



JAEA-Technology

2006-061



JP0750053

## 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

Development and Preliminary Tests of Mini-MACRO  
(MAss transport Characterization in host ROCK)

高須 民男\* 前川 恵輔

Tamio TAKASU \* and Keisuke MAEKAWA

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

February 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA  
Technology  
K30100

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。

本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。

なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>) より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター\*では実費による複写頒布を行っております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4

日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課

電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

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

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency

Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to

Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,

Japan Atomic Energy Agency

2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan

Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5901

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

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

(2006年12月6日受理)

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、安全評価上地下深部の地下水の挙動を適切に把握することが必要である。沿岸地域などに見られる淡水である地下水と塩水である海水とが混在した領域では、地下水の挙動は複雑であると考えられている。また、人工バリアのひとつとして考えられているベントナイトは海水系地下水においては降水系地下水に比べ膨潤せず、自己シール性が十分に発揮されないことも懸念されている。そのため、地下深部に塩分濃度の高い地下水が存在する場合の塩水の挙動を把握することが重要となっている。

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）は、淡水である地下水と塩水との密度差により生じる塩水楔の進展過程を把握するため、地層をガラスビーズにより模擬した媒体層中に食紅で着色した塩水により塩水楔を再現するものである。

同装置は、既存の多孔質媒体水理試験設備（以降「MACRO 装置」と呼ぶ）の 1/4 スケールの寸法の媒体槽を有し、装置の分解・組み立て作業の合理化、試験効率の向上を図るとともに、本体を透明板で構成することで、試験の経過観察、試験結果の可視化によるデータ取得を充分行える装置である。

本報告書は小型 MACRO の整備内容やその考え方及び塩水楔予察試験の結果をまとめ、今後の本装置による試験の効率的な実施に資するものである。

---

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

\*1 検査開発株式会社

Development and Preliminary Tests of Mini-MACRO  
(MAss transport Characterization in host ROcc)

Tamio TAKASU<sup>\*1</sup> and Keisuke MAEKAWA

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

(Received December 6, 2006)

It is necessary for safety assessment of high-level radioactive waste geologic disposal to understand groundwater flow in deep underground accurately. Groundwater flow in the coastal area especially considered to be quite complex that involves density and hydraulic gradient driven flow of freshwater and seawater. Furthermore, bentonite, which is one of the favored engineered barrier materials, may not swell very well in seawater as it does in freshwater, and therefore may not provide a reliable seal if salinity is high enough. Therefore it is important to understand saltwater behavior in deep underground.

In order to understand the behavior of seawater intrusion into freshwater in deep underground, we constructed a laboratory equipment 'Mini-MACRO' named after the original large scale MACRO (MAss transport Characterization in host ROcc) and aimed to increase a precision and efficiency of experiment. Mini-MACRO equipment consists of three parts: a sandbox (0.5m x 0.25m x 0.1m) and each reservoir tank for saltwater simulated seawater and freshwater. Seawater intrusion experiments are conducted using glass beads (sub-millimeter in diameter) and colored saltwater in the sandbox with a transparent face plate to allow visual observation.

In this report we summarize the procedures of the equipment construction and the results of preliminary tests of saltwater intrusion into a freshwater body.

Keywords: Mini-MACRO, Mass Transport, Host Rock, Saltwater Intrusion Experiment, Hydraulic Head, Homogeneity

---

\*1 Cooperated staff from Inspection Development Company Ltd.

## 目 次

1. はじめに -----	1
2. 試験装置の概要 -----	1
2.1 小型 MACRO の基本概念 -----	1
2.2 小型 MACRO の仕様と構造の概要 -----	2
3. 塩水楔予察試験 -----	3
3.1 小型 MACRO による塩水楔予察試験 -----	3
3.2 小型 MACRO と数値モデルの比較 -----	4
3.3 小型 MACRO と従来の MACRO 装置との比較 -----	4
4. おわりに -----	4
参考文献 -----	5
付 錄 -----	16

Contents

1. Introduction -----	1
2. Outline of the specification of Mini-MACRO -----	1
2.1 Basic concept of Mini-MACRO -----	1
2.2 Outline of the specification of Mini-MACRO -----	2
3. Preliminary experiment of saltwater intrusion -----	3
3.1 Preliminary experimental results by Mini-MACRO -----	3
3.2 Comparison with numerical result -----	4
3.3 Comparison with experimental result of original large scale MACRO -----	4
4. Conclusions -----	4
References -----	5
Appendix -----	16

## 1. はじめに

本報告書は、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）の製作及び、塩水・淡水の給排水設備の整備、通水試験において得られた装置の構造、機能、性能向上に係る対策の内容と整備上の考え方及び予察試験結果をまとめたものである。

小型 MACRO は、従来の多孔質媒体水理試験設備<sup>1)</sup>（以下「MACRO 装置」と呼ぶ）の 1/4 スケールの寸法の媒体槽を有することで、MACRO 装置と比較して、媒体充填時の分解・組み立て作業の合理化、試験及び媒体内の淡水置換の効率の向上を図るために、2004 年 9 月から製作仕様の検討を進め、2005 年 3 月に本体の製作を終了した。同年 5 月より 7 月にかけて本体設置、塩水・淡水用配管及びポンプ接続等周辺機材の整備、着色水を用いた媒体槽内へのトレーサー通水試験を実施し、諸機能の改善を行った。

塩水楔予察試験は、粒径 1mm のガラスビーズを充填した均質場を作製し、塩水濃度 4%，水頭差 0.5～2cm とした試験条件の下、2005 年 12 月までに終了した。水頭差の違いにより塩水楔の浸透面積に明瞭な差が生じ、更に水頭差が 1cm 及び 2cm の条件においてガラスビーズ均質場での塩水楔の浸入に関する定常状態を確認できた。また、小型 MACRO の予察試験結果と、数値モデルによる解析結果及び既設の MACRO 装置での塩水楔試験結果との比較を行い、小型 MACRO での予察試験の結果がそれぞれの結果と整合的であることにより、予察試験結果の妥当性を確認した。以上のことから、地層中での塩水挙動を観察する基盤としての小型 MACRO の基本性能を確認することができた。

## 2. 試験装置の概要

### 2.1 小型 MACRO の基本概念

既設の MACRO 装置 (Fig. 1) を用いた試験では、従来、以下の手順が必要となっていた。装置の分解・組み立て作業は、重量物である媒体槽透視板（約 66kg）及び透視板補強治具（約 14kg×7 式）の着脱作業、媒体槽に充填するガラスビーズの準備作業等を数名で約 1 週間を費やして実施し、脱気水で飽和させたガラスビーズの媒体槽への充填においては、媒体の沈下が収まり細密化されるまで約 2 ヶ月間のバイブレータによる充填作業及び補充作業を数名で実施していた。その後、媒体槽の気泡除去及び、着色水を用いた媒体槽内へのトレーサー通水試験を適宜行い、ガラスビーズが均質に充填されていることを確認した上で、試験及び着色水を除去するための淡水置換に各々 1 日を費やしていた。

小型 MACRO は、MACRO 装置の 1/4 スケールの寸法の媒体槽を有し、本体をアクリル製の透明板で構成することで、媒体充填時の分解・組み立て作業では重量のある治具の着脱及びバイブルータを用いたガラスビーズの充填作業の合理化、媒体槽が均質に充填されているかどうかの確認や試験及び淡水置換では作業時間の短縮を図ることにより、一連の目標作業期間を 1 週間とし、また、試験結果を視覚的に捉えることにより試験を効率的に行うこと目的とした装置である。媒体槽に充填するガラスビーズの粒径を変更することによる透水性や、塩分濃度等の試験条件を変

更した場合の準備作業から試験までの一連の作業を短時間に効率的に実施できるとともに、試験の再現性が維持され、塩水楔試験を精度良く実施できるよう仕様を考慮した。

小型 MACRO 及び MACRO 装置双方の本体の仕様について比較した表を Table 1 に示す。

## 2.2 小型 MACRO の仕様と構造の概要

小型 MACRO 本体は、Fig. 2 に示すように、ガラスピーブを充填する媒体槽及び、媒体槽に給水する淡水・塩水をそれぞれ貯める淡水槽、塩水槽からなり、媒体槽と淡水槽・塩水槽はそれぞれ開口部にナイロン製のメッシュ（網）を取り付けた隔離板で仕切られている。淡水槽の水位は可動堰により任意の高さに調節することができる。

### (1) 媒体槽

材質は透明なアクリル製で、媒体槽側面には、媒体槽内に淡水・塩水を流すための開口部を設け、開口部には媒体槽に充填したガラスピーブが流出するのを防ぐための隔離板（(3)参照）を取り付けている。媒体槽上面は、媒体層上部表面のエア抜きができる構造の蓋（以下「媒体槽上蓋」と呼ぶ）を取り付け、ガラスピーブの充填・除去ができる構造となっている。

### (2) 淡水槽・塩水槽

材質は透明なアクリル製で、媒体槽との境界部に淡水・塩水を流すための開口部を設けている。

淡水槽・塩水槽には、淡水・塩水を貯める貯水区画とそこから溢れた淡水・塩水を排水するオーバーフロー区画とを分ける仕切りを設け、給水した淡水・塩水が装置から越流しない構造となっている。また、淡水槽・塩水槽の水位をそれぞれ調整するための可動堰は、精度よく昇降し、任意の位置で固定可能な電動式とした。更に、塩水槽には、貯水区画が塩水に置換されるまでの間、媒体槽との間で淡水・塩水の混合が生じないよう、塩水の浸入を防ぐシャッター機構を設けている。

塩水浸入防止シャッター機構は、塩水槽ゲート支持板とシャッターで構成されている。双方に  $\phi 22\text{mm}$  の貫通孔が 15 個ある。

### (3) 隔離板

隔離板は、Fig. 2 に示すように、ガラスピーブの流出を防ぐため媒体槽両端にビスで固定している。ガラスピーブの流出を防ぐためのナイロンメッシュと、一定の間隔で円形の開口部を設けたステンレス製板の一体構造で、媒体槽に充填するガラスピーブの粒径に合わせてナイロンメッシュを交換できるよう取り外しのできる構造となっている。

### (4) 流量計

淡水槽・塩水槽から媒体槽に流出する淡水・塩水の流量を確認するため、給水側、排水側それぞれに Fig. 2 に示すように流量計を取り付けている。

製作した本体及び周辺機材については、給排水設備等の調整やトレーサー通水試験等を通じて種々の留意点を抽出し、機能の改善を行った。詳細については付録を参照されたい。

### 3. 塩水楔予察試験

#### 3.1 小型 MACRO による塩水楔予察試験

小型 MACRO を使用して、装置の基本機能を確認するための塩水楔試験を実施した。媒体槽には淡水で飽和させた粒径 1mm のガラスビーズを充填した。淡水槽側を上流として、淡水槽と塩水槽間の淡水の水頭差を 0.5~2cm に設定し、塩水槽には食紅により着色した 4% 塩水（海水の塩分濃度を想定）を、淡水槽には脱気した淡水を給水する。塩水は楔の形をした層（塩水楔）を形成しながら媒体槽に浸入する。媒体槽に浸入した塩水が定常状態に達するか、設定した試験時間の終了まで塩水の浸入挙動を観察した。

水頭差 0.5cm における試験条件及び結果を Table 2 及び Fig. 3 に示す。

塩水楔予察試験を通じて得られた塩水楔試験を実施するまでの設定条件及び留意点は以下のとおりである。

##### (1) 淡水槽の水頭保持

試験開始後の淡水槽における水頭の変化に十分追従するための可動堰への給水流量は、水頭差 2cm で  $520 \text{ cm}^3/\text{min}$ 、水頭差 1cm で  $220 \text{ cm}^3/\text{min}$ 、水頭差 0.5cm で  $110 \text{ cm}^3/\text{min}$  以上である。これらの流量で淡水を安定供給し、かつ設定した水頭を超過しない適切な給水精度の給排水の調整が要求される。

また、改善したサイホン配管（付録参照）により可動堰に最大約  $1,300 \text{ cm}^3/\text{min}$  を給水して淡水槽の水頭を保持できる。サイホン配管内の気泡の影響による水頭の変化への追従が不安定となることがあるため、試験前の通水確認を確実に実施することが要求される。

##### (2) 媒体槽に浸入する塩分濃度の確認

媒体槽に浸入する塩分濃度は、 $1,000 \text{ cm}^3$  の脱気した淡水に  $0.1\text{g}$  の食紅を溶解した着色水の標準液を、予め所定の濃度に希釀した着色水の色と比較することにより確認する。予察試験では着色水の濃淡の顕著な差は確認できず、設定した条件では着色水の分散や拡散の影響は生じていないものと考えられる。なお、将来画像解析などによる精密な分析を行う場合、塩分濃度と着色水の色との関係の確認や、解像度等の精度に応じた比較用の希釀着色水の準備などが必要である。

##### (3) 試験中の塩水濃度の安定性

試験中は、媒体槽を通過した淡水が塩水槽の貯水区画に浸入し、塩水槽の水面近傍の塩水を希釀しながら、オーバーフロー区画に溢れ、排水口へ排水されるものと思われる。試験開始から 30 分経過後の塩水槽の流量（Table 2）を見ると、塩水給水量  $710 \text{ cm}^3/\text{min}$  に対して、オーバーフロー区画の排水量が  $1,080 \text{ cm}^3/\text{min}$  と塩水給水量より多いことから、前述の推測が裏付けられる。このため、淡水供給量と同量の 4% 塩水の給水を常時行い、電気伝導率計で塩水槽の塩分濃度を試験実施中に測定した結果、塩水槽内の電気伝導率をほぼ一定に維持できることが確認できた。

##### (4) 試験時間に応じて必要な塩水量

水頭差 0.5cm の塩水楔試験では塩水と淡水を約 0.5 時間継続して給水した。（1）及び（3）を参考にすると、可動堰への塩水給水流量は約  $0.021 \text{ m}^3$  程度必要であり、試験前の塩水槽への注水量は約  $0.015 \text{ m}^3$  必要である。

### 3.2 小型 MACRO と数値モデルの比較

小型 MACRO による塩水楔試験結果の妥当性を確認する一環として、小型 MACRO における予察試験結果と、数値モデルによる解析結果との比較を行った。数値モデルには、多相流体解析コードである TOUGH2 の水、空気及び塩水流動解析モジュール EOS7 を用いた<sup>2)</sup>。予察試験結果からは、着色した塩水の淡水領域への分散や拡散現象は確認できなかつたため、解析上も考慮しないこととした。媒体槽の透水係数は、粒径 1mm のガラスビーズについて事前に求めた値から、 $1.14 \times 10^{-2} \text{m/sec}$  とし、塩水の塩分濃度は 4%，淡水槽と塩水槽の水頭差が 1cm の場合の定常状態の結果を比較した。

小型 MACRO の予察試験結果を Fig. 4 に、数値モデルによる解析結果を Fig. 5 にそれぞれ示す。予察試験では、塩水槽側の中ほどよりやや上部から下方に向かって底部が鋭角な塩水楔が形成され、装置の中央付近まで楔が浸入する様子が確認できた。数値モデルでも、塩分濃度 4% のコンターは予察試験結果と同様の形状を示していることが分かる。このことから、比較的単純な条件の下での予察試験結果が、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。

### 3.3 小型 MACRO と従来の MACRO 装置との比較

小型 MACRO における予察試験の結果に基づいて、従来の MACRO 装置での同様の条件下での試験結果と比較を行い、小型 MACRO の性能の確認を行った。

試験結果の比較に際しては、従来の MACRO 装置と小型 MACRO との寸法の違いを考慮し、 $\Delta = d/L$  ( $L$  : 装置の幅、 $d$  : 水頭差) を指標に、 $\Delta$  が同じ値となる条件の下での結果の比較を行った。

Fig. 6 に従来 MACRO の試験結果を、Fig. 7 に小型 MACRO の試験結果を示す。いずれも  $\Delta = 0.015$  (小型 MACRO の水頭差  $d = 0.75 \text{cm}$ )、塩水濃度 4%，充填したガラスビーズ粒径 1 mm であり、定常状態を確認したものである。両図を比較すると、細かい部分の違いはあるものの、塩水楔全体は同様の形状を示していることが分かる。このことから、塩水くさび試験に関して、小型 MACRO は従来の MACRO 装置と同様の性能を有することが確認できた。

## 4. おわりに

本報告書は、小型 MACRO の開発に関して、装置の製作、給排水設備等の整備内容、整備上の考え方及び塩水楔予察試験の結果を取りまとめたものである。

装置の製作・整備の過程では、既設の MACRO 装置と比較しながら小型 MACRO の機能・性能の向上に反映し対策を施した部分は多く、装置の製作・整備の過程を記録として残しておくことにより、今後の試験研究における改善等に反映していくことが重要である。

塩水楔試験については、今後、充填するガラスビーズの粒径を変え媒体槽の透水性を変更した試験や、粒径の異なる数種類のガラスビーズを用いた不均質場での試験、人工構造物の模型を用いた塩水楔の挙動変化を観察する試験等の実施を検討していく予定である。

小型 MACRO を用いた試験の結果は、米国ローレンスバーカレー国立研究所 (LBNL) との国際共同研究として実施している解析コード TOUGH2 の検証のほか、他の密度流解析コードとの比較・検

討を通じて、地下水中に塩分濃度の高い地下水が存在する条件下での地下水流動を適切に把握するためのモデル化手法の確立を図っていく。

#### 参考文献

- 1) 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)
- 2) K. Pruess, C. Oldenburg, G. Moridis : TOUGH2 User's Guide, Lawrence Berkeley National  
Laboratory Report, LBNL-43134 (1999)

Table 1 塩水楔試験に関する小型 MACRO と既設の MACRO 装置との比較

(1/3)

項目	小型 MACRO	MACRO 装置
仕様と構造の概要	ガラスビーズを充填する媒体槽及び、媒体槽に給水する淡水・塩水をそれぞれ貯める淡水槽、塩水槽からなり、媒体槽と淡水槽・塩水槽は隔壁板で仕切られている。淡水槽・塩水槽の水位は可動堰により任意の高さに調節することができる。	同左〔部位の名称は、淡水槽に準じる部分を注水槽、塩水槽に準じる部分を排水槽と呼び、同等の用途で用いる。〕但し排水槽には可動堰を設けず、脱着可能な配管を接続した排水ポンプを設けることにより液面コントロールを可能にしている。 構造を Fig. 1 に示す。
装置 主要材質、寸法及び重量	アクリル製板で厚さ 10mm (媒体槽の前面、背面の板厚は 15mm)  (単位 mm) 幅×長さ×高さ [重量] 本体外寸法 : 800×1374×790 [50 kg]  架台外寸法 : 800×1,010×210 媒体槽内寸 : 100×500×250 淡水槽内寸 : 180×150×560 (堰 540)  塩水槽内寸 : 180×150×410 (堰 390)  可動堰内寸 : 140×80×170 (堰 150) 可動堰有効昇降範囲は、淡水槽側が 0～350mm、塩水槽側が 0～200mm の範囲で任意に停止できる。	ステンレス鋼板 (媒体槽透視板はアクリル製板で厚さ 30mm)  (単位 mm) 幅×長さ×高さ 本体外寸法 : 1,550×4,250×約 2,000  トレー寸法 : 1,520×3,110×158 媒体槽内寸 : 100×1,960×1,000 注水槽内寸 : 100×182.5×1,300 (堰 1,120) (延長可能 : 槽高さ 500 (堰 500)) 排水槽内寸 : 100×182.5×1,300 (堰 1,120) (延長可能 : 槽高さ 500 (堰 500)) 可動堰内寸 : 195×140×195 (堰 145) 可動堰有効昇降範囲は 0～300mm でこの範囲で任意に停止できる。
操作性	分解・組立等の整備、運転及び試験作業は作業員一人で可能。また、人力だけで作業可能。	分解・組立のうち、媒体槽透視板の取り付け取り外しには、数名の人員と専用の搬送装置 (バラマン) が必要。 また、ガラスビーズの充填時にバイブレータによる加振が必要。

(2/3)

		本設備に水及びガラスビーズを充填した状態で、人力により垂直状態を基準に 105 度まで回転でき、水平及び垂直状態で停止可能。
隔離板の材質・構造及び寸法	<p>枠は ステンレス鋼板で厚さ 1mm, ツイン窓（窓中央に間仕切り：幅 10mm）の枠板及び穴径 10mm のパンチング加工を施した板を 2 枚合わせ、網はナイロン製である。媒体側にツイン窓枠を設けビスで装着している。</p> <p>(単位 mm) 幅×長さ×高さ            枠の外寸法 : 138 × 2 × 288            枠の内寸法 : 100 × 2 × 250            枠を媒体槽に止めるビス穴のピッチ 54 mm</p>	<p>枠は SUS316 鋼板で厚さ 3mm の板に穴径 10mm のパンチング加工を施した板及び厚さ 2mm で幅 5mm の枠板を 2 枚合わせ、網は SUS316 金鋼である。媒体側に幅 5mm の枠を向けビスで装着している。</p> <p>(単位 mm) 幅×長さ×高さ            枠の外寸法 : 108 × 5 × 940            枠の内寸法 : 98 × 5 × 930            枠を媒体槽に止めるビス穴のピッチ 93.5 mm</p>
隔離板制作上の要求事項	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. メッシュ材を枠板に挟んで媒体槽にビス止めできること。</li> <li>2. メッシュ材はガラスビーズの粒径によって異なる網目のものに交換でき、ガラスビーズが漏れないこと。</li> <li>3. 媒体層から加わる応力に対し、充分な強度があること。</li> <li>4. 使用するガラスビーズの透水性に影響を及ぼさないこと。</li> <li>5. 塩水による腐食がないこと。</li> </ol>	同左
流量計の用途と仕様	<p>淡水槽・塩水槽への給排水流量から媒体槽に流入した淡水・塩水の量を把握する。</p> <p>淡水槽・塩水槽の給水側・排水側に微少流量計を合計 4 個設けている。</p>	<p>注水槽への給排水流量、排水槽のオーバーフロー流量を把握する。</p> <p>注水槽の給水側にアクリルテープ一管及び電磁流量計 A、排水側に電磁流量計 A を各 1 個使用、排水槽の排水側に電磁流量計 B の 2 流量タイプを 2 個使用している。</p>

(3/3)

	<p>微少流量計 デジタル表示</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・流量範囲 350～5000 cm<sup>3</sup>/min</li> <li>・最高使用圧力 0.49MPa</li> <li>・使用温度範囲 0°C～60°C</li> <li>・精度±4%RS±40 cm<sup>3</sup>/min</li> </ul>	<p>データ処理装置で電磁流量計 A 及び B の瞬時値を収集すると共に、デジタル表示する。</p> <p>電磁流量計 A</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・流量範囲 0～100 cm<sup>3</sup>/min</li> </ul> <p>電磁流量計 B</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・流量範囲 0～0.01 m<sup>3</sup>/min</li> <li>・流量範囲 0～0.001 m<sup>3</sup>/min</li> </ul> <p>アクリルテーパー管流量計</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・流量範囲 0.001～0.01 m<sup>3</sup>/min</li> <li>・最高使用圧力 0.4MPa</li> <li>・使用温度範囲 Max40°C</li> <li>・目盛 500 cm<sup>3</sup>/min 每目視計測</li> </ul>
媒体槽上蓋の構造の概要	<p>上蓋は、取付け時の空気抜き穴を 4ヶ所設け、空気抜き穴にはナイロンスクリーンをチューブニップルで挟み込み媒体の漏れを塞いでいる。</p> <p>板厚 5mm</p>	<p>中蓋 4列及び上蓋 4列の二重蓋で、内蓋には水封フランジの調整ロッドが付いており媒体充填の際にできる自然沈降を補う深さ微調整が可能。</p>

Table 2 水頭差 0.5cm 小型 MACRO 塩水楔予察試験データ

初期条件： 塩水槽水頭 182cm， 塩分約 4% (電気伝導率 6.28 S/m)

淡水層水頭 187cm (電気伝導率 0.018 S/m)， 水温 16.3°C

H18.1.17

経過時間 ' " (分秒)	塩水楔浸透寸法 (H・L) mm	図番号(頁)	淡水槽流量 (cm <sup>3</sup> /min)	塩水槽流量 (cm <sup>3</sup> /min)	塩水槽 電気伝導率 (S/m)
0' 00"	0・0		給水一排水 810-710	給水一排水 330-520	6.17
1' 00"	90・60		630-	710-	
2' 00"	130・100	Fig. 3(a)			6.11
3' 00"			630-		
5' 00"	170・200				6.08
7' 00"	175・235				6.07
9' 00"	180・270	Fig. 3(a)			6.07
10' 00"	180・293				
12' 20"	190・330	Fig. 3(a)			
15' 00"	190・350	Fig. 3(a)	630-630	710-	
17' 30"	190・400	Fig. 3(b)			6.10
18' 00"	192・410				
25' 00"	200・485	Fig. 3(b)			
26' 20"					6.05
28' 00"	200・500 <			*	
30' 00"		Fig. 3(b) Fig. 3(b)	630-600 終始水頭保持	710-1080 終始水頭保持	6.06

準備： 0.5 m<sup>3</sup>タンクに約 4% (電気伝導率 6.28S/m) の塩水を調整した。別の 0.5 m<sup>3</sup>タンクに 0.425 m<sup>3</sup>の脱気水を確保した。

CM-21P 型ポータブル電気伝導率計を塩水槽に常時浸漬した。

\* : 塩水槽流量の排水には、淡水槽から塩水槽へ流れた淡水量を含んでいる。

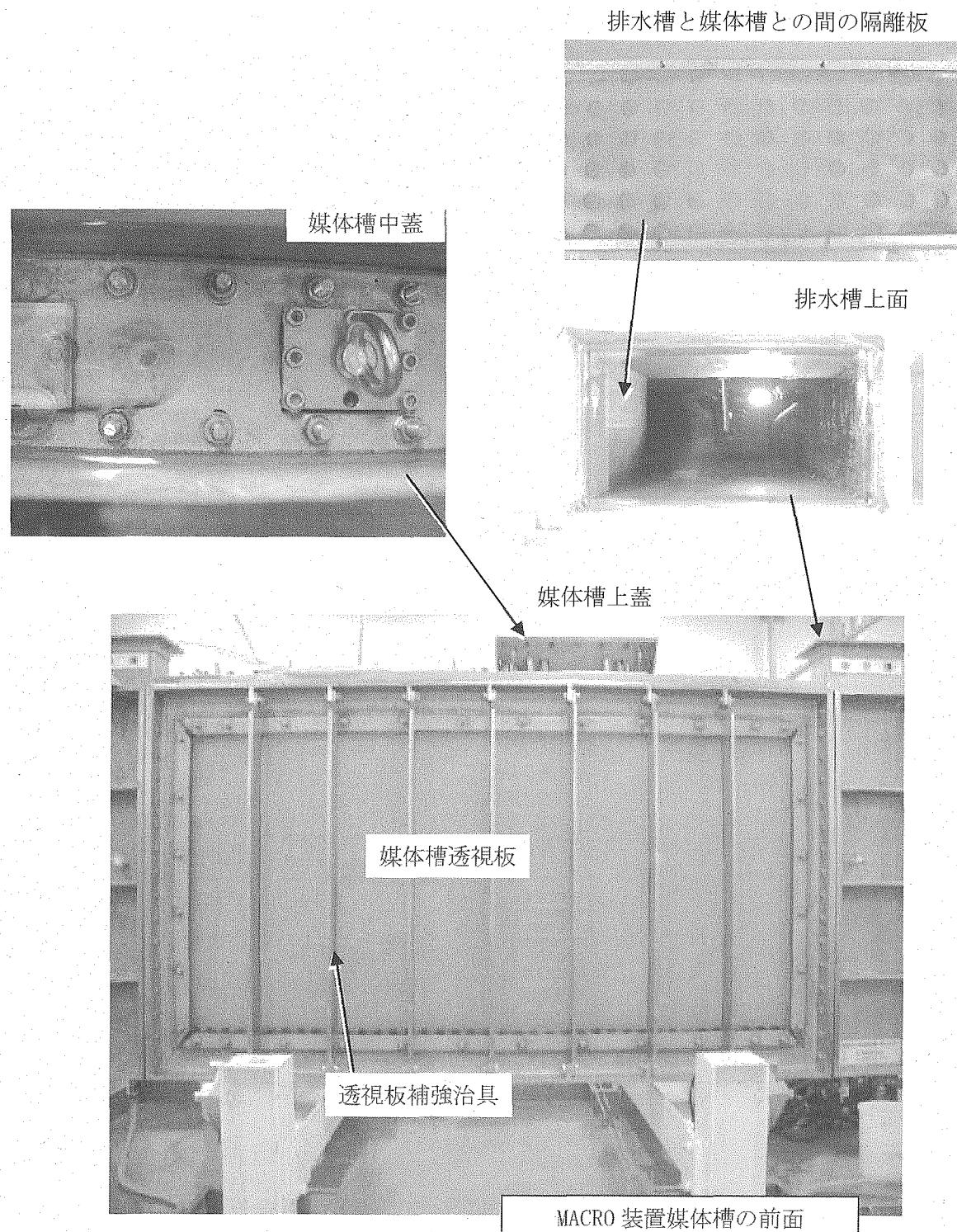


Fig.1 MACRO 装置の構造

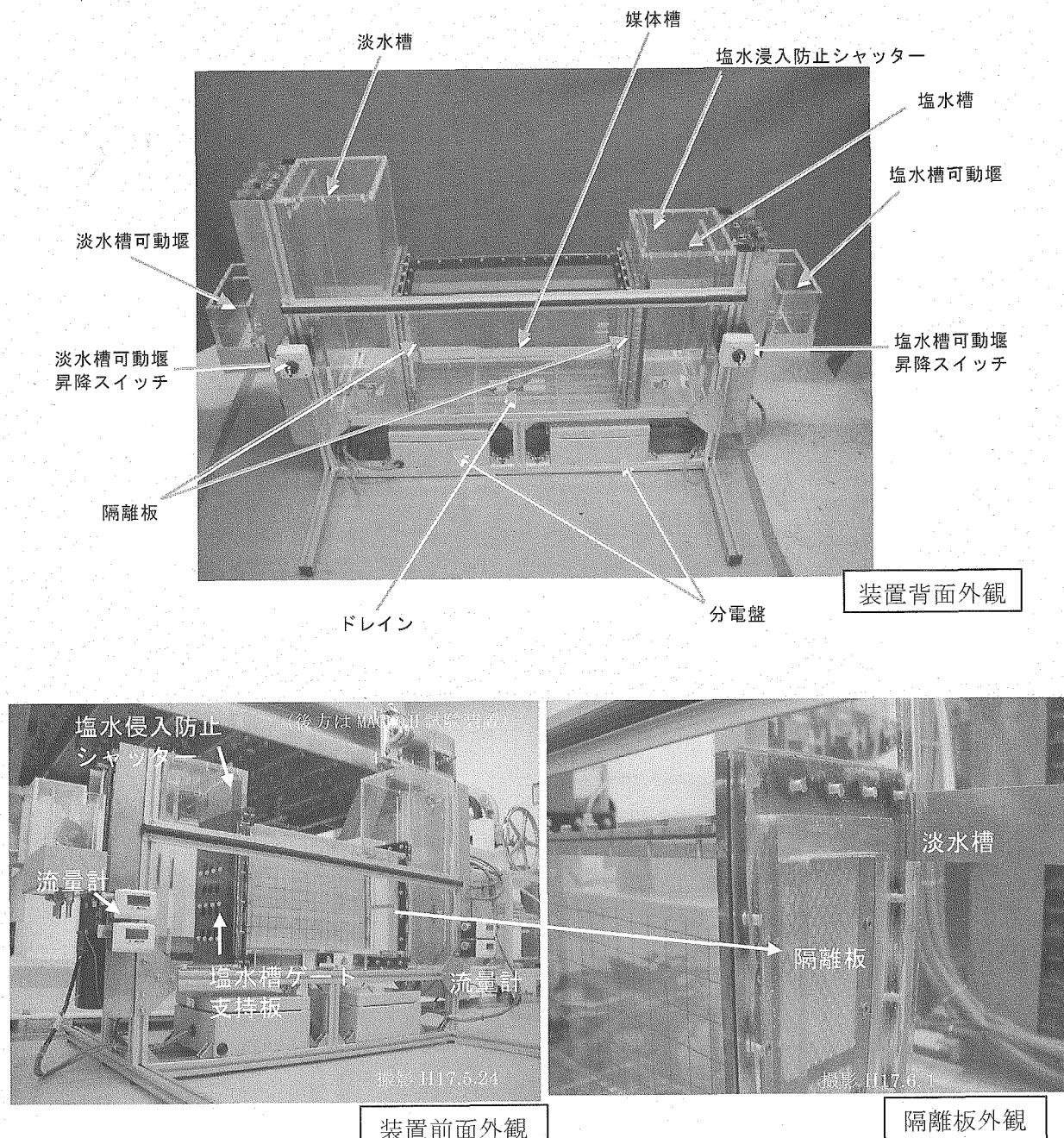


Fig. 2 小型 MACRO の構造

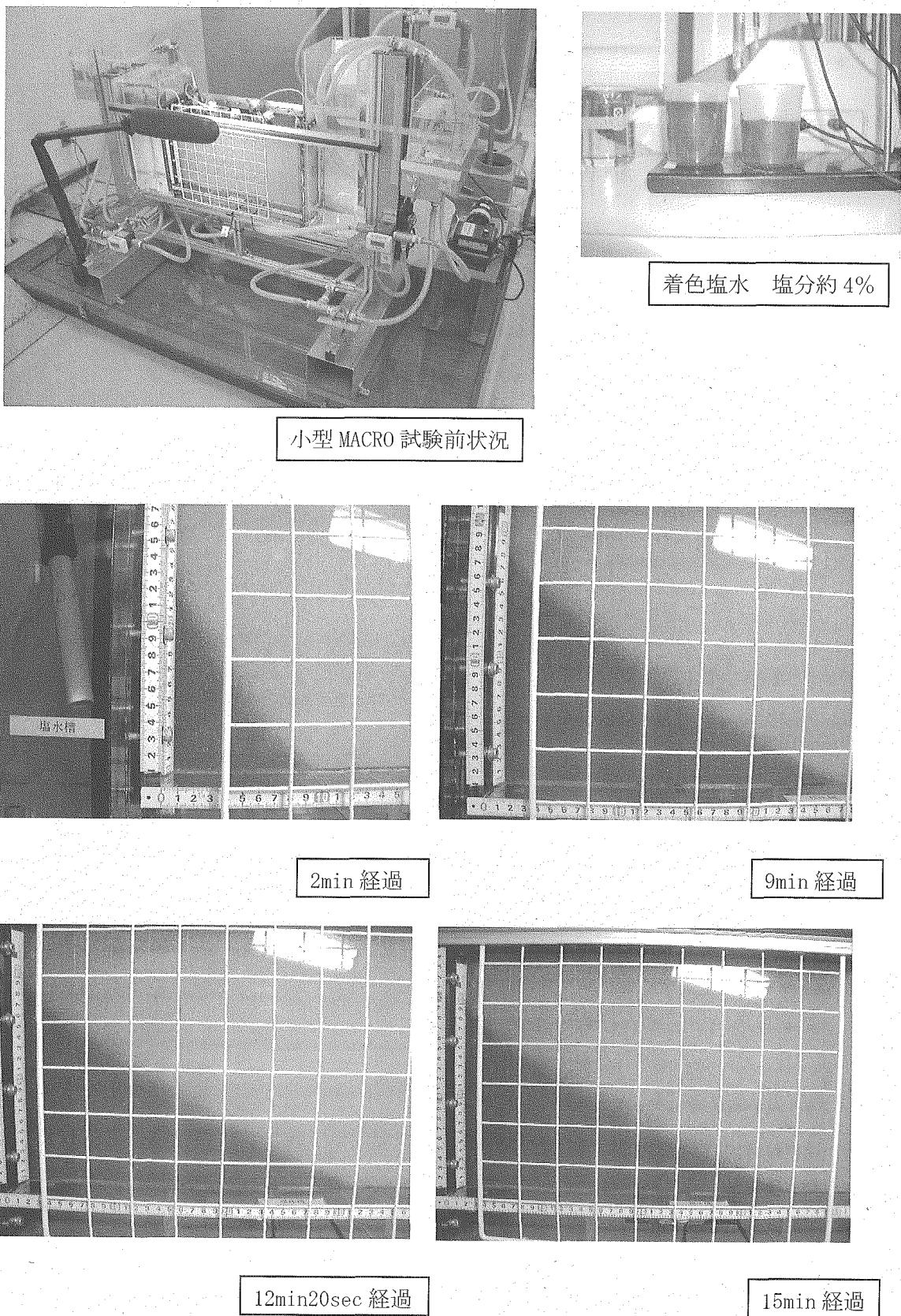


Fig. 3(a) 水頭差 0.5cm 塩水楔予察試験

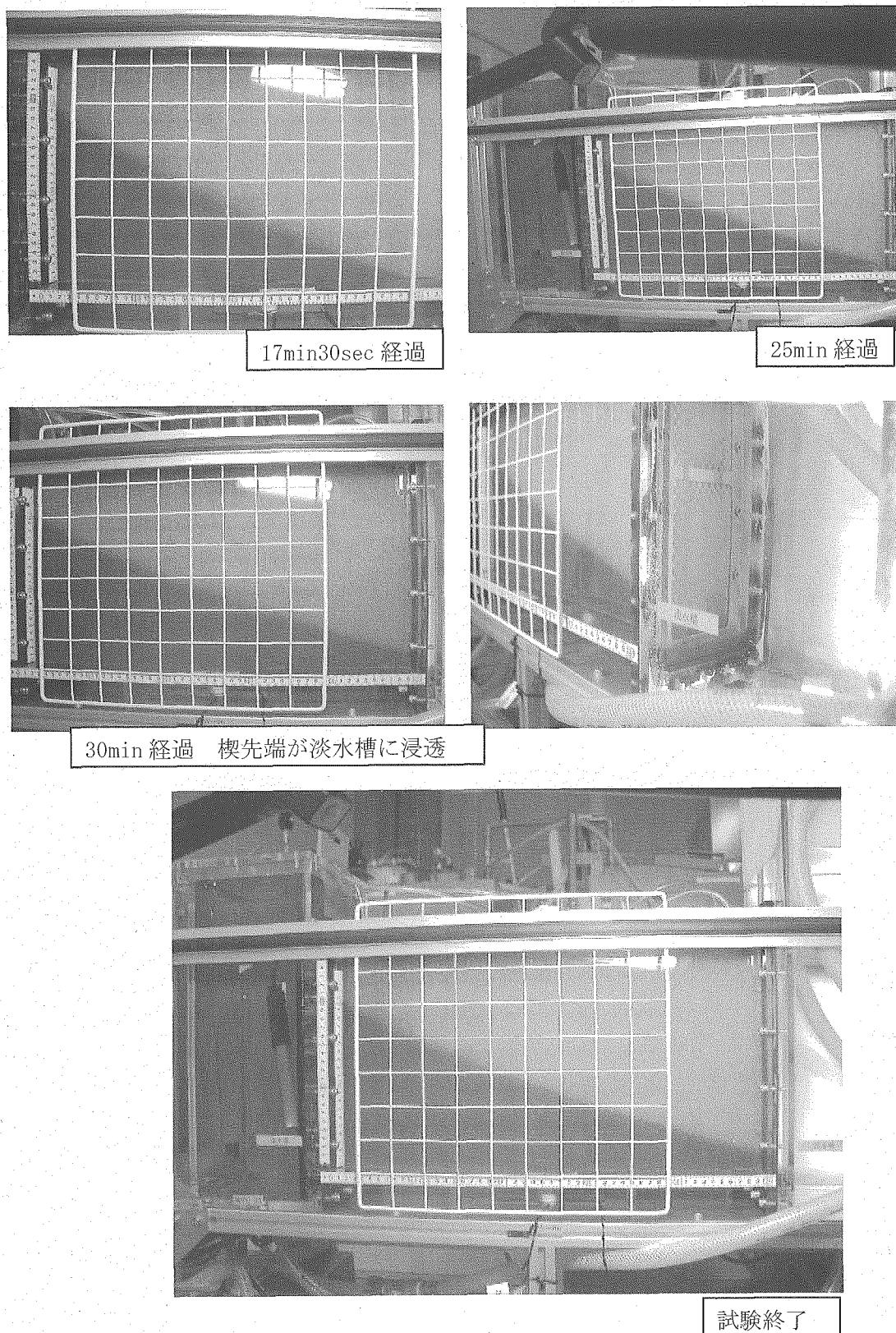
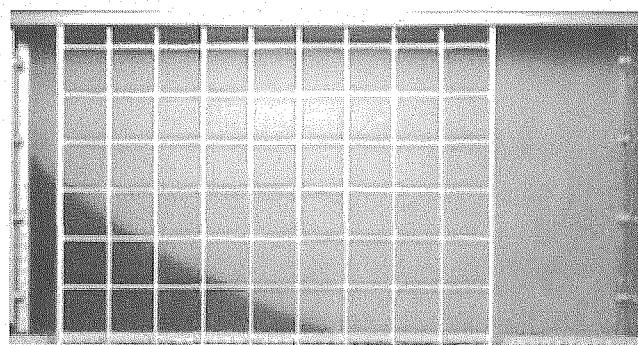


Fig. 3(b) 水頭差 0.5cm 塩水楔予察試験



(水頭差 1cm, 塩分濃度 4%)

Fig.4 小型 MACRO 装置での塩水楔試験結果

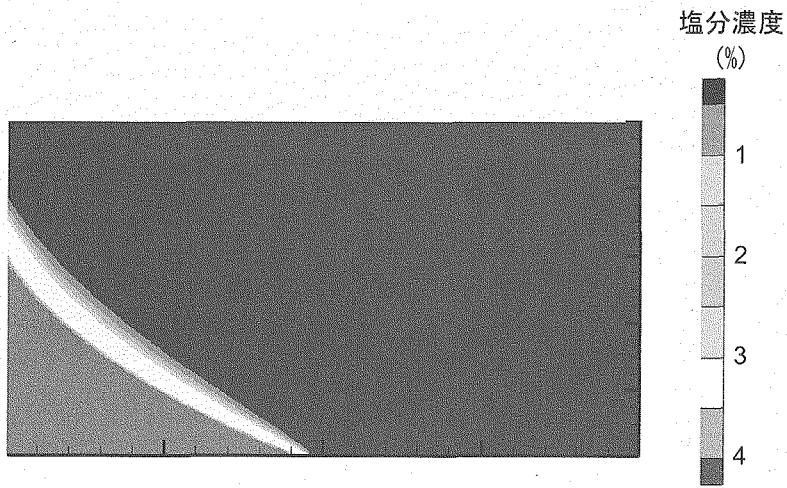
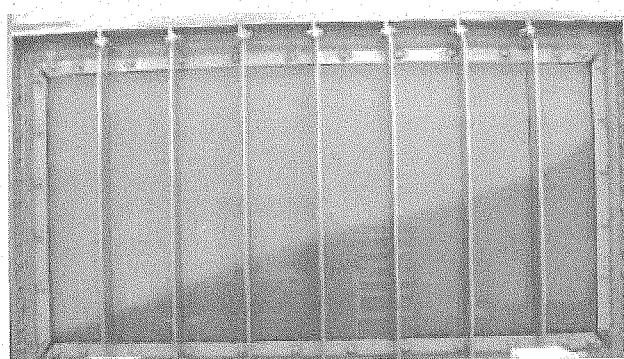
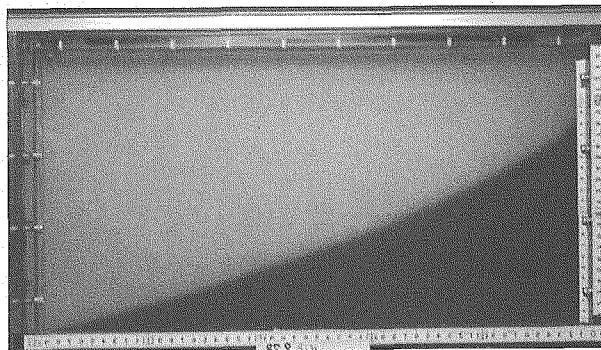


Fig.5 解析モデルによる計算結果



( $\Delta = (\text{水頭差 } d) / (\text{装置幅 } L) = 0.015$ )

Fig. 6 従来の MACRO 装置での塩水楔試験結果



( $\Delta = (\text{水頭差 } d) / (\text{装置幅 } L) = 0.015$ )

Fig. 7 小型 MACRO 装置での塩水楔試験結果

注) 従来の MACRO 装置との比較のため、写真の左右を逆転している。

## 付 錄

小型 MACRO の設置や周辺機材の整備、通水試験及びそれらの作業を通じた機能の改善内容を以下にまとめる。

### 1. 小型 MACRO 本体設置及び周辺機材の整備

設置場所として、核燃料サイクル工学研究所内の地層処分基盤研究施設第 2 試験棟 MACRO II 室を選定し、既存の機材を使用してチューブ配管などの仮整備作業を平成 17 年 5 月 18 日～平成 17 年 6 月 17 日までに実施した。

#### (1) 設置場所

設置場所に選定した MACRO II 室は Fig. 8 の概略図に示すように、試験水の給水源、排水口、及び試験水を一昼夜以上貯水し脱気するための 0.5 m<sup>3</sup>タンクが既設されている点、着色水の進展過程観察、試験経過記録機器の設置、各水槽及び給排水配管の分解・組み立てに使用する作業台を設置できるスペースがある点、更に工具、器具を取り揃えた工作エリアが近接している点で、小型 MACRO を整備する環境が最良であると判断した。

Fig. 9 にレイアウト作業前の周辺機材等の状況を示す。

#### (2) 周辺機材の整備

MACRO II 室の装置設置環境を整備するとともに、隔離板の交換取り付け、給水タンク・ポンプの設置、注水源、給水タンク、ポンプ、装置本体及び排水口までの給排水チューブの接続作業を行った。周辺機材のうち、給水タンク及びポンプ各 2 個については休止中の機器を使用じたため、薬液タンクを中性洗剤で隅々まで洗った後でポンプを取り付け、石鹼水をポンプの吸引・吐出口に接続したチューブから通水して、ポンプ流速を調整しながら 30 分程度循環させて洗浄した上で、更に 10 分程度石鹼水を水道水に替えて循環洗浄した。また、注水源の施設配管に備え付けてあるカートリッジフィルター 2 本を新しいものに交換し試験水の浄化対策を行った。

Fig. 10 に機材設置及び配管整備状況を示す。

#### (3) 可動堰水頭ゲージの取り付け

可動堰水頭ゲージの取り付けは、以下の点を考慮した。

- ・ 塩水・淡水両可動堰の高さ位置が読み取りやすく、両可動堰の水頭差を 0～200mm まで 1mm 単位で設定できること。また、ゲージが試験等の作業の支障にならないこと。
- ・ 塩水・淡水両可動堰の指針を水頭ゲージのゼロ点に合わせ、双方の可動堰から給水した際、双方の可動堰からオーバーフローが生じた直後に、媒体槽の水位が上蓋（媒体槽+フランジ+パッキン高さ 262mm）まで上昇して各水槽の水位が一致すること。
- ・ 水頭ゲージの破損等により交換する際に設定高さが再現できること。

Fig. 11 に小型 MACRO 水頭ゲージの取り付け位置の考え方を示す。

## 2. 通水試験

設置・整備した本体及び周辺機材における給排水等の性能及び機能を確認するために、通水試験を実施した。

### (1) 媒体槽へのガラスビーズ充填前の通水試験

本試験では、淡水槽可動堰と淡水槽間の接続チューブ内の気泡を除去して気泡溜りに起因した給水の遅れが生じないようにした後、給水ポンプから淡水用可動堰へ約  $900 \text{ cm}^3/\text{min}$  で給水した。

Fig. 12 に淡水用可動堰と淡水槽の接続チューブ内の空気除去状況を示す。

- ① 淡水用可動堰と淡水槽の水頭は同一レベルになるように、サイホンの原理によるチューブ接続（サイホン配管）をしているが、可動堰の水位が先行して高くなり淡水槽の水位上昇が鈍いこと、淡水用可動堰から淡水槽への流量は  $150 \text{ cm}^3/\text{min}$  で給水量のほとんどが可動堰排水部から排水口へ流れていることから、サイホン配管に不具合のあることを確認した。
- ② 排水流量計が塩水槽の排水バルブよりも高い位置に設置されているため、塩水槽排水チューブ内の気泡溜りに起因した排水不良があることを確認した。

### (2) 媒体槽へのガラスビーズ充填

媒体槽へのガラスビーズ充填は、気泡を排除しながら隅々まで均質に浸漬するように注入する必要がある。ガラスビーズは、脱気した淡水中に一昼夜以上浸漬させ、スコップとヘラ及び、媒体槽上部のフランジ面に載せるゴム製中蓋パッキンの容積分を調整するためにノギスを使用して媒体槽への充填を行う。充填及び注水に伴う媒体槽の変形量を確認するために、ダイヤルゲージを媒体槽背面に配置する。当該作業においては、装置の形状・寸法が影響する不具合はなかった。

Fig. 13 にガラスビーズ充填作業状況を示す。

### (3) トレーサー通水試験

トレーサー通水試験は、媒体槽にガラスビーズが均質に充填されていることを確認する目的で実施した。装置全体に淡水を満たし、淡水槽の水頭を塩水槽よりも高く調整した上で、淡水に食紅を溶解した着色水を淡水槽に投入し、媒体槽内の着色水の進展具合を確認する。

#### ① 試験条件

- a. 淡水槽水頭高さを  $277 \text{ mm}$ 、塩水槽水頭高さを  $183 \text{ mm}$  になるよう可動堰を調整
- b. 給水ポンプの流量を  $33 \sim 37 \text{ cm}^3/\text{min}$  に調整（30%運転）
- c. 塩水槽と媒体槽の間の仕切り板の開きを  $8 \text{ mm} / \phi 22 \text{ mm}$  引き上げ（通水流量  $26 \text{ cm}^3/\text{min}$ ）

#### ② トレーサー通水試験

- a. 着色水は、MACRO トレーサー試験作業マニュアルに準じて、淡水槽容積  $0.015 \text{ m}^3$  に対して食紅  $8.3 \text{ g}$  を取手付きビーカに取り  $100 \text{ cm}^3$  の脱気水に溶かして作製した。
- b. ①b. の通水流量を保持した状態で、着色水を淡水槽可動堰から約  $15 \text{ cm}^3$  注入した結果、給水チューブを経由して淡水槽下方より垂直に上昇し、着色が水面に達してから槽底部に向けて広がった。

着色水が淡水槽全体に広がる過程で、媒体槽への浸入がないことを確認した。

- c. 着色の進行状況を鮮明にするため食紅着色水を淡水槽上方から注入した。

- ③ 本トレーサー通水試験の結果、上蓋近傍の高さ  $3 \sim 4 \text{ cm}$  の着色部分に若干進行時間の遅れが生じたが、 $46 \text{ sec}$  で  $2 \text{ cm}$  の割合で均等な着色の浸透を確認できた。

Fig. 14 に既設の MACRO 装置におけるトレーサー通水試験の例を, Fig. 15 に小型 MACRO における媒体槽内へのトレーサー通水試験の状況を示す。

#### (4) 着色水の淡水置換

着色水の淡水置換は、再試験の実施に向けてガラスビーズの浸漬状態を保持する必要があることから、脱気した淡水の塩水・淡水槽への給水、淡水槽可動堰を降下した逆流による排水及び媒体槽排水バルブからの排水を同時に実施する。

今回の淡水置換においては Fig. 16 に示すように、脱気した淡水を貯水した給水タンクの容量不足及び排水系経路の不足を補うため、内径 16mm のチューブを使用した水道水の給水及び内径 16mm のチューブを使用したサイホン配管による排水を実施する必要が生じた。

#### (5) 塩水浸入防止シャッターの止水効果

塩水楔試験の開始前に、塩水槽へ淡水を貯水した状態で、淡水槽側の水頭を設定し、通水条件や水頭差の安定性及び配管から漏水がないこと等を確認した後、塩水槽の淡水を塩水に置換する。塩水槽内の淡水から塩水への置換に際して、媒体槽側からの淡水の混入がなく、所定の塩分濃度の着色塩水に置換するために、塩水槽と媒体槽の間に塩水浸入防止シャッターを設けた。

塩水浸入防止シャッターを閉じた状態で塩水槽内に塩水を注水することにより、媒体槽のガラスビーズの浸漬状態及び塩水濃度に影響がないことを確認した。

Fig. 17 に、塩水浸入防止シャッターを止水状態にした場合の淡水の排出から塩水注入までの状況を示す。

#### (6) 媒体槽前面からの着色塩水進展過程の観察

媒体槽前面には、25mm 間隔で格子状に罫書き線を入れた透明アクリル製の薄板をはめ込んだが、照明や媒体槽周辺の什器、人影等の映り込みがあり、着色塩水の進展過程の観察及び画像の記録に影響を及ぼしていることを確認した。

媒体槽前面での什器、人影等の映り込み状態が Fig. 15 に見られる。

### 3. 機能の改善

2. で抽出された課題に対して、以下の改善を行った。実施した改善の内容を Fig. 18 に示す。

#### (1) サイホン口径変更による淡水槽可動堰の水頭の変化への追従性確保

淡水槽可動堰に要求する給排水性能は、サイホン配管により媒体槽内の流量変化に追従した水量の補給・余剰水排水、動水勾配を一定に保持する水頭保持、及び水頭変更時の可動堰の昇降に伴う水頭変化への追従性に優れていることである。この要求を満足するため、淡水槽可動堰と淡水槽の上口に Fig. 18(a) に示す内径 15mm 及び 19mm のチューブを使用したサイホン配管を設けた。その結果、可動堰の上昇による容量変化には最大約  $1,300 \text{ cm}^3/\text{min}$  を給水して淡水槽の水頭を保持することができ、また可動堰の下降による容量変化にも追従して水量の補給・余剰水排水が可能となり、水頭変化に十分追従できる機能を確保できた。さらに、水頭差を 2cm、1cm とした通水試験においても、各々水頭差が安定し、水頭差 2cm で  $750 \text{ cm}^3/\text{min}$  の淡水を安定補給できることが確認できた。

#### (2) 操作性・機能性向上のためのトレー等の製作

試験装置の分解、組み立て及びガラスビーズ充填作業において、装置下部床面への淡水・塩水

の漏水やガラスビーズの飛散が想定されるため、装置全体を載せることができるトレーを作製した (Fig. 18(b))。合わせて、小型 MACRO の構造、機能、性能の改善を図るための設置機材を製作した。

① トレーは、塩化ビニル製板(板厚：側面 10mm, 底面 15mm)により、幅 1,800mm, 奥行 900mm, 高さ 80mm の外側寸法で製作し、既設の架台に据え付け固定できるようファスナーを 4ヶ所に設けた。更に、漏水の排水用バルブ 1 個を取り付け、バルブ穴には漏洩したガラスビーズの流出を防ぐために、ガラスビーズの粒径に応じて適切な目の粗さのものに交換可能なメッシュを栓止めした。

② 着色水の淡水置換における排水性能を向上するため、淡水槽、塩水槽それぞれへの給水チューブを分岐し、排水量を調整できるよう排水バルブを設けた。

トレーの製作において、給水流量計、T 字配管、排水用 1/2 バルブ及び給水用 1/2 バルブを接続し固定するための支持板及びアタッチメントを 2 式製作した。Fig. 18(b) に示すように、支持板の高さは、配管チューブ内の空気溜まりの生じない程度(約 70mm)として、本体淡水可動堰の前面及び本体塩水可動堰の前面のアルミ製フレームに専用ナットとネジで取り付けた。アルミ製フレームには溝があり、溝に付属の専用ナットを装着して支持板を取り付けているため、スライドさせて任意に位置を変更することができる。

③ 配管内の気泡溜まりを防止するため、トレーの排水側側面に、媒体槽、淡水槽、塩水槽からのそれぞれの排水チューブの外周を変形させずに支持することができる緩衝構造の支持具及びアタッチメントを設けて、排水バルブから排水口に向かうよう傾斜をつけた。

④ 媒体充填作業に適した高さとするために、Fig. 18(b) に示すステンレス製角鋼を設けて装置全体を 150mm かさ上げし、トレー内に据え付けた。

⑤ 着色水の淡水置換における給水性能を向上した置換給水設備を追加した。

a. トレーの製作において、淡水槽・塩水槽への給水チューブ及び電源盤 2 台を縦型に据え付け支撐することができるアルミ製フレーム 4 本及びアタッチメントを設けた。淡水槽側アルミ製フレームの高さは約 800mm、塩水槽側アルミ製フレームの高さは約 650mm、電源盤据え付けアルミ製フレーム長さは約 950mm とし、本体のアルミ製フレームにネジ等で固定できる構造にしてある。

淡水槽側アルミ製フレーム上部に給水流量計、T 字配管及び給水用 3/8 バルブを接続し固定、塩水槽側アルミ製フレーム上部に給水用 3/8 バルブを接続し固定した。なお、給水流量計、T 字配管及び両バルブの固定高さは任意に調整できる構造である。

b. 塩水楔試験等の水理試験を行う際は 0.05 m<sup>3</sup> 以上の淡水を一昼夜以上置き脱気して使用するため、近接設備である塩水タンク 1 台及び 0.5 m<sup>3</sup> タンク 2 台に淡水を貯水して置き、いつでも使用できるように給水ポンプ及び配管を用意した。

Fig. 18(c) に、着色水の淡水置換時の給水性能を向上した置換給水設備を示す。

### (3) 媒体槽前面での着色塩水進展過程の観察環境の整備

当初、着色塩水の進展過程を詳細に観察できるよう、格子状の野書き線を入れた透明の薄板を媒体槽前面にはめ込んでいた。しかしながら、ガラスビーズを充填した状態では薄板により媒体槽全体が暗くなり、野書き線の陰影や照明の映り込みにより媒体槽が観察しにくくなることが判明したため、薄板に替えて Fig. 18(d) に示すように、媒体槽前面の左端及び下端にスケールを貼

るとともに、格子状のガードを媒体槽前面に設置した。左端のスケールは、目線高さが合せやすいよう二重にした。また、媒体槽前面の照明の映り込みを防止するため、装置前面から蛍光灯の照明を当て、更に白色の移動式ボードを媒体槽前面に正対する位置に設置した。トレーサー通水試験での着色水の進展過程の観察及びビデオカメラやデジタルカメラによる画像の記録において、試験結果を確認できる程度に映り込みが低減されたことを確認した。

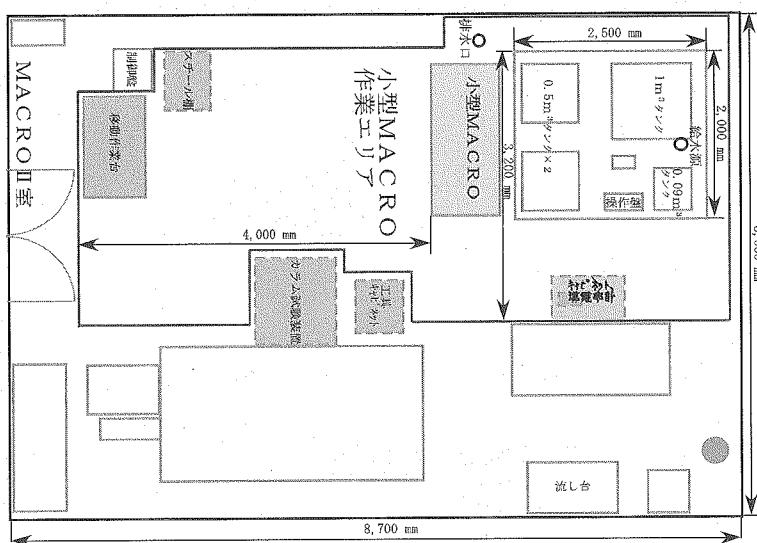
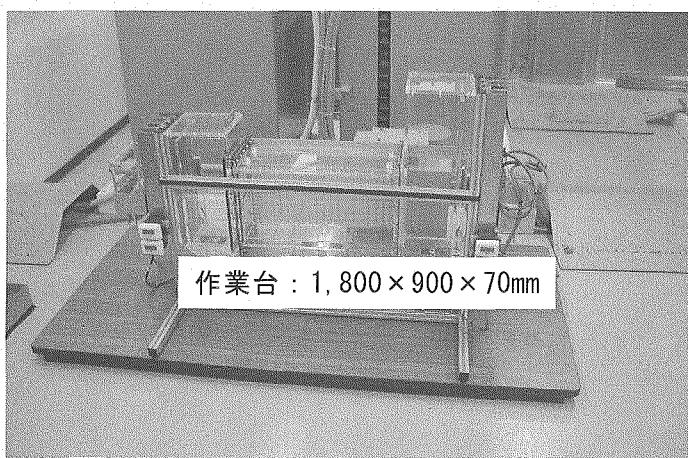


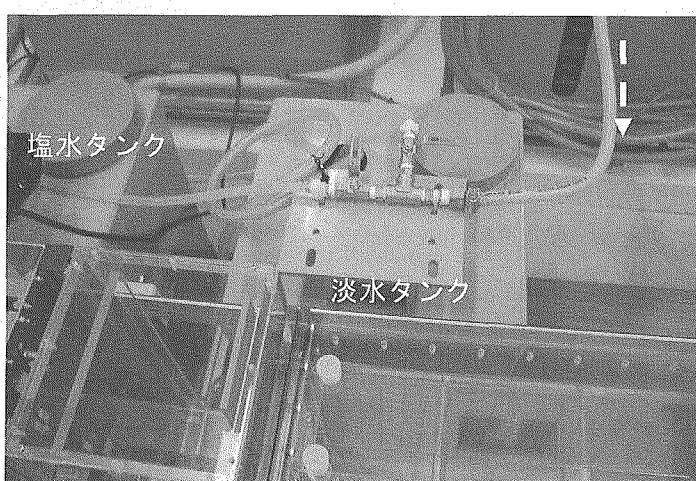
Fig. 8 小型 MACRO 本体設置及び周辺機材の整備概略図



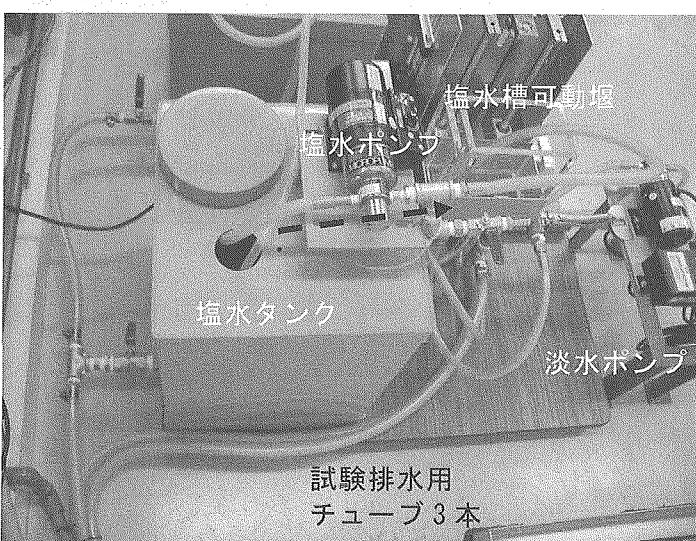
Fig. 9 本体設置・整備前の周辺機材等の状況



小型 MACRO 本体を作業台上へ移動



注水源より給水タンクへチューブ接続



給水タンクから給水ポンプ、塩水可動堰へのチューブの接続

チューブ : 外径 18×内径 12 mm

バルブ : ねじ径 3/8

継ぎ手 : 3/8 ホースニップル

チューブをホースバンドで固定

タンク容量 : 0.05 m<sup>3</sup>

チューブ : 外径 16×内径 10 mm

バルブ : ねじ径 1/2

継ぎ手 : 1/2 ホースニップル

Fig. 10(a) 機材設置及び配管整備

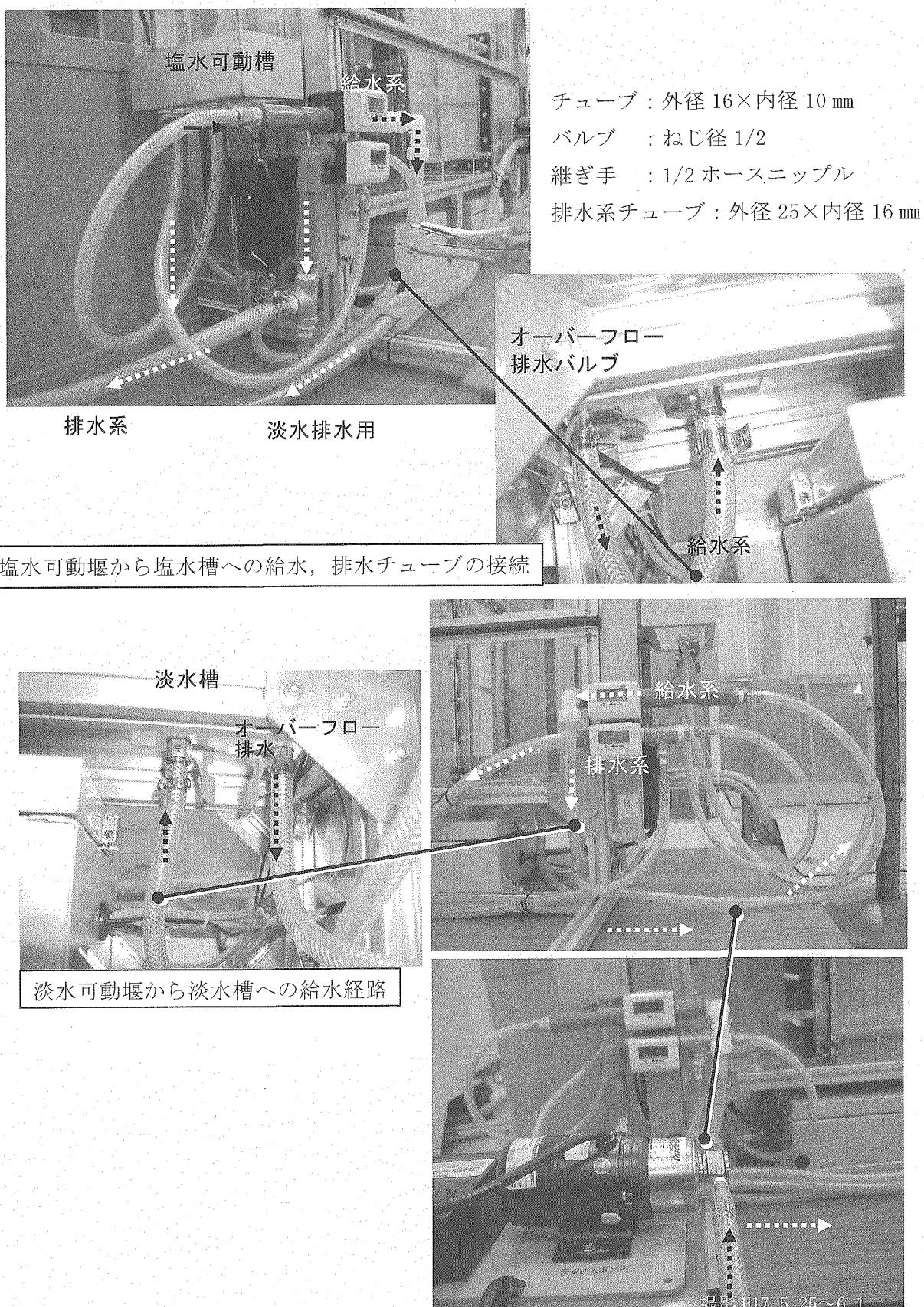


Fig. 10(b) 機材設置及び配管整備

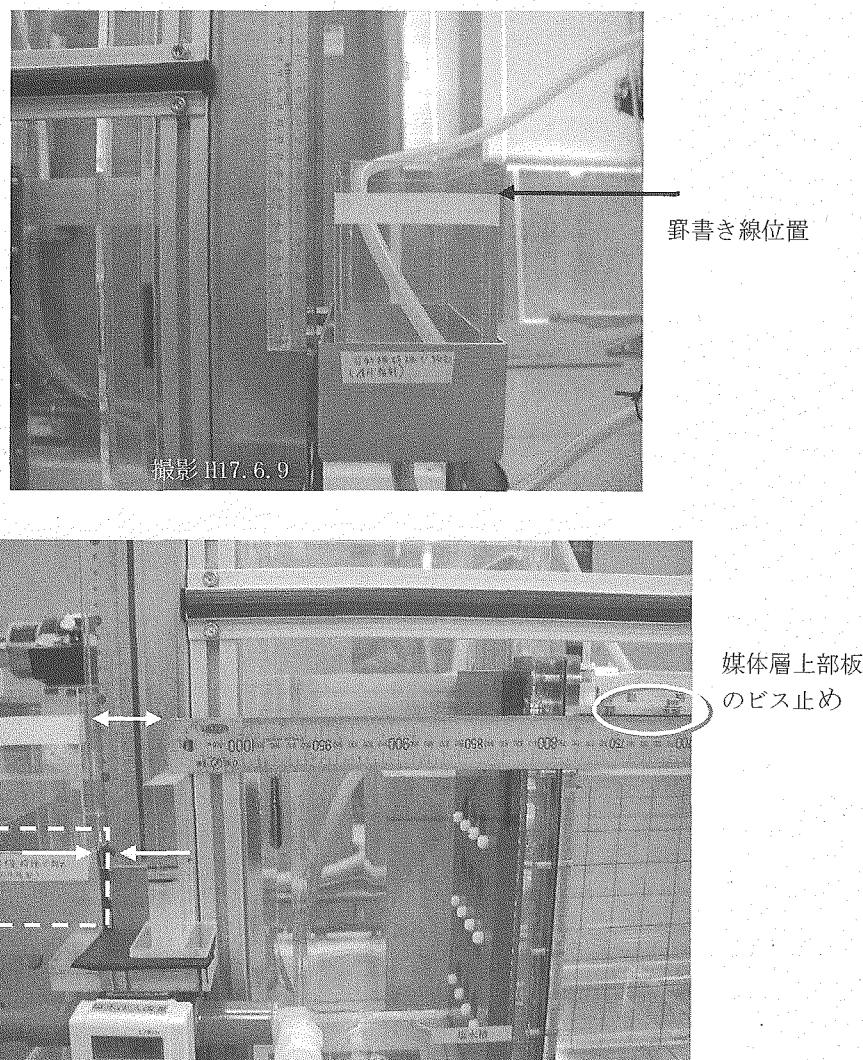
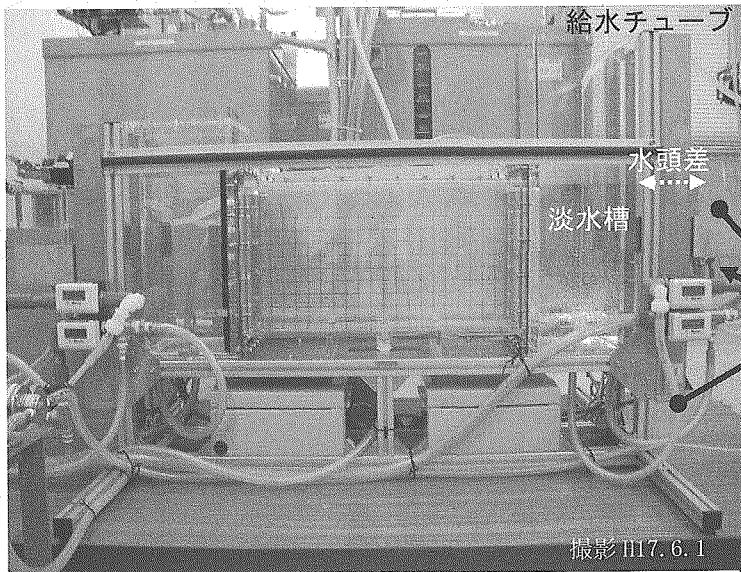


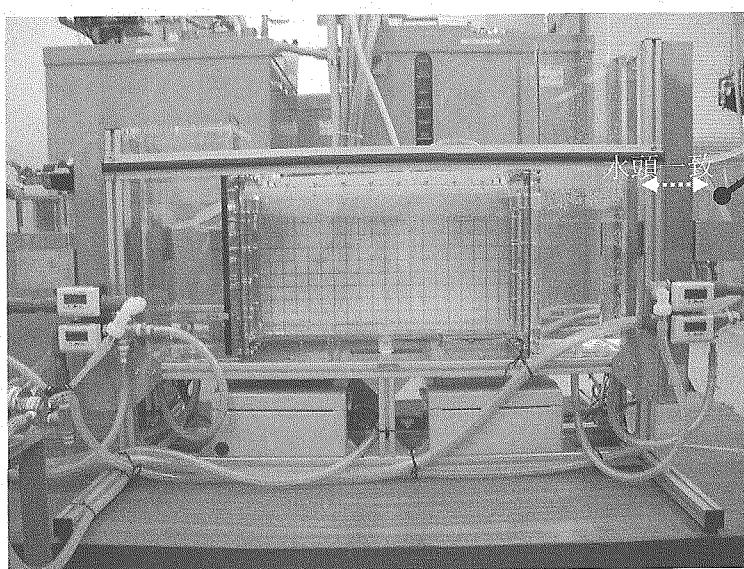
Fig. 11 水頭ゲージ取り付け位置の考え方

- a. 可動堰上端から堰板端面の高さ（図面上 20mm）をノギスで測定し、側面板に、ボールペンで書き線を入れる。写真では、白いテープ上端が書き線位置を示す。
  - b. 媒体槽にパッキン及び媒体槽上部板をビス止めした後、1m以上のスチール直尺を用いて媒体槽上蓋底面の延長上に可動堰の堰板端面を合わせる。
- 可動堰の載ったステンレス鋼製枠の上端を指針として水頭ゲージの基準ゼロ点を合わせて指針にできるだけ近づけて直角に張る。



淡水ポンプ吐出流量：  
約  $540\sim900\text{cm}^3/\text{min}$  で淡水槽へ  
直接注入。

淡水槽可動堰 (低位置)  
可動堰バルブ  
接続チューブ



給水チューブを淡水槽  
可動堰に挿入

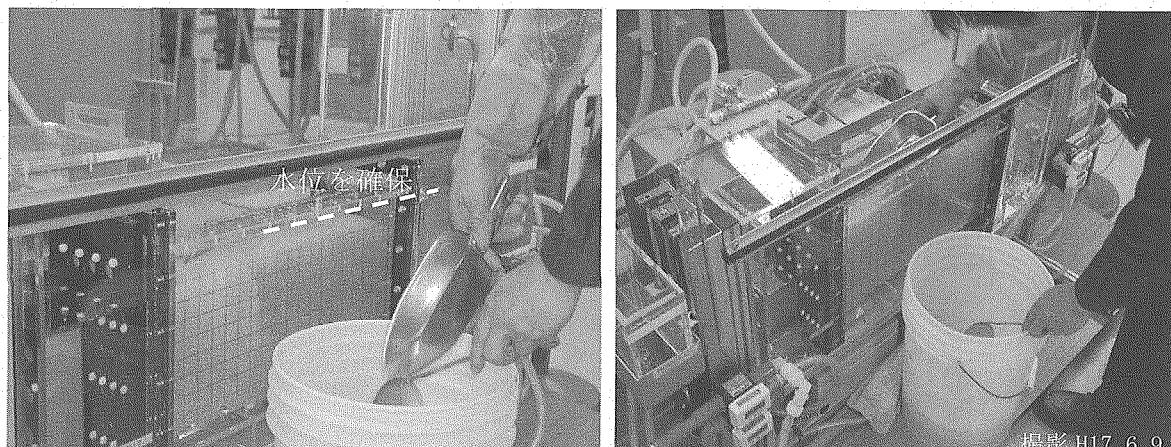
Fig. 12 淡水用可動堰と淡水槽の接続チューブ内の空気除去

接続チューブ内の気泡に起因した給水の遅れに伴って水頭差が生じるため、当該水槽間の水頭レベルが同一になるような注水手順を定める。

- 可動堰を低位置にして置き、淡水槽上部より注水し当該可動堰の水位が約 100mm 上がるまで注水したら、接続チューブ内の空気を追い出し可動堰と淡水槽の水位が同一になるよう調整する。

追い出し方法は、チューブの低く垂れた部分を持って高低差を付けながら、バルブ、継ぎ手、流量計部分の空気の上昇を見て可動堰バルブからチューブ内の空気を追い出す。

- 可動堰内の水位が上昇してチューブ内に空気が無いことを確認したら、給水チューブを可動堰に挿入し、可動堰高さを昇降して、水頭を任意の高さに調整する。



媒体槽にガラスビーズが浸漬する水位を確保して充填

撮影 H17. 6. 9



ダイヤルゲージの配置

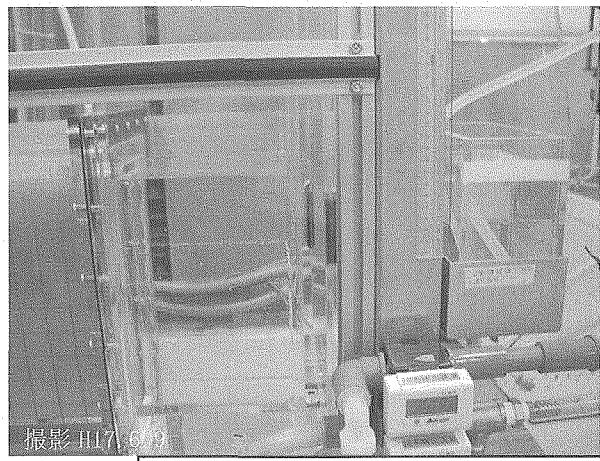
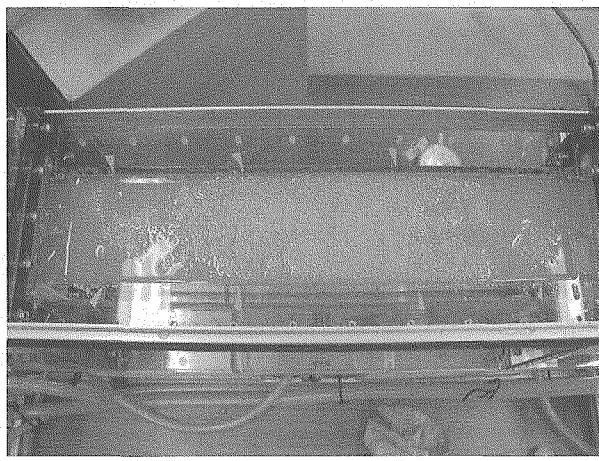
Fig. 13(a) ガラスビーズ充填作業

## ① 媒体槽にガラスビーズが浸漬する水位を確保して充填

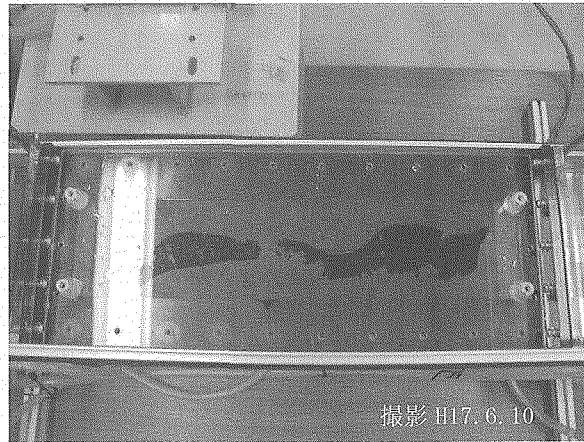
サイホン管による可動堰からの排水を利用して、ガラスビーズが浸漬する水位を常時確保する。媒体層フランジ面よりガラスビーズが越流しないよう注意する。

## ② ダイヤルゲージを配置

ガラスビーズの充填に伴う媒体槽側部のアクリル板の変形について、媒体槽裏面中央部にダイヤルゲージを設置し、測定する。重量約 28kg の淡水で飽和させたガラスビーズを充填した後で測定した結果は、膨れ幅 0.15mm であった。



ガラスビーズが浸漬した充填状態



充填 1 回目完了

Fig. 13(b) ガラスビーズ充填作業

### ③ 充填 1 回目完了

充填したガラスビーズの沈下のないことをノギスにて確認後、厚さ 7mm の内蓋パッキンを媒体槽フランジにはめ込む。内蓋パッキンは、媒体槽上蓋のビス締め込みによる破損を防止する緩衝材として、媒体槽上蓋・ガラスビーズを保護するため考案した。

充填量は、沈下による空洞化を避けるため、内蓋パッキン中央に向けて多めにしている。

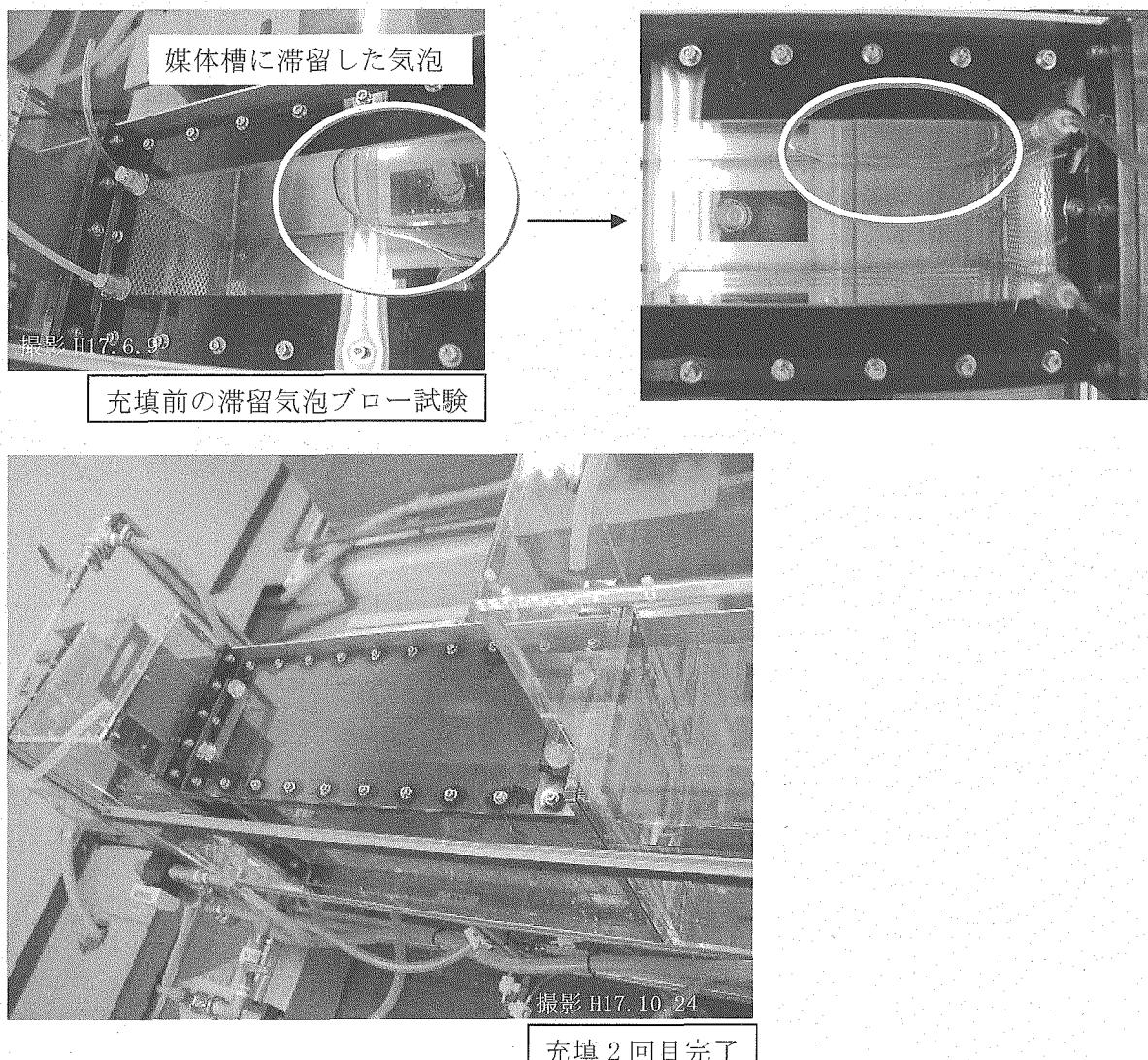


Fig. 13(c) ガラスビーズ充填作業

#### ④ 充填前の滞留気泡ブロー試験

充填後媒体槽上蓋で媒体槽を密封する際は、ブロー穴にチューブを差込み、試験時のチャンネリング要因である気泡を抜きながら満水にする必要がある。

図の充填前の滞留気泡ブロー試験において、上蓋の淡水槽側に閉じ込めた  $12.5\text{cm}^2$  程度の偏った気泡を  $4\text{cm}^2$  までブローできることを確認した。

#### ⑤ 充填 2回目完了

充填作業及び3回の補充充填を5日間（2005年10/20～24）にわたって行い、内蓋パッキンに沈み込みがないことを目視及びハンマー検査により確認した。充填開始から補充充填完了及び気泡除去までの作業時間は、合計で6時間30分であった。

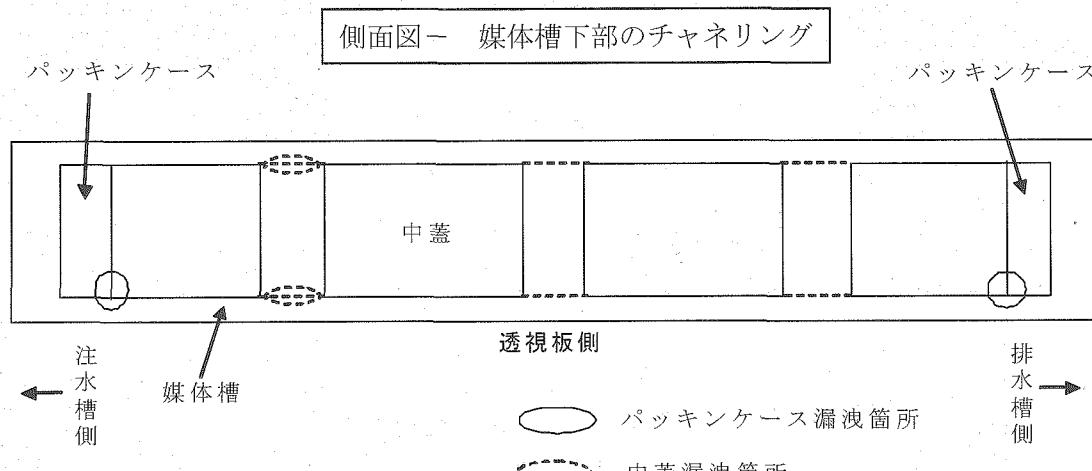
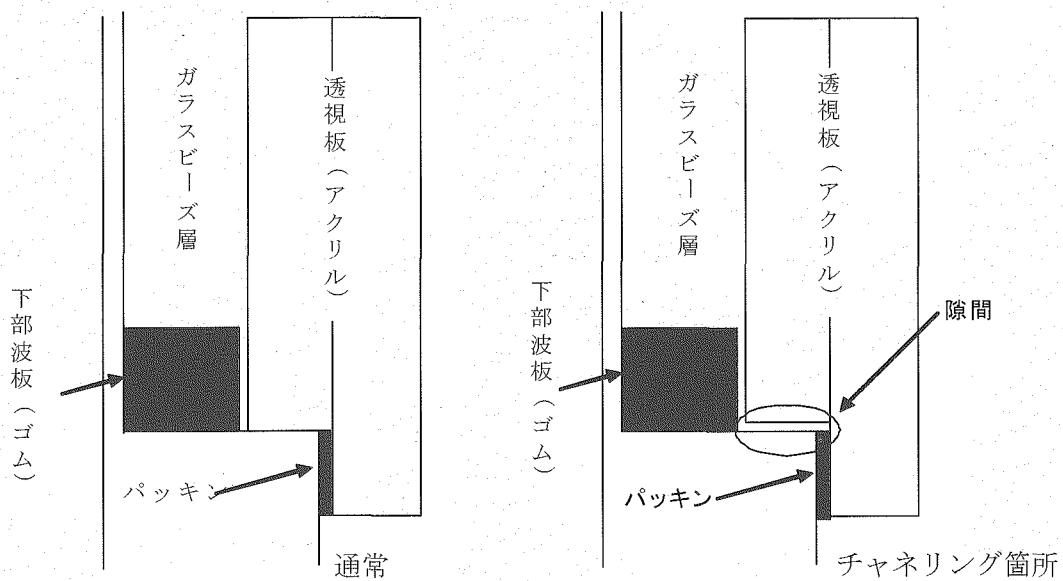
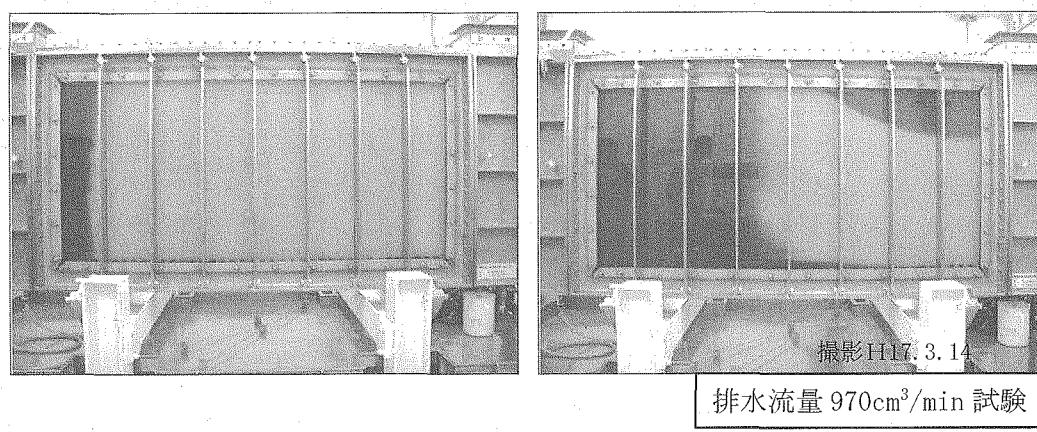


Fig. 14 MACRO 装置におけるトレーサー通水試験の例

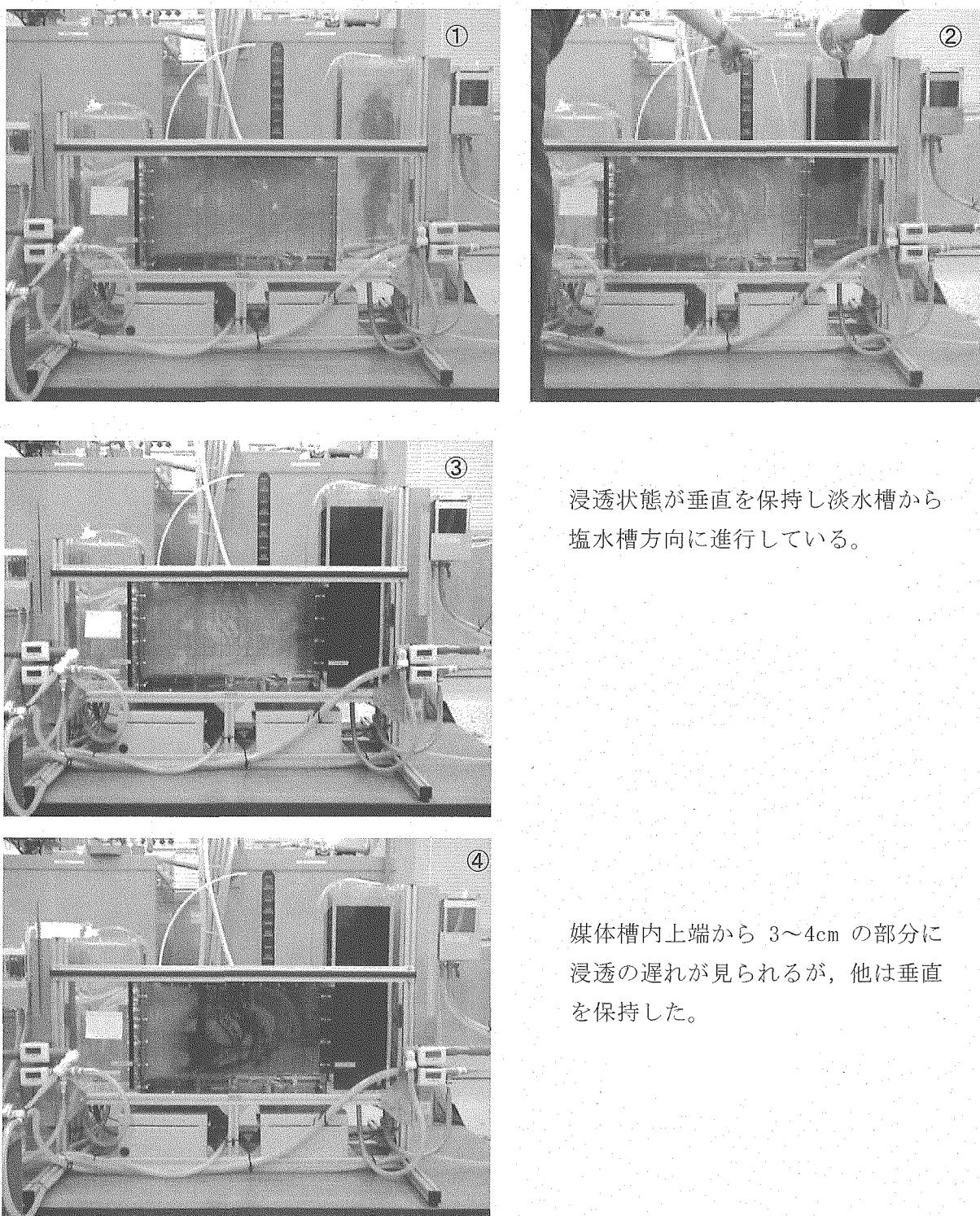


Fig. 15 トレーサー通水試験

浸透状態が垂直を保持し淡水槽から  
塩水槽方向に進行している。

媒体槽内上端から 3~4cm の部分に  
浸透の遅れが見られるが、他は垂直  
を保持した。

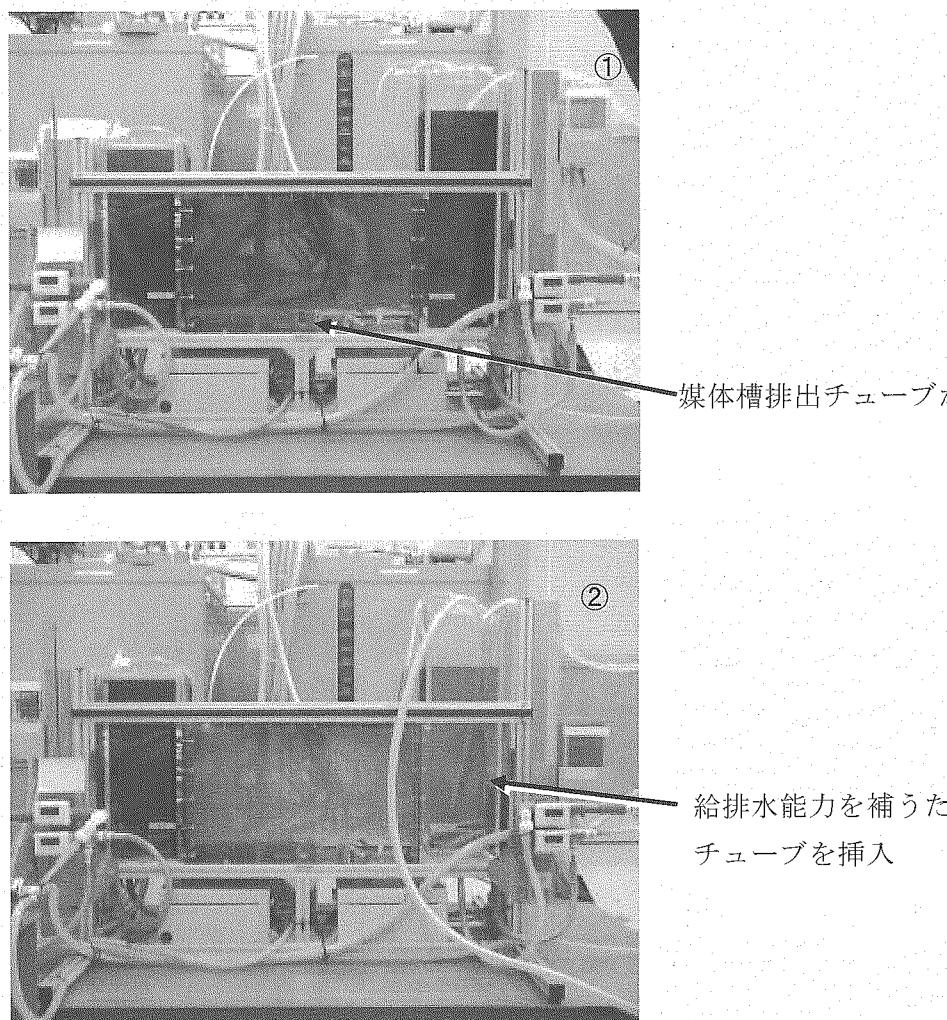
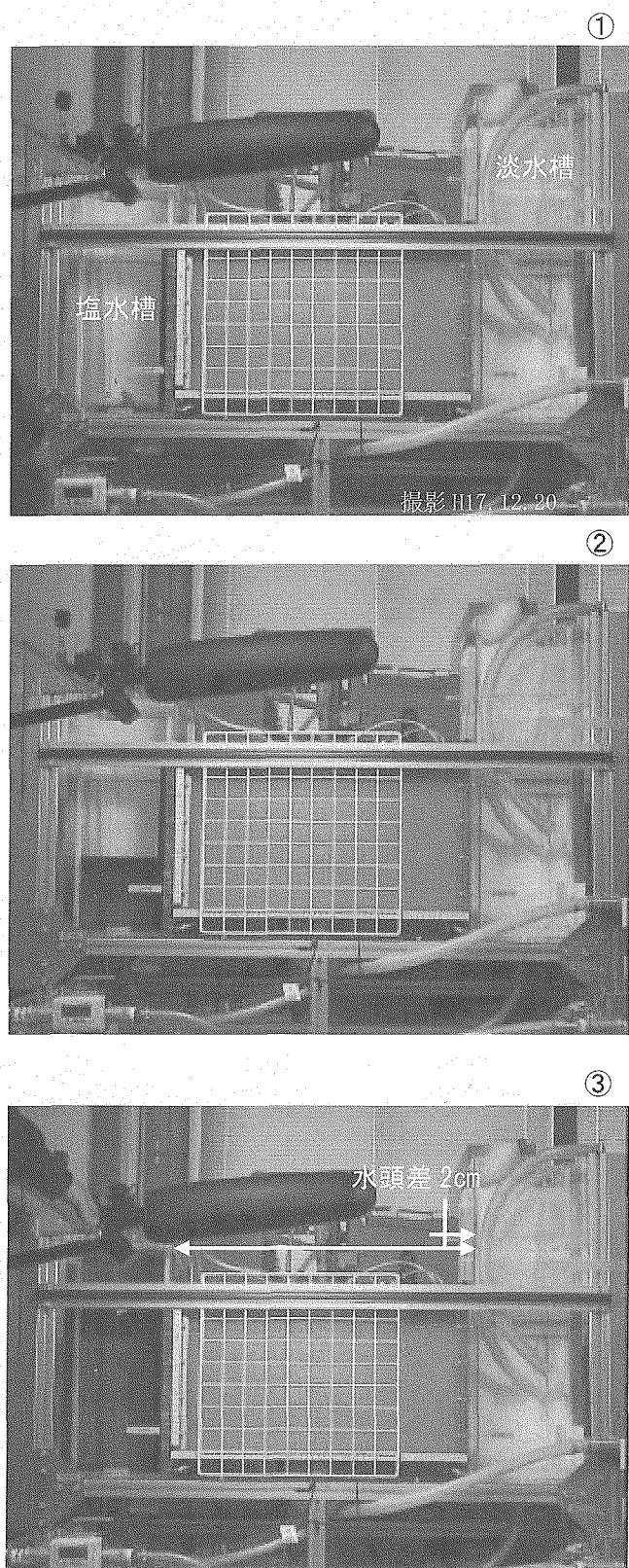
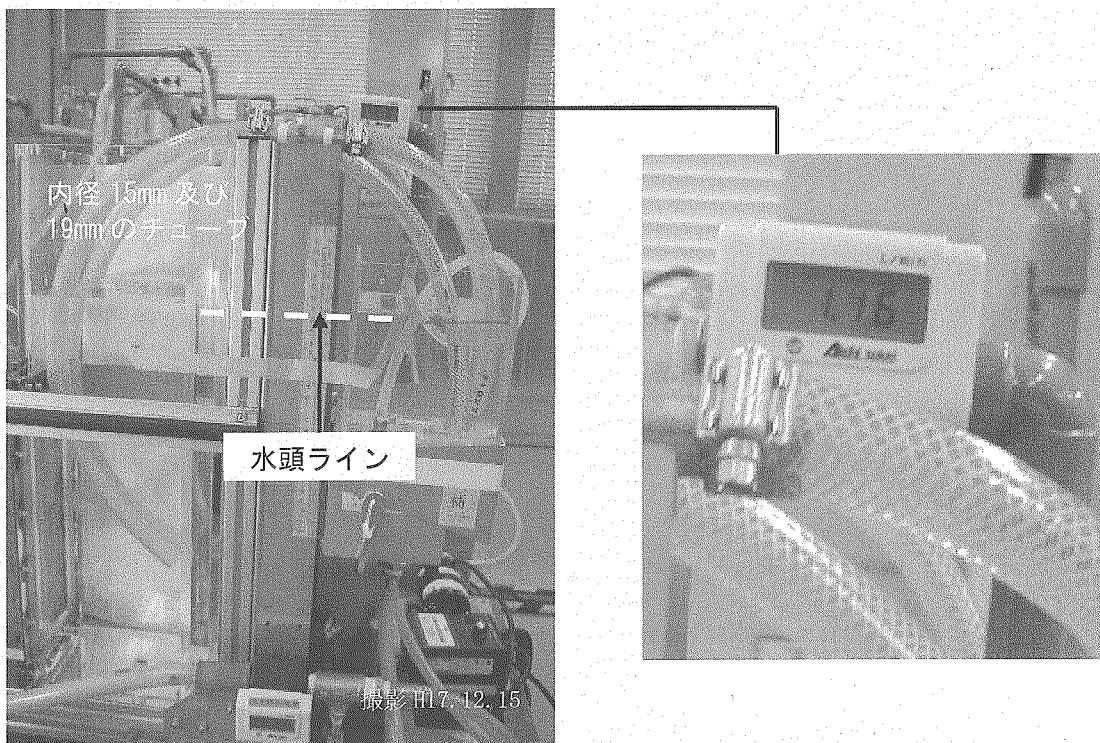


Fig. 16 トレーサー通水試験後の着色水の淡水置換



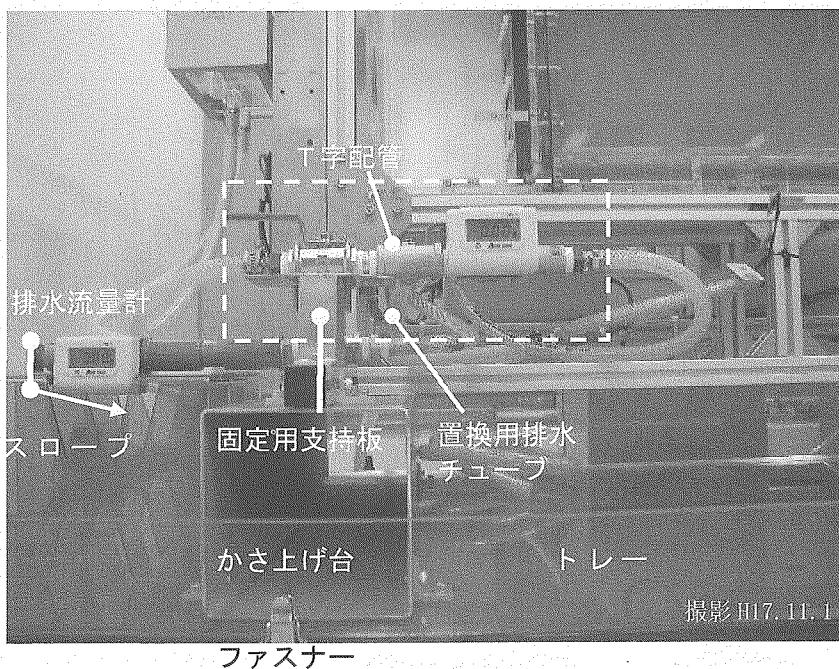
①は塩水槽の淡水を抜いた状態  
 ②は塩水の注入  
 ③は塩水注入完了、排水開始から注入  
 完了までの時間は約 12 分

Fig. 17 塩水浸入防止シャッターの止水機能確認



サイホン口径変更による淡水槽可動堰の水頭の変化への追従性確保

Fig. 18(a) 小型 MACRO の機能改善



操作性・機能性向上のためのトレー等の製作

Fig. 18(b) 小型 MACRO の機能改善

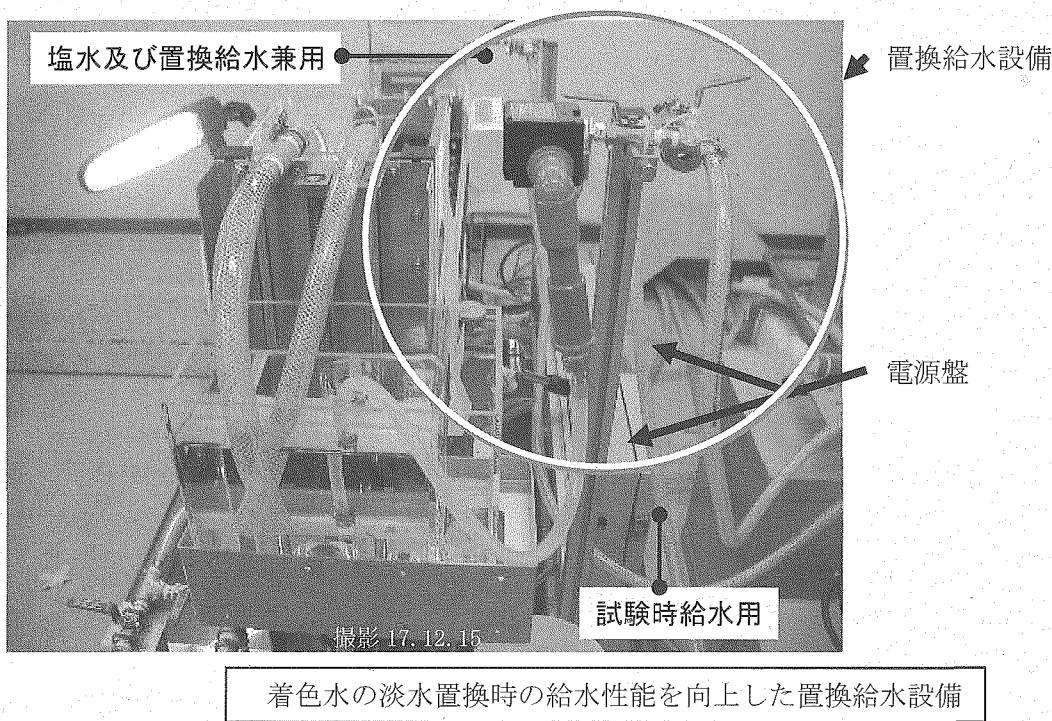
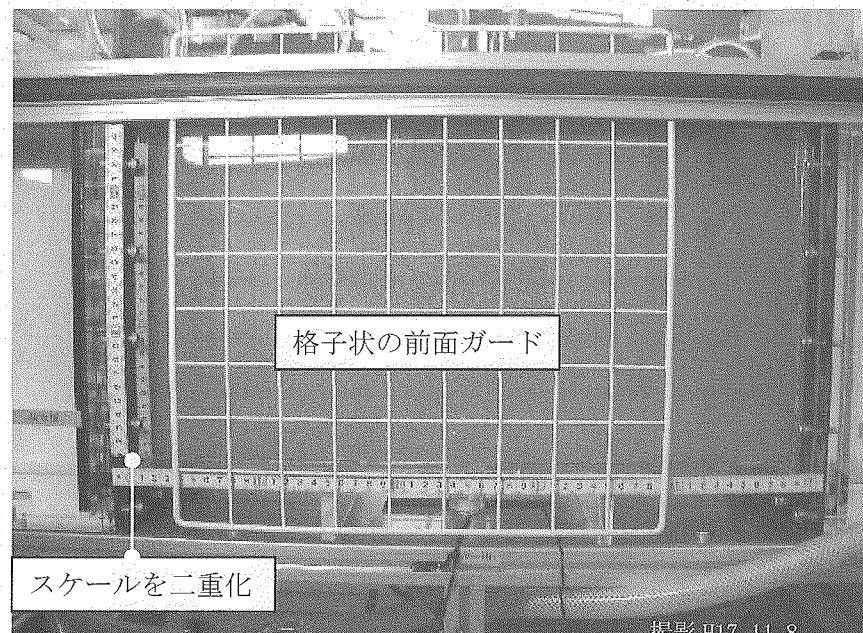


Fig. 18(c) 小型 MACRO の機能改善



媒体槽前面での着色塩水進展過程の観察環境の整備

Fig. 18(d) 小型 MACRO の機能改善

# 国際単位系 (SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
数	メートル毎秒	m <sup>-1</sup>
密度(質量密度)	キログラム毎立法メートル	kg/m <sup>3</sup>
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 <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率	(数の)	1

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	p
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	y

表 3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(a)</sup>	rad	m · m <sup>-1</sup> = <sup>(b)</sup>
立体角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	m <sup>2</sup> · m <sup>-2</sup> = <sup>(b)</sup>
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
圧力	ニュートン	N	m · kg · s <sup>-2</sup>
応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー	仕事、熱量	J	N · m
工作效率	放射束	ワット	J/s
電荷	電気量	C	s · A
電位差(電圧)	起電力	V	m <sup>2</sup> · kg · s <sup>-3</sup> · A <sup>-1</sup>
静電容量	容量	F	m <sup>2</sup> · kg <sup>-1</sup> · s <sup>4</sup> · A <sup>2</sup>
電気抵抗	抵抗	Ω	m <sup>2</sup> · kg · s <sup>-3</sup> · A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ストン	S	A/V
磁束密度	束ウエーバー	Wb	m <sup>2</sup> · kg · s <sup>-2</sup> · A <sup>-1</sup>
インダクタンス	インダクタ	T	Wb/m <sup>2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度	℃	kg · s <sup>-2</sup> · A <sup>-1</sup>
光度	東ルメン	lm	ed · sr <sup>(c)</sup>
(放射性核種)の放射能	ベクレル	Bq	m <sup>2</sup> · m <sup>-2</sup> · cd=cd
吸収線量、質量エネルギー一分与、カーマ	レイ	Gy	m <sup>2</sup> · s <sup>-2</sup>
線量当量、周辺線量当量	シーベルト	Sv	J/kg
方向性線量当量、個人線量当量	シーベルト	Sv	m <sup>2</sup> · s <sup>-2</sup>

表 6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	L	1L=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1t=10 <sup>3</sup> kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2) ln10 (Np)

表 7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49) × 10 <sup>-19</sup> J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10) × 10 <sup>-27</sup> 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	里	1 海里=1852m
ノット	ト	1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
バル	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 b=100fm <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>

表 9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイナ	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ボアズ	P	1 P=1 dyn · s/cm <sup>2</sup> =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
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 <sup>-8</sup> Wb
スチルブ	sb	1 sb=1cd/cm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> cd/m <sup>2</sup>
ホタル	ph	1 ph=10 <sup>1</sup> lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm/s <sup>2</sup> =10 <sup>-2</sup> m/s <sup>2</sup>

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
キュリ	Ci	1 Ci=3.7 × 10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58 × 10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
X線単位	IX unit	1 IX unit=1.002 × 10 <sup>-4</sup> nm
ガンマ	γ	1 γ=nT=10 <sup>-9</sup> T
ジヤンスキ	Jy	1 Jy=10 <sup>-26</sup> W · m <sup>-2</sup> · Hz <sup>-1</sup>
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット	Torr	1 Torr=200 mg = 2 × 10 <sup>-4</sup> kg
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カリ	cal	1 cal=1J=10 <sup>-4</sup> W · s
ミクロ	μ	1 μ=1pm=10 <sup>-6</sup> m