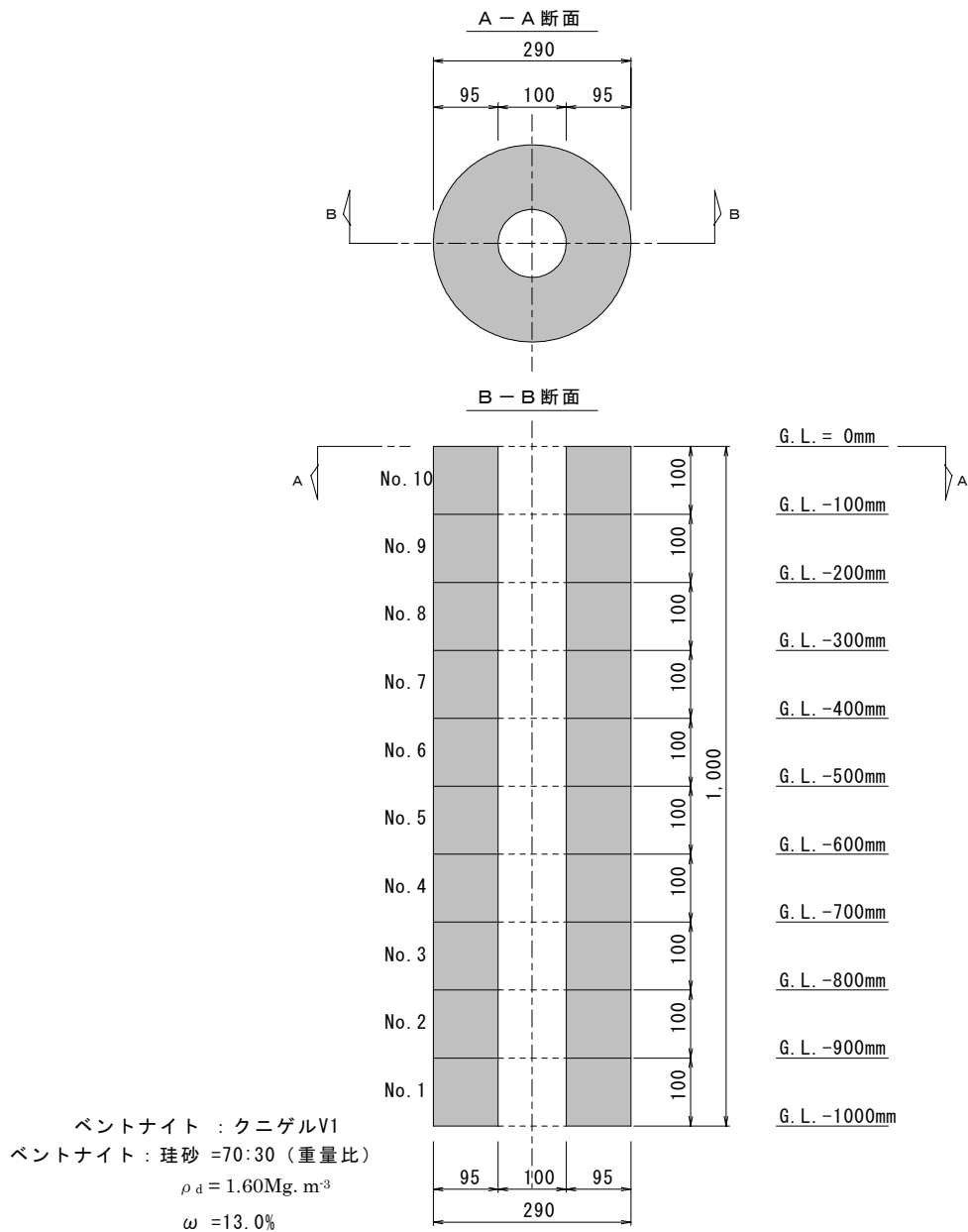


図 2-2 緩衝材試験体概要図

2.2.2 模擬岩体

模擬岩体はモルタルを用いて製作した。製作にあたっては、厚さ 2.0mm のステンレス製の容器を作製し、その容器にモルタルを打設した。モルタルの配合を表 2-2 に示す。模擬岩体の透水性を上げるために、骨材には構造用人工軽量骨材)を使用した。また、同様の目的で、モルタルに発泡剤 (ファインフォーム 707, 株式会社エヌエムビー) を使用した¹⁾。模擬岩体中心に配置した模擬処分孔は、モルタルの打設前に円筒形の金属型枠 ($\phi=300\text{mm}$) を設置して規定の寸法を確保した。

表 2-2 モルタル配合表

セメント (kg)	水 (kg)	細骨材 (kg)	混和材 (kg)	発泡剤 (kg)
370	204	955	2.96	1.85

2.3 連成試験条件

連成試験は平成 17 年 4 月 11 日より平成 19 年 7 月 19 日までの 830 日間稼動させた。期間中 2 度、施設の停電があったが、その際には発電機により電力を供給し試験を継続させた。試験における設定条件を図 2-3 に示す。

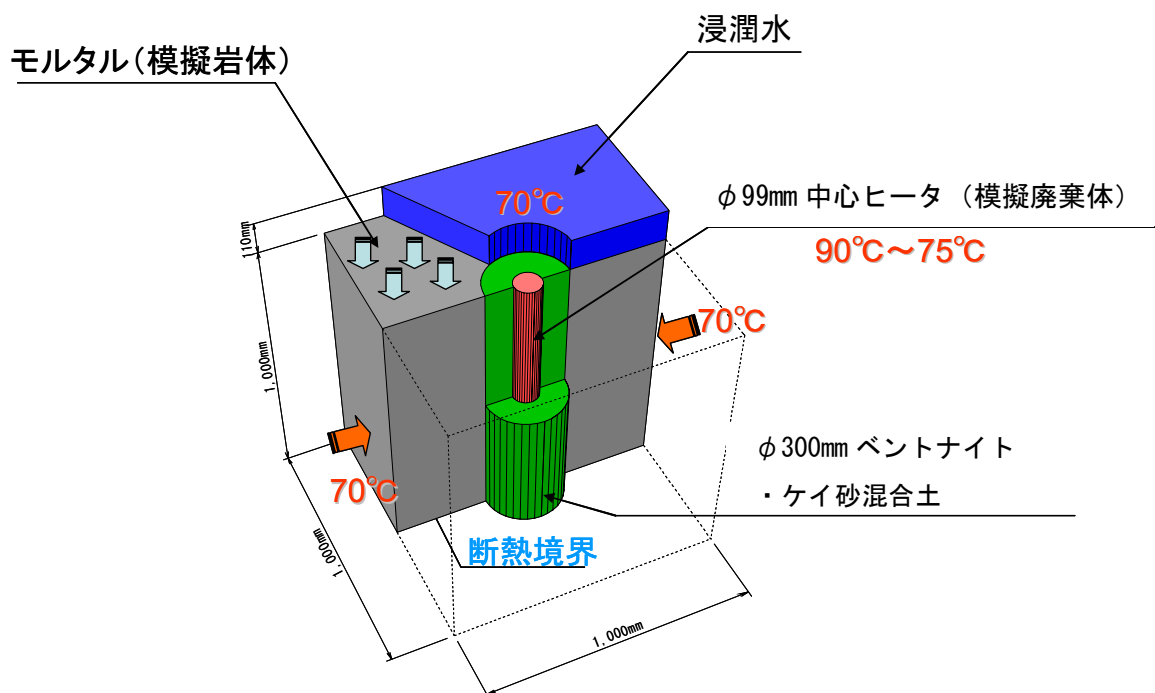


図 2-3 試験条件概要図

2.3.1 温度条件

試験体の側面に配置した載荷板の温度および試験体上部に湛えた溶液温度は試験期間中 70°C 一定になるように制御した。中心ヒータの温度は、ヒータ壁面で 90°C になるように伝熱オイルの温度を制御して試験を開始した。しかし、緩衝材中の温度勾配を低下させることにより、水の浸潤を促進させることを目的として、平成 18 年 7 月 30 日より中心ヒータの温度を低下させ、条件を変更した。低下方法としては、1 回当たり 5°C/4 日の低下を 3 回実施し、最終的にヒータ壁面で 75°C となるように制御し試験を継続した。ヒータ壁面設定温度の履歴を図 2-4 に示す。

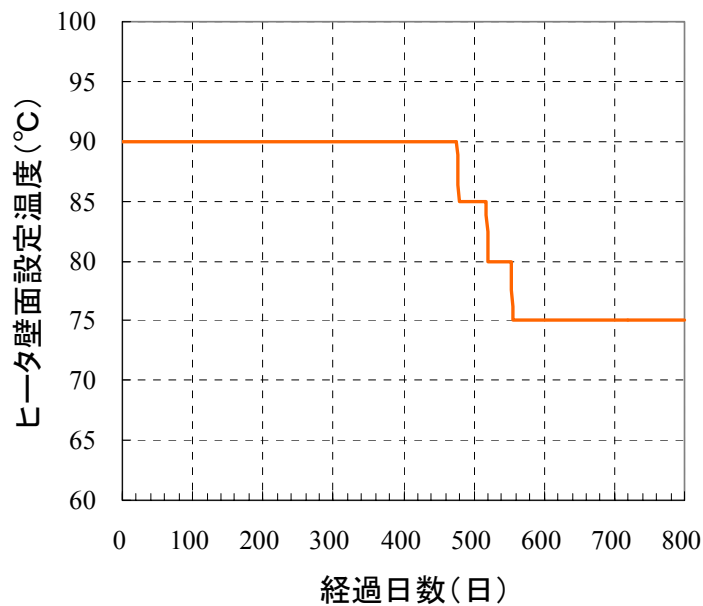


図 2-4 ヒータ壁面設定温度の履歴

2.3.2 水理条件

水理学的条件としては、試験体上部に湛えた溶液の水位を $110\text{mm} \pm 10\text{mm}$ に管理した。試験体は、緩衝材上部がステンレス製のプレートにてシールされる構造となるため、模擬岩体の上面で水頭が概ね一定に保たれることとなる。

2.3.3 力学的条件

力学的な条件としては、試験体の側面に載荷板を配置しジャッキで固定することにより、変位固定条件とした。

2.3.4 化学的条件

化学的条件としては、上部浸潤水を窒素ガスで常時バブリングし、試験期間中に酸素および二酸化炭素の影響を極力排除した環境で試験を行った。

2.4 測定用センサー

試験に使用したセンサーを表 2-3 に示す。

表 2-3 使用センサー一覧

計測対象	センサー名称	メーカー	型番および仕様	数量	備考
模擬岩体	熱電対	助川電気工業	Nimboxシース熱電対T35	32	
緩衝材	熱電対	助川電気工業	Nimboxシース熱電対T35	34	
	サイクロメータ	Wescor	PST-55-30-SF	15	キャリブレーション試験結果より $\omega \geq 11.7\%$ の範囲を計測
	湿度計	VAISALA	HMP233 プローブ径13mm,長さ=70mm	6	キャリブレーション試験結果より $\omega \leq 13.6\%$ の範囲を計測
		TDK	CHS-UPS	3	キャリブレーション試験結果より $\omega \leq 13.6\%$ の範囲を計測
	土圧計	ST研究所	PS25-20,定格容量2.0MPa	10	ベントナイトブロックと境界界面の間に設置
	pH計	藤原製作所	PHS-1型,ガラス電極	3	2本は上部水のpHを測定 1本は緩衝材中のpHを測定
		大起理科工業	IQ-200PH,ISFET電極	4箇所	計測毎に緩衝材試験体に挿入し計測
熱物性取得 センサー	Hot Disk AB 社	HTK ϕ 7mm	5	熱伝導率より含水比を推定	

温度データについては T タイプのシース熱電対を使用した。水分量測定については、サイクロメータおよび湿度計を用いた。湿度計については、釜石粘土熱負荷試験等²⁾で実績のある VAISALA 社製 HMP233 に加えて、本研究では、センサー自体の寸法が測定場に与える影響を低く抑えることを目的として、それよりもセンサー部分の寸法のより小さい TDK 社製のセンサー (CHS-UPS) を使用した。また、今回新たな試みとして、熱物性取得用のセンサーにより、緩衝材の熱伝導率を測定し、以下の式で表される熱伝導率と含水比の関係³⁾より緩衝材含水比の推定を試みた。ここで、 λ は熱伝導率 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]、 ω は含水比 [%] を表す。

$$\lambda = 4.44404 \times 10^{-1} + 1.3772 \times 10^{-2} \omega + 6.1395 \times 10^{-3} \omega^2 - 1.6861 \times 10^{-4} \omega^3$$

2.4.1 測定用センサーのキャリブレーション

表 2-3 に示すように、緩衝材中の水分量はサイクロメータおよび湿度計を用いて測定した。サイクロメータの出力値は水分ポテンシャルであり、湿度計の出力値は相対湿度である。そこで、サイクロメータ及び湿度計を用いて緩衝材中の水分量を推定するために、連成試験に先立ち緩衝材の水分量とこれらの出力値との関係を定式化した。

(1) サイクロメータのキャリブレーション

サイクロメータのキャリブレーションにあたっては、緩衝材は連成試験で用いるものと同じベントナイト/ケイ砂混合比、および乾燥密度を持つものを使用した。異なった含水比を持つ供試体を複数準備し、それぞれについて、温度条件を変化させてデータを取得した。設定温度としては、22°C (室温)、70°C、80°C、90°C とした。試験は ϕ 50mm、高さ 100mm の円柱供試体にセン

サーを埋設し、恒温槽内で温度を制御して実施した。温度は室温から順次上昇させ、各設定温度にてサイクロメータの出力値を記録した。この際、同一の温度で数日間測定を行い、出力値に変化がないことを確認した。図 2-5 に含水比と水分ポテンシャル関係の一例を示す。

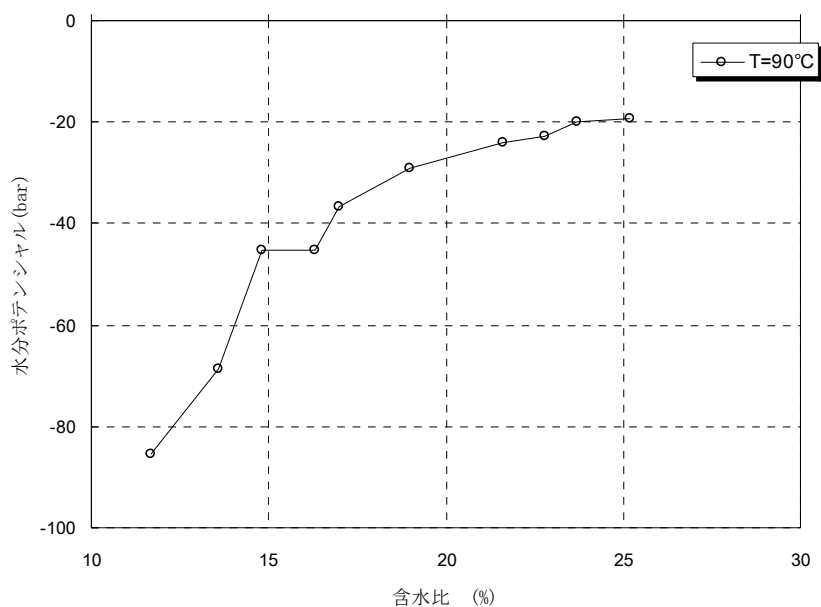


図 2-5 含水比－水分ポテンシャル出力関係 (T=90°C)

次に各温度におけるこれらの関係を以下の式に示す回帰式を設定して回帰分析を行った。

$$\omega = \sqrt{\frac{\theta}{|P|}}$$

ω : 含水比 (%)

θ : 係数

P : 水分ポテンシャル (bar)

図 2-6 から図 2-9 に回帰分析結果を示す。

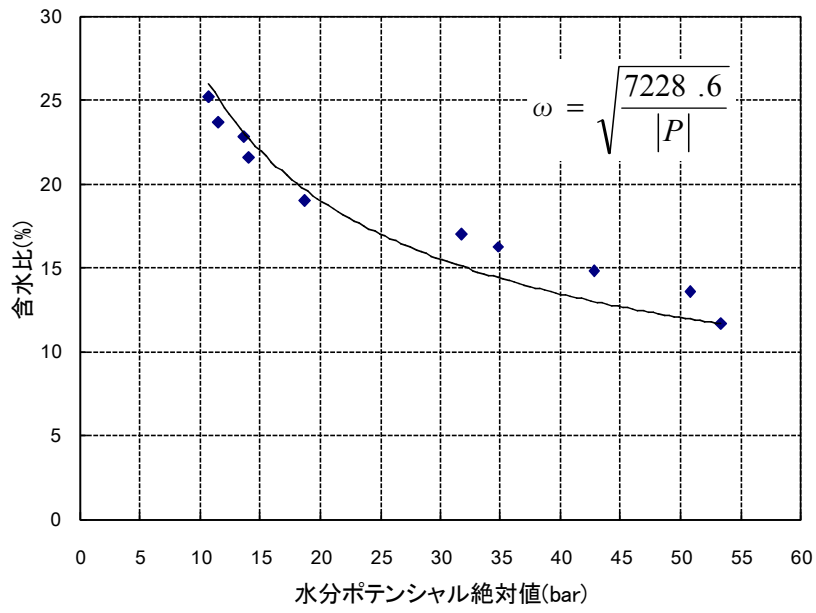


図 2-6 回帰分析結果 (T=22°C)

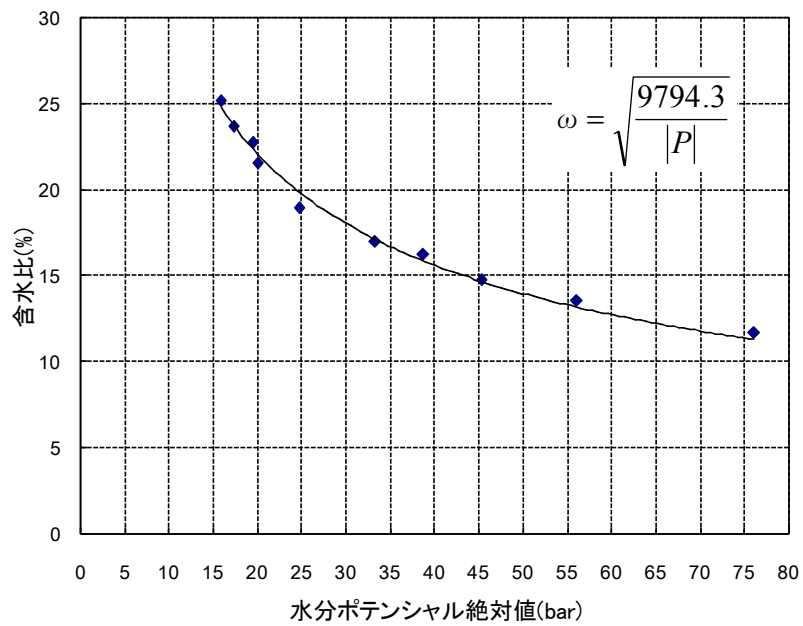


図 2-7 回帰分析結果 (T=70°C)

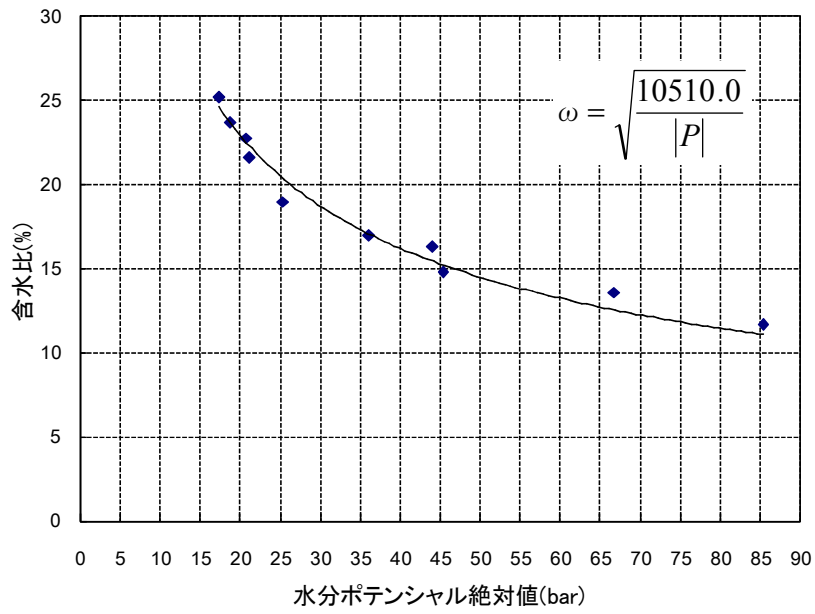


図 2-8 回帰分析結果 (T=80°C)

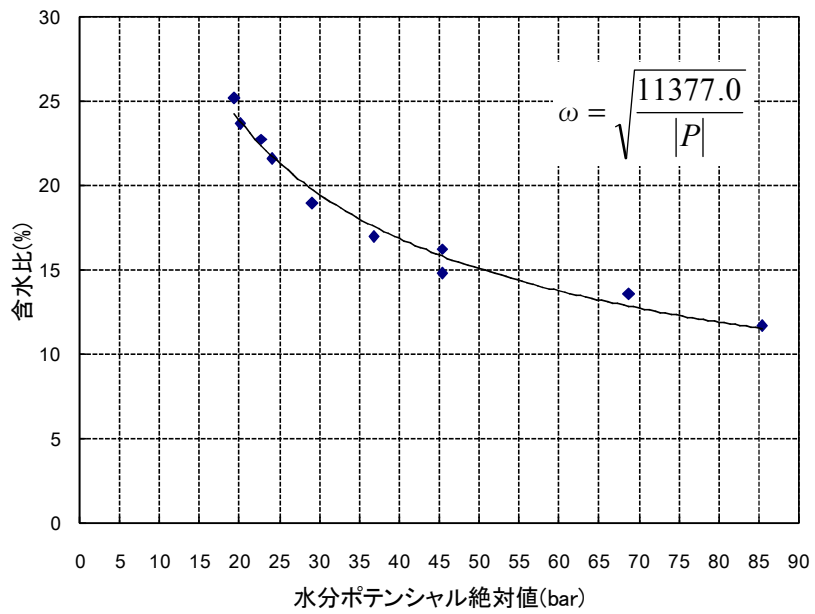


図 2-9 回帰分析結果 (T=90°C)

これらから、係数 θ には温度依存性が認められるので、温度を変量として θ について線形回帰分析を行った。温度と θ の関係及び回帰式を図 2-10 に示す。

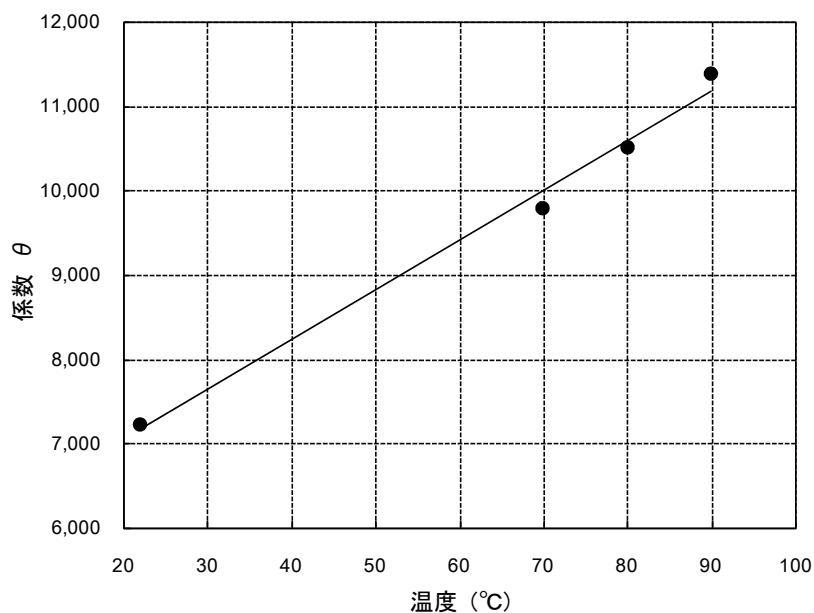


図 2-10 温度 - θ 関係

以上より、下に示す水分ポテンシャルと温度を変量とする、連成試験に用いる緩衝材を対象とした含水比推定式を得た。

$$\omega = \sqrt{\frac{(60.022T + 5781)}{|P|}}$$

この推定式の精度を確認する目的で、含水比の実測値と推定式を用いて求めた値との比較を図 2-11 に示す。ここでは、推定式により含水比の値で $\pm 2.5(\%)$ の精度で推定可能であることを示している。

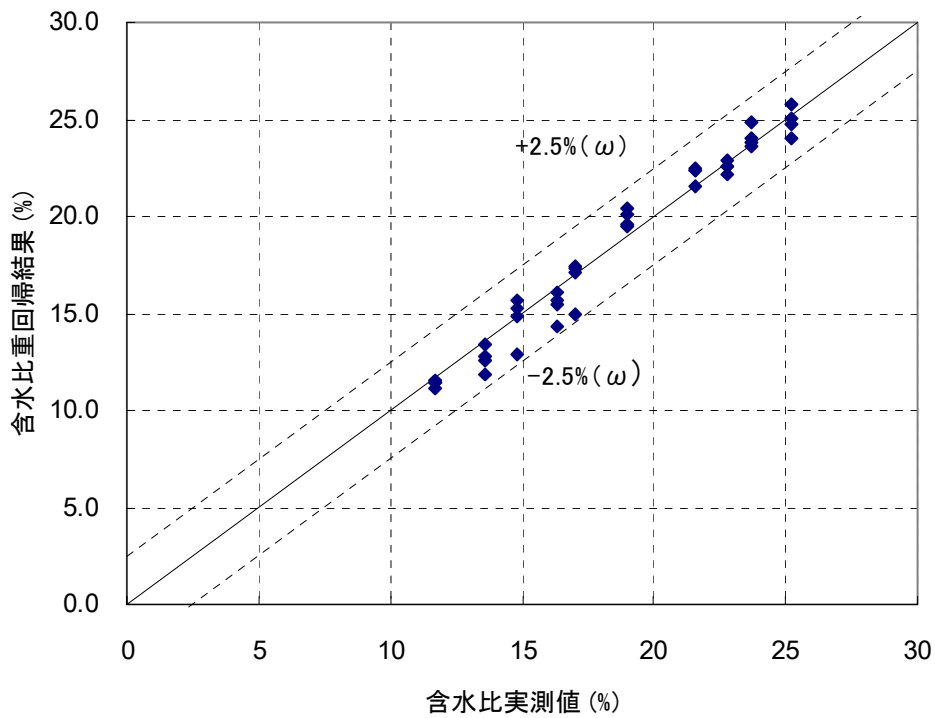


図 2-11 含水比重回帰結果 (サイクロメータ)

(2) 湿度計のキャリブレーション

湿度計のキャリブレーションにおいて、供試体はサイクロメータのキャリブレーションに用いたものと同様な仕様のものを用いた。

(i) CHS-UPS (TDK 社製湿度計) のキャリブレーション

湿度計 CHS-UPS により得られた含水比－相対湿度関係を図 2-12 に示す。

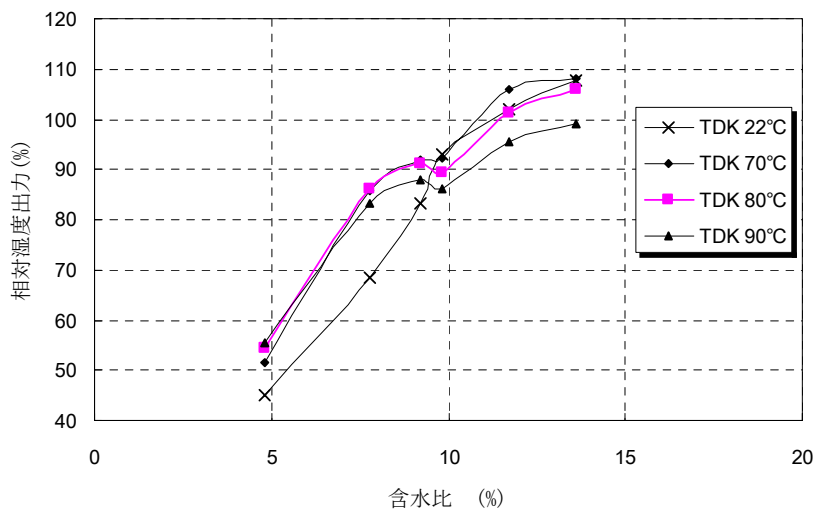


図 2-12 含水比－相対湿度出力関係 (CHS-UPS)

含水比が高い場合には感度が低くなり出力値に変化がなくなったので、 $\omega \leq 13.6\%$ の値について推定式の適用を試みた。各試験温度で得られたデータについて以下の二次の多項式を回帰式として設定し、回帰分析を行った。回帰分析結果を図 2-13 から図 2-16 に示す。

$$\omega = \alpha(H + \beta)^2 + \gamma$$

H : 出力相対湿度 (%)

ω : 含水比 (%)

α : 係数

β : 係数

γ : 係数

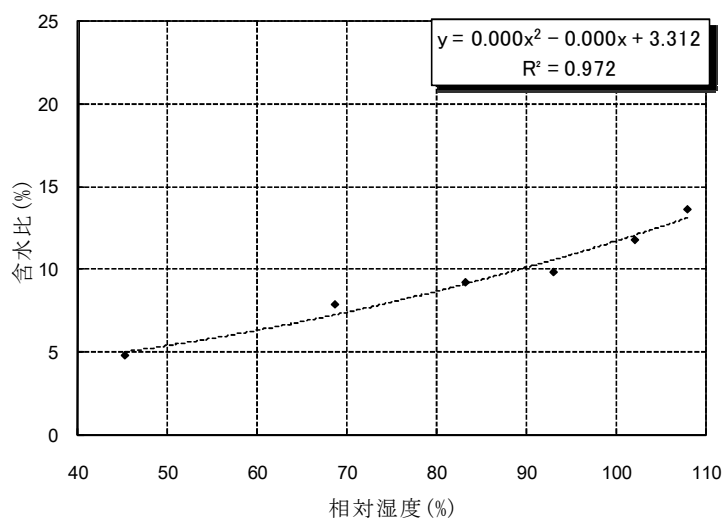


図 2-13 回帰分析結果 (T=22°C)

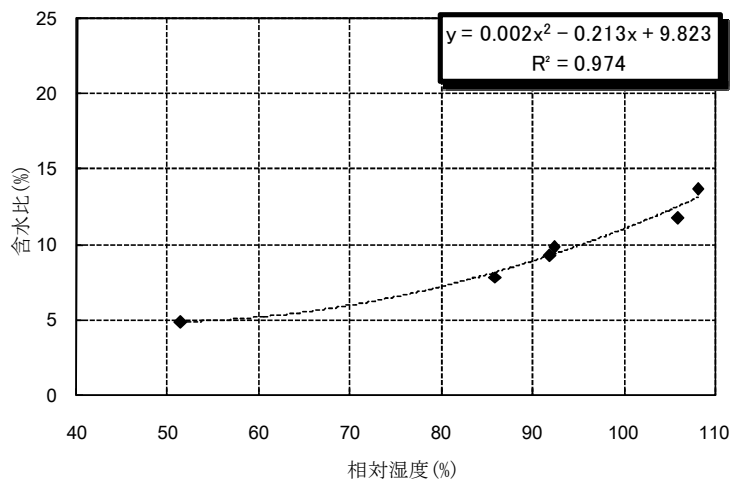


図 2-14 回帰分析結果 (T=70°C)

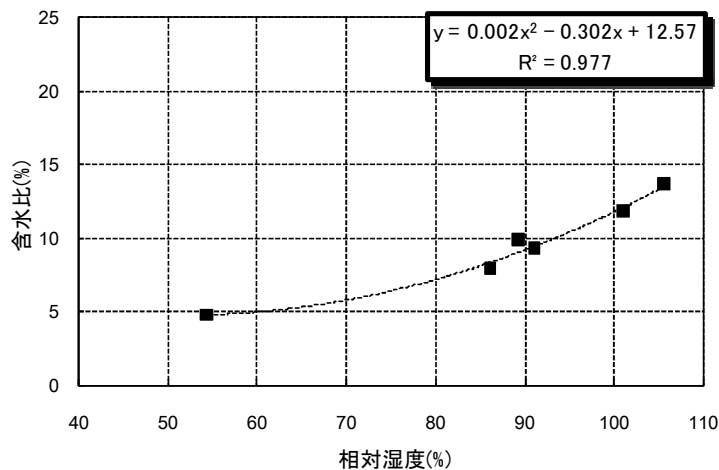


図 2-15 回帰分析結果 (T=80°C)

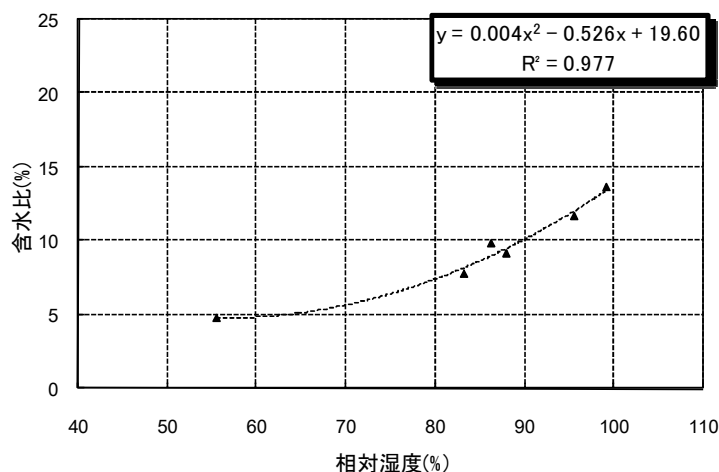


図 2-16 回帰分析結果 (T=90°C)

次に各変数 α , β , γ について温度を変量として回帰分析を行った. 温度と各係数との関係およびそれぞれの回帰式を図 2-17 から図 2-19 に示す. 以上より定めた多重回帰分析の結果, 以下の回帰式を得た.

$$\omega = 0.0004 \exp(0.0245T) \times (H + 0.0071T^2 - 1.6092T + 31.489)^2 - 0.0004T^2 + 0.0701T + 1.9847$$

ω : 含水比 (%)

T : 温度 (°C)

H : 出力相対湿度 (%)

上式の多重回帰結果を図 2-20 に示す. ここでは, 推定式により含水比の値で $\pm 2.5(\%)$ の精度で推定可能であることを示している.

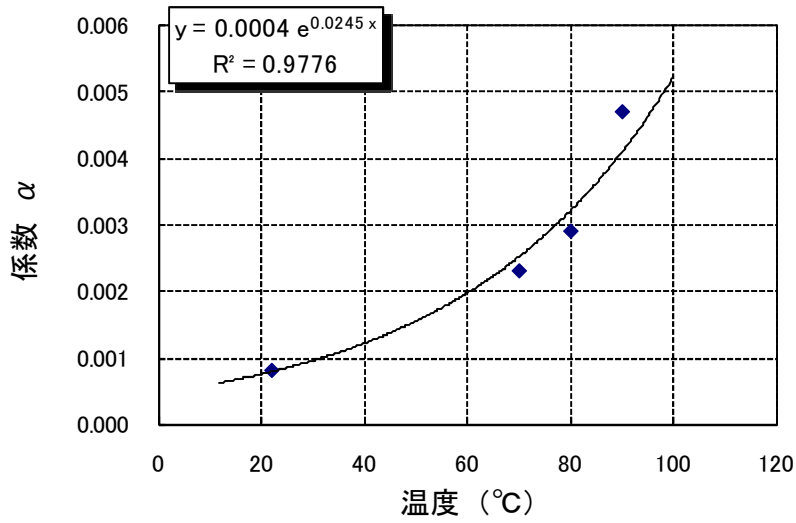


图 2-17 温度—系数 α 關係

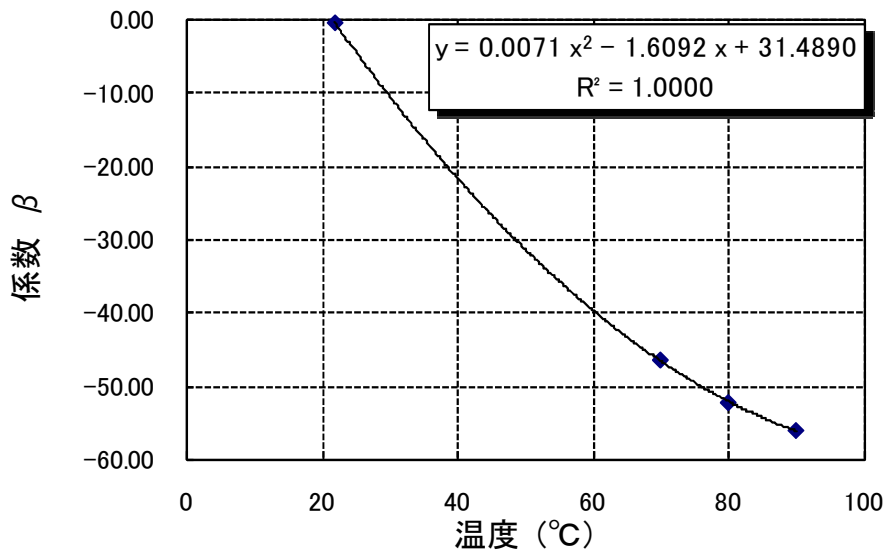


图 2-18 温度—系数 β 關係

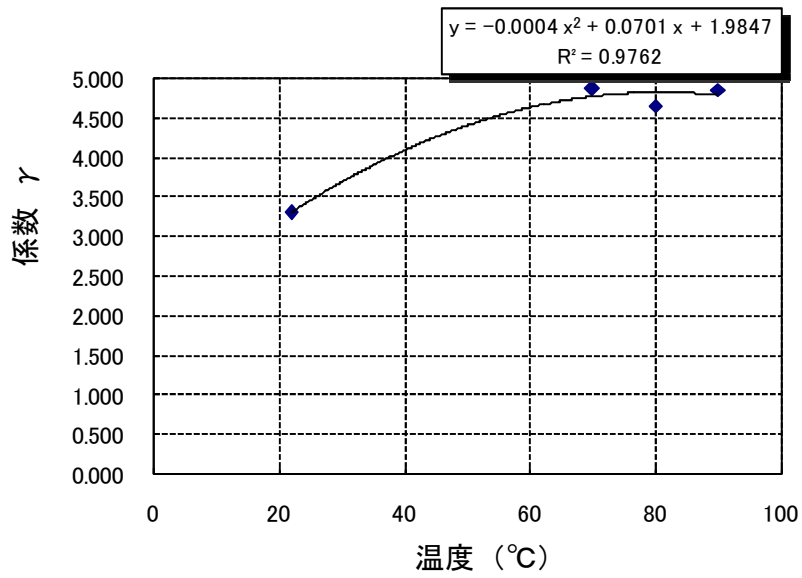


図 2-19 温度－係数 γ 関係

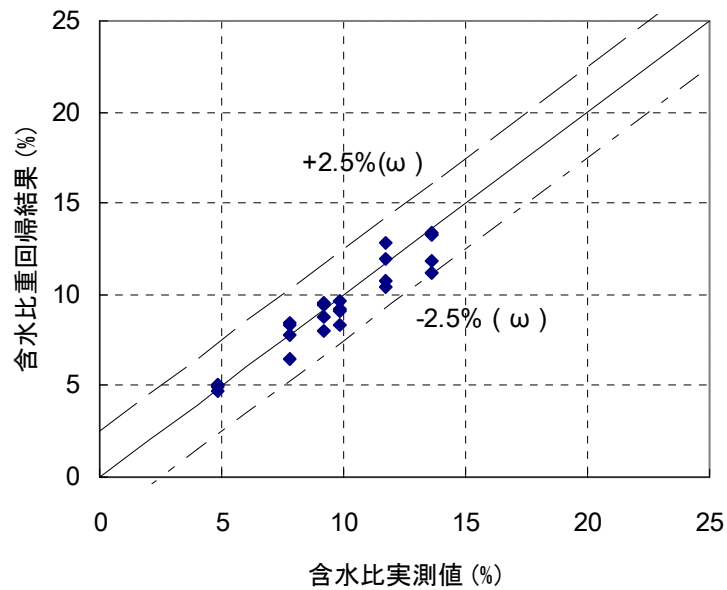


図 2-20 含水比の多重回帰分析結果と実測値の比較 (TDK CHS-UPS)

(ii) HMP233 (VAISALA 社製湿度計) のキャリブレーション

湿度計 HMP233 により得られた含水比－相対湿度関係を図 2-21 に示す。

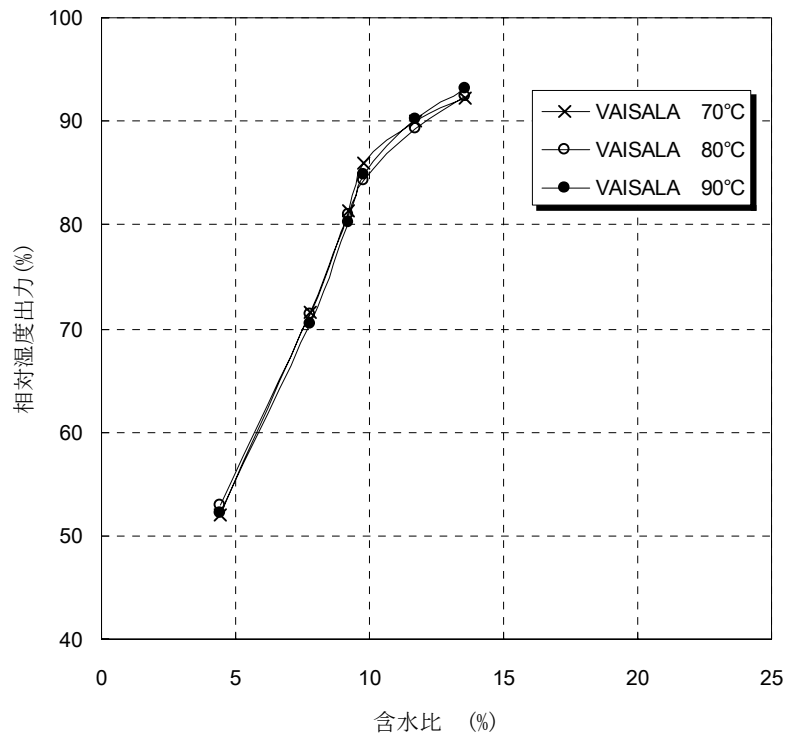


図 2-21 含水比－相对湿度出力関係 (VAISALS HMP233)

前述と同様な理由により、 $\omega \leq 13.6\%$ のデータについて 2 次回帰式を設定し回帰分析を行った。図 2-21 に示した結果から、本センサーによる相对湿度出力値は温度に依存しないと判断して、回帰式においては相对湿度出力値のみを変数とした。得られた含水比推定式を以下に示す。

$$\omega = 0.0032H^2 - 0.2617H + 9.3871$$

H : 出力相对湿度 (%)

ω : 含水比 (%)

上式の多重回帰結果を図 2-22 に示す。ここでは、推定式により含水比の値で $\pm 1.5(\%)$ の精度で推定可能であることを示している。

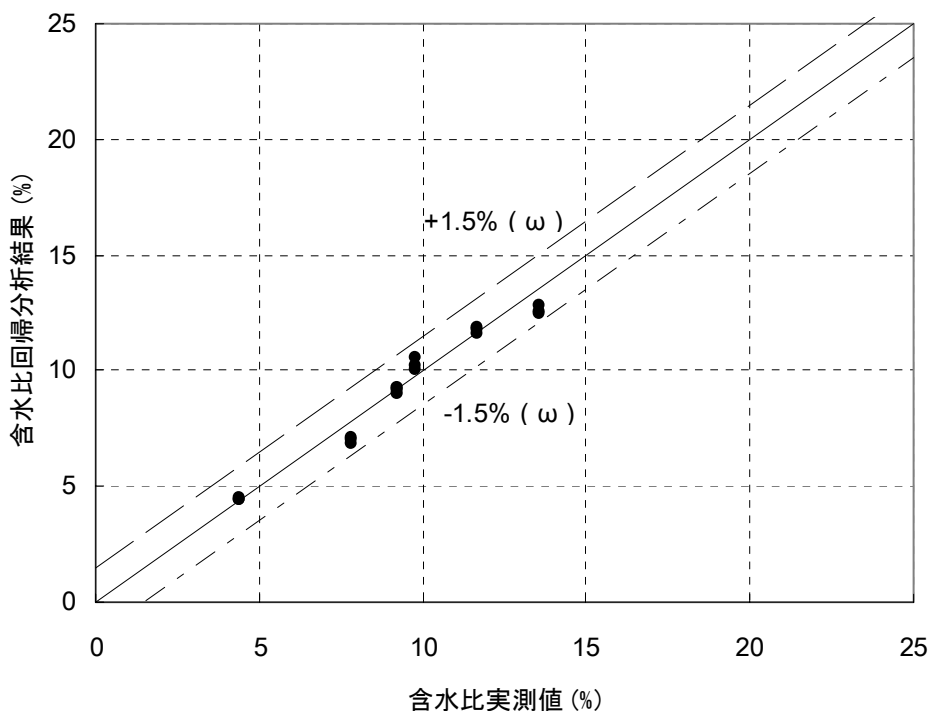


図 2-22 含水比の多重回帰分析結果と実測値との比較 (VAISALSA HMP233)

(3) 土圧計の温度変化による零点ドリフトの補正

土圧計は零点が温度によりドリフトする特性を持つことから、事前にこの特性を把握し出力値を補正した。事前の特性把握試験においては、試験設備設置箇所での室温 (13℃) を零点として、使用する全ての土圧計を恒温槽にて無載荷状態で 70℃, 80℃, 90℃ に加熱して各々の出力の移動量を取得した。得られた結果を図 2-23 から図 2-25 に示す。凡例の名称は試験に供したセンサーに固有の番号である。そのようにして得られた結果について線形回帰分析を行い、温度補正量算定式を決定した。なお、回帰式には以下の関数を設定した。

$$\Delta_T = C_S \times (T - 13)$$

Δ_T : 零点移動量 (MPa)

C_S : センサー各々に固有の係数

T : 温度 (℃)

各土圧計に固有の係数 C_S の一覧を表 2-4 に示す。

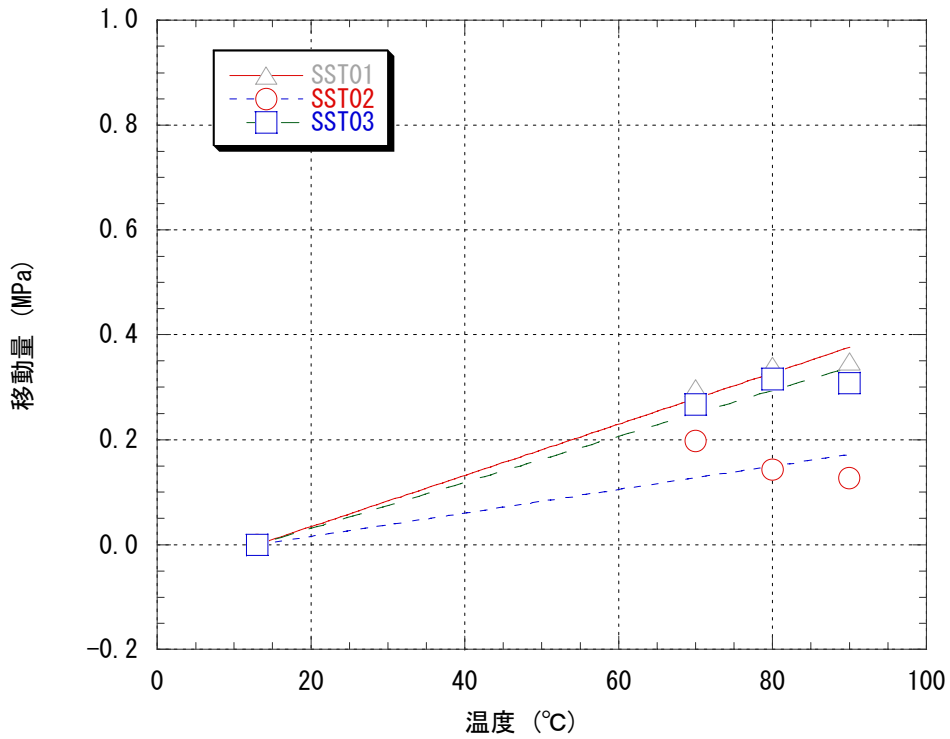


図 2-23 温度—零点移動量関係 (SST01, SST02, SST03)

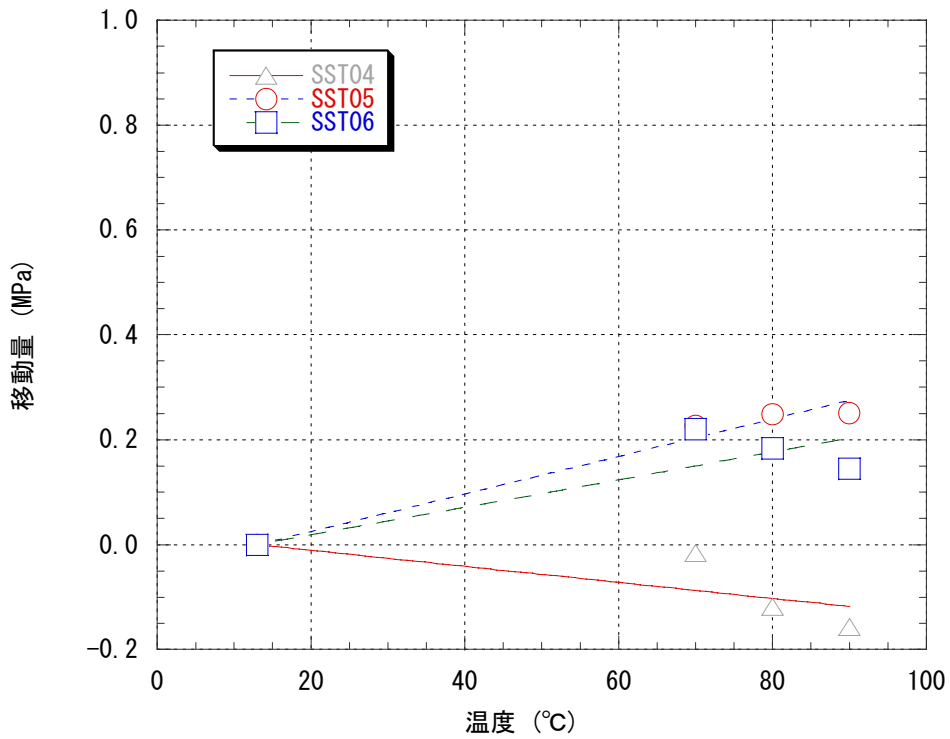


図 2-24 温度—零点移動量関係 (SST04, SST05, SST06)

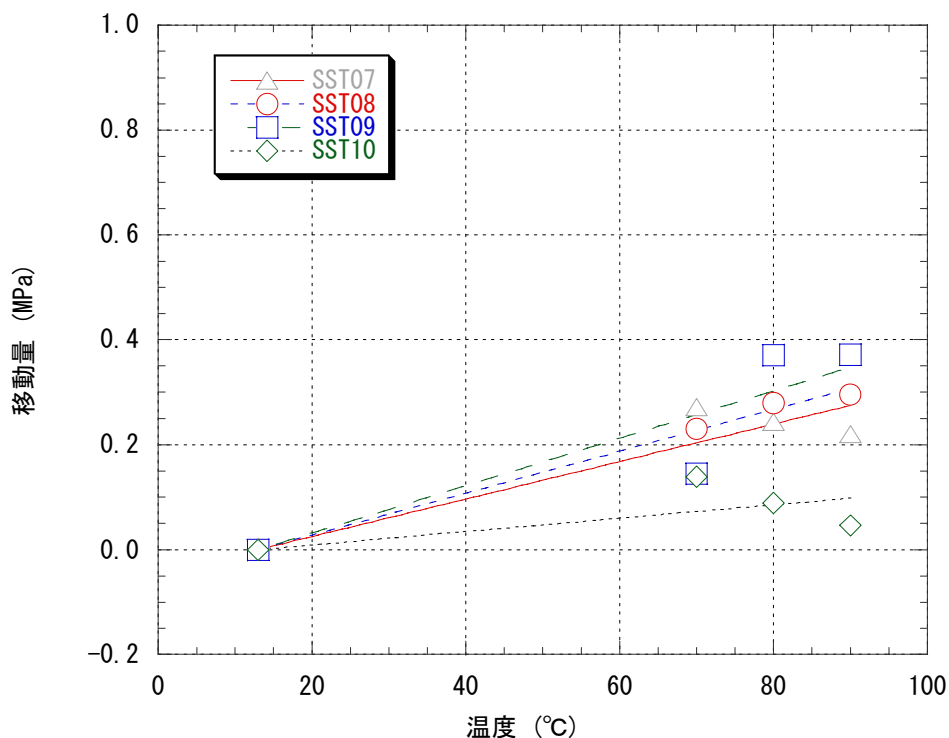


図 2-25 温度－零点移動量関係 (SST07, SST08, SST09, SST10)

表 2-4 各土圧計の係数 C_s 値一覧

土圧計番号	SST01	SST02	SST03	SST04	SST05
係数 C_s	4.885	2.234	4.388	-1.531	3.575
土圧計番号	SST06	SST07	SST08	SST09	SST10
係数 C_s	2.635	3.573	3.989	4.517	1.275

2.4.2 センサー設置および試験体設置

緩衝材に設置したサイクロメータ、湿度計および熱電対については、緩衝材ブロックを積み上げる前に、ドリルで規定の位置に穴を空け各種センサーを埋設した。熱伝導率測定センサーについては、緩衝材ブロック間に挟み込んだ。センサーの設置が完了した緩衝材試験体の状況を写真 2-1 に示す。緩衝材中に配置した測定センサーのレイアウトを図 2-26 から図 2-33 に示す。また、模擬岩体中の熱電対の配置を図 2-34 に示す。図 2-30 にある pH 測定用中空管は ISFET 式 pH センサーを測定時に挿入するためのものである。この箇所は測定時以外はメカニカルパッカーを設置し大気と緩衝材の接触を遮断した。

図 2-35 にメカニカルパッカーの構造図を示す。

緩衝材試験体は天井クレーンを使用して、模擬岩体に設けられた模擬処分孔に設置した。この際、模擬岩体と緩衝材試験体との間に隙間が生じるが、そこには試験体に用いたものと同じ仕様のベントナイト/ケイ砂混合体ブロックを粉砕したものを、人力にて締め固めながら充填した。

写真 2-2 に隙間充填状況を示す。



写真 2-1 緩衝材試験体セット完了状況



写真 2-2 緩衝材 - 模擬岩体隙間充填状況

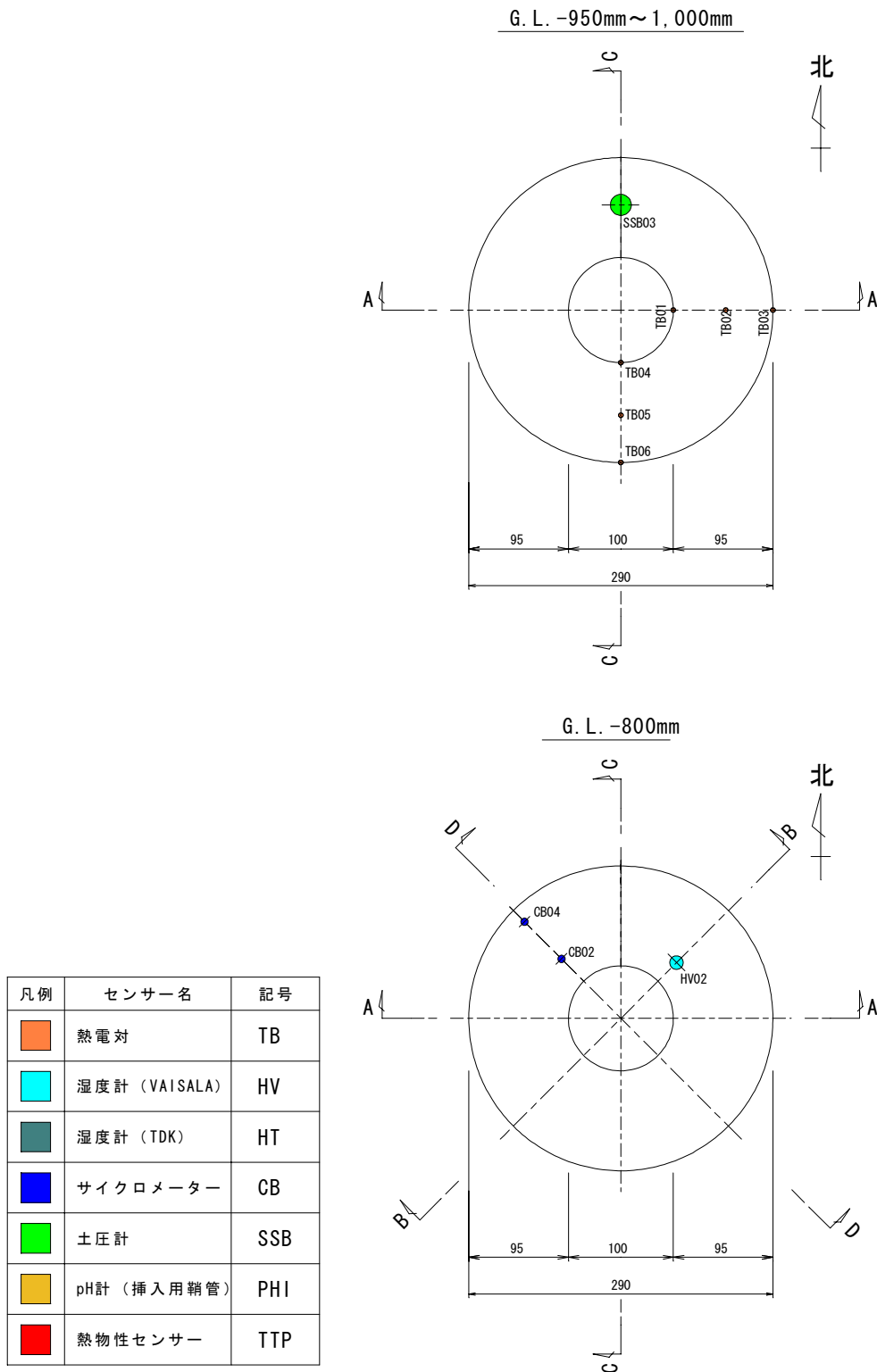


図 2-26 緩衝材中センサー配置平面図 (1)

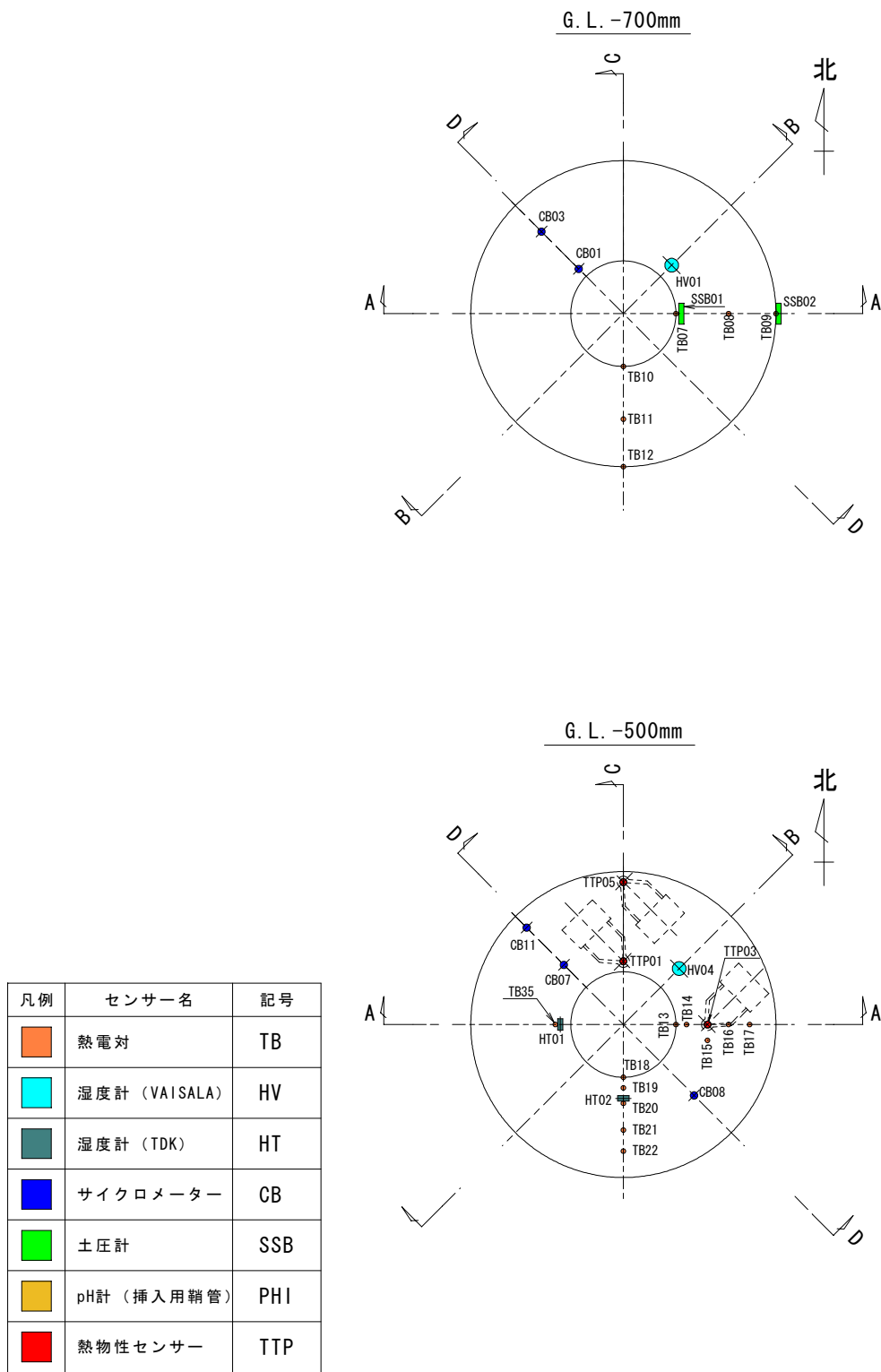


図 2-27 緩衝材中センサー配置平面図 (2)

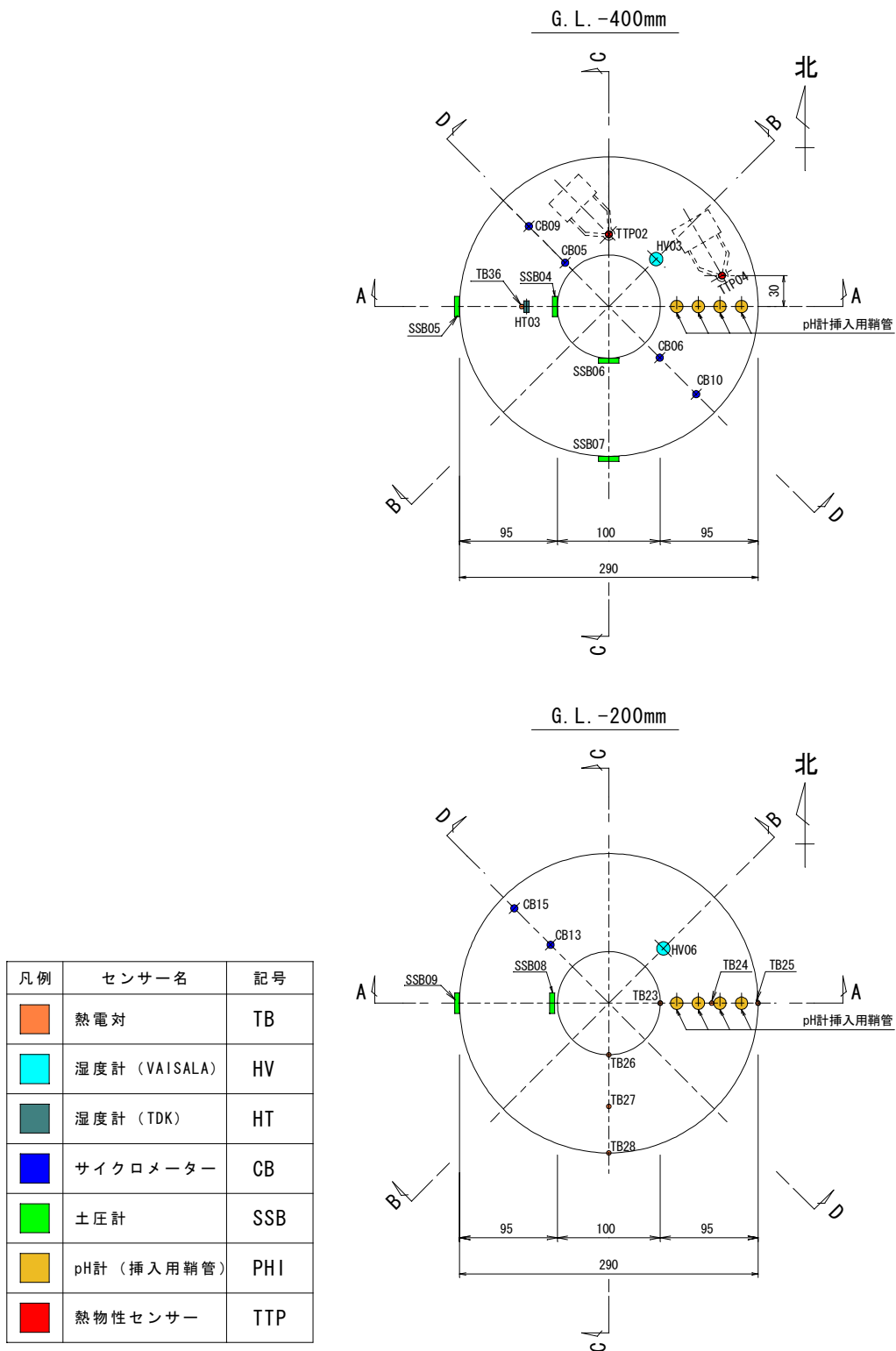


図 2-28 緩衝材中センサー配置平面図 (3)

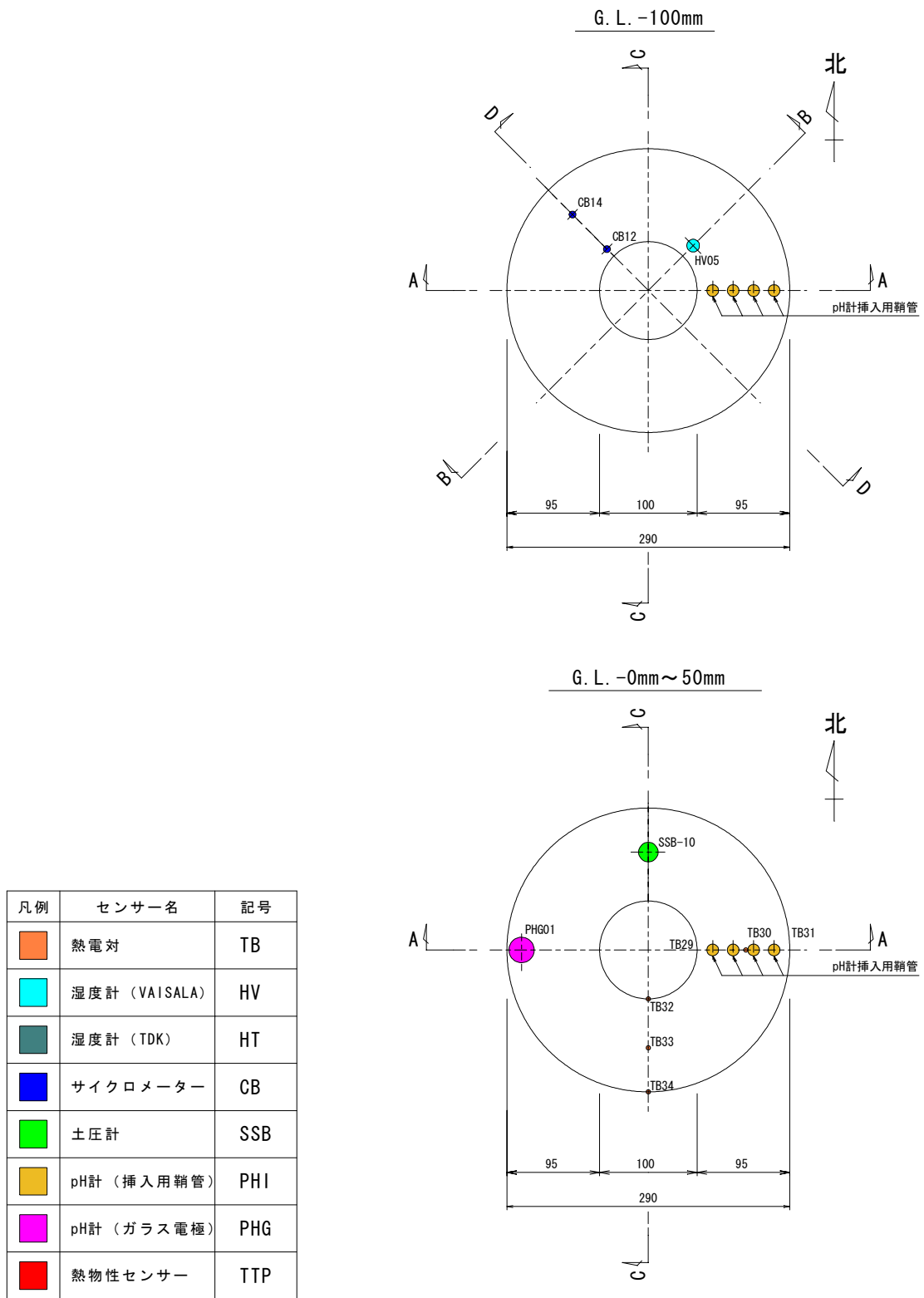


図 2-29 緩衝材中センサー配置平面図 (4)

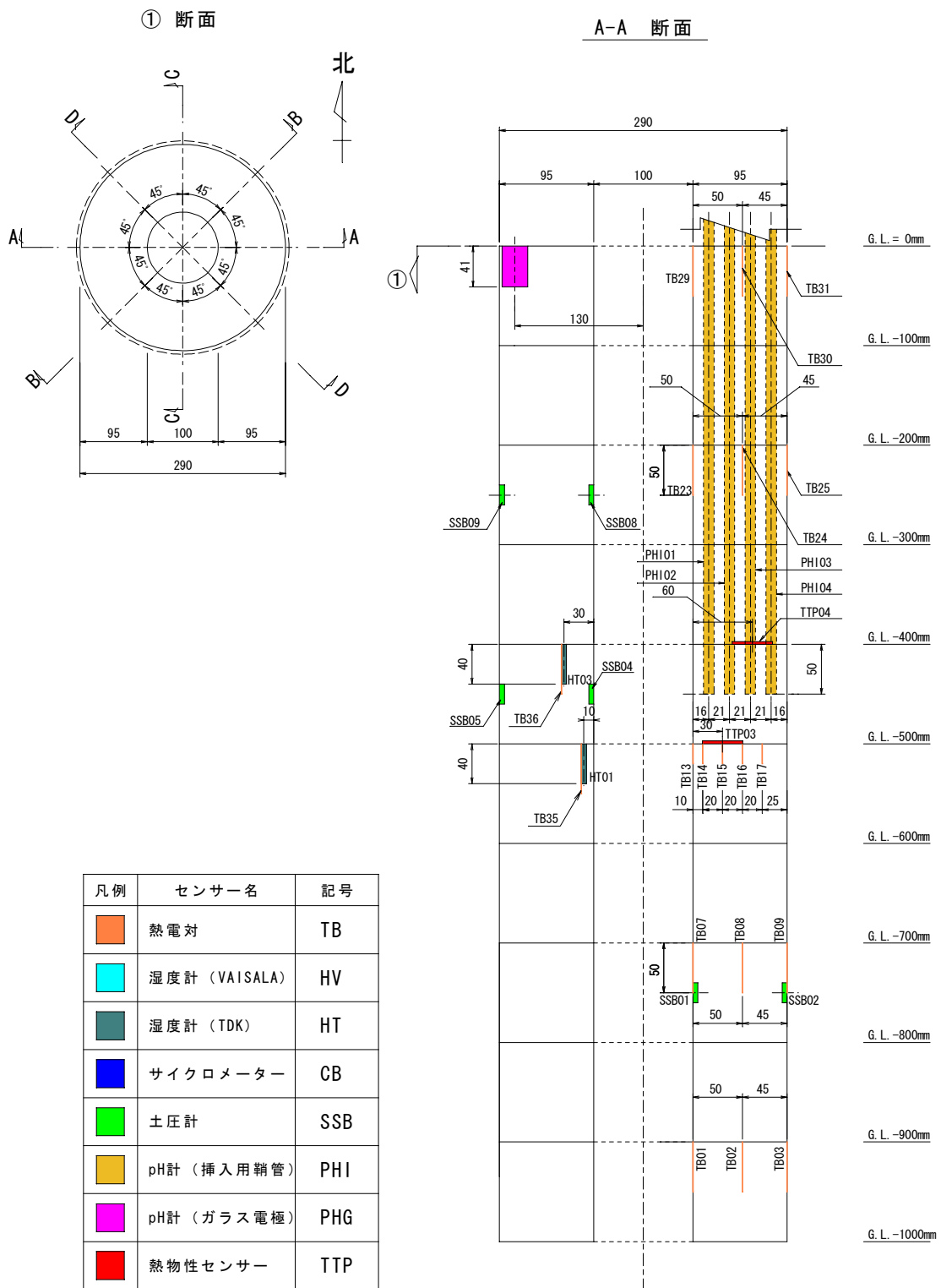


図 2-30 緩衝材センサー配置断面図 (1)

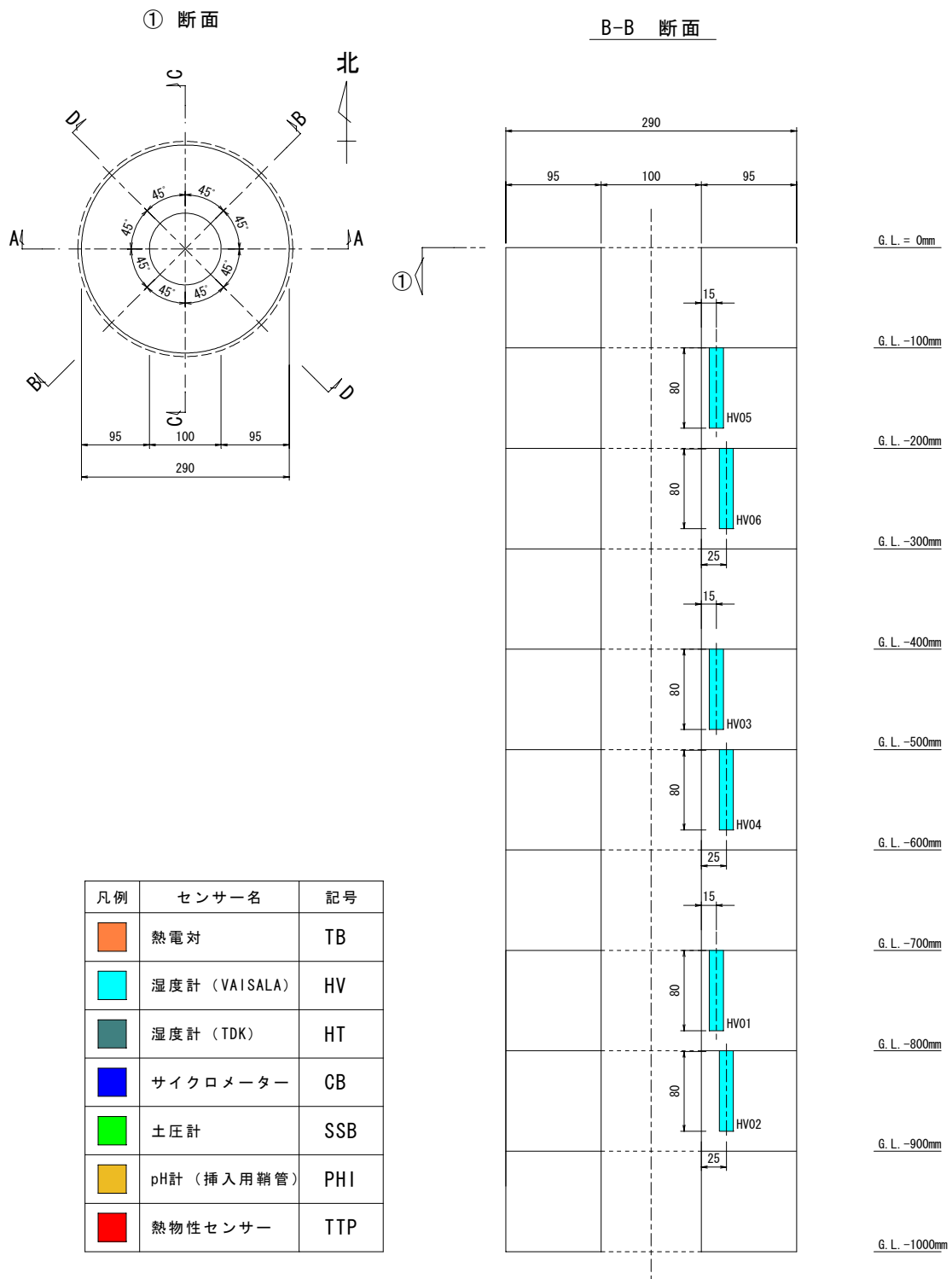


図 2-31 緩衝材センサー配置断面図 (2)

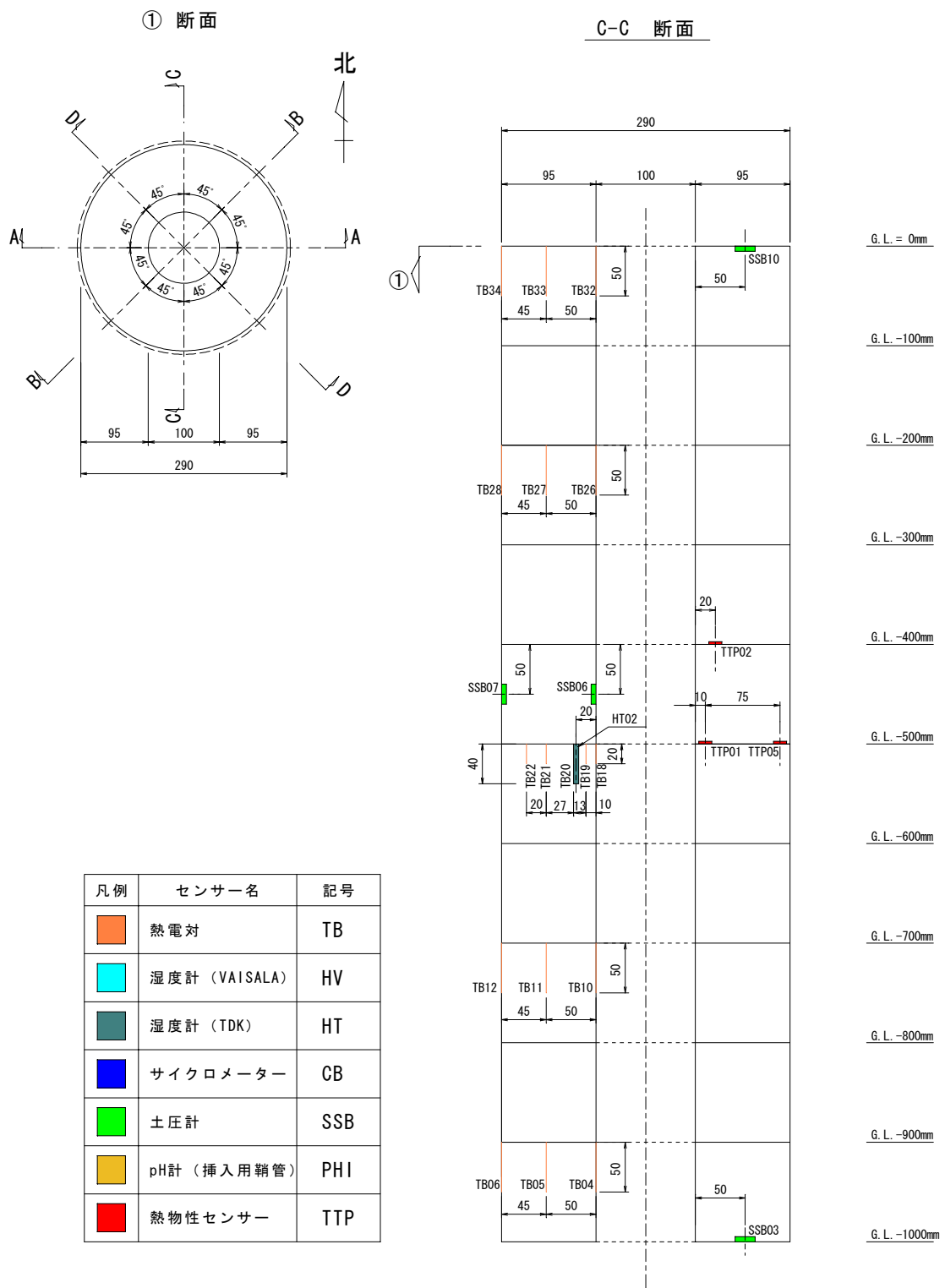


図 2-32 緩衝材センサー配置断面図 (3)

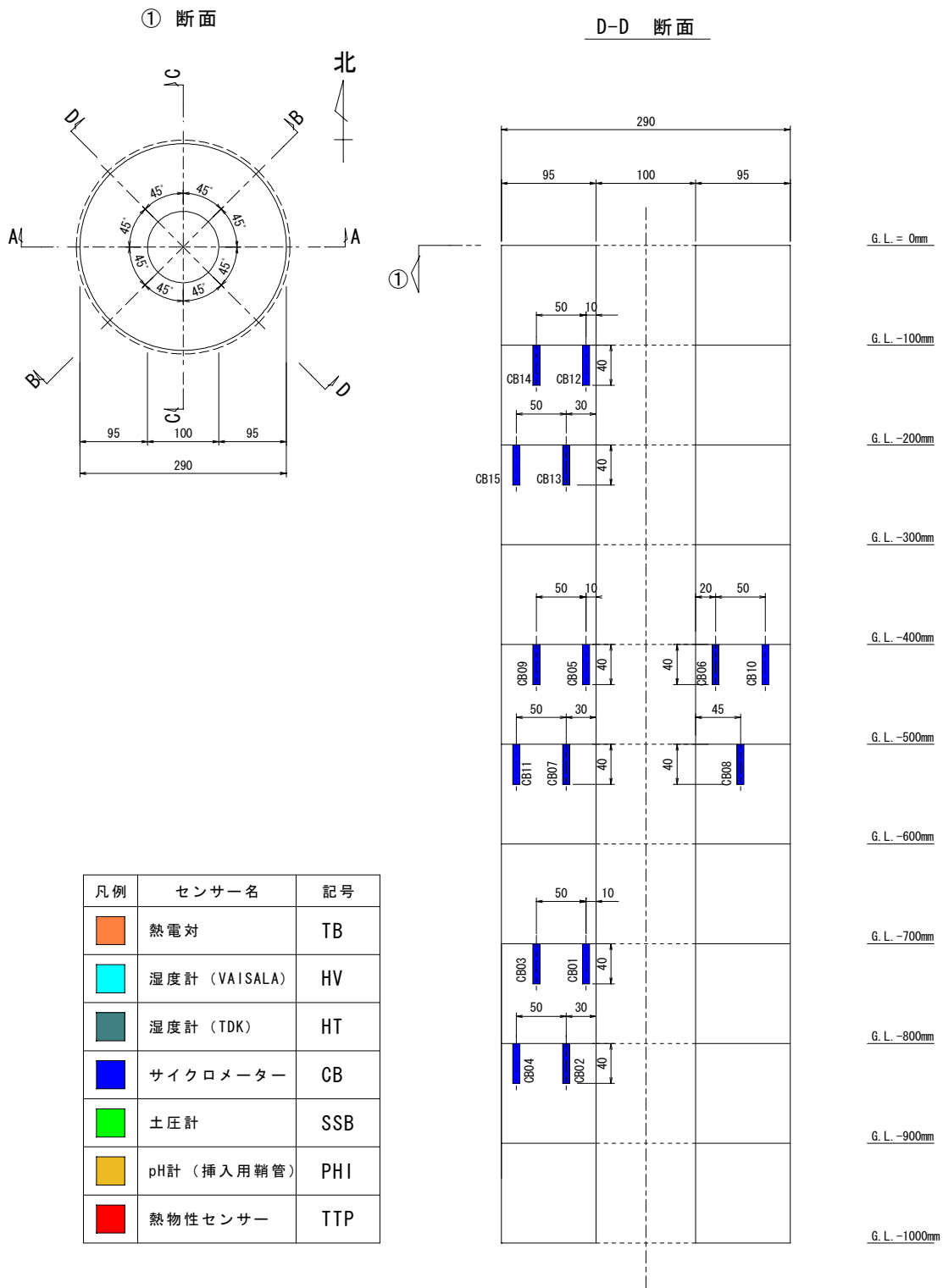


図 2-33 緩衝材センサー配置断面図 (4)

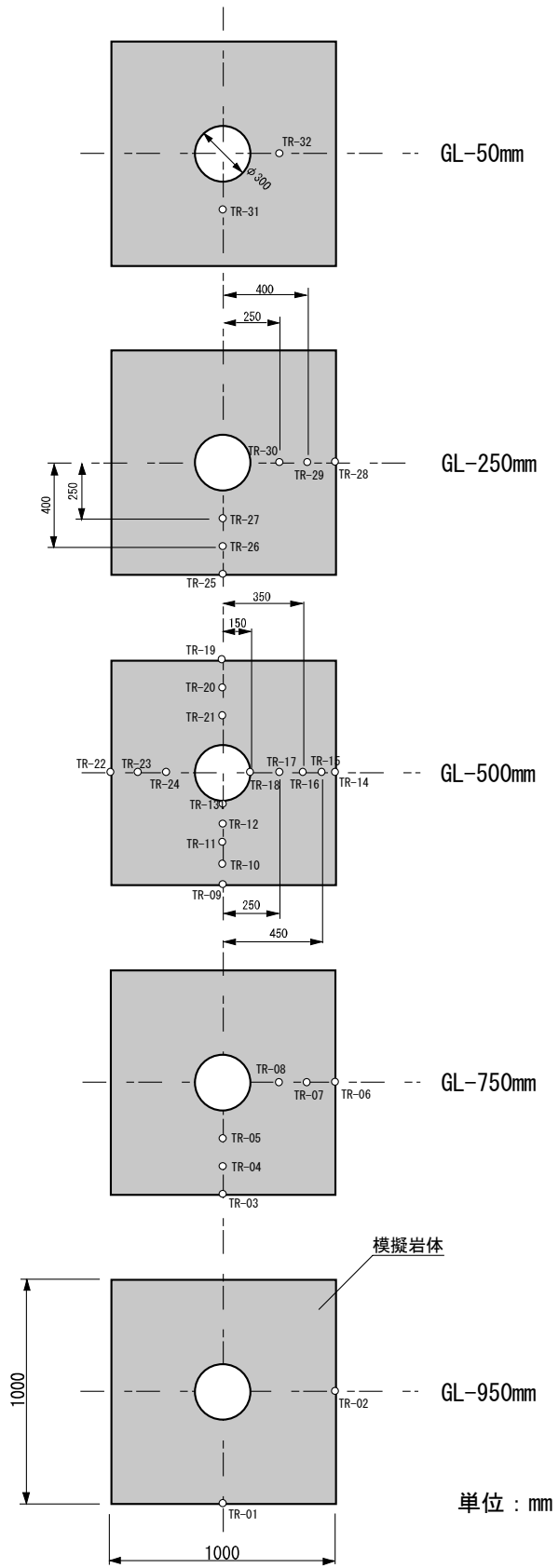
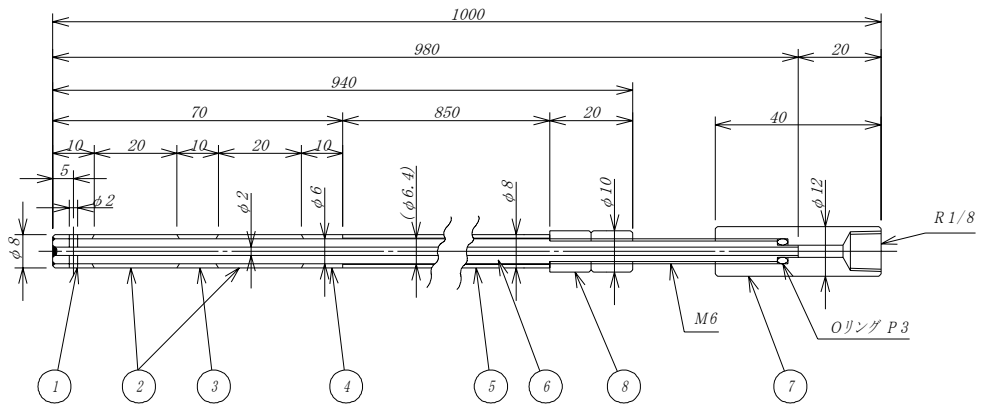


図 2-34 模擬岩体中への熱電対センサーの配置



8	圧縮ワット	SS316	2		
7	アダプター	SS316	1		
6	芯金	SS316	1		
5	カラー(4)	SS316	1		
4	カラー(3)	SS316	1		
3	カラー(2)	SS316	1		
2	パッカーゴム	バドトゴム	2		
1	カラー(1)	SS316	1		
番号	部品名称	材 質	個数	備 考	
名 称	メカニカルパッカー組図			第三巻	尺 度
機器名		設 計	検 査	図 本 認	

図 2-35 メカニカルパッカー構造図

3. 連成試験結果

3.1 温度の結果

試験体上面から 50mm, 250mm, 520mm, 750mm, 950mm 下がった位置におけるセンサー設置位置の温度の経時変化を図 3-1 から図 3-5 に示す。また、図 3-6 に上記各高さにおける、試験開始から 1 年後の温度の空間分布を示す。これらから、緩衝材試験体の中間の高さ (G.L.-500mm) においては、概ね $1^{\circ}\text{C}/10\text{mm}$ の温度勾配が形成されていることがわかる。

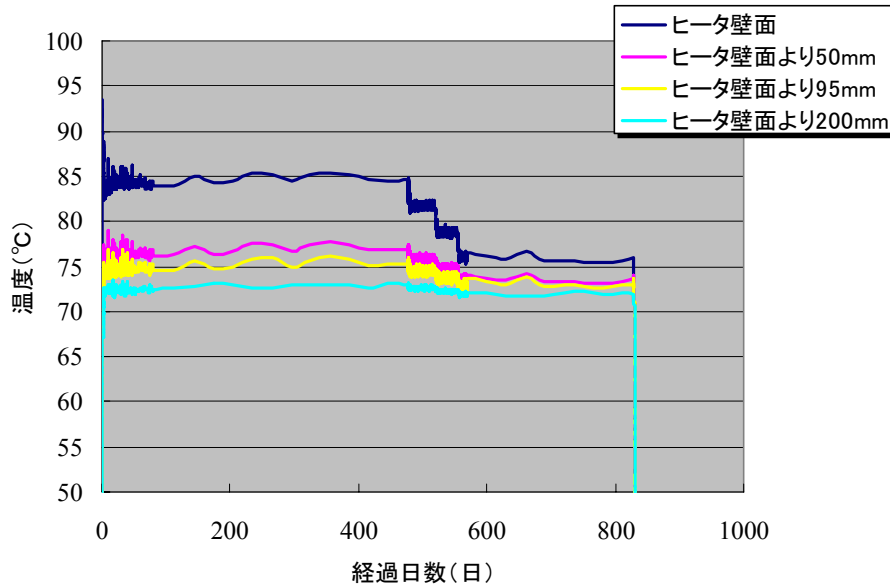


図 3-1 温度経時変化 (G.L.-50mm)

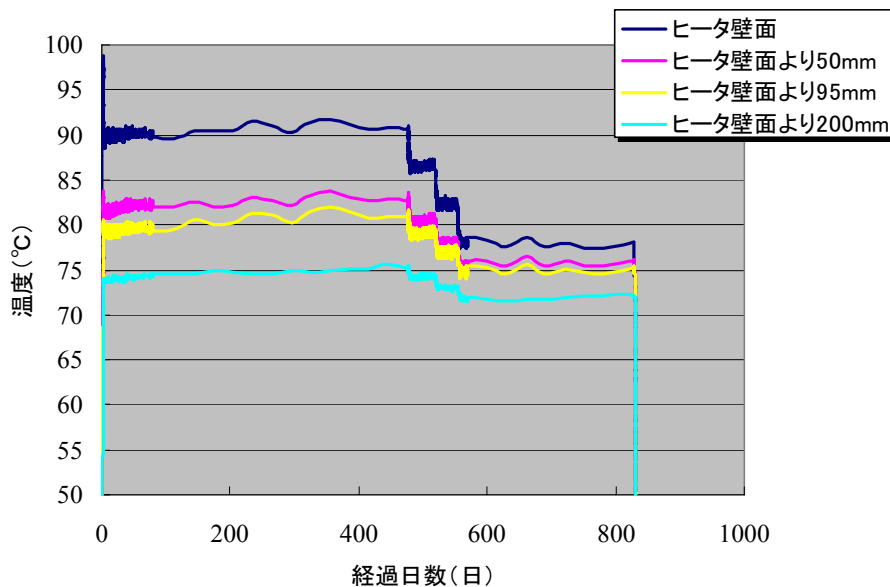


図 3-2 温度経時変化 (G.L.-250mm)

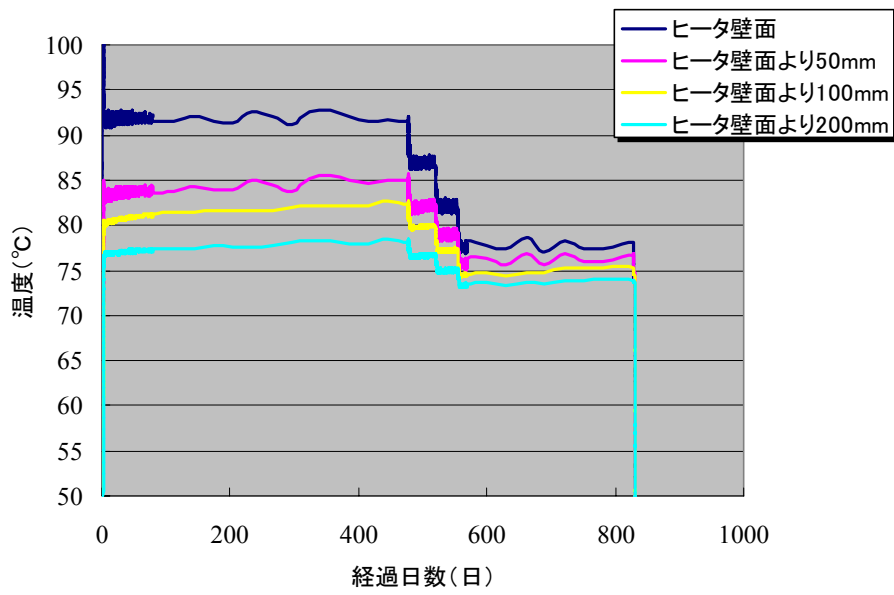


図 3-3 温度経時変化 (GL.-520mm)

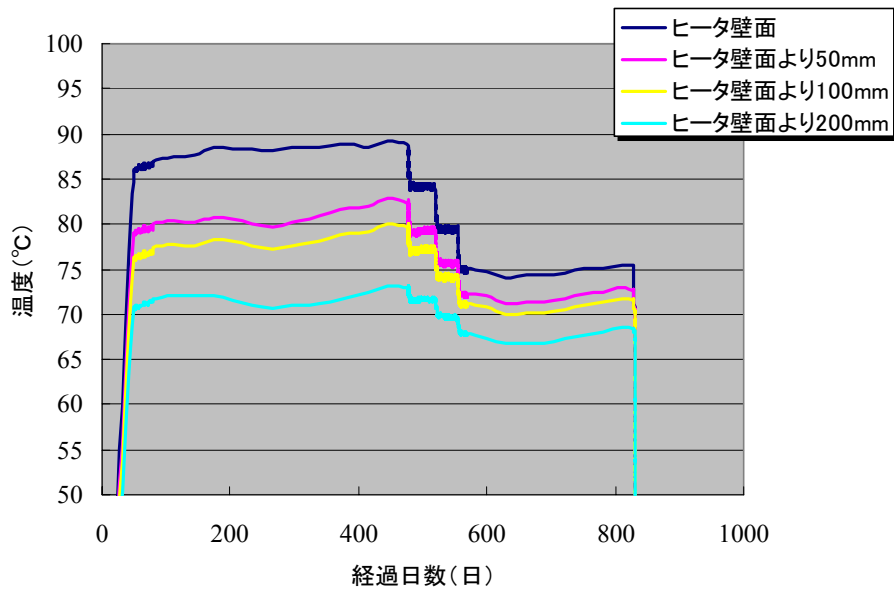


図 3-4 温度経時変化 (GL.-750mm)

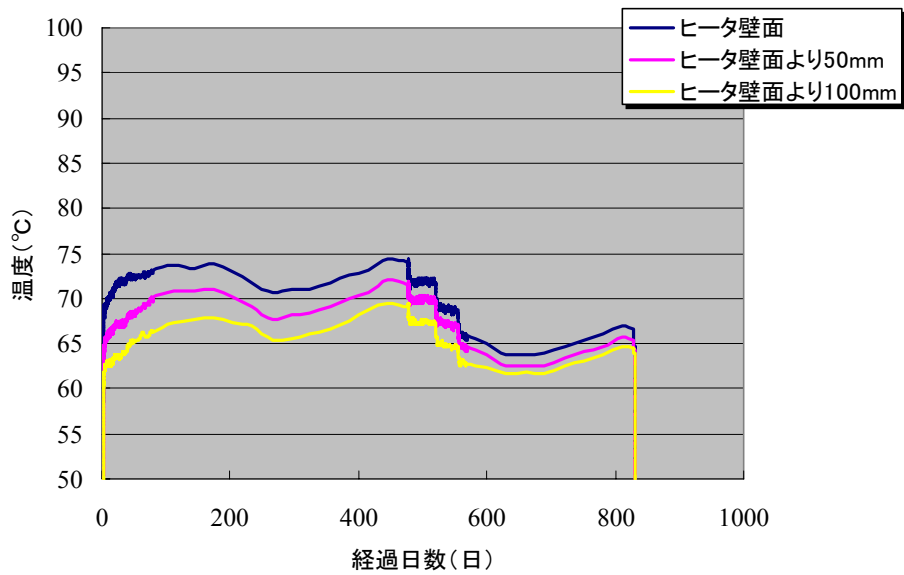


図 3-5 温度経時変化 (GL-950mm)

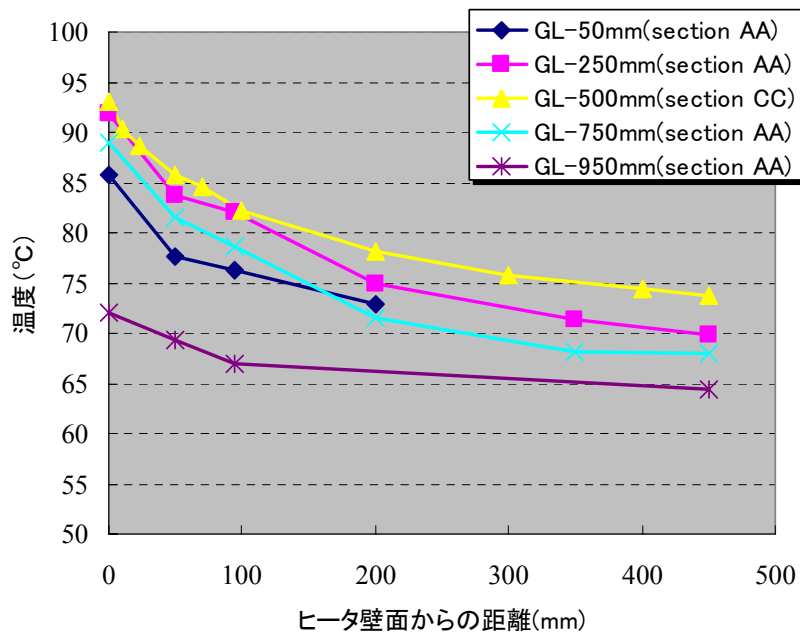


図 3-6 温度空間分布 (試験開始から1年後)

3.2 緩衝材水分量の測定結果

3.2.1 サイクロメータによる緩衝材水分量の推定値

サイクロメータを用いた測定による、緩衝材中の水分量の推定結果を図 3-7 から図 3-9 に示す。図 3-7 において、ヒータ壁面から 10mm のデータに着目すると、中心ヒータの温度を低下させ始

めた時期を境に水分量の上昇率が増加しており、この事実は温度勾配の低下によるヒータ側から外側に向かう水分フラックスの減少を示唆するものと考えられる。次に、ヒータから 60mm 以上はなれた位置での推定値について、いずれも一旦完全飽和相当の含水比以上に上昇し、再び低下するという挙動が見られる。この原因は明確ではないが、緩衝材の膨潤による乾燥密度の変化がその一因ではないかと推測される。従って、このような挙動を示すデータは次章で述べる熱 - 水連成モデルの信頼性確認において評価には供しないこととした。

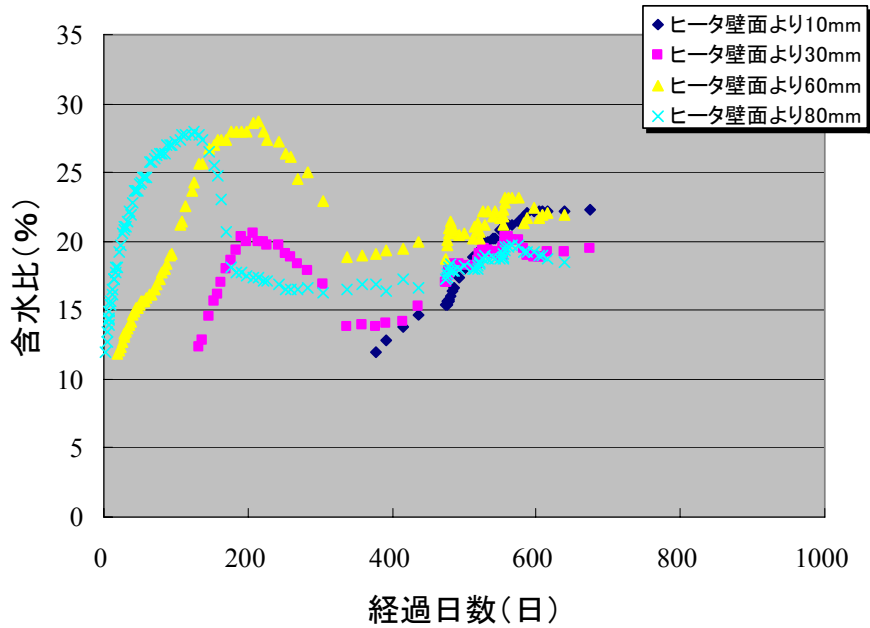


図 3-7 サイクロメータによる含水比推定値 (G.L.-840mm~740mm)

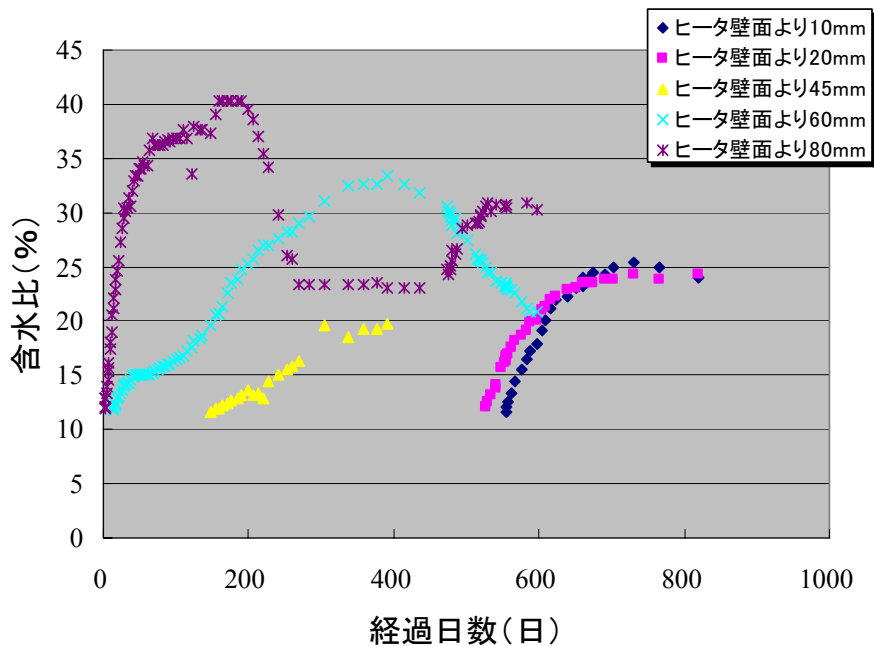


図 3-8 サイクロメータによる含水比推定値 (G.L.-540mm~440mm)

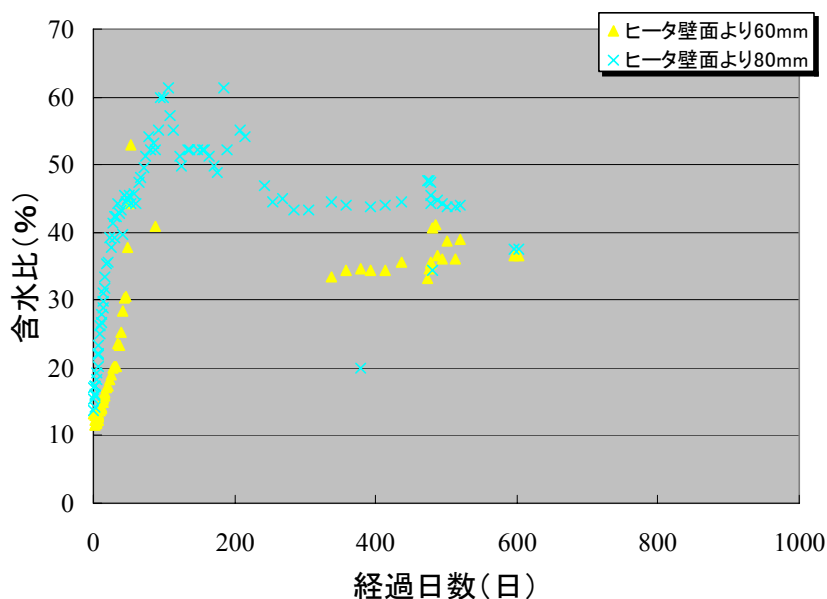


図 3-9 サイクロメータによる含水比推定値 (G.L.-240mm~140mm)

3.2.2 湿度計による緩衝材水分量の推定値

(1) CHS-UPS (TDK 社製湿度計) による測定結果

図 3-10 に CHS-UPS (TDK 社製湿度計) による含水比推定結果を示す. ここでは, 試験開始直後にヒータ近傍の緩衝材の含水比が低下する挙動を捉えている. しかし, 試験開始後約 80 日後に設置した 3 つ全てのセンサーが測定不能となった.

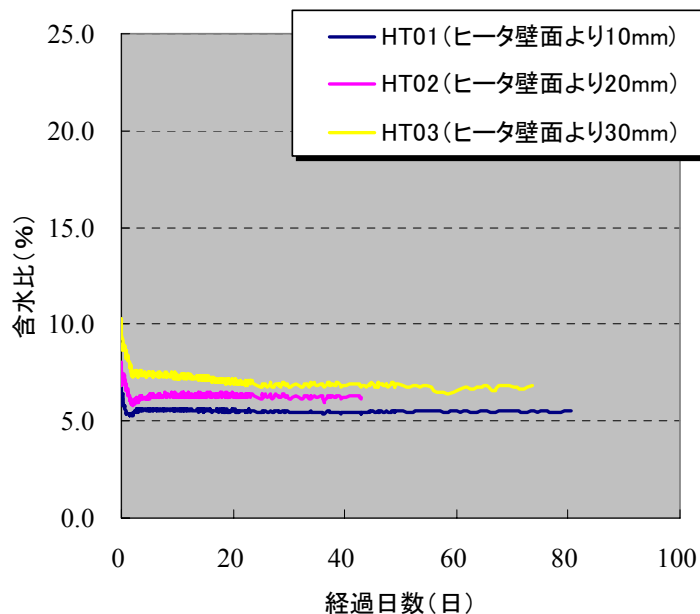


図 3-10 湿度計 (CHS-UPS) による含水比推定値

(2) HMP233 (VAISALA 社製湿度計) による測定結果

HMP233 による測定の一例 (センサー番号: HV05) を図 3-11 に示す。ここでは, 試験開始直後に水分量が低下し, その後, 概ね 500 日後まで徐々に水分量が増加する挙動を測定できた。但し, このような挙動が測定されたのは, 設置した 6 個のセンサーのうち, このセンサーのみであった。

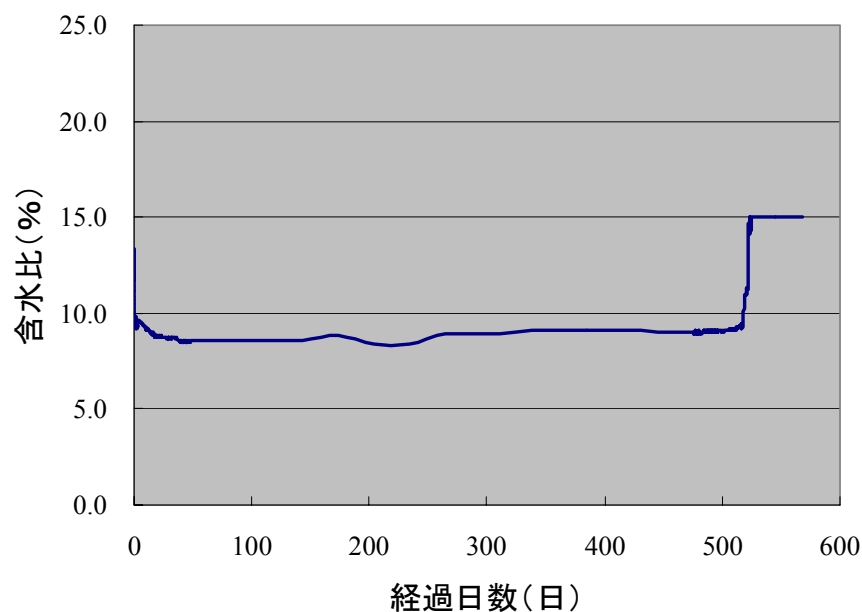


図 3-11 湿度計 (HMP233) による含水比推定値

3.2.3 熱伝導率測定センサーによる緩衝材水分量の推定値

熱伝導率測定センサーによる緩衝材水分量の推定結果を図 3-12 に示す。ここでは, 最も模擬岩体に近い位置 (ヒータ壁面より 90mm) に設置したセンサーでさえも, 200 日以降も含水比推定値は 15%程度を示すに止まっている。これは, センサーを緩衝材ブロックに挟み込んで設置しているため, センサーと緩衝材の接触が不十分である可能性があり, そのことが原因ではないかと推測される。また, いずれのセンサーも試験開始から 250 日以内にデータ取得が不可能となった。

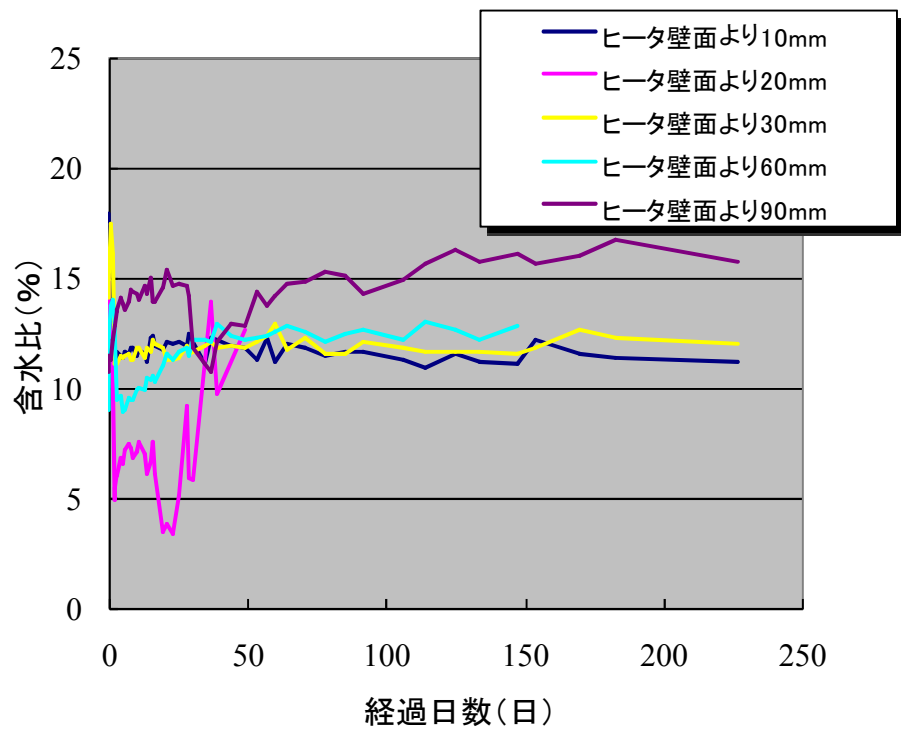


図 3-12 熱伝導率測定による含水比推定結果

3.3 膨潤応力測定について

土圧計による膨潤応力測定に関しては，設置したいずれのセンサーによっても，有意な測定データを取得することはできなかった。

4. 熱-水連成モデルの信頼性確認

これまで述べてきた、熱-水-応力連成試験の結果に基づき、熱-水連成モデルの信頼性を確認するための解析を実施した。本モデリングの特徴としては、以下のようなことが挙げられる。なお、解析には熱-水-応力連成解析コード THAMES-3D⁴⁾を用いた。

- ① 温度勾配に起因する水分移動を水蒸気の拡散挙動でモデル化した、Phillip & de Vries⁵⁾ モデルを適用し、さらに、既存の温度勾配水分拡散試験のデータを用いて、その適用性を検証した。
- ② 緩衝材の不飽和水理特性を再検討し、室内浸潤試験のデータを用いて、その適用性を検証した。
- ③ 模擬岩体の不飽和透水特性をモデル化し、室内浸潤試験のデータを用いて、その適用性を検証した上で、岩盤-緩衝材という2種類の物性を持つ条件下での連成解析を行った。

4.1 緩衝材および模擬岩体の不飽和水理モデルのパラメータの設定

4.1.1 パラメータ設定のための浸潤試験

(1) 試験概要

緩衝材および模擬岩体の不飽和水理モデルのパラメータを同定するために、室内において緩衝材のみの供試体および緩衝材とモルタルを重ね合わせた複合供試体の2種類を用いて、浸潤試験を実施した。供試体形状は緩衝材、モルタルともに直径50mm高さ20mmの円柱形である。緩衝材は連成試験で用いたものと同様のものであり、初期含水比は12.5%に設定した。モルタルは、連成試験に供した模擬岩体製作時に、同じモルタルで作製したものである。浸潤試験開始前には通水を行い、飽和状態にした後に試験に供した。給水については加圧せずに行った、図4-1に試験の概略図を、表4-1に試験ケースを示す。各ケースにおいて試験終了後に緩衝材を4mmピッチでサンプリングし、含水比を測定した。

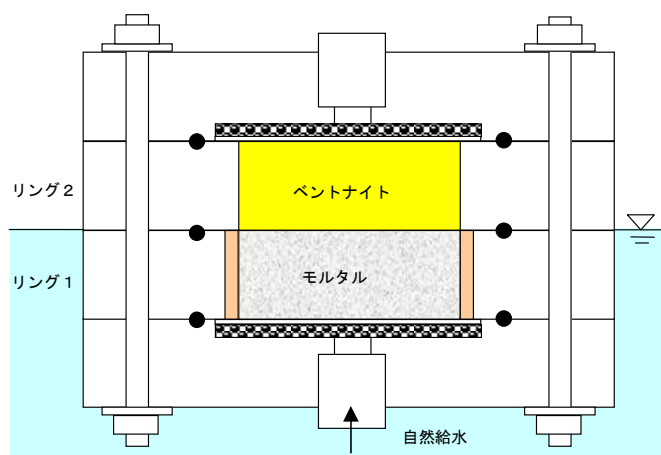


図 4-1 複合供試体を用いた浸潤試験概略図

表 4-1 浸潤試験の試験ケース

試験ケース	供試体	試験時間(hrs)
B-0-2	緩衝材のみ	2
B-0-8	緩衝材のみ	8
B-0-24	緩衝材のみ	24
B-0-48	緩衝材のみ	48
B-0-96	緩衝材のみ	96
BM-0-2	緩衝材+模擬岩体	2
BM-0-8	緩衝材+模擬岩体	8
BM-0-24	緩衝材+模擬岩体	24
BM-0-48	緩衝材+模擬岩体	48
BM-0-96	緩衝材+模擬岩体	96

(2) 試験結果

図 4-2 に緩衝材のみの試験の含水比の変化を、図 4-3 に緩衝材・モルタル複合供試体を用いた試験の含水比の変化を示す。

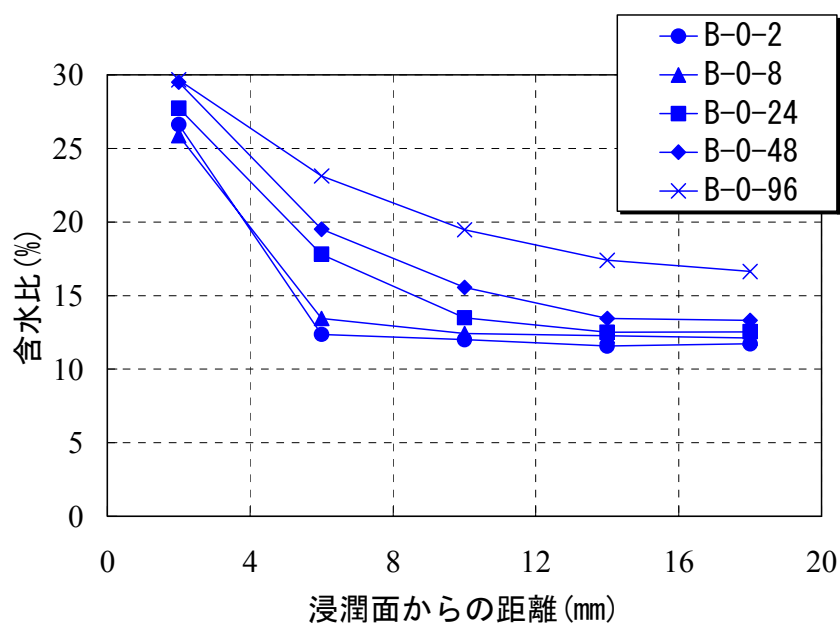


図 4-2 浸潤試験結果 (緩衝材のみ)

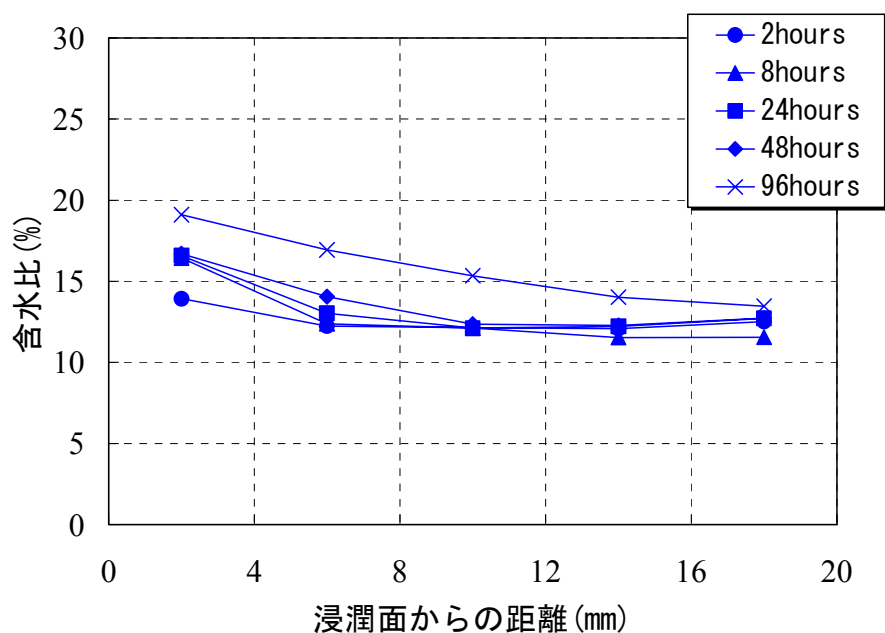


図 4-3 浸潤試験結果（緩衝材+モルタル）

4.1.2 緩衝材の不飽和水理モデルのパラメータの設定

(1) 不飽和水分特性曲線

緩衝材の不飽和水分特性モデルには、van Genuchten モデル⁶⁾ (van Genuchten, M., 1980) を用いた。本モデルによると有効飽和度 Se はサクション ψ [m] を変数として以下の式で表される。

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left\{ 1 + |\alpha\psi|^n \right\}^{-m}$$

θ : 体積含水率

θ_s : 飽和体積含水率

θ_r : 最小体積含水率

α : VG パラメータ[m⁻¹]

$$m = 1 - \frac{1}{n}$$

パラメータの設定にあたっては、連成試験で用いたものと同様の仕様のベントナイト/ケイ砂混合土 ($\theta_s=0.403$, $\theta_r=0.0$) の既存の室内試験データ³⁾ をフィッティングした (図 4-4)。これにより得られたパラメータは、 $\alpha=0.012$, $n=1.4$ となった。

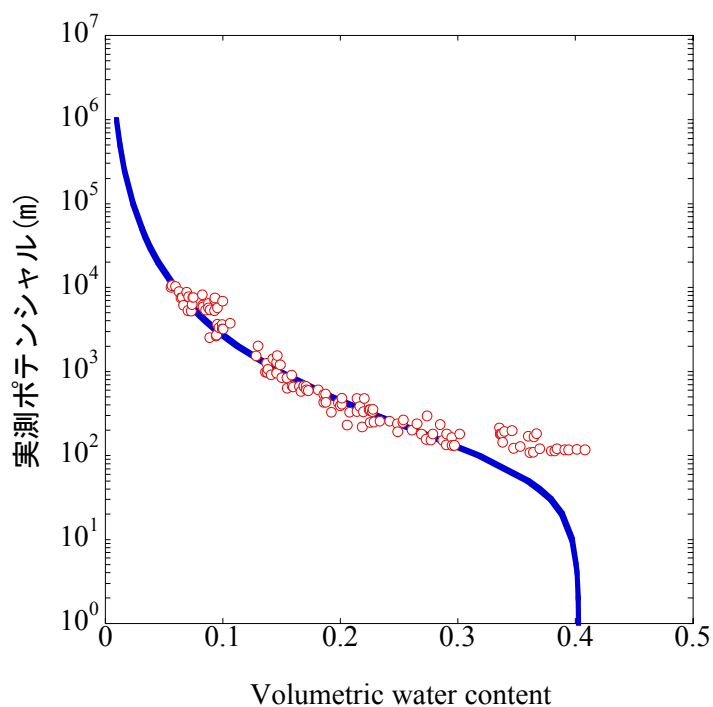


図 4-4 体積含水率－ポテンシャル関係（実測値およびフィッティングカーブ）

(2) 不飽和透水係数モデル

緩衝材の不飽和透水モデルについては、下式で表される直線モデル⁷⁾を仮定した。

$$Kr = \frac{Kr_a}{Se_b} \cdot Se \quad (Se \leq Se_b), \quad Kr = Kr_a + \frac{1 - Kr_a}{1 - Se_b} \cdot Se \quad (Se \geq Se_b)$$

ここで、 Kr は比透水係数を、 Se は有効飽和度を示す。

図 4-5 に直線モデルのパラメータ Se_b, Kr_a の概念図を示す。 Se_b, Kr_a は4.1.1 に述べた浸潤試験のうち緩衝材のみのケースの試験結果と数値解析結果とを比較することにより同定した。その結果、 $Se_b=0.99, Kr_a=0.551$ という値を得た。図 4-6 に浸潤試験結果の実測値とモデルによる計算値の比較を示す。

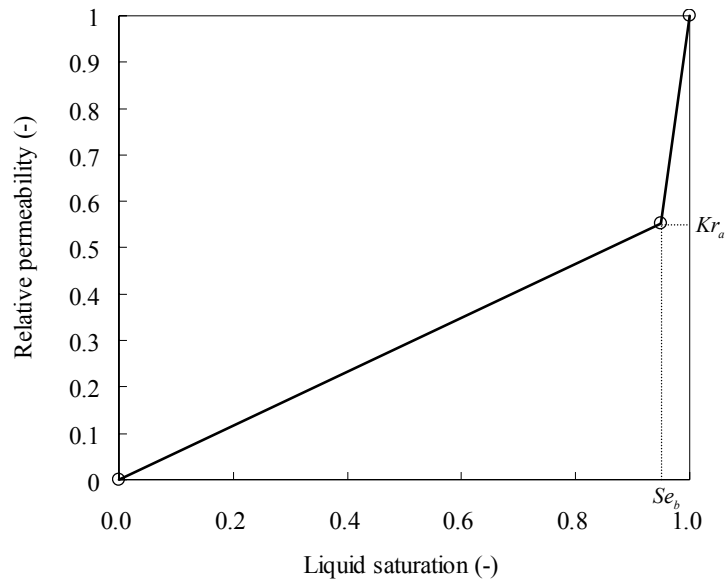


図 4-5 直線モデル概念図

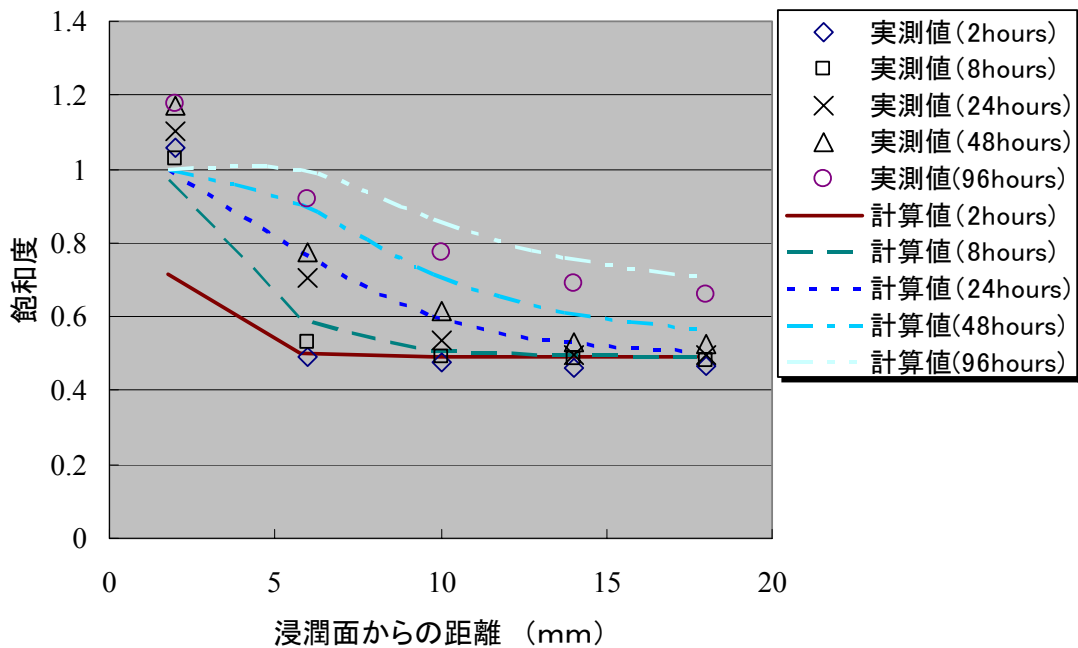


図 4-6 水飽和度の実測値と計算値の比較 (緩衝材のみ)

4.1.3 模擬岩体（モルタル）の不飽和水理モデルのパラメータの設定

模擬岩体（モルタル）の不飽和水理モデルのパラメータの設定にあたり、pF 試験を実施し水分特性曲線を求めた。さらに、得られた水分特性曲線を van Genuchten モデル（以下、VG モデルという）を用いてフィッティングし、同モデルのパラメータを同定した。

(1) 試験概要

モルタルの不飽和浸透特性に関するパラメータの取得を目的とし、水分保持特性（水分特性曲線：pF曲線）を遠心法により求めた。その結果からVGモデルを用いて同定を行い、不飽和透水係

数を推定した。

遠心法試験装置概略図を図 4-7に示す。また、試験装置の外観と供試体設置部の状況を写真 4-1及び写真 4-2にそれぞれ示す。今回用いた装置は小型遠心力模型実験装置であり、最大回転数は1,300rpm（無載荷状態）である。

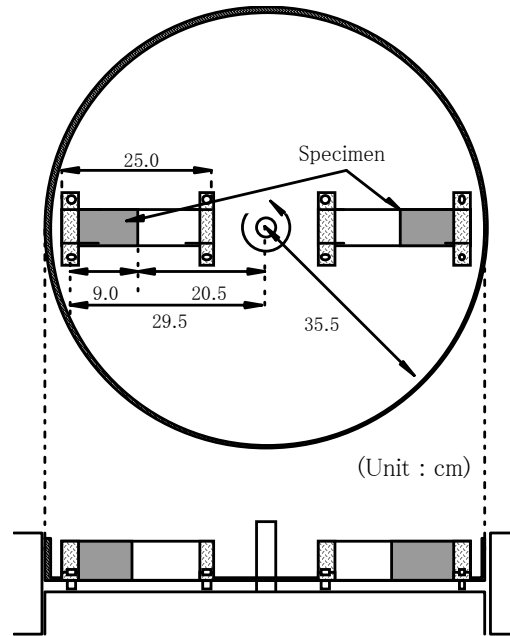


図 4-7 遠心法試験装置概略図



写真 4-1 試験装置（外観）

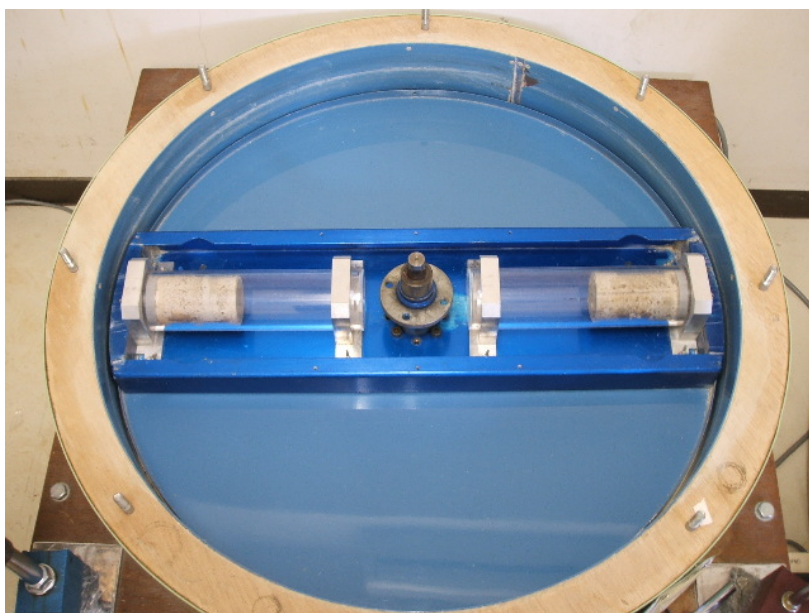


写真 4-2 試験装置（供試体設置部）

試験方法は、同サイズの供試体を 2 個用意した後、写真 4-3（左）のようにアクリル容器にエポキシ樹脂を用いて固定した。そして、写真 4-3（右）のように試験装置にガイドパイプ(アクリル容器)を用いて設置した後、所定の回転数で定常状態に至るまで回転させて排水を促した。その後、供試体を取り出して重量を測定し、これを各ステップで繰り返した。

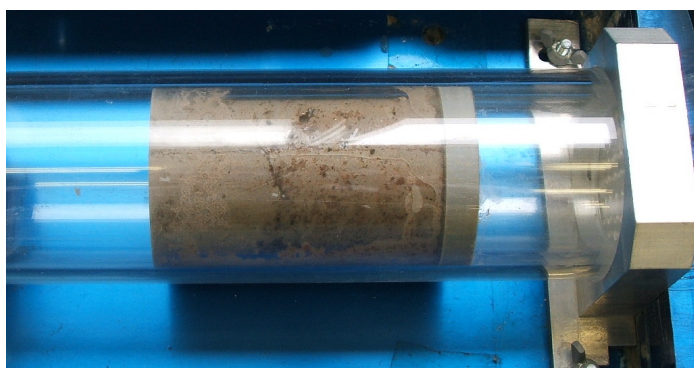


写真 4-3 供試体設置状況

なお、マトリックポテンシャル（負の圧力水頭）は、図 4-8の概念図を用いて、次式によって求められる⁸⁾。

$$\phi = r \left(r_1 - \frac{r}{2} \right) n^2 \times 1.097 \times 10^{-6} \text{ (kPa)}$$

$$\text{ただし, } r = (r_1 - r_0)$$

ここで, r_0 : 供試体下端の回転半径(cm), r_1 : 供試体中央の回転半径(cm)である.

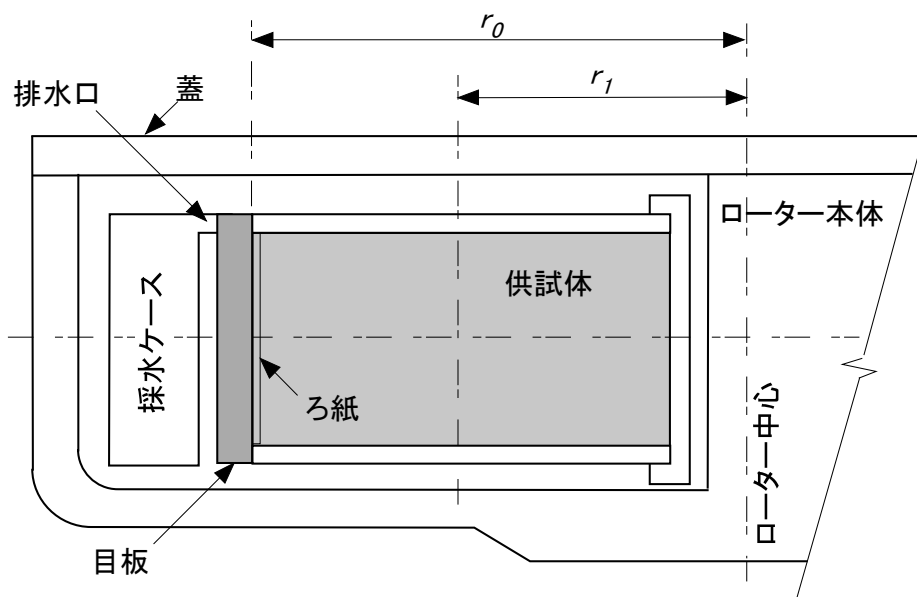


図 4-8 遠心機の固定式水平ローター部の例⁸⁾

(2) 試験結果

上述の方法で試験を実施した結果を表 4-2にまとめる. 供試体の体積含水率は, まず110°Cの乾燥炉で24時間以上放置した後に得られた絶乾状態と, これを水中で1週間以上真空脱気して得られた飽和状態における重量差から初期値を計算し, 各ステップにおける排水重量から求めた. ここで, 排水量の経時変化を図 4-9, 水分特性曲線を図 4-10にそれぞれ示す. 今回用いた試験装置では回転数1,100rpmが最大であり, 飽和度に換算すると約75%程度の値まで測定できた.

表 4-2 pF 試験結果

Step	回転数 n	経過時間 (min)	マトリックポテンシャル		排水量(積算) (g)		体積含水率	
			(kPa)	(cm)	ΔA	ΔB	A	B
0	0	0	0.00	0.0	0.00	0.00	0.357	0.311
1	20	4485	-0.04	0.4	0.50	0.48	0.354	0.308
2	100	14325	-1.10	11.0	1.32	1.35	0.349	0.304
3	250	21585	-10.09	100.9	3.50	3.13	0.337	0.294
4	500	28725	-40.35	403.5	5.81	5.42	0.325	0.281
5	750	37665	-90.79	907.9	8.62	8.40	0.309	0.264
6	1000	49185	-161.40	1,614.0	12.48	12.00	0.288	0.245
7	1100	57165	-195.29	1,952.9	15.24	14.38	0.273	0.231

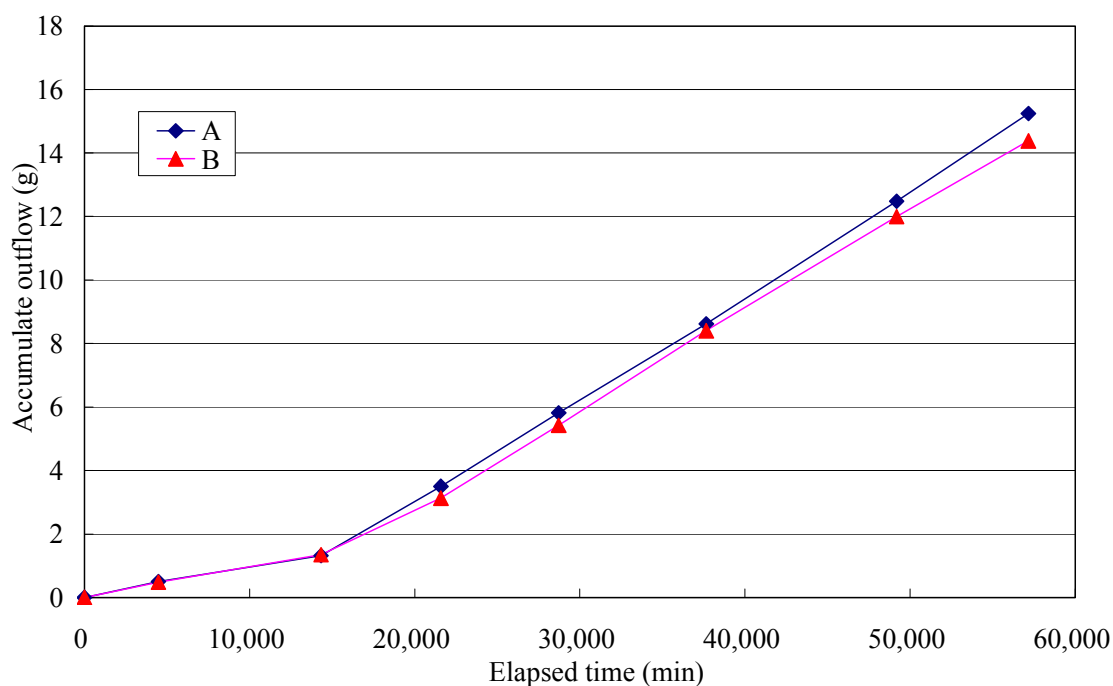


図 4-9 排水量(積算)の経時変化

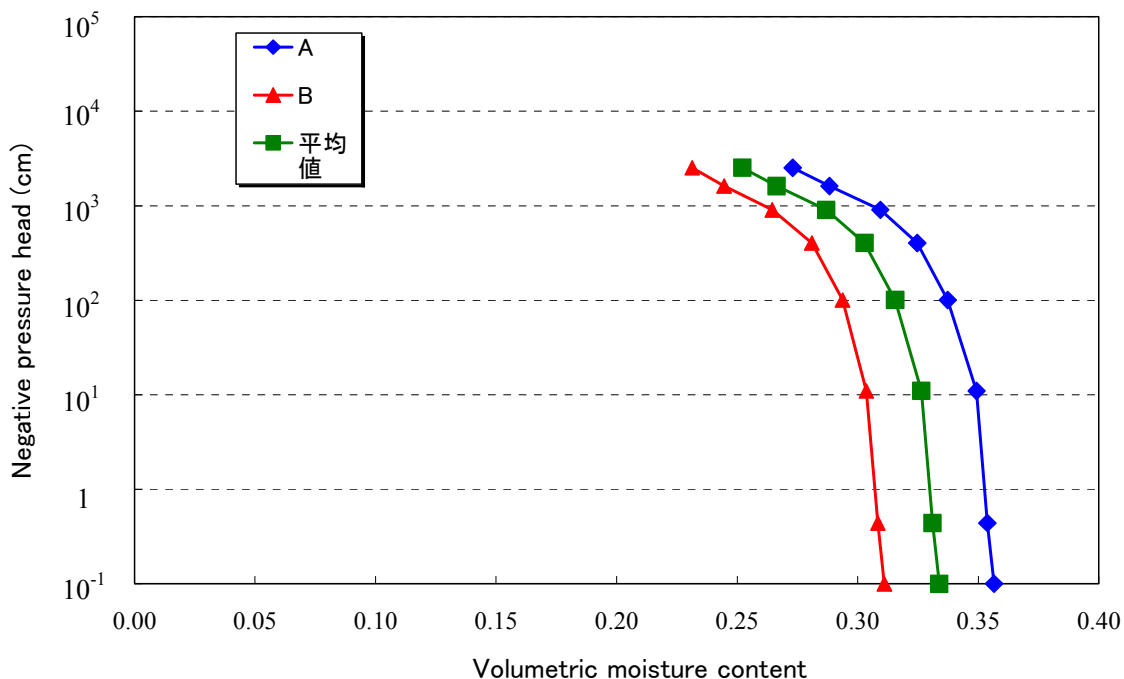


図 4-10 水分特性曲線

次に、図 4-10 の結果に対して、VG モデルを用いて試験結果の同定を行った。また、同定したパラメータを次式に適用し、不飽和透水係数を推定した。

$$k_r = \frac{k}{k_s} = S_e^{1/2} \left\{ 1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right\}^2$$

ここで、 S_e : 有効飽和度、 m : 形状パラメータ、 k_s : 飽和透水係数(m/sec)である。

なお、同定に用いたプログラムは VANG-SP⁹⁾であり、非線形最小二乗法により 3 つの未知パラメータ (α , n , θ_r) を求める手法である。ここで、表 4-3 に入力データ (既知パラメータ) を示す。

表 4-3 同定に用いた入力データ (既知パラメータ)

	A	B	平均
飽和体積含水率 θ_s	0.357	0.311	0.334

表 4-4 および図 4-11 に同定結果を示す。データが高含水比領域に偏っているため、最小体積含水率 θ_r は、いずれも 0 となった。

表 4-4 同定結果

入力データ		A	B	平均
最小体積含水率	θ_r	0.0	0.0	0.0
VG パラメータ	α	0.486	0.372	0.380
	n	1.01	1.13	1.11

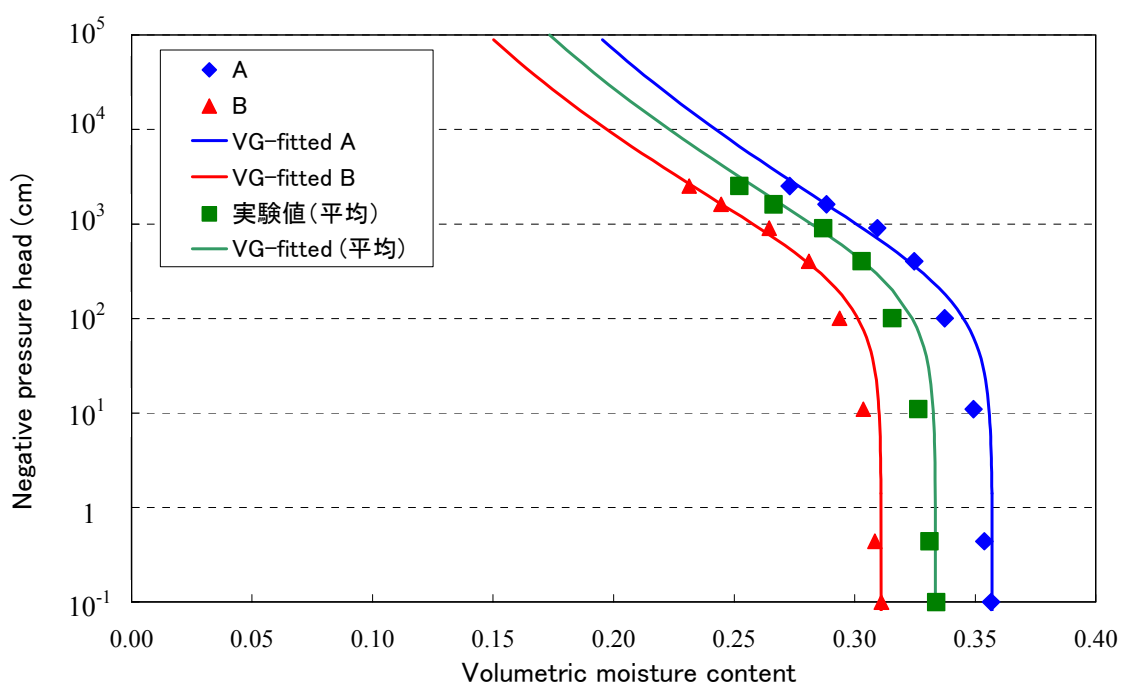


図 4-11 同定結果

(3)モルタル・緩衝材複合供試体を用いた浸潤試験に設定パラメータの妥当性の検証

緩衝材およびモルタルの不飽和透水特性に関するパラメータの妥当性を検証するために、モルタル・緩衝材複合供試体を用いた浸潤試験を対象に、設定したパラメータを用いて数値解析を実施した。緩衝材中の水分分布について、実測値と計算値の比較を図 4-12 に示す。ここでは、計算値と実測値は良好な一致を示しており、設定したパラメータが妥当なものであるとすることができる。

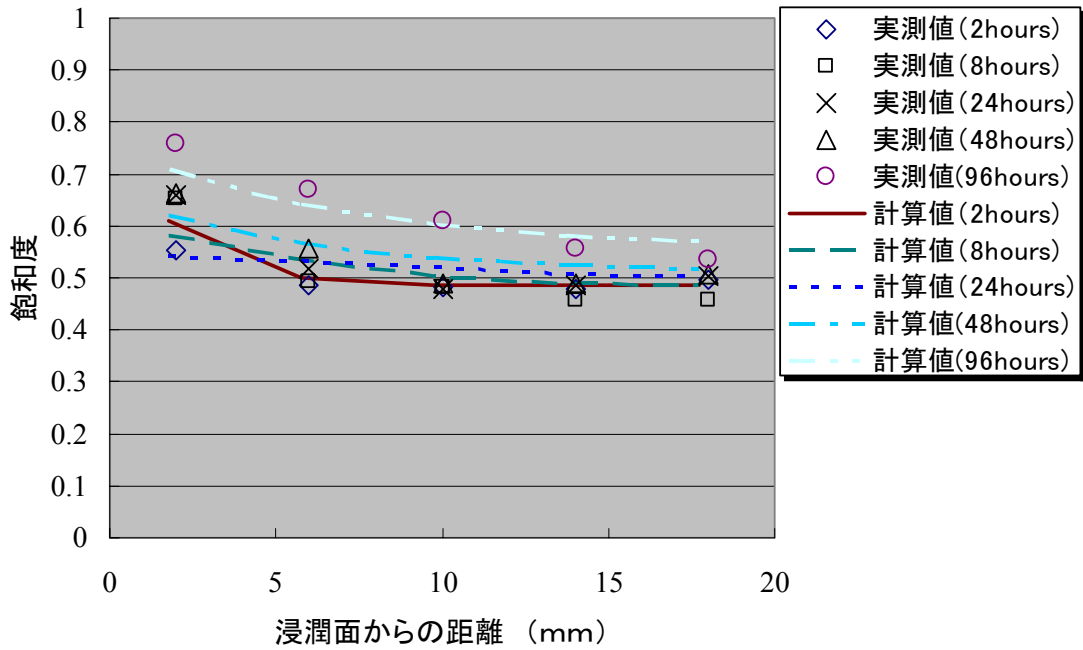


図 4-12 実測値と計算値の比較（緩衝材+モルタル供試体）

4.2 温度勾配水分拡散モデル

4.2.1 Philip & de Vries モデル

緩衝材中の温度勾配に起因する水分移動は、水蒸気が温度勾配により移動するものとしてモデル化した。Philip & de Vries によると、水蒸気の温度勾配による水分拡散係数 D_{Tv} は式により表される。

$$D_{Tv} = a \tau D_{va} \nu h_r \frac{d\rho^*}{dT}$$

ここで a は気相率 [-], τ は土中のガス拡散に対する屈曲率 [-], D_{va} は空気中の水蒸気拡散率 [m^2/s] である。 ν [-] はマスフローファクターであり、次式で定義される。

$$\nu = \frac{P}{P - p_G}$$

ここで、 P は全圧であり p_G は水蒸気分圧である。 h_r は相対湿度 [-] であり、 $h_r = \exp\left(\frac{P_l}{\rho_l R_v T}\right)$

ここで、 P_l はサクション [mH_2O], R_v は水蒸気の気体定数である。 T は温度であり、 ρ^* は次式で与えられる。

$$\rho^* = \frac{\rho_v}{\rho_l}$$

ここで ρ_v ある温度における水蒸気の密度であり、 ρ_l は同温度における水の密度である。

本研究においては $\tau=0.66$ を $D_{va}=4.5 \times 10^{-5}(\text{m}^2 \cdot \text{S}^{-1})$ を用いた。図 4-13 に連成試験で用いた緩衝材にこのモデルを適用し、算出された飽和度と温度勾配水分拡散係数の関係を示す。

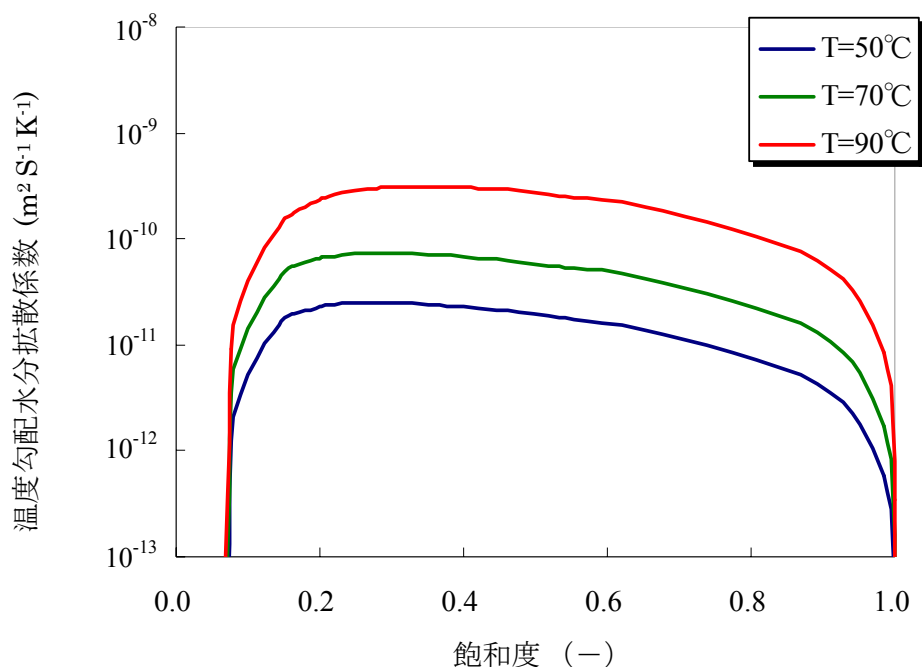


図 4-13 飽和度－温度勾配水分拡散係数関係

4.2.2 既往の挙動試験結果を用いたモデルの信頼性確認

設定した温度勾配水分拡散係数の妥当性を評価するために、既往の温度勾存在下の水分移動試験¹⁰⁾について、数値解析を実施し計算値と実測値の比較を行った。試験の供試体はφ50mm×高さ50mmの円柱形状であり、緩衝材は連成試験で用いたもの同一のベントナイト/ケイ砂混合土を用いている。ここでの初期含水比は9.2%とした。水理的境界は閉境界として水分の出入りは無いものとし、温度境界としては、一端を60℃に、反対側の端面を30℃に固定し、一定の温度勾配下で試験を実施している。図4-14に試験条件の概要を示す。図4-15に試験開始から96時間後の含水比の分布について、計算値と実測値の比較を示す。なお、ここでは緩衝材の不飽和透水特性値に関しては、前述の浸潤試験より求めた値を用いた。結果においては、計算値と実測値との間に良好な位置がみられ、この試験条件においては、緩衝材に対して設定した温度勾配水分拡散係数の適用性を示すものであると考える。

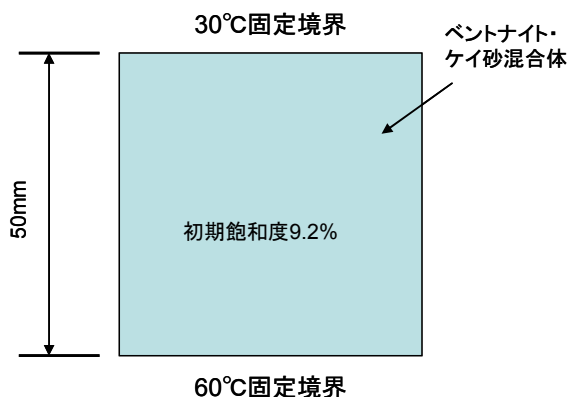


図 4-14 試験条件概要

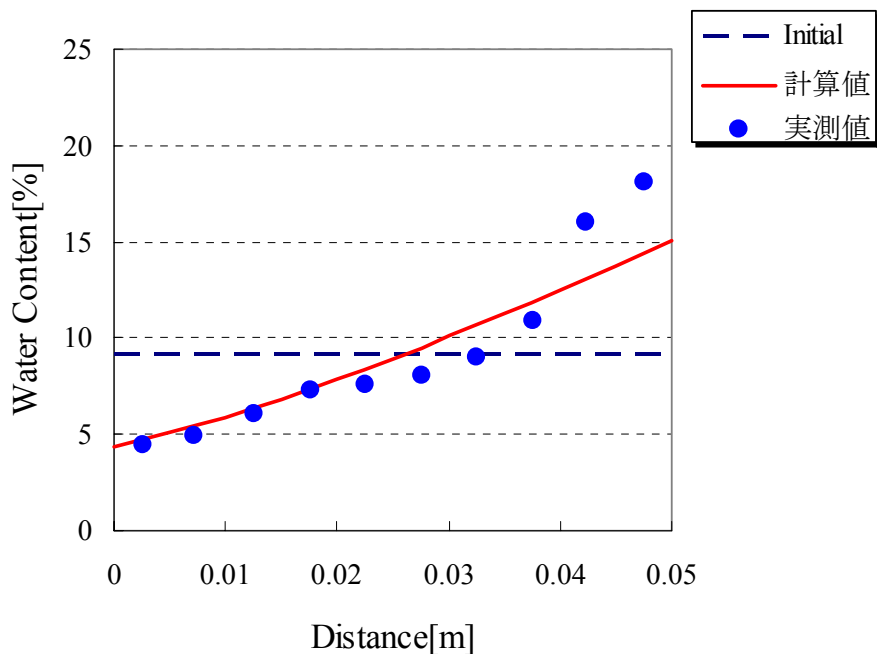


図 4-15 計算値と実測値の比較 (96 時間後)

4.3 COUPLE 連成試験を対象とした熱 - 水連成解析

ここでは、4.1 および4.2 において設定したモデルパラメータを用いて、連成試験を対象とした数値解析を実施し、試験により取得したデータと比較することで、熱 - 水連成解析モデルの信頼性確認を行った。解析には有限要素法を用いた熱 - 水 - 応力連成解析コード THAMES-3D⁴⁾を使用した。このコードにおいては、気相の水蒸気と液状水の局所平衡を仮定し、流体の流れは単層流としてモデル化されている。

4.3.1 解析パラメータおよび解析メッシュ

解析に用いた物性値を表 4-5 に示す。モルタルの各種物性値については室内試験により取得し

た. また, 緩衝材の熱物性値については以下の関数で表される³⁾.

$$\lambda = 4.44 \times 10^{-1} + 1.38 \times 10^{-2} \omega + 6.14 \times 10^{-3} \omega^2 - 1.69 \times 10^{-4} \omega^3$$

$$c = (34.1 + 4.18\omega) / (100 + \omega)$$

λ : 熱伝導率 [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

c : 比熱容量 [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

ω : 含水率 [%]

図 4-16 に解析に用いた有限要素メッシュを示す. 境界条件の対称性から平面的には領域の 1/4 でモデル化した. 高さ方向に関しては, 境界条件に対象性が無いので, 試験体の高さ 1.0m 全域でモデル化した. このメッシュは, 15,158 の節点と 13,104 の要素で構成される.

表 4-5 連成解析に使用した各材料の物性値

	緩衝材	模擬岩体
乾燥密度 [$\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$]	1.60	1.23
空隙率 [-]	0.403	0.311
熱伝導率 [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	含水比の関数	0.791
比熱容量 [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	含水比の関数	0.578
固有透過度 [m^2]	4.0×10^{-20}	4.5×10^{-18}

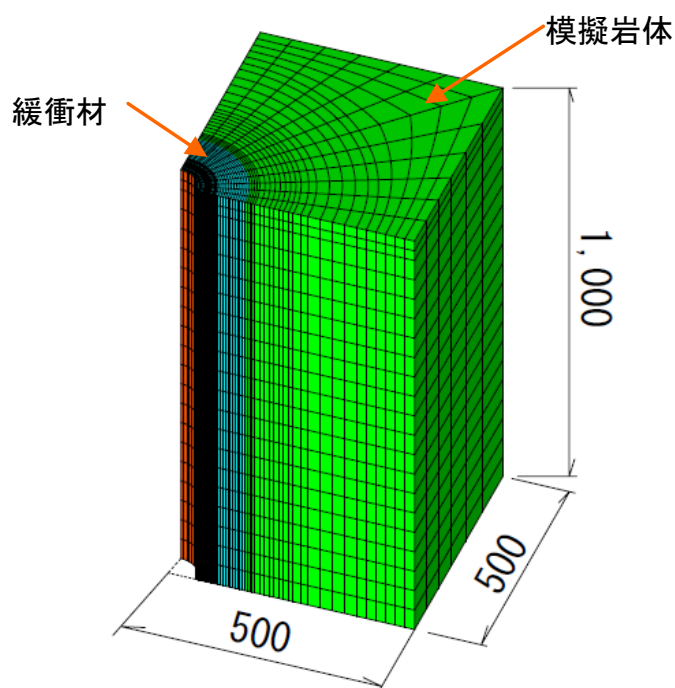


図 4-16 有限要素メッシュ

4.3.2 初期条件および境界条件

(1) 熱移動に関する条件

温度の初期条件は、試験体全域において 25°C 一定とした。試験において中心ヒータの表面温度は鉛直方向に対して一様とはならなかったことから、解析においては、該当する節点に実測で得られた値を設定した。測定位置に該当せず実測値が無い節点に関しては、近傍の実測値を用いて線形補完した。また、中心ヒータの温度低下を実施した期間においても同様に温度の実測値を用いた。試験体の上面に該当する節点は 70°C の温度固定境界とした。試験体側面の温度については、試験体側面底部で約 63°C という低い温度を観測したため、この位置に該当する節点温度は実測値に固定し、それ以外は 70°C の値にて温度固定境界とした。試験体の底面および断面に該当する節点は断熱境界とした。

(2) 水理学的条件

水理学的初期条件としては、模擬岩体上面に相当する節点の水頭を 0.11m で固定した。

4.3.3 解析結果と実測値との比較

(1) 温度分布

図 4-17 に数値解析により得られた 350 日後の温度のコンター図を示す。図 4-18 から図 4-20 に中心ヒータ設定温度を 85°C, 80°C, 75°C にした後にほぼ定常状態に達した後の温度のコンター図を示す。

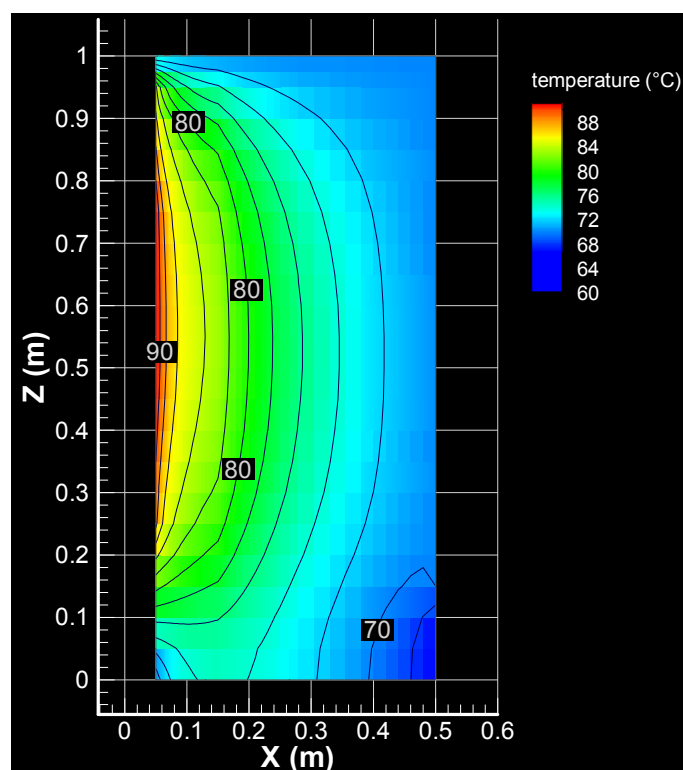


図 4-17 温度分布コンター図 (350 日後, 中心ヒータ設定温度 90°C)

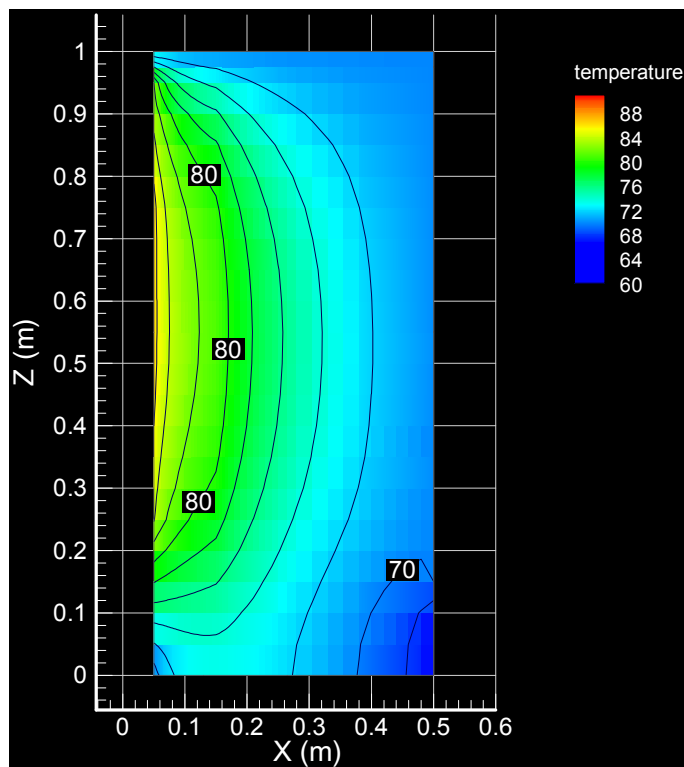


図 4-18 温度分布コンター図 (ヒータ設定温度 85°C)

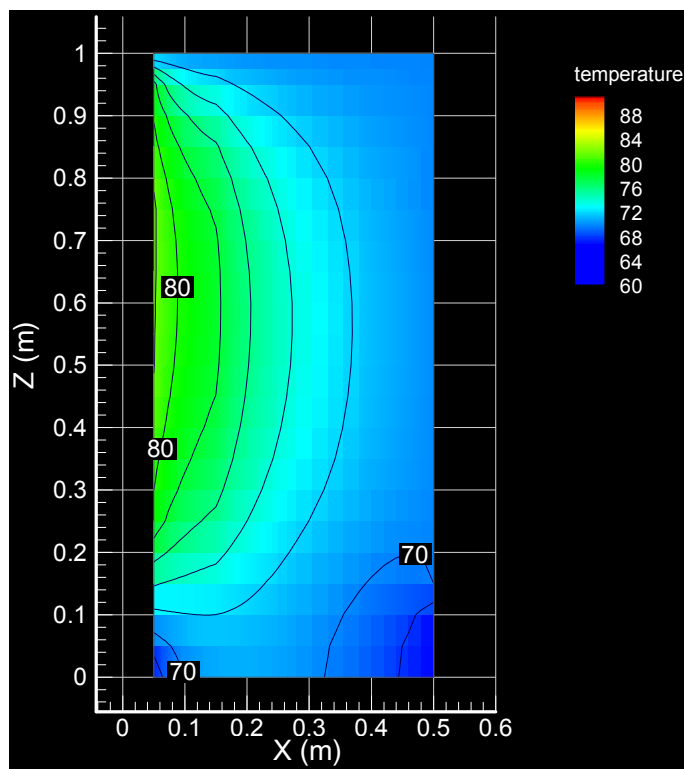


図 4-19 温度分布コンター図 (ヒータ設定温度 80°C)

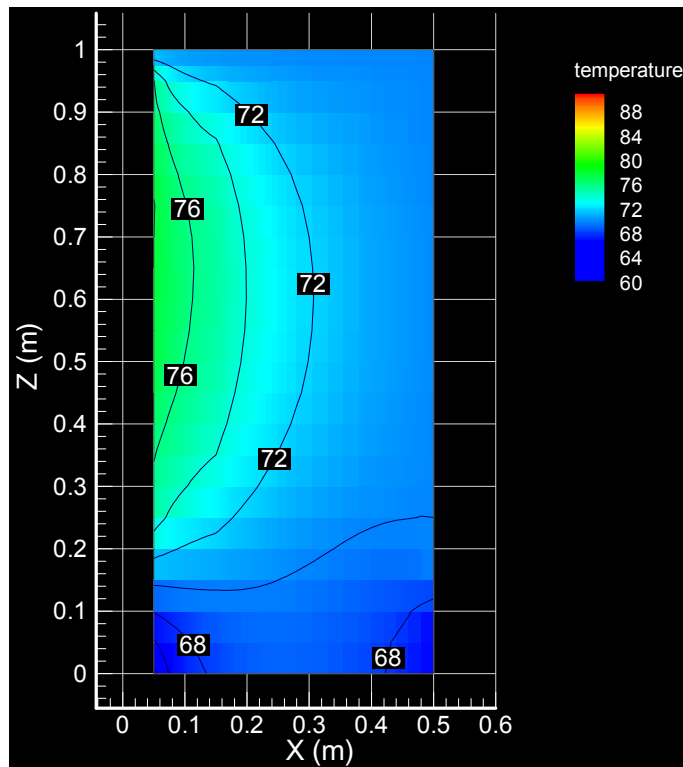


図 4-20 温度分布コンター図 (ヒータ設定温度 75°C)

次に、各コンター図中の試験体上部から 520mm 下の位置の温度分布について計算値と実測値の比較を図 4-21 に示す。ここでは、緩衝材中の温度分布計算値は、中心ヒータ温度の低下にも追従しており、実際の挙動をよく表現しているといえる。

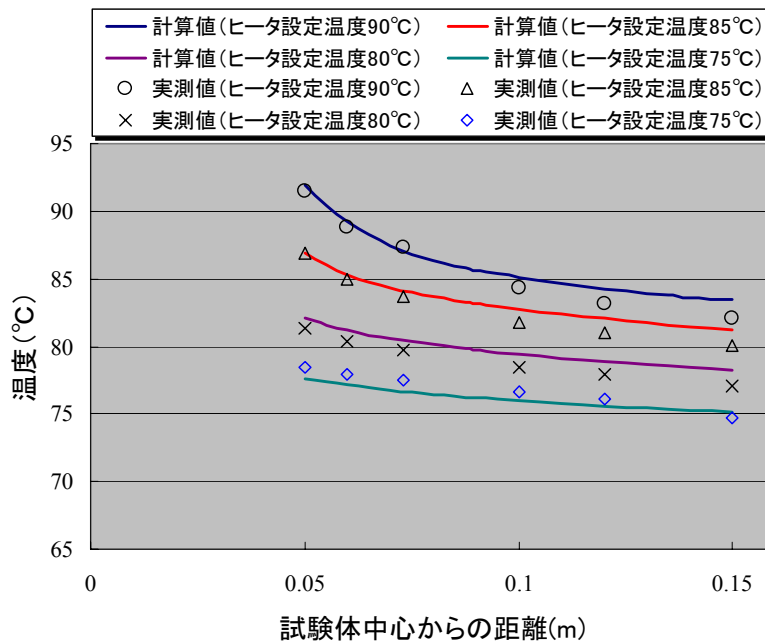


図 4-21 緩衝材中の温度分布の計算値と実測値の比較

(2) 水分分布

図 4-22～図 4-25 に水飽和度のコンター図を示す。これらから、緩衝材中の水飽和度がヒータ近傍では初期値（約 0.5）より低下し、時間の経過とともに、再度飽和度が上昇する挙動が表現されていることが分かる。一方、先に示した温度分布のコンター図によると、試験体上下端に近づくほど、鉛直方向の温度勾配が生じていることが分かる。緩衝材中の温度について計算値が実測値を精度よく推定しているという事実から、実際の試験においても計算結果と同様に、緩衝材中には鉛直方向の温度勾配が生起しているものと考えられる。水分分布の実測値はサイクロメータにより取得したものであるが、今回用いたサイクロメータはその測定機構上、鉛直方向の温度勾配が存在する場合には精度が大きく低下するとされる。このため、ここでは鉛直方向の温度勾配が比較的小さくなっている、試験体の上面から 540mm 下の高さに設置されたサイクロメータにより取得された実測値を評価の対象とした。図 4-26 に用いた値を取得したセンサーの設置位置を、図 4-27 に計算値と実測値の比較を示す。ヒータ壁面から 45mm の位置では、中心ヒータ温度を低下させる以前のデータが取得されており、モデルを使った計算では、この位置の水飽和度の経時変化を概ね捉えている。このことは、温度勾配および動水勾配を駆動力とする水分フラックスそれぞれの合計が実挙動の水分フラックスと概ね一致することを示していると考えられる。さらに、中心ヒータ温度を低下させた後の水飽和度の経時変化についても、モデルによる計算値は実際の挙動を概ね表現している。この事は温度勾配を駆動力とする水分移動モデルの妥当性を示唆しており、さらには動水勾配を駆動力とする緩衝材の飽和／不飽和水理特性のモデル化の妥当性をも示唆するものと考えられる。

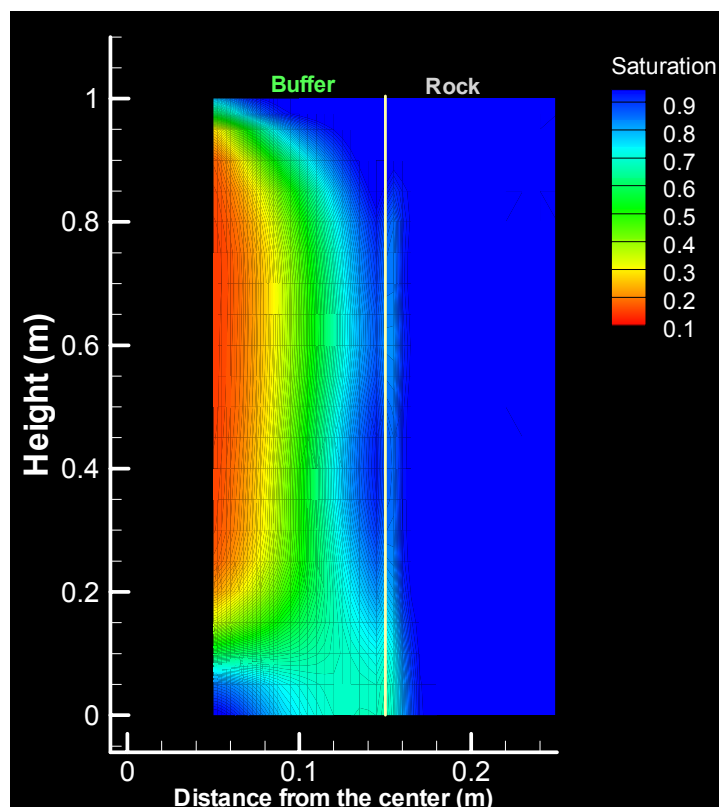


図 4-22 水飽和度分布コンター図 (28 日後)

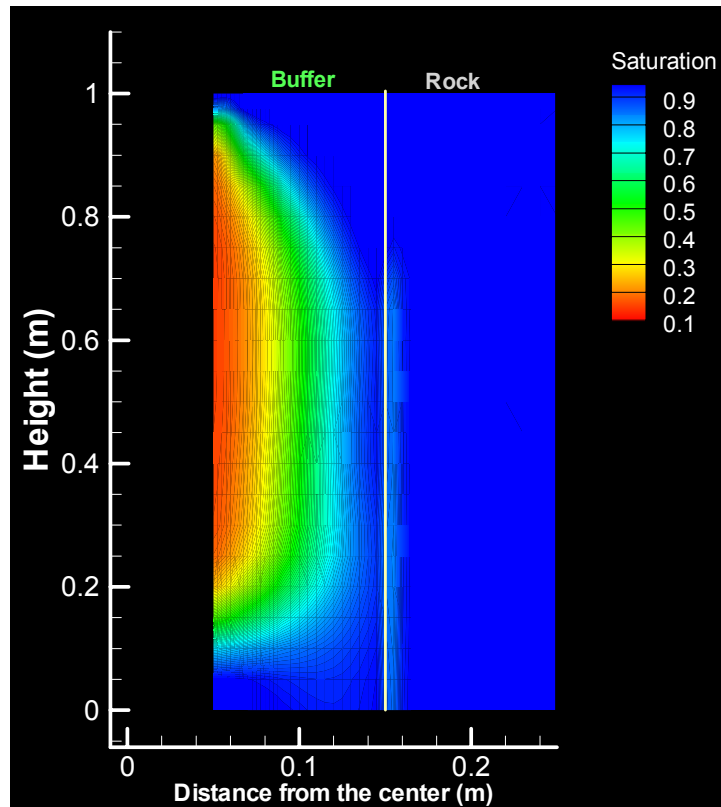


図 4-23 水飽和度分布コンター図 (84 日後)

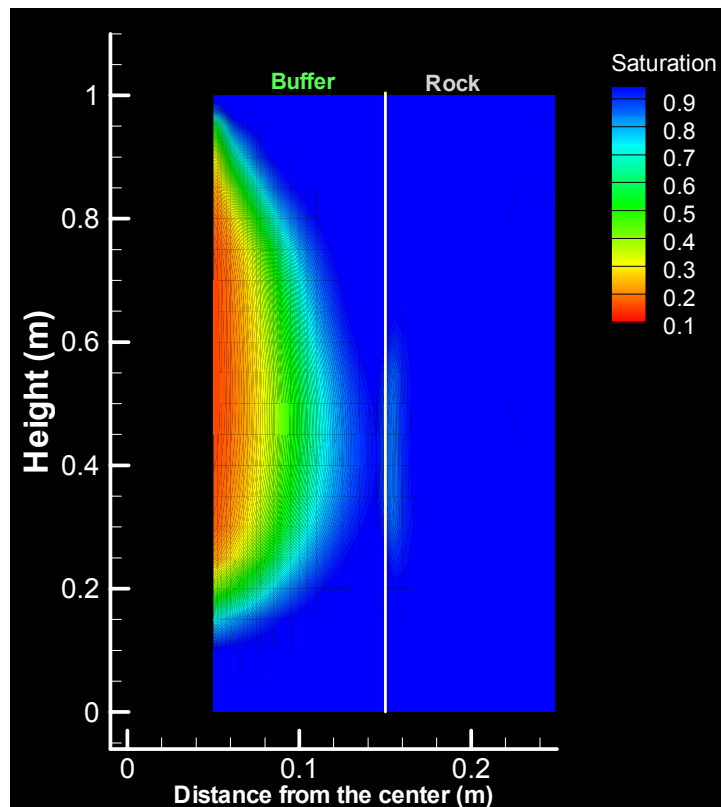
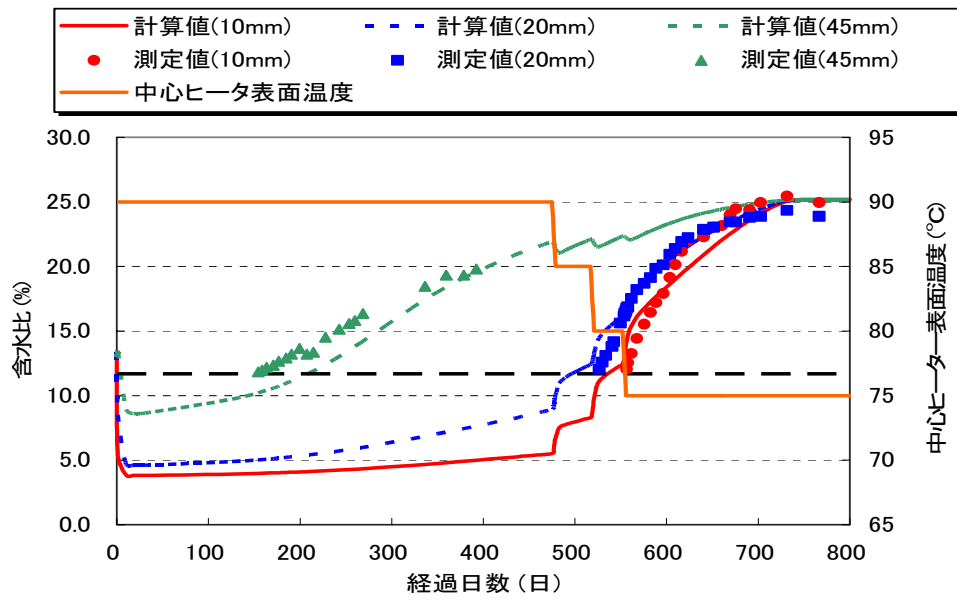


図 4-24 水飽和度分布コンター図 (168 日後)



図中の-----は、サイクロメータによる測定の下限值を示す。

図 4-27 計算値と実測値の比較 (緩衝材中の水飽和度の経時変化)

5. まとめ

室内において工学的規模の熱 - 水 - 応力連成試験設備を用いて、試験期間 830 日の連成試験を実施し、試験結果に基づき熱 - 水連成モデルの信頼性確認を行った。ここで得られた知見や課題を以下に記す。

- データの取得に関して、温度および水分量のデータを取得することができた。しかし、有意な水分量のデータは一部のサイクロメータでしか取得することができず、そのデータも水飽和度で約 0.5 (含水比 11.7%) より大きい値に限られるものであった。このことから、高い耐久性を有し、さらには低水飽和度域においても水分量を測定可能な水分センサーの開発が必要と考える。また、緩衝材の膨潤応力測定については、今回有意なデータを取得することができなかった。今後は、試験環境 (最高温度 90°C, 最高水飽和度 1.0) に対する耐久性の向上が必要である。
- 試験開始後約 500 日後から中心ヒータの温度を下降させた。この後、緩衝材中への水の浸潤が促進される挙動が観測され、温度勾配が緩衝材の再冠水挙動に大きく影響を与えることが実現現象を通して確認された。
- 個別の現象 (温度勾配による水分移動、緩衝材の不飽和浸透) に関するモデルを再検討した。それらのモデルを取り入れた熱 - 水連成モデルを用いて、試験の境界条件下で試験体中の温度および水分量の変遷を計算した。その結果、数値解は試験で観測された温度および緩衝材中の水分量の変化の挙動と良く一致した。このことは、今回用いた熱 - 水連成モデルを処分場の廃棄体周辺環境を想定した条件において適用することの信頼性の高さを示唆するものとする。

参考文献

- 1) 鈴木英明, 伊藤彰, 吉田泰, 陶山忠宏, 川上進, 笹本宏, 油井三和: “熱 - 水 - 応力連成試験設備 (COUPLE) における熱 - 水 - 応力 - 化学連成試験 (I)”, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-033 (2003)
- 2) 千々松正和, 杉田裕, 藤田朝雄, 雨宮清: “釜石原位置試験上における粘土充填・熱負荷試験結果”, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-024 (1999)
- 3) サイクル機構: “わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 — 地層処分研究開発第2次取りまとめ— 分冊2 地層処分の工学技術”, JNC TN1400 99-022 (1999)
- 4) Y. Ohnishi, H. Shibata and A. Kobayashi: “Development of finite element code for the analysis of coupled thermo-hydro-mechanical behaviors of a saturated-unsaturated medium”, *Proc. of Int. Symp. on Coupled Process Affecting the Performance of a Nuclear Waste Repository* (1985)
- 5) J.R. Philip and D.A. de Vries: “Moisture movement in porous material under temperature gradients”, *EOS Trans* 38, pp.222-232 (1990)
- 6) M. van Genuchten: “A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils”, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 44, pp.892-898 (1980)
- 7) 今井久, 雨宮清, 西田薫, 林為人, 雷興林: “不飽和領域の原位置測定手法および解析モデルの研究”, 動燃技術資料, PNC TJ1449 97-002(I) (1997)
- 8) 地盤工学会: “土質試験の方法と解説 (第一回改訂版)”, p.123 (2000)
- 9) 西垣誠・竹下祐二: “室内及び原位置における不飽和浸透特性の試験及び調査法に関する研究”, 岡山大学工学部土木工学科 (1993)
- 10) L. Börgesson and J. Hernelind: “DECOVALEX TEST CASE 3 –Calculation of the BIG BEN experiment-, Coupled modeling of the thermal, mechanical and hydraulic behavior of water-unsaturated buffer material in a simulated deposition hole”, SKB ARBETSRAPPORT (1994)

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	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	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
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	毎メートル	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の) 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1

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	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	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	ラジアン ^(a)	rad		m ² ・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ² ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
(放射性核種の) 放射能	ベクレル	Bq	1m/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
吸収線量, 質量エネルギー	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときにいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 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“1”は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg ⁻¹ ・s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg ⁻¹ ・s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ² ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ² ・A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ⁻¹ ・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 ⁻¹ ・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 ⁻¹ ・s ² ・A
吸収線量	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 ⁻¹ ・s ⁻³ =m ² ・kg ⁻¹ ・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 ² ・m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ =kg ⁻¹ ・s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

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=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	''	1''=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	l, L	1l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で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 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1海里=1852m
ノット		1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バイン	b	1b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St =1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G ≙10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe ≙(1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≙10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb =1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal =1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位系に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位		1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ =1μm=10 ⁻⁶ m

