

# 多孔質媒体均質層及び二層不均質層を 対象にした塩淡境界面の挙動

Saltwater-freshwater Interface Behavior for Homogeneous and Double Layer Porous Media Filled with Different Size of Glass Beads

> 高須 民男<sup>\*</sup> 前川 恵輔 澤田 淳 Tamio TAKASU\*, Keisuke MAEKAWA and Atsushi SAWADA

> > 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 イチュ

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

多孔質媒体均質層及び二層不均質層を対象にした塩淡境界面の挙動

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 高須 民男<sup>\*1</sup>,前川 恵輔<sup>+1</sup>,澤田 淳<sup>+2</sup>

(2008年1月23日受理)

高レベル放射性廃棄物の地層処分における安全評価では、地層中の地下水流動などの地質環境 条件を実際の現象に即して評価することが重要である。沿岸地域などでは、塩水と淡水が混在す る地層中の地下水流動を把握する必要があることから、均質層及び二層不均質層を対象に、模擬 した地層中での塩水(Nacl溶液)の淡水中への進展過程や塩淡境界面の挙動を観察するための室 内試験を、多孔質媒体中水理・物質移行現象可視化装置を用いて 2005 年 12 月から 2007 年 6 月 まで実施した。ビーズ粒径が異なる3種類の均質層及び二層不均質層での各試験における塩水楔 浸入量を整理した結果、今回の動水勾配と塩水濃度が同様の条件下においては、ガラスビーズ粒 径によらず、動水勾配と塩水濃度で塩水楔浸入量の分類ができる可能性が示された。塩水の浸入 長さは塩分濃度に比例し、動水勾配が低い場合には塩分濃度の増加によって浸入長さが著しく大 きくなった。

なお,ビーズ粒径が異なる3種類の均質層について間隙率の測定手順を確認した。また,粒径 1mm 均質層の間隙がガラスビーズ充填後の時間経過によっても大きく影響を受けていないことを 確認した。

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 \*1 検査開発株式会社,核燃料サイクル工学研究所 環境技術管理部 処分技術課(兼務) +1 地層処分研究開発部門 幌延深地層研究ユニット 堆積岩地質環境研究グループ +2 核燃料サイクル工学研究所 環境技術管理部 処分技術課(兼務)

i

# Saltwater-freshwater Interface Behavior for Homogeneous and Double Layer Porous Media Filled with Different Size of Glass Beads

Tamio TAKASU<sup>\*1</sup>, Keisuke MAEKAWA<sup>+1</sup> and Atsushi SAWADA<sup>+2</sup>

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

(Received January 23,2008)

It is important to evaluate relevant processes in geosphere, such as groundwater flow, based on the actual conditions of geological environment. At the coastal area, it is needed to understand groundwater flow under the saltwater and freshwater mixing conditions. We conducted a set of laboratory experiments using mass transport visualization system with flow chamber representing homogeneous sedimentary rock filled with uniform glass beads and double layer filled with different size of glass beads, in order to observe saltwater intrusion process into fresh water and saltwater-freshwater interface behavior. From the horizontal intrusion length of saltwater, the result might not depend on the size of glass beads and might be categorized by the combination of hydraulic gradient and saline concentration. In case of low hydraulic gradient case, the saltwater intrusion length tends to be larger due to saline concentration increase.

Keywords: Saltwater-freshwater Interface, Saltwater Intrusion, Mini-MACRO, Density Driven Flow, Hydraulic Head, Homogeneous Media, Double Layer Porous Media

\*1 Inspection Development Company Ltd.: Waste Isolation Technology Section, Waste Management Department, Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories (Additional Post)

+1 Sedimentary Environment Research Group, Horonobe Underground Research Unit, Geological Isolation Research and Development Department,

+2 Waste Isolation Technology Section, Waste Management Department, Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories (Additional Post)

# 目次

1. はじめに	1
2. 試験の概要	1
2.1 装置の概要	1
2.2 均質層及び二層不均質層での試験の概要	2
<ol> <li>塩水楔試験のための条件・再現性の確認</li> </ol>	4
3.1 ガラスビーズ密度及びガラスビーズを充填した媒体槽の間隙率	4
3.2 均質層における塩水楔の形状再現性確認試験	6
4. 均質層の透水係数の測定	7
4.1 ビーズの粒径 1 ㎜の均質層試験における透水係数の経時変化	7
4.2 ビーズ粒径 0.4 mmの均質層における透水係数の経時変化	7
4.3 小型MACRO推定間隙率の妥当性	8
5. 塩水の淡水中への進展過程や塩淡境界面の挙動の観察	9
5.1 均質層における塩水楔試験	9
5.2 均質層における塩水楔浸入に影響される染料浸透試験	10
5.3 ビーズの粒径 0.4 mmの均質層における折り返し塩水楔試験	11
5.4 二層不均質層における塩水楔試験	11
5.5水頭差と塩分濃度によって決定される定常状態の塩水楔形状	13
6. おわりに	14
参考文献	16

#### Contents

1. Introduction 1
2. Outline of the experiments1
2.1 Basic concept of equipments1
2.2 Experiments on homogeneous and double layer porous media2
3. Confirmation of condition and reproducibility for salt water intrusion examination4
3.1 Density of the glass beads and porosity of the flow chamber filled with glass beads - $4$
3.2 Reproducibility examination of salt water intrusion shape on homogeneous field $6$
4. Permeability coefficient change measurement of homogeneous field7
4.1 Permeability coefficient change of time on homogeneous field (beads size 1mm)7
4.2 Permeability coefficient change of time on homogeneous field (beads size 0.4mm)7
4.3 Validity of measured porosity of Mini-MACRO8
5. Observation of intrusion process and saltwater-freshwater interface behavior9
5.1 Salt water intrusion examination on homogeneous field9
5.2 Dye infiltration examination on homogeneous layer influenced by salt water
intrusion10
5.3 Change of salt water intrusion shape on homogeneous field (beads size
0.4mm) 11
5.4 Salt water intrusion examination on double layer porous media 11
5.5 Influence of hydraulic head difference and salt water density on steady state
of salt water intrusion shape 13
6. Conclusions 14
References 16

#### 1. はじめに

本報告書は、日本原子力機構が地層処分基盤研究施設において実施している沿岸堆積岩地域に おける地下水流動を適切に把握するための物質移行のモデル化に資するものであり、モデル化に おいては、塩水楔の形成及び塩淡境界面の挙動を的確に予測できる地下密度流解析法を持つこと が重要な問題である。

この密度流試験データ取得の一環として、私たちは多孔質媒体中水理・物質移行現象可視化装置((MAss transport Characterization in host ROck)以下「小型 MACRO」と呼ぶ)の媒体槽に、 粒径が明確なガラスビーズを充填することによって一様な透水係数である均質層、または二種類 のガラスビーズを重ねて充填することによって二層不均質層を作製する。このうち均質層はビー ズ粒径1mm, 0.8mm, 0.4mmの三種類の均質層を作製することとした。試験は、海水浸入の挙動を 模擬して、小型 MACRO の淡水槽を上流とする媒体槽内の淡水の流れに逆行して、あらかじめ赤色 に着色した塩水が小型 MACRO の塩水槽から媒体槽に浸入する様子を観察することより、各々の媒 体槽における塩水浸入形状や塩水の赤色着色変化を比較することによる塩分濃度の変化を把握す る。

高須ら<sup>1)</sup>は、これまでに、装置の基本機能を確認するための塩水楔予察試験を実施し、淡水で 飽和させた粒径 1mm のガラスビーズにより模擬した媒体槽中に食紅で着色した塩水により塩水 楔を再現すると共に、塩水楔試験を実施する上での媒体槽の通水量の変化に起因した留意点とし て以下の項目を示した。

- (1) 試験中における淡水槽の水頭保持
- (2) 媒体槽に浸入する塩水濃度の確認(画像解析など)
- (3) 試験中の塩水供給による塩水槽の塩水濃度の安定性
- (4) 試験中に継続して供給できる塩水の貯水量確保

また,その塩水楔予察試験の結果を用いて,数値モデルによる解析<sup>3)</sup>結果との比較を行い, Fig1.1-1に示すように数値モデルの解析結果と整合的であることが確認できた。(前川ほか<sup>4)</sup>)

本研究では、細粒径のガラスビーズを用いた均質層及び二層不均質層を作製して、上記の留意 点(1)、(3)および(4)に対する透水性に応じた必要な注水流量の確保、(2)に対する塩 水槽2箇所の塩分濃度の測定を施した上で、複数の動水勾配、間隙率の測定、塩水濃度など、よ り多くの条件を設定して塩水楔の形状の変化の特性データを取得し、条件に応じた塩淡境界面の 挙動を把握する。

#### 2. 試験の概要

2.1 装置の概要

小型 MACRO は、ガラスビーズを充填する媒体槽、媒体槽に給水する淡水・塩水をそれぞれ貯 める淡水槽・塩水槽からなる。媒体槽への淡水・塩水の浸入及び止水は、塩水槽側に設けたシ ャッターの手動開閉によって操作できる (Fig. 2.1-1 に小型 MACRO、媒体槽及び充填するガラス ビーズ粒径規格を、Fig. 2.1-2 に淡水槽・塩水槽の構成を示す)。 なお、塩水は純正科学株式会社製の NaCl (ASSAY min. 99.5%)を水溶液として使用いている。

(1) 媒体槽

Fig. 2.1-1 に示す均質層及び Fig. 2.1-2 に示す二層不均質層は以下の手順で作製する。

媒体槽は、長さ52cm、奥行10cm、高さ26cmで容積が約13000cm<sup>3</sup>の透明なアクリル製水 槽(媒体槽)内を水で飽和状態にして、粒径規格の明確なガラスビーズを高さが25cmを超 えるまで充填し、ヘラで表面を平面に近いかまぼこ型にならし、この上に厚さ1cmのシリ コンゴム製シート及び塩ビ製上蓋を載せボルトで締め付けて密封した物(以下「媒体槽」 は「均質層及び二層不均質層」の総称として用いる)である。作製した媒体槽は、ハンマ 一検査(共鳴音で空洞の有無を確認する検査)で上蓋の密封の際に媒体槽上部に生じる可 能性がある気泡及び空洞の無いことを確認する。

(2) 淡水槽, 塩水槽

媒体槽内の淡水の流れは淡水槽,塩水槽間の水位の差(以下「水頭差」と呼ぶ)によっ て生じる。給水中の淡水槽及び塩水槽の水位は,0.1cm の精度で昇降できる可動堰からの 越流水位に一致してサイホン制御され各水槽内を流動している水の水位(以下「任意水位」 と呼ぶ),各水槽内の固定越流堰を超えオーバーフロー区画へ排水される過程で各水槽内を 流動している水の水位(以下「固定水位」と呼ぶ)のいずれかで決定する。水頭差はこの 組み合わせで設定することができる。本室内試験はFig.2.1-2に示すとおり淡水側を任意 水位,塩水槽を媒体槽上端面から10.2cm 高い固定水位に設定して実施し,淡水槽,塩水槽 からの給排水量はFig.2.1-3に示すとおり微小流量計(愛知時計電気株式会社製0F05ZZF 型)が表示する1 cm<sup>3</sup>/min の桁まで,または微小流量計(愛知時計電気株式会社製0F10ZZF 型)が表示する10 cm<sup>3</sup>/min の桁までの瞬時流量を読み取り記録している。

(3) 隔離板, 染料吐出ノズル

媒体槽の両端部の淡水・塩水をそれぞれ貯める淡水槽,塩水槽と媒体槽を連絡するそれ ぞれの開口部は,Fig.2.1-4 に示すパンチング加工を施したステンレス板にナイロン製の メッシュ(網)を取り付けた隔離板で仕切ることでガラスビーズが媒体槽から流出しない 構造と成っている。淡水槽の隔離板の穴に沿って設置したノズルからブリリアントブルー FCF で着色した青色染料水を微小流量ポンプによって 0.01cm<sup>3</sup>/min を最小流量とする任意 流量で吐出すること(以下「染料浸透試験」と呼ぶ)ができる。

(4) 電気伝導率計

塩水槽中の塩水濃度の変化を随時確認するために、4%までの塩水濃度を自動測定できる 電気伝導率計(東亜ディーケーケー株式会社製 CM-21P型)のセンサーを塩水槽底部及び水 面近傍の定位置に設置した。電気伝導率計(CM-21P型)については、Table.2.1-5 および Photo.2.1-1に示すとおり脱気水で4%の濃度に調整し食紅0.1gを加えた着色塩水を原液と して、0.25%毎に希釈した際の電気伝導率と塩水濃度データを取り、値の関係を事前に確認 した。また着色塩水原液の塩水濃度希釈に伴った着色変化を観察した。

2.2 均質層及び二層不均質層での試験の概要

塩水楔試験のための条件として、ガラスビーズを充填した均質層の間隙率は、安定保持し、

塩水楔試験の実施条件下に即した均質層の間隙の平均を示す測定結果が得られる測定方法を確 立しておく必要がある。媒体槽は前述のとおり淡水槽,塩水槽と媒体槽が連絡していてガラス ビーズの間隙中に気泡混入等が無い様に飽和水で満たされている。この各水槽のうちの媒体槽 中の間隙率に相当する平均飽和水量を求めるためのサンプリングにおいて,場を乱し余剰の飽 和水がサンプルに混入しないような簡単な測定手法を選択するため,ビーズの粒径1mm及びビ ーズの粒径0.4mmで製作した媒体槽の素材(充填前の材料)など5種類のサンプル場を用いて 予察測定を実施した。

また、均質層の安定保持に関する塩水楔の形状再現性について、ガラスビーズ充填後数ヶ月の時間経過に伴う充填の差に影響が無いことをビーズの粒径1mmの均質層において合わせて確認した。

次の試験パラメータとして透水係数が重要となる。透水係数は通水試験または、トレーサー 通水試験により測定する。通水試験は各々のガラスビーズ間隙中の透水係数を求めるための短 時間の試験であり、淡水槽、塩水槽からの給排水量が水頭差に応じて適量で、装置計器及び配 管等が健全あることを合わせて確認する試験(以下「通水試験」と呼ぶ)、トレーサー通水試 験は媒体槽を移行する着色水が垂直を保持して淡水槽から塩水槽方向に移行する状態から 各々のガラスビーズが均質に充填されていることを確認するため、及び各々のガラスビーズ間 隙中の透水係数をトレーサー流速から求めるための試験(以下「トレーサー通水試験」と呼ぶ) である。均質層の透水係数の測定は、通水試験による塩水槽からの越流量を元に単位断面あた りの流量を求め動水勾配で除して算出する方法と通水試験による敵下着色淡水の浸透距離/分

(平均的な流速)を測定,動水勾配で除して算出する方法を用いる。前者は媒体槽の間隙を通水した平均越流量を示すのに対して,後者は前者の間隙を通水した平均越流量に加えて二層不均質層のような媒体槽の水平方向部分を通水した平均流量を示すための測定方法としても用いることができる。

ビーズの粒径1mmの均質層およびビーズの粒径0.4mmの均質層における通水試験を塩水楔試 験前に組み入れて実施し,透水係数を測定した結果,微少な透水係数の経時変化と変化後の安 定した期間があること確認した。

塩水試験前の通水試験で透水係数が安定した期間の測定値を用いて、先述のとおり得られた 間隙率を評価したところ、5 種類のサンプルの中では作製均質層材を使用して求めたビーズの 粒径 1 mm及びビーズの粒径 0.4 mmの均質層におけるガラスビーズの推定間隙率(λe)が妥当 であった。妥当性は間隙率を用いた算出トレーサー移行時間と、後に実施したトレーサー通水 試験における実測トレーサー移行時間とを比較して示すことができた。

ビーズの粒径 0.4 mmの層の上にビーズの粒径 1 mmの層を水平になるように堆積充填させた二 層不均質層や前述同様に予め作製均質層材を使用して推定間隙率を求めたビーズの粒径 0.8 mm の均質層の 2 種類の媒体槽を作製して,通水試験,トレーサー通水試験を実施した。

前述のビーズの粒径1mm ビーズの粒径0.4mmの均質層,二層不均質層およびビーズの粒径0.8mmの均質層の4種類の媒体槽で塩水楔試験を,ビーズの粒径1mmの均質層を除いた媒体槽で染料浸透試験等を合わせて実施した。さらに、ビーズの粒径0.4mmの均質層では、折り返し 塩水楔試験を実施し拡散による塩水楔の形状変化を観察した。 塩水楔試験は塩水濃度4%,3%及び2%とした密度流試験,染料浸透試験は塩水楔試験における 淡水の流れる様子(染料の分散,瞬時流速の変化)を観察する試験である。

各塩水楔試験における塩水楔の形状を比較した結果,ビーズの粒径の異なる均質層及び二層 不均質層など透水性条件が異なっても動水勾配と塩分濃度の違いによっていくつかのグループ 分けが可能であることを確認した。

3. 塩水楔試験のための条件・再現性の確認

3.1 ガラスビーズ密度及びガラスビーズを充填した媒体槽の間隙率

測定手順及び算出式

① ガラスビーズ密度

体積が既知の容器に均質層材を採取して質量を求める。これを乾燥させたときの質量を はかり、均質層材に含まれる水の容積を求める。

質量を容積で割った値が密度であるから、式は以下の様になる。

2間隙率

「間隙部分の容積」は均質層材に含まれる水の容積を用いる。式は以下の様になる。

媒体槽製作に用いるガラスビーズは、15000cm<sup>3</sup>を正確に採取して、ガラスビーズの間隙を水 で飽和させるために容器(調合容器)に脱気水とともに入れ、一昼夜放置する。このようにし てガラスビーズの間隙を水で飽和したガラスビーズを「均質層材」と呼ぶことにする。

容積が既知である容器に採取したガラスビーズの間隙率の測定を,媒体槽の製作に用いた以 下のサンプルで実施した。また,ガラスビーズ密度の確認を合わせて実施した。

・試験後のビーズの粒径1㎜媒体槽から計量スコップに採取したサンプル

・ビーズ粒径1mmの均質層材入り調合容器から計量スコップに採取したサンプル

・調合容器に準備したビーズ粒径1mmの均質層材

・ビーズ粒径 0.4 mmの均質層材入り調合容器から計量スコップに採取したサンプル

・調合容器に準備したビーズ粒径 0.4 mmの均質層材

「試験後のビーズの粒径1mm媒体槽から計量スコップに採取したサンプル」のサンプリング においては 250 cm<sup>3</sup>及び 100cm<sup>3</sup>計量スコップを使用した。計量スコップ容器の体積が既知であ るため、これをサンプルの容積とした。 「試験後のビーズの粒径1mm媒体槽から計量スコップに採取したサンプル」を例にして,ガ ラスビーズ密度及び媒体槽に充填したガラスビーズの間隙率測定手順をFig. 3.1-1 に,また手 順項目ごとの値をTable. 3.1-1 に示す。

Table.3.1-1の参考欄に示した「乾燥後ビーズ体積」は、250 cm<sup>3</sup>及び 100cm<sup>3</sup>計量スコップで 媒体槽から採取したサンプルをそれぞれ乾燥した後ガラス製メスシリンダーに充填して容積を 求めた結果であるが、ガラス製メスシリンダーに充填する際、振り固めたときと、流し入れた ときでは容積値が異なるため、振り固めながらガラス製メスシリンダーに充填して「固めかさ 密度」を求めた。250 cm<sup>3</sup>のガラスビーズ密度(250cm<sup>3</sup>平均)と 100 cm<sup>3</sup>のガラスビーズ密度(100cm<sup>3</sup> 平均)を求めたた。250 cm<sup>3</sup>の計量スコップ分が計量スコップ体積に対して増量傾向、100cm<sup>3</sup> 計量スコップ分が計量スコップ体積に対して減量傾向となり、2 種類の計量スコップに依存し たサンプル量のばらつきが見られたが、平均値はサンプリング方法による誤差を収束する結果 になった。さらに各サンプルの間隙率を比較すると、媒体槽の上方層のサンプル3及び4でや や低い値を示し、その後採取した中間層及び下方層では高い値を示している。誤差の原因とし て中間層及び下方層はサンプリング時に媒体槽内で数 cm 浸水した状態であり、サンプリング中 にも他の水槽の水位が媒体槽の水位に作用した水の流入があり、この中からのサンプリングに よって、容器を引き上げる際にガラスビーズが浮遊し、計量スコップから溢れて水量を多く含 んだサンプルになった可能性が高い。

Table. 3. 1-2 は,「ビーズ粒径 1 mmの均質層材入り調合容器から計量スコップに採取したサン プル」であるが,Table. 3. 1-1 で使用した均質層材を再利用するため洗浄したもので,ガラス ビーズの間隙部分は水で飽和状態にしてあるが,均質層材外から水が入り込むことはない。サ ンプリングにおいては,サンプル E が,100 cm<sup>3</sup>計量スコップを水平にして垂直に引き上げ採取 したものである。また,サンプル F,G は固めかさ密度を意識して 100 cm<sup>3</sup>計量スコップを引き 上げ前にガラスビーズを揺すってから採取したものであるが,ガラスビーズ密度,間隙率に大 きな値の差は現れなかった。

Table. 3. 1-3 は、「調合容器に準備したビーズ粒径 1 mmの均質層材」であるが、均質層の容積 が小さい装置特性を生かして均質層材の作製過程で容積・質量及び注入水量を容易に測定する ことができたため間隙率を算出できた有効な方法である。作製均質層材の間隙率は 0.02 m<sup>3</sup>バケ ツにガラスビーズ 0.015 m<sup>3</sup>及び脱気水を入れ、ガラスビーズが充分に沈降したことを待って、 ガラスビーズよりも上にある余剰水を吸引して、15000cm<sup>3</sup>の乾燥ガラスビーズに注入した脱気 水の量から吸引した水量を差し引いた水量を「均質層材に含まれる水の容積」として求めた。 結果、ガラスビーズ密度は Table. 3. 1-1 サンプル 3 及び4よりもさらに小さい値が得られ、 Table. 3. 1-3 の間隙率についても 33.9%であり、Table. 3. 1-1 のサンプル 3 及び4 の 36.9%よ りもさらに小さい値が得られた。従って小型 MACRO の均質層における堆積状態に近い固めかさ 密度、圧密状態であると思われる(以下 0.02 m<sup>3</sup>バケツの作製均質層材の間隙率を「推定間隙率」 とよぶ)。

粒径 0.4 mmのガラスビーズ密度及び間隙率についても,Table. 3.1-4 に示す「ビーズ粒径 0.4 mmの均質層材入り調合容器から計量スコップに採取したサンプル」の手順No.項目ごとの値と Table. 3.1-5 示す「調合容器に準備したビーズ粒径 0.4 mmの均質層材」の手順No.項目ごとの値 から前者の間隙率と後者の推定間隙率を比較すると、後者に固めかさ傾向が確認でき、作製均 質層材により得られた推定間隙率が小型 MACRO の均質層における充填状態に近いものと推察で きる。

3.2 均質層における塩水楔の形状再現性確認試験

一度作製した均質層を使用して水頭差や塩分濃度の条件を変えた塩水楔試験を繰り返して実施する際,ガラスビーズの沈降,水の飽和度の変化,水垢の発生・付着等の時間の経過に伴う影響が試験結果に影響を及ぼす可能性がある。小型 MACRO の均質層の約5ヶ月の時間経過に伴う試験結果への影響を調べるため,2005年12月16日の予備試験,及び2006年2月7日から3日間のトレーサー通水試験を経た均質層を用いて,水頭差を1cmとした4%塩水楔試験を2回実施して,合計3回の試験における塩水楔浸入を観察した。

前提条件として,当該均質層は2005年10月20日に充填し装置の機能確認試験を繰り返した ものであること,また,当時の媒体槽はPhoto. 3.2-1に示すとおり構造上透水性に影響を及ぼ す恐れのある部分によって,通水流量が低下する要因はあるが,均質層は現状を保存したまま 塩水楔試験を実施した。

Fig. 3. 2-1 の「4%塩水楔の形状再現性確認試験」に示した3試験の楔高さおよび楔長さの 比較グラフでは、2回目、3回目の塩水楔試験の方が塩水楔の浸入高さ(■,△)は試験開始時 から約1cm低いまま推移している。また、時間経過に対する塩水楔の水平方向浸入長さは、初 回を100%とした場合2回目、3回目の塩水楔試験では28分後に約プラス9%の浸入を確認する 結果となった。

2回目,3回目の試験で初回の試験より塩水楔の高さ浸入が遅れ,水平方向長さ浸入が多少加速した原因として,前述のような媒体槽の構造上の影響が以下の様に重なって生じたと考えられる。

- a. いずれの試験でも、通水量が Photo. 3.2-1の a. に示す隔離板枠の幅 10 mmの梁が Photo.
   3.2-1のb. に示す塩水槽ゲート支持板貫通孔 φ 22 mmと重なった構造に阻まれてガラス ビーズ間の通水量である試験流量を抑制した。また、通水路を塞いだことに加え、シャ ッター開き加減による誤差が生じた。
- b. 塩水置換作業の際のシャッター操作が原因と見られる媒体槽の水位低下により生じた Photo. 3.2-2 のような媒体槽への気泡混入によって、通水経路である一部の間隙部分 を気泡で塞いだことにより淡水の流れを抑制した。または一方では塩水の浸入する長さ を助長した。

塩水楔の浸入を助長する傾向の原因は、Photo. 3.2-1 の a. 隔離板枠の幅 10 mmの梁または Photo. 3.2-1 の b. に示す塩水槽ゲート支持板貫通孔にあると思われる。Table. 3.2-1 のトレ ーサー通水試験及び通水試験の流量の比較によって均質層は5ヶ月程度の時間経過で透水性が 低下する様なガラスビーズの沈降,飽和度低下,水垢付着等が無いことがわかった。

#### 4. 均質層の透水係数の測定

媒体槽の構造について透水性に影響を及ぼすと考えた部分の改善・整備を施した後,2006年7 月28日に製作し2006年8月10日に補充したビーズの粒径1mmの均質層における通水試験を2006 年8月21日から2006年10月12日に実施した塩水楔試験前に組み入れて実施し,試験毎に透水 係数の変化を確認した。また,2006年10月31日に充填を終えたビーズの粒径0.4mmの均質層 を使用した通水試験を2006年11月2日からの塩水楔試験前に組み入れて実施し,試験毎の透水 係数の変化を確認した。透水係数は以下の「透水係数Kの計算式」を用いて算出した。

透水係数 K の計算式は

透水係数=	<u>通水流量×均質層長さ</u>	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	• ( .	4)
透小你数一	均質層断面積×水頭差												

K=(Q·L) / (A·Δ d) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・(4 ') さらに、各々のガラスビーズが均質に充填されていることを確認するため(以下「トレーサー 通水試験」と呼ぶ)の試験を実施して、ほぼ一様なトレーサーの移行を確認した。合わせて試 験中のトレーサーの移行速度を測定し、媒体槽の間隙部を満たすトレーサー流量と間隙率の関 係を示した。

通水流量Q=均質層の体積V×間隙率λ/トレーサー移行時間T ・・・・・・(5)-1

4.1 ビーズの粒径1mmの均質層試験における透水係数の経時変化

通水流量は淡水槽から塩水槽の塩分及び浮遊物を充分通排水した後,安定した流量を確保し 3 分間継続したときの微小流量計の表示流量を読み取った。Table. 4.1-1 に示す「透水係数の 算出表 - 1」の Q 値のうち 2006 年 10 月 3 日の 3%塩水楔試験前通水試験までは微小流量計 (OF10ZZF 型) で 10 cm<sup>3</sup>/min の桁までの読み取りを,2006 年 10 月 12 日に実施した 2%塩水楔 試験のための通水試験は,微小流量計(OF05ZZF 型)を追加取付けした後に実施したため 1cm<sup>3</sup>/min の桁までの読み取りをしている。したがって,水頭差 0.5cm 及び 0.75cm で実施した 試験のうち,微小流量計(OF10ZZF 型)で読み取った流量測定範囲(350 cm<sup>3</sup>/min)以下の値は 参考値とすると,透水係数は 2006 年 8 月 10 日の均質層材補充以降に微少な変化はしたが,2006 年 9 月 7 日以降の 1 ヶ月間は 1.28~1.30 cm/sec 以内に安定している。

4.2 ビーズの粒径 0.4 mmの均質層における透水係数の経時変化

Table. 4.2-1 に示す「透水係数の算出表 - 2」の通り,通水流量は淡水槽から給水して塩水 槽の塩分及び浮遊物を充分通排水した後,安定した流量を確保し3分間給排水を継続したとき の微小流量計(0F05ZZF型)の表示流量を1cm<sup>3</sup>/minの桁まで読み取った。

結果,透水係数は2006年10月31日の均質層材補充以降約1ヶ月の試験期間中0.094~0.120 cm/sec 以内に安定している。

4.3 小型MACRO推定間隙率の妥当性

Table. 4.3-1 はトレーサー通水試験における「実測トレーサー移行時間 T」 と推定間隙率から導いた「算出トレーサー移行時間 T'」を比較した物である。

Table. 4.3-1に示す「実測トレーサー移行時間 T」の①②③は、ビーズの粒径 1 mmの均質層 補充作製の過程である 2006 年 8 月 2 日から 7 日に繰り返し実施したトレーサー通水試験結果で あり、Photo. 4.3-1の媒体槽ガードに印した 2 つの黄色マークの間を移行するトレーサー先端 が淡水槽に到達した時間を 0.5~2cm の各水頭差においてそれぞれ 3 回確認した値で、移行過程 についてもトレーサー先端位置を 1 min 間隔で追跡読み取りし Table. 4.3-2の「粒径 1 mmの均 質層の着色通水(トレーサ)試験」のように示した。また、ビデオ再生画像によりトレーサー 先端の到達位置の再確認を実施している。Table. 4.3-2 に示す「着色水浸透長さ」欄を見ると 50cm に到達したときの「経過時間」が、10 分 37 秒と記されている。この経過時間は Table. 4.3-1の表に示した「実測トレーサー移行時間 T」の①のうちの「水頭差 1 cm」の欄へ転記した 値である。Table. 4.3-1「実測トレーサー移行時間 T」の②のうちの「水頭差 1 cm」の欄では、 トレーサー移行時間 T が均質層の作製直後に実施した着色通水(トレーサ)試験結果①よりも 多く掛かっている。この値から②の試験においては透水係数の経時変化によって、均質層の作 製直後に実施した着色通水(トレーサ)試験の①よりも、均質層のかさが固まり、安定した均 質層になったため、Photo. 4.3-1 に示す測定箇所におけるトレーサー移行量が低下したものと 判断する。

ただし、2006 年 8 月 10 日に実施したハンマー検査(共鳴音で空洞の有無を確認する検査) 結果をもとに、充填不足箇所への均質層材の補充を実施していることから Table. 4.3-1①②③ は参考値として記載した。

Table. 4. 1-1の「ビーズの粒径 1mm の均質層における透水係数の経時変化」に示すとおり, 初期充填状態の通水流量Qについては9月7日以降に実施した塩水楔試験前の通水流量と比べ て約5%~8%多く,媒体槽の空洞部を流れた水量を含んでいることが予想できるため,水頭差 1cm, 1.5cm及び 2cm では均質層間隙部を満たした水量として透水係数値が 1.28~1.30 c m/sec の安 定した状態にあるときの通水流量Qを Table. 4.3-1 に示す「算出トレーサー移行時間 T'」算 出のためのデータとして使用している。

3章1項で得られたビーズの粒径1mmの均質層材における推定間隙率33.9%を用いて,以下により算出トレーサー移行時間 T'を求めたところ,Table.4.3-1に示すようにトレーサー通水 試験で求めた実測トレーサー移行時間Tとほぼ一致していることがわかった。

算出結果からビーズの粒径 1 mmの均質層の透水係数が「透水係数の算出表 - 1」の 1.28~ 1.30cm/sec となり安定した時,推定間隙率は妥当な間隙率(λe)であると言える。

 $Q = V(13000 \text{ cm}^3) \times \lambda \quad (33.9\%) / T \qquad \cdots (5) -2$ 

 $T' = V(13000 \text{ cm}^3) \times \lambda$  (33.9%) /Q

ビーズの粒径 0.4 mmの均質層についても 3 章 1 項の Table. 3.1 - 5 に示す推定間隙率 33.8%を 用いて,以下の方法によりトレーサー移行時間 T″を算出して,Table. 4.3-3 および Photo. 4.3-2 に示すような実測データおよび撮影した画像より求めた「実測トレーサー移行時 間 T」と推定間隙率から算出した「算出トレーサー移行時間 T"」とを比較した。 Q=V(13000cm<sup>3</sup>)×λ (33.8%) /T ・・・・・・・(5) -3 算出時間 T' は T' =V(13000cm<sup>3</sup>)×λ (33.8%) /Q (34cm<sup>3</sup>/min) =129' 14"

Table. 4. 3-3 より実測トレーサー移行時間は 24 分で着色水が約 9.5cm 移行しているから「計算式では着色水が移行して 9.5cm に到達する時間は

着色水浸入が約 9.5cm に達する時間は,算出トレーサー移行時間 T"と実測トレーサー移行時間 (表中では「経過時間」を示す)とでほぼ一致していることがわかった。

5. 塩水の淡水中への進展過程や塩淡境界面の挙動の観察

5.1 均質層における塩水楔試験

小型 MACRO のビーズの粒径 1 mmの均質層中において塩水槽の塩水濃度を 4%, 3%及び 2%にした際の塩水楔試験を,Photo. 5.1-1 に示す。試験は,染料により着色した塩水が淡水槽(右端) に達するまで,あるいは塩水の浸入が進まない定常状態に達するまで実施し,塩水濃度を変えた場合の各水頭差での塩水楔の浸入形状を Fig. 5.1-1, Fig. 5.1-2,及び Fig. 5.1-3 に図示して比較した。Fig. 5.1-4 には Fig. 5.1-1, Fig. 5.1-2,及び Fig. 5.1-3 の中の水頭差 0.75cm の塩水 楔試験における試験記録を用いた経過時間と塩水楔浸入寸法の関係について示す。

また,ビーズの粒径を 0.4 mmに変えた均質層中において塩水槽の塩水濃度を 4%, 3%及び 2% にした際の塩水楔試験を Photo. 5.1-2 に示すとおり,塩水楔が定常状態に達するまで実施した。 塩水濃度を変えた場合の各水頭差での塩水楔の浸入形状を Fig. 5.1-5, Fig. 5.1-6 及び Fig. 5.1-7 に示す。

(1) 水頭差を変えたときの塩水濃度4%楔浸入形状

Fig. 5.1-1 に示した塩水楔の浸入形状においては水頭差0.5cmに設定した試験を除いて, 他の水頭差に設定した試験では塩水楔の浸入が止まり定常状態に達した。水頭差を低くす ると水平方向浸入長さ,浸入高さとも水頭差に反比例して進展しているのがわかる。

(2) 水頭差を変えたときの塩水濃度 3% 楔及び 2% 楔浸入形状

Fig. 5.1-2,及びFig. 5.1-3に示した塩水楔の浸入形状の3%濃度の試験では、水頭差を 0.5cm に設定した試験を除いて他の試験では塩水楔の浸入が止まり定常状態に達した。塩 水と淡水の境界は、塩水の赤と淡水の透明に分かれて多少円弧状の形状をしている。また、 どの濃度においても水頭差に反比例して水平方向浸入長さ及び高さが進展している。ただ し、水頭差を2cmに設定した際には2%塩水の淡水への浸入は全く無かった。

(3) 塩水楔浸入量の塩水濃度変更による影響

Fig. 5.1-4 は前述 Fig. 5.1-1, Fig. 5.1-2, 及び Fig. 5.1-3の中から水頭差 0.75cmの塩水

楔試験について,開始から定常状態に至るまでに塩水が浸入した高さ(H)及び浸入した長さ(L)を4分毎に記録したデータを用いて重ねて比較している。

塩水浸入高さ及び水平方向浸入長さは、2%でH122mm-L188mm、3%でH148mm-L263mm、4%でH189mm-L490mmであり、特に水平方向浸入長さにおいては塩水濃度が濃い方が淡水内に大きく入り込む。2%塩水と3%塩水では2%塩水の浸入量の1.39倍、3%塩水と4%塩水では3%塩水の浸入量の1.86倍までの浸入を示した。

(4) 均質層ビーズの粒径が 0.4 mmのときの楔浸入形状

ビーズの粒径を0.4mmに変えた均質層中において塩水槽の塩水濃度を約4%,3%及び2% にした際の塩水楔試験をFig.5.1-5, Fig.5.1-6およびFig.5.1-7に示したような水頭差 により実施した。Fig. 5.1-5が4%の塩水楔が定常状態に達したときの浸入形状を, Fig.5.1.6が3%Fig.5.1.6が2%の塩水楔が定常状態に達したときの浸入形状を示している。 どの濃度においても水頭差が低くなると水平方向浸入長さ浸入高さとも進展している。ま た、塩水と淡水の境界は塩水の赤と淡水の透明に分かれて多少円弧状の形状をしている。 (5)塩水楔浸入量の均質層のビーズの粒径変更による影響

ビーズの粒径1mmの均質層における試験に比べてビーズの粒径が0.4mmの均質層の試験 はTable.5.1-1のように同じ水頭差でも定常状態に到達するまでの時間が4.6倍から10.5 倍掛かった。

同じ水頭差で実施したビーズの粒径 1 mmの均質層における試験とビーズの粒径が 0.4 mm の均質層における試験の塩水楔形状を相互比較すると、ビーズ粒径が異なることで試験時 間に違いがあるにもかかわらず、塩水楔が定常状態に達した際の形状および到達位置はお およそ近接している。Fig. 5.1-1 と Fig. 5.1-5 の水頭差  $\Delta$  1.5cm 試験, Fig. 5.1-2 と Fig. 5.1-6 の水頭差  $\Delta$  2.0cm 試験および Fig. 5.1-3 と Fig. 5.1-7 の水頭差  $\Delta$  1.0cm 試験結果 は近似している。

定常状態に達したときの塩水楔浸入量は、均質層のビーズの粒径変更による影響よりも 水頭差や塩分濃度によって決定されることを、データ収集を重ねた5項で再度検証するこ ととする。

5.2 均質層における塩水楔浸入に影響される染料浸透試験

塩水槽に対する淡水槽の水頭差を2cmとして通水試験を行い,塩水槽での越流流量が一定(69 cm<sup>3</sup>/min)で水頭設定の再現が正確である事を確認した後,ビーズの粒径0.4 mmの均質層中において塩水楔浸入中の染料浸透試験を以下の条件で実施した。

塩水槽のゲートを閉じ、塩水槽内の淡水を排水した後、濃度4%の塩水で満たし、一方の淡水 槽の底部にはFig.2.1-4に示すように孔径1mmの青色染料水ノズルを設置した。青色染料水ノ ズルより淡水の通水断面積の1/250断面相当あたりの流量である0.14cm<sup>3</sup>/min で染料水を吐出 しながら塩水楔試験を開始した。

その結果, Photo. 5. 2-1 から分かるように 60min にて塩水楔が高さ 6cm×長さ 8cm の定常状態 に達し, 112min に青色染料水が塩淡境界に達した。青色染料水の浸透速度は Fig. 5. 2-1 に示す 様に水平方向長さ 30cm までは約 0. 45cm/min, 水平方向長さ 40cm に至ってから塩水槽に到達す るまでの塩淡境界面に沿った浸透は約0.22cm/minとなって,先端を球状から鋭角な形状に変え, 先端を鋭く屈曲させながら,塩水と混ざることなく塩水槽に至った。更に,140min後では先端 に追随する部分が次第に塩水と接触して塩淡境界面で混合したことを示す紺色に変色した糸状 の線を観察できた。

5.3 ビーズの粒径 0.4 mmの均質層における折り返し塩水楔試験

塩水槽に対する淡水槽の水頭差を1.5cmとして通水試験を行い,塩水槽での越流流量が一定 (41 cm<sup>3</sup>/min)で水頭設定の再現が正確である事を確認したビーズの粒径0.4 mmの均質層中に おいて塩水楔折り返し試験を以下の条件で実施した。

塩水槽のゲートを閉じ塩水槽内の淡水を排水した後,濃度4%の塩水で満たした。Photo.5.3-1 に示すように,塩水楔試験を開始し152minで塩水楔が高さ10.7cm×長さ14.8cmの定常状態に 達した。ここから水頭差を2cm, 2.5cmに変更し,更に1.5cmに戻したときの塩水楔の復旧の様 子を観察した。

試験を開始して 169min 後に水頭差を 2.5cm に変更したところ,楔形状は高さ 7.5 cm×長さ 11.3 cm まで衰退し,それまでなだらかな曲線であった塩淡境界は,楔先端が削れたような鈍角な形状を示した。

水頭差を戻して 1.5cm とした 212min 時点には楔形状は高さ 3.5 cm×長さ 4.7 cm まで衰退した。折り返して塩水楔が浸入した 21 分後には、塩水楔試験を初期の 28 分時点における楔形状とほぼ同じく高さ 7.2 cm×長さ 9 cm 迄戻し、塩水の赤色がぼやけることなく曲線を復旧再現した。

5.4 二層不均質層における塩水楔試験

Fig. 5. 4-1 に示すように小型 MACRO にビーズの粒径 0.4 mmの均質層 5cm を充填後, ビーズの 粒径 1 mmの均質層 20cm を堆積させた二層不均質層を作製して, Fig. 5. 4-2 に示すトレーサー通 水試験を水頭差 2cm で実施した後, Photo. 5. 4-1 に示すように塩水槽の塩水濃度を 4%にした際 の塩水楔試験を水頭差 0.7 cm, 1 cm, 1.5 cm 及び 2cm として実施した。また,塩水濃度を 3% にした際の塩水楔試験を水頭差 1.5 cm 及び 2cm として, さらに,塩水濃度を 2%にした際の塩 水楔試験を水頭差 1 cm として実施した。

以下(1)から(3)では Photo. 5. 4-2 に示すような水頭差 0.75 cm における試験で得られ た結果について紹介する。

塩水槽に対する淡水槽の水頭差を 0.75cm とし通水試験を行い,塩水槽での越流流量が一定 (179 cm<sup>3</sup>/min) で水頭設定の再現が正確である事を確認した後,塩水槽を濃度 4%の塩水で満 たし,淡水槽の底部に設置した孔径 1mm のノズルより青色染料水を流量 0.25cm<sup>3</sup>/min で吐出し ながら塩水楔試験を開始し,3hr44min 間試験を行った。

(1) 下方層への塩水進展過程と楔形状変化及び上方層における染料浸透試験

不均質層における4%塩水楔の形成においては,透水性の高いビーズの粒径1mm層へ先端 を丸めた特徴を持った形状で浸入を開始し,4min程遅れてビーズの粒径0.4mm層への浸入 を開始する。ビーズの粒径0.4mm層への浸入の遅れを補うようにビーズの粒径1mm層から 塩水が滴れる現象が確認できた。開始 72min にはビーズの粒径 1 mm層を 0.5cm 間を 8min (0.625 mm/min) 掛けて進展する塩水楔とビーズの粒径 0.4 mm層を 1.5cm 間を 8min(1.875 mm/min)掛けて進展する塩水楔の浸入長さが並び,二つの鋭角な楔が形成された。178min にはビーズの粒径 1 mm層での塩水楔の進展は停止し定常状態になるが,ビーズの粒径 0.4 mm層では約 1 mm/min で進展することを確認できた。

一方,ビーズの粒径1mm層に浸透する青色染料水は,塩水楔の接近前である24minから 徐々に先端を球状から鋭角な形状に変え,先端を鋭く屈曲させながら,塩水と混ざること なく塩淡境界面に沿って上昇し,塩水槽に至った。

塩水楔の進展過程での注目点として、ビーズの粒径1mm層の塩水楔からビーズの粒径0.4 mm層へ滴れる塩水染料は、時間経過とともにビーズの粒径1mm層を進展する塩水楔の進展 速度に合致して右方向へ平行移動していることから、ビーズの粒径1mm層の塩水楔は先に 浸入した塩水が新たに供給された塩水に塩水層側から順次押し込まれて進展するものと推 察できる。

(2) 下方層から上方層へ浮上する青色染料水の浸入による塩淡境界の着色変化

二層不均質層で2006年12月5日に水頭差2cmでトレーサー通水試験を実施している。 トレーサー通水試験の過程を撮影したFig.5.4-2に示す画像より,ビーズの粒径0.4 mm層 の染料の淡水中での移行速度を確認すると3.2mm/minとなるが,同画像より確認したビー ズの粒径1 mm層における淡水中での染料の移行速度の約70 mm/minに比べて透水性が低い ことが確認できる。

Photo. 5. 4-2 に示すような水頭差 0. 75 cm とした塩水楔試験において, ビーズの粒径 0.4 mm層に浸透する青色染料水は、淡水槽の隔離板面に集中的に吐出させた青色染料水が、直径約 4 cm の大きさになって浸透したものであるが,形状を変える拡散等は無くビーズの粒径 0.4 mm層内を左方向へ平行に移行した。塩水楔に到達した 170min には先端を球状から鋭角な形状に変え,先端を鋭く屈曲させ φ 1 mm層へ浸透,ビーズの粒径 1 mm層に浸透する青色染料水とは 140min まで接触が見られなかった塩淡境界面を透明から青色に変えながら,かつ淡水の流速が速い層への流入により流域を狭めて浮上した。

(3) φ0.4 mm層における青色染料水と塩水である赤色染料との混合域の形成

 $\phi$ 0.4 mm層の青色染料水は170min で塩水楔に接触した。接触直後から $\phi$ 0.4 mm層に浸入 する赤色である塩水楔と重なり合うことで塩水楔の先端を紺色に変色させる混合域が形成 されることを確認した。

225min 経過時における純粋な塩水部分を観察すると φ1 mm層では淡水に押される様に湾曲し, φ0.4 mm層では先端に丸みを持っているように見ることができる。

(4) 水頭差を変えたときの塩水濃度4%における楔浸入形状の比較

塩水楔試験を二層不均質層において Fig. 5. 4-3 に示すような水頭差にして実施した。図

は,各水頭差における塩水楔が淡水の下へ浸入した高さと水平方向の長さを比較するため, 試験で得られた塩淡境界を重ねて示した。すべて塩水楔の進展が止まり定常状態に達した ときの塩淡境界の浸入高さと水平方向の浸入長さを示している。水頭差を低くすると水頭 差に反比例して浸入長さ,高さとも進展しているのがわかる。

5.5 水頭差と塩分濃度によって決定される定常状態の塩水楔形状

Fig. 5. 1-1 と Fig. 5. 4-3 の相違点として,同一水頭差とした試験を比較した場合,後者では 二層不均質層のビーズの粒径0.4mmの均質な層とビーズの粒径1mmの均質な層で湾曲した形状 の塩淡境界面がそれぞれ確認でき,若干角度をかえて連なった状態になっている。均質層の場 合と比較すると浸入過程も浸入形状も異なる。塩水楔浸入長さを,Fig. 5. 1-1 の底部 5cm を目 隠しして Fig. 5. 5-1 に示すようにして, Fig. 5. 4-3 の媒体槽における塩淡境界面が若干角度を かえた粒形 1 mm層底部を底辺とする楔と部分比較しても塩水楔浸入長さ,浸入高さに関した形 状の一致点は示せず、各水頭差の試験共に Fig. 5. 4-3 の二層不均質層における塩水楔が定常状 態に達した際の水平方向浸入長さは大きな浸入を示している。逆に Fig. 5. 1-1 と Fig. 5. 4-3 の底部を底辺とする塩水楔浸入長さを比較すると、水頭差 1cm で実施した試験で近似している。

2007 年 6 月までに Fig. 5. 5-2 に示すような「ビーズの粒径 0.8 mmの均質層における間隙率 とトレーサー移行時間の関係」においてビーズの粒径 0.8 mmの均質層における間隙率は,

「34.2%」であることを確認した。また、Photo.5.5-1の「ビーズの粒径 0.8 mmの均質層における塩水楔試験の結果画像一覧」に示すような塩水楔試験を実施した。

ビーズの粒径 0.8 mmの均質層における塩水楔試験から得られたデータと粒径 1 mm 粒径 0.4 mmのガラスビーズをそれぞれ充填した均質層, ビーズの粒径 0.4 mmの層の上にビーズの粒径 1 mmの層を水平になるように堆積充填させた二層不均質層を含めた 4 種類の媒体槽における塩水楔試験結果を Table. 5.5-1 に示して比較するとともに, 定常状態における塩水楔の水平方向 浸入長さに影響を与える要因について Fig. 5.5-3 に示して評価した。1 項の(5) で示したのと 同様に, Table. 5.5-1 においてもビーズ粒径が異なることで「試験時間」に違いがあるにもか かわらず塩水楔が定常状態に達した際の水平方向浸入長さは, Fig. 5.5-3 においても水平方向 浸入長さに影響を与える要因の1つである「塩水の電気伝導率」毎に分布がおおよそ近接して いる。

Fig. 5.5-3 のデータを詳細に比較すると■水頭差(Δh) 0.75cm, ▲水頭差(Δh) 1cm, × 水頭差(Δh) 1.5cm 及び※水頭差(Δh) 2cm のそれぞれが電気伝導率が上昇するにしたがっ て,右上がりの直線で示すこと(ただし,水頭差(Δh) 2cm の×印1つ及び水頭差(Δh) 0.75cm の×印1つを除いた場合。)ができ,水頭差が低下するほど右上がりの直線が急勾配を示して いる。これらの結果から,塩水の電気伝導率の上昇が在っても水頭差が大きいときは塩水楔水 平方向浸入量への影響は比較的小さいものの,水頭差が小さくなると塩水の電気伝導率の上昇 にともなって塩水楔水平方向浸入量への影響が増幅して塩水楔水平方向浸入量の急激な増加 を示すことが分かった。

Fig. 5. 5-3 中の二層不均質層における試験結果は→印を(■水頭差( $\Delta$ h)0. 75cm,  $\land$ 水頭 差( $\Delta$ h) 1cm, ×水頭差( $\Delta$ h) 1. 5cm に)付けた 4 点である。結果は、データ数が少ないこ

と及び図中の分布を見て,各水頭差の均質層における塩水楔水平方向浸入量との関連性を評価 できるものではないが,水頭差が小さい場合には,他の均質層の塩水楔水平方向浸入量より少 ない浸入量を示した。

#### 6. おわりに

沿岸地域の地下においては,淡水に海水が浸入することにより塩水と淡水が共存した領域が 形成される。

多孔質媒体中水理・物質移行現象可視化装置(以下「小型 MACRO」と呼ぶ)を用いて 2005 年12月から 2007 年6月まで実施した均質層及び二層不均質層を対象にした塩水の淡水中への 進展過程や塩淡境界面の挙動観察を行った。

(1) 塩水の淡水中への進展過程観察

塩水の淡水中への進展過程観察においては,媒体槽内での塩水の浸入形状への塩分濃度 と水頭差の違いによる影響が顕著であり,ビーズの粒径 1 mmの均質層における水頭差 0.75cm の塩水楔試験では,定常状態に至るまでに塩水が浸入した高さ(H)及び浸入した 長さ(L)は、2%でH122 mm - L188 mm,3%でH148 mm - L263 mm,4%でH189 mm - L490 mmとな り,特に水平方向浸入長さにおいては2%塩水と3%塩水では2%塩水の浸入量の1.39 倍,3% 塩水と4%塩水では3%塩水の浸入量の1.86 倍までの浸入を示し、塩水濃度が濃い方が淡水 内に大きく入り込む。均質層のビーズの粒径を変えた場合に定常状態に到達する時間は、 ビーズの粒径 1 mmの均質層における試験に比べてビーズの粒径 0.4 mmの均質層における試 験では透水性の低いことが影響して各水頭差とも4.6 倍以上掛かった。一方,同じ水頭差 で実施したビーズの粒径 1 mmの均質層における試験とビーズの粒径が 0.4 mmの均質層にお

るにもかかわらず、塩水楔が定常状態に達した際の形状および到達位置はおおよそ近接し ていた。

(2) 塩淡境界面での挙動観察

①淡水槽から媒体槽に微流量の青色染料水を吐出すことによる塩淡境界面近傍での挙動観察では、以下の様な淡水の流れる様子を観察した。

- ・ 青色染料水である淡水が塩水の浸入した領域を避けるように流れる屈曲現象。
- ・ 淡水中の青色染料水の浸透速度は 0.45cm/min であったが塩水楔と接近するのに伴って (また,塩淡境界面近傍で) 0.22 cm/min に減速。
- ②塩水楔折り返し試験における塩水楔の形状復旧の観察では、以下の様な楔形状の連続した 変化を観察した。
- ・ 楔形状が曲線形状の定常状態に達した後の手動による水頭差上昇によって、塩水楔は先端が削れるような鈍化を伴って衰退。
- ・塩水楔折り返し起点では鈍化が無い曲線形状に戻り,水頭差の降下変更後には時間経過 するに伴って衰退前の塩水楔形状を復旧。
- ③不均質層における試験では、以下のような連続した変化を確認した。

- ・ 楔浸入過程において透水性の異なる上方層と下方層で並んだ二つの鋭角な楔が形成され、
   時間経過に伴って曲線形状がほぼ一体化した擬似楔形状を形成。
- ・透水性の低い下方層を直径約 4cm の固まりとなって流れた青色染料水が透水性の異なる 上方層に至った際は塩水楔の境界面に沿って流域を数ミリまで狭めて浮上。
- ・各試験において、下方層を流れた青色染料水と下方層に浸入した塩水楔の楔先端を覆うように混合域を形成。

以上の結果及びビーズの粒径 0.8 mmの均質層における塩水楔試験の結果を踏まえ,ビーズの 粒径が異なるビーズの粒径 1mm,ビーズの粒径 0.4 mm,ビーズの粒径 0.8 mmの 3 種類の均質層及 び二層不均質層での各試験における塩水楔浸入量を整理して評価した結果,今回の動水勾配と 塩水濃度が同様の条件下においては、ガラスビーズ粒径によらず、動水勾配(/H)、塩分濃度

(density)で塩水楔浸入量の分類ができる見通しが得られた。さらに塩水楔浸入量の特徴として は、塩分濃度の増加にしたがって浸入長さが増す比例関係が成立つ、動水勾配が低いときほど 塩水濃度の増加による影響が著しく浸入長さが大きくなった。

「塩水の淡水中への進展過程や塩淡境界面の挙動観察」に際しては、均質層及び二層不均質 層の環境整備が肝要であると考え、「塩水楔試験のための条件・再現性の確認」を行った。媒体 槽中の間隙率測定方法として、直接サンプリングのように場を乱し余剰の飽和水を混入するサ ンプリング問題を無くす効率的な方法として、均質層の素材(充填前の材料 15000cm<sup>3</sup>または 14000 cm<sup>3</sup>)をサンプルとして用い容積・質量及び注入水量を測定して妥当な間隙率が得られ ることを確認した。結果 3 種類の均質層の間隙率はビーズの粒径 1 mmで λe=33.9%、ビーズの 粒径 0.4 mmで λe=33.8%、ビーズの粒径 0.8 mmで λe=34.2% であった。また、5 ヶ月間経過し た均質層において「塩水楔の形状再現性確認試験」を行い塩水楔形状の再現性に影響するガラ スビーズ層環境の変化は無かった。

今後は、均質層材をサンプルとして求めた推定間隙率をパラメータとして数値解析に活用で きることを逆解析によって同定するとともに、試験で得られた塩水楔水平方向浸入長さや浸入 速度について数値解析シュミレーションにおいて同定することを考えている。小型 MACRO を 用いた研究の継続においては、透水条件を変えた際の塩水楔進展速度の違いによる濃度分散状 況、数値モデルにより水頭の周期的な経時変化などが拡散領域の増減に影響を及ぼす可能性が 示唆されている <sup>®</sup>ことを踏まえ、水頭の経時変化などが拡散現象に及ぼす影響などを確認する ための Photo. 5. 3-1 に示すような折り返し試験を繰り返した間欠的動水勾配変更による塩水 楔の境界条件の変動における濃度拡散状況、及び数種類の不均質層パーツ作製による塩水 楔水平方向浸入のデータ収集を継続する必要がある。以降、塩淡境界面における挙動観察に よる経験を基に二層流理論の理解を深めると共に、数値解析手法(TOUGH2等)<sup>3</sup>によるモデル 評価結果と比較することを通じて、更にモデルの検証を実施する。並行して解析プログラム (Dtransu)<sup>5</sup> を使用した塩淡境界把握のための数値解析的検討を進める予定である。

#### 参考文献

- 1)高須民男,前川恵輔:多孔質媒体中水理・物質移行現象可視化装置(小型 MACRO)の開発及び 予察試験結果, JAEA-Technology2006-061 (2007)
- 2) 畑中耕一郎, 亘真吾, 金澤康夫, 内田雅大, 石黒勝彦, 石川博久: 不均質多孔質媒体中の水理 /物質移動に関する研究(I), PNC TN8410 95-377 (1995)
- K. Pruess, C. Oldenburg, G. Moridis: "TOUGH2 User's Guide", Lawrence Berkeley National Laboratory Report, LBNL-43134 (1999)
- 4)前川恵輔, 唐崎健二, 伊藤一誠: "地層中の塩淡境界評価に関する一考察", 第22回日本原 子力学会バックエンド部会夏期セミナー資料集(2006).
- 5) 菱谷智幸,西垣誠,橋本学: "物質移動を伴う密度依存地下水流の 3 次元数値解析手法に関 する研究",土木学会論文集 No. 638/Ⅲ-49, pp.59-69 (1999).
- 6) K. Maekawa, K. Karasaki and T. Takasu: "Laboratory Experiment for Seawater Intrusion into Freshwater Aquifer", 2006 AGU Fall Meeting (2006).
- 7) K. Maekawa, K. Karasaki and T. Takasu: "Laboratory Experiments for Seawater Intrusion into Freshwater Aquifer with Heterogeneity", 2007 AGU Fall Meeting (2007).
- 8) K. Karasaki, K. Ito and K. Maekawa: "Simulation of Salt Water Intrusion", Proceedings, TOUGH Symposium 2006 (2006).
- 9) 井上博之,石黒健, 久慈雅栄, 吉野尚人: 堆積岩地域の特徴を考慮した地下水流動現象の解明と モデル化に関する研究概要報告書, 核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書 JNC TJ8400 2004-013 (2004)

#### Table. 2.1-5 電気伝導率と塩水濃度の関係

NaCl標準溶液による電気伝導率測定手順

2006年1月31日 室温16℃

1 電気伝導率10.67mS/cm(=1.067S/m)の標準溶液によるCM-21P型ポータブル電気伝導率計の指示値確認。

2 4%NaC1標準溶液を10作り、CM-21P型ポータブル電気伝導率計で電気伝導率及び塩水濃度を測定。

3 4%NaCl標準溶液を食紅0.1gで着色した後に電気伝導率及び塩水濃度を測定。

4 以下0.25%づつ希釈した着色NaC1標準溶液15点に対する電気伝導率及び電気伝導率計の塩水濃度を測定。

5 電気伝導率(S/m)と本標準溶液の関係グラフを作成。

	電気伝	導率計	の塩水湯	農度換算	筸値				測定機	器 は CM	I-21P型	ポータフ	リル伝導	率計			I
塩水濃度	0.27%	0.53%	0.79%	1.05%	1.31%	1.57%	1.84%	2.09%	2.35%	2.60%	2.86%	3.12%	3.36%	3.61%	3.86%	4.11%	
	4%NaCl	標準溶	液を基に	こ希釈し	た塩水の	の電気伤	云導率と	塩水濃	度データ	7							(参考)
標準塩水濃度(%	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	3.75	4.00	4%の蒸留水
電気伝導率(S/m)	0.515	0.971	1.419	1.842	2.26	2.66	3.06	3.44	3.84	4.21	4.59	4.97	5.32	5.7	6.04	6.42	6.32
溶液温度(℃)	14.2	14.4	14.5	14.5	14.6	14.6	14.7	14.5	14.4	14.4	14.3	14.2	14.2	14.1	14	13.4	15.7
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	

\*NaC1標準溶液の希釈に使用する脱気水は、水道水をフィルターに通して500Lタンクに10日間貯水したものであり

電気伝導率 y 14℃は180 µ S/cm (=1.8×10<sup>-2</sup>S/m) 程度である。

\*電気伝導率10.67mS/cm(=1.067S/m)の標準溶液によるCM-21P型ポータブル電気伝導率計の指示値は、y16.1℃=1.080S/m



表とグラフから標準溶液塩分(左)と電気伝導率計の塩分値(右)が最大0.11%濃度誤差を含むものの、近似した比例関係にあることが検証できた。

Table. 3.1-1 試験後のビーズ粒径 1 mm媒体槽から計量スコップに採取したサンプル

手順No.項目	3-1)	1	10	11)	10	4	参考	3	1)		8
項目 サンプル 番号	均質層材 質量(g)	ビーズ密度 g/cm <sup>3</sup>	間隙率(%)	乾燥ビー ズ質量 (g)	均質層材中 の水の容積 (1g=1cm <sup>3</sup> )	採取均質 層材容積 (cm <sup>3</sup> )	乾燥後ビー ズ体積 (cm <sup>3</sup> )	擦切り均 質層材質 量(g)	空計量ス コップ質 量(g)	乾燥後質 量(g)	空バット 質量 (g)
250cm <sup>3</sup> 平均	480.95	2.53	39.6	382.1	98.9	<b>≒</b> 250	254	526.5		966.6	
100cm <sup>3</sup> 平均	185.61	2.42	38.2	147.4	38.2	≒100	98	209.9		904.6	
サンプル1	471.36	2.43	38.0	376.29	95.07	250	250	516.97	45.61	958.39	582.10
サンプル2	483.37	2.54	39.4	384.83	98.54	250	256	528.95	45.58	971.76	586.93
サンプル3	185.57	2.36	36.9	148.71	36.86	100	98	209.96	24.39	839.85	691.14
サンプル4	183.32	2.32	36.9	146.47	36.85	100	97	207.45	24.13	1175.50	1029.03
サンプル5	484.40	2.57	40.3	383.70	100.70	250	254	530.01	45.61	965.80	582.10
サンプル6	484.68	2.58	40.5	383.42	101.26	250	255	530.26	45.58	970.35	586.93
サンプル7	188.64	2.46	39.2	149.44	39.20	100	99	213.03	24.39	840.58	691.14
サンプル8	185.11	2.39	38.8	146.33	38.78	100	96.5	209.24	24.13	1175.53	1029.20
サンプル9	187.39	2.44	39.2	148.20	39.19	100	98	211.67	24.28	730.30	582.10
サンプル10	185.43	2.39	38.4	147.01	38.42	100	97	209.56	24.13	733.95	586.94
サンプル11	183.84	2.36	38.3	145.55	38.29	100	97	208.20	24.36	836.65	691.10
平均		密度g/cm <sup>3</sup>	間隙率(%)					サンプル都	話号とサンフ	リング位置	
1		2 44	38 7					サンプリン	ゲ順·432	1567891	011

2006年6月14日採取 粒径1mmガラスビーズ密度及び均質層のサンプルの間隙率測定



Table. 3.1-2 ビーズ粒径 1 mmの均質層材から計量スコップに採取したサンプル

2006年7月27日再生棋体	粒径1mmガラスビーズ密度及び均質層材のサンプルの間隙率測定
2006年7月27日再生媒体	新径1mmガラスビーズ密度及び均質層材の+

手順No.項目	3-1	(1)	10	(1)	10	4	参考	3	1)		8
項目 サンプル	均質層材 質量(g)	ビーズ密度 g/cm <sup>3</sup>	間隙率 (%)	乾燥ビー ズ質量 (g)	均質層材中 の水の容積 (1g=1cm <sup>3</sup> )	採取均質 層材容積 (cm <sup>3</sup> )	乾燥後ビー ズ体積 (cm <sup>3</sup> )	擦切り均 質層材質 量(g)	空計量ス コップ 質量 (g)	乾燥後 質量 (g)	空バット 質量 (g)
サンプルE	180.75	2.28	37.0	143.78	36.97	100	95	205.03	24.28	725.88	582.10
サンプルF	191.01	2.46	37.6	153.44	37.57	100	100	215.14	24.13	740.53	587.09
サンプルG	191.66	2.48	37.9	153.74	37.92	100	101	216.02	24.36	845.03	691.29
亚均		密度g/cm <sup>3</sup>	間隙率(%)								
1 20		2.41	37.5								

Table.3.1-3 調合容器に準備したビーズ粒径1mmの均質層材

2005年10月20日充填媒体 2006年6月1日~6月16日 粒径1mmガラスビーズ密度及び調合容器の均質層材の間隙率測定

項目 サンプル	均質層材 質量 (g)	ビーズ密度 (g /cm <sup>3</sup> )	推定間隙率(%)	乾燥ビー ズ質量 (g)	均質層材中 の水の容積 (1g=1cm <sup>3</sup> )	採取均質 層材容積 (cm <sup>3</sup> )	乾燥後tǐ- ズ体積 (cm <sup>3</sup> )	調合均質 層材質量 (g)	空30Lバ ケツ・2 Lメスシ質量 (g)
均質層材	27, 540. 18	2.27	33.9	22, 450	5090.18	15000	15000	31350	909.82

Table. 3.1-4 ビーズ粒径 0.4 mmの均質層材から計量スコップに採取したサンプル

20001	十10月18日		赵佺0.4Ⅲ□刀	<u>フスヒース省</u>	<u> </u>	『村のサンノ	ルの间隙	<b>牟</b> 測正			
手順No.項目	3-1)	1)	10	1)	10	4	参考	3	(1)		8
項目 サンプル	均質層材 質量(g)	ビーズ密度 g/cm <sup>3</sup>	間隙率(%)	乾燥ビーズ 質量(g)	均質層材中 の水の容積 (1g=1cm <sup>3</sup> )	採取均質 層材容積 (cm <sup>3</sup> )	乾燥後 ビーズ体 積(cm <sup>3</sup> )	擦切り均 質層材質 量(g)	空計量ス コップ質 量(g)	乾燥後 質量(g)	空バット 質量(g)
サンプルC	203.87	2.680	38.2	165.70	38.17	100	108	228.26	24.39	1194.90	1029.20
サンプルD	197.02	2.576	38.4	158.60	38.42	100	102	221.15	24.13	1187.80	1029.20
サンプルE	194.17	2.518	38.0	156.20	37.97	100	100	218.45	24.28	738.30	582.10
サンプルF	192.37	2.498	38.3	154.05	38.32	100	98	216.5	24.13	741.03	586.98
サンプルG	197.09	2.634	40.6	156.50	40, 59	100	101	221.45	24.36	847.70	691.20
亚均		密度g/cm <sup>3</sup>	間隙率(%)								
1.11		2.53	38.2	サンプルの	最小値C及び	最大値Gを防	いて算出	した。			

2006年10月18日 粒径0.4mmガラスビーズ密度及び均質層材のサンプルの間隙率測定

Table. 3.1-5 調合容器に準備したビーズ粒径 0.4 mmの均質層材

2006年10月17日	3	<u>粒径0.4mmガラ</u>	ラスビーズ密度	夏及び調合容器	の均質層を	すの間隙率測定
手順No.項目 ⑪+⑩*	(1)	10	11)	10*	<b>(4</b> )*	④*は、未使用のガラスビーズを
項目 均質層 類量(g)	† ビーズ密 度g/cm <sup>3</sup>	推定間隙率 (%)	乾燥ビーズ 質量(g)	均質層材に 含む水の容 積(1g=1cm <sup>3</sup> )	均質層材 容積(cm <sup>3</sup> )	2Lポリビーカを用いて量り採取 ⑩*は、水6300cm <sup>3</sup> を④に注入,振 動を加え、均質層材が浸水してか ら上積み2cmの余剰水分を除いた 際の均質層中の水分
均質層材 3011	0 2.43	33.8	24137.00	5070.12	15000	余剰水分の容量
				-		=バケツ半径 $^2$ ×円周率×高さ

 $=14^2 \times 3.14 \times 2$ 

=1229.88 cm<sup>3</sup>

#### Table. 3. 2-1 小型MACRO装置の通水流量

2005年10月20日作製	2005年10月20日作製-ビーズ粒径1㎜の均質層											
2006年2月7日~2月9日 トレーサー通水試験												
データ項目 小型MACRO												
$\Delta d$ :水頭差 (cm)	0.5	0.75	1	1.5	2							
均質層断面積cm <sup>2</sup>	250	250	250	250	250							
A•.Δd	125	187.5	250	375	500							
L:均質層長さcm	52	52	52	52	52							
Q: 通水流量cm <sup>3</sup> /min	110		220	330	480							
2006年5月24日~ 4%塩水楔試験前の通水												
0.通水滋景om <sup>3</sup> /min			180*									

Q: 通水加量cm / min / 1000 \*は20分実施した通水試験の最初の10分間の結果で180cm<sup>3</sup>/minとした。後半 10分間は220cm<sup>3</sup>/minとなった。

	~			(Q値;(	DF10ZZF型	流量計)
データ項目		)	小型MACF	RO		ĺ
Δd:水頭差(cm)	0.5	0.75	1	1.5	2	
均質層断面積cm <sup>2</sup>	250	250	250	250	250	Ĩ
A•.∆d	125	187.5	250	375	500	ĺ
L:均質層長さcm	52	52	52	52	52	ĺ
Q:通水流量cm <sup>3</sup> /min	220	300	390	600		Í
Q':通水流量cm <sup>3</sup> /sec	3.67	5.00	6.50	10.00		
透水係数 K(cm/sec)	1.53	1.39	1.35	1.39		
2006年9月7日~ 2% 塩	水楔試験前	の通水				-
Q:通水流量cm <sup>3</sup> /min	220		370		750	
Q':通水流量cm <sup>3</sup> /sec	3.67		6.17		12.50	
透水係数 K(cm/sec)	1.53		1.28		1.30	
2006年9月28日~ 4%共	<u> </u>	試験前のi	恿水ःःःः			
Q:通水流量cm <sup>3</sup> /min	220	300	370	560		
Q':通水流量cm <sup>3</sup> /sec	3.67	5.00	6,17	9.33		
透水係数 K(cm/sec)	1.53	1.39	1.28	1.29		
2006年10月3日 3% 塩水	、楔試験前の	D通水				
Q:通水流量cm <sup>3</sup> /min					750	
Q':通水流量cm <sup>3</sup> /sec					12.50	
透水係数 K(cm/sec)					1.30	
2006年10月12日 2% 塩	水楔試験前	の通水		(Q値;(	DF05ZZF型	流量計)
Q:通水流量cm <sup>3</sup> /min		255				
Q':通水流量cm <sup>3</sup> /sec		4.25				
透水係数 K(cm/sec)		1.18				

Table.4.1-1透水係数の算出表-1 2006年8月10日補充作製-ビーズ粒径1mmの均質層における透水係数の経時変化

#### Table.4.2-1透水係数算出表-2

2006年10月31日作製-	ビーズ粒径	<b>圣0.4mm</b> の均	<b>う質層にお</b>	ける透水停	系数の経時	変化
2006年11月2日~ 4%塩水楔試験前の通水 (Q値:CF05ZZF型流量計)						
データ項目		小	型MACR	RO		
$\Delta d$ :水頭差(cm)	0.5	0.75	1	1.5	2	
均質層断面積cm <sup>2</sup>	250	250	250	250	250	
A•.Δd	125	187.5	250	375	500	
L:均質層長さcm	52	52	52	52	52	
Q:通水流量cm <sup>3</sup> /min				41	62	
Q':通水流量cm <sup>3</sup> /sec			0.57	0,68	1.03	
透水係数 K			0.118	0.095	0.107	
2006年11月14日~ 4%	塩水楔再詞	、験前の通	水			
Q:通水流量cm <sup>3</sup> /min					55	
Q':通水流量cm <sup>3</sup> /sec				0.68	0.92	
透水係数 K				0.095	0.095	
2006年11月16日~ 3%。	、2%塩水楔	再試験前の	り通水			
Q:通水流量cm <sup>3</sup> /min						
Q':通水流量cm <sup>3</sup> /sec			0.45	0.68	0.92	
透水係数 K			0.094	0.095	0.095	
2006年11月27日 染料浸透試験のための確認通水 Ad:1cm 2006年11月28日 4%塩水楔試験前の通水 Ad:2cm						
Q:通水流量cm <sup>3</sup> /min					69	
Q':通水流量cm <sup>3</sup> /sec			0.45		1.15	
透水係数 K			0.094		0.120	
K,Ave			0.102	0.095	0.104	

データ項目	小型MACRO值			
均質層の長さ L (cm)		5	2	
均質層の高さ H (cm)		2	5	
均質層の奥行 ₩ (cm)		1	0	
均質層の断面積 A (cm <sup>2</sup> )		25	50	
均質層の体積 V (cm <sup>3</sup> )		130	000	
推定間隙率 λe(%)		33	. 9	
水頭差 Δd(cm)	0.5	1	1.5	2
通水流量 Q(cm <sup>3</sup> /min)	220	370	560	750
Q' (cm <sup>3</sup> /sec)	3.667	6.17	9.33	12.5
算出トレーサー移行時間 T'				
(min)	20′ 02″	11′ 55″	7' 52"	5′ 53″
		11 00	. 01	0 00
実測トレーサー移行時間			=/	_/ //
T (min) (1)	18′35″	10' 37"	7' 40"	5′ 55″
参考 (2)	21' 25"	11' 45"	7′ 30″	5' 40"
3	21' 18"	12' 20"	7'	5' 20"
透水係数 K(cm/sec)	1.53	1.28	1.29	1.30
水頭差 Δ d′ (cm)	0. 50	1.00	1. 50	2.00
$\Delta$ d' = Q' L/AK · · · (4 ")				
$A = H \cdot W$				

Table.4.3-1 小型MACRO推定間隙率とトレーサー移行時間の関係表

算出結果からビーズ粒径 1 mmの均質層の透水係数が「透水係数の算出表 - 1」の 1.28~ 1.30cm/sec となり安定した時、推定間隙率は妥当な間隙率 (λe) であると言える。

 $T' = V(13000 \text{ cm}^3) \times \lambda$  (33.9%) /Q

粒径1mm均	質層の着色通	水(トレー	-サ)試験	2006年8月	月2日
通水置換排水	量(3分後):0.30L	_/ min	淡水槽のフ	<li>&lt;温 ℃(CM-2)</li>	1P)
K(算出参考透	水係数):		淡水槽淡水	〈電気伝導率: 「	nS∕m
水頭差:1.0 c	m(182—192)		試験開始前	試験開始前のタンク淡水量:	
淡水堰指針:	36 mm				
経過時間	着色水浸透長さ	淡水給水–	–排水	塩水槽越流排水	
min	∆cm	L⁄min		L⁄min	
1回目 0	0	0.7	0.46	0.3	
1	4.5	0.71	0.56	0.26	
2	10.5	0.71	0.41	0.3	
3	15.5	0.75	0.41	0.3	
4	21	0.75	0.41	0.3	
5	23	0.71	0.41	0.3	
6	27	0.71	0.45	0.3	
7	33	0.75	0.45	0.3	
8	37	0.75	0.45	0.3	
9	40	0.75	0.41	0.3	
10	50	0.75	0.45	0.26	
10'37″	50				

# Table.4.3-2 均質層の透水係数の測定

Table. 4.3-3 均質層の透水係数の測定

粒径0.4mm均質	層の着色通水	(トレーサ	▶)試験		2006年11月1日	
通水置換排水量(3)	, 分後): <b>0~</b> 0.043l	_/ min	淡水槽のフ	k温 20.5℃(CM-2	21P)	
K(算出参考透水係	数):		淡水槽淡水	k電気伝導率:18.4	l4mS∕m	
水頭差:1 cm(18)	2—192)		試験開始育	前のタンク淡水量:4	425L	
淡水堰指針: 34 п	nm					
経過時間	着色水浸透長さ	淡水給水–	–排水	塩水槽越流排水	塩水可動堰から	
min	∆cm	L⁄min		L⁄min	の高さ(≒cm)	
2回目 0	0	0.227	0.22	0.304		
2	-0.5	0.22	0.172	0		
4	0.5>1	0.22	0.179	0.041		
8	>3	0.22	0.186	0.034		
12						
16	>7.5	0.22	0.179	0.034		
20						
24	9.5>10.5	0.22	0.186	0.034		
					L	
	1回目の通水試験	験は、媒体権	曹内蓋(シリコ)	/ゴム製)の420タイ	ſ	
	│プを使用し、2回目の通水試験は、同460タイプを使用した。					
	2回目の通水試験	験において	まぼ満足する	る着色水の浸透が		
	見られた。					

					- 12 + 12 + 1
塩水濃度	水頭差∆	粒径 1 ㎜均質層	双方の試	粒径 0.4 mm均質層	備考
(%)	(cm)	定常状態到達時	験時間比	定常状態到達時間	
		間 [A] (min)	[A] : [B]	[B] (min)	
4	1	40	1:4.8	194	
4	1.5	16	1:4.6	112	Fig.2とFig.6参照
4	2	12	1:7	84	
3	1.5	8	1:8	64	
3	2	4	1:10.5	42	Fig.3とFig.7参照
2	1	16	1:6.3	101	Fig.4とFig.8参照
1					

Table.5.1-1 塩水楔試験条件毎の定常状態到達時間の比較表

	Table-5.5-1 4種類の媒体槽における塩水楔試験結果比較					
	試験の水頭差	試験時間	塩水電気伝導率	楔高さ	楔長さ	
媒体槽	(cm)	(min)	S/m (塩分%)	(cm)	(cm)	
均質0.4mm						
均質1mm	0.5	21	6.23 (3.99%)	21.0	51.0	
不均質1mm/0.4mm						
均質0.4mm						
均質0.8mm	0.75	100	6.43	19.4	51	
均質1mm	0.75	52	6.07	18.6	49	
不均質1mm/0.4mm	0.75	224	6.27	17.7	43.3	
均質0.8mm	0.75	170	4.87	1.85	50.5	
均質0.8mm	0.75	90	3.37	11.2	14.7	
均質1mm	0.75	48	3, 38	12.2	18.8	
均質0.4mm	1	198	6.3	16.5	31.6	
均質0.8mm	1	85	6.42	17.5	33.5	
均質1mm	1	45	6. 1	14.3	25.2	
不均質1mm/0.4mm	1	220	6. 35	14.2	27.8	
均質0.8mm	1	84	4.84	13.4	21.5	
均質0.4mm	1	104	3. 31	4.4	5.9	
均質0.8mm	1	36	3, 35	6	6.8	
均質0.4mm	1.5	124	6.14	8.5	11.5	
均質0.4mm	1.5	148	6.49	10.8	14.8	
均質0.8mm	1.55	53	6. 4	10.4	13.2	
均質1mm	1.5	16	5.99	8.1	11.3	
不均質1mm/0.4mm	1.5	124	6.24	10	14	
均質0.4mm	1.5	80	4.86	4.5	6	
均質0.8mm	1.5	55	4.83	6.2	7.4	
不均質1mm/0.4mm	1.5	60	4.83	6.5	6.5	
均質0.4mm	2	92	6.5	6	8	
均質0.4mm	2	135	6, 19(3, 97%)	5.7	7.7	
均質0.4mm	2	100	6. 64	6	8.1	
均質0.8mm	2	21	6.24(4%)	5.5	6. 6	
均質1mm	2	12	5.97(3.81%)	4.0	5.9	
不均質1mm/0.4mm	2	96	6.26	6.8	8.3	
均質0.4mm	2	44	4.84	1.8	2.9	
均質0.8mm	2	20	4.81	2	3	
均質1mm	2	4	4.63	1.8	3.0	
不均質1mm/0.4mm	2	108	3. 37	6.3	6.4	









Fig. 2. 1-1 装置の媒体槽



Fig. 2.1-2 装置の淡水槽、塩水槽

流量計	OF10ZZF 型	0F05ZZF 型
測定範囲(L/min)	0.35~5	0.05~0.85
表示桁 (L/min)	1/100	1/1000
精度	$\pm 2\% \mathrm{RS}$	$\pm 2\% \mathrm{RS}$
	$\pm 0.04$ L/min	$\pm 0.007$ L/min

(矢印は越流水の流れ)



Fig. 2.1-3 装置の流量表示



Fig. 2.1-4 隔離板と染料浸透試験の様子

計量スコップを用いた試験後の粒径1mmの媒体層からのサンプルリング(例)



①~①;手順No項目

Fig. 3.1-1 ガラスビーズ密度及び媒体槽に充填したガラスビーズの間隙率測定手順

		Table. 1	3試験の権	製高さ及び	楔長さのヒ	比較表(単位	ī: mm)
時間経過(min	)	高さ初回	高さ2回	高さ3回	長さ初回	長さ2回	長さ3回
	4	115	100	98	130	125	130
	8	130	115	110	180	180	190
	12	140	125	124	215	215	225
	16	140	127	129	240	250	250
	20	145	132	132	255	270	275
	24	148	138	136	270	290	295
	28	151	138	138	282	310	308
	32		140	140		325	325
	36		142	142		340	332
	40		144		-	355	
	44		145			365	
	48		147			378	
	52		150			388	



Fig. 3. 2-1 4%塩水楔の形状再現性確認試験



Fig. 5.1-3 ビーズ粒径1mm均質層の2%塩水楔浸入形状比較



Fig. 5.1-4 塩水楔浸入量の塩水の濃度差による影響

ビーズ粒径1mmの均質層を用いた水頭差0.75cmで実施した塩水楔試験では、塩水濃度を2%、3%および4%に変えた条件下において塩水濃度が上昇するほど塩水楔の高さ(H)と塩水楔の長さが大きな形状となる。



Fig. 5.1-7 ビーズ粒径 0.4 mm均質層の 2%塩水楔浸入形状



Fig. 5. 2-1 均質層における塩水楔浸入中の染料浸透試験

ビーズ粒径 0.4 mmの均質層において、塩水槽側からは塩水濃度 4%とした赤色の塩水を給水しながら、淡水槽に設置したノズルからは青色の染料水を吐出させて水頭差を 2cm として塩水楔試験 を行った。



Fig. 5.4-1 二層不均質層における水頭差 0.75cm 塩水楔試験(塩水浸透開始時)



Fig. 5.4-2二層不均質層におけるトレーサー通水試験(粒径1mm層より粒径0.4mm層の透水性が低い)



媒体槽ガラスビーズ粒径:0.4mm&1mm不均質層

Fig. 5.4-3 二層不均質層の4%塩水楔浸入形状比較



Fig. 5.5-1 4%塩水楔が浸入したビーズ粒径 1 mm均質層うち底部 5 cm を目隠し

充填ガラスビーズ密度及び間隙率	<u>測定結果</u>							
項目	湿潤媒体 重量(g)	密度g/cm <sup>3</sup>	推定間隙率 (%)	乾燥ビーズ 重量(g)	採取媒体内湿 潤水容積(1g =1cm <sup>3</sup> )	採取媒体 容積(ml)	採取媒体重量 (g)	空20レ <sup>、</sup> ケツ (g)
粒径0.8mm均質層材(媒体と言う)	27,902.50	1.651	34.2	23,112.50	4790.00	14000	30615.50	2713
					1	I.		バケツ蓋:346
2007年5月15日作製粒径0.8mm	贸質層     □    □							バケツA:910
2007年5月24日 トレーサー連	1水試験							ハケツB:1111
フーク項日 A 4 · 水 西 主 ( om )	0.5	0.75		1 5	9			1000
Δα. 水頭左 (Cll) 均原同応元建 <sup>2</sup>	0.5	0.75	250	1. 0	250	THE OWNER OF THE OWNE	5 × × ×	1 1 1 million 1
以復唐町面積cm A・Ad	125	187.5	250	375	230	21		5min
A Au I・均質届長さcm	52	52	52	52	52			
Avo通水流号om <sup>3</sup> /min	02	02	165	02	02	4		1
0: 通水cm <sup>3</sup> /sec			2.75					100 A
Q. L			143					
透水係数 K			0.572			FIL		1
T':時間 (min)			29' 02"			and the second s		10000000000000000000000000000000000000
$T' = V (14000 \text{ cm}^3) \times \lambda$ (34.21	4%) /Q (1	35cm <sup>3</sup> /min)						
		実試験時間	29'20"	トレーサー通水	試験写真参照	E H		1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
2007年6月14日~ 塩水楔試験前の	D通水試験							10min
Ave通水流量cm <sup>3</sup> /min		124	172	255	324			
Q:通水cm <sup>3</sup> /sec		2.07	2.87	4.25	5.40			1
Q. L		107.5	149.1	221.0	280.8			-
透水係数 K		0.573	0.596	0.589	0.562			
								Ĩ.
Ave通水流量cm <sup>3</sup> /min		117	165	255	331			
Q:通水cm <sup>3</sup> /sec		1.95	2.75	4.25	5.52			
Q. L		101.4	143.0	221.0	286.9	and the second s	1 × 1 × 1	
透水係数 К		0.541	0.572	0.589	0.574	21		20min
<u>^</u>						-		
Ave通水流量cm <sup>3</sup> /min		138	165			1		1
Q:通水cm³/sec		2.30	2.75					
Q. L		119.6	143.0					
透水係数 【		0.638	0.572					1
								1 (monoconcernant)
								7/11
						Reference -		
						54		29min20sec
						2		Lonniegoood
								1
						E.		
						Concession of the local division of the loca		in the second second second
						日 トレー	サー通水詞	忒験状況 ┝──
								I

Fig. 5.5-2 ビーズ粒径 0.8 mm均質層における間隙率とトレーサー移行時間の関係

ビーズ粒径 0.8 mm均質層における間隙率を用いて算出トレーサー移行時間 T'を求めた (29'02")ところ、トレーサー通水試験で求めた実側トレーサー移行時間 T (29'20") とほぼ一致した。



Fig. 5.5-3 水頭差や塩水濃度によって決定される塩水楔形状







塩分 2.00%



Photo. 2. 1-1 電気伝導率計



Photo. 3. 2-1 構造上透水性に影響を及ぼすと考えた部分の写真



Photo. 3. 2-2 試験前の作業で気泡が混入した均質層の状況



Photo. 4. 3-1 均質層の透水係数の測定 2006 年 7 月 28 日に製作し 8 月 2 日に水頭差 1cm で実施したトレーサー通水試験の状況

<sup>□</sup>内はビーズ粒径1mmの均質層試験における実測トレーサー移行時間T



Photo. 4. 3-2 均質層の透水係数の測定

2006 年 10 月 31 日に補充製作、当日に水頭差 1cm で実施した 1 回目通水試験の状況 □内はビーズ粒径 0.4 mmの均質層における実測トレーサー移行時間 T

小型MACRO 試験結果一覧 ◆均質層ビーズ粒径:1mm ◆写真は, 試験終了時の状態。

水頭差(cm	<u> 塩水濃度 4(%)</u>	<u>塩水濃度3(%)</u>	塩水濃度 2 (%)
2.0	2006年10月2日実施。	2006年10月3日実施。	2006年.9月14日実施
	染料により着色した塩水が楔形状に進	染料により着色した塩水が楔形状に進	隔離板を境界に塩水と淡水が別れ、
	行し、定常状態に達した。	行し、定常状態に達した。	塩水楔の形成がない。
1.5	2006年9月29日実施	2006年8月24日実施	2006年9月14日実施
	染料により着色した塩水が楔形状に進	染料により着色した塩水が楔形状	染料により着色した塩水が楔形状
	行し、定常状態に達した。	に進行し、定常状態に達した。	に進行し、定常状態に達した。
1.0	2006年10月2日実施。 染料により着色した塩水が楔形状に進行し、ほぼ定常状態に達した。	2006年8月21日実施 染料により着色した塩水が楔形状 に進行し、定常状態に達した。	2006年9月7日実施 染料により着色した塩水が楔形状 に進行し、定常状態に達した。
0.75	2006年9月28日実施	2006年8月29日実施	2006年10月12日実施
	染料により着色した塩水が楔形状に進	染料により着色した塩水が楔形状	染料により着色した塩水が楔形状
	行し、定常状態に達した。	に進行し、ほぼ定常状態に達した。	に進行し、ほぼ定常状態に達した。
0.5	2006年10月3日実施。 染料により着色した塩水が楔形状に進 行し、淡水槽に至る。定常状態に未到	2006年8月24日実施 楽料により着色した塩水が楔形状に進 行し、淡水槽に至る。定常状態に未到	2006年9月8日実施 2006年9月8日実施 染料により着色した塩水が楔形状 に進行し、定常状態に達した。

Photo.5.1-1 均質層における塩水楔試験結果画像一覧

小型MACRO	試験結果一覧		
◆ 保1 本 増 刀 つ ▲ 写 直 (+ 封)	7人ビー人社住: Ø U.4mm 『		
▼→美は、山			
水頭差(cm)	塩水濃度 4(%)	塩水濃度 3 (%)	塩水濃度 2 (%)
2.0	2006年11月14日実施 染料により着色した塩水が楔形状に進行	近大画像     拡大画像     並えのの     はの     立たの     はの     なの     により     着色した     塩水が     楔形状に 進行	
	し、定常状態に達した。	し、定常状態に達した。	
1.5			
	2006年11月7日実施	2006年11月16日実施	
	染料により着色した塩水が楔形状に進行 し、定常状態に達した。	染料により着色した塩水が楔形状に進行 し、定常状態に達した。	
1.0	100-0002 100-0002 100-0002 100-0002		
	2006年11月2日実施		2006年11月17日実施
	染料により着色した塩水が楔形状に進行 し、ほぼ定常状態に達した。		染料により着色した塩水が楔形状に進行 し、定常状態に達した。

Photo. 5.1-2 均質層における塩水楔試験結果画像一覧 2/2



Photo. 5. 2-1 均質層における塩水楔浸入中の染料浸透試験の詳細



2006年12月4日作成

① 水頭差 1.5cm

試験 154 分、塩水濃度 4.15%



④水頭差 1.5cm に変更

製状態:折り返し試験進行起点 試験 212 分、塩水濃度 4.15%、



楔形状:H3.5×L4.7

Photo. 2. 3-1 ビーズ粒径 0. 4 mmの均質層における折り返し塩水楔試験

# 小型MACRO 試験結果一覧

◆二層不均質層ガラスビーズ粒径:1/0.4mm ◆写真は,試験終了時の状態。

水頭差(cm)	塩水濃度 4(%)	塩水濃度 3 (%)	塩水濃度 2 (%)
2.0	2006年12月6日実施 2006年12月6日実施 染料により着色した塩水が上方層と下 方層に各々楔形状に進行し、定常状態 に達した。青色淡水の浸透過程で屈曲	拡大画像         12134567799         2007年1月10日実施         染料により着色した塩水が楔形状に進行し、定常状態に達した。	
1.5			
1.0	2006年12月13日実施         染料により着色した塩水が上方層と下         方層に各々楔形状に進行し、定常状態         (ご達した。)         ・	2006年12月25日実施 染料により着色した塩水が上方層と下 方層に各々楔形状に進行し、定常状態 に達した。	拡大画像
	2006年12月14日実施 染料により着色した塩水が上方層と下 方層に各々楔形状に進行し、定常状態 に達した。二層への青色淡水浸透過程 で屈曲と混合を確認した。		2007年1月11日実施 染料により着色した塩水が上方層と下 方層に各々楔形状に進行し、定常状態 に達した。青色淡水浸透過程で屈曲と 混合を確認した。
0.75			
	2006年12月22日実施 染料により着色した塩水が上方層と下 方層に各々楔形状に進行し、ほぼ(下 方は1cm/8min進行あり)定常状態に 達した。二層への青色淡水浸透過程で 屈曲と混合を確認した。		

Photo. 5.4-1 二層不均質層における塩水楔試験の結果画像一覧



小型MACF	RO 試験結果一覧		
◆媒体層フ	ブラスビーズ粒径: 0.8mm		
◆写真は,	試験終了時の状態。		
k頭差 (cm	塩水濃度 4(%)	塩水濃度 3 (%)	塩水濃度 2 (%)
2.0	MILT Y MILT Q	- 111-1-1112-12-2 (10) - 111-12-12-2 (10) - 12-2 美術家の語 - 12-2 美術家の語	
	2007年6月1日実施(21min)	2007年6月11日実施(20min)	
	染料により着色した塩水が楔形状に進行し、 定常状態に達した。	染料により着色した塩水が楔形状に進行し、 定常状態に達した。	
1.5	WALK MARKA M		
	2007年6月1日実施(53min)	2007年6月8日実施(55min)	
	染料により着色した塩水が楔形状に進行し、 定常状態に達した。	染料により着色した塩水が楔形状に進行し、 定常状態に達した。	
1.0		1/2 4.2 1/2 (2.4) 2/2 (2.	
	2007年5月28日実施(85min)	2007年6月6日実施(92min)	2007年6月13日実施(36min)
	染料により着色した塩水が楔形状に進行し、 定常状態に達した。	染料により着色した塩水が楔形状に進行し、 定常状態に達した。	染料により着色した塩水が楔形状に進行し、 定常状態に達した
0.75	The second se	And the second sec	177.4.99 17.1.4.99 1.2.8.45 1.
	2007年5月30日実施(108min)	2007年6月7日実施(170min)	2007年6月14日実施(98min)
	染料により着色した塩水が楔形状に進行し、 塩水槽に達した。	染料により着色した塩水が楔形状に進行し、 定常状態に達した。	染料により着色した塩水が楔形状に進行し、 定常状態に達した。

Photo. 5. 5-1 ビーズ粒径 0.8 mmの均質層における塩水楔試験の結果画像一覧

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 <sup>2</sup>			
体積	立法メートル	m <sup>3</sup>			
速 さ , 速 度	メートル毎秒	m/s			
加 速 度	メートル毎秒毎秒	$m/s^2$			
波 数	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 <sup>3</sup> /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 租立单位						
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 <sup>(a)</sup>	rad		$m \cdot m^{-1} = 1^{(b)}$			
立 体 角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	$sr^{(c)}$		$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$			
周 波 数	ヘルツ	Hz		s <sup>-1</sup>			
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 <sup>(d)</sup>	°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 <sup>-1</sup>			
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
和立量						SI 組立単位					
和立里							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 <sup>-3</sup>
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 <sup>-3</sup> • 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 <sup>-2</sup> • s • A
HE I	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	_	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 <sup>-1</sup> • s • A
吸	収	緑	量		率	クレ	1		秒	Gy/s	m <sup>2</sup> • s <sup>-3</sup>
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 <sup>3</sup> 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 SI単位で表される数値が実験的に得られ								
	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 <sup>-19</sup> J					
	統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} kg$					
	天 文 単 位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 <sup>11</sup> 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 <sup>5</sup> Pa					
オングストローム	Å	1 Å=0. 1nm=10 <sup>-10</sup> 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UGS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 <sup>-7</sup> J					
ダ	イ	$\sim$	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N					
ポ	T	ズ	Р	1 P=1 dyn⋅s/cm²=0.1Pa・s					
ス	トーク	ス	St	1 St =1cm <sup>2</sup> /s=10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s					
ガ	ウ	ス	G	1 G ≙10 <sup>-4</sup> T					
工	ルステッ	F	0e	1 Oe ≙(1000/4π)A/m					
$\checkmark$	クスウェ	N	Mx	1 Mx ≙10 <sup>-8</sup> 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 <sup>4</sup> 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 <sup>10</sup> 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 <sup>-2</sup> Gy
$\boldsymbol{\nu}$			Д	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
Х	線	単	位		1X unit=1.002×10 <sup>-4</sup> 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 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット					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	$1 \ \mu = 1 \ \mu m = 10^{-6} m$

а а

s s

.

≂ €

8