「海―自然と文化」東海大学紀要海洋学部　第３巻第１号　69-77頁（2005）
Journal of The School of Marine Science and Technology, Vol.3 No.1 pp. 69-77, 2005

自動水質浄化装置の開発

井上智裕*1・福江正治*2・上原弘次*3・大木和夫*3・山﨑正一*4・岡　将都*5

Development of Automatic Filtration System

Tomohiro INOUE, Masaharu FUKUE, Koji UEHARA, Kazuo OKI,
Shoichi YAMASAKI and Masato OKA

Abstract

To remove suspended solids (SS) in lakes, ponds and estuaries, an automatic filtration system was developed. The system consists of a main body with a floater, three pumps, two float sensors, solar panels and batteries. The silica sand is used for the filter materials. The thickness of filter materials is 7cm, at this time, the sectional area is 0.13m^2. Two solar panels were used for the power source. The clogging in this system can be prevented by a reverse water flow by an automatic control with the float sensors. The system was examined in Shimizu Utozaka pond. The results showed that the filtration removed about 30% of total SS.

１．はじめに

湖沼や内湾などの閉鎖性水域は，地形的条件により豊かな生態系が営まれ，憩いの場や漁場として人々に利用されている．一方で，その地形的条件により流入水の交換が悪く，自然的・人為的要因により河川や陸域から流入する汚濁物質は，水域内に溜まりやすい．本来，浄化機能を有する砂浜や干潟などの浄化作用により，閉鎖性水域の水質は一定に保たれてきた．しかし，砂浜や干潟などの減少や（木村，1995），過度の人為的負荷により閉鎖性水域の水質は悪化し，それにより様々な問題を引き起こしている（須藤ほか，1994; 中西，1996; 徐ほか，1997）．主な汚濁物質として，河川や陸域から流入する懸濁粒子があげられる．自然的・人為的要因により懸濁粒子が水域内へ流入すると，透明度の低下を引き起こし，光合成を行う海草や海藻を枯死させる．懸濁粒子は，有機や無機粒子であるため，その表面特性により様々な化学物質を吸着する（Xhoffer *et al*., 1992: Buffle and Leppard, 1995）．人為的影響により河川や水域へ汚染物質が排出されると，懸濁粒子はそれを吸着し，汚染懸濁粒子となる（Vaithiyanathan *et al*., 1993; Contado *et al*., 2003）．また，自然的・人為的要因により河川や陸域から排出された懸濁粒子は海底へ沈降堆積し，海底土を形成する．そのため，汚染懸濁粒子が排出されると，最終的に，汚染海底土が形成される．このように，海底土の汚染は，流入および沈降堆積過程における懸濁粒子の吸着物質の種類や量に影響する．

汚染海底土が形成されると，懸濁性濾過生物に代表されるような底生生物への汚染が危惧される．また，生態濃縮を通じて汚染は拡大し，最終的には人間の健康に害を及ぼす．このように，懸濁粒子は水質や底質のみならず有用な水産物や人間の健康にまで害を及ぼすため，閉鎖性水域の環境修復を図るには，懸濁粒子の除去が必要となる．懸濁粒子の人為的除去方法の一つに，濾過があげられる．濾過は，浄水場や湖沼の富栄養化防止など広く用いられており，その効果は高いことが知られている（石崎，1999）．

そこで本研究では，閉鎖性水域の環境修復を目的として，人為的に懸濁粒子を除去できる装置を検討した．本研

2005年５月16日受理
＊1　東海大学大学院海洋学研究科海洋工学専攻（Graduate School of Marine Science and Technology, Tokai University）
＊2　東海大学海洋学部海洋土木工学科（Department of Marine Civil Engineering, Tokai University）
＊3　国土総合建設(株)（Japan Industrial Land Development Co., LTD.）
＊4　青木マリーン(株)（Aoki Marine Co., LTD.）
＊5　岡鉄工所（Oka Ironworks Co.）

究では，Fig. 1 に示すような浮体式上向流自動濾過装置を提案する．

本論文では，浮体式上向流自動濾過装置を開発するために行った基礎実験や，開発した浄化装置およびその浄化効果について報告する．

2．小型モデル装置による濾過実験

2.1　実験概要

本研究で提案した浮体式上向流自動濾過装置の浄化能力について検討するため，小型モデル装置を用いて連続濾過実験を行い，上向流濾過装置の浄化能力について調べた．Fig. 2 に小型モデル装置を示す．小型モデル装置は，貯水タンク，ポンプ，攪拌機および濾過槽からなる上向流単層濾過装置であり，濾過槽上部からポンプで排水することによって，濁水を濾過槽下部から濾過層を通過させて浄化させる．本実験では，濾過槽として直径 9.5cm，高さ 80cm のアクリルパイプを用いた．また，濾過槽の底にポリ容器を取り付け，側面に直径約 5.0cm の穴を 5 個空け，そこを流入口とした．連続的に濾過を行うと，濾過された懸濁物質が濾材表面に付着し目詰まりが生じる．これは，濾過槽の機能を低下させる原因となる．本実験では，濾材の目詰まりは逆洗浄により解消する方式を採る．なお，逆洗浄は人為的に行う．

Table 1 に，実験条件について示す．本実験の試水は，有機汚濁水として巴川の河川水に市販の肥料を入れ，天日

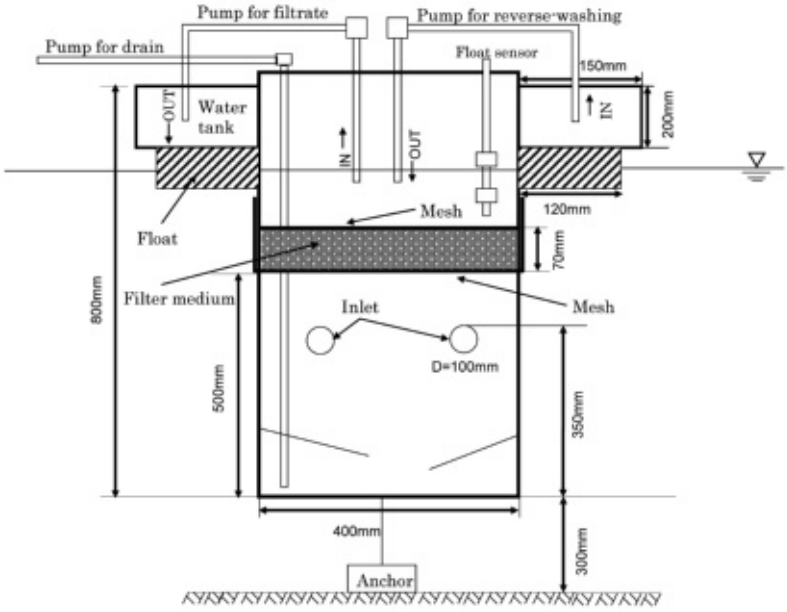

Fig. 1　Schematic of Automatic filtration system developed in this study.

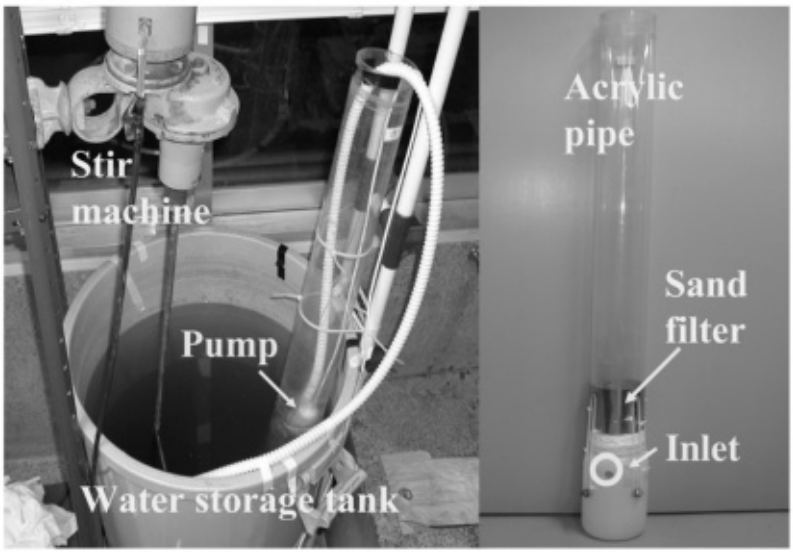

Fig. 2　Compact model device.

Table 1. Experimental conditions in compact model system.

Fiter materials	Thickness (cm)	Weight (kg)	Particle density (g/cm³)	Initial void ratio	Initial coefficient of permeability (m/s)	Sample water	Volume of sample water (L)	Initial SS (mg/L)
Silica sand	5.0	0.4	2.65	0.3	1.2×10^{-4}	River water (Tomoe River)	65	90

に約1ヶ月間放置し，大量のアオコを発生させたものを用いた．この懸濁水65Lを貯水タンクに移し，攪拌機により常に攪拌を行いながら濾過を行った．また，濾材は市販の6号硅砂を用い，濾材の厚さは5.0cmとした．

本実験では，濾過槽を通過してポンプで汲み上げた水を濾過後とし，それと貯水タンク内の水を適宜採水し，水質の変化を調べた．本濾過槽の浄化能力は，透水係数，浮遊懸濁物質（SS）から評価を行った．

2.2 実験結果

Fig. 3に濾過槽の透水係数の経時変化を示す．実験開始直後の透水係数は1.7×10^{-3} m/sであり，時間の経過に伴い透水係数は減少し，20時間後のそれは5.3×10^{-4} m/sである．これは，連続濾過により濾材の目詰まりが発生し，濾過槽の透水係数が減少したと考えられる．そのため，濾過開始から20時間後に一度濾過を停止し，先に述べた逆洗浄により目詰まり解消を図った．逆洗浄は，濾過槽の上部から直接水道水を流して行った．逆洗浄後，再び連続濾過を開始した．逆洗浄前，後の濾材の透水係数は，それぞれ5.3×10^{-3}，1.4×10^{-3} m/sである．このように，逆洗浄を行うことで濾材の透水係数は，ほぼ初期状態にまで回復することがわかる．その後も，適宜逆洗浄を行うことで，濾材の透水係数は回復することがわかる．これらのことから，逆洗方式は目詰まり対処に有効であるといえる．今回は，逆洗浄のみで濾材の回復を図ることができたが，逆洗浄の効果がみられないときは，濾材の入れ替えを行う．

飽和状態にある土の中を層流状態で浸透する水の見かけの流速は，Darcyの法則より次式で表される（今井，1995）．

$$v=ki \tag{1}$$

ここに，v：見かけの流速（cm/s），k：透水係数（cm/s），i：動水勾配である．(1) 式は，本装置の単位時間単位面積当たりの処理能力とできる．そこで本研究では，(1) 式を用いて懸濁物回収装置の処理能力を，次のように定義する．

$$P_c=ki \tag{2}$$

ここに，P_c：濾材の単位面積当たりの浄化装置の処理能力（m/day），k：濾材の透水係数（m/day），i：動水勾

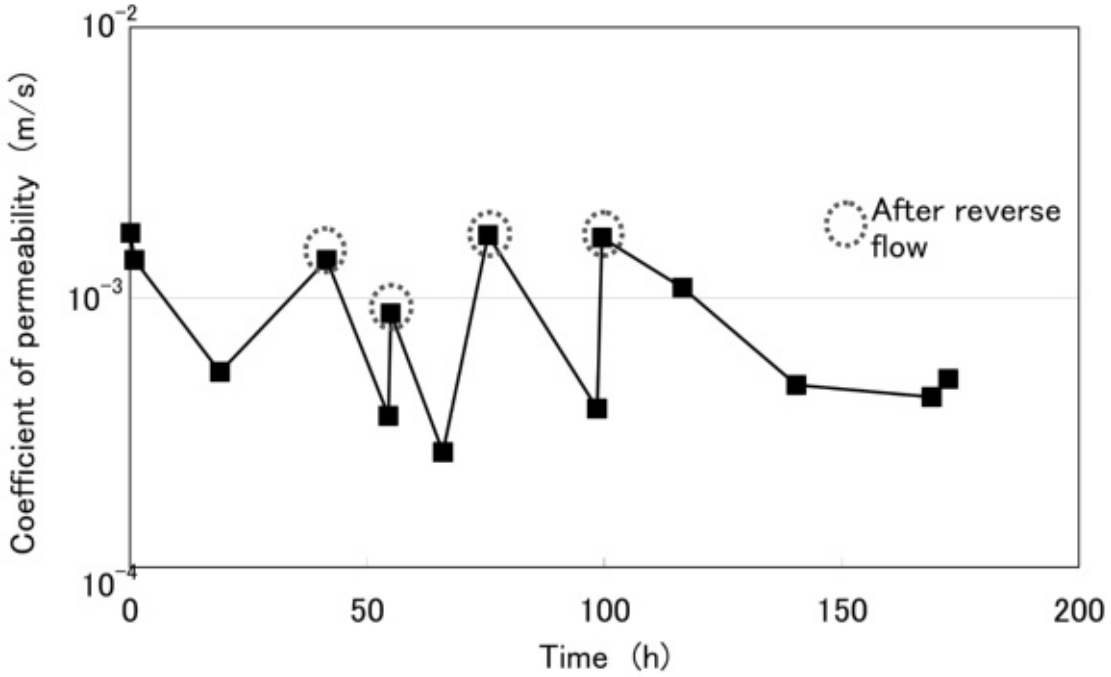

Fig. 3 Change in permeability of filter materials.

配である．なお，(2) 式から本装置の P_c は，約 200m/day であった．

Fig. 4 に濾過後の SS の経時変化を示す．実験前の SS が 90mg/L であるのに対し，20時間後の濾過後のそれは 68.6mg/L である．このことから，本装置において，ほぼ１日の連続濾過により SS を約 24% 除去したことになる．その後，SS は多少の変動が見られるものの，時間の経過に伴い減少することがわかる．逆洗浄後の SS 濃度は，逆洗浄前のそれと比べ多少高い値を示している．しかし，その後の SS は再び除去されている．本装置は，10日間の連続濾過により，約 60% の SS 除去効果を得た．また，初期 SS が 200mg/L の赤土懸濁水を用いて，本装置による連続濾過実験を行った結果，実験開始から 3 日目の SS は，ほぼ 1mg/L であった（井上，2004）．

これらのことから，上向流濾過による SS 除去効果は高く，さらに，砂は濾材として有用であることがわかる．

3．自動水質浄化装置

3.1　装置の概要

本研究では，先に述べた基礎実験結果をふまえ，SS の除去を目的とした除去装置を開発した．本研究で開発した除去装置は，Fig. 5 に示すような濾過層，フロート，貯水槽からなる浮体式上向流自動濾過装置である．濾過槽は直径 40cm，高さ 80cm のアクリルパイプを用い，そこに外形 60cm，内径 40cm，高さ 15cm のフロートを被せた．本装置の底部にアンカーを取り付け，装置の安定を図った．濾過槽下部には，直径 10cm の穴を 3 個空けそこを流入口とした．流入口から濾過層を通過し濾過された汚濁水は，濾過水吸水用ポンプにより装置上部の貯水槽へ汲み上げられる．貯水槽へ汲み上げられた濾過水は，貯水槽からオーバーフローし，自由落下により再び池に戻される．

連続濾過による濾材の目詰まりは，先に述べた基礎実験と同様に，逆洗浄により解消を図る．逆洗浄は，貯水槽内の濾過水を用いて逆洗浄用ポンプにより行われる．逆洗浄により除去された濾過物質は，濾過槽底部に取り付けてある濾過物質排水ポンプから装置の外へ排水・回収される．なお，濾過や逆洗浄および濾過物質の回収は，本装置に取り付けてある水位センサーにより自動で切り替わる．

3.2　電　力

本装置の電力は，市販のソーラーパネルより供給する．ソーラーパネルは，MSK 社製の大きさ 158cm×80.2 cm×5cm，最大出力 180W，最大出力動作電流 5.05A の太陽電池モジュールを 2 枚用いた．また，本装置を24時間稼動させるために，バッテリーを用いて，電力の安定供給を図る．なお，バッテリーは，YUASA 社製の公称電圧 12V，定格容量 250Ah（200時間率）を 2 台用いた．

3.3　本装置の特徴

本装置の特徴として次のことがあげられる．

① 装置はフロート式であるため，移動が可能である．
② 装置の大部分は水面下にあるため，景観を壊さない．
③ 水質浄化，逆洗浄による目詰まり解消，濾過物質の回収が，全て自動で切り替わるため維持管理が容易である．
④ 本装置の電力は，太陽電池を用いるため，維持費が不要である．

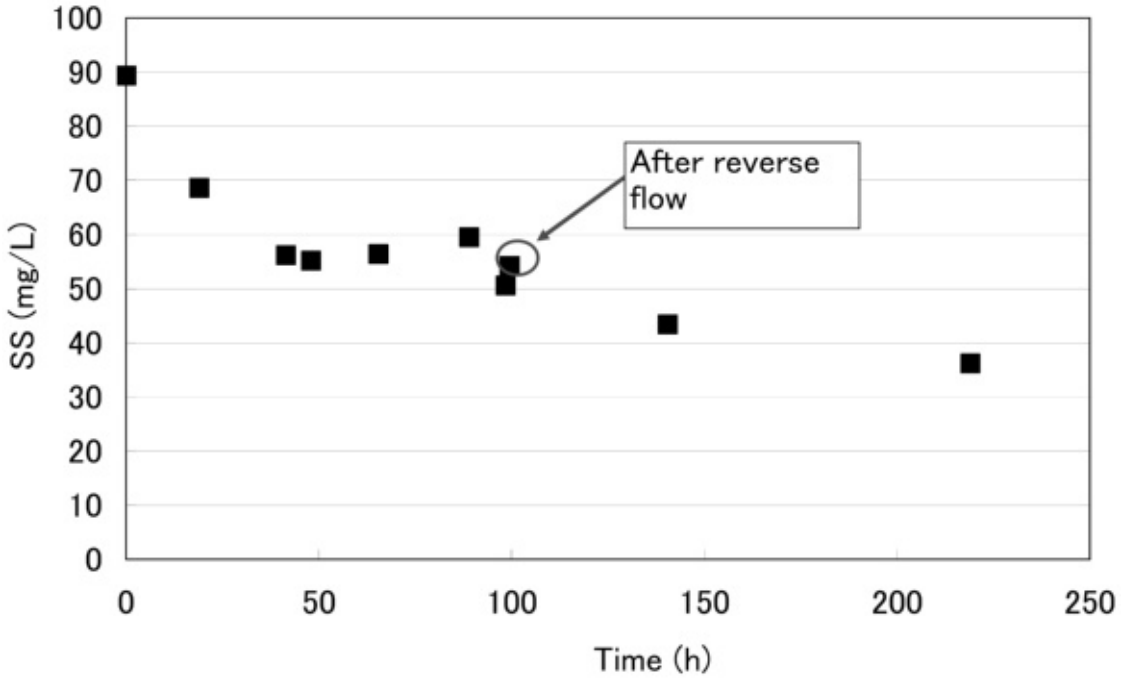

Fig. 4　Change in SS of water samples by filtration.

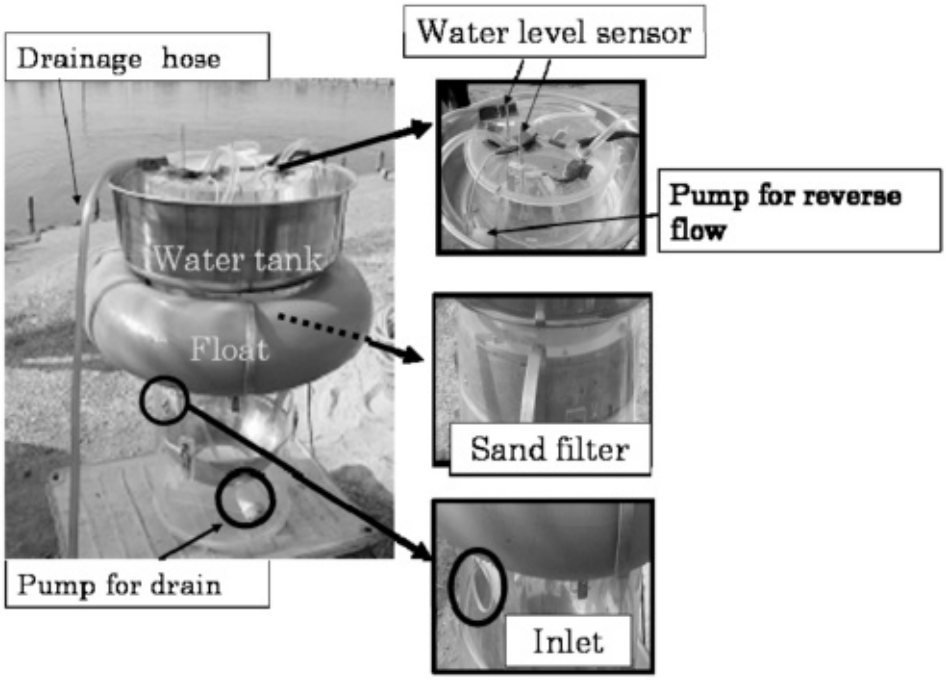

Fig. 5　Developed automatic filtration system.

⑤　対象となる水域の規模に合わせて，装置の規格変更が可能である．

3.4　濾材およびクイックサンド対策

本装置の濾材は，市販の 4 号硅砂を用い，濾材厚さは 7 cm とした．なお，濾材の断面積は 0.13m² である．4 号硅砂は，6 号硅砂と比べ粒径が大きいため，後述するクイックサンドによる噴砂が起こりにくい．そのため，本実験では，4 号硅砂を濾材として用いた．Fig. 6 に濾材の物理特性を示す．

先に述べたように，本装置のような上向流濾過方式の場合は，Fig. 7 に示すように濾材に上向きの透水力を与えるため，濾材がクイックサンド状態になることが危惧される．Fig. 7 において，単位体積当たりの透水力は，次式で表される（今井，1995）．

$$j = i\gamma_w \tag{4}$$

ここで，j：単位体積透水力，i：動水勾配，γ_w：水の単位体積重量．また，濾材の水中単位重量は，次式で表される．

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \tag{5}$$

ここで，γ'：水中単位重量，γ_{sat}：飽和単位重量，γ_w：水の単位体積重量．クイックサンドは，$j > \gamma'$ のときに発生する．クイックサンドは，動水勾配を限界動水勾配以下に設定するか，または，濾材の単位体積重量を増やすことで防ぐことができる．

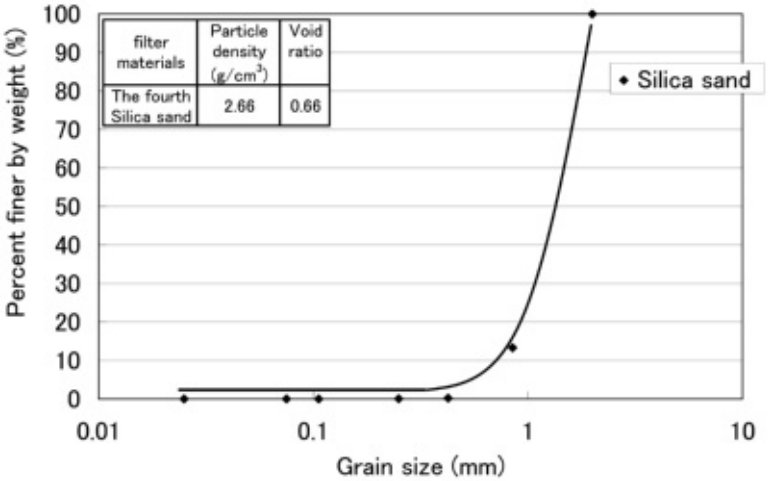

Fig. 6　Physical property of filter materials in developed automatic filtration system.

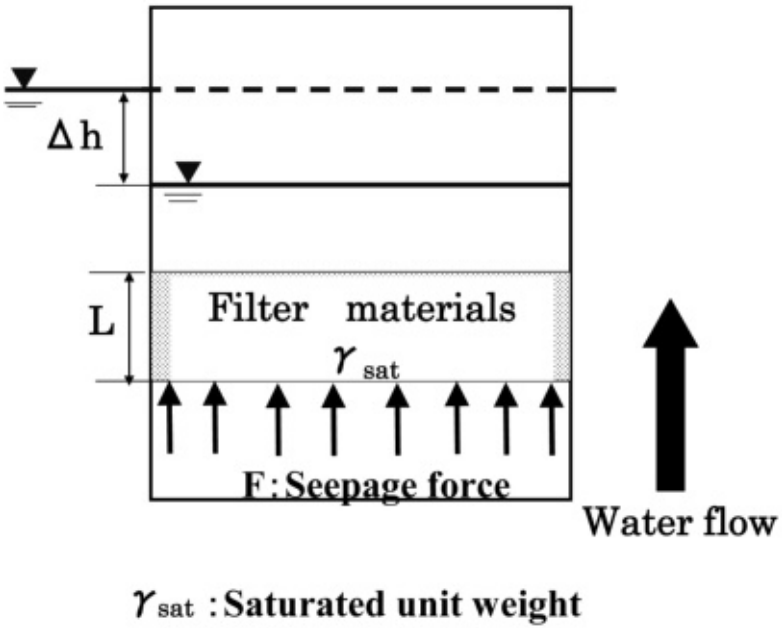

Fig. 7　Schematic of seepage force.

4．自動水質浄化装置による浄化実験

4.1　清水有東坂池の概要および状況

本研究で開発した自動水質浄化装置を用いて，2005年3月7日から静岡県清水有東坂池において浄化実験を行っている．清水有東坂池は，外周130m，貯留面積1256m²，水深1.2〜2.0mの調整池である．池には水鳥や魚が生息しており，休日には水鳥に餌を与える人や釣り人で賑わい，周辺住民の憩いの場となっている．しかし，Fig. 8に示すように，CODが7.22〜9.56mg/Lと非常に高く，有東坂池は，有機汚濁の激しい池であることがわかる．上述したように，池には水鳥が生息しており，その餌としてパンや菓子が与えられている．そのため，水鳥の餌や糞が有機汚濁の原因と考えられる．また，池の懸濁粒子をEPMAにより観察した結果，珪藻が確認された．この原因として，流入水は主に生活排水であり，リンや窒素などの栄養塩が比較的高いことがあげられる．

このように，本来なら憩いの場である有東坂池は，人為的影響により有機汚濁が激しい，環境上好ましくない状態となっている．

4.2　浄化装置の設置地点および採水地点

Fig. 9に，本装置の設置地点および採水地点を示す．

st.No	SS (mg/L)	COD (mg/L)	T-P (mg/L)	P (mg/L)	T-N (mg/L)
st.1	15.6	9.56	0.17	0.01	2.1
st.2	1.9	2.83	0.18	0.14	4.2
st.3	13.6	7.22	0.15	0.04	2.4

Fig. 8　Appearance and water quality situation of Shimizu Utozaka pond.

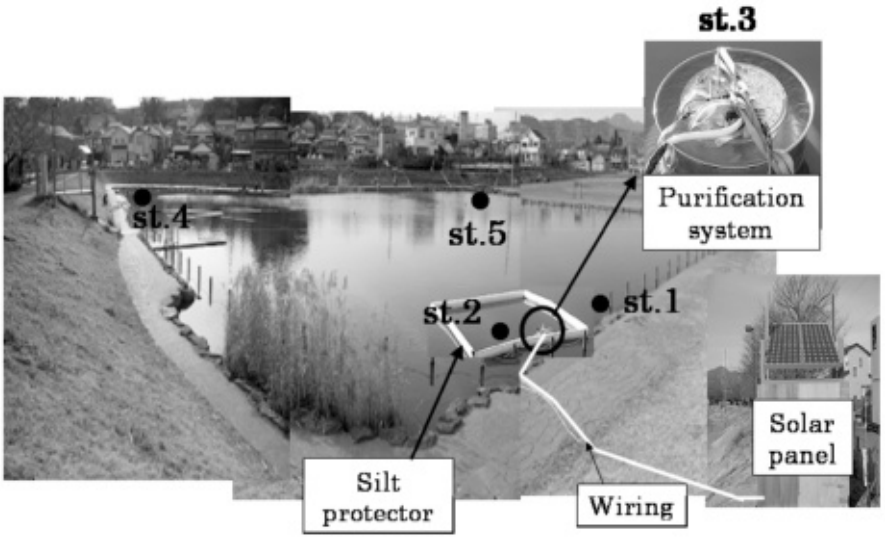

Fig. 9 Purification experiment situation and sampling site in Shimizu Utozaka pond.

Fig. 9 に示すように，本装置での浄化効果の比較を行うために，浄化装置を 5m×5m×2m のシルトプロテクターで囲った．また，本装置の電力源であるソーラーパネルやバッテリーは，陸上にパネル設置架台を設け，そこに取り付けた．本実験の採水地点は，濾過前（st. 1），濾過後（st. 2），プロテクターの外（st. 3），池の奥（st. 4），流入水（st. 5）の計 5 地点とした．濾過前および後は，それぞれプロテクター内，本装置により濾過されたものとした．濾過後の採水には，あらかじめ測定した濾過層の透水係数から，濾過槽内の試水の浸透時間を考慮した．

4. 3　測定項目

本装置は，透水係数，浮遊懸濁物質量（SS），化学的酸素要求量（COD）から評価を行う．透水係数は，定水位透水試験により（地盤工学会編，2000）測定を行った．また，SS は重量法により，COD は酸性過マンガン酸カリウム法によりそれぞれ測定を行った（気象庁編，1990）．

4. 4　浄化効果

Fig. 10 に，例として 3 月 7 日の st. 1 ～ 3 における SS および COD の浄化効果について示す．Fig. 10 に示すように，プロテクターの中と外の SS は，約 40mg/L である．これに対して，濾過後の SS は，31.1mg/L であり，約 30% の SS が除去されたことになる．また，COD については，余り効果がみられなかった．しかし，実験開始直後の結果であるため，今後，長期的に濾過を行うことで，改善されると思われる．また，透水係数は約 1.0×10^{-3} m/s であった．これから，P_c を求めると，P_c は 60.5m/day

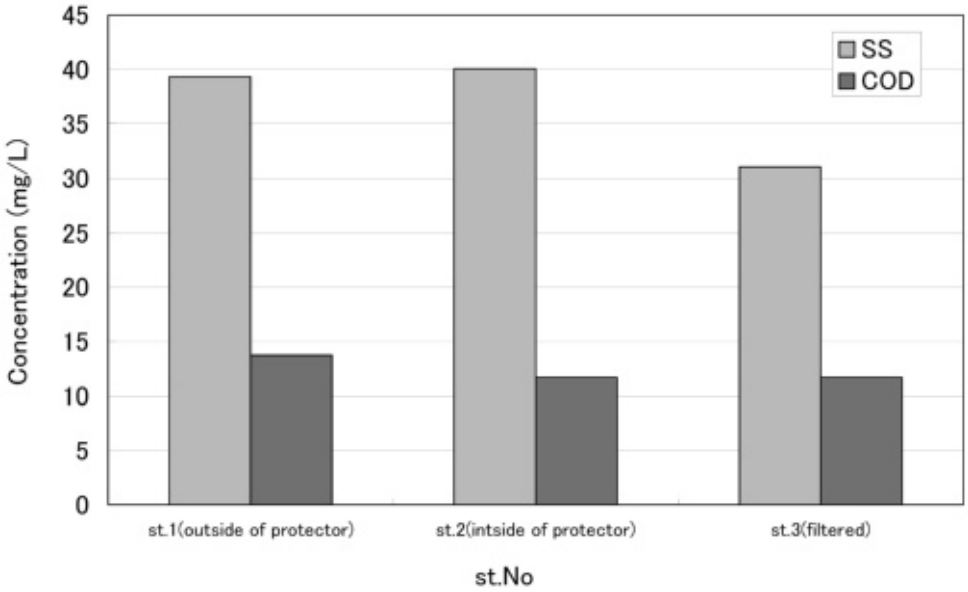

Fig. 10 Purification effect of SS and COD.

であった．

5．まとめ

本研究では，閉鎖性水域の環境修復を図ることを目的として，懸濁粒子を人為的に除去可能である自動水質浄化装置の開発を行い，装置の浄化能力について検討した．その結果，次のことがわかった．上向流濾過によるSS除去能力は非常に高く，濾材として砂は有用であることがわかった．また，(2) 式を用いることで，装置の処理能力を定量的に評価することができる．本研究で開発した浮体式上向流自動濾過装置により，実験開始から1日で約30%のSSが除去された．

今後は，引き続き有東坂池における浄化実験を行い，浄化効果を継続的に検討する必要がある．

謝　辞

本装置の製作において，和田金属　森川米吉氏にご協力頂きました．清水有東坂池において実験を行うに当たり，静岡市都市計画部都市計画事務所　足立高志氏にご協力頂きました．実験の際には，本学土木工学科4年生　武井文一氏，磯島守寿氏の両氏をはじめ，福江研究室のみなさまにご協力を頂きました．ここに記して，以上の方々に深謝いたします．

参考文献

Buffle, J. and Leppard, GG. (1995): Characterization of aquatic colloid and macromolecule: 1. Structure and behavior of colloid material. Environ. Sci. Technol., **29**, 2169-2175.

Contado, C.・G,Blo.・C. Conato.・F. Dondi・R, Beckett. (2003): Experiment approaches for siec-based metal speciation in rivers. J. Environ. Monit., **5**, 845-851.

地盤工学会 編 (2000): 土質試験の方法と解説-第一回改訂版-，902pp.

木村賢史 (1995): 海洋環境の保全に果たす干潟や砂浜の役割．水情報，**15**(8)，3-5.

中西　弘 (1996): 閉鎖性海域における水質汚濁メカニズム．環境管理，**32**(10)，48-55.

須藤隆一・西村　修・徐　開欽・山田一裕・千葉信男・熊谷幸博 (1994): 汚濁海水の自然浄化に関する研究．建設工学研振興会年報，**29**，107-114.

今井五郎 (1995): わかりやすい土の力学．鹿島出版，268 pp.

井上智裕・福江正治・上原弘次・大木和夫・山﨑正一 (2004): サンゴ礁域における巻上げ赤土の回収装置．第3回海環境と生物および沿岸環境修復技術に関するシンポジウム発表論文集，海環境シンポジウム実行委員会，59-64.

石崎勝義 (1999): 土壌を活用した浄化技術の浸透能について．環境技術，**28**(11)，29-31.

徐　開欽・坂口芳輝・西村　修・田中裕作・細見正明・須藤隆一 (1997): 人工海浜による閉鎖性内湾の水質浄化．環境工学研究論文集，**34**，249-258.

気象庁 (1990): 海洋観測指針．財団法人日本気象協会，428 pp.

Vaithiyanathan, P.・Al. Ramanathan・V. Subramanian (1993): Transport and Distribution of Heavy Metals in Cauvery River. Water, Air, and Soil Pollution, **71**, 13-28.

Xhoffer, C.・Wouters, L・Van Griken, R (1992): Characterization of Individual Particles in the North Sea Surface Microlayer and Underlying Seawater: Comparison with Atmospheric Particles. Environ. Sci. Technol., **26**, 2151-2126.

要　旨

自動水質浄化装置の開発

井上智裕・福江正治・上原弘次・大木和夫・山崎正一・岡　将都

自然的・人為的要因により河川や陸域から排出される懸濁粒子は，様々な化学物質を吸着して存在している．懸濁粒子が，閉鎖性水域へ流入すると．透明度の低下や富栄養化など水質悪化の原因となる．また，それらが沈降堆積すると海底土を形成する．このように，懸濁粒子は，水質のみならず底質にまで悪影響を及ぼす．そのため，閉鎖性水域の環境修復を図るには，懸濁粒子の除去が重要となる．

そこで本研究では，懸濁粒子を人為的に除去・回収する装置について検討した．本研究で開発した装置は，浮体式上向流自動濾過方式で，濾過槽上部からポンプで排水することによって，濁水を濾過槽下部から濾過槽を通過させて浄化させる．濾材は市販の 4 号硅砂を用い，濾材の厚さは 7 cm とした．なお，濾材の断面積は 0.13m^2 である．濾材の目詰まり解消方法は，逆洗浄方式を採用した．また，本装置の電力は，市販の太陽電池モジュールから供給した．

本装置を用いて，2005年 3 月 7 日から清水有東坂池において連続濾過実験を行い，本装置の浄化能力について調べた．本装置の浄化効果は，SS，化学的酸素要求量（COD）から評価する．その結果，実験開始から 1 日で約 30% の SS が除去された．