JAEA-Research 2008-029



亀裂を有する堆積岩の水理・物質移行評価のための データ取得・解析 (委託研究)

Study on Flow and Mass Transport through Fractured Sedimentary Rocks (Contract Research)

下茂 道人* 熊本 創* 唐崎 健二* 澤田 淳 前川 恵輔 佐藤 久

Michito SHIMO*, Sou KUMAMOTO*, Kenzi KARASAKI* Atsushi SAWADA, Keisuke MAEKAWA and Hisashi SATO

> 地層処分研究開発部門 システム性能研究グループ

Performance Assessment 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(<u>http://www.jaea.go.jp/index.shtml</u>) 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

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

亀裂を有する堆積岩の水理・物質移行評価のためのデータ取得・解析 (委託研究)

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 下茂 道人*, 熊本 創*, 唐崎 健二**, 澤田 淳, 前川 恵輔⁺, 佐藤 久*

(2008年1月22日受理)

高レベル放射性廃棄物の地層処分サイトの性能評価にあたっては、天然バリアを構成する岩盤中に おける水理・物質移行特性を適切に評価することが重要である.

従来の研究では、堆積岩における物質移行現象に関しては、粒子間間隙を主な移行経路として考えてきた.しかし、亀裂が発達した堆積岩においては、亀裂が粒子間間隙よりも卓越した水みちを形成する可能性がある.

本研究では、亀裂が発達した堆積岩中の物質移行現象を把握することを目的に、亀裂を有する堆積 岩の水理・物質移行データを室内試験を実施して拡充するとともに、それらのデータに基づいた亀裂 を有する堆積岩中の物質移行の評価手法の検討として、亀裂内の地下水流速の違いが堆積岩の物質移 行現象に与える影響について数値解析的な検討を行った.また、堆積岩が分布する広域的なスケール での地下水流動場を評価する手法開発の一環として、幌延地域の地下深部において確認されている高 い間隙水圧について、その形成要因を把握することを目的とした数値解析的検討を行った.

室内試験では、原子力機構が北海道幌延町において実施している幌延深地層研究計画に伴う立抗の 掘削でGL-30.6m地点において取得された岩塊試料(声問層)を整形し、人工の平行平板亀裂を有す る試料を作成して、これを対象とした透水試験ならびに非収着性トレーサー試験を実施した.試験に より得られた実効拡散係数は既往の声問層を対象とした試験結果の平均的な値であり、分散長も移行 距離の1/10倍という従来から指摘されている関係と同様の傾向が示された.

堆積岩の物質移行現象に与える影響について数値解析的な検討では、単一亀裂モデルを用いて、動 水勾配の異なる数ケースについて物質移行解析を実施し、マトリクス部への拡散が顕著となるような 岩盤では亀裂内流速の変化が亀裂内でのトレーサーの滞留時間に影響を与え、その結果マトリクス部 への拡散現象による移行量に顕著に影響を与えることがわかった.

幌延地域を対象とした地下水流動の数値解析的検討の結果,幌延地域の地下深部において確認されている高い間隙水圧については,透水係数などを平均的に表現した広域的なモデルでは再現できずに局所的な要因によるものと推察された。また,解析の結果から広域的なモデルでの岩盤への涵養量として16mm/年程度の値が示された.

本報告書は、大成建設株式会社が日本原子力研究開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

核燃料サイクル工学研究所(駐在):〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

+地層処分研究開発部門 幌延深地層研究ユニット

*大成建設株式会社 技術センター土木技術研究所

* * Lawrence Berkeley National Laboratory

※技術開発協力員

JAEA-Research 2008-029

Study on Flow and Mass Transport through Fractured Sedimentary Rocks (Contract Research)

Michito SHIMO*, Sou KUMAMOTO*, Kenzi KARASAKI**, Atsushi SAWADA Keisuke MAEKAWA⁺ and Hisashi SATO^{**}

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

(Received January 22, 2008)

It is important for safety assessment of HLW geological disposal to evaluate groundwater flow and mass transport in deep underground appropriately. Though it is considered that the mass transport in sedimentary rock occurs in pores between grains mainly, fractures of sedimentary rock can be main paths. The objective of this study is to obtain the data of flow and mass transport properties in fractured sedimentary rocks by laboratory tests, and to estimate these properties in larger scale rocks, such as in situ test scale with considering both data obtained by this study and one from in situ experiments such as packer tests. In this study the following three tasks were carried out: (1) laboratory hydraulic and tracer experiments using the rock specimens of Koetoi formation obtained at underground research facility under construction in the Horonobe area, (2) a numerical examination on the influence of dual porosity, fracture and permeable matrix on to the representative groundwater velocity and/or mass transport properties in the fractured sedimentary rocks, (3) a numerical study on the contributing factors to groundwater flow such as effect of low permeability layers. Non-sorbing tracer experiments using artificial fractured rock specimens were carried out. Potassium iodide was used as a tracer. The obtained breakthrough curve was interpreted and fitted by using a numerical simulator called FRAC3DVS (Therrien et al., 1996), and mass transport parameters, such as longitudinal dispersivity, matrix diffusion coefficient, transport aperture, were obtained. Several cases mass transport simulations using single fracture model that the groundwater flow velocity in the fractures is different were performed to study on the influence that a difference of the groundwater flow velocity in the fractures gives a mass transport in the fractured sedimentary rocks. Groundwater flow simulations using a numerical simulator for inverse problems called iTOUGH2 and using a numerical simulator coupled Thermo - Hydro - Mechanical processes called TOUGH-FLAC performed to study the effect of the low permeability layers on groundwater pressure distribution.

Keywords: Geological Disposal, Mass Transport, Fractured Soft Sedimentary Rocks, Fracture Network Model Continuum Model

This work was performed by Taisei Corporation under contract with Japan Atomic Energy Agency.

⁺ Horonobe Underground Research Unit, Geological Isolation Research and Development Directorate

^{*}Civil Engineering Research Institute, Technology Center, Taisei Corporation

^{**}Lawrence Berkeley National Laboratory

^{*}Collaborating Engineer

目次

1. はじめに
2. 研究概要
2.1 研究の目的
2.2 研究の内容
3. 岩石試料を対象とした水理・物質移行特性データの取得
3.1 試料の採取, 整形
3.2 試料の分析
3.2.1 分析項目
3.2.2 基本物性試験
3.2.3 一軸圧縮試驗
3.2.4 X線分析
3.2.5 空隙径分布測定
3.3 透水試験
3.3.1 インタクト試料を対象とした透水試験(トランジェントパルス透水試験)17
3.3.2 亀裂試料を対象とした透水試験(定水頭透水試験)
3.4 物質移行試験
3.4.1 拡散試験
3.4.2 トレーサー試験
4. 亀裂を考慮した堆積岩の水理・物質移行挙動の検討40
4.1 解析モデルおよび解析条件
4.1 解析モデルおよび解析条件 ····································
 4.1 解析モデルおよび解析条件
 4.1 解析モデルおよび解析条件
 4.1 解析モデルおよび解析条件 40 4.2 パラメータの設定および解析ケース 41 4.2.1 亀裂パラメータの設定 41 4.2.2 マトリクスパラメータの設定 41 4.3 解析結果 44
 4.1 解析モデルおよび解析条件 40 4.2 パラメータの設定および解析ケース 41 4.2.1 亀裂パラメータの設定 41 4.2.2 マトリクスパラメータの設定 41 4.3 解析結果 44 5. 堆積岩地域に見られる地下深部の諸特性を考慮した地下水流動モデルによる逆解析 46
 4.1 解析モデルおよび解析条件 40 4.2 パラメータの設定および解析ケース 41 4.2.1 亀裂パラメータの設定 41 4.2.2 マトリクスパラメータの設定 41 4.3 解析結果 44 5. 堆積岩地域に見られる地下深部の諸特性を考慮した地下水流動モデルによる逆解析 44 5.1 幌延地域の間隙水圧分布に関する解析 46
 4.1 解析モデルおよび解析条件 40 4.2 パラメータの設定および解析ケース 41 4.2.1 亀裂パラメータの設定 41 4.2.2 マトリクスパラメータの設定 41 4.3 解析結果 44 5. 堆積岩地域に見られる地下深部の諸特性を考慮した地下水流動モデルによる逆解析 46 5.1 幌延地域の間隙水圧分布に関する解析 46 5.1.1 目的 46
4.1 解析モデルおよび解析条件 40 4.2 パラメータの設定および解析ケース 41 4.2.1 亀裂パラメータの設定 41 4.2.2 マトリクスパラメータの設定 41 4.3 解析結果 44 5. 堆積岩地域に見られる地下深部の諸特性を考慮した地下水流動モデルによる逆解析 46 5.1 幌延地域の間隙水圧分布に関する解析 46 5.1.2 解析手法 46
 4.1 解析モデルおよび解析条件 40 4.2 パラメータの設定および解析ケース 41 4.2.1 亀裂パラメータの設定 41 4.2.2 マトリクスパラメータの設定 41 4.3 解析結果 44 5. 堆積岩地域に見られる地下深部の諸特性を考慮した地下水流動モデルによる逆解析 46 5.1 幌延地域の間隙水圧分布に関する解析 46 5.1.1 目的 46 5.1.2 解析手法 46 5.1.3 解析モデル 46
4.1 解析モデルおよび解析条件 40 4.2 パラメータの設定および解析ケース 41 4.2.1 亀裂パラメータの設定 41 4.2.2 マトリクスパラメータの設定 41 4.3 解析結果 44 5. 堆積岩地域に見られる地下深部の諸特性を考慮した地下水流動モデルによる逆解析 46 5.1 幌延地域の間隙水圧分布に関する解析 46 5.1.2 解析手法 46 5.1.3 解析モデル 46 5.1.4 涵養量に関する考察 49
4.1 解析モデルおよび解析条件 40 4.2 パラメータの設定および解析ケース 41 4.2.1 亀裂パラメータの設定 41 4.2.2 マトリクスパラメータの設定 41 4.3 解析結果 44 5. 堆積岩地域に見られる地下深部の諸特性を考慮した地下水流動モデルによる逆解析 46 5.1 幌延地域の間隙水圧分布に関する解析 46 5.1.2 解析手法 46 5.1.3 解析モデル 46 5.1.4 涵養量に関する考察 46 5.1.5 解析結果 57
4.1 解析モデルおよび解析条件 40 4.2 パラメータの設定および解析ケース 41 4.2.1 亀裂パラメータの設定 41 4.2.2 マトリクスパラメータの設定 41 4.3 解析結果 44 5. 堆積岩地域に見られる地下深部の諸特性を考慮した地下水流動モデルによる逆解析 46 5.1 幌延地域の間隙水圧分布に関する解析 46 5.1.1 目的 46 5.1.2 解析手法 46 5.1.3 解析モデル 46 5.1.4 涵養量に関する考察 49 5.1.5 解析結果 57 5.1.6 非等方性の検討 65
4.1 解析モデルおよび解析条件 40 4.2 パラメータの設定および解析ケース 41 4.2.1 亀裂パラメータの設定 41 4.2.2 マトリクスパラメータの設定 41 4.3 解析結果 44 5. 堆積岩地域に見られる地下深部の諸特性を考慮した地下水流動モデルによる逆解析 46 5.1 幌延地域の間隙水圧分布に関する解析 46 5.1.2 解析手法 46 5.1.3 解析モデル 46 5.1.4 涵養量に関する考察 46 5.1.5 解析結果 57 5.1.6 非等方性の検討 65 5.1.7 まとめと今後の課題 65
4.1 解析モデルおよび解析条件 40 4.2 パラメータの設定および解析ケース 41 4.2 パラメータの設定 41 4.2.1 亀裂パラメータの設定 41 4.2.2 マトリクスパラメータの設定 41 4.3 解析結果 44 5. 堆積岩地域に見られる地下深部の諸特性を考慮した地下水流動モデルによる逆解析 46 5.1 幌延地域の間隙水圧分布に関する解析 46 5.1.1 目的 46 5.1.2 解析手法 46 5.1.3 解析モデル 46 5.1.4 涵養量に関する考察 42 5.1.5 解析結果 57 5.1.6 非等方性の検討 65 5.1.7 まとめと今後の課題 65 5.2 応力変形-水理連成解析 70
4.1 解析モデルおよび解析条件 40 4.2 パラメータの設定および解析ケース 41 4.2 パラメータの設定 41 4.2.1 亀裂パラメータの設定 41 4.2.2 マトリクスパラメータの設定 41 4.3 解析結果 44 5. 堆積岩地域に見られる地下深部の諸特性を考慮した地下水流動モデルによる逆解析 46 5.1 幌延地域の間隙水圧分布に関する解析 46 5.1.1 目的 46 5.1.2 解析手法 46 5.1.3 解析モデル 46 5.1.4 涵養量に関する考察 45 5.1.5 解析結果 57 5.1.6 非等方性の検討 65 5.1.7 まとめと今後の課題 66 5.2 応力変形-水理連成解析 70 5.2.1 目的 70

	5.2.3 基礎方程式
	5.2.4 解析モデルの設定
	5.2.5 物性値の設定
	5.2.6 境界条件の設定
	5.2.7 連成パラメータの設定
	5.2.8 解析時間の設定
	5.2.9 解析手順
	5.2.10 解析結果
	5.2.11 まとめと今後の課題88
6.	まとめ
	6.1 岩石試料を対象とした水理・物質移行特性データの取得
	6.2 亀裂を考慮した堆積岩の水理・物質移行挙動の検討
	6.3 堆積岩地域に見られる地下深部の諸特性を考慮した地下水流動モデルによる逆解析90
7.	おわりに
参	考文献

Contents

1. Introduction ······1
2. Outline of research ····································
2.1 Research objective ······2
2.2 Research contents ······2
3. Obtain of flow and mass transport property in rock specimen ····································
3.1 Acquisition of specimen and formation
3.2 Analysis of specimen ······8
3.2.1 Analysis items ······8
3.2.2 Physical property experiments ······8
3.2.3 Uniaxial compression tests ······9
3.2.4 X-Ray Analysis ·····10
3.2.5 Measurement of pore-size distribution14
3.3 Permeability test ·····17
3.3.1 Permeability test for intact specimen(transient pulse permeability test)17
3.3.2 Permeability test for fracture specimen(constant head permeability test)26
3.4 Mass transport test ······29
3.4.1 Diffusion test ·····29
3.4.2 Tracer test ······34
4. Study on flow and mass transport property for sedimentary rock considered with fracture $\cdots 40$
4.1 Numerical model and analysis conditions
4.2 Parameter specification and analysis case41
4.2.1 Fracture parameter setting ······41
4.2.2 Matrix parameter setting ······41
4.3 Simulation results ······44
5. Inversion analysis with considering property of deep underground rock properties in
sedimentary rock area ······46
5.1 Analysis of pore pressure distribution in the Horonobe area
5.1.1 Objective46
5.1.2 Methodology ······46
5.1.3 Numerical model ······46
5.1.4 Study on groundwater recharge rate ······49
5.1.5 Simulation results ······57
5.1.6 Study on anisotropy of rock properties
5.1.7 Summary and future issues ······69
5.2 Stress-deformation- hydrology coupling analysis70
5.2.1 Objective

5.2.2 Analytical methodology ······70
5.2.3 Primitive equations ······72
5.2.4 Specification model ······74
5.2.5 Physical property setting ······76
5.2.6 Boundary condition setting ······76
5.2.7 Coupling parameter setting ······76
5.2.8 Simulation time setting ······77
5.2.9 Analysis procedure ·····79
5.2.10 Analysis results ······79
5.2.11 Summary and future issues ·····88
6. Summary
6.1 Obtain of flow and mass transport property in rock specimen
6.2 Study on flow and mass transport property for sedimentary rock considered with
fracture ·····90
6.3 Inversion analysis with considering property of deep underground rock properties in
sedimentary rock area ······90
7. Conclusion ······92
References ····································

図目次

义	3.2 - 1	X 線分析結果	13	
义	3.2-2	水銀圧入法による細孔径分布測定結果15		
义	3.2-3	細孔径分布測定結果(既存データとの比較)16		
义	3.3-1	トランジェントパルス透水試験装置概要18		
义	3.3-2	トランジェントパルス法測定原理19		
义	3.3-3	トランジェントパルス透水試験手順19		
义	3.3-4	岩盤内応力と深度の関係(HDB-1 孔, HDB-6 孔)	20	
义	3.3-5	Hsieh 法による解析手順の概念図	22	
义	3.3-6	トランジェントパルス透水試験結果24		
义	3.3-7	深度と透水係数の関係(既往データとの比較)	25	
义	3.3-8	定水頭透水試験装置概要	27	
义	3.3-9	供試体作成の模式図	27	
义	3.4-1	拡散実験装置概要	30	
义	3.4-2	拡散実験装置および供試体の概観	30	
义	3.4-3	拡散試験結果	33	
义	3.4-4	実行拡散係数と有効間隙率の関係(既存データとの比較)	33	
义	3.4-5	ブロック試料用セル型トレーサー試験装置概要	35	
义	3.4-6	トレーサー試験結果	38	
义	3.4-7	トレーサー試験の解析条件(ブロック試料:B-3)	38	
义	3.4-8	透水量係数と物質移行開口幅の関係(釜石原位置試験データとの比較)	39	
义	3.4-9	分散長と試験スケールの関係(既往データとの比較)	39	
义	4.2-1	解析モデルの概要	42	
义	4.2-2	フローポイントと水理試験区間の関係	43	
义	4.2-3	水理試験結果(稚内層)	43	
义	4.3-1	観測断面における濃度の経時変化	45	
义	4.3-2	観測断面における濃度の経時変化(時間軸を流量で正規化した結果)	45	
义	$5.1 \cdot 1$	3次元解析モデル	47	
义	5.1 - 2	解析モデルの地質材料分布とボーリング孔位置	47	
义	5.1 - 3	HDB 孔の平面的な位置関係	49	
义	5.1-4	新問寒別橋と天塩大橋間の流量差データ	51	
义	5.1 - 5	モデルの透水係数と温度分布の関係	51	
义	5.1-6	各涵養量ケースの HDB-1 沿いの水頭分布と観測データの比較	52	
义	5.1-7	年間涵養量を変えた場合の飽和度の分布の比較	54	
义	5.1-8	定水頭境界(上)と16mm/yrの定流量境界(下)の場合の水頭分布の比較	55	
义	5.1-9	地表面要素を大気圧に保ったダミー要素を繋げたケースの解析結果	56	

义	5.1 - 10	HDB-1 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較	. 57			
义	5.1-11	HDB-2 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較 57				
义	5.1-12	HDB-3 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較	. 58			
义	$5.1 \cdot 13$	HDB-4 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較	. 58			
义	5.1-14	HDB-5 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較	. 59			
义	5.1 - 15	HDB-6孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較	. 59			
义	5.1-16	HDB-7 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較	. 60			
义	5.1 - 17	HDB-8 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較	. 60			
义	5.1 - 18	涵養量が 16 mm/yr のケースの HDB 孔近傍の水頭分布	. 62			
义	5.1 - 19	涵養量が 16 mm/yr のケースの東西断面の拡大図	. 63			
义	5.1-20	HDB-1 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較	. 64			
义	5.1 - 21	HDB-2 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較	. 64			
义	5.1 - 22	HDB-3 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較	. 65			
义	5.1 - 23	HDB-4 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較	. 65			
义	5.1 - 24	HDB-5 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較	. 66			
义	5.1 - 25	HDB-6孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較	. 66			
义	5.1 - 26	HDB-7 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較	. 67			
义	5.1-27	HDB-8 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較	. 67			
义	5.2 - 1	応力と水理のカップリング	. 70			
义	5.2-2	TOUGH-FLAC3D 連成解析	. 71			
义	5.2 - 3	共存する FLAC3D と TOUGH2 のメッシュ	. 72			
义	5.2-4	応力と間隙率の関係に関する模式図	. 73			
义	5.2 - 5	連成解析における時間ステップとデータの流れ	. 73			
义	5.2-6	幌延全体モデルからの解析領域の切り出し概念図	. 75			
义	5.2-7	連成解析に用いた要素分割	. 75			
义	5.2-8	残留間隙率の違いによる応力と間隙率の関係	. 77			
义	5.2-9	Leverett と Rudqvist の間隙率と透水係数の連成式の比較	. 77			
义	5.2 - 10	HDB-1における塩分洗い出し解析による塩分濃度変化と実測値	. 78			
义	5.2-11	HDB-2 おける塩分洗い出し解析による塩分濃度変化と実測値	. 78			
义	5.2 - 12	地圧勾配 1.1 倍のケースにおける最終的な全水頭分布の東西断面	. 80			
义	5.2 - 13	地圧勾配 1.1 倍のケースにおける最終的な全水頭分布の南北断面	. 80			
义	5.2 - 14	地圧勾配 1.1 倍のケースにおける最終的な間隙率分布の東西断面	. 81			
义	5.2 - 15	地圧勾配 1.1 倍のケースにおける最終的な間隙率分布の南北断面	. 81			
义	5.2-16	地圧勾配 1.2 倍のケースにおける最終的な全水頭分布の東西断面	. 82			
义	5.2-17	地圧勾配 1.2 倍のケースにおける最終的な全水頭分布の南北断面	. 82			
义	5.2-18	地圧勾配 1.2 倍のケースにおける最終的な間隙率分布の東西断面	. 83			
义	5.2-19	地圧勾配 1.2 倍のケースにおける最終的な間隙率分布の南北断面	. 83			
义	5.2-20	HDB-1における全水頭解析結果と実測の比較	. 84			

図 5.2-21	HDB-2における全水頭解析結果と実測の比較	84
図 5.2-22	HDB-3における全水頭解析結果と実測の比較	85
図 5.2-23	HDB-4における全水頭解析結果と実測の比較	85
図 5.2-24	HDB-5における全水頭解析結果と実測の比較	86
図 5.2-25	HDB-6における全水頭解析結果と実測の比較	86
図 5.2-26	HDB-7 における全水頭解析結果と実測の比較	. 87
図 5.2-27	HDB-8における全水頭解析結果と実測の比較	87

表目次

表 3.1-1	試料の形状, 寸法一覧	
表 3.2-1	基本物性試験結果一覧(既存データとの比較)	
表 3.2-2	一軸圧縮試験結果一覧	9
表 3.2-3	X線分析結果一覧	
表 3.2-4	水銀圧入試験結果一覧	
表 3.3-1	試験条件	
表 3.3-2	トランジェントパルス透水試験法で用いた既知パラメータ一覧	
表 3.3-3	トランジェントパルス透水試験結果一覧(既往データとの比較)	
表 3.3-4	定水頭透水試験結果一覧(亀裂試料:試料7)	
表 3.4-1	試験条件一覧	
表 3.4-2	拡散試験結果(既往データとの比較)	
表 3.4-3	トレーサー試験条件	
表 3.4-4	ブロック試料トレーサー試験解析入力条件一覧	
表 4.2-1	亀裂パラメーター覧	
表 4.2 - 2	マトリクスパラメーター覧	
表 4.2-3	フローポイントの有無と透水量係数の関係(水理試験結果)	
表 5.1-1	解析に用いた透水係数初期値一覧	
表 5.1-2	非等方性を考慮した逆解析の結果	
表 5.2-1	解析に用いた水理および力学物性値	

写真目次

写真 3.1-1	岩塊試料の外観	. 4
写真 3.1-2	試料整形結果(試料 1~3)	. 5
写真 3.1-3	試料整形結果(試料 4~6)	. 6
写真 3.1-4	試料整形結果(ブロック状試料)	. 7
写真 3.3-1	トランジェントパルス透水試験装置概観	18

This is a blank page.

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分サイトの性能評価にあたっては、天然バリアを構成する岩盤中に おける水理・物質移行特性を適切に評価することが重要である.

日本原子力研究開発機構では、岩盤の物質移行特性に関して、硬岩(結晶質岩や古い時代の堆積岩) と軟岩(新しい時代の堆積岩)に分けた研究を行ってきた.その中で、軟岩では粒子間間隙が主な移 行経路として考えられてきた.しかしながら、軟岩においても、亀裂が発達している場合においては、 亀裂が粒子間間隙よりも卓越した水みちを形成すると考えられる.

本研究では、亀裂が発達した堆積岩中の物質移行現象を把握することを目的に、亀裂を有する堆積 岩の水理・物質移行データについて室内試験を実施して拡充するとともに、それらのデータに基づい た亀裂を有する堆積岩中の物質移行の評価手法の検討として、亀裂内の地下水流速の違いが堆積岩の 物質移行に与える影響について数値解析的な検討を行った.また、堆積岩が分布する広域的なスケー ルでの地下水流動場を評価する手法開発の一環として、幌延地域の地下深部において確認されている 高い間隙水圧について、その形成要因を把握することを目的とした数値解析的検討を行った.

2. 研究概要

2.1 研究の目的

本研究の目的は, 亀裂が発達する堆積岩中の水理物質移行現象与える影響を把握すること, ならび に, 堆積岩が分布する広域的なスケールでの地下水流動場を評価することである.

2.2 研究の内容

本研究では、2.1 で記した2つの目的のうち、前者の目的に対して亀裂が発達する堆積岩として幌 延深地層研究所計画で採取された岩石試料を用いた室内実験により水理・物質移行特性データを取得 する(下記の(1)項)するとともに、それらのデータに基づいた亀裂を有する堆積岩中の物質移行挙動 の検討として下記の(2)の項を実施した.後者の目的に対しては、堆積岩地域に見られる地下深部の諸 特性を考慮したモデル解析を行い、幌延地域の地下深部において観測されている高い間隙水圧に着目 して、その形成要因について検討した.

- (1) 岩石試料を対象とした水理・物質移行特性データの取得
- (2) 亀裂を考慮した堆積岩の水理・物質移行挙動の検討
- (3) 堆積岩地域に見られる地下深部の諸特性を考慮した地下水流動モデルによる逆解析

(1) 岩石試料を対象とした水理・物質移行特性データの取得

試験に用いる試料は,幌延深地層研究計画で掘削している立抗(換気立抗)で取得された岩石試料 (声問層試料)から,亀裂試料,インタクト試料を採取した.

試験は、透水試験および非収着性のトレーサーを用いた物質移行試験を実施した. 試験方法は、イ ンタクト試料については、透水試験をトランジェントパルス法にて行い、物質移行試験は、移流を考 慮しない拡散試験を行った. 試験から得られるデータを解析し、透水係数ならびに拡散係数を求めた. また、 亀裂試料については、セル型のトレーサー試験装置を用いて、定水頭透水試験および移流を考 慮した非収着性トレーサー試験を行い、それぞれ、透水係数と物質移行開口幅、分散長を求めた.

(2) 亀裂を考慮した堆積岩中の水理・物質移行挙動の検討

単一亀裂モデルを用いて、動水勾配の異なる数ケースについて物質移行解析を実施し、流速場の違いが岩盤内の物質移行現象に与える影響について検討を行った.

(3) 堆積岩地域に見られる地下深部の諸特性を考慮した地下水流動モデルによる逆解析

幌延地域で実施されたこれまでの調査で確認されている地下深部の特徴のうち,主に間隙水圧に着 目し,逆解析コードおよび熱-水-応力連成解析コードを用いた数値解析により,地下水流動に対する 影響要因について検討を行った.

3. 岩石試料を対象とした水理・物質移行特性データの取得

3.1 試料の採取, 整形

北海道幌延町にある原子力機構 幌延深地層研究センターが建設中の地下研究施設において、平成 18年度中に掘削した深度から、掘削ズリ(約40cm×30cm×30cm)を採取した(写真 3.1-1).地質 ならびに採取地点等を以下に記す.

- 地質 :声問層健岩部
- 採取位置 : 換気立坑 (GL.-30.6m)
- ・ 採取日 : 平成 18 年 11 月 11 日(土)

各試験に必要となる試料の形状および寸法を表 3.1-1 に示す.インタクト試料を用いた透水試験は、 三軸セルにより試料に封圧を載荷した状態で試験を実施する必要があるため、使用する試験装置の構 造上,試料の形状,寸法が直径 50mm×高さ 50mm の円柱状に限定される.また当初は,亀裂試料 を用いた透水試験,トレーサー試験についても、同様の円柱状試料を用いた試験を予定していたが, 試料が軟質で,かつやや乾燥しており,再コアリングや水中脱気の際に破損するケースが多かったた め、今回は、コアリングよりも試料への負荷が少ない方法で整形可能なブロック状試料を用いた試験 を実施した.なお、今回採取した試料からは、自然亀裂を有する試料が得られなかったため、亀裂試 料については、半割状の試料の間にスペーサーを挟んで作成した人工の平行平板試料を用いた.また、 インタクト試料を用いた物質移行試験(拡散試験)では、透水試験用に作成した直径 50mm×高さ 50mm の円柱状試料をさらに直径 30mm に再コアリングし、これを直径 30mm×厚さ 5mm の円盤 状にスライスしたものを用いた.基本物性試験および試料分析については、一軸圧縮試験では、直径 30mm×高さ 60mm の円柱状に整形したものを用いた.その他の物性試験、分析については、試料の 形状が限定されないため、透水試験、物質移行試験用の試料を採取した近傍から、必要な量の塊状試 料をサンプリングして使用した.写真 3.1-2~写真 3.1-4 に透水試験、物質移行試験用に整形した試 料の寸法、重量ならびに外観を示す.



写真 3.1-1 岩塊試料の外観

表 3.1-1 試料の形状, 寸法一覧

試験項目	試験方法	試料形状	試料寸法
(1)基本物性試験, 試料分析			
 密度, 空隙率など 	浮力法	岩塊	握りこぶし大
•一軸圧縮試験	一軸圧縮試験	円柱状	ϕ30mm×L60mm程度
•X線回折	定方位,不定方位法	岩塊	握りこぶし大
•空隙径測定	水銀圧入法	岩塊	握りこぶし大
(2)インタクト試料			
•透水試験	トランジェントパルス透水試験法	円柱状	∮50mm×L50mm程度
• 拡散試験	透過拡散法	円盤状	∮30mm×L5mm程度
(3) 亀裂試料			
•透水試験	定水頭透水試験	平行平板ブロック	H30mm×W30mm×L50mm程度
・トレーサー試験	トレーサー試験	平行平板ブロック	H30mm×W30mm×L50mm程度

試料	1
----	---

• •		
試料寸法	$\phi = 50.10$ mm	
	L-30.33mm	
試料重量	158.01g	
亀裂の状況	亀裂有	

試料 2								
試料寸法	φ=50.18mm L=50.20mm							
試料重量	158.16g							
亀裂の状況	亀裂無し							

試料 3									
試料寸法	φ=50.16mm L=50.81mm								
試料重量	160.01g								
亀裂の状況	亀裂無し								
-									

(a) 試料諸元



(b) 写 真



(c) スケッチ

写真 3.1-2 試料整形結果(試料1~3)

試	钋	4
		_

試料寸法	ϕ =50.13mm L=60.69mm
試料重量	191.54g
亀裂の状況	亀裂無し

돌 4	式料 5
試料寸法	ϕ =50.12mm L=62.69mm
試料重量	194.05g
亀裂の状況	亀裂有

雪	式料 6
試料寸法	ϕ =50.15mm L=60.81mm
試料重量	191.22g

亀裂無し

亀裂の状況

(a) 試料諸元



(b) 写 真



(c) スケッチ

写真 3.1-3 試料整形結果(試料 4~6)

試料7

試料寸法	L34.5mm × W40.0mm × H47.5mm
試料重量	103.50g
亀裂の状況	人工平行平板

(a) 試料諸元



(b) 写 真

写真 3.1-4 試料整形結果 (ブロック状試料)

3.2 試料の分析

3.2.1 分析項目

ここでは、試験に使用する岩石試料の有効間隙率や一軸圧縮強度などの岩石の力学的特性を判断す るため一般的に用いられている諸物性値を把握するため、基本物性試験、一軸圧縮試験を実施すると ともに、対象としている岩石試料の力学的特性を補完的に示す指標として考えられる①珪藻質泥岩の 続成作用の変化や、岩石の力学的特性のみならず水理・物質移行に影響を与える特性として②岩石中 の細孔径分布測定を実施した。①に関しては、幌延地域の珪藻質泥岩に見られる埋没続成作用の特徴 を踏まえ、続成作用に伴うシリカ鉱物の変化(珪藻→オパール A→オパール CT→石英)に着目し、 粉末式 X 線分析を行った. ②に関しては、水銀圧入法による空隙の細孔径分布測定を行った.

3.2.2 基本物性試験

基本物性測定は,試験に使用した試料の物性を把握する目的で実施した.なお,基本物性試験用の 試料は,採取した岩塊のうちの透水試験および物質移行試験に使用したインタクト試料, 亀裂試料の ごく近傍の岩片から採取した.

試験結果の一覧を表 3.2-1 に示す.また、同表中には、比較のため、既存の成果(平成 14 年度~ 平成 16 年度に取得したデータ)を併せて示す.表より、今回の試料は、平成 15 年度に実施した声問 層試料の GL.-200m 付近で採取した試料とほぼ同様の結果となった.

博斯在中	计整个符	地國夕	採取深度		比重 (g/cm ³)	含水比	飽和度	有効間隙率	吸水率	弾性波速	度(km/s)		
休収牛皮	武科在你	地居石	(GLm)	自然状態	強制乾燥状態	強制湿潤状態	(-)	(%)	(%)	(%)	P波速度	S波速度		
+ 11 22	1	古田屋	20.6	1.580	0.975	1.586	0.621	99.0	61.1	62.7	1.66	0.42		
本研究	2	尸问厝	30.0	1.580	0.979	1.589	0.614	98.5	61.0	62.3	1.66	0.43		
	2-2i		195.00~195.70	1.879	1.465	1.879	0.283	100.0	41.4	28.3	2.70	0.98		
亚成14年度	3-3i	我内园	214.00~214.40	1.910	1.526	1.910	0.252	100.0	38.5	25.2	2.80	1.12		
十成14年度	3-4i	作用しまり目	314.00**314.40	1.911	1.527	1.911	0.252	100.0	38.4	25.2	2.70	1.10		
	4-2i		441.50~442.00	2.005	1.673	2.005	0.199	100.0	33.2	19.9	2.60	1.15		
	6-2f	声問層		1.574	0.978	1.574	0.609	100.0	59.5	60.9	1.68	0.43		
	6-2i-h		声問層	202.00~202.60	1.568	0.970	1.568	0.617	100.0	59.8	61.7	1.70	0.46	
	6-2i-v			声問層		1.570	0.974	1.570	0.613	100.0	59.6	61.3	1.68	0.48
	6-4f				广问语		1.699	1.177	1.699	0.443	100.0	52.2	44.3	1.85
	6-4i-h			245.10~245.60	1.679	1.145	1.679	0.466	100.0	53.4	46.6	1.87	0.59	
亚成15年度	6-4i-v			1.675	1.138	1.675	0.472	100.0	53.7	47.2	1.93	0.40		
干成13年度	7-1i-001		199.65~100.00	1.917	1.470	1.917	0.304	100.0	44.7	30.4	1.78	0.44		
	7-1i-90	勇知層	189.05 - 190.00	1.882	1.413	1.882	0.332	100.0	46.9	33.2	1.80	0.41		
	7-2f		006 0E000 07	1.921	1.475	1.921	0.302	100.0	44.5	30.2	1.77	0.36		
	7-2i		220.03. 220.27	1.935	1.495	1.935	0.294	100.0	44.0	29.4	1.78	0.38		
	7-3f		240.00~240.60	1.893	1.429	1.893	0.322	100.0	46.3	32.4	1.72	0.34		
	7_2;		240.00-240.00	1 007	1 451	1 0 0 7	0.215	100.0	45.7	217	1 7 1	0.22		

表 3.2-1 基本物性試験結果一覧(既存データとの比較)

3.2.3 一軸圧縮試験

ー軸圧縮試験の結果一覧を表 3.2-2 に示す. 同表中には, 比較のため, 既存の成果(平成 15 年度, 平成 16 年度に取得したデータ)を併せて示す. 一軸圧縮強度は, 2.5MPa であり, 既往の声問層デー タと比べて, 最も低い値となった.

					W 16	11.5+	一軸 圧縮試験										
実施年度	地層名	試料名	深度	再コアリング 方向	里位重	体積 量	一軸	圧縮 渡	静引 係 (外	単性 数 率D	静道 係 (かい	単性 数 ッ [、])	破 ひず	壊 げみ	静杰。〕	79ン比	
			(m)		(kN	/m³)	()MF	a)	OMF OMF	а)	(MP	v) a)	()	\$)			
					15.6		2.92		221		505		1.46		0.423		
本研究	声問層	换気立坑	GL30.6m	-	15.3	15.5	2.10	2.51	222	227	547	524	1.06	1.32	0.384	0.386	
1 0/02		が出用リスリ			15.6		3.03		239		520		1.44		0.350		
			96.33 - 96.4		15.1		2.57		263		487		1.16		0.225		
				水平	14.7	15.1	3.31	2.88	266	293	447	530	1.25	1.07	0.156	0.207	
			99.00 - 99.21		15.5		2.76		351		657		0.80		0.239		
	声问唐	6-1	96.33 - 96.4		15.1		2.67		360		604		0.83		0.153		
			00.00 00.91	水平+90°	14.8	15.0	5.14	3.91	297	302	362	463	1.80	1.29	0.109	0.148	
			38.00 - 38.21		14.6		3.07		250		424		1.24		0.183		
			201.05 - 201.40		15.4		4.25		328		494		1.35		0.200		
			201.60 - 202.00	水平	15.2	15.3	2.33	3.20	353	354	635	589	0.68	0.95	0.164	0.195	
	吉問菌	8-2	205.75 - 206.00		15.4		3.02		381		638		0.83		0.220		
	/= 190/18		201.05 - 201.40		15.3		4.27	-	341		528		1.28		0.198	1	
			201.60 - 202.00	鉛直	15.4	15.2	4.68	4.97	273	308	377	439	1.75	1.67	0.132	0.145	
			205.75 - 206.00		15.0		5.67		309		411		1.99		0.106		
			245.75 - 246.00		16.4		3.52	-	469		802		0.89		0.260		
				水平	16.5	16.5	3.64	3.61	441	463	735	749	0.87	0.88	0.176	0.211	
	声問層	6-3	246.00 - 246.45		16.6		3.68		479		711		0.87		0.211		
			245.75 - 246.00		16.6		6.06	-	339		379		1.97		0.134	1	
				鉛直	16.5	16.6	6.12 6	6.30	374	3/4	367	456	1.85	1.90	0.164	0.166	
平成15年度			246.00 - 246.45		16.6		6.71		408		621		1.87		0.201		
			183.00 - 183.30	(18.9		1.05	1 10	11		78		1.46		0.232		
			100 00 100 50	水平	19.1	18.9	1.63	1.18	119	8/	129	90	1.46	1.45	0.370	0.253	
	勇知層	7-1	183.30 - 183.56		18.8		0.86		64		63		1.42		0.158		
				183.00 - 183.00		10.0	19.0	1.30	1.61	104	0.0	84 194	100	1.58	1.07	0.438	0.001
			183.30 - 183.56	如臣	10.0	18.0	1.00	1.01	104	33	104	100	1.0/	1.07	0.480	0.381	
			105.55 - 104.00		10.0		1.05		1.07		101		1.00		0.217		
			226.00 - 226.43	→k ⊐Z	18.8	19 Q	1.05	1.97	152	192	207	167	1.20	1 14	0.352	0.394	
			226 43 - 226 70	431	19.0	10.0	1 30	1.01	115	102	133	101	1.26	1.17	0.340	0.004	
	勇知層	7-2	220.40 220.10		19.2		1.68		159		188		1.18		0.489		
			226.00 - 226.43	鉛直	19.0	19.1	1.84	1.65	207	181	199	191	1.03	1.07	0.442	0.474	
			226.43 - 226.70		19.0		1.62	-	177		187		1.01		0.491	1	
					19.2		1.44		114		121		1.41		0.237		
			237.00 - 237.32	水平	19.1	19.1	0.82	1.21	74	100	67	104	1.16	1.30	0.476	0.422	
			239.25 - 239.59		19.1		1.37		113		125		1.32		0.422	1	
	男知層	7-3	237.00 237.32		19.2		1.80		175		213		1.06		0.369		
			200 SE 200 E0	鉛直	19.4	19.2	1.01	1.28	101	116	88	125	1.06	1.23	0.234	0.280	
			239.25 - 239.59		19.1		1.03	1	72		73		1.58		0.238		
					18.1		10.77		1125		1560		0.97		0.107		
				水平	18.2	18.1	10.85	10.81	841	1108	1378	1516	1.05	1.04	0.165	0.147	
	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	HDB-9	168.00 - 166.00		18.1		15.15		1357		1611		1.11		0.169		
	1EL/1/唱 	(150)	100.00 - 100.80		18.2		7.21		1312		2421		0.69		0.238		
平成16年度				垂直	18.5	18.3	5.29	6.25	932	1094	1224	1971	0.61	0.60	0.255	0.227	
					18.2		4.84		1038		2269		0.50		0.187		
					18.8		18.18		1084		1520		1.90		0.237		
	稚内層	HDB-9 (250)	253.50 - 254.00	コア軸方向	18.7	18.7	17.50	17.84	1088	1093	1493	1568	1.79	1.77	0.216	0.232	
					18.6		16.67	]	1106		1690		1.62		0.243		

表 3.2-2 一軸圧縮試験結果一覧

### 3.2.4 X線分析

対象試料である珪藻質泥岩の続成作用の程度を調べることを目的として,不定方位法,定方位法に よる X 線分析を行った.分析用の試料は採取した岩塊のうち,透水試験,物質移行試験用の試料のご く近傍の岩片から採取した.

### (1) 原理

X線回折(X-ray diffraction, XRD)は、鉱物の結晶構造に関する情報を得るための分析方法であり、試料に含まれている元素の種類や量を知るための方法ではない.この分析法は、試料中の原子の配列が規則性を有すること、すなわち結晶相であることを前提にしている.

結晶体に単色のX線を当てると、X線が結晶格子面で反射し、互いに干渉しあうので、次の条件を 満たす方向の回折線のみ強度が増大し、他は打ち消しあって観察されない.

 $2d \sin = n$ 

d は面間隔、 $\lambda$ は波長、n は干渉しあう波の位相の差である. n=0,1,2,・・・の場合をそれぞれ 0 次、1 次、2 次・・・の回折線と呼ぶ. 波長  $\lambda$  が一定の単色 X線を照射した際の反射角  $\theta$  (2 $\theta$ )を観 測し、上の式から面間隔が求められる. この面間隔は一般に物質の固有の値で、一つの物質の数個の d とそれに対応する回折 X線の相対強度が観察できれば、その物質を同定することができる.

X線回折には多くの方法があり、通常は、粉末回折法 (powder diffraction method) が適用される. 鉱物はそれぞれに特有の回折線を示し、回折線の位置と強度から各鉱物の同定がなされる.つまり、 X線回折により鉱物の同定が可能である.具体的には、粉末試料の回折実験によって得られた X線回 折結果を既知物質のそれと比較し、未知物質を同定する.

通常の粉末回折法では不定方位法を用い,あらゆる方向に配列した結晶粉末からのX線回折を測定 する.不定方位法により試料に含まれる鉱物種の同定が可能であり,そのおおよその量も知ることが できる.

#### (2) 不定方位法

不定方位法は、あらゆる方向を示す配向性のない粉末試料からの X 線回折を行う. 試料をめのう乳 鉢を用い、指でさわったときに粒子の感じがなくなるまで(4µm以下)粉砕する. 粉末にした試料 は、穴のあいた(20×14×1.5mm)アルミニウム板製試料ホルダーにつめこみ、測定に供する. 得ら れたデータを既知の X 線回折データと比較し、含有される鉱物の種類を決定する. ただし、複雑な 混合物や粘土鉱物の場合には同定が困難であるため、さらに定方位法で検討する必要がある.

### (3) 定方位法

定方位法は、水ひ法により特定範囲の粒径の粘土を採取して定方位のマウントを行った試料に対して、エチレングリコール処理、ジアミン処理、塩酸処理、高温処理を行った試料と無処理の試料についてX線回折を行い、それぞれの結果を比較することで、含有される鉱物の種類とおおよその含有量を決定する方法である.

#### (4) 鉱物含有量の推定

結晶相の混合物からのX線の強度は結晶相の含有量と相関関係があるので、結晶相同定後、適当な

回折線を選んで結晶相の定量を行うことができる.しかし,回折 X 線の強度は,結晶相物質の含有量 だけではなく鉱物の種類(化学組成・結晶構造),結晶度,粉末粒子の形状,大きさ,方位,測定条件, および混合物全体の X 線吸収係数などの要素により決定される.その主要なもののみについてみても 鉱物の種類によって異なり,同族の鉱物であっても変異があり,同じ結晶面の回折線強度が一定の強 度を示すとは限らない.例えば,緑泥石のように大幅に化学組成が変わるために強度も大きく変わる ものもある.このような試料では,定量しようとする鉱物の純粋状態での強度が必要であるのに,こ れを知る(あるいは基準試料を選ぶ)ことが困難である.また,完全な不定方位あるいは定方位試料 をつくることが難しいので,試料間の方向性の相違による誤差も避けられない.これらの限界により X線回折による鉱物の定量は一般にかなり大きな誤差を含むことになり,厳密に定量的な評価を行う ことは困難である.

今回の測定では、不定方位測定により得られた X線回折デジタルデータを既知含有量の標準鉱物の それと比較することによって経験的に各鉱物のおおよその含有量を推定した.

### (5) 分析結果

X線解析チャートを図 3.2-1 に示す.以下に各鉱物の同定結果を示す.

① スメクタイトの同定

スメクタイトの同定は無処理とエチレングリコール処理の結果を比較することにより行った.

無処理定方位試料の回折実験により得られた CuK $\alpha$ : 2 $\theta$  =5.0~7.5°に分布する幅が広い回折線 が、エチレングリコール処理後低角度 CuK $\alpha$ : 2 $\theta$  =5.2°に明らかに移動したことは、膨潤性粘土鉱 物であるスメクタイトの存在を示唆する.したがって、スメクタイトが、微量~小量程度存在すると 推定される.

② 緑泥石とカオリナイトの同定

緑泥石とカオリン鉱物が共存する場合,緑泥石の 002,004 の回折線とカオリン鉱物の 001,002 の回折線が重なるため,カオリン鉱物と緑泥石の識別に困難が生じる.このような場合には,何らか の処理によってこれらの回折線の変化を観察し,同定を行う.ジアミン処理方法は,カオリナイトの 底面間隔を膨脹し,カオリナイトの 12.3°の回折線が 8.4°となり,面間隔が広がる.したがって, 緑泥石の回折線と分離することによって,カオリナイトと緑泥石の識別が容易になる.分析試料に対 してジアミン処理を行った結果,12.3°付近の回折線の移動が観察できなかったため,カオリンが存 在していないことが確認された.

④ シリカ鉱物の同定

シリカ鉱物であるオパール CT とオパール A は以下の定義に基づいて同定を行った.オパール CT は、クリストバライトとトリジマイトの不規則の混じりであり、回折線には 2 $\theta$  (CuK $\alpha$ ) =21.66 で明確なピークが現れる. 一方、オパール A は非晶質であるため、回折線には明確なピークが現れず、 2 $\theta$  (CuK $\alpha$ ) =21.66 を中心に非常に幅広い弱い散乱 (ブロードピーク) が現れる.

今回の分析では、オパールAのブロードピークが見られることから、幌延地域の珪藻質泥岩に特徴的なシリカ鉱物の変化:珪藻→オパールA→オパールCT→石英の中で、オパールAのゾーンに区分されることが示された.

						-										
		シ	リカ鉱	広物		長	石				沸	石		粘土	鉱物	
試料名	石英	非晶質?オパールA	オパールCT	トリジマイト	クリストバライト	カリ長石	斜長石	菱鉄鉱	黄鉄鉱	石膏	濁沸石	斜プチロル沸石	スメクタイト	緑泥石	雲母類	カオリン

 $\triangle$  $\triangle$  $\triangle$  備考

 $\triangle$  $\triangle$  $\triangle$ 

表 3.2-3 X線分析結果一覧

 $\bigcirc$ 凡例:● 多量,○ 中量,▲ 少量,△ 少量? 微量,+ 微量,- 極微量。

 $\triangle$ 

ル А

順 番

1

換気立坑GL.-30.6m



図 3.2-1 X線分析結果

### 3.2.5 空隙径分布測定

試料の空隙分布を測定することを目的として,水銀圧入法による空隙の細孔径分布測定を行った. 測定には,採取した岩塊のうち,透水試験・物質移行試験用試料のごく近傍から採取した岩片を用いた.

### (1) 測定方法

水銀圧入法は、水銀が土壌や岩石表面に対して接触角が大きく、濡れ性が小さいという性質を利用 したもので、間隙率や乾燥嵩密度、真密度をはじめ、細孔径分布、細孔内比表面積などを求めること ができる.

水銀圧入法による測定は、島津製作所製のポロシメーター(オートポア IV9520:測定細孔径 0.003 ~500 µ m)を用いて行った. 試料は、大きさ 2.5~5.0mm 粒に破砕した試料を 105℃の温度で 1 時 間乾燥させたものを用いた.

細孔径分布および細孔内比表面積の計算においては、水銀の土壌に対する一般的な物性値として、 表面張力 γ =0.480 (N/m),および接触角 θ =140°を用いた.細孔径と水銀にかかる圧力,表面張力, 接触角との関係は、Washburn の法則として関連付けられている.細孔径、細孔内比表面積、乾燥嵩 密度、有効間隙率は、以下の関係から決定した.

$$\mathbf{D} = -\left(\frac{4}{P_m}\right) \boldsymbol{\gamma} \cdot \cos\theta \tag{3.2-1}$$

$$S_{P} = -\frac{1}{\gamma \cdot \cos \theta} \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} P_{m} dV \qquad (3.2-2)$$

$$\rho_d = \frac{M_d}{V_c - \left(\frac{M_{me}}{\rho_{me}}\right)} \tag{3.2-3}$$

$$n_P = 100V_{SP} \cdot \rho_d \tag{3.2-4}$$

ここに、D:細孔直径(m)、 $P_m$ :水銀にかけた圧力(kg/m²)、 $\gamma$ :水銀の試料表面での表面張力 (N/m)、 $\theta$ :水銀の試料表面での接触角(°)、 $S_P$ :細孔内比表面積(m²/kg)、 $V_{max}$ :水銀が最大孔 径の空隙に注入された時のセル中の水銀体積(m³)、 $V_{min}$ :水銀が最小孔径の空隙に注入された時の セル中の水銀体積(m³)、 $\rho_d$ :乾燥嵩密度(kg/m³)、 $M_d$ :乾燥状態での試料重量(kg)、 $V_c$ :密閉セ ルの体積(m³)、 $M_{me}$ :水銀の重量(kg)、 $\rho_{me}$ :水銀の密度(kg/m³)、 $n_P$ :有効間隙率(%)、 $V_{SP}$ : 比空隙体積(単位重量当りの空隙体積)(m³/kg)である.

### (2) 測定結果

図 3.2-2 に各試料の細孔半径と累積有効間隙率の関係を,表 3.2-4 に水銀圧入試験結果の一覧を示 す.図より、今回の試料では、細孔半径 0.2 m付近以下の空隙の割合が多く、既往の声問層を対象と した試験結果と比較すると、やや径の小さい空隙の占める割合が多いことが分かる(図 3.2-3).

				20	
試料	深度	累積細孔 体積	累積細孔 比表面積	嵩密度	真密度
	(m)	(mL∕g)	$(m^2/g)$	(g/cm³)	(g/cm ³ )
換気立坑 GL30.6m	30.6	0.521	29.1	1.05	2.290

表 3.2-4 水銀圧入試験結果一覧



図 3.2-2 水銀圧入法による細孔径分布測定結果



図 3.2-3 細孔径分布測定結果(既存データとの比較)

### 3.3 透水試験

透水試験は、インタクト試料についてはトランジェントパルス透水試験、亀裂試料については定水 頭透水試験を実施した.以下に試験方法と結果について説明する.

### 3.3.1 インタクト試料を対象とした透水試験(トランジェントパルス透水試験)

(1) 試験方法

試験に用いたトランジェントパルス透水試験装置の概要, 概観及び, 測定原理をそれぞれ, 図 3.3-1, 図 3.3-2, 写真 3.3-1 に示す.本装置の特徴は,温度変化による水圧への影響を低減するため,装置 全体を水槽内に沈める機構を有することである.試験手順を図 3.3-3 に示し,試験手順の詳細を以下 に述べる.

① 試料セット

三軸セルに試料をセットし,装置内,配管内のエア抜きを行う.

② 封圧の載荷

試料に側圧,軸圧を載荷する. 試料採取深度に相応の側圧,軸圧を載荷し,圧力が安定するまで監 視する.

③ 間隙水圧の載荷

試料及び上下貯留槽内に一様な水圧を加え、水圧が一定になるまで監視する.

④ 水圧パルスを作用

上流側貯留槽内の水圧をパルス幅Hだけ上昇させ、水圧の安定を確認した後、バルブの開閉により 試料に水圧パルスを作用させる.

⑤ 水圧変化の測定,記録

上下流の水圧の経時変化を測定,記録する.

⑥ 水圧平衡

水圧が平衡に達した時点で、計測を終了する.



図 3.3-1 トランジェントパルス透水試験装置概要



写真 3.3-1 トランジェントパルス透水試験装置概観





[試験の流れ]

[計測の流れ]



図 3.3-3 トランジェントパルス透水試験手順

### (2) 試験条件

試験条件を以下に示す. 封圧については,

図 3.3-4 に示す HDB-1 孔および HDB-6 孔の密度検層の結果から推定した鉛直応力を参考に, 試 料採取深度相当の圧力条件下に設定した. なお, その鉛直応力の値は, 水圧破砕試験により求められ た最小主応力値とも整合的である. また, 間隙水圧については, 岩盤内の間隙水圧が深度方向に静水 圧分布していると仮定して決定した.

- 温度 : 室温
- 封圧 : 深度(m)×0.018 (MPa/m) 間隙水圧: 深度(m)×0.010 (MPa/m)

採取深度	封圧	[MPa]	間隙水圧	パルス圧
[GLm]	軸圧	側圧	[MPa]	[MPa]
30.60	0.50	0.50	0.30	0.10

表 3.3-1 試験条件



### (3) 試験結果

トランジェントパルス透水試験の結果を,図 3.3-6 ならびに表 3.3-3 に示した.トランジェントパルス透水試験の解析には,Brace 法と,差圧を用いた Hsieh 法を用いた.それらの方法を以下に述べる.

(a) Brace 法(Brace, W.F.他, 1968)

Brace 法は、上下流水槽内の水圧差の測定結果を次式にフィッティングさせることにより、透水係数を求める方法である(Brace, W.F.他, 1968).

$$\frac{h_u - h_d}{H} = \exp\left[-\frac{V_u + V_d}{V_u V_d} \frac{KAt}{\ell C_w \gamma_w g}\right]$$
(3.3-1)

ここに、H:パルス圧幅 (MPa), hu: 上流側水圧 (MPa), hd: 下流側水圧 (MPa), Vu: 上流側 貯留槽の容積 (m³), Vd: 上流側貯留槽の容積 (m³), K: 岩石試料の透水係数 (m/s), A : 岩石試料 の断面積(m²), t: 経過時間 (s), ℓ: 岩石試料の長さ (m), Cw: 水の圧縮率 (m²/kN), γw: 水の 密度 (kg/m³), g: 重力加速度 (m/s²)

Brace 法は、上下流水槽内の水圧差を用いるため、温度影響による水圧変化分がキャンセルアウト される利点を有する.しかし、岩石内貯留が上下流水槽の貯留量に比べて無視しうるという仮定に基 づいており、比貯留係数を算出することはできない.

(b) 差圧を用いた Hsieh 法(Hsieh, P.A.他, 1981)

岩石内貯留を考慮した水圧変化の厳密解として、次式で示される Hsieh の解がある (Hsieh, P.A. 他, 1981).

$$\frac{h_u}{H} = \frac{1}{1+\beta+\gamma} + 2\sum_{m=1}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha\phi_m^2)(\beta+\gamma^2\phi_m^2/\beta)}{\left[\gamma^2\phi_m^4/\beta^2 + (\gamma^2\beta+\gamma^2+\gamma+\beta)\phi_m^2/\beta + (\beta^2+\gamma\beta+\beta)\right]}$$

 $\cdot \cdot (3.3-2)$ 

$$\frac{h_d}{H} = \frac{1}{1+\beta+\gamma} + 2\sum_{m=1}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha\phi_m^2)(\beta-\gamma\phi_m^2/\beta)}{\left[\gamma^2\phi_m^4/\beta^2 + (\gamma^2\beta+\gamma^2+\gamma+\beta)\phi_m^2/\beta + (\beta^2+\gamma\beta+\beta)\right]\cos\phi_m}$$

• • • (3.3-3)

ここで、
$$\phi_{\rm m}$$
は次式の根である.  
 $\tan \phi = \frac{(1+\gamma)\phi}{\gamma \phi^2 / \beta - \beta}$  ・・・(3.3-4)

上式中のα, β, γは無次元数で,以下のように表される.

$$\alpha = \frac{Kt}{\ell^2 S_s}, \quad \beta = \frac{S_s A \ell}{S_u}, \quad \gamma = \frac{S_d}{S_u} \cdot \cdot \cdot (3.3-5)$$

$$S_u = C_w \gamma_w V_u g \cdot \cdot \cdot (3.3-6)$$

 $S_d = C_w \gamma_w V_d g \cdot \cdot \cdot (3.3-7)$ 

ここに、H:パルス圧幅 (MPa)、hu: 上流側水圧 (MPa)、hd: 下流側水圧 (MPa)、Su: 上流側貯留 槽の貯留量 (m²)、Sd: 下流側貯留槽の貯留量(m²)、K: 岩石試料の透水係数 (m/s)、A: 岩石試料の断 面積(m²)、t: 経過時間 (s) 、 ℓ: 岩石試料の長さ (m)、Cw: 水の圧縮率 (m²/kN)、 γw: 水の密度 (kg/m³)、g: 重力加速度 (m/s²)、Vu: 上流側貯留槽の容積(m³)、Sv: 比貯留係数(m⁻¹)である.

Hsiehの解では、上・下流側の水圧を個々にフィッティングさせるため、温度による水圧変化の影響によって解析誤差が生じやすい.そこで、(3.3-2)式と(3.3-3)式の差を取ることにより、温度による水圧変化分をキャンセルアウトする方法が考えられる.この方法を、ここでは「差圧を用いた Hsieh法」と呼ぶこととする.

Brace 法と差圧を用いた Hsieh 法による解析結果を図 3.3-6 のグラフ中に示した.いずれも理論解 (図中の赤線) との良好な一致が見られる.

図 3.3-5 に Hsieh 法による解析手順の概念図を示す.具体的な解析手順は以下のとおりである.

① 測定された上下流側貯留槽の水圧変化を理論曲線とマッチングし、そのときの $\beta$  (= $\beta$ *) と、  $\alpha \beta^{2=1}$ のときのt (=t*) を求める.

② ①で求めたβおよびtを用いて(3.3-5)式より,比貯留係数 Ss を求める.

③ ②で求めた Ss と①で求めた t を用いて (3.3-5) 式より, K を求める.



図 3.3-5 Hsieh 法による解析手順の概念図
図 3.3-7 に、透水係数と深度の関係について、今回の試験結果と、平成 16 年度までに実施した既 往の透水試験結果とを比較したものを示す.これより、今回の試験結果は、既往の結果も含めて、採 取深度と透水係数の間に明瞭な相関は見られないことが分かる.また、既往の声問層を対象とした試 験結果と比較してやや低い透水性を示すことが分かる.しかし、今回の試料は、基本物性試験で得ら れた有効間隙率が 61%程度と既往の声問層試料の中で最も大きい間隙率を有する試料であり、一般的 に言われる間隙率と透水係数の正の相関とは一致しない傾向が見られる.これは、先に示した水銀圧 入試験の結果から、今回の試料の間隙径分布は、既往の声問層試料のなかで中間的な傾向を示してお り、間隙率は大きいが、間隙構造としてはより径の小さい間隙の占める割合が大きいという特徴を有 していることに起因するものと考えられる.

	単位	既知パラメータ値
Vu	(m ³ )	4.15E-04
V _d	(m ³ )	4.15E-04
А	(m ² )	1.96E-03
1	(m)	5.00E-02
$C_{w}$	(m2/kN)	4.65E-07
w	(kN/m3)	9.7890

表 3.3-2 トランジェントパルス透水試験法で用いた既知パラメーター覧

表 3.3-	3 F	・ランジ	ジェントパルス語	透水試験結	果一覧	(既往	主データとの比較	)	
									LI

宝旋午産	採販订夕	排屆欠	地屋夕	計判.夕.	採筋沕	= ((		封圧	(MPa)	間隙水圧	パルス 圧	透水係数	(m/s)	比貯留係数 (1/m)
天旭平反	174421670	地宿石	PV1710	休以休度(GL.=Ⅲ)			軸圧	側圧	(MPa)	(MPa)	brace法	差圧を用い	、たhsieh法	
本研究	换気立坑	声問層	掘削ズリ	;	30.60	)	0.50	0.50	0.30	0.10	8.49E-11	1.35E-10	5.59E-05	
		秘由屋	9-1i-h	990 75		001 00	4 50	4 50	9.50	0.10	2.41E-11	2.80E-11	1.32E-05	
亚山16年度	HDB-94C	相門間	9-1i-v	230.75	~	231.00	4.50	4. 50	2. 50	0.10	1.25E-11	1.50E-11	1.34E-05	
十成10年度	UDD 107	HDB-10孔 声問層 10-1i-h 10-1i-v1 91.50 ~		00.00 1.00	1 00	1 00	1 00	0.10	6.90E-11	8.28E-11	1.43E-05			
	HDB-104L		10-1i-v1	91. 50	$\sim$	92.00	1.80	1.80	1.00	0.10	6.98E-11	8.38E-11	1.42E-05	
			6-2i-h	202 00	<	202 60	3 60	3 60	0 2.00	0 10	5.40E-10	7.53E-10	8.74E-06	
	HDB-67	吉問層	6-2i-v	202.00		202.00	0.00	0.00		0.10	4.21E-10	4.53E-10	1.11E-05	
	HDD 016	) 1HJ/H	6-4i-h	245 10	$\sim$	245 60	4 50	4 50	2 50	0.10	1.71E-10	1.93E-10	4.08E-06	
亚成15年度			6-4i-v	240.10		240.00	4.00	4.00	2.00		1.13E-10	1.27E-10	1.18E-05	
十成15年反			7-1i-001	180 65	$\sim$	100.00	3 60	3 60	2 00	0.10	2.11E-10	2.54E-10	1.29E-05	
	UDB-77	重知屋	7-1i-90	109.00	-	150.00	5.00	5.00	2.00	2.00 0.10	2.78E-10	2.86E-10	1.10E-05	
	HDD /1L	为和官	7-2i	226.85	$\sim$	228.27	4.10	4.10	2.30	0.10	3.31E-10	4.09E-10	1.01E-05	
			7-3i	240.00	$\sim$	240.60	4.30	4.30	2.40	0.10	1.98E-10	2.22E-10	1.08E-05	
			2-1i	195.00	$\sim$	195.70	3.6	3.6	2	0.1	4.83E-12	5.49E-12	1.12E-05	
平成14年度	HDB-4孔	稚内層	3-2i	314.00	$\sim$	314.40	5.4	5.4	3	0.1	4.83E-12	4.88E-12	6.08E-06	
				4-1 i	441 50	$\sim$	442.00	8 1	8 1	4.5	0.1	1 69E-12	1 63E-12	8 11E-06



(a) Brace 法



(b) 差圧を用いた Hsieh 法

図 3.3-6 トランジェントパルス透水試験結果



図 3.3-7 深度と透水係数の関係(既往データとの比較)

### 3.3.2 亀裂試料を対象とした透水試験(定水頭透水試験)

#### (1) 試験方法

定水頭透水試験は、後述のトレーサー試験で使用する装置を用いて実施した.試験装置の概略を図 3.3-8 に示す.試験装置は、トレーサー試験装置のトレーサー注入側のシリンジポンプを定水頭の堰 に取り替えたもので,排出側の堰との水頭差を一定に保った状態で,試料を通水する流量を測定した. 試験手順を以下に示す.

#### (1) 供試体の作成

作製した供試体の模式図を図 3.3-9 に示す.写真 3.1-4 で 整形したブロック状試料の両端面 を除く周囲にシリコンシーラントを塗布し,図 3.3-9 (a)に示すように、止水のためのアクリル板を貼 り付ける.両端部には、亀裂部のみにトレーサーを注入できるように、亀裂寸法に合わせたスリット を設けたアクリル板を周囲と同じようにシリコンシーラントを用いて貼り付ける (図 3.3-9 (b)).さ らに、これらを固定するために周囲をアングルと全ネジロッドにより締め付けた (図 3.3-9 (c)).こ の状態で、水中脱気による試料の飽和を行った.

#### ② 供試体のセット

供試体を図 3.3-8 に示すように2つのセルで挟み込むようにセットした後, 亀裂内にエアが残留し ないよう, 注入側のセルから試料内部を通水して装置全体に脱イオン脱気水を満たし, 注入側, 排水 側の両バルブを閉じる.

#### 定水頭透水試験の開始

注入側および排水側の両バルブを開放し、水の注入を開始する.

#### 定常状態の確認

排出側での流量を測定し、流量が定常状態に達したことを確認する.このときの水頭差と、流量の 関係から亀裂の透水量係数を算定する.



図 3.3-8 定水頭透水試験装置概要



図 3.3-9 供試体作成の模式図

# (2) 試験結果

定水頭透水試験では、亀裂が試料の中央に位置していると仮定した場合の亀裂の透水量係数 Tr(m²/s)と、試料の全断面を透水すると仮定した場合の試料の透水係数 K(m/s)を以下の(3.3-8)~ (3.3-10)式から求めた.

$$T_{f} = \frac{Q}{x \cdot I} \cdot \cdot \cdot (3.3 \cdot 8)$$
$$K = \frac{Q}{A \cdot I} \cdot \cdot \cdot (3.3 \cdot 9)$$
$$I = \frac{H}{L} \cdot \cdot \cdot (3.3 \cdot 10)$$

ここに、T_f: 亀裂の透水量係数(m²/s)、Q: 流量(m³/s)、L: 試料の長さ(m)、x: 亀裂長さ(m)、I: 動 水勾配(-)、K: 試料の透水係数(m/s)、A: 試料の断面積(m²)、H: 水頭差(m)である.

表 3.3-4 に定水頭透水試験結果の一覧を示す. 亀裂の透水量係数は, 4.40×10⁻⁹(m²/s)であり, これ から三乗則により求められる水理開口幅は, 0.029(mm)であった. また, 試料全体の透水係数は, 4.60×10⁻⁷(m/s)であった.

試料名	地層名	採取場所	水頭差 (m)	流量 (m ³ /s)	亀裂の 透水量係数 T _f (m ² /s)	試料の 透水係数 K(m/s)
試料7	声問層	換気立坑 GL.−30.6m	0.33	4.40E-09	1.84E-08	4.60E-07

表 3.3-4 定水頭透水試験結果一覧(亀裂試料:試料7)

# 3.4 物質移行試験

物質移行試験は、インタクト試料については透過拡散法による拡散試験、亀裂試料についてはトレ ーサー試験を実施した.以下にそれぞれについて説明する.

### 3.4.1 拡散試験

(1) 試験方法

試験装置の概要を図 3.4-1, 図 3.4-2 に示す.本試験は,透過拡散法による拡散試験である.透過 拡散法とは,岩石試料で仕切られた2つのセルにそれぞれトレーサー溶液と水を入れ,2つのセル内 のトレーサー濃度の経時変化から岩石の拡散係数を求める方法である.

以下に,試験手順に沿って,試験方法を述べる.

① 供試体作成

供試体は、図 3.4・2 に示すように、採取試料を直径 30mm、厚さ 5mm の円盤状に整形し、周囲を エポキシ系樹脂により固めたものである.なお、供試体の作成中は試料をなるべく乾燥させないよう 注意を払い、供試体作成後は速やかに試料脱気を行った.

② 供試体のセット

作成した供試体は、図 3.4-1、図 3.4-2 に示すアクリル製の拡散セルに、2つのセルで挟み込むようにセットした.

③ 供試体の脱気

供試体セット後,両セルに脱イオン水を入れ真空槽にて脱気を行った.

④ 拡散試験の開始

供試体の脱気を完了後、トレーサーセル側の脱イオン水をトレーサー溶液(ヨウ化カリウム水溶液) と交換し、拡散試験を開始した.この時、動水勾配による溶液の移流が発生しないよう、トレーサー 溶液および脱イオン水の容量はともに 50ml とし、両セルの水位を同じにした.

⑤ 測定セル側溶液のサンプリングおよび脱イオン水の補充

試験開始の1時間後から10時間後までは、1時間おきに測定セルから20ml ずつサンプリングし、 サンプリング後は同量の脱イオン水を測定セルに補充した.また、10時間後以後は、同様の方法で1 日に2回のサンプリングを実施した.なお、測定セルの脱イオン水の補充により生じる希釈の影響は、 サンプリング毎の量とその濃度から補正を行った.

⑥ サンプルの分析

サンプリングした溶液中に含まれるヨウ化物イオン濃度を ICP 発光分光分析(定量下限値:0.01 mg/L)により求めた.



図 3.4-1 拡散実験装置概要

側面図



図 3.4-2 拡散実験装置および供試体の概観

### (1) 試験条件

表 3.4-1 に試験条件の一覧を示す. トレーサー溶液にはヨウ化カリウム(KI)水溶液を用い,トレーサー濃度は,ヨウ化物イオン(I⁻)濃度を対象に測定した. また,溶液濃度は,ヨウ化物イオンの酸化による測定結果への影響を考慮して,低濃度のI⁻ 500 (mg/L)とした.

表 3.4-1 試験条件一覧

項目	実験条件
	ヨウ化カリウム水溶液
トレーサーセル側	・濃度:I 500 (mg/L)
	・容量:50 (ml)
測会われ側	脱イオン水
側正でル側	・容量:50 (ml)
温度	室温(22℃~25℃)

### (2) 試験結果

試験結果を図 3.4-3 に示す.得られた試験結果を用い,以下に述べる方法で拡散係数を求める.

①解析方法

一次元の拡散方程式を、初期条件 Cp(t,x)=0, t=0, 0≤x≤H, 境界条件 Cp(t,x)=C0, t>0, x=0,
Cp(t,x)=0, t>0, x=H のもとで解くことにより、次式を得る.

$$Cd = \frac{Sr \cdot H \cdot C_0}{Vm} \left[ \frac{De \cdot t}{H^2} - \frac{\alpha}{6} - \frac{2\alpha}{\pi^2} \times \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{(-1)^n}{n^2} \cdot \exp\left(-\frac{De \cdot n^2 \cdot \pi^2 \cdot t}{H^2 \cdot \alpha}\right) \right\} \right]$$
(3.4-1)

ここに、Cp:間隙水中のトレーサー濃度、t:時間,x:拡散源からの距離,H:試料の厚さ(m), C₀:トレーサーセル中のトレーサー濃度(mg/L),Cd:測定セル中のトレーサー濃度(mg/L),Sr: 試料の断面積(m²),De:実効拡散係数(m²/s),Vm:測定セル中の溶液体積(m³)である.また,  $\alpha$ は収着容量であり、 $\alpha$  = n +  $\rho$ ・Kd(n:試料の有効間隙率, $\rho$ :試料の乾燥密度(kg/m³),Kd: 分配係数(m³/kg))で与えられる.

ここで、上式(3.4-1)の指数項部は、試験時間のあまり経過していない初期の非定常状態における Cd の経時変化を表しており、ある程度の時間が経過した後は、これを無視できる.従って、上式(3.4-1)は、近似的に次式(3.4-2)のように表せる.

$$Cd = \frac{Sr \cdot H \cdot C_0}{Vm} \left( \frac{De \cdot t}{H^2} - \frac{\alpha}{6} \right)$$
(3.4-2)

つまり,実効拡散係数は,時間に対する濃度増加の傾きから,(3.4-2)式により求められる. さら に,見かけの拡散係数を次式で与えられるタイムラグ法によって求めた.

$$Da = \frac{H^2}{6T_{\text{int}}} = \frac{De}{\alpha}$$
(3.4-3)

ここに、Da: 見かけの拡散係数(m²/s)、T_{int}: 測定セル中のトレーサー量が0となる時間(s)である.

②解析結果

解析により求めた実効拡散係数,見かけの拡散係数および収着容量を表 3.4-2 に示す.実効拡散係数は, 2.13×10⁻¹⁰ (m²/s)であり,既往の声問層試料を対象とした試験結果と比べると,平均的な値となった(図 3.4-4).また,収着容量から求めた分配係数を求めると,0に近い値となることから,当試料へのヨウ化物イオンの収着量は非常に小さいものと考えられる.

中场在由	地园夕	=++±1々	実効拡散係数	見かけの拡散係数	収着容量	分配係数	有効間隙率
关旭牛皮	地層石	武科石	De (m²/sec)	Da(m ² /sec)	α	m ³ /kg	n _e
本研究	声問層	換気立坑 (GL30.6m)	2.13E-10	3.21E-10	6.63E-01	4.91E-05	0.615
	稚内層	9-2i1	4.19E-11	2.50E-08	1.67E-03	0.00E+00	0.426
	稚内層	9-1i-h	2.94E-11	3.38E-10	8.70E-02	0.00E+00	0.426
	稚内層	9-1i-v	3.52E-11	4.26E-10	8.26E-02	0.00E+00	0.440
平成16年度	声問層	10-1i-h	9.22E-11	1.76E-09	5.23E-02	0.00E+00	0.486
	声問層	10-1i-v1	9.60E-11	2.97E-10	3.23E-01	0.00E+00	0.486
	声問層	11-2i-h3	3.22E-10	4.63E-10	6.94E-01	6.43E-05	0.639
	声問層	11-4i-h1	1.46E-10	2.93E-10	4.97E-01	0.00E+00	0.546
	声問層	6-2i-h	6.78E-10	6.01E-10	1.13E+00	5.42E-04	0.598
	声問層	6-2i-v	3.30E-10	1.58E-09	2.09E-01	0.00E+00	0.596
	声問層	6-4i-h	2.59E-10	1.56E-09	1.66E-01	0.00E+00	0.534
亚式15年度	声問層	6-4i-v	2.08E-10	1.29E-09	1.61E-01	0.00E+00	0.537
十成15年度	勇知層	7-1i-003	1.44E-10	5.52E-10	2.61E-01	0.00E+00	0.447
	勇知層	7-1i-902	9.50E-11	9.41E-09	1.01E-02	0.00E+00	0.469
	勇知層	7-2i-2	1.17E-10	1.02E-09	1.15E-01	0.00E+00	0.440
	勇知層	7-3i	2.32E-10	1.70E-08	1.36E-02	0.00E+00	0.457
	稚内層	2-2i	2.34E-11	6.86E-11	3.42E-01	0.00E+00	0.414
平成14年度	稚内層	3-4i	2.55E-11	3.36E-11	7.58E-01	2.40E-04	0.384
	稚内層	4-2i	8.16E-12	3.84E-11	2.12E-01	0.00E+00	0.332

表 3.4-2 拡散試験結果(既往データとの比較)







図 3.4-4 実行拡散係数と有効間隙率の関係(既存データとの比較)

#### 3.4.2 トレーサー試験

#### (1) 試験装置および方法

トレーサー試験は、コア試料の拡散試験で用いた拡散セル装置を応用したセル型のトレーサー試験 装置を用いて行った.試験装置の概要を図 3.4-5 に示す.本装置は試料をトレーサーセル(注入側) と測定セル(排水側)の2つのセルで挟み込み、トレーサーセルより一定流量でトレーサー溶液を注 入し、測定セル側の溶液濃度の経時変化を測定するものである.本装置の特徴を以下に示す.

- ・ 注入流量が少なくてもフラッシングの必要がない
- 配管内分散が生じない
- 蒸発の影響を受けない

これらの特徴から、本試験法は、今回のように極微少流量条件下での試験を行う必要がある場合に 有効な試験方法であるといえる.

なお、本試験では、トレーサー溶液の注入に超微少流量を高精度で送液することが可能なシリンジ ポンプを用い、測定セル側の濃度測定には、イオンメーターを用いた.また、濃度測定は、イオンメ ーターによる連続測定に加えて、図中に示すサンプリングロより1日2回の頻度でサンプリングを行 い、ICPによるトレーサー濃度分析も行った.また、測定セル内に排出されたトレーサー溶液の濃度 分布を一様にするために、測定セル内は、常時、スターラーによる攪拌を行った.以下に試験の手順 について説明する.

① シリンジポンプの設置

3.3.2節の定流量透水試験を完了した後,図 3.4-5 に示すように,注入側の堰をトレーサー注入用の シリンジポンプに付け替える.この際,シリンジ内ならびにシリンジから注入側セルまでの配管内を 全てトレーサー溶液に置換する.なお,入替え作業時には,配管やバルブ内のエア抜きを確実に実施 する.

② トレーサー溶液への入替え

測定セル側のバルブを閉じたまま,注入側セル内の脱イオン水をトレーサー溶液(ヨウ化カリウム 水溶液)と入れ替える.作業時には,試料内ならびに配管継手などにエアが混入しないように注意す る.

③ シリンジポンプの始動

注入側配管の三方バルブをドレイン側にセットし、シリンジポンプを始動する.シリンジポンプは、 始動後、シリンジの押子とスライダーの接触がなじむまで注入流量が一定にならないため、ポンプ始 動直後は試料への注入は行わず、ドレイン方向に排水し、注入流量が一定になったことを確認した時 点で試験を開始する. ④ トレーサー試験の開始

シリンジポンプの注入流量が一定になったことを確認した後,注入側の三方バルブを試料方向に切り替え,それと同時に排出側のバルブを開放して,トレーサー試験を開始する.

⑤ 測定セル側溶液の濃度測定およびサンプリング

イオンメーターによる連続測定により,試験開始直後からの測定セル側の溶液濃度の経時変化を測定する.また,試験開始当日から1日2回の頻度で5mlのサンプリングを行い,ICPによるヨウ化物イオン濃度測定を行った.なお,サンプリング後は同量の脱イオン水を測定セルに補充した.測定セルの脱イオン水の補充により生じる希釈の影響は,サンプリングした溶液の量とその濃度から補正を行った.

⑥ サンプルの分析

サンプリングした溶液中に含まれるヨウ化物イオン濃度を ICP 発光分光分析(定量下限値:0.01 mg/L)により求めた.



図 3.4-5 ブロック試料用セル型トレーサー試験装置概要

### (2) 試験条件

試験条件を表 3.4-3 に示す. トレーサー溶液は拡散試験と同様に, ヨウ化カリウム水溶液を用いた. また,注入するトレーサー溶液の濃度および注入流量は、測定セルの容量、シリンジポンプの容量、 イオンメーターの測定精度等から,I-500 (mg/L)、および q=0.005 (cc/min) とした.

	試験条件
	ヨウ化カリウム水溶液
トレーサーセル側	・濃度  :I ⁻ 500 mg/L
	▪注入流量:q=0.005 cc/min
当中すこ言	脱イオン水
別たビル側	・イオンメーターにより濃度測定

表 3.4-3 トレーサー試験条件

#### (3) 試験結果および解析結果

トレーサー試験結果を図 3.4-6 に示す.これより,試験結果は,マトリクス拡散による遅延の影響 を受け,測定濃度の経時変化のプロットが,下に湾曲しながら上昇していることが分かる.

同試験結果を用いて,試験と同様の条件を与えた数値解析により得られた濃度上昇曲線と試験結果 とのフィッティングにより, 亀裂部の物質移行開口幅ならびに分散係数(分散長)を逆解析的に求め た.数値解析には, 3次元物質移行解析コード FRAC3DVS (ver.3.49, Therrien 他, 1996)を用 いた.なお,物質移行開口幅は曲線の傾きに,分散長は曲線の立ち上がりの部分に大きく影響するの で,両者は独立して決定することができる.

解析条件を表 3.4・4 に示す.既知パラメータとして与えた水理開口幅,マトリクス部の透水係数, マトリクス部の実効拡散係数,間隙率は,前述の透水試験,拡散試験,基本物性測定結果を参考に設 定した.解析モデル(図 3.4・7)は,試験で使用した試料と同寸法の断面の中心に平板亀裂を配置し, 亀裂面を挟んで対称としたものである.流れ方向の長さは,分散長よりも十分長くとるため,250mm とした. 亀裂面は面要素でモデル化した.境界条件は,左右面を水頭固定境界,上下側面を不透水境 界とした.ここで,試験条件が定流量条件にもかかわらず,左右面を水頭固定としたのは,マトリク ス部と亀裂部に流れる流量比が未知であるため,解析上,流量を固定できないためである.

図 3.4-6 中に解析結果を示す.図 3.4-6 に示すように,解析結果と測定結果の良い一致が見られた. また、トレーサー試験の解析から得られた物質移行開口幅は 0.031 (mm) であり、事前に実施した 定水頭透水試験結果から三乗則により求めた水理開口幅とほぼ同等の値となった.一般に、透水性に 寄与する水理開口幅は、亀裂幅の狭いところの効果が卓越するのに対し、物質移行開口幅は、平均的 な開口幅の影響を大きく受けるため、物質移行開口幅の方が水理開口幅よりも数倍以上大きくなるこ とが報告されているが、今回の結果は、この傾向と一致しない.これは、今回の試料が平行平板亀裂 試料であり、亀裂の面内不均一性が小さいことに起因するものと考えられる.

また、図 3.4·8 より、物質移行開口幅と透水量係数の関係において、物質移行開口幅と $\sqrt{T}$ の間に 直線的な相関があることが分かる. さらに、花崗岩サイト(釜石鉱山原位置試験場)において、原位 置スケールの亀裂に対して、物質移行開口幅 e と透水量係数 T の間に次の関係:  $e = 2\sqrt{T}$  が示され ている(Shimo 他、1999)が、今回の試験結果は、この傾向よりも、やや小さめの開口幅が得られて いる. 分散長については、一般的に移行経路の 1/10~1/100 の値を示すと言われており、今回の結果はこの傾向とほぼ一致している.この結果を既往の実験結果(図 3.4-9:新藤他, 1995)および昨年度の 試験結果と比較すると、ほぼ同一のトレンド上にあり、従来から指摘されている分散長とスケールの 関係が、当試料においても同様の回帰直線により表せる可能性が示された.



表	3. 4–4	ブロック試料	トレー	サー	試験解析入	,力条件一	·覧
---	--------	--------	-----	----	-------	-------	----

試料名	<b>注入流量</b> (cc/min)	水理開口幅 (mm)	マトリクス部 透水係数 (m/s)	マトリクス部 実効拡散係数 (m2/s)	マトリクス部 有効間隙率 (%)
試料7	0.005	0.029	1.35E-10	2.13E-10	60.0
設定根拠	試験条件より 設定	透水試験結果 より設定	透水試験結果 より設定	拡散試験結果 より設定	基本物性試験 結果より設定



図 3.4-7 トレーサー試験の解析条件 (ブロック試料:B-3)



図 3.4-8 透水量係数と物質移行開口幅の関係(釜石原位置試験データとの比較) (Shimo 他, 1999)



図 3.4-9 分散長と試験スケールの関係(既往データとの比較) (新藤他, 1995)

### 4. 亀裂を考慮した堆積岩の水理・物質移行挙動の検討

岩盤中の物質移行現象の評価においては、物質の移行経路となる岩盤空隙内の地下水の流速(実流 速)を適切に評価することが重要である.また、一般に、実流速はダルシー流速を有効間隙率で除す ことにより求められ、この有効間隙率を設定する際には、物質の移行に寄与する空隙を適切に評価す る必要がある.

花崗岩などの結晶質岩では、一般的に、岩石マトリクス部の間隙率は小さく、かつ亀裂を有するため、岩盤内の物質の移行に寄与する空隙は主に亀裂であり、亀裂内の実流速を規定するパラメータである亀裂開口幅の評価が重要となる。一方、本件で対象とする幌延地域の堆積岩は、結晶質岩と同様に、主要な水みちとなり得るような亀裂が存在し、かつマトリクス部の間隙率が大きいため、岩盤内の物質移行現象の評価においては、亀裂内の移流に加えて、亀裂からマトリクス部への拡散現象を考慮する必要があることが示唆されている。このような場合、岩盤内の物質の移行に寄与する空隙は亀裂およびマトリクス部の粒子間間隙であり、これらの空隙内の移行に影響を与えるパラメータとして、 亀裂開口幅やマトリクス部の間隙率の評価が重要となる。ただし、これらのパラメータは、岩盤内の移流、分散、拡散などの各移行現象において、それぞれ異なる現象を規定するものであり、各々のパラメータが岩盤全体の物質移行現象に与える影響を別々に把握しておく必要がある。

そこで、本章では、亀裂を有する堆積岩を対象として、上記の岩盤内の物質移行に寄与すると考えられる2つのパラメータのうち、特に亀裂開口幅に着目し、その違いが岩盤全体の物質移行現象に与える影響について解析的な検討を行った.

具体的には、単一の平行平板亀裂を有するモデルを用いて、流速場の異なる3ケースについて、物 質移行解析を実施し、亀裂内の実流速の違いが、岩盤内の物質移行現象に与える影響について確認を 行った.

なお,解析は,室内トレーサー試験の評価と同様に,三次元物質移行解析コード FRAC3DVS (ver.3.49, Therrien 他, 1996)を用いて行った.

### 4.1 解析モデルおよび解析条件

解析モデルは、亀裂内の移流とマトリクスへの拡散現象を再現するために、図 4.2-1 に示すような 25m×10mの X-Z 平面上に、単一の平行平板亀裂を配置したものを用いた.

解析は、まず、モデル左右両端(X=0,25m)を定水頭境界、側面(Z=0,10m)を不透水境界とした地下水流動の定常解析を実施し、その後、得られた流速分布を用いて物質移行解析を実施した.物質移行解析は、上流側(モデル左端のX=0)全面のトレーサー濃度を1.0で固定し、所定時間を経過した後、濃度を0に変更して、トレーサー注入後の水による洗い出しを模擬した解析を実施した.すなわち、上流側では一定期間のみ一定濃度でやや幅広のパルス状にトレーサーを注入する境界を適用した.なお、トレーサーの注入時間については、各ケースでモデル内に流入するトレーサーの総量を統一するために、モデル内の空隙体積 $V_{por}(V_{por}=V \times n, V$ はモデル体積、n は間隙率)に相当する量の注入を完了した時間(トレーサー注入時間:t =  $V_{por}/Q$ ,Qは流量)として設定した.解析結果は、図中に示す観測断面(X=10m断面)における平均トレーサー濃度の時間変化として出力した.

今回の解析では、同様のモデルで亀裂部とマトリクス部のパラメータを固定して、動水勾配を変え

た3ケース(動水勾配: i = 0.01, 0.005, 0.001) について物質移行解析を実施し、流速場の違いが岩 盤内の物質移行現象に与える影響について考察を行った.

### 4.2 パラメータの設定および解析ケース

本解析におけるパラメータの一覧を表 4.2-1,表 4.2-2 に示す. 今回の解析では,幌延地域において,特に亀裂内の流れが卓越すると考えられる「稚内層」を想定したパラメータ設定を行った.また, 各パラメータは,幌延地域における試験や室内試験の結果に基づいて設定した.以下に,各パラメー タの設定根拠について説明する.

### 4.2.1 亀裂パラメータの設定

(1) 亀裂開口幅

亀裂開口幅は、幌延地域で実施された現場での水理試験結果に基づいて設定した.

原子力機構では、これまでに実施された地表からの調査結果に基づいた水理地質構造モデルの構築 を行っている.その中で、特に稚内層については、流体検層で検出された地下水の流入・流出箇所、 すなわちフローポイント(以下,FPと呼ぶ)の近傍に位置する亀裂が地下水の主要な水みちとして 機能している可能性が高いことが明らかとなってきており、水理試験結果においても、FPを含む区 間の方が含まない区間よりも高い透水性を有する結果が得られている(図 4.2-2,図 4.2-3,表 4.2-3). そこで、本解析では、稚内層を対象とした水理試験結果のうち、特にFPを含む区間の平均的な透水 量係数に基づいて亀裂開口幅を設定した.

なお, 亀裂開口幅のうち, 水理開口幅(t_H)については, 三乗則(式(4.1))に基づいて設定し, 物質移行開口幅(t_r)については, 花崗岩サイト(釜石鉱山原位置試験場)で実施されたトレーサー 試験で得られた開口幅と透水量係数の関係式(4.2)に基づいて設定した.

$$t_H = \sqrt[3]{\frac{12\mu T}{\rho g}} \tag{4.1}$$

 $t_T = 2 \times \sqrt{T} \tag{4.2}$ 

(2) 分散長

分散長は、対象とするスケールによって異なり、一般に移行距離の 1/10~1/100 の値であると言われている.また、本件で実施した室内トレーサー試験結果においてもこの傾向と整合的であった(図 3.4-9).そこで、今回の解析では、亀裂の縦方向分散長( $\alpha_f$ )を移行距離(トレーサー供給源から濃度観測断面までの距離:10m)の 1/10 である  $\alpha_f$ =1.0m に設定した.

### 4.2.2 マトリクスパラメータの設定

(1) 透水係数

マトリクス部の透水係数(km)は、これまでに、幌延地域でのボーリング調査で得られた岩石試料 を用いて実施された室内透水試験結果(表 3.3-3)のうち、稚内層の平均的な値を設定した. (2) 拡散係数

マトリクス部の実効拡散係数(De)は、これまでに、幌延地域でのボーリング調査で得られた岩石 試料を用いて実施された室内拡散試験結果(表 3.4-2)のうち、稚内層の平均的な値を設定した.

(3) 分散長

今回対象とする稚内層の透水性は亀裂の透水性と比べて小さいため、マトリクス内の移流は無視し 得ると仮定し、マトリクス部の分散長αm=0と仮定した.

(4) 間隙率

マトリクス部の間隙率(n)については、これまでに、幌延地域でのボーリング調査で得られた岩 石試料を用いて、稚内層を対象として実施された基本物性試験結果(表 3.2-1)の平均的な値を設定 した.



図 4.2-1 解析モデルの概要

衣 4.2-1 黾殺ハファーツ-	一覧
------------------	----

パラメータ	値	単位
水理開口幅	1.00E-04	m
物質移行開口幅	1.00E-03	m
分散長	1.00	m

表 4.2-2 マトリクスパラメーター覧

パラメータ	値	単位
間隙率	40	%
透水係数	1.0E-11	m/s
拡散係数	1.0E-11	m²/s
分散長	0	m



図 4.2-2 フローポイントと水理試験区間の関係



図 4.2-3 水理試験結果(稚内層)

表 4.2-3 フローポイントの有無と透水量係数の関係(水理試験結果)

	全区間 T(m ² /s)	FP区間 T(m2/s)	FP区間以外 T(m2/s)
最小値	2.55E-04	2.55E-04	2.69E-06
最大値	1.96E-11	2.01E-08	1.96E-11
対数平均値	2.22E-07	3.62E-06	1.20E-08

### 4.3 解析結果

図 4.3・1 に観測断面におけるトレーサー濃度の経時変化を示す. 観測断面におけるトレーサー濃度 は、観測断面を通過するマスの総量を流量で除した値として計算した. これより、動水勾配の違いに よって、観測断面での濃度上昇および低下の勾配は異なり、動水勾配が小さくなるほど濃度変化が遅 くなることが分かる. また、濃度上昇のピークについても、動水勾配が小さくなるほどピーク濃度が 小さくなることが分かる. ただし、今回のように動水勾配を変化さたケースについて濃度変化の比較 を行う場合は、図 4.3・1 のような通常の破過曲線では、各ケースの同時刻でのトレーサー注入量が異 なるため、濃度変化の違いが、トレーサー注入量の違い(すなわち亀裂内の移流による移行量の違い) によるものか、マトリクス拡散による遅延によるものかを分離して評価することが困難である. そこ で、今回は、図 4.3・2 に示すように、破過曲線の時間軸を次式により正規化したプロットを作成し、 観測断面での濃度変化の違いについて考察を行った.

$$t^* = t \times \frac{Q}{V} \tag{4.3}$$

ここに、t*は正規化時間(・)、t は時間(s)、Q は注入流量(m³/s)、V は注入断面と観測断面間の モデル体積(m³)である.ただし、解析条件より、水による洗い出し直前のトレーサーの総注入量は、 モデル体積 V に占める空隙量  $V_{por}$ (m³)と等しいため(Q×t=V^{por})、洗い出し直前の正規化時間は、  $V_{por}/V$  すなわち間隙率(n=0.4)と等しい値となる.図 4.3・2 のように、時間軸を正規化した破過曲 線を用いることにより、各時間におけるトレーサー注入量の違いによる観測断面の濃度変化の違いは 除かれ、マトリクス拡散による遅延の影響のみを評価することができる.

図 4.3・2 より、時間軸を正規化した破過曲線の濃度変化は、動水勾配の違いによって異なり、動水 勾配が小さいほど、濃度上昇および低下の勾配やピーク濃度が小さくなる傾向が見られる.これは、 動水勾配が小さいケースでは、亀裂内の流速が小さくなり、やや幅広のパルス状(一定期間のみ一定 濃度で)に亀裂に注入されたトレーサーが亀裂内を滞留する時間が長くなるため、亀裂からマトリク ス部への拡散量が相対的に増加することによる遅延効果が大きくなるためと考えられる.すなわち、 マトリクス部への拡散が顕著となるような岩盤では、亀裂内の実流速の違いは、直接的には、亀裂内 の移流による移行速度に影響を与えるが、それにともなう亀裂内での滞留時間の増加によって、間接 的にマトリクス部への拡散現象による移行量にも影響を与えるということが言える.

今回は, 亀裂内の実流速の違いを表現するために, 動水勾配を変化させた場合について検討を行った. 今後, 亀裂開口幅を変化させたケースや, マトリクス部への拡散量に影響すると考えられるマトリクス部の間隙率を変化させたケースについて同様の検討を行い, 各パラメータが岩盤内の物質移行現象に与える影響について確認することが重要であると考えられる.



図 4.3-1 観測断面における濃度の経時変化



図 4.3-2 観測断面における濃度の経時変化(時間軸を流量で正規化した結果)

# 5. 堆積岩地域に見られる地下深部の諸特性を考慮した地下水流動モデルによる逆解析

### 5.1 幌延地域の間隙水圧分布に関する解析

### 5.1.1 目的

これまでの研究において、幌延地域の既存のボーリング孔 D-1 孔及び HDB-1~HDB-8 孔の現状に おける間隙水圧の計測結果を用いて各地質構造の透水性などを推定する逆解析を行い、間隙水圧分布 および透水性分布、大曲断層とヌカナン断層の構造と透水係数に関する検討を行った.その結果、声 間層上部の低透水ゾーンの存在の可能性、稚内層の透水係数、断層のサンドイッチ構造の可能性等に 関する知見を得た.これらの解析では、地表面を定水頭と仮定していたが、本研究では、地表面を定 流量(定涵養量)と仮定を変更して、これまで同様に幌延地域のおける間隙水圧の計測結果を用いて 各地質構造の透水性などを推定する逆解析を行い、間隙水圧分布および透水性分布、大曲断層とヌカ ナン断層の構造と透水係数に関する検討を行った.また、これまでの解析では地層の透水係数が等方 であることを仮定した検討を行ってきたが、それが非等方性である場合について追加検討を行った.

### 5.1.2 解析手法

解析には、Lawrence Berkeley 国立研究所開発による TOUGH2 (Pruess et al., 1999) および、逆 解析手法である iTOUGH2 (Finsterle, 1999)を用いた. 逆解析中の順解析としては Richards の式を 用いる飽和一不飽和浸透流解析モジュールである EOS9 を用いた.

### 5.1.3 解析モデル

逆解析に用いる解析モデルは、既存表層地質図、地質断面図等から作成された3次元有限要素法格 子分割(2002 モデル)を積分型有限差分法データに変換したモデルを基本モデルとして用いた.全要 素数は78,000 要素、要素の大きさは、平面的には外縁部で約1,000m、中心部で約200m、厚さは最 上部で 50m から深部で 500m まで段階的に変化させた.図 5.1-1 に、解析に用いた要素分割図を示 す.図 5.1-2 に、南北方向の中央における東西方向断面とボーリング孔配置を示す.

声問層上部に想定した低透水ゾーンは、伊藤ら(2004)のモデルを継承した。断層に関しては、粘 土化した低透水構造のみ、高透水構造のみ、もしくは高透水-低透水-高透水のサンドイッチ構造の いずれのケースの考察も可能なメッシュ分割を行った。一般に断層は周辺の水理場を大きく左右する と考えられるが、その水理性状は原位置での計測なしには一義的に決められない。大曲断層の水理性 状に関する唯一の情報は、2002年のAMT 観測から推測された電気比抵抗構造(Matsui, 2004)であ る. それによれば、断層周辺で抵抗値の高いゾーンが深部まで達しており、断層または断層に付随す る高透水性ゾーンを伝って表層水が深部まで流れ込んでいるものと推定される。



図 5.1-2 解析モデルの地質材料分布とボーリング孔位置

Geological	Encoh	Formation		Initial Permeability	Inversion
Period	просп			(m/s)	parameter
		Surface		4.00E-05	0
Quatenery		Quaternery Sediments		2.00E-05	0
Neogene	Pliocene	Yuuchi F.		2.00E-06	0
	Miocene	Low permeability zone		1.67E-10	
		Koetoi F. –	horizontal	2.00E-08	0
			vertical	2.00E-08	0
		Wakkanai F. –	horizontal	9.27E-12	0
			vertical	9.27E-12	0
		Masuhoro F.		1.00E-08	
Cretaceous		Cretaceous rock		2.00E-10	
		Omagari Fault	Core	2.00E-09	
			Sandwich	2.00E-09	
		Nukanan Fault	Core	2.00E-09	
			Sandwich	2.00E-09	

表 5.1-1 解析に用いた透水係数初期値一覧

表 5.1-1 はこれまでの解析のうち実測値と最もよく整合したモデルの透水係数の一覧であり,今回の解析の初期値である.右欄に〇の記号があるパラメータは,後述する非等方性を考慮した逆解析の対象とした地層を示す.

境界条件としては、地表面で定涵養量、底面および側面は不透水に設定した.また、非等方性の検 討では地表面を定水頭として解析を行った.逆解析における未知パラメータとしては、稚内層、声問 層については、層序に平行方向と垂直方向の透水性、増幌以浅は等方を仮定した透水係数のそれぞれ の対数値とした.

逆解析の同定対象とする計測データは、HDB-1 孔から HDB-8 孔までの MP システムによる間隙水 圧から換算された全水頭とした. その際に, MP システムの測定区間中心を代表点とし, 代表点に最 も近い解析格子中心の定常的な全水頭値を計算値として逆解析を実施した. D-1 孔のデータは HDB 孔と比較して測定時期が古い事と,以前の解析の結果から, D-1 データが殆ど逆解析結果に影響を及 ぼさなかった事から同定対象から除外した. 図 5.1-3 に各孔の平面的な位置関係を示す. この図から 明らかなように, HDB-2 孔は他のボーリング孔から遠く,逆に残りのボーリング孔は隣接している. HDB_2 孔で観測される異常高圧は突出しており,他の孔では見られない. HDB-2 孔で見られる異常 高圧の原因は HDB-2 孔周辺に限られる要因とも考えられる. また,その他の HDB 孔は隣接してお り,水頭分布が似通っている.



図 5.1-3 HDB 孔の平面的な位置関係

### 5.1.4 涵養量に関する考察

前述のように、これまでは地表面の境界条件を定水頭として解析を行ってきており、さらに自由地 下水面が地表にある場合と、-5m、-10m である場合の検討も行った.このようにして地下水面を 下げる事によって浅部の再現性が向上した.しかし、モデル領域全域に渡り、例えば-10mの固定地 下水位を仮定するには多少無理があることから、今回は涵養量固定のケースについて解析を行った.

そもそも涵養量を現場で直接計測するのは非常に困難であり、今回の対象のような広い範囲で信頼 のおける涵養量のデータは往々にして得がたい.そこで、間接的に涵養量を推定する方法として、河 川の2点間の流量差から推定する方法及び温度データから涵養量を推測する方法を検討する.これま で、直接涵養量の推定こそ行わなかったが、河川流量と温度データをもとに透水係数の推定を行い、 モデル全体の透水係数をおよそ 20 倍に設定した経緯がある.これまで、HDB 孔の水頭分布を使って 逆解析で透水係数分布を求めているが、もともと、水頭分布による逆解析からは透水係数の相対的な 分布は同定可能でも、絶対値は同定できない.そこで、モデルの地表面境界を固定水頭と仮定し、涵 養量について直接キャリブレーションせずに、透水係数のキャリブレーションを行って河川流量と温 度データの整合性を求めた.

図 5.1・4 に天塩川と流量の位置関係を示す.図 5.1・4 は国土地理院による新問寒別橋と天塩大橋間 の流量差データである.データに大きなバラツキがあるものの,その差はおよそ 5m³/s の範囲にある. このデータが対象地域の涵養量を反映していると仮定し,基本ケースモデルの涵養量と比較した際, モデルの涵養量はおよそ 1/10の 0.5m³/s であった.また,温度データに関しては,幌延の北に位置す る豊富温泉では,33℃の湯を深度 500m~1000m から汲み上げているとの報告がある.図 5.1・5 に基 本ケースモデルの透水係数を等倍に変化させた場合の深度方向の温度分布と豊富温泉のデータから推 定される温度分布を示す(伊藤ら,2004). この図から,豊富温泉のデータと整合性を持たせるため にはモデル全体の透水係数は 5~50 倍である必要があることがわかる. これら河川流量と温度データ の2つの点を加味し,基本ケースモデルの20倍の透水係数とした.



図 5.1-5 モデルの透水係数と温度分布の関係

数値解析的には、モデルの地表面に設定する境界条件については、地下水面は地表と一致するとは 限らず、地表から地下水面の間は不飽和、二相流であると考えられ、一般に TOUGH2 のようなシミ ュレーターでは圧力と流量の両方を1つの要素に同時に設定できないことから、地表面の要素の上に さらにダミーの要素を繋げて大気圧に設定し、地表面要素を固定流量にするが、その際設定された流 量のすべてがモデル内部に流れ込む保証はない.透水係数や要素の位置によっては、ダミー要素に逆 流する場合があり、流出域となる.これはダミー要素と地表面要素の間の透水係数を調節することに よってある程度軽減されるが、透水係数を低く設定しすぎると、不透水境界と同様の設定をした事に なる.また、計算される圧力水頭値から浸出面を求め、浸出面に相当する格子点を圧力水頭0と置く 手法もある.理想的には信頼できる涵養量を使って透水係数を同定するのが最良の方法と言える.あ るいは、温度分布データのような何らかの観測データと合致するように各表面要素の涵養量について 逆解析を行う方法も考えられる.したしながら、これは現時点では非現実的であると考える.その理 由の第一には、利用可能な逆解析を制約するデータ(各 HDB 孔の水頭データ)が極めて少なく局所 的であり、モデル全体の感度が極端に低い事と、第二に地表面の要素数は 3000 を超えるので、それ らのすべてを未知数にして逆解析を行うには計算時間が掛かり過ぎる事である.

理想的には、地表流や蒸発散を考慮したシミュレーターを使うのが望ましいが、分配係数等の推定 困難な新たなパラメータが必要となり、自由度がさらに増してしまう.そこで本研究では、涵養量を 地表面各要素で同一(単位面積当り)としキャリブレーションを行った.



図 5.1-6 各涵養量ケースの HDB-1 沿いの水頭分布と観測データの比較

図 5.1-6 に年間涵養量が 32mm, 16mm, 3.2mm のそれぞれのケースの HDB-1 孔沿いの水頭分布 を示す.年間降雨量がおよそ 1,000mm とすれば,各々その 1/30 から 1/300 が実際に深部に涵養し ていると仮定した事になる.この図から年間涵養量が 16mm のケースが最も HDB-1~HDB-8 までの 水頭分布に近いことがわかる.他の HDB 孔についても同様な結果であった.ただし,HDB-2 孔につ いては 32mm のケースが異常高圧部の分布に近かったが,深度の浅い部分の水頭には全く一致しなか った.図 5.1-7 にはそれぞれのケースの飽和度分布を示す.比較的標高の高い部分で涵養量が少ない ほど不飽和領域が広がっていることがわかる.また,図 5.1-8 に地表面を定水頭とした従来の地表面 境界条件と涵養量が 16mm とした定流量の境界条件を与えた場合のモデル全体の水頭分布を示す.定 水頭のケースでは,地表面の標高が水頭と一致するが,定流量とした場合は、図からわかるように水 頭分布が地表面と一致していない.深部についてはほぼ同様な分布を示しているが,後者の方が東側 で高い傾向を示している.これは、地表部の圧力が大気圧よりも高くなっている事にも起因している と考えられる.ちなみに 16mm/yr の涵養量は天塩川の河川流量差に当てはめると,1.25m³/s となり, 前出の計測値の平均である 5m³/s のおよそ 1/4 である.

次に表層の要素の流量(正確には質量)を固定するのはいささか非物理的であるので前出のように、 地表面で大気圧を担保する為に地表面要素それぞれに大気圧で固定したダミーの要素をつなげたケー スを検証した.こうする事によって、各要素に与えられた全流量がモデル内部に入る保障はないが、 地表面は大気圧に保たれる.図 5.1-9 から明らかなように、32mm と 16mm のケースに大差がなく、 地表面の要素に与えた涵養量のすべては地中に流入していないことがわかる.これらのケースの HDB 孔における水頭分布は図 5.1-7 の 3.2mm のケースに近い.

以上のことから、モデルの平均透水係数が実際に近いとすれば、16mm/年の涵養量も現実に近いと 考えられる.河川流量から考えれば、さらに5倍程度平均透水係数が大きい可能性もある.地表面の 涵養量を正しく考慮するためには、地下水面レベルの分布データあるいは、涵養量の詳しい分布デー タが望まれる.両者のデータが得られれば、信頼度の高い透水係数分布の逆解析が可能となる.



図 5.1-7 年間涵養量を変えた場合の飽和度の分布の比較

(a) 32mm, (b) 16mm, (c) 3.2mm



図 5.1-8 定水頭境界(上)と16mm/yrの定流量境界(下)の場合の水頭分布の比較



図 5.1-9 地表面要素を大気圧に保ったダミー要素を繋げたケースの解析結果 (a) 16mm/yr, (b) 32mm/yr

# 5.1.5 解析結果

以下,図 5.1-10~図 5.1-17 に各 HDB 孔での観測値と各ケースの計算全水頭値の比較を示す.



図 5.1-10 HDB-1 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較



図 5.1-11 HDB-2 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較



図 5.1-12 HDB-3 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較



図 5.1-13 HDB-4 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較


図 5.1-14 HDB-5 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較



図 5.1-15 HDB-6 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較



図 5.1-16 HDB-7 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較



図 5.1-17 HDB-8 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較

図 5.1-10~図 5.1-17 に見られるように、定水頭境界条件での解析結果(ケース 0~8) に比較して 涵養寮を 16mm に設定した場合、全体的に観測値により近い結果が得られた.また、観測されている 水頭の絶対値とは一致しなくても、傾向としては一致したケースが多く見られる.以下に各孔ごとの 結果をまとめる.

・HDB-1 孔: すべての孔についてほぼ共通であるが、観測データの中間的な水位を示す結果となった. 全体的には「く」の字型の分布を示し、より深部では水頭が高い傾向にある.

・HDB-2 孔:最も浅い高い観測点の水頭はほぼ再現されたが、全水頭値が深度によらずほぼ一定の値を示している.その下位の異常高圧の観測値は再現されていない.この異常高圧は局所的で、地形以外の要因によるものと考えられる.

・HDB-3 孔:他のケースに見られるジグザグ的な浅部の水頭減少傾向がなくなったが、全体的には「く」の字型の傾向を示し、深度 100m までは低下傾向となっている.計算値はいままでと同様に4点の観測値の平均的な値を示した.

・HDB-4 孔:実測と計算の全水頭値の絶対値のずれはこれまでより低減された.深度方向の水位変化はほぼ再現できている.

・HDB-5 孔: これまでのケースに比べて水頭変化の傾向が逆で, -500m までは深度に伴って水頭 値が高くなっているが,計算値は4点の観測点の水頭値のほぼ中間点を通っている.

・HDB-6 孔:実測は全体的に深度に伴い水頭値に増加傾向があるるが、計算は深度 1000mまでは 減少する逆の傾向となっている.計算値は実測値の平均値を通っている.

・HDB-7 孔:これまでのケースに比べて,実測値に近い水頭値が再現されている.実測に見られる,浅部の細かい深度に伴う水頭値の低下-上昇傾向は再現されていないが,実測水頭値の平均値的値となっている.

・HDB-8 孔:細かい変化は再現できていないが,実測データにかなり近い計算データとなった. 比較するデータはないが,深部にの水頭値は高い値を示している.

図 5.1-18 に涵養量が 16mm/yr のケースの解析結果から HDB ボーリング孔周辺を含む南北断面お よび東西断面のモデルの水頭分布を示す.図 5.1-19 は東西断面を拡大し、断層の位置を分かり易く する為にメッシュを重ねて表示している.これらの図から明らかなように、大曲断層と特にヌカナン 断層が HDB 孔周辺の水理場に大きく影響を与えていることがわかる.

-61-



(a)



(b)

図 5.1-18 涵養量が 16 mm/yr のケースの HDB 孔近傍の水頭分布 (a) 南北断面, (b) 東西断面





### 5.1.6 非等方性の検討

次に、これまでは全ての地層は透水性に関して等方であると仮定して解析を行ってきたが、堆積岩 の多くは層序方向の透水係数が層序に直角方向の透水係数より高い傾向があることが知られている事 から、これまでの解析のうち実測値との整合がよいモデルにおいて、層序方向とそれに直交する方向 の透水係数に関して自由度を与え、さらなる逆解析を行った.非等方解析の対象とした地層は、表 5.1-1 に示すように、声問層、及び稚内層である.同時に勇知層、第四期層、表層の透水係数は等方 を仮定し、自由度を与えた.

以下,図 5.1-20~図 5.1-27 に各 HDB 孔での観測値と各ケースの計算全水頭値の比較を示す.



図 5.1-20 HDB-1 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較



図 5.1-21 HDB-2 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較



図 5.1-22 HDB-3 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較



図 5.1-23 HDB-4 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較



図 5.1-24 HDB-5 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較



図 5.1-25 HDB-6 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較



図 5.1-26 HDB-7 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較



図 5.1-27 HDB-8 孔における観測値と各ケースの計算全水頭との比較

声問層,稚内層の層序方向とそれに直交する方向の透水係数を独立させ,勇知層,第四期層,表層 の透水係数と併せて逆解析を試みたが,全体としては実測値にあまり合致する結果が得られなかった. ただ,孔によってはこれまでより実測値に近くなったところも見られた.表 5.1-2 に逆解析の結果得 られた透水係数を示す.稚内層の層序方向の透水係数は逆解析で設定した最低限の透水係数となった. つまり,水平方向には不透水となった.また表層と第四期層は3オーダー下がり,逆に勇知層は1オ ーダー高く,声問層の垂直方向の透水係数は1オーダー低くなった.

Geological Period	Epoch	Formation		Initial Permeability (m/s)	Final Permeability (m/s)
		Surfa	ace	4.00E-05	4.30E-07
Quatenery		Quaternery S	Sediments	2.00E-05	2.60E-10
Neogene	Pliocene	Yuuchi F.		2.00E-06	3.60E-05
	Miocene	Low permeability zone		1.67E-10	1.67E-10
		Koetoi F.	horizontal	2.00E-08	1.34E-08
			vertical	2.00E-08	1.18E-09
		Wakkanai F.	horizontal	9.27E-12	1.00E-23
			vertical	9.27E-12	1.34E-13

表 5.1-2 非等方性を考慮した逆解析の結果

・HDB-1 孔:浅部ではこれまでの傾向と逆に深度方向に水頭値が増加し,200m 以深からは減少傾向を示した.

・HDB-2 孔:これまでのどのケースよりも低い水頭値を示した. 観測値と大きくずれる結果となった.

・HDB・3孔:これまでケースとかけ離れて、高い水頭値から減少傾向を示す水頭分布となった.

・HDB-4 孔:実測値にかなり近い値が計算されたが、水頭分布の傾向は深部ほど減少傾向になっている.

・HDB-5 孔:実測値にかなり近く,深度にそって減少する傾向を示した.

・HDB-6 孔:実測は全体的に深度に伴い水頭値に増加傾向があるるが,計算は深度 300m 以深は 減少する逆の傾向となっている.計算値は実測値のよりかなり大きい値となった.

・HDB-7 孔:計算された水頭値はこれまでのケースに比べて,実測値よりかなり高い水頭値となった..実測に見られる,浅部の細かい深度に伴う水頭値の低下-上昇傾向も再現されていない.

・HDB-8 孔:細かい変化は再現できていないが,実測データにかなり近い計算データとなった. 比較するデータはないが,深部の水頭値は他の孔と同様減少傾向を示している.

### 5.1.7 まとめと今後の課題

地表面の涵養量を固定したケースと、各地層の透水係数が非等方性であるケースについて、幌延地 域のおける間隙水圧の計測結果を用いて各地質構造の透水性などを推定する逆解析を行い、間隙水圧 分布および透水性分布、大曲断層とヌカナン断層の構造と透水係数に関する検討を行った結果、以下 の知見を得た.

・これまでの温度解析,河川流量,HDB 孔の水頭の逆解析,固定涵養量のモデル解析の結果を総合すると広域の涵養量は16mm/年前後の値であると考えられる.さらに,その4~5倍である可能性もあるが,更なるデータが必要である.

・信頼性の高い涵養量データと、より広域、より深い位置での水頭データが得られれば、より信頼 度の高い透水係数の逆解析が可能となる.

・非等方性を仮定することで逆解析結果がこれまでと大きく異なった.より深部のデータや、広域 に渡るデータが不足していることから、一義的にどの結果が正しいとは言えないが、稚内層の層序方 向の透水性がゼロではありえないので、これまでの解析結果と実測値との整合の高いモデルからスタ ートするよりも、更なる自由度を与えれば異なった結果が得られると考えられる.

・HDB 孔の水頭値分布は、ケースによってはかなり再現性が高いが、全ての孔の水頭分布を同時 に再現するまでには到っていない.一方、すべてのケースを併せれば殆どの孔井の水頭分布を包括す る事から、さらに細かい離散化とパラメータの自由度を増やすことによってさらに再現性を上げる事 は可能であると考える.しかし、データの空間的広がりと絶対数が不足しているのでより細かいメッ シュを切っても逆解析結果自体の信頼性が上がる保障は無い.現在のデータに対して最も最適な大き さの解析対象領域を選べば、今度は境界条件に関して大きな不確実性を導入してしまうことになる.

・HDB-2 孔の異常高圧ゾーンの水頭値再現は困難である.メタンガスの影響などの別のプロセス で成因を説明するのが妥当と考える.

# 5.2 応力変形一水理連成解析

## 5.2.1 目的

堆積岩地域においては異常高圧層や異常低圧層がしばしば観測される. 幌延地域で観測された水頭 データにも、一部異常とみなされる水頭値が存在する. 5.1 では、これらが地形や地質構造の分布に よると仮定し、TOUGH2 を使った定常逆解析で説明を試みた. 涵養量固定境界や、非等方性を考慮 することである程度の成功は見られたが、これらの異常圧が地形以外の原因に起因する可能性は払拭 されていない. 例えば、応力場、メタンガスの遊離、化学反応などが異常高圧の原因に挙げられる. また、立坑等の大規模掘削を行う場合には、地下水の間隙水圧分布が掘削時の変形に与える影響が無 視できない. 掘削時には、空洞への漏水と間隙水圧の低下、岩盤の変形が同時に生じ、地下水流動と 変形が直接影響しあう現象が生じている. したがって、地下水の影響を反映した変形解析には、いわ ゆる連成解析が必要となる.

ここでは、将来的には熱や化学反応の影響までを考慮する目的で、TOUGH2 を用いた連成解析の 適用性に関する基礎検討を行う. 幌延地域のデータを使って応力変形-水理連成解析を行う事により、 水頭データの説明の可能性を探る. 今回間隙率と透水係数の連成式を使った解析を行う.

## 5.2.2 解析の方法

## (1) 連成解析の概念

図 5.2-1 に地下の力学および水理場における力学的プロセスと水理学的プロセスのカップリングの



# 図 5.2-1 応力と水理のカップリング

(i)と(ii)は直接的な関係(iii)と(iv)は間接的な関係を示す.

(After Rudqvist and Stepahsson, 2003)

関係を示す.カップリングには孔隙の体積が変化することによる直接的な力学場と水理場のカップ リングに加えて、地層の力学および水理特性の変化の間接的なカップリングの2種類が考えられる.

解析は,熱・地下水流動の連成解析が可能な TOUGH2 および熱・変形の連成解析が可能である FLAC3D (Itasca Consulting Group 1997)の連成解析手法 TOUGH-FLAC (Rutquvist,J et al.,2002) を用いた. TOUGH2 に関しては,熱の移動を考慮しない飽和・不飽和浸透流解析モジュールである EOS9 を用いた.

連成解析では、それぞれの解析手法のデータを1タイムステップことにファイルに出力して、他方の入力データとして受け渡す形式をとっている. 図 5.2-2 に連成解析のデータの流れを示す.



図 5.2-2 TOUGH-FLAC3D 連成解析

すなわち,TOUGH2からは圧力,飽和度,温度が出力され,FLAC3Dの間隙水圧,温度として入力され,それを用いた変形解析が実施される.また,FLAC3Dからは応力が出力され,TOUGH2において,応力から間隙率,浸透率等が更新され,計算が行われるということが順次繰り返される.

FLAC3D は有限要素法を用い, TOUGH2 は積分有限差分法なので,前者は要素の頂点に接点が存在し,TOUGH2 は要素の中心に接点がある(図 5.2-3). そこで,2 つのプログラムの間のデータのやり取りの際に接点の変数値に関して補間が必要である.



図 5.2-3 共存する FLAC3D と TOUGH2 のメッシュ

### 5.2.3 基礎方程式

図 5.2-4 に応力と間隙率の関係に関する模式図を示す. 実際には,以下の式 (Davis and Davis, 1999) によって計算されている.

$$\phi = \phi_r + (\phi_0 - \phi_r) \exp(\alpha \sigma_M)$$
(5.2-1)

ここで、 $\phi_r$ は残留間隙率、 $\phi_0$ は応力0における間隙率、 $\sigma'_M$ は中間有効応力である。以上によって 求められた間隙率から、昨年度までは Leverett M.C.(1941)による関係を用いて浸透率を計算した。

$$k = k_0 \exp\left(c\left(\frac{\phi}{\phi_0} - 1\right)\right)$$
(5.2-2)

本年度は、Rutquvistら(2002)の提唱する以下の関係式を用いた.

$$k = k_0 \exp\left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^{2\beta - 1} \tag{5.2-3}$$

また、不飽和状態における毛管圧力も、間隙率変化によって以下のように修正される.

$$P_{c} = P_{c0} \left( S_{\ell} \right) \frac{\sqrt{k_{0}/\phi_{0}}}{\sqrt{k/\phi}}$$
(5.2-4)

両解析の時間ステップ進行における連成の具体的手順は,図 5.2-5 に示すような手順で行われる. すなわち,TOUGH2を先行させ,その結果を用いて FLAC3D の解析を行い,そこから求められた応 力を用いて次の時間ステップにおける TOUGH2 の解析を行うということを,ステップごとに順次行 っている.



図 5.2-4 応力と間隙率の関係に関する模式図



図 5.2-5 連成解析における時間ステップとデータの流れ

# 5.2.4 解析モデルの設定

解析モデルは、間隙水圧の検討で用いたモデルを基本とし、計算負荷を軽減する目的で、HDB ボーリング孔群を含む中央部約 20km×20km×2.5km の領域を切り出した. 図 5.2-6 に全体と解析領域の関係を示す.

領域抽出後に,後述する力学的境界条件設定を容易にするために,側方境界が東西および南北方向 と平行となるように,端部に付加的な要素(面)を追加した.図 5.2-7 に最終的な要素分割を示す.最 終的な要素数は46(東西)×26(南北)×15(深度方向)である.



図 5.2-6 幌延全体モデルからの解析領域の切り出し概念図



図 5.2-7 連成解析に用いた要素分割

### 5.2.5 物性値の設定

連成解析には、水理、力学両方の物性値が必要となる.水理特性は、HDB 孔他の全水頭分布の解 析の結果を反映した値を設定した.また、力学特性は、声問層および稚内層に関しては室内試験結果 (山本他 2002a,b)から、増幌層に関しては弾性波探査の結果から推定した.また、それ以外に関し ては、声問層、稚内層のデータを参考として仮想的な値を決めている.実際には、室内試験は、イン タクトなサンプルで行われている可能性が高いため、体積弾性率、せん断弾性率ともに岩盤としての 値よりもかなり高めの値となることか予想されるため、予備的解析としての位置づけから、室内試験 等の結果を 1/2 した値を設定した.表 5.2-1 に本解析で用いた水理および力学特性を示す.

	Permeability (m/s)	Porosity	Bulk Moodulus(GPa)	Shear Modulus (GPa)	Density (kg/m ³ )
Surface layer	4.00E-05	0.2	229	89	2200
Quaternery	2.00E-05	0.2	229	89	2200
Yuuchi F.	2.00E-06	0.2	458	178	2200
Low permeability zone	1.69E-10	0.2	458	178	2431
Koetoi F.	2.00E-08	0.2	458	178	2431
Wakkanai F.	9.36E-12	0.2	1180	812	2481
Masuhoro F.	1.00E-08	0.2	1426	982	2500
Cretaceos Rock	2.00E-10	0.2	1466	982	2500
Omagari Fault	2.00E-09	0.2	458	178	2431
Nukanan Fault	2.00E-09	0.2	458	178	2431

表 5.2-1 解析に用いた水理および力学物性値

#### 5.2.6 境界条件の設定

水理的な境界条件は、底面は不透水、上面は地表面で水位固定とした.側面に関しては、主流動方 向が東西方向であるため、東西面で圧力固定、南北面は不透水とした.

一方,力学的境界条件は,明瞭な境界を取ることは不可能であるため,便宜的に上面は自由面,下 面は固定,側面は北側および東側は深度に応じた法線沿いの圧縮方向応力一定,西および南は固定と した.

#### 5.2.7 連成パラメータの設定

連成解析においては、式(5.1-1)および(5.1-3)の連成パラメータαおよびβを決定する必要がある.特 にαは応力と間隙率の関係を決定する値であるため最も重要なパラメータと言える.本研究ではこれ らのパラメータの値をそれぞれα=1.0×10⁻⁶ 1/Pa,β=1.2とした.またφ=0.05とした.図 5.2-8にφ=0, 0.05それぞれの応力と間隙率の関係の比較を示す.図 5.2-9にはLeverettの連成式(5.1-2)とRudqvist の式(5.1-3)の比較を示す.これらの図から明らかなように、今回採用した関連式(5,1-2)に比較して今 回は結果的に連成の強度を若干弱くしたことになる.特に、間隙率と透水係数の関係はほぼ線形とな っている.間隙率は,各節点における全応力ではなく,初期からの中間応力の差によって変化するという設定である.



図 5.2-8 残留間隙率の違いによる応力と間隙率の関係



図 5.2-9 Leverett と Rudqvist の間隙率と透水係数の連成式の比較

### 5.2.8 解析時間の設定

連成解析の場合,間隙水圧場と応力場が互いに影響しあうことによって変化するため,定常状態への到達が通常の浸透流解析と比較して時間がかかる.従って,地質学的な物証等から,解析時間を決定した方がより現実的な解析が可能と考えられる.ここでは,連成解析に先立ち,全体モデルで塩分洗い出し解析を実施し,HDB-1およびHDB-2の地下水サンプリングによって求められた現状の塩分 濃度を再現する時間を解析時間とした.図 5.2-10および図 5.2-11に HDB-1 および HDB-2 における解析上の塩分濃度変化と,現状の濃度を比較した結果を示す.



図 5.2-10 HDB-1 における塩分洗い出し解析による塩分濃度変化と実測値



図 5.2-11 HDB-2 おける塩分洗い出し解析による塩分濃度変化と実測値

これから、両者の平均を取ると、2.37×10⁶年という結果となり、地質学的に見ても妥当な範囲と考 えられるため、解析時間をこの値に設定した.

### 5.2.9 解析手順

ここでは、地殻応力が透水性や流動場、水頭分布に与える影響を模擬するために、以下の手順で解 析を行った.

1) 水平応力を等方とした上で、応力を考慮しない定常的な間隙水圧を付加し、力学的な解析を行う.

2)上の応力分布を応力初期値として,東側側面に地圧勾配の 1.1 倍, 1.2 倍を付加して,連成ループを開始する.

3) 連成ループが所定時間に到達した時点で解析を終了する.

### 5.2.10 解析結果

今回の解析ケースにおける最終的な水頭値及び間隙率の分布を HDB 孔周辺の東西および南北断面 において,図 5.2-12~図 5.2-19 に示す.



図 5.2-12 地圧勾配 1.1 倍のケースにおける最終的な全水頭分布の東西断面



図 5.2-13 地圧勾配 1.1 倍のケースにおける最終的な全水頭分布の南北断面



図 5.2-14 地圧勾配 1.1 倍のケースにおける最終的な間隙率分布の東西断面



図 5.2-15 地圧勾配 1.1 倍のケースにおける最終的な間隙率分布の南北断面



図 5.2-16 地圧勾配 1.2 倍のケースにおける最終的な全水頭分布の東西断面



図 5.2-17 地圧勾配 1.2 倍のケースにおける最終的な全水頭分布の南北断面



図 5.2-18 地圧勾配 1.2 倍のケースにおける最終的な間隙率分布の東西断面



図 5.2-19 地圧勾配 1.2 倍のケースにおける最終的な間隙率分布の南北断面

ここで, HDB-1~HDB-8 の各ボーリング孔沿いの全水頭分布を, 図 5.1-20~図 5.1-27 に示す. 同時に, Everett の連成式を使った 1.1 倍, 1.2 倍のケース,実測と応力を考慮しない場合の逆解析結 果も示す.



図 5.2-20 HDB-1 における全水頭解析結果と実測の比較



図 5.2-21 HDB-2 における全水頭解析結果と実測の比較



図 5.2-22 HDB-3 における全水頭解析結果と実測の比較



図 5.2-23 HDB-4 における全水頭解析結果と実測の比較



図 5.2-24 HDB-5 における全水頭解析結果と実測の比較



図 5.2-25 HDB-6 における全水頭解析結果と実測の比較



図 5.2-26 HDB-7 における全水頭解析結果と実測の比較



図 5.2-27 HDB-8 における全水頭解析結果と実測の比較

図 5.2・20~図 5.2・27 にみられるように、連成の式を変えても全体的に水頭圧分布にはさほど顕著 な影響がなく、応力との連成を考慮しない場合と比較しても大きな差異は見られない.何れの孔井の 場合も実測値の平均に近い値となった.間隙率と透水係数の連成式である Everett の式に比べて Rudqvist の式は今回の解析の応力範囲では結果的に連成関係が弱く、水頭値も Everett の式を用いた 場合と連成を考慮しない場合の中間的結果となった.これは、図 5.2・9 の図からも容易の予測できる. いすれのケースも、HDB・2 で見られるような異常高圧の再現は見られなかった. HDB・2 のような異 常高圧をモデル化するためには局所的な透水構造や応力集中現象、メタンガスの遊離などのプロセス を考慮する必要があるものと考えられる.

これまでの応力変形—水理連成解析はさらなる改善の余地が残っている.第一に,表 5.2-1 に示し た水理及び力学物性値は初期値として与えるべきでなく,理想的にはシミュレーション終了時の 2.37 ×10⁶ 年後の値とすべきであろう.さらに応力状態の変遷が推定できればそれらを使うのが正しい. また,全ての地層において,同じカップリングの関係式とパラメータを使ったが,区別する根拠があ れば異なる式と値になる.特に,断層においては他の健岩部との差別化が必要であると考えられる.

### 5.2.11 まとめと今後の課題

今回は Rudqvist ら(2002)の提唱する間隙率と透水係数の連成式を使って水平応力比が 1.1 および 1.2 であると想定して幌延地域の水理-応力変形連成解析を行った.また,残留間隙率は 0.05 と仮定 した.

水平方向の異方性応力を考慮することによって、浅部では間隙率の上昇、透水係数の増加、一方、 深部では間隙率の低下、透水係数の低下が見られた.その影響によって、間隙水圧は全体的に、水理 のみの解析と比較して低下する.しかし、その低下の程度は少ない.

現モデルでは HDB2 孔の異常高圧は再現できない. 局所的なプロセスであると想定するのが妥当で あろう.

応力-水理連成解析は、応力による孔隙率の変化や孔隙率の変化による透水係数の変化を関係付け る式やパラメータ(αとβ)に大きく左右される.今回の解析ではβを小さく仮定したため、結果的に ほぼ線形的な関係となったが、室内実験やフィールド実験で関係式の検証やパラメータの同定が重要 である.

水平応力比が既知で一定としたが、実際は過去に変化していると考えられる.また、水理及び力学 物性値の初期値に関して検討の余地がある.理想的には逆解析を行ってそれらの同定を図るのが望ま しい.

断層の特性を反映した応力変形-水理連成解析を行う必要がある.

また、今回の水平応力以外に、メタンガスの発生、遊離、堆積過程、海水準変動等、いくつかの考慮すべきプロセスが挙げられる.これらに関しても力学的な連成が無視できない可能性があるため、 今後検討する必要がある.

# 6. まとめ

以下,本件で明らかになったことをまとめる.

### 6.1 岩石試料を対象とした水理・物質移行特性データの取得

亀裂が発達した堆積岩中の物質移行現象を把握することを目的に,幌延深地層研究センターにて建設中の地下研究施設のうち,換気立坑のGL.-30.6m地点において採取した声問層試料を用いて,透水試験ならびに物質移行試験を実施した.その結果以下のことが明らかとなった.

### (1) 透水性

①マトリクス部の透水係数は、1.35×10⁻¹⁰ (m/s)であった.

②今回の対象試料は、間隙率は大きいが、空隙構造としてはより径の小さい空隙の占める割合が 大きいという特徴を有しているため、同程度の間隙率を有する他の声問層試料に比べてやや透 水係数が低い結果となった。

### (2) 物質移行特性

①マトリクス拡散係数

マトリクス部の実効拡散係数は 2.13×10⁻¹⁰ (m²/s)であり,既往の声問層を対象とした試験結果の平 均的な値であった.

②分散長

亀裂を有する試料のトレーサー試験結果を用いた FRAC3DVS によるフィッティングから,分散長 として,0.04 (m)が得られた.この結果を既往の試験結果と比較すると,ほぼ同一のトレンド上にあ る.従って,従来から指摘されている分散長とスケールの関係が,ほぼ同様の回帰直線により表せる 可能性が示された.

③物質移行開口幅

亀裂を有する試料のトレーサー試験結果から、物質移行開口幅として 0.031mm が得られた. この 値は、透水係数から三乗則により逆算した水理開口幅とほぼ同等の値である.

また、透水量係数と物質移行開口幅の関係を見ると、非常に緩やかではあるが、正の相関が見られ、  $\sqrt{T}$ と直線的な関係にある.また、花崗岩サイト(釜石鉱山原位置試験場)において、原位置スケー ルの亀裂に対して、物質移行開口幅 e と透水量係数 T の間に次の関係:  $e = 2\sqrt{T}$  が示されている (Shimo 他、1999).今回の試験結果は、この関係式で得られる値よりもやや小さい.

#### 6.2 亀裂を考慮した堆積岩の水理・物質移行挙動の検討

亀裂が発達した堆積岩中の物質移行現象を把握することを目的に、単一の平行平板亀裂を有するモ デルを用いて、流速場の異なる3ケースについて、物質移行解析を実施し、亀裂内の実流速の違いが、 岩盤内の物質移行現象に与える影響について確認を行った.その結果、以下のような知見が得られた.

② ①の結果より, 亀裂内の実流速を規定するパラメータである亀裂開口幅は, 亀裂内の移流だけでなく, マトリクス拡散による遅延効果にも影響を与えるパラメータである.

③今後は、同様の解析を、亀裂開口幅を変化させたケースや、マトリクス部への拡散量に影響すると 考えられるマトリクス部の空隙率を変化させたケースについて実施し、各パラメータが岩盤内の物質 移行現象に与える影響について確認する必要がある.

#### 6.3 堆積岩地域に見られる地下深部の諸特性を考慮した地下水流動モデルによる逆解析

堆積岩が分布する広域的なスケールでの地下水流動場を評価する手法開発の一環として,幌延地域の地下深部において確認されている高い間隙水圧について,その形成要因を把握することを目的とした数値解析的検討を行った.

地表面の涵養量を固定したケースと、各地層の透水係数が非等方性であるケースについて、幌延地 域のおける間隙水圧の計測結果を用いて各地質構造の透水性などを推定する逆解析を行い、間隙水圧 分布および透水性分布、大曲断層とヌカナン断層の構造と透水係数に関する検討を行った結果、以下 の知見を得た.

①これまでの温度解析,河川流量,HDB 孔の水頭の逆解析,固定涵養量のモデル解析の結果を総合 すると広域の涵養量は16mm/年前後の値であると考えられる.さらに,その4~5倍である可能性も あるが,更なるデータが必要である.

②信頼のできる涵養量データと、より広域、より深い位置での水頭データが得られれば、より信頼度 の高い透水係数の逆解析が可能となる.

③非等方性を仮定することで逆解析結果がこれまでと大きく異なった.より深部のデータや,広域に 渡るデータが不足していることから,一義的にどの結果が正しいとは言えないが,稚内層の層序方向 の透水性がゼロではありえないので,これまでの実測値との整合の高いモデルからスタートするより も,更なる自由度を与えれば異なった結果が得られると考えられる. ④HDB 孔の水頭値分布は、ケースによってはかなり再現性が高いが、すべての孔の水頭分布を同時 に再現するまでには到っていない.一方、すべてのケースを併せれば殆どの孔井の水頭分布を包括す る事から、さらに細かい離散化とパラメータの自由度を増やすことによってさらに再現性を上げる事 は可能であると考える.しかし、データの空間的広がりと絶対数が不足しているのでより細かいメッ シュを切っても逆解析結果自体の信頼性が上がる保障は無い.

⑤HDB-2 孔の異常高圧ゾーンの水頭値再現は困難である.メタンガスの影響などの別のプロセスで 成因を説明するのが妥当と考える.

また,将来的には熱や化学反応の影響までを考慮する目的で TOUGH2 を用いた連成解析の適用性 に関する基礎検討を行った.今回は間隙率と透水係数の連成式を使った解析を行った.その結果,以 下の知見を得た.

①地下水面を下げる事によって浅部の再現性が向上した.しかし、モデル領域全域に渡って例えば
 -10mの固定地下水位を仮定するには多少無理がある.次のステップとしてはより信頼のおける涵養量のデータを使った検討が望ましい.

②水平方向の異方性応力を考慮することによって、浅部では間隙率の上昇、透水係数の増加、一方、 深部では間隙率の低下、透水係数の低下が見られた.その影響によって、間隙水圧は全体的に、水理 のみの解析と比較して低下する.しかし、その低下の程度は少ない.

現モデルでは DBH2 孔の異常高圧は再現できない. 局所的なプロセスであると想定するのが妥当で あろう.

③応カー水理連成解析は、応力による間隙率の変化や間隙率の変化による透水係数の変化を関係付け る式やパラメータ(αとβ)に大きく左右される.今回の解析ではβを小さく仮定したため、結果的に ほぼ線形的な関係となったが、室内実験やフィールド実験で関係式の検証やパラメータの同定が重要 である.

④水平応力比が既知で一定としたが、実際は過去に変化していると考えられる.また、水理及び力学物性値の初期値に関して検討の余地がある.理想的には逆解析を行ってそれらの同定を図るのが望ましい.

⑤断層の特性を反映した応力変形—水理連成解析を行う必要がある.

# 7. おわりに

本研究では、亀裂が発達した堆積岩中の物質移行現象を把握することを目的に、亀裂を有する堆積 岩の水理・物質移行データについて室内試験(透水試験、トレーサー試験など)を実施して取得する とともに、それらのデータに基づいた亀裂を有する堆積岩中の物質移行の評価手法の検討として、亀 裂内の地下水流速の違いが堆積岩の物質移行に与える影響について数値解析的な検討を行った.また、 堆積岩が分布する広域的なスケールでの地下水流動場を評価する手法開発の一環として、幌延地域の 地下深部において確認されている高い間隙水圧について、その形成要因を把握することを目的とした 数値解析的検討を行った.

室内試験では、既存データの極めて少ない泥岩における水理、物質移行パラメータを取得し、これ までに取得してきたデータを拡充した.また、数値解析的検討においては、特に岩盤中の物質移行現 象の評価で重要となる亀裂内の実流速について、その違いが亀裂を有する堆積岩内の物質移行に与え る影響について数値解析的な検討を行った.その結果、マトリクス部への拡散が顕著となるような岩 盤では、亀裂内の実流速の違いは、直接的には、亀裂内の移流による移行速度に影響を与えるが、そ れにともなう亀裂内での滞留時間の増加によって、間接的にマトリクス部への拡散現象による移行量 にも影響を与えることがわかった.また、堆積岩が分布する広域的なスケールでの地下水流動場の評 価検討については、幌延地域を対象に、地表面の涵養量を固定したケースと各地層の透水係数が非等 方性であるケースについて、間隙水圧の計測結果を用いて各地質構造の透水係数に関する検討を 行った結果、幌延地域の地下深部において確認されている高い間隙水圧については、透水係数などを 平均的に表現した広域的なモデルでは再現できずに局所的な要因によるものと推察された。また、解 析の結果から広域的なモデルでの岩盤への涵養量として16mm/年程度の値が示された.信頼のできる 涵養量データと、より広域、より深い位置での水頭データが得られれば、より信頼度の高い透水係数 の逆解析が可能であると考えられ、原位置での更なるデータ取得が望まれる.

今後は、亀裂を有する堆積岩内の水理・物質移行現象の評価手法の構築の一環として、室内試験に よる水理・物質移行データの拡充を進めるとともに、得られたデータに基づき種々のパラメータの違 いが亀裂を有する堆積岩中の物質移行現象に与える影響について解析的な検討を行う。さらに、堆積 岩が分布する広域的なスケールを対象とした地下水流動場の評価に際しては、構築した水理地質構造 モデルと原位置で取得される水頭値などの限られたデータとの対比によるモデルの信頼性確認やモデ ルの更新などの検討と、そのために必要な原位置データについて整理していく予定である.

# 参考文献

Therrien, R., E.A. Sudicky : "Three-dimensional analysis of variably-saturated flow and solute transport in discretely-fractured porous media", J. Contaminant Hydrology, vol.23, pp.1-44, (1996)

喜多治之,岩井孝幸,中嶋悟:"花崗岩および凝灰岩間隙水中のイオンの拡散係数の測定",応用地質,第30 巻,第2号,pp.26-32,(1989)

山本卓也,下茂道人,藤原靖,服部弘通,田所照夫,岩間彦衛,名合牧人,熊本創:"幌延深地層研 究センターにおける試錐調査(HDB-1 孔)",核燃料サイクル開発機構(委託研究成果報告書,大成建 設株式会社),JNC TJ1400 2002-010,(2002)

山本卓也,下茂道人,藤原靖,服部弘通,名合牧人,田所照夫,中垣真一:"幌延深地層研究計画に おける試錐調査(HDB-6,7,8孔)のうち HDB-6 孔",核燃料サイクル開発機構(委託研究成果報告書, 大成建設株式会社),JNC TJ5400 2005-004,(2004)

Brace, W.F., et al : "Permeability of Granite under High Pressure", J. of Geophysical Research, Vol.73, No.6, pp.2225-2236, (1968)

Hsieh, P.A., et al : "Transient Laboratory Method for Determining the Hydraulic Properties of 'Tight' Rocks – I Theory", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 18, pp.245-252, (1981)

島崎英彦, 新藤静夫, 吉田鎮男: "放射性廃棄物と地質科学", 東京大学出版会, (1995)

新藤静夫,井伊博行:"表層における地下水流動,放射性廃棄物と地質科学(島崎英彦,新藤静夫,吉 田鎮男編),東京大学出版会,(1995)

Lynn W.Gelhar, Claire Welty, Kenneth R.Rehfeldt : "A Critical Review of Data on Field-Scale Dispersion in Aquifers", Water Resources Reserch, Vol.28, No.7, pp.1955-1974, (1992)

核燃料サイクル開発機構:"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次取りまとめー",分冊3 地層処分システムの安全評価,核燃料サイクル開発機構,JNC TN1400 99-023,(2000)

Shimo M., Yamamoto H., Uchida M., Sawada A., Doe T. W., Takahara, Y. : "In-situ test on fluid flow and mass transport properties of fractured rocks", Proc.9th ISRM Congress, Vol. 2, pp.1401-1404, (1999)

Finsterle, S., iTOUGH2 User's Guide, Report LBNL-40040, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, Calif., 1999.

Matsui, H., Horonobe Underground Research Laboratory Project, The present status in investigation from the surface –Geology and Rock Mechanics, in Proceedings, International Workshop on Horonobe Underground Research Laboratory Project, October, 2004.

Pruess, K., C. Oldenburg, and George Moridis, TOUGH2 User's Guide, Lawrence Berkeley National Laboratory Report, LBNL-43134, 1999.

Bai M., Elsworth D., Modeling of subsidence and strain-dependent hydraulic conductivity for intact and fractured porous media. Rock Mech. Rock Eng. 1994; 27: pp.209-250.

Caine J.S, Evans J.P., Foster C.G. Fault zone architecture and permeability structures. Geology, 1996;24(11):pp.1025-1028.

Hsiung S.M., Chowdhury A.H., and Nataraja M.S. Numerical simulation of thermal-mechanical processes observed at the Drift-Scale Heater Test at Yucca Mountain, Nevada, USA. J. Rock. Mech. Min. Sci. 2005;42: pp.652-666.

Pruess K., Oldenburg C., Moridis. TOUGH2 user's guide, version 2.0. Lawrence Berkeley National Laboratory Report, LBNL-43134, Berkeley. 1999.

Rutqvist J. Coupled stress-flow properties of rock joints from hydraulic field testing. PhD Thesis, Royal Institute of Technology, Sweden, 1995a.

Rutqvist J., Tsang C.-F. A study of caprock hydromechanical changes associated with CO2 injection into a brine aquifer. Environmental Geology, 2002 ; 42: pp.296-305.

Rutqvist J., Stephansson O. The role of hydromechanical coupling in fractured rock engineering, Hydrogeology Journal, 2003;11: pp.7-40.

Rutqvist, J., Wu, Y-S., Tsang, C-F., Bodvarsson., G., 2002. A modeling approach for coupled multi-phase fluid flow, heat transfer, and deformation in fractured porous rock. Int. J. Rock Mech., Min., Sci. 39. pp. 429-442.

Rutqvist, J., and Tsang, C-F. 2003. Analysis of thermal-hydrlogic-mechanical behavior near an emplacement drift at Yucca Mountain. J. C. Hydrol. 62-63. pp.637-652.
Yamasaki, S., H. Matsui, K. Hama, H. Morioka, K. Hatanaka, and T. Fukushima, Abstracts of International Workshop on Horonobe Underground Research Laboratory Project, October, 2004, JNC TN5400-2004-004.

This is a blank page.

表1.SI 基本単位	
------------	--

甘木县	SI 基本i	SI 基本単位				
巫平里	名称	記号				
長	さメートル	m				
質量	量キログラム	kg				
時 『	間 秒	S				
電	流アンペア	А				
熱力学温度	度ケルビン	Κ				
物質量	量モ ル	mo1				
光月	度カンデラ	cd				

组合量	SI 基本単位				
和立里	名称	記号			
面 積	平方メートル	m ²			
体積	立法メートル	m ³			
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	毎メートル	m-1			
密度(質量密度)	キログラム毎立法メートル	$kg/m^3$			
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	$mo1/m^3$			
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	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	$10^{-12}$	ピコ	р				
$10^{6}$	メガ	Μ	$10^{-15}$	フェムト	f				
$10^{3}$	キロ	k	$10^{-18}$	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	v				

## 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

			51 祖立中位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による	SI基本単位による
			表し万	表し万
平 面 角	ラジアン ^(a)	rad		$m \cdot m^{-1} = 1^{(b)}$
立 体 角	ステラジアン ^(a)	$sr^{(c)}$		$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$
周 波 数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-2}$
圧力,応力	パスカル	Pa	$N/m^2$	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N•m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
工 率 , 放射 束	ワット	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電荷, 電気量	クーロン	С		s•A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁東	ウエーバ	Wb	V•s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
磁束密度	テスラ	Т	$Wb/m^2$	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光東	ルーメン	lm	$cd \cdot sr^{(c)}$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd = cd$
照度	ルクス	1x	$1 \text{m/m}^2$	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 質量エネル	H L I	Crr	T /lra	22
ギー分与, カーマ		Gy	J/Kg	m•s
線量当量,周辺線量当			6	
量,方向性線量当量,個	シーベルト	Sv	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
人線量当量,組織線量当				l

(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の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℃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

		衣4.	. 半世	LUT	- Y -	回伯の	白小こ	-2074	<u> 田</u> 4	ノ記方を召せ	531祖立单位07例
和立昰						SI 組立単位					
_	Я	꼬. 가. 耳	4				名称			記号	SI 基本単位による表し方
粘					度	パス	、力	ル	秒	Pa•s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
力	のモ	-	メ	$\sim$	ŀ	ニュー	・トン	メー	トル	N•m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表	面		張		力	ニュー	トン毎	ミメー	トル	N/m	kg $\cdot s^{-2}$
角		速			度	ラジ	7:	ン毎	: 秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-1}$
角	加		速		度	ラジフ	アン有	₩ 平 ⊅	方 秒	$rad/s^2$	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$
熱	流密度	,	放 射	照	度	ワット	毎平方	メー	トル	$W/m^2$	kg $\cdot$ s ⁻³
熱	容量,	エン	トロ	ιĽ	ļ	ジュー	・ル毎	ケル	ビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質	量熱容量	: (比	熱容	:量)	,	ジュー	ル毎キ	ログ	ラム	T/(1-K)	2 -2 -2 -1
質	量 エ .	ント	· D	F	1	毎ケル	ビン			J/ (Kg • K)	m•s•K
質	量 エ	ネ	N	ギ	ļ		ルケキ	, n h	= 1	т /1	2 -2 -1
(	比エノ	ネ ル	/ ギ		)	21-	ルサイ	- 11 - 2	14	J/Kg	m•s•K
勑	伝		道		굻	ワット	毎メー	・トル	毎ケ	W/(m•K)	
5753	14		- <del></del> -		4.	ルビン				w/ (III · IX)	m·kg·s·k
休	穑 工	ネ	ル	ギ	Į	ジュー	ル毎立	方メ	ート	$T/m^3$	$m^{-1}$ · kg · $g^{-2}$
14-	1,8	. 1.		`		ル				J/ III	iii · Kg · S
電	界	の	強	i	さ	ボルー	卜毎>	~	トル	V/m	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3} \cdot \mathbf{A}^{-1}$
体	秸		雷		荷	クーロ	ン毎立	方メ	ート	$C/m^3$	m ⁻³ • s • A
					1.4	ル				07 11	111 5 A
雷	気		変		位	クーロ	ン毎平	方メ	ート	$C/m^2$	m ⁻² • s • A
HE.	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	_	2		1.11.	ル				0/11	
誘		電			率	ファラ	ド毎	メー	トル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透		磁			率	ヘンリ	一毎	メー	トル	H/m	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-2} \cdot \mathbf{A}^{-2}$
モ	ルエ	ネ	ル	ギ	1	ジュ	- <i>N</i>	毎1	Εル	J/mo1	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mo1^{-1}$
モ	ルエン	/ ト	다 만	<u>_</u>	,	ジュー	ル毎モ	ル毎	ケル	I/(mo1 ⋅ K)	$m^2 \cdot k\sigma \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モ	<i>I</i> V	烈	谷		量	ピン				5, (moi m)	in Kg 5 K mor
照	射線量(	X 線	及び	γ 線	)	クーロ	ン毎キ	ーログ	ラム	C/kg	kg ⁻¹ • s • A
吸	収	緑	量		率	クレ	1	毎	秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放	射		強		度	ワット	毎ステ	ラジ	アン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放	射		輝		度	ワット: 毎マテ	毎平方 ラジア	メー	トル	$W/(m^2 \cdot sr)$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

## 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	0	$1^{\circ} = (\pi / 180)$ rad
分	,	1' = $(1/60)^{\circ}$ = $(\pi/10800)$ rad
秒	"	1" = $(1/60)$ ' = $(\pi/648000)$ rad
リットル	1, L	$11=1 \text{ dm}^3=10^{-3}\text{m}^3$
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	В	$1B=(1/2)\ln 10(Np)$

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	$1 \text{ a=} 1 \text{ dam}^2 = 10^2 \text{m}^2$					
ヘクタール	ha	$1 \text{ ha}=1 \text{ hm}^2=10^4 \text{m}^2$					
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa					
オングストローム	Å	1 Å=0. 1nm=10 ⁻¹⁰ m					
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=10^{-28} \text{m}^2$					

表9 固有の名称を含むCGS組立単位

	衣9. 固有の名称を含む663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	$\sim$	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N					
ポ	T	ズ	Р	1 P=1 dyn⋅s/cm²=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					
工	ルステッ	F	0e	1 Oe ≙(1000/4π)A/m					
$\checkmark$	クスウェ	N	Mx	1 Mx ≙10 ⁻⁸ Wb					
ス	チル	ブ	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd/cm}^2 = 10^4 \text{ cd/m}^2$					
朩		ŀ	ph	1 ph=10 ⁴ 1x					
ガ		$\mathcal{N}$	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$					

	表10. 国際単位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	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq				
$\scriptstyle  u$	ン	トゲ	$\sim$	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$				
ラ			F	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy				
$\boldsymbol{\nu}$			Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv				
Х	線	単	位		1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm				
ガ		ン	7	γ	$1 \gamma = 1 nT = 10^{-9}T$				
ジ	ヤン	/ ス キ	-	Jy	$1 \text{ Jy}=10^{-26} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$				
フ	I.	ル	111		1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m				
メー	ートル	系カラ	ット		1 metric carat = 200 mg = $2 \times 10^{-4}$ kg				
ŀ			ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa				
標	準	大 気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa				
力	D	IJ	-	cal					
Ξ	ク	П	$\sim$	μ	$1 \ \mu = 1 \ \mu m = 10^{-6} m$				