

運輸省港湾技術研究所

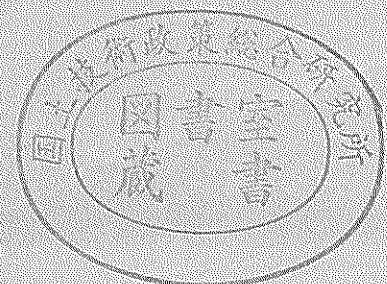
港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

VOL.38 NO.2 June 1999

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第38巻 第2号 (Vol.38, No.2), 1999年6月 (June 1999)

目次 (CONTENTS)

1. 潮位変動および密度の非一様性を考慮した砂浜海岸地下水の非定常過程に関する数値解析
.....内山雄介..... 3
(Numerical Analysis on Groundwater Flow in Sandy Beaches Considering Tidal Fluctuation and Density Distribution
.....Yusuke UCHIYAMA)
2. 久里浜湾の流れ特性と生態系に関する研究
.....日比野忠史・豊田政史・西守男雄・細川恭史・鶴谷広一..... 29
(Current Field Characteristics and Ecosystem Investigations in Kurihama Bay
...Tadashi HIBINO, Masashi TOYOTA, Dan-o NISHIMORI, Yasushi HOSOKAWA and Hiroichi TSURUYA)
3. 海水交換型防波堤の透過量評価手法の提案
.....西守男雄・日比野忠史・豊田政史・細川恭史・石原弘一・森下正志・鶴谷広一..... 63
(Estimation of Water Mass Exchanged through Water Exchangeable Breakwater
.....Dan-o NISHIMORI, Tadashi HIBINO, Masashi TOYOTA, Yasushi HOSOKAWA,
Hirokazu ISHIHARA, Masashi MORISHITA and Hiroichi TSURUYA)
4. 粘性土のセメンテーションによる強度発現メカニズム
.....土田 孝・湯 怡新..... 99
(Strength Mobilization due to Cementation of Clay
..... Takashi TSUCHIDA and Yi Xin Tang)
5. 港湾空港事業における軽量混合処理土工法の開発と適用事例
.....土田 孝..... 131
(Development and Use of Foamed Treated Soil in Port and Airport Project
..... Takashi TSUCHIDA)
6. 海洋環境 (酒田港20年) に暴露したコンクリート梁の材料劣化が梁の力学性能に及ぼす影響
.....横田 弘・秋山哲治・濱田秀則・三上 晃・福手 勤..... 169
(Effect of Degradation of Concrete on Mechanical Properties of Reinforced Concrete Beams
Exposed to Marine Environment (for 20 years in Sakata)
.....Hiroshi YOKOTA, Tetsuji AKIYAMA, Hidenori HAMADA, Akira MIKAMI and Tsutomu FUKUTE)
7. 鋼直杭式棧橋の地震時保有耐力に関する実験および解析
.....横田 弘・川崎 進・菅原 亮・Hazem El-Bakry・川端規之..... 223
(Ultimate Structural Performance of Steel-Pile Supported Wharves
... Hiroshi YOKOTA, Susumu KAWASAKI, Ryo SUGAWARA, Hazem El-Bakry and Noriyuki KAWABATA)
8. 防波堤ケーソンの自動設置システムの開発 (第二報) - アンカーワイヤ方式の水力模型実験による検討 -
.....米山治男・白石 悟・名里健吾・高橋英俊..... 257
(Development of Automatic Installation System of Breakwater Caisson (2nd Report)
- Evaluation of Anchor Wire System by Hydraulic Model Experiments -
..... Haruo YONEYAMA, Satoru SHIRAIISHI, Kengo NAZATO and Hidetoshi TAKAHASHI)
9. RC港湾構造物の塩害に係わる環境要因の定量的評価に関する研究
.....濱田秀則..... 299
(Quantitative Evaluation of Environmental Factors Related to Chloride Attack of RC Harbor Structures
.....Hidenori HAMADA)

10. 破壊確率を考慮した防波堤のライフサイクルコストと許容破壊確率
.....長尾 毅・松渕 知..... 395
(Studies on Life-Cycle Cost and Allowable Failure Probability of Breakwaters
..... Takashi NAGAO and Satoru MATSUBUCHI)
11. 係留施設のライフサイクルコスト発生と維持管理意志決定支援システムの構築に関する基礎的研究
.....松渕 知・横田 弘..... 423
(Life-Cycle Cost Analysis of Berthing Facilities and Development of A Decision Support System
during their Maintenance Work
..... Satoru MATSUBUCHI and Hiroshi YOKOTA)
12. 大規模地震時におけるコンテナクレーンの脚の浮き上がりに関する模型実験
.....江頭隆喜・山本俊介・田邊俊郎・中島 晋・菅野高弘・宮田正史・柏崎昭宏・金山維史..... 475
(Experiment on Uplifting of Legs of Container Cranes under Strong Earthquakes
..... Takaki ETOU, Shunsuke YAMAMOTO, Toshiro TANABE, Susumu NAKASHIMA・
Takahiro SUGANO, Masafumi MIYATA, Akihiro KASHIWAZAKI and Tadafumi KANAYAMA)

海水交換型防波堤の透過量評価手法の提案

西守男雄*・日比野忠史**・豊田政史***・細川恭史****
石原弘一*****・森下正志*****・鶴谷広一*****

要 旨

海水交換型防波堤（スリットケーソン）の海水透過量の評価手法を水理模型実験、現地観測、数値計算の結果から提案した。水理模型実験では1/20縮尺模型を用いて、①スリットケーソン内の流れは近似的にポテンシャル流れとして扱われ、港内外の水位差によって透過量が決定されること、②透過係数は主として港内側の形状（開口率）によって決定されること、現地観測では①三田尻中関港の東防波堤に用いられている下部透過型スリットケーソン内の流れの観測から潮差と透過量との相関が高いこと、②潮差と透過量の関係は、防波堤の周辺海域の状況（季節・天候等）によって異なること、二次元浅水長波方程式を用いた（FEM）数値計算では①水理模型実験から得た実験式によって現地スリットケーソン内の透過流速を再現させ透過量を評価できることを見いだした。これらの一連の結果から海水交換型防波堤の海水交換量は、本研究で提案する実験式と数値モデルによって十分評価できることを示した。

キーワード：海水交換，開口率，透過係数，潮差，透過流量，数値モデル

* 海洋環境部環境評価研究室
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1, TEL : 0468-44-5018, FAX : 0468-44-6243, E-mail : nishimori@cc.phri.go.jp

** 海洋環境部主任研究官

*** 海洋環境部環境評価研究室

**** 海洋環境部環境評価研究室長

***** 第四港湾建設局宇部港湾工事事務所長

***** 中央大学大学院理工学部土木工学専攻

***** 海洋環境部長

Estimation of Water Mass Exchanged through Water Exchangeable Breakwater

Dan-o Nishimori*
Tadashi Hibino**
Masashi Toyota***
Yasushi Hosokawa****
Hirokazu Ishihara*****
Masashi Morishita*****
Hiroichi Tsuruya*****

Synopsis

An evaluation method for exchange of water mass through breakwaters with openings is proposed on the basis of the results of hydraulic experiments, field observations and numerical simulations. Hydraulic experiments with 1/20 scale models showed that: (1) flows inside a caisson with openings could be treated as a potential flow; (2) water mass flowing through the breakwater was proportional to the water level difference between entrance and exit, (3) hydraulic conductivity was affected by the opening shape and the ratio of the openings with respect to the total surface area of the wall. From field observations at Mitajiri-Nakanoseki Port, we found that : (1) the exchanged water mass was related to the tidal fluctuation; (2) relationships between exchanged mass and tidal fluctuation vary with seasonal tidal flow patterns. The 2-D tidal flow numerical simulations revealed that the exchanged water mass can be evaluated by applying the hydraulic conductivity parameter obtained by the present hydraulic experiments.

Key words: water exchange rate, opening ratio, hydraulic conductivity, tidal range, exchanging water mass, numerical model

* Member of Environmental Assessment Laboratory, Marine Environment Division
** Senior Research Engineer, Marine Environment Division
*** Member of Environmental Assessment Laboratory, Marine Environment Division
**** Chief of Environmental Assessment Laboratory, Marine Environment Division
***** Ube Port Construction Office, The 4th District Port Construction Bureau, Ministry of Transport
***** Graduate School of Chuo University, Department of Civil Engineering
***** Director of Marine Environment Division
3-1-1, Nagase, Yokosuka 239-0826
TEL : 0468-44-5018, FAX : 0468-44-6423, E-mail : nishimori@cc.phri.go.jp.

目 次

要 旨	63
1. まえがき	67
2. 水理模型実験	67
2.1 実験に用いた海水交換型防波堤の種類	67
2.2 実験装置および実験方法	67
2.3 実験結果と評価手法の検討	69
3. 現地観測	73
3.1 観測概要	73
3.2 観測方法	73
3.3 観測結果と考察	74
4. 数値計算	78
4.1 数値計算概要	78
4.2 計算条件	79
4.3 計算結果と考察	80
5. 結論	81
6. あとがき	82
参考文献	82
記号表	82
付 録	84

1. まえがき

港湾整備においては、本来の目的である航路および泊地での静穏域の確保や津波・高潮などの防災対策に加えて、富栄養化や赤潮対策なども考慮した複合的な対策をとることが重要となってきた。その対策の一つとして、従来の防波堤に透過機能を付加した海水交換型防波堤が設置されている。波浪のエネルギーを利用して一方向へ導水を促す構造について研究開発（例えば山本ら 1987, 塩崎ら 1996, 松島 1996）^{1~3)} されているものが多い。その構造様式は周辺海域の波浪および地理的条件に応じて様々である。

図-1に、代表的な海水交換型防波堤の構造様式と建設されている港を示す。構造様式の名称は形状の特徴で分類した。これまでの建設事例では、スリットケーソンタイプやカーテンウォールタイプが多い。スリットケーソンタイプは湾口部などの外洋と面する海域に、カーテンウォールタイプは漁港などの静穏な海域に建設されることが多い。

実用化された海水交換型防波堤のうち、現地の実証実験でその機能を検討した例がある（例えば、柳瀬ら 1991, 山本ら 1994）^{4, 5)}。柳瀬ら（1991）は防波堤に通水管を設けた構造の水理特性を室内実験および現地観測で比較している。この研究では波や周期の変化による通水管内の流れの特性を議論の対象としており、通水管内の流れの振幅は、同一波高に対して周期が大きいほど大きく、室内実験および現地観測ともに、その傾向が一致したと報告している。

これに対して、比較的静穏な内海・内湾における常時の海水交換の効果について検討を行う場合、潮汐の作用による防波堤の透過（流れ）特性について検討する必要がある。さらに、潮汐と透過特性との関係からケーソン内の透過速度を推定できれば、数値モデルによってケーソンの透過流量を予測することが可能となる。これは、海水交換型防波堤が周辺海域へおよびす海水交換の促進効果の予測、港内水質改善効果の予測という観点から重要である。本研究の目的は、①海水交換型防波堤の水位差に起因した流れに対する透過特性を把握するための水理模型実験を行い、構造様式の違いによる透過特性について検討すること、②実験の結果からケーソン内の透過速度を推定するための実験式を提案すること、③現地において海水交換型防波堤内の流れの測定を行い、潮汐が防波堤の海水交換に及ぼす影響を把握すること、④防波堤および湾内の水質観測を行い、海域の水質状況を把握すること、⑤水理模型実験で得られた実験式を用いて、

数値計算においてケーソン内の透過流速を算出し、現地観測結果と比較してその再現性について検討することの5つである。

2. 水理模型実験

2. 1 実験に用いた海水交換型防波堤の種類

実験における構造様式としては、実際に建設されている海水交換型防波堤のうち、建設実績の多い混成堤形式であること、消波機能を有するスリットケーソンで、導水特性の比較が容易であることを条件に4種類選定した。

それらの構造および港外、港内側の通水部の開口率と初期水位における通水部の開口率が図-2に示されている。模型は現地の形状を縮尺1/20で再現した。各防波堤の名称は、その形状特性から付けられたものである。模型に示されている斜線は通水部を表している。各構造の模型図下に示されている上段の開口率は、ケーソン全体の港外、港内側の面積に対する港外、港内側の通水部面積の割合として定義されている。下段カッコ内は、初期水位の水面下における通水部の開口率であり、ケーソン底面より水面までの港外、港内側の面積に対するケーソン底面より水面までの港外、港内側の通水部面積の割合として定義されている。

各構造の形状特性については次の通りである。T型スリットケーソンは、下部を細くし、隣接する側面の通水部によって導水が行われる。なお、港外側には縦スリットと遊水室をもち、消波機能を有している。多孔型スリットケーソンは、港外、港内側に円形の通水部が独立して設けてあり、個々の通水部から導水が行われる。波の反射率を小さくするため、港外側の開口率が港内側のそれより大きい。上部および下部透過型スリットケーソンは、港外側の縦スリットから流出入する海水が港内側のそれぞれ上部・下部に設けられた通水部から導水が行われる。多孔型、上部透過型、下部透過型スリットケーソンは、ケーソン内が遊水室となって、消波機能を有している。上部透過型スリットケーソンの隔壁には開口部が設けてある。

2. 2 実験装置および実験方法

実験は、港湾技術研究所内にある二次元往復流水路（幅1m×高さ1m×長さ35m）を用いて行った。図-3に実験水路の概念図およびケーソン模型、計測器の配置が示されている。水路内の両端は鋼管パイプで連結されており、循環パイプによって往復する流れを最大流量0.2m³/s

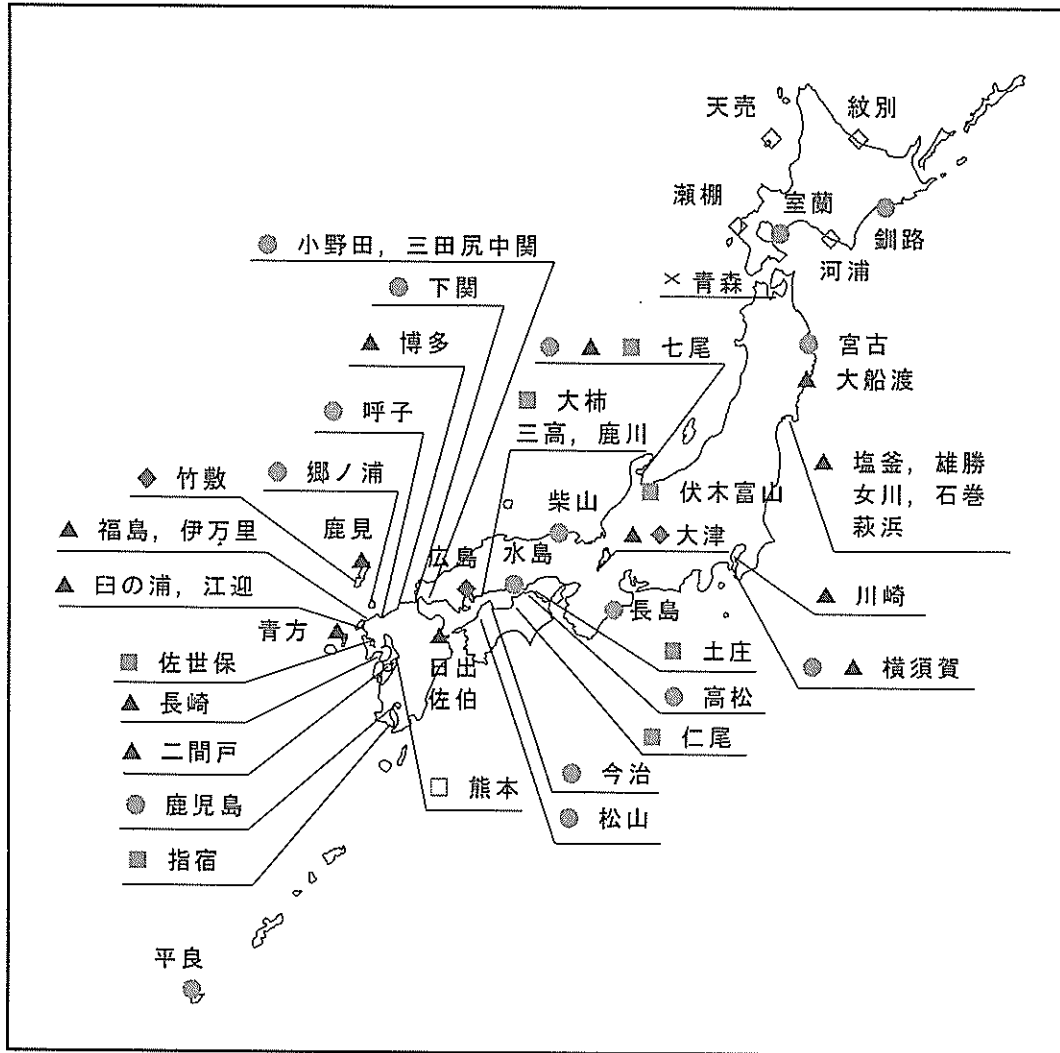


図-1 海水交換型防波堤の建設実績

構造様式	海水交換の特徴
●：スリットケーソン	消波機能（遊水室）を有し、通水部を通して海水交換を行う。
▲：カーテンウォール	上部工と海底間において海水交換を行う。
■：消波ブロック型	透過型のブロックにより海水交換を行う。
◆：浮防波堤	浮体のケーソンと海底間において海水交換を行う。
□：軟着堤	軟弱地盤に建設され、スリットケーソンタイプと同様な海水交換機能を有する。
◇：有孔型	ケーソンの両面（港内、港外側）に多孔壁を有し、海水交換を行う。
×：潜堤型	ケーソン全体が水没しているため、ケーソンと水面間において海水交換を行う。

まで起こすことができる。ケーソンおよびマウンド模型は、水路中央に港内、港外側の面を流れの向きに対して直角に2箇並べて配置した。水位計は港内、港外側の2カ所（図-3中の η_1 、 η_2 ）に配置した。水位計を配置した位置は、ケーソン模型を透過した際に生じる水位の乱れを受けない位置である。模型形状の外寸法は4種類

のケーソンとともに同寸法であり、その寸法は図-2のT型スリットケーソンに記されている。模型の材質はベニア合板であるが、側面は堤内の導水状況を目視できるようにアクリル合成樹脂を用いた。

水路内に定常流を起こし、模型の前後で生じる水位変化を計測した。表-1に示すように、流量が0.013から

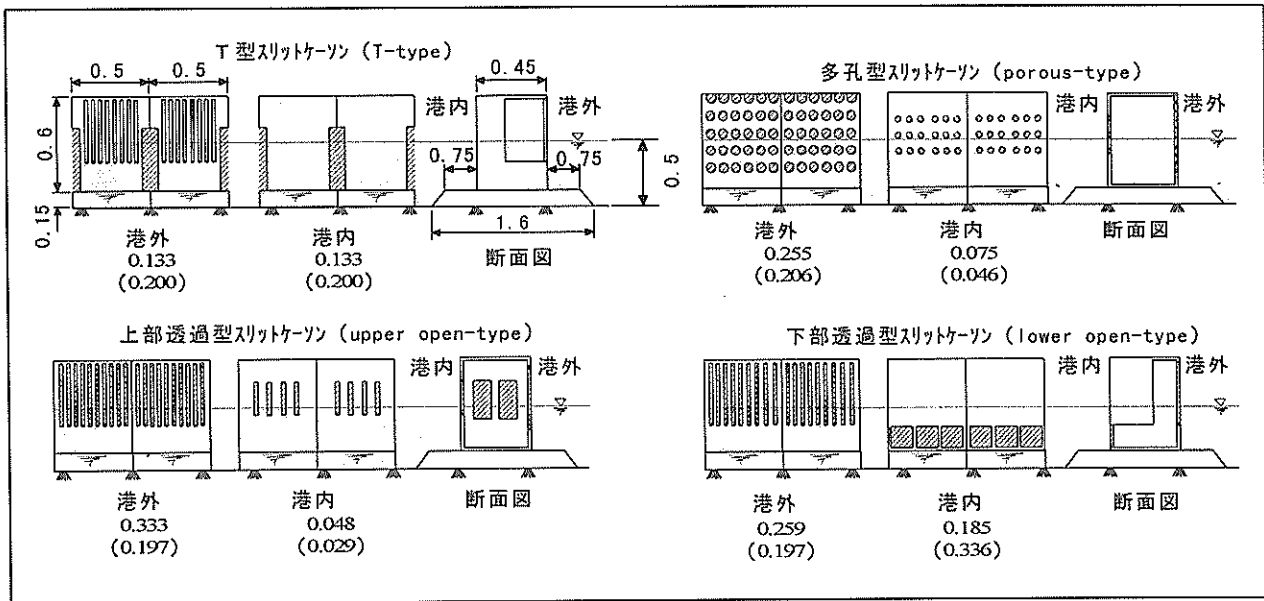


図-2 実験模型の概念図 (模型形状の外寸法の単位: m)

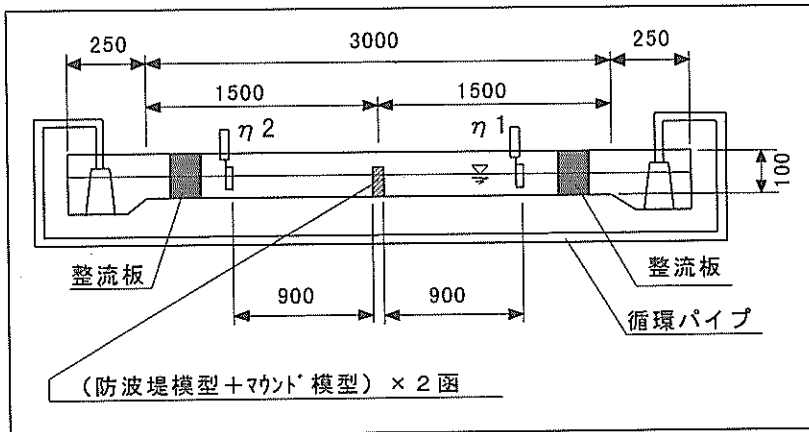


図-3 実験水路の概念図 (水路形状の単位: cm)

水路幅: 100cm, 設定水深: 50cm, 模型縮尺: 1/20, η_1, η_2 : 容量式水位計

表-1 実験条件

流れの向き	港外 → 港内 港内 → 港外
設定流量 (m ³ /s)	0.013 0.017 0.021 0.025 0.029

0.029m³/sまでの5段階の定常流を港外から港内, 港内から港外の両方向に流し, それぞれの流れの向きに対するケーソンの透過特性を調べた. 水路中に設置された容量式水位計 (計測技研製 C-600BNC) からの信号 (サンプリング周波数: 50Hz, サンプリング時間: 30s) を, 水位計増幅器 (計測技研製 CH-306) で増幅し, デジタルレコーダー (TEAC製 DR-M3b) を用いて光磁気ディスクに集録した. 設定流量に対して各々3回の計測を行い, 30秒間の平均値を解析に用いた.

2. 3 実験結果と評価手法の検討

(1) 定常流と堤内外の水位差との関係

港外から港内方向へ定常流を与えたときの各々の構造物に対する流量と水位差 (流入側水位-流出側水位) との関係を図-4に示す. どのスリットゲートも流量の増加にともない港内外の水位差が増加しており, ケーソンの構造の違いによる抵抗が大きいほど水位差が大きくなることを示している. 同一の流量に対して水位差が最も大きい (抵抗が大きい) のは, 上部透過型スリットケ

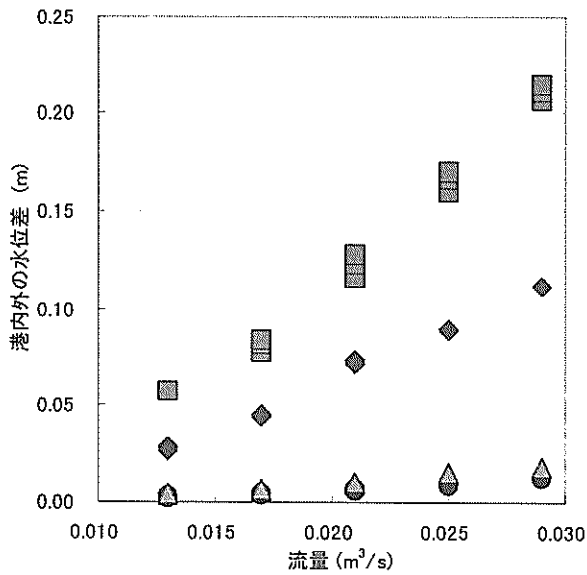


図-4 流量と水位差との関係（港外から港内方向への流れ）

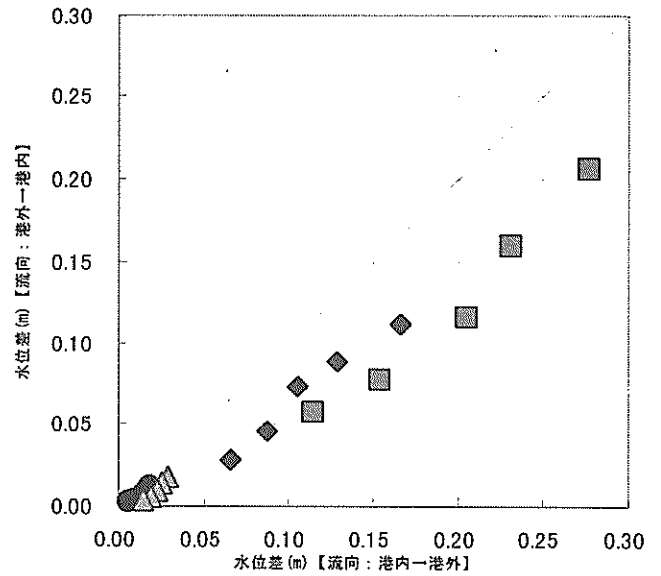
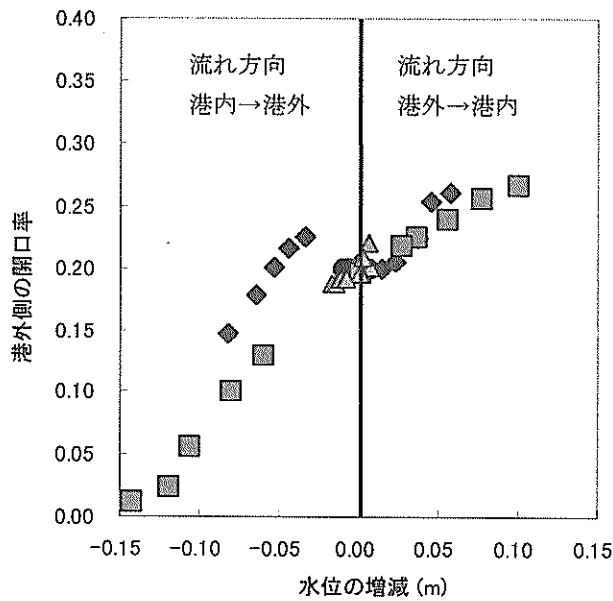
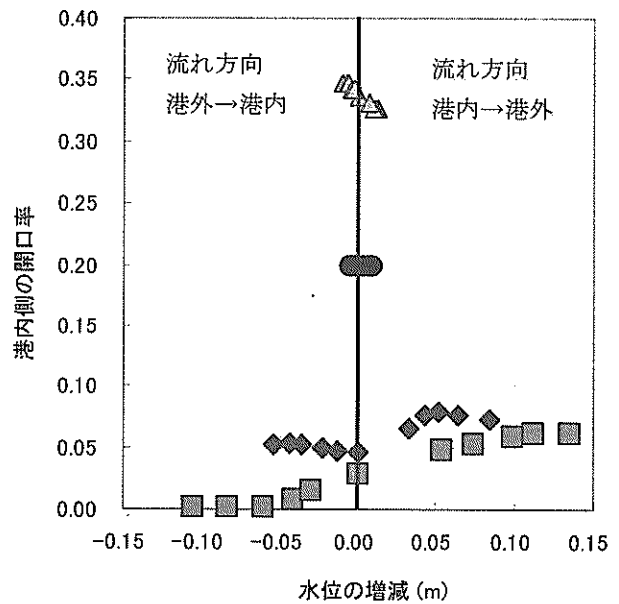


図-5 流れの向きに対する水位差の比較

●：T型スリットケーソン，◆：多孔型スリットケーソン，■：上部透過型スリットケーソン，▲：下部透過型スリットケーソン
以下，図-8まで同様の記号を用いる。



(a) 港外側



(b) 港内側

図-6 水位の増減に対する水面下の開口率の変動

ーソン，次いで多孔型，下部透過型，T型スリットケーソンの順であった。また，港内から港外へ定常流を与えたときの流量と水位差との関係はいずれの構造も図-4と同様な傾向にあった。

図-5は，同一流量に対する流れの方向（港内→港外，港外→港内）ごとの水位差の関係を示したものである。いずれの構造においても港内から港外へ流れる場合に水

位差が大きく，港内から港外へは流れにくいことがわかる。これはケーソン内外側の構造上の特性によるものである。図-2に各構造ごとに開口率が記されているが，流れの向きによって水位差の変化が大きい多孔型，上部透過型スリットケーソンの開口率は，港内外で3～6倍の構造上の差がある（港外側の開口率>港内側の開口率）。

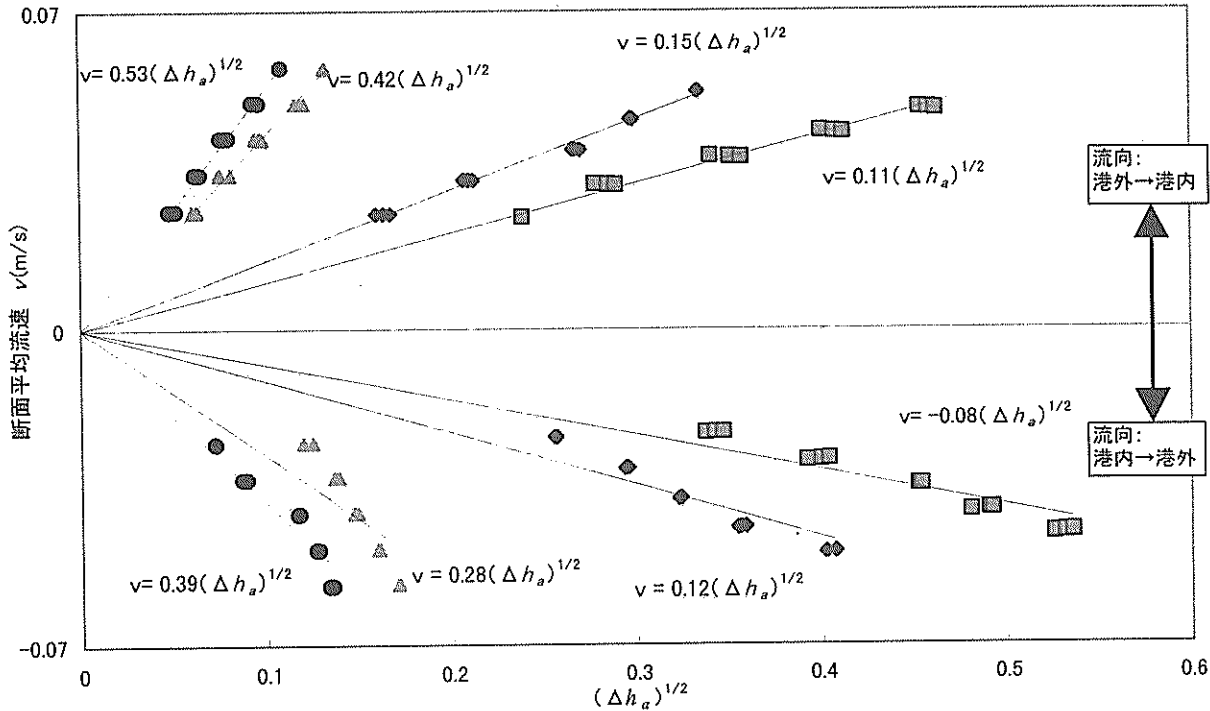


図-7 断面平均流速と $(\Delta h_a)^{1/2}$ との関係

図中の記号は、図-4 参照

図-6には、各流量に対する港内港外側の水位の増減値とケーソン底面から水面までの開口率との関係が (a) 港外側の水位の増減値と開口率 (b) 港内側の水位の増減値と開口率で示されている。水位は各流量に対して3回ずつ計測したが、それぞれ同程度の値であったことから、ここでは代表値を用いている。正の値は流入時、負の値は流出時を示している。したがって、図-6 (a) の正の値 (負の値) と、(b) の負の値 (正の値) が対応している。図-6から、ここで検討したスリットケーソンは通水部が水面上まで開口しているため、開口率は水位によって変化することがわかる。港外側はスリット構造になっているため開口率は水位の上昇とともに増加している。多孔型、上部透過型スリットケーソンは、水位の増減に伴い開口率も増減する傾向にあり、その変動幅はT型、下部透過型スリットケーソンよりも大きい。さらに、図-4、図-5に示すように、流れの向きによらず水位差の増大に伴って流量の線形な増大があることから、ケーソンの透過は流れの向きに関係なく、港内側の通水部の位置および開口率によって影響を受けていることがわかる。

(2) ケーソン内の透過流速の推定

流量 Q_a の水がケーソンを透過するとき、流入側の水深を h_m 、水路幅を B とすると、流入側の断面平均流速 v は式(1)で表される。

$$v = \frac{Q_a}{Bh_m} \quad (1)$$

このとき防波堤の前後に生じる水位差 Δh_a が、防波堤による摩擦損失、形状損失によると仮定したとき、 Δh_a と v の関係は式(2)となる。

$$\Delta h_a = \alpha \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

ここで α は損失係数、 g は重力加速度 (9.8 m/s^2) である。式(2)から、 v は式(3)として得られる。

$$v = \left(\frac{2g\Delta h_a}{\alpha} \right)^{1/2} = C(\Delta h_a)^{1/2} \quad (3)$$

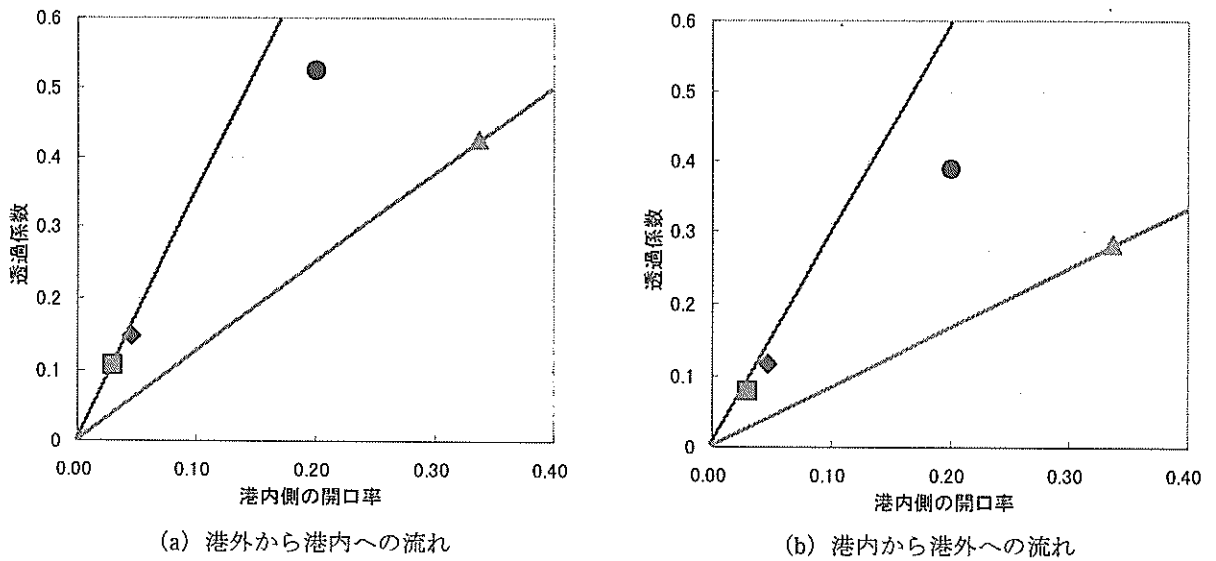


図-8 透過係数と開口率（港内側）との関係

図中の記号は、図-4 参照

ケーソン内を透過する流速を式(3)とし、ここで得られる C を透過係数と定義する。透過係数は値が大きいほど導水効果が高いことを意味している。図-7には、断面平均流速 v と $(\Delta h_u)^{1/2}$ との関係が示されている。断面平均流速は、式(1)によって求めており、港外から港内への流れ方向を正值としている。この図から、透過係数を直線の勾配として求めることができる。図-7より、T型と下部透過型スリットケーソンは実験値が式(3)の関係からややずれているけれども、本実験の範囲内ではスリットケーソンを通過する流れの断面平均流速が $(\Delta h_u)^{1/2}$ にほぼ比例していると判断できることから、近似的にポテンシャル流れとして扱えるといえる。このときの透過流のレイノルズ数は、模型の開口幅を代表長さにとれば、 $Re=10^3 \sim 10^4$ 程度である。なお、今回水理模型実験では、防波堤前後の水位差は最小で2 cm程度与えている。これは、縮尺を考慮すると現地で0.4m程度となる。実際の現地においては潮流の作用によってこれほどの水位差が防波堤前後でつくことはほとんどないと考えられる。しかし、図-7から、水位差が小さくなれば断面平均流速も図中の直線に沿って小さくなり、式(3)で流速を表すことはほぼ妥当であると考えられる。

(3) 構造の違いによる透過特性

図-8には、静水時における港内側の開口率と透過係数の関係が (a) 港外から港内への流れ方向、(b) 港内から港外への流れ方向で示されている。図中には、実験に使用したスリットケーソンの透過係数の上限値と下限値が切片を0とした直線で示されている。上限値が上部

透過型、下限値が下部透過型である。この直線の勾配が大きいほど、小さい開口率で海水の透過が効率的に行われることを示している。図-8 (a), (b) とともに各構造のうち最も透過が効率的であるのは上部透過型スリットケーソンであり、最も効率が低いのが下部透過型スリットケーソンであることを示している。この関係から、各構造の流れの透過特性は以下のとおりに考察できる。多孔型、上部透過型ケーソンは港内側の通水部が水面付近に設けてあり、透過波の影響を考慮して開口率が小さく設計されている。これは、海水交換としての効果は抑制されるが、水面付近に通水部が設けてあることで透過の効率が良いことを示している。下部透過型スリットケーソンは港内側の通水部がケーソン下方に設けてあるため、透過の効率は低い、開口率が大きく通水部全体で海水交換が行えるので結果として透水効果は高くなっている。さらに、外湾海水を湾内の底層へ導水させることから貧酸素対策など水質改善を期待する場合には適した構造といえる。T型スリットケーソンは鉛直方向一様に通水部が設けてあるため、水位の変化に伴った開口率の変化はなく、海水交換は効率的に行われている。これらの結果から、透過効率を上げるためには、開口部は常に水没させ、なるべく上部に設けると効率が良いことがわかる。しかし、水環境を考える場合には、海水交換の総水量やどの位置の水を動かしたいかなど、水構造の面からも検討することが必要である。もちろん、波の反射率がなるべく小さくなるようになど、防波堤本来の機能が十分満足することも同時に考えなければならない。

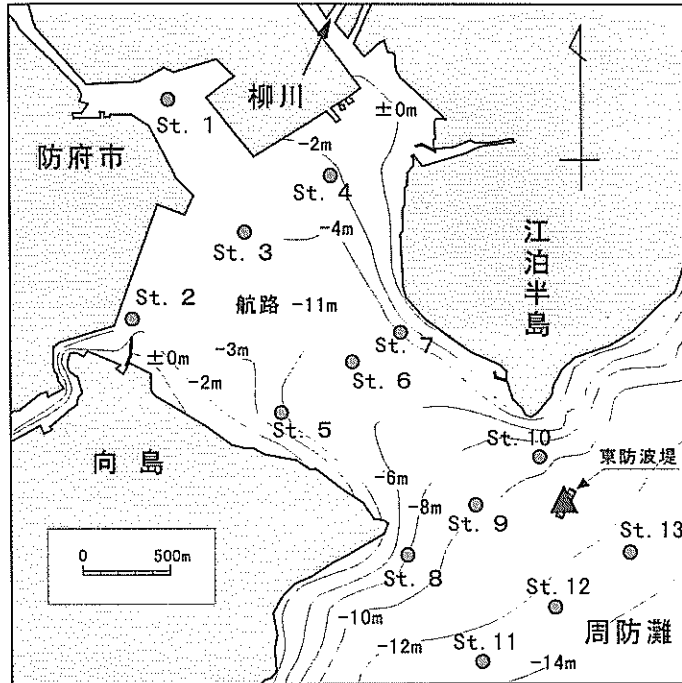


図-9 現地観測位置の平面図 (三田尻港)
 ● : 水質観測点, ▲ : 水位・流向・流速観測点

表-2 観測条件

観測項目	測定間隔	観測位置	設置水深(m)	観測日	備考
流向・流速 水位	10分	通水部(図-10; St. A)	bottom+1.6m	1998/4/19~1998/4/24	
水質	水深方向 0.1m毎	湾内(図-9; St. 1~13)	-	1998/4/20, 4/21	塩分・水温・DO・クロロフィルa 濁度・pH・水深
	8:00~17:00, 20分 毎 水深方向	防波堤の前後		1998/4/20	
流向・流速・水位	10分	通水部(図-10; St. B)	bottom+1.0m	1998/10/13~1998/11/2	
水質	水深方向 0.1m毎	湾内(図-9; St. 1, 2, 3, 4, 6, 7, 9, 10)	-	1998/10/13	塩分・水温・DO・クロロフィルa 濁度・pH・水深
水質	10分	遊水室(図-10; St. C)	bottom+4.8m	1998/4/19~	塩分・水温

3. 現地観測

3.1 観測概要

水理模型実験の対象となった下部透過型スリットケーソンについて実際に現地観測を行い、潮汐の影響による海水交換特性、季節の変化による湾内の水質変化特性について検討した。

図-9には現地観測の位置、表-2には観測条件が示されている。防波堤は山口県防府市に位置する三田尻中関港三田尻地区(以下では三田尻港と記す)の湾口部の東西2ヶ所に建設予定であり、現在東防波堤が建設中である。西防波堤の建設は1999年度以降の予定である。

三田尻港は周防灘に面しており、江泊半島および向島に囲まれた南北(湾奥)に3km、東西(湾口)に1~2

kmの閉鎖性湾である。湾奥部には柳川(山口県2級河川、計画流量:160m³/s)が流入している。

下部透過型スリットケーソンは、有義波高 $H_{1/3}=1.0\text{m}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=3.8\text{s}$ の通常波および有義波高 $H_{1/3}=3.9\text{m}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=9.2\text{s}$ の30年確率波を対象に断面実験が行われ、波の反射率0.57、伝達率0.42として決定された(運輸省第四港湾建設局宇部港工事事務所1996)⁶⁾。

3.2 観測方法

(1) 下部透過型スリットケーソンの透過流量

スリットケーソンの透過流量は通水部での水位(潮位)変動・流向・流速を連続観測することで行った。観測は1998年4月19日から4月24日の6日間(小潮:4月

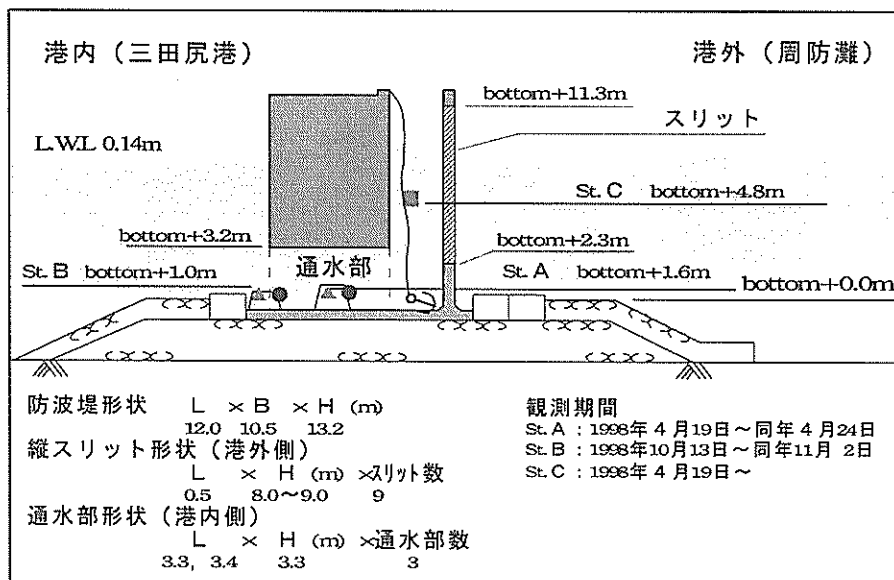


図-10 下部透過型スリットケーソンの断面および観測位置
 ● : 水位計, ▲ : 流向・流速計, ■ : 水温・塩分計

20日, 大潮: 4月26日) と, 1998年10月13日から11月2日の19日間 (小潮: 10月12, 28日, 大潮: 10月20日) 行った. 図-10に下部透過型スリットケーソンの断面および観測位置を示す. 観測基準面 (bottom±0.0m) をケーソン底面とした. 4月の観測では図中St.Aに, 10~11月の観測では図中St.Bに電磁流速計 (アレック電子製 ACM-16M) を通水部に設置した. 測定間隔は10分, サンプルング時間は30データ/sである. 30秒間の平均値を解析に用いた.

(2) 湾内の水質変化

干潮時, 満潮時における湾内の水質変化を把握するため, 多項目水質計 (アレック電子製 ACL1183-PDK) を用い, 4月20日 (満潮14:12), 4月21日 (干潮10:32) および10月13日 (上げ潮最強時13:00) に, 図-9に記載されるSt. 1~13で測定を行った. 海面から海底まで鉛直方向0.1m毎に水深 (m)・水温 (°C)・塩分・クロロフィルa (μg/l)・濁度 (mg/l)・溶存酸素 (DO) (mg/l, %) を測定した. また, 4月20日では8:00~17:00にかけて20分ごと防波堤の港外, 港内側の水質観測を行った. なお, 水質観測の結果は付録A, B, Cに記載する.

図-10のSt.Cにおいて水温・塩分計 (アレック電子製 MDS-CT) を設置し, 1998年4月19日から水温・塩分の経時変化を把握するため連続観測を行っている. 測定間隔は10分, サンプルング時間は1データ/sである. 1ヶ月毎に計測器の交換を行っている.

3. 3 観測結果と考察

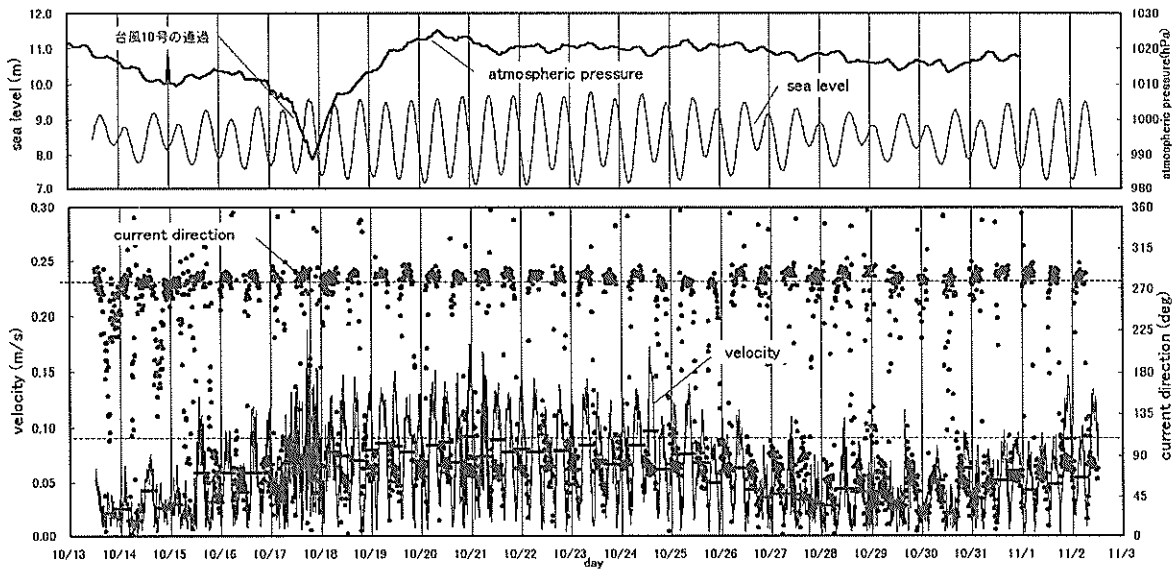
(1) 観測期間における気象の状況

図-11には, 水位変動, 流向, 流速および海面気圧の経時変化が (a) 10~11月観測, (b) 4月観測で示されている. 水位は計測器 (4月観測: bottom+1.6m, 10~11月観測: bottom+1.0m) の水深の値である. 流向は北向きへの流れを0°とし, 時計回りに角度をとっている. 図中の点線は, 防波堤の港内外側の面に対して直角的な流れの向きを示している (港外から港内: 292.5°, 港内から港外: 112.5°). 太線で示されている水平な線分は, 上げ潮時と下げ潮時のそれぞれの期間に対応する平均流速である.

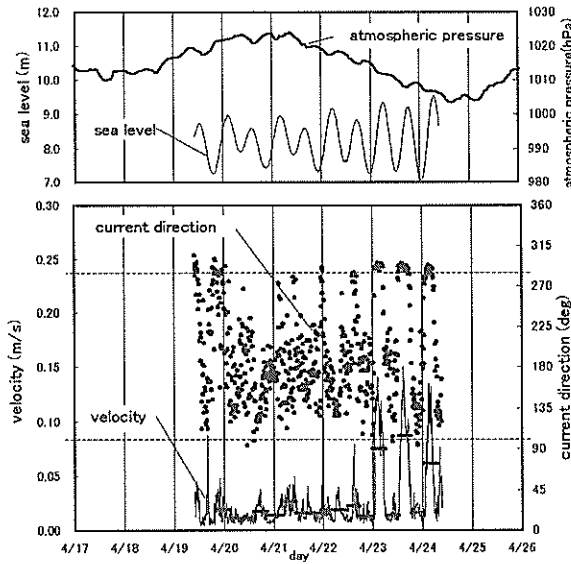
図-11 (a) より, 10月17日から18日にかけて台風9810号 (約990hPa) が防府市を通過し, 約30hPaの気圧変動があった. 台風の通過に伴い, 満潮時の水位は大潮期の満潮時と同程度の値9.45mが観測された. 10月18日以降は高気圧に覆われ, 気圧の変化は小さく約1020hPaで安定していた. 図-11 (b) より, 観測期間中の海面気圧は約7日の周期で変動していた. 観測開始日から4月20日まで約1020hPaであったが, それ以降は低気圧の通過で1005hPaまで低下した.

(2) 下部透過型スリットケーソンの透過特性

ケーソン前後の水位の変動に伴い上げ潮時に港内側, 下げ潮時に港外側へケーソン内を透過する流れが起きており, 特に10~11月の観測で顕著に表れている. 上げ潮時の流れの向きは全体を通して港内方向へ安定している



(a)10~11月観測結果



(b) 4月観測結果
図-11 観測結果

が(図-11中の点線の方向)、下げ潮時の流れの向きは大潮期で約 80° 、小潮期で約 65° の方向を示している。これは、港内側背後に計測器が設置されていたことから、上げ潮時には通水部からの流向、下げ潮時には周辺海域の流向の影響を受けたためであると思われる。上げ潮、下げ潮間の平均流速は、小潮期より大潮期に大きく、上げ潮、下げ潮では顕著な流速差はないことがわかる。図-11 (b) の水位変化の様子は、図-11 (a) における10月13~17日と27~31日の期間にほぼ相当する。上げ潮、

下げ潮に伴う流速の状況は、図-11 (a) の該当期間の結果と類似している。

(3) 潮差と平均透過流量との関係

図-12には、潮差とその潮差に対する上げ潮と下げ潮間でのケーソン1函あたりの平均透過流量との関係が示されている。10~11月観測は▲, △, 4月観測は■, □で示しており、白抜きが下げ潮を表している。平均透過流量は、図-11中の太線に示す平均流速を通水部内の断面積と、ケーソン1函の通水部の数に乗じて求めた。ケ

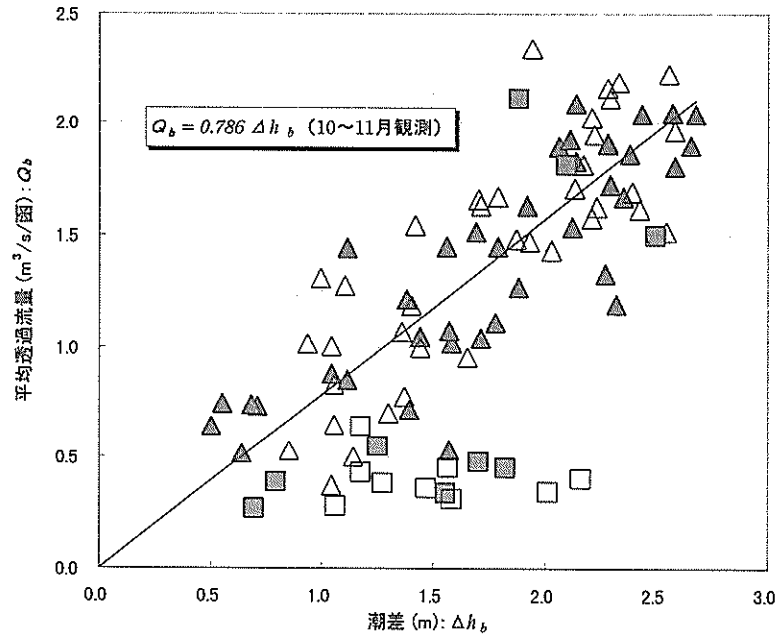


図-12 潮差と平均透過流量との関係

▲ : 10~11月観測 (上げ潮), △ : 10~11月観測 (下げ潮)
 ■ : 4月観測 (上げ潮), □ : 4月観測 (下げ潮)

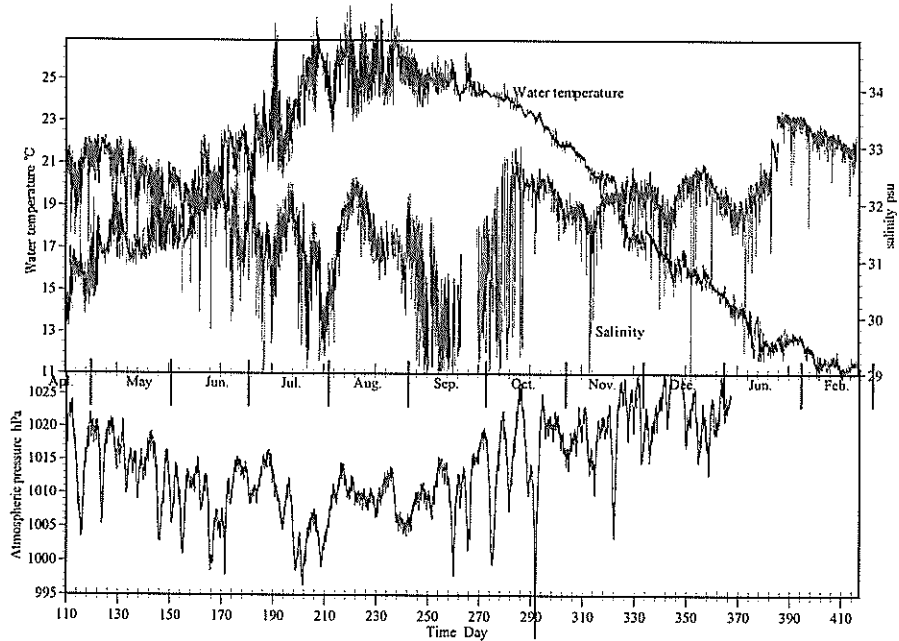


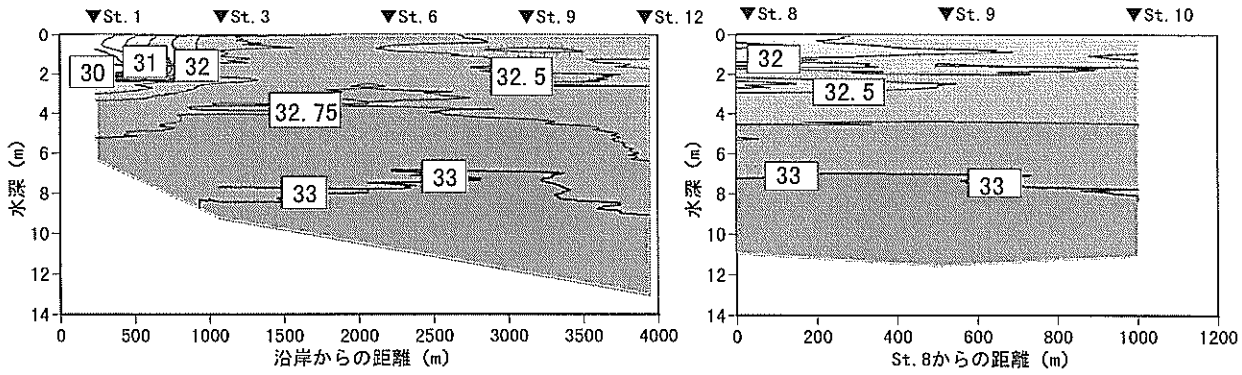
図-13 水温・塩分・気圧の経時変化

ケーソン1函あたりの通水部の数は3つである。断面形状は正方形(3.3m×3.3m)であるが、断面積の算出には通水部の四隅における流速はほとんど無いと考えて有効面積を円(φ3.3m)として求めている。図-12より、10~11月観測においては潮差に比例して平均透過流量は増加しており、ケーソン1函当たりにおける平均透過流量 Q_b は潮差 Δh_b と $Q_b = 0.786 \Delta h_b$ の関係で表せる。このときの

透過流のレイノルズ数は、通水部幅(3.3m)を代表長さにとると、 $Re = 10^4 \sim 10^5$ 程度である。

(4) 季節の違いによる湾内の塩分の分布

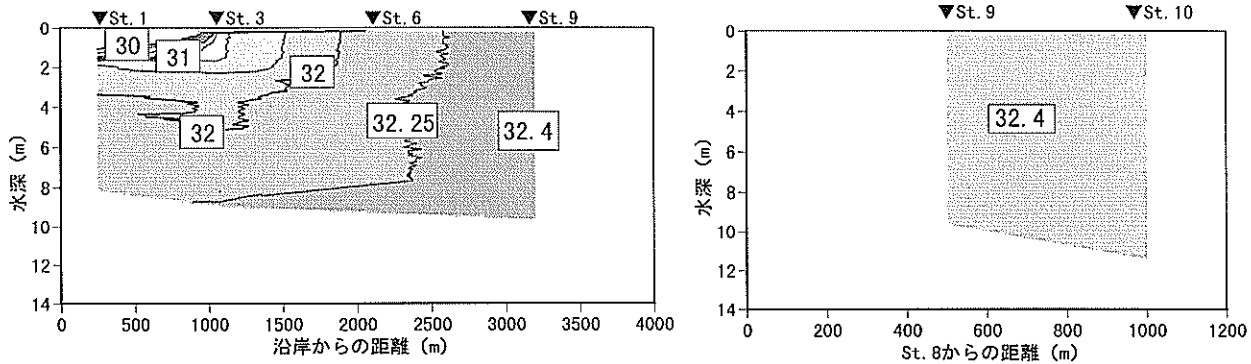
4月と10~11月の観測結果は、水位変動に伴う流れの向きとの関係の傾向が異なっている。これは、三田尻港付近の流れが、天候や季節によって変化する瀬戸内海の流れの影響を受けているためと考えられる。



(a) 湾軸方向（北西—南東）の断面分布

(b) 湾横方向（南西—北東）の断面分布

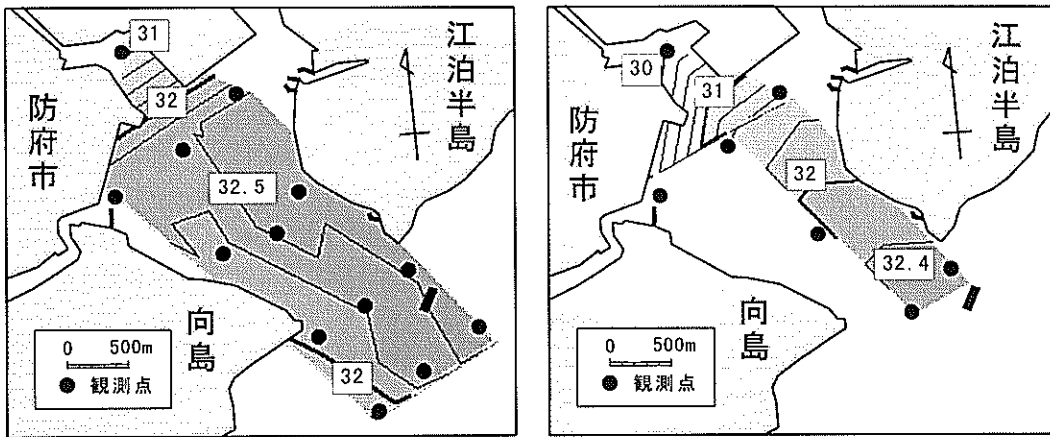
図-14 4月観測における塩分の分布状況



(a) 湾軸方向（北西—南東）の断面分布

(b) 湾横方向（南西—北東）の断面分布

図-15 10~11月観測における塩分の分布状況



(a) 4月20日；満潮時 14:12

(b) 10月13日；上げ潮最強時 10:32

図-16 塩分の平面分布（表層より-1.0m）

図-13上段に水温・塩分（図-10, St.C), 下段に気圧の経時変化が示されている。水温・塩分の変化は、1998年4月～同年8月までと1998年9月～1999年2月は変化量の幅が異なっており、連続観測を行った4月と10～11月では、三田尻港に面する周防灘（瀬戸内海）からの流

入水の性質が異なることが予想できる。塩分は気圧との対応が見られ、5月～8月頃まで塩分が下がり、9月頃から気圧の上昇とともに塩分も上昇している。日比野・鶴谷（1999）⁷⁾によると、日本周辺沿岸域では、9月頃の気圧の上昇に伴い水位は低下する。水位の低下量は

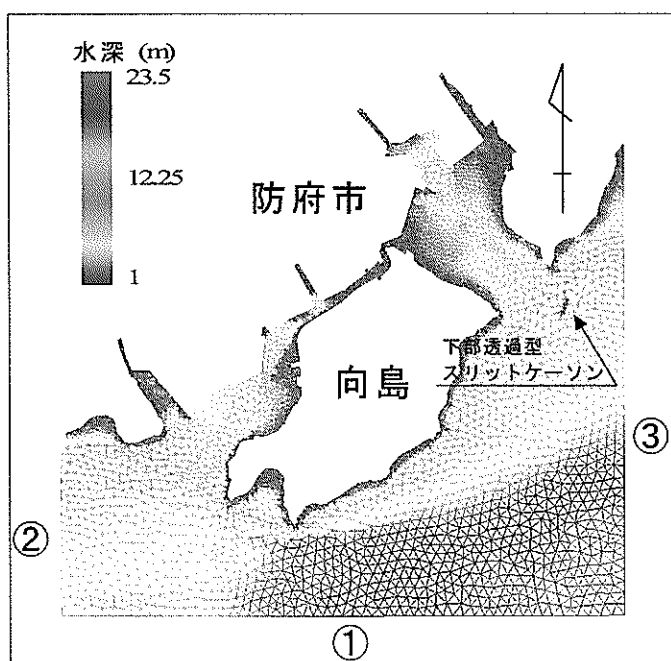


図-17 数値計算における計算範囲（有限要素分割図）

西日本海，東シナ海では，9～11月頃の約3ヶ月間に40cm以上になると報告されている（村上・山田 1992）⁹⁾。周辺海域の水位変化に伴って三田尻港に流入する水塊の水質の変化や流入方向の変化が起これと考えられる。4月と10～11月のケーソン透過流量の違いは，これらの周辺海域からの流れの違いによるものと考えられる。

図-14には4月観測（4月20日），図-15には10～11月観測（10月13日）における満潮時（上げ潮時）の塩分の断面分布が（a）湾軸方向，（b）湾横方向で示されている。図中には塩分濃度の値が表示されている。観測地点は図-9に示されている。図-14（a），（b）より，4月観測時には湾奥から湾外まで塩分躍層が存在しており，上げ潮時に湾外から塩分の成層した海水が流入していることがわかる。図-15（a），（b）より，10～11月観測時には，湾の中央より湾外にかけて塩分の成層はなく，上げ潮時に湾外から鉛直方向一様な塩分濃度の海水が流入していることがわかる。これは，4月と10～11月で三田尻港の周辺海域における水構造が異なっていたことを示している。図-13で9月までの潮汐周期の水温と塩分の変動は周辺海域が成層していることが主因となっている。

（5）塩分の分布状況による湾内の流れ予測

図-16には，満潮時（上げ潮時）における表層より1.0mの塩分の平面分布が（a）4月観測（4月20日），（b）10～11月観測（10月13日）で示されている。図中には塩

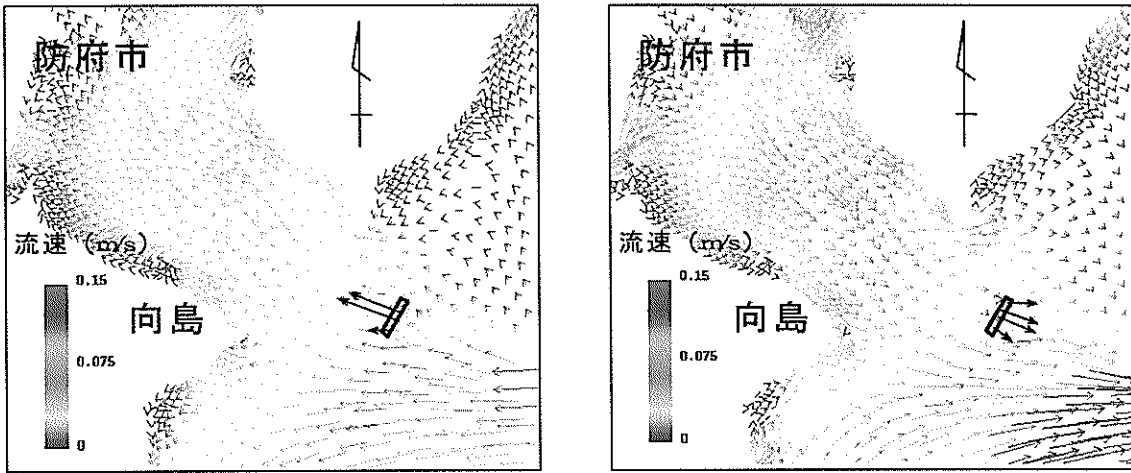
分濃度の値が表示されている。図-16（a）より，4月には向島に沿って低濃度の塩分があり，湾内の江泊半島側（北東方向）に向かって高濃度の塩分が存在している。図-16（b）より，10～11月は南東の方向から湾奥に向かって塩分濃度が低下している。塩分の分布状況および3.3（1）の考察から，表層付近における上げ潮時の湾外水の湾内への流入は，4月は南西方向から，10～11月は南東方向からであると予想される。また，三田尻港への海水の流入は，日本周辺沿岸域の水位変化と関連がありそうで，季節によって日本海・瀬戸内海・太平洋から性質の異なる海水の流入量の変化の影響を受けていると予想されることから，今後は瀬戸内海における季節的な流れの特性についても検討を行う予定である。

4. 数値計算

4.1 数値計算概要

水理模型実験で得た実験式を用いてケーソン内の透過流速を計算し，その結果と現地観測結果を比較して再現性を検討した。

図-17には計算範囲が示されており，水深が色別で表示されている。下部透過型スリットケーソンが図中右に示されている。図中の①，②，③を海域の境界（開境界）とした。沿岸の地形および水深データの作図は，海図（海上保安庁 1986）⁹⁾ および地形図（国土地理院 1994，

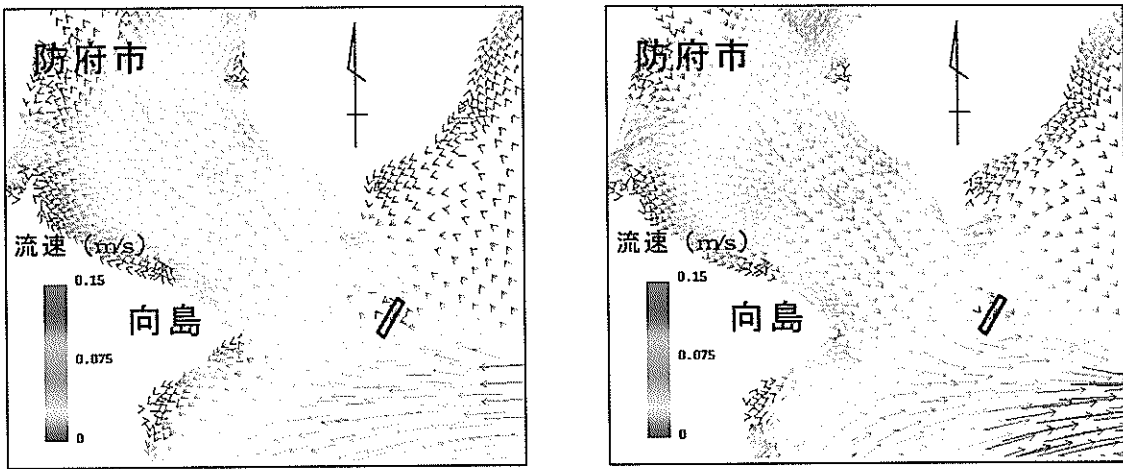


(a) 上げ潮最強時

(b) 下げ潮最強時

図-18 三田尻港周辺の流速ベクトル図 (計算値)

流速の大きさが色別で表示されている。四角で囲った部分が下部透過型スリットケーソンを示す。ケーソンを透過する流速が黒矢印で表示されている。



(a) 上げ潮最強時

(b) 下げ潮最強時

図-19 不透過型のケーソンにした場合の三田尻港周辺の流速ベクトル図 (計算値)

四角で囲った部分の不透過のケーソンを示す。

1995)^{10, 11)}を、スキャナ (CatComp社製 SCAN PLUS III 800T) によってラスタデータを取得し、ベクトル化はCAD (新日本製鐵社製 NSXPRES 300X) によって行った。

4. 2 計算条件

(1) 計算方法

非線形非定常の二次元浅水長波方程式、式(4)、(5)を基礎方程式として、有限要素法を用いて計算を行った。

$$u_i + u_j u_{i,j} + g \zeta_{,i} - A_i (u_{i,j} + u_{j,i})_{,j} + B_i - S_i + f_i = 0 \quad (4)$$

$$\zeta + \{(h + \zeta) u_i\}_{,i} = 0 \quad (5)$$

ここで、式(4)、(5)はテンソル表記である。 u_i ($i=1, 2$): i 方向の流速 ($u_1 = u$, $u_2 = v$), h : 水深, ζ : 水位, A_i : 渦動粘性係数, B_i : 底面応力項 [= $(\tau_{ib}) / \{\rho (h + \zeta)\}$], S_i : 海面応力項 [= $(\tau_{is}) / \{\rho (h +$

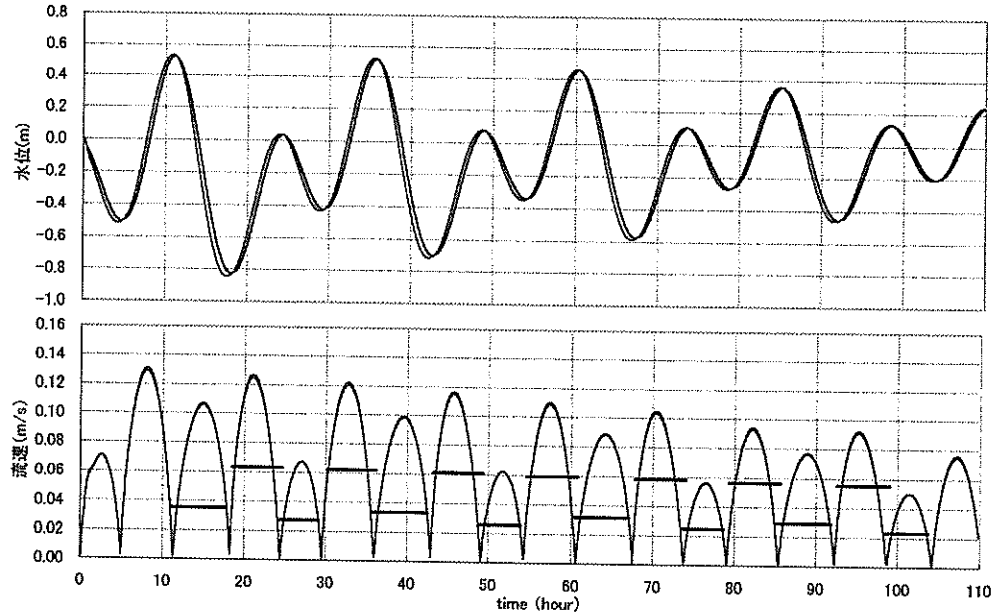


図-20 防波堤の港外、港内側の水位と流速の経時変化（計算値）

と]], ρ : 海水密度, f_i : コリオリ項 ($f_1 = -fv$, $f_2 = fu$) であり, 記号の上に示す \cdot は時間に関する微分を表す.

(2) 開境界

開境界に与える計算条件には, 潮位を与える場合と流速を与える場合の2つがある. 本数値計算においては流速を条件として与えた. 瀬戸内海全域における潮流計算結果を用いて開境界上の流速を計算し, その計算結果を条件として与えた. ここで, 瀬戸内海全域の潮流計算には, 開境界を紀伊水道, 関門海峡, 豊後水道とし, 計算条件を潮位で与えている.

(3) 陸岸境界

陸岸境界における計算にはslip条件を用いた. slip条件とは, 境界において岸に沿う流れ方向に速度を有し, 岸に直角方向の流れは0とする条件である.

(4) ケーソン内の流れ

水理模型実験から得た式(3)にしたがった. 図-7に示されるとおり, 下部透過型スリットケーソンの透過係数は, 上げ潮時は0.42, 下げ潮時は0.28を用いている.

4. 3 計算結果と考察

(1) ケーソンと周辺海域の流れ場

図-18には, 三田尻港周辺における計算結果が(a) 上げ潮最強時, (b) 下げ潮最強時の流速ベクトル図で示されている. 流速の値を色別で表示させている. 図-18より, 上げ潮時には防波堤を通して湾内に向かう流れがあり, 下げ潮時には反対方向の流れを示している. ケーソンの周辺海域の流れは, 上げ潮, 下げ潮に関わらず, 防

波堤の北東側での流速が小さく, 南西側で流速が大きくなっている.

(2) 透過型と不透過型ケーソンの違いによる周辺海域への影響予測

図-19には, 不透過型のケーソンにした場合の三田尻港周辺の計算結果が(a) 上げ潮最強時, (b) 下げ潮最強時の流速ベクトル図で示されている. 図-19(a), (b)ともにケーソン周辺においては小さな渦が発生している結果となった. これに対し, 湾内および湾外の流れ場を図-18と比較すると上げ潮, 下げ潮ともにケーソン周辺以外は顕著な差がない結果となった. これは, 現在の防波堤の規模が周辺海域に対して小さく, 全体的な流れ場には大きな影響を及ぼしていないためであると考えられる. しかしながら, 図-18(a), (b)の結果のように透過型のケーソンを設けることで防波堤から海水交換が促進されることは, 湾内への海水交換が効率よく行われているといえる. これは, 図-12に示す現地観測結果からも認められる. なお, 透過型と不透過型ケーソンにおける上げ潮, 満潮, 下げ潮, 干潮の流速ベクトル図(計算値)を付録Dに記載する.

(3) ケーソン内の透過流速

図-20には, ケーソンの港内外側の水位と透過流速の計算結果が経時変化でそれぞれ示されている. 赤線はケーソン港外側, 黒線は港内側の計算結果を示している. 太線で示されている水平な線分は, 上げ潮, 下げ潮期間における平均透過流速である. ここで, ケーソン内の透過流速は, 上げ潮時は港内側, 下げ潮時は港外側の流速

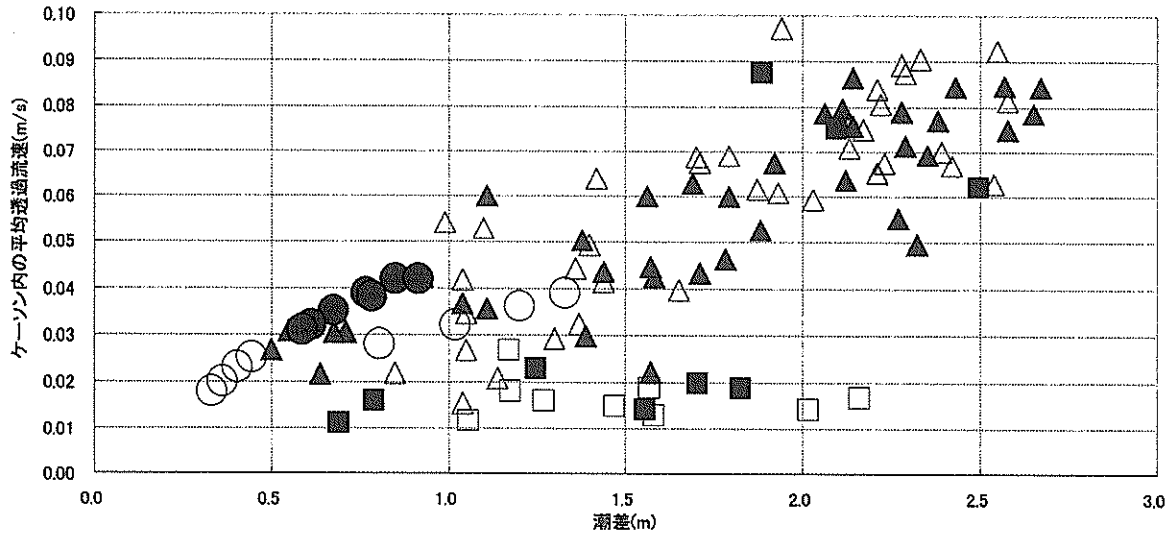


図-21 潮差とケーソン内の平均透過流速との関係（計算結果と観測結果との比較）

- ：計算結果（上げ潮），○：計算結果（下げ潮）
- ▲：10～11月観測（上げ潮），△：10～11月観測（下げ潮）
- ：4月観測（上げ潮），□：4月観測（下げ潮）

で扱う。また、この流れ場では、上げ潮時に防波堤内外の水位差が大きく、下げ潮時に水位差が小さくなる特性を示している。この結果、ケーソンを透過する流速は上げ潮時に大きくなっている。

（4）本評価手法の実用性

図-21に潮差とケーソン内の平均透過流速との関係について、計算結果と現地観測結果との比較を示す。ケーソン内の透過流速は上げ潮、下げ潮間の平均流速である。計算結果は●、○で示し、観測結果は10～11月を▲、△、4月を■、□で示している。白抜きが下げ潮を表している。計算結果は、観測結果と概ね合っており、提案した式(3)は、スリットケーソン内の流れをほぼ再現していることがわかる。4.2(2)で述べたように本数値計算では、瀬戸内海全体の計算から開境界の条件を求めており、紀伊水道、関門海峡、豊後水道の潮位が瀬戸内海の境界条件として与えられている。このため、気圧変化等による水位変化および季節の変化に伴う水質の条件が考慮されていない。境界条件に与える流速として、これらの条件を考慮した計算値を与えるか、あるいは、実際の海域の実測値で与えることができれば、さらに観測結果の再現性を良くすることができると考えられる。

5. 結論

本研究では、潮汐により促進される海水交換の作用を対象にした。まず、水理模型実験によって海水交換型防波堤の構造様式の違いによる透過特性について検討した。現地観測では、下部透過型スリットケーソンの透過特性について検討を行った。水理模型実験と現地観測の結果をもとに、海水交換型防波堤の海水交換機能の評価手法を数値計算によって検討した。本研究により得られた主要な結論を以下に示す。

(1) 水理模型実験

- ①海水交換型防波堤の透過特性は、特に港内側の開口率の影響を受けており、港内外に生じる水位差によって透過量は決定される。
- ②各構造の透過特性は、実験式で表した透過係数によって表すことができる。透過係数は、主として港内側の形状（開口率）によって決まる。
- ③防波堤の海水交換だけに着目すると、通水部の開口率が大きいほど効果的であるが、透過の効率を上げるためには、開口部は常に水没させ、なるべく上部に設けることが必要である。ただし、防波堤本来の目的である透過波と反射波の低減も含めた総合的な観点から構造を決定する必要がある。

(2) 現地観測

- ①三田尻港の東防波堤に用いられている下部透過型スリ

ットケーソンの平均透過流量は潮差との相関が高い。水位変動によって流向、流速の傾向が明確であった10～11月の観測については、ケーソン1函当たり潮差1mに対し約 $1\text{ m}^3/\text{s}$ の海水交換量となっている。

②4月と10～11月の観測結果の比較から、潮差と平均透過流量との関係は防波堤の周辺海域の状況（季節的な流れ、成層状態、天候等）によって異なると予想される。

(3) 数値計算

①現地のスリットケーソン内の透過流速（透過量）は、水理模型実験で定義した実験式を用いることで再現できる。

②今回の計算で用いた境界条件は瀬戸内海全体の計算から求めたが、広域の流れ場では気圧分布や海域の成層の影響についても十分考慮する必要がある。このために、現地において年間を通した水構造や流れ場の特性を把握するより詳細な観測が必要である。

6. あとがき

今回の研究から、数値計算によってケーソン内の透過流速を再現することが可能であることを示した。今後、他の構造様式についても現地観測と数値計算を行う予定であり、海水交換型防波堤の海水交換機能の効果の予測手法および、港内水質改善効果の予測手法の確立を目指している。

本研究において、海水交換型防波堤の情報収集には、運輸省港湾局、運輸省の各港湾建設局、北海道開発局および沖縄総合事務局の皆様にご協力いただいた。また、現地観測では運輸省第四港湾建設局宇部港湾工事事務所の協力を得た。さらに現地観測における海面気圧の情報を日本気象協会（MICOS Web Mr.）よりインターネットを通じて取得した。ここに記して感謝の意を表する。

(1999年3月31日受付)

参考文献

- 1) 山本正昭・中泉昌光・間辺本文： 潜堤付防波堤による海水交流工法の開発，第34回海講論文集，1987，pp. 675-679.
- 2) 塩崎禎郎・磯崎総一郎・中村 滋・堀内 博： 海水交換機能を有する透過型スリットケーソンの水理特性，海岸工学論文集，第43巻，1996，pp. 1226-1230.
- 3) 松島健滋： 海水交換機能をもつ多孔ケーソンの蓄

- 養施設への応用，ヘドロ，No.67，1996，pp. 54-62.
- 4) 柳瀬知之・谷野賢二・水野雄三・梅沢信敏・桑原伸司： 有効堤の海水交換機能に関する研究，海岸工学論文集，第38巻，1991，pp. 856-860.
 - 5) 山本 潤・武内智行・中山哲蔵・田畑真一・池田正信： 志賀島漁港外港の導水工による環境改善効果に関する現地調査，海岸工学論文集，第41巻，1994，pp. 1096-1100.
 - 6) 運輸省第四港湾建設局宇部港工事事務所： 環境との共生をめざした防波堤整備，第41回管内技術報告会資料，1996，46p.
 - 7) 日比野忠史・鶴谷広一： 大船渡湾での貧酸素水塊の形成と消滅機構，水工学論文集，第34巻，1999，pp. 1073-1078.
 - 8) 村上和男・山田邦明： 我国沿岸の海面水位の長期変動の特性とその要因，海岸工学論文集，第39巻，1992，pp. 1026-1030.
 - 9) 海上保安庁： 海図，三田尻中関港・西浦漁港 1/10,000，海上保安庁，1986，第1134号
 - 10) 国土地理院： 地形図，防府 1/25,000，国土地理院，1994，NI-52-3-8-4.
 - 11) 国土地理院： 地形図，佐波島 1/25,000，国土地理院，1995，NI-52-4-5-3.

記号表

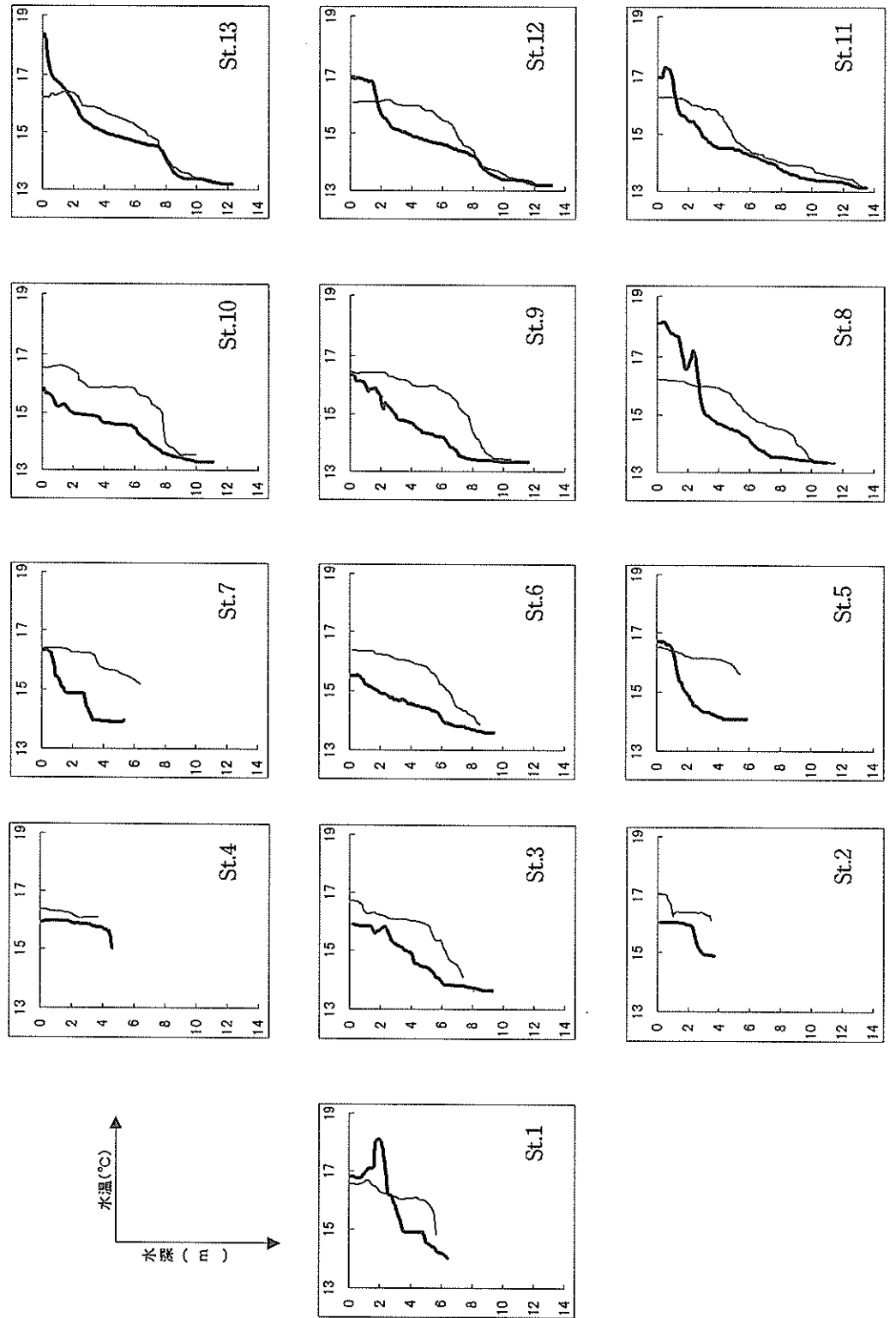
A_l	: 渦動粘性係数
B	: 水路幅
B_i	: 底面応力項
C	: 透過係数
f_i	: コリオリ項
g	: 重力加速度 (=9.8m ² /s)
$H_{1/3}$: 有義波高
h	: 水深
h_m	: 流入側の水深
Δh_a	: ケーソン前後の水位差
Δh_b	: 潮差
Q_a	: 定常流の流量
Q_b	: ケーソン内の平均透過流量
S_i	: 海面応力項
$T_{1/3}$: 有義波周期
u_i	: i 方向の流速
v	: 断面平均流速
α	: 損失係数

ζ : 水位
 $\eta_{1, 2}$: 容量式水位計
 ρ : 海水密度

付録A-1 湾内の水質観測結果 (水温)

太線：4月20日 満潮時 14:12

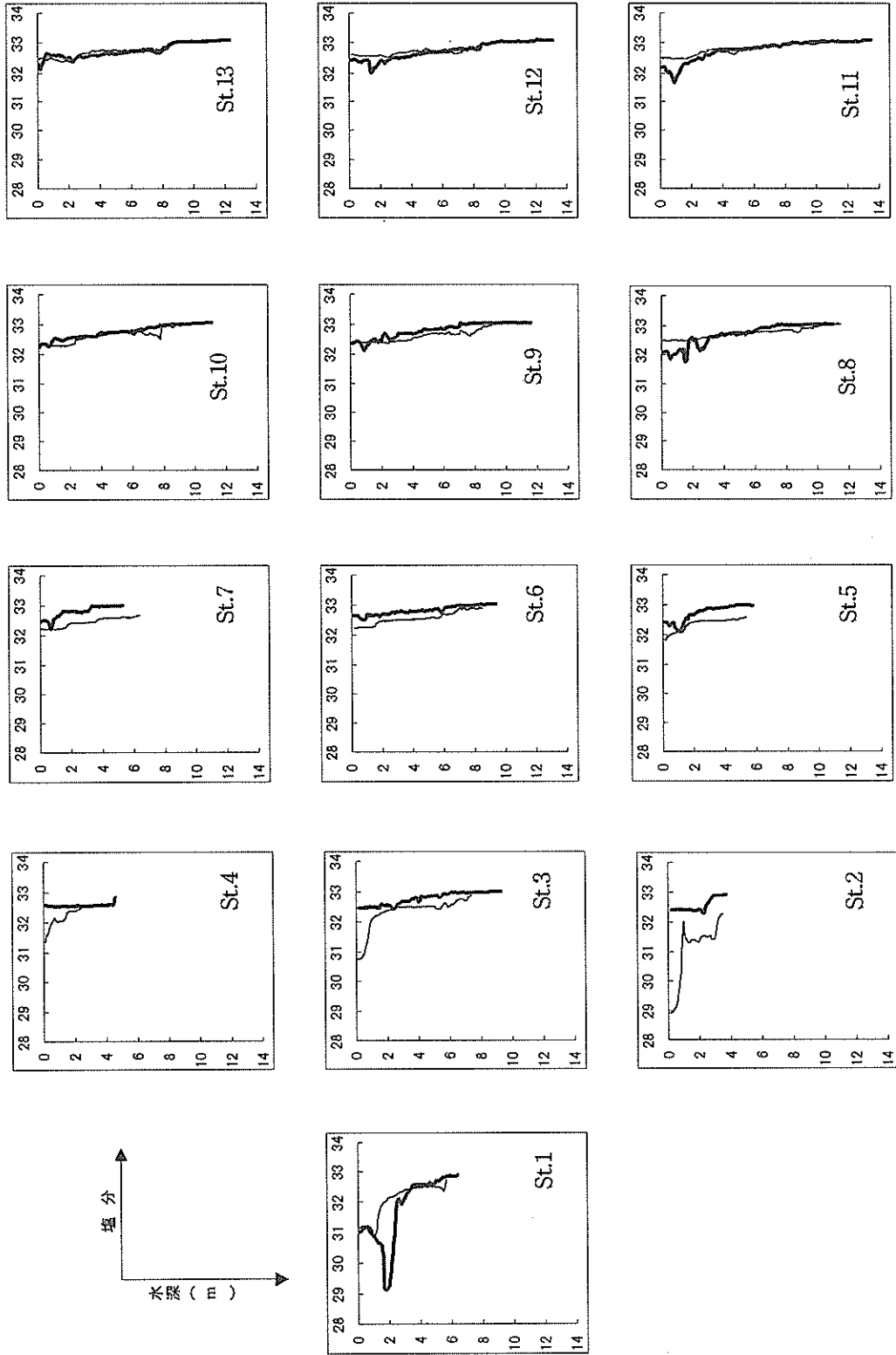
細線：4月21日 干潮時 10:32



付録A-2 湾内の水質観測結果(塩分)

太線: 4月20日 満潮時 14:12

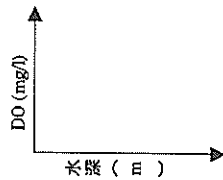
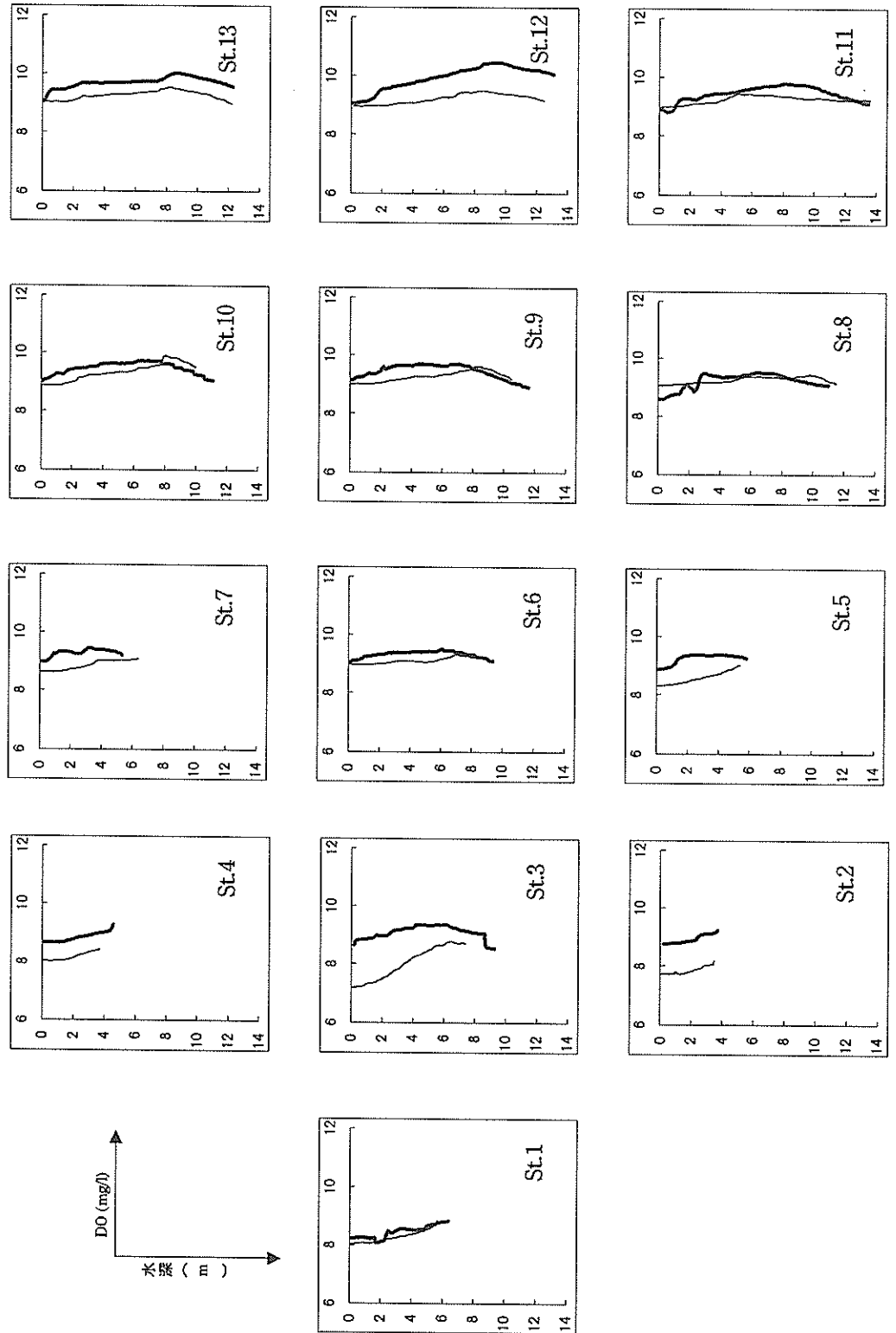
細線: 4月21日 干潮時 10:32



付録 A-3 湾内の水質観測結果 (DO)

太線：4月20日 満潮時 14:12

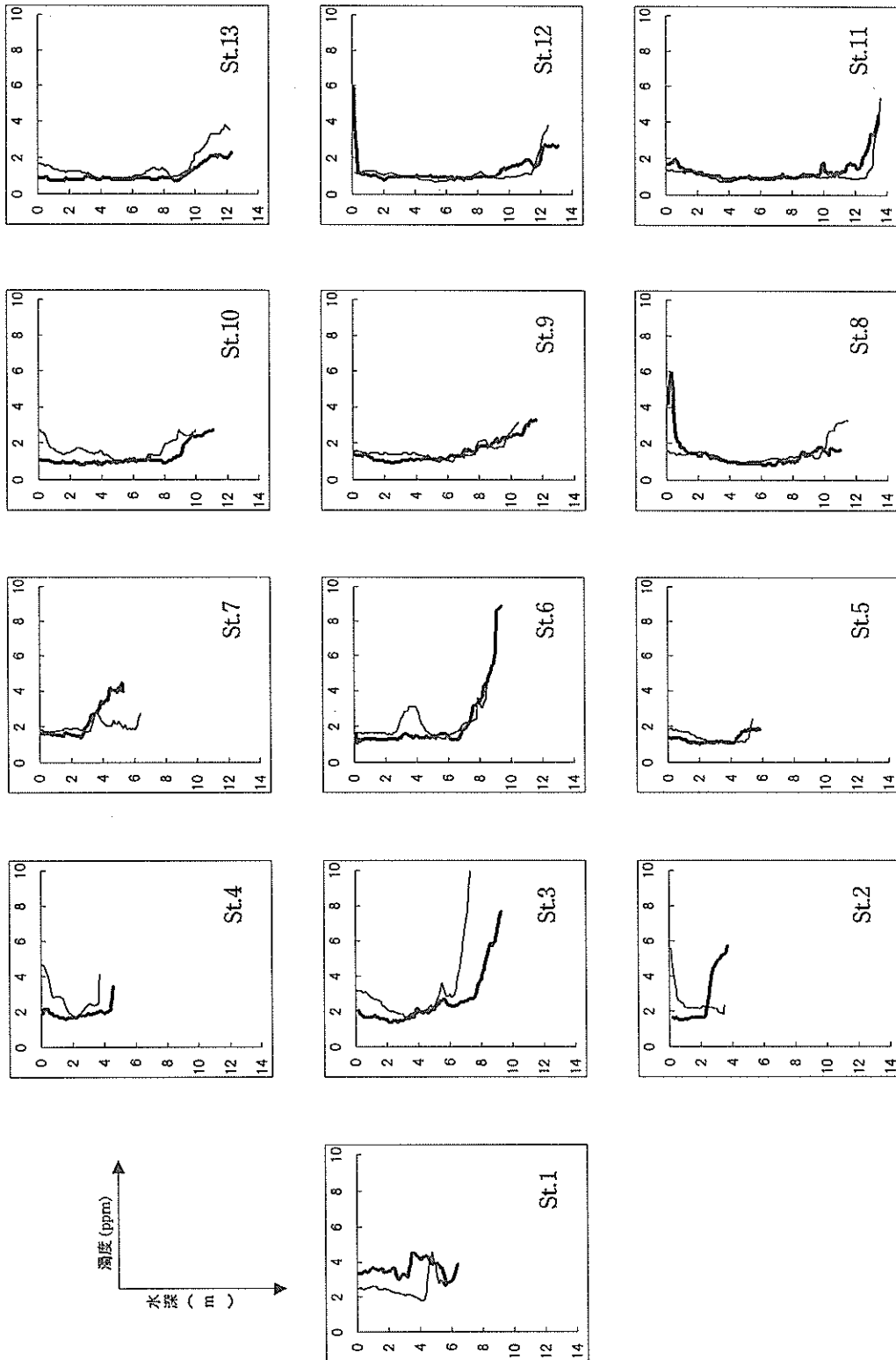
細線：4月21日 干潮時 10:32



付録A-4 湾内の水質観測結果 (濁度)

太線：4月20日 満潮時 14:12

細線：4月21日 干潮時 10:32

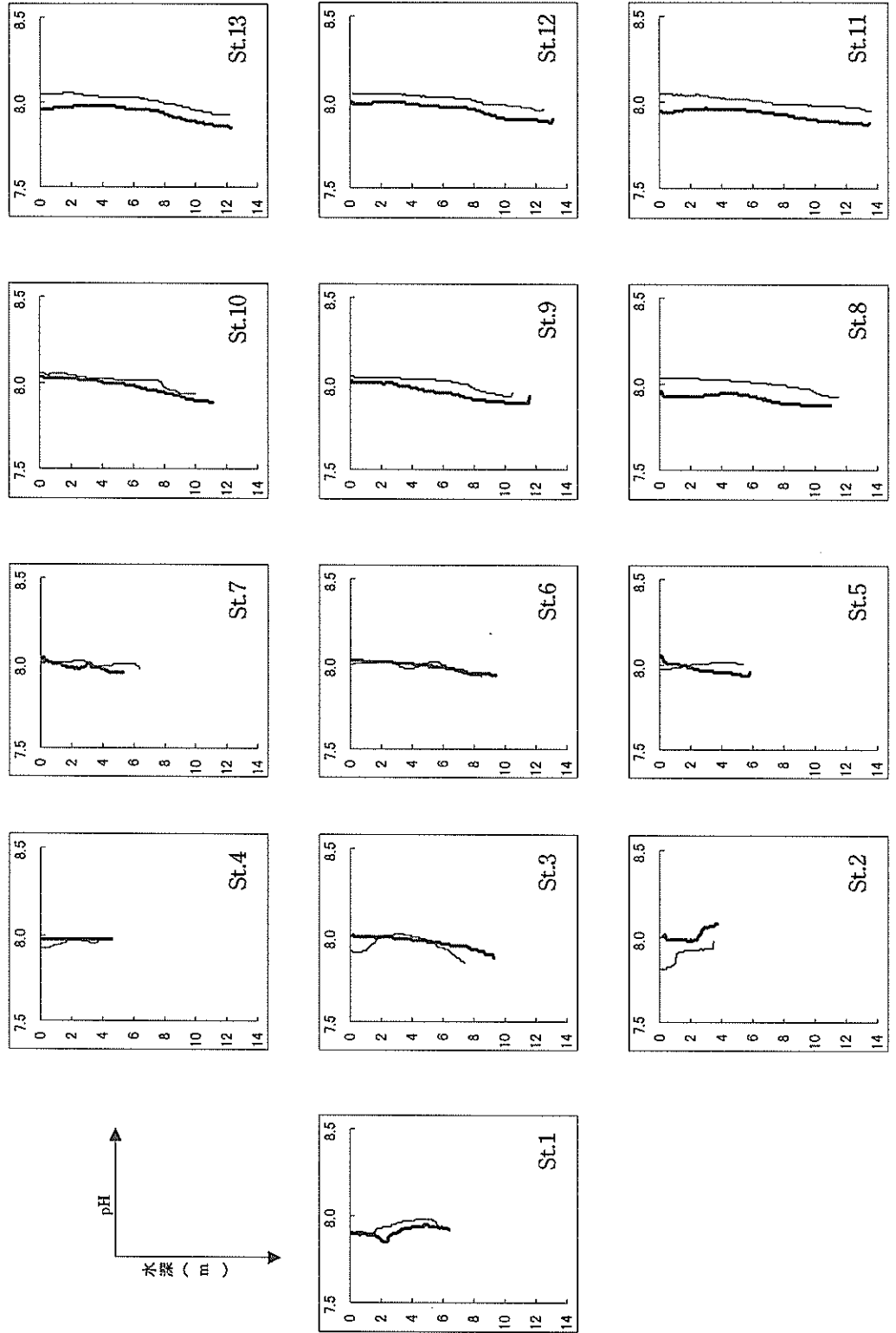


濁度 (ppm)
水深 (m)

付録A-5 湾内の水質観測結果 (pH)

太線：4月20日 満潮時 14:12

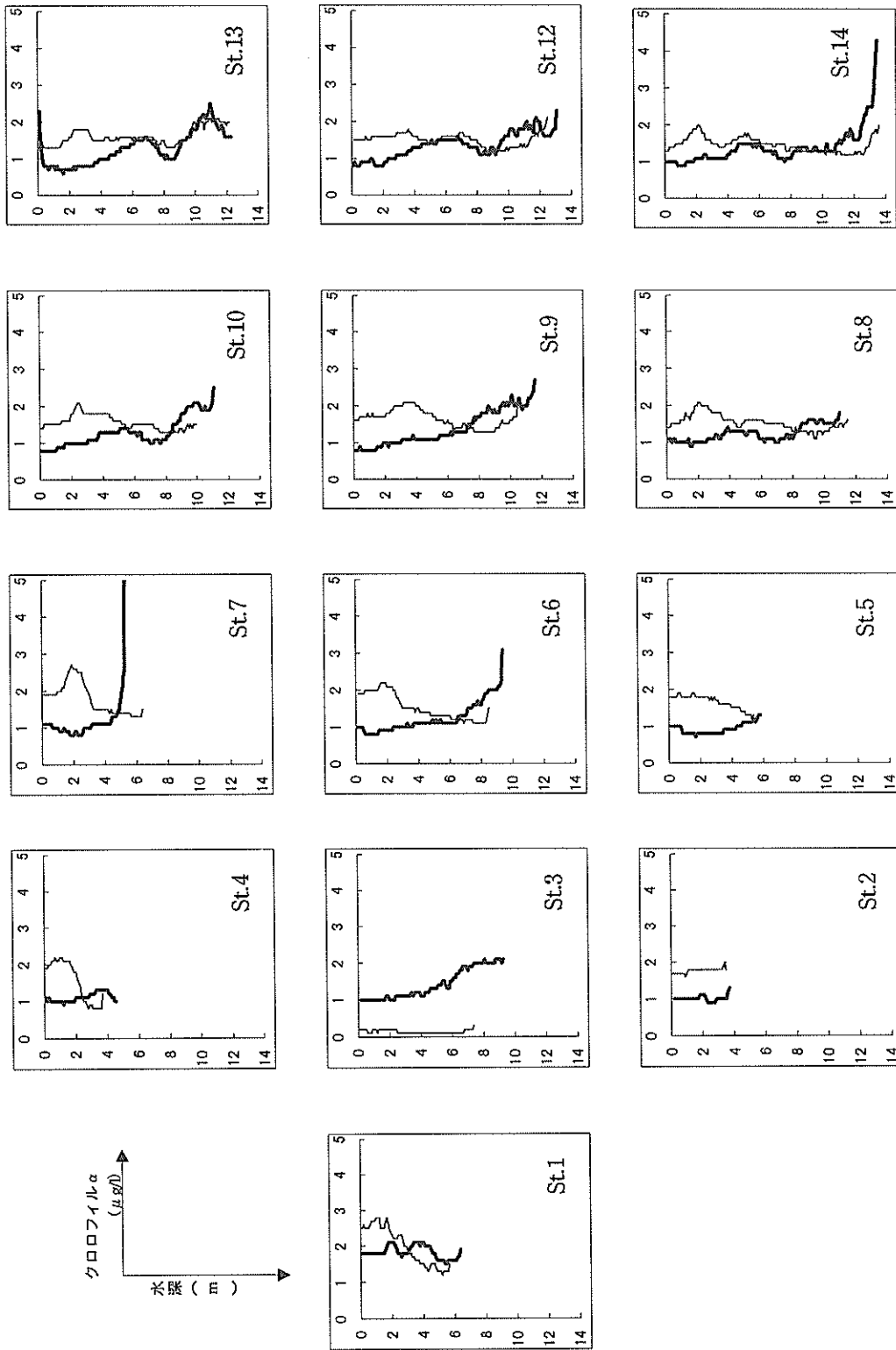
細線：4月21日 干潮時 10:32



付録A-6 湾内の水質観測結果 (クロロフィルa)

太線 : 4月20日 満潮時 14:12

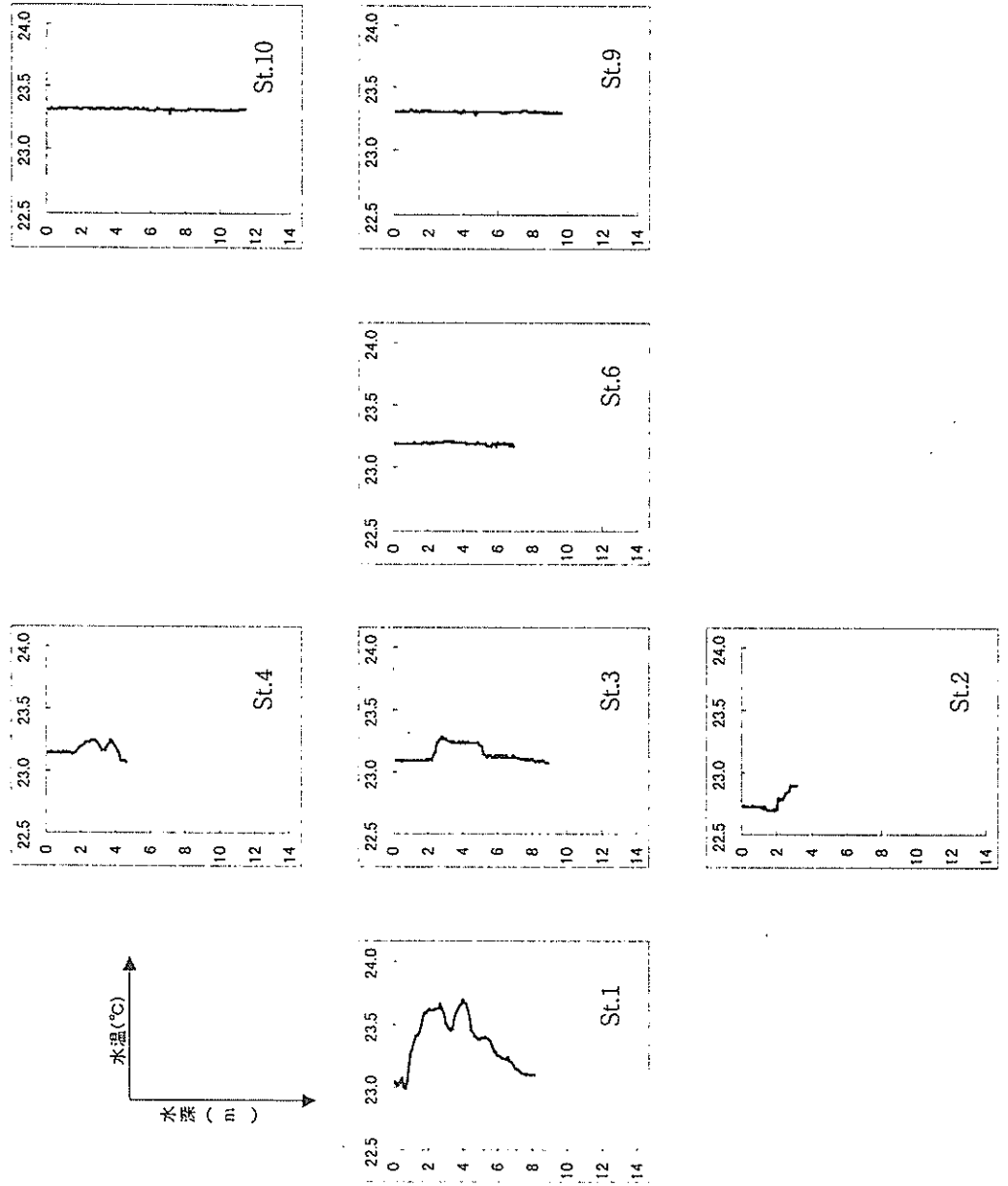
細線 : 4月21日 干潮時 10:32



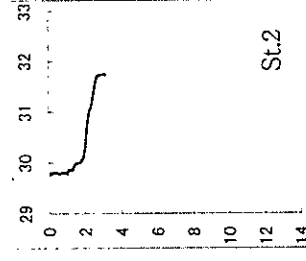
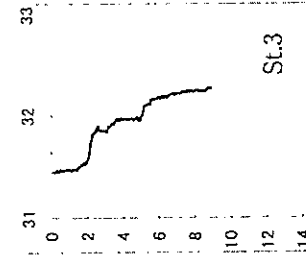
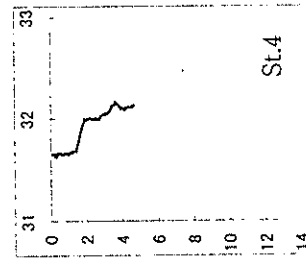
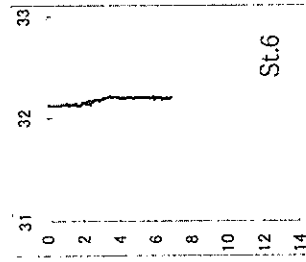
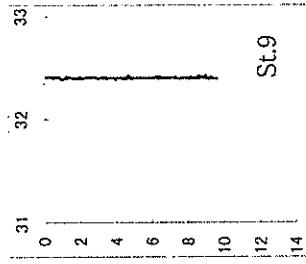
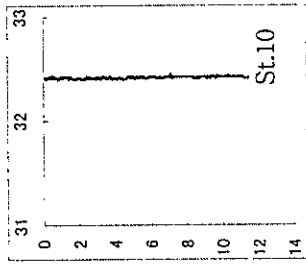
クロロフィルa
($\mu\text{g/L}$)

水深 (m)

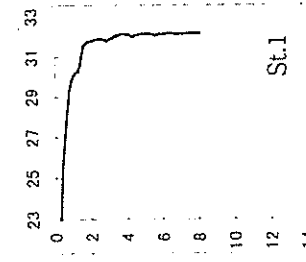
付録B—1 湾内の水質観測結果 (水温)
10月13日 上げ潮最強時 13:00



付録B—2 湾内の水質観測結果 (塩分)
10月13日 上げ潮最盛時 13:00

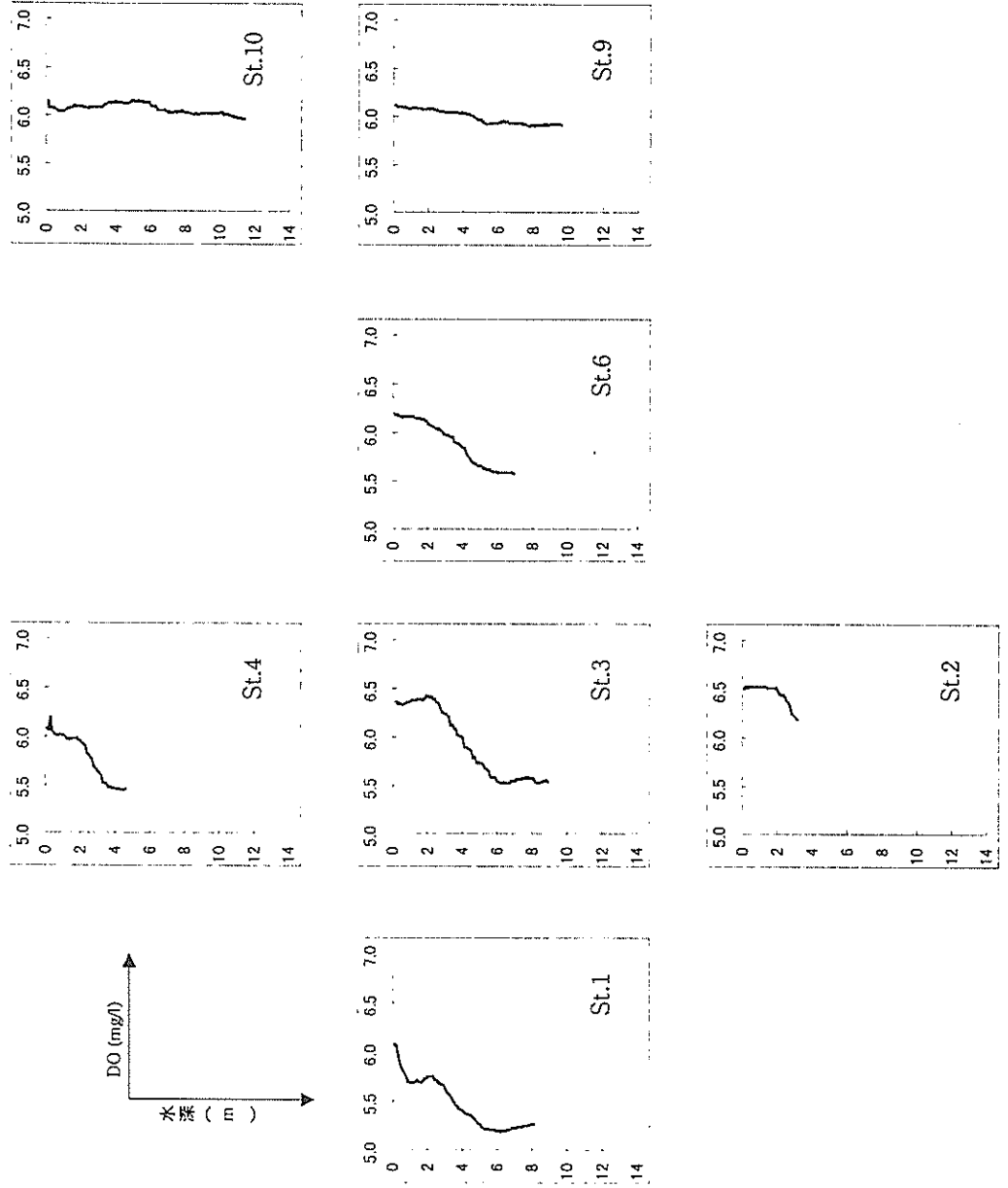


*St.1, 2は横軸スケールが異なる



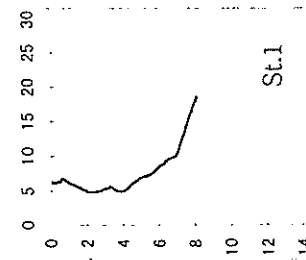
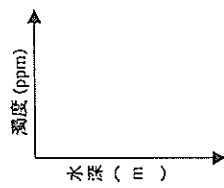
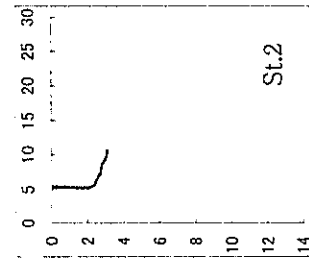
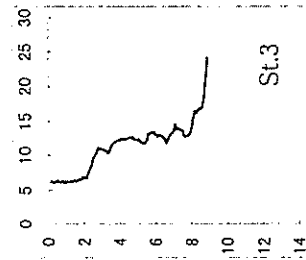
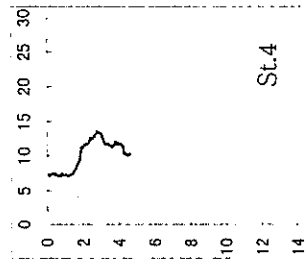
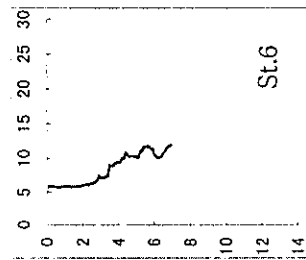
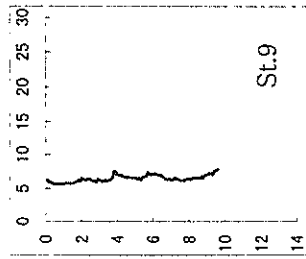
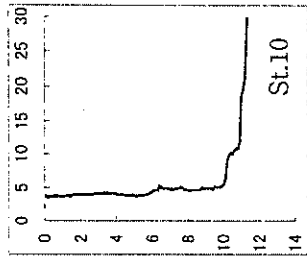
付録B—3 湾内の水質観測結果 (DO)

10月13日 上げ潮最強時 13:00

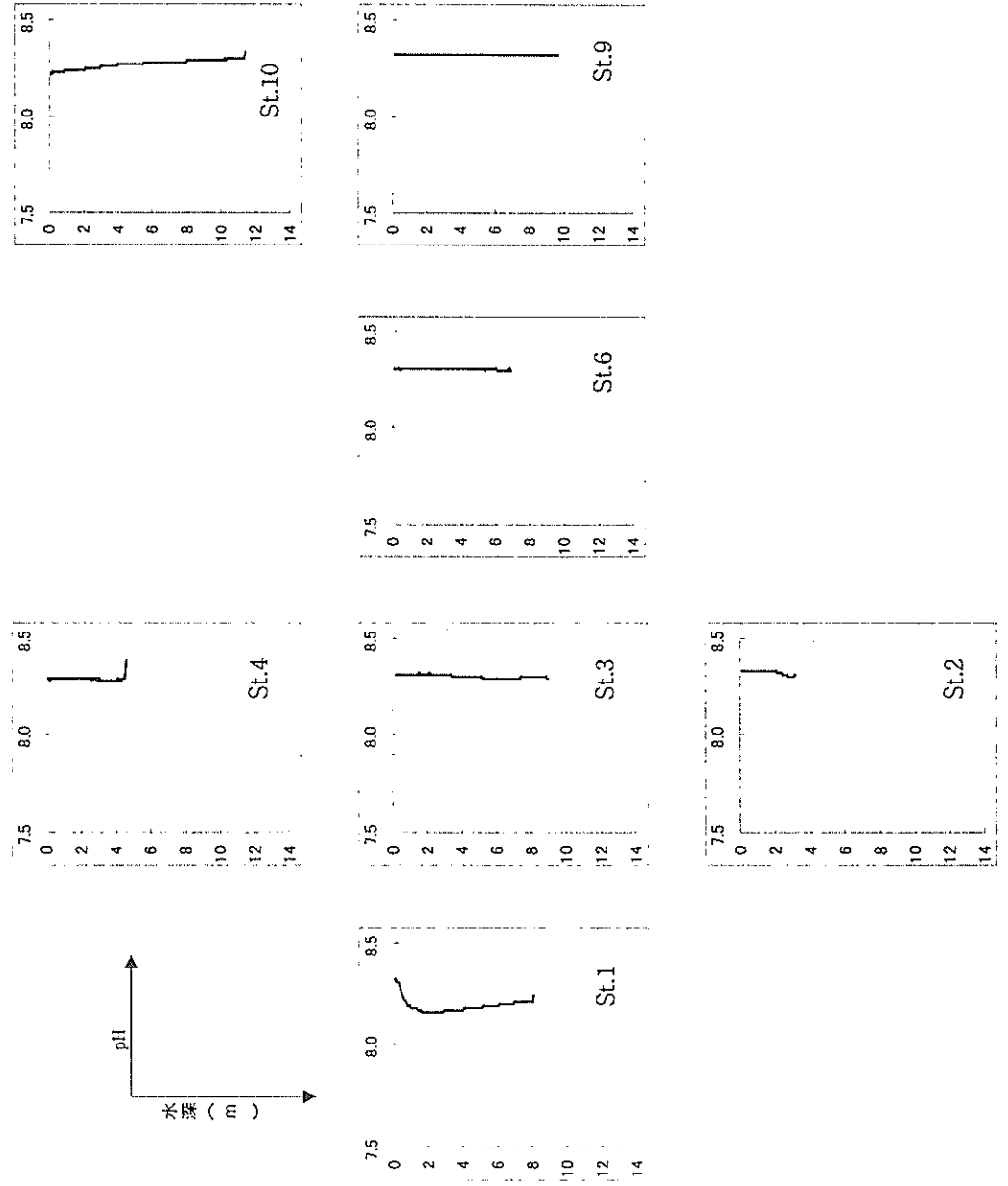


付録B—4 湾内の水質観測結果（濁度）

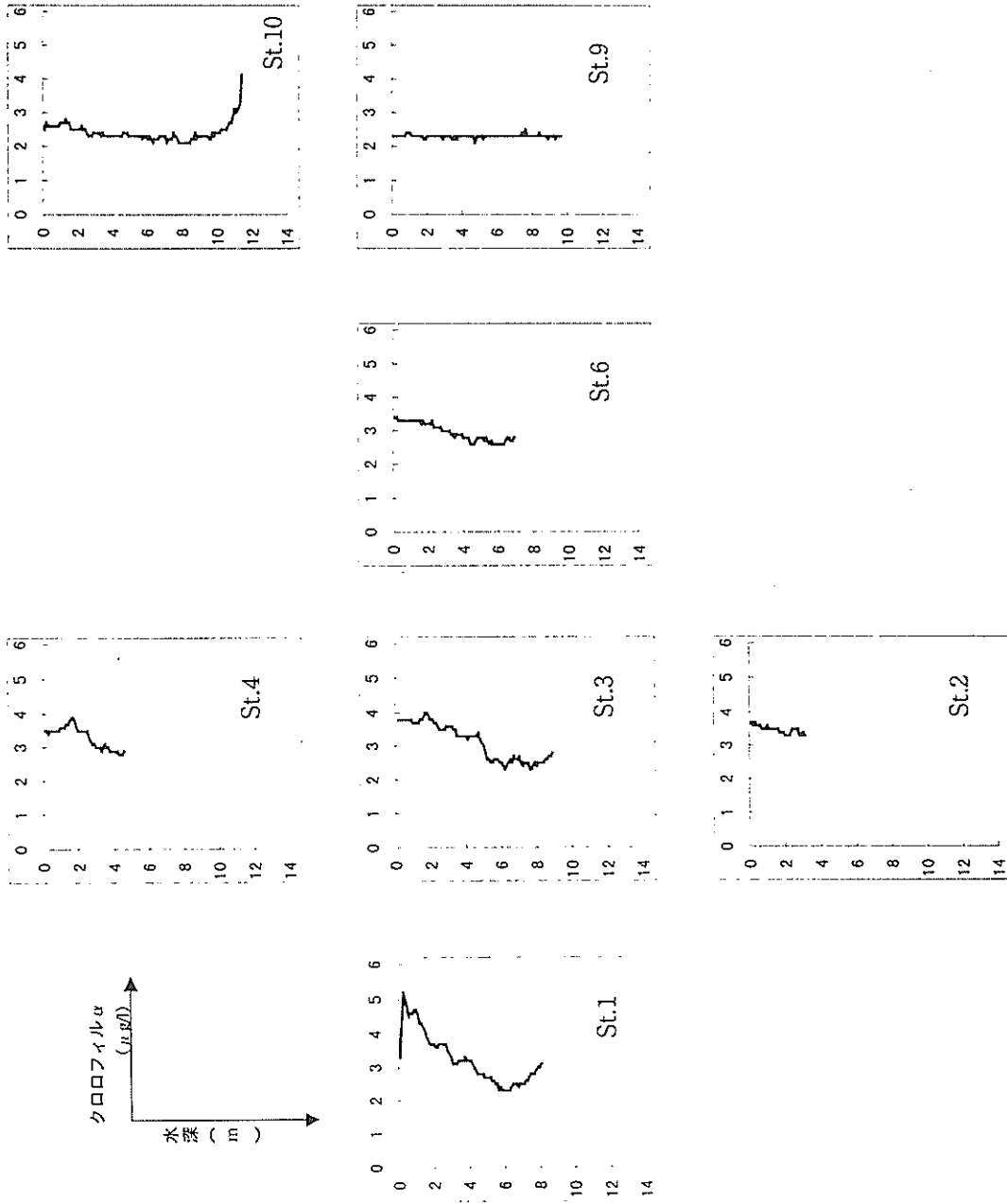
10月13日 上げ潮最強時 13:00



付録B—5 湾内の水質観測結果 (pH)
 10月13日 上げ潮最強時 13:00



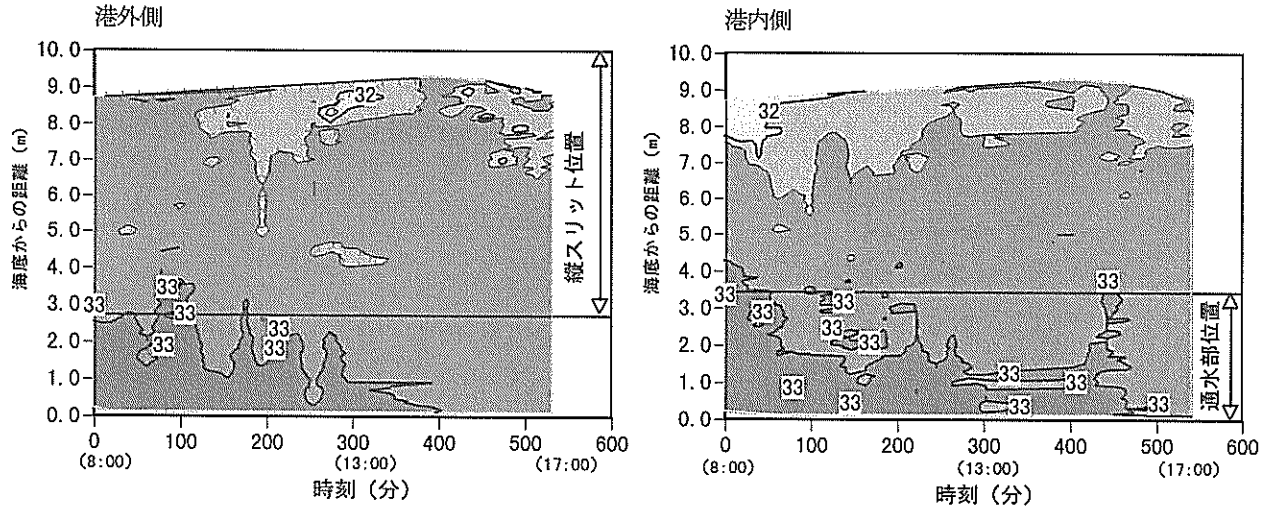
付録B—6 湾内の水質観測結果 (クロロフィル a)
 10月13日 上げ潮最強時 13:00



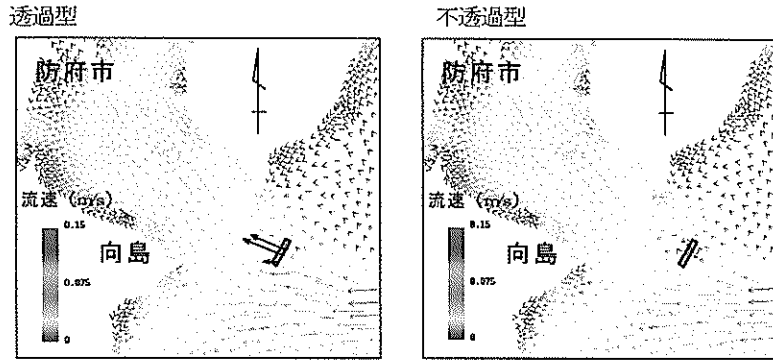
付録C 防波堤の港外、港内側における塩分の経時変化（4月20日 8:00～17:00，測定間隔：20分）

横軸が時刻，縦軸が海底面からの距離を示す。図中には，塩分濃度を記す。

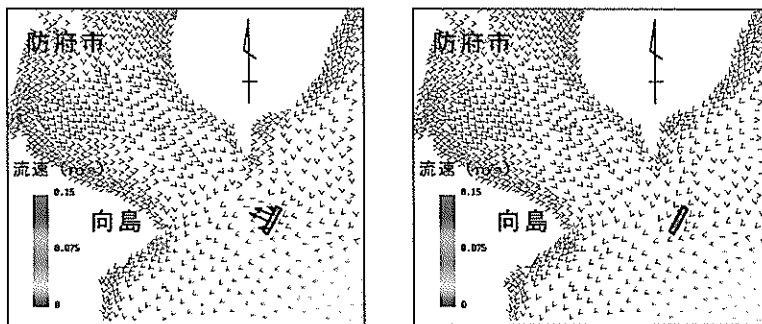
このとき，上げ潮，下げ潮ともなうケーソン内の流れ方向は，防波堤に対し直角ではなかった（図-11（b）参照）。



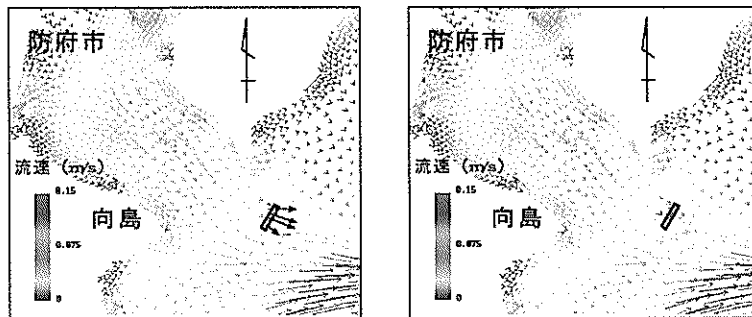
付録D 透過型（下部透過型スリットケーソン）と不透過型ケーソンの流れ場の計算結果比較（流速ベクトル図）。流速の値が色別で表示されている。図中の四角で囲った部分が透過型および不透過型のケーソンを示す。透過型の流速ベクトル図については、透過流速の大きな黒矢印で表示されている。



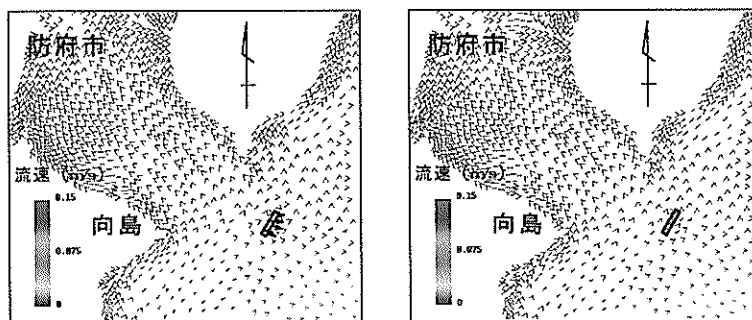
(a) 上げ潮最強時



(b) 満潮



(c) 下げ潮最強時



(d) 干潮