

ノート

音響探査機 (SC-3) と曳航式水質計 (TPM CLOROTEC) を用いた塩水くさび・塩分躍層調査

徳岡隆夫¹・吹田 歩¹・立石雅昭²・西村清和³
安間 恵⁴・松田滋夫⁵・川澄敏治⁶・関 達雄⁶

Saline wedge observation by echo-sounding equipment (SC-3) and towing type water quality monitor (TPM CLOROTEC)

Takao Tokuoka¹, Ayumi Fukita¹, Masaaki Tateishi², Kiyokazu Nishimura³,
Kei Anma⁴, Shigeo Matsuda⁵, Toshiharu Kawasumi⁵ and Tatsuo Seki⁶

Key words: SC-3 acoustic profiling system; towing type water quality monitor; saline wedge observation

1. はじめに

河口域の塩水くさびや汽水湖の塩分躍層の調査では躍層面の動きとその上下の水質の変化を時空的に捉える必要がある。前者については塩水くさび音響プロファイリングシステム (航走式, SC-3 型) が開発され, これまでに中海や江の川において調査が行われ, 塩水くさび・塩分躍層の時空的な変化を可視化して捉えられるようになった (例えば徳岡ほか, 2001)。しかしながら, 音響探査では水中の音響インピーダンス (密度と音速の積) の異なる境界を捉えるので, 塩分の違いが大きく効いてくることになるが (西村ほか, 1994), 塩分などの水質については別途測定する必要がある, これまでは停船して測定するなどの方法に拠っていたために, 調査に機動性を欠いていた。今回, アレック電子株式会社の TPM CLOROTEC を上記の音響探査機とともに曳航して調査を行い, 効率的な調査を行うことができたの

で, その結果について報告する。なお, 船上でのナビゲーションはフリーソフトの Kashmir 3D を用いて行った。

使用した機器は以下のとおりである。

・塩水くさび音響プロファイリングシステム SC-3 型 (千本電機株式会社製) (写真 1)

航走しながら 200 kHz の超音波を水面から水底に向かって発信し, 塩分躍層で生じる反射波を受信し, 塩分躍層の分布, 形状を記録断面として捉えることができる。また, 反射信号はデジタル化されデータ収録器に記録される (徳岡ほか, 2001)。本システムは, 受信部を改良した水中音響探査機本体とデジタル収録装置から構成される。音響探査機本体は発信部, 受信部および感熱式記録部から構成され, 従来の装置に比べ, 小型軽量化, 低消費電力化が図られている。一方デジタル収録装置は, A/D 変換器, シングルボードマイクロコンピュータ, 液

¹ 徳岡汽水環境研究所 Tokuoka Laboratory for Studies of Brackish Water Environments, Hizu-cho 34-1, Matsue 690-0863, Japan

² 新潟大学理学部地質科学教室 Department of Geoscience, Faculty of Science, Niigata Univ. Igarashi, Niigata City, 950-2181, Japan

³ 産業技術総合研究所 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba 305-8567, Japan

⁴ 川崎地質株式会社 Kawasaki Geological Engineering Co.Ltd., Minato-Ku, Tokyo 108-8337, Japan

⁵ クローバテック株式会社 Clovertech Inc.

⁶ アレック電子株式会社 Alec-electronics, Co. Ltd., Nishi-Ku, Kobe City, 651-2242, Japan



写真

1. 船上に設置した塩水楔音響プロファイリングシステム SC-3 (右：デジタル記録器，中央：アナログ記録器； 送受波器は舷側に固定している．阿賀野川での調査)
2. 曳航する TPM CLOROTEC (翼の中央先端から出ているケーブルは船上でのリアルタイム観測用ケーブルで，パソコンに接続；阿賀野川での調査)
3. 舷側に固定した塩水楔音響プロファイリングシステム SC-3 と曳航する TPM CLOROTEC による中海での観測状況
4. 船上で音響，水質記録をリアルタイムでチェック，ウインチで TPM CLOROTEC の深度を調節する．阿賀野川での調査)

晶ディスプレイ等から構成されており，音響探査機で得たアナログの反射信号をデジタル化しハードディスク等に収録する．同時に液晶ディスプレイに記録をカラー表示し，モニタすることができる．また，GPS 受信機を備えていて，測位データが同時に記録される．

塩水くさび音響プロファイリング
システム SC-3 の仕様概要

水中音響探査機本体

送受波器 周波数 200 kHz 電歪式，指向角 半減全角 6 度
 発信回数 5 回/1 秒
 レンジ幅 10 m または 20 m

可測深度 送受波器下 0.4 m-125 m

記録方式 感熱記録方式

アナログ出力 ±5 V オペアンプ出力，5 V 正論理トリガ出力

デジタル収録装置

12 bit A/D 変換器，シングルボードコンピュータ，カラー液晶モニタ
 外部データストレージ (1 GB フラッシュメモリ)

・ TPM CLOROTEC (アレック電子株式会社製) (写真 2)

温度・塩分・クロロフィル a・濁度・深度の各センサを搭載していて，水平分布を求める曳航観測，鉛直分布を求めるプロファイル観測，時系列変化を

求める定点連続観測が変更を加えることなく実施できる。データは本体内蔵のメモリーに記録されるが、曳航用強力ケーブルを使用して、船上のパソコンに収録できる。この場合はGPS位置データの同時記録も可能である。

センサ	タイプ	測定レンジ	分解能	精度	時定数
水温	白金抵抗体	-5~40℃	0.001℃	±0.05℃	0.1秒
電気伝導度	電磁誘導セル	0~60 mS/cm	0.001 mS/cm	±0.05 mS	0.1秒
クロロフィル	蛍光散乱光	0~200 μg/l	0.005 μg/l	±2% FS	0.2秒
濁度	後方散乱光	0~200 ppm	0.005 ppm	±2%	0.2秒
深度	半導体水圧	0~200 m	0.3 cm	±0.3% FS	0.1秒

2. 阿賀野川での調査例

2004年11月19~20日にSC-3とTPM CLOROTECを用いた観測を行った(写真1, 2, 4; なお, 全体の結果については立石ほかにより別途報告される)。船速は3~4ノット, 後者の測定インターバルは1秒とした。11月20日の調査例について紹介する。測線を図1に示す。SC-3による観測結果にTPM CLOROTECによる深度および塩分のデータを重ねて図2に, またTPM CLOROTECによる深度・温度・塩分・濁度・クロロフィルaを図3に示す。なお, 阿賀野川では塩水遡上は最大で河口から14 km上流に至るとされているが, 観測時には流量が大きかったために, 河口から2 kmまでであった。この観測は阿賀野川大橋の少し下流から河口までで, 舷側に固定したSC-3および船先でTPM CLOROTECを深度調節しながら曳航して行われた。塩水くさびの先端を越えた位置から下流に向けて航走したためにまずTPM CLOROTECを水深1.5 mで曳航し, くさび先端

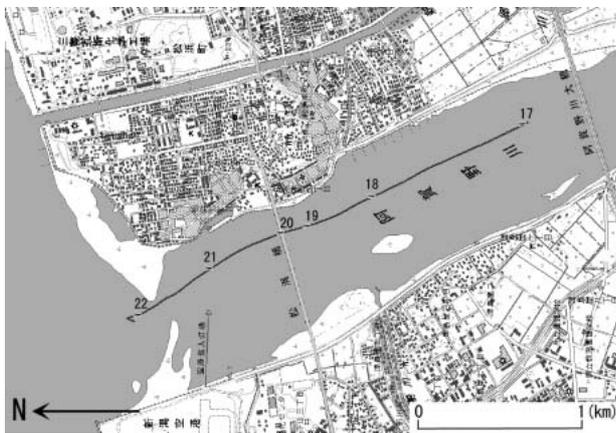


図1. 阿賀野川での調査測線(地形図は2.5万分の1「松浜」による)。

Fig. 1. Test route at R. Aganogawa, Niigata Pref.

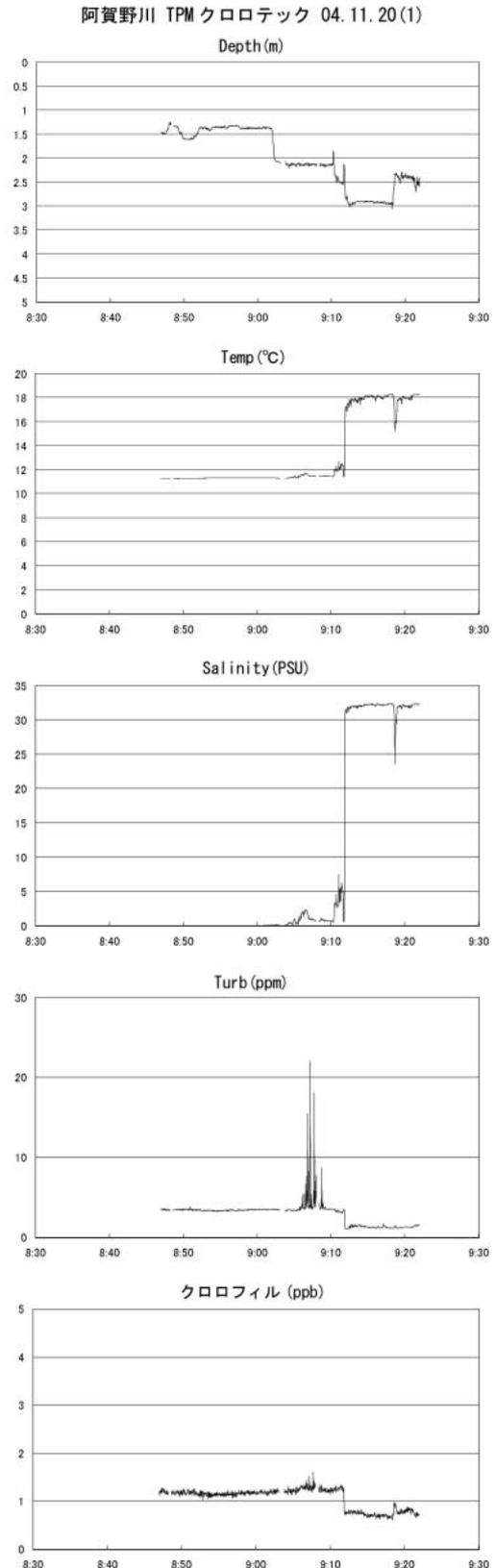
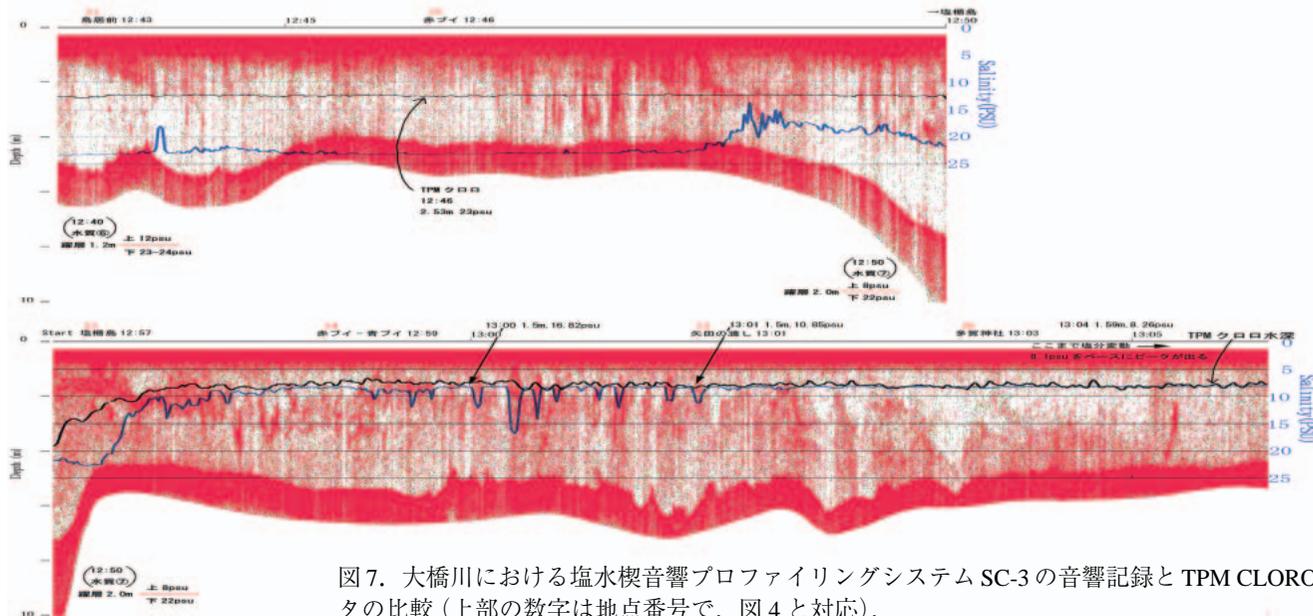
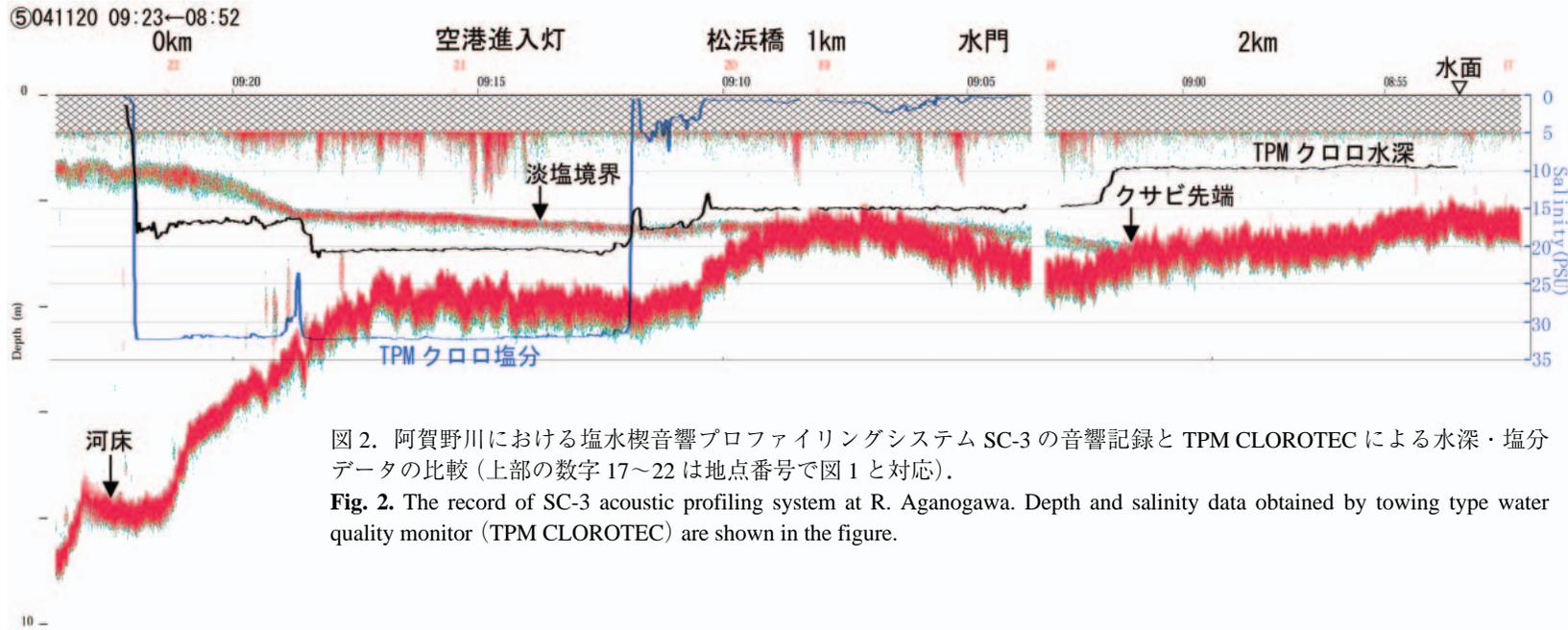


図3. 阿賀野川調査におけるTPM CLOROTECによる深度・温度・塩分・濁度・クロロフィルaの時系列変化(測定は1秒ごと)。

Fig. 3. Time-series data of Depth, Temperature, Salinity, Turbidity and Chlorophyll-a by TPM CLOROTEC at R. Aganogawa.



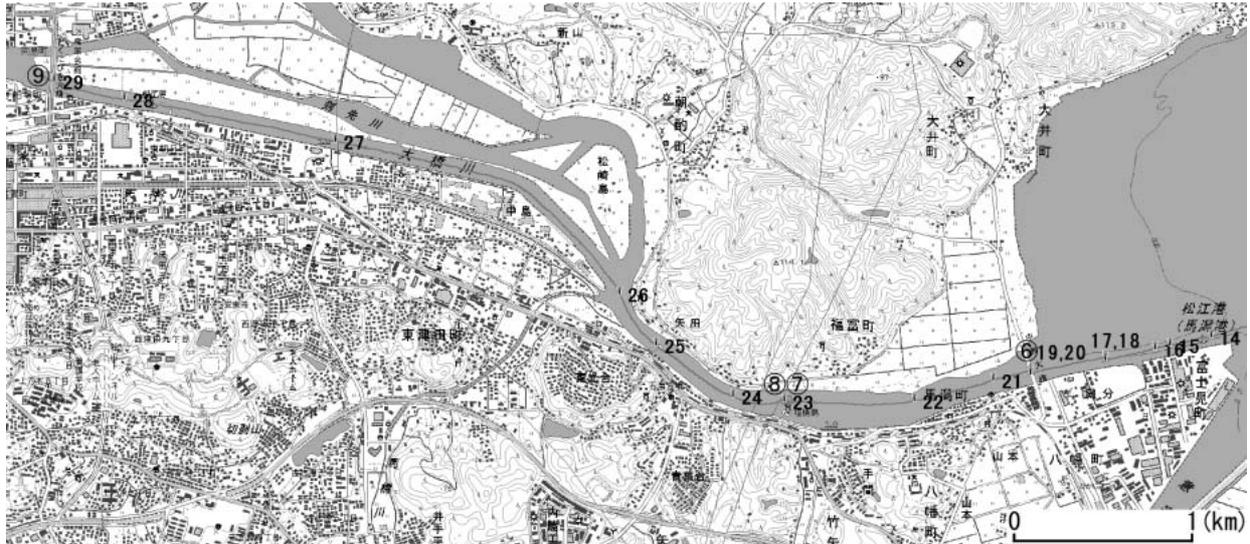


図4. 中海—大橋川での調査測線(大橋川の部分のみを示す. 数字は地点番号, 丸数字は COMPACT-CTDによる水質測定地点. 地形図は2.5万分の1「揖屋」および「松江」による.)

Fig. 4. Test route at Lake Nakaumi-R. Oohasi, Shimane Pref.

が確認されたところで水深2 mとし, 松浜橋より下流で淡塩境界よりも深い2.4 mとした. 図2に示すように, 淡塩境界面より上に TPM CLOROTEC のセンサ部がある場合には塩分はゼロ, 境界面より下にある場合には塩分は32 psu 程度であるが, 境界面付近にセンサが位置すると, 塩分値が変化することがよくわかる. なお, 図3には TPM CLOROTEC による全測定項目を示しているが, 温度・濁度・クロロフィル a についても塩分同様に淡塩境界面の上下で変化していることがわかる. TPM CLOROTEC による測定項目は船上においてリアルタイムで数値およびグラフで見ることができるので(写真4, ただし塩分については電気伝導度で示される), 音響データを参考にしながら上げ下げの操作を行うことによって船上で水塊の分布状況と水質を知ることができる.

3. 大橋川での調査例

2004年8月31日に中海の中浦水門—湖心観測塔—馬潟—大橋川(くにびき大橋まで)にかけて SC-3 と TPM CLOROTEC を用いた観測を行った. 馬潟沖から大橋川くにびき大橋までの測線を図4に示す. SC-3を舷側に固定し, 船尾近くから TPM CLOROTEC を曳航した(写真3). 船速は5~7ノット, TPM CLOROTEC の測定インターバルは1秒とした. なお, 両機を用いての観測は初めてのことであったので, 水質データのチェックのためにコンパ

クトCTD(アレック電子株式会社製, TPM CLOROTECと同じ深度・水温・塩分・濁度・クロロフィル a の各センサを搭載, 一定間隔の深度ピッチのプロファイル観測を連続的に容易に実施できる)を用いていくつかの地点で停船して水質測定を行った. 前日が台風で大荒れの天候となり, この日も通常は認められる中海の塩分躍層は乱れていて全体として混合が進んでいるという悪条件下での観測となった. 中浦水門からくにびき大橋までの全区間の TPM CLOROTEC による深度および塩分データを図5に, 停船して測定した水質データ(塩分のみ)を図6に示す. TPM CLOROTEC は測定開始時には水深4 mを越える深さから終了時には2 m以浅まで操作をしている. 音響記録では, 中海では通常は水深3 m程度に存在する塩分躍層が認められなかったが, これは前日の台風の影響によって成層が大きく乱され, 全体として混合が進んでいたことによる(図6の水質データ②③④を参照). しかしながら, 中海と大橋川の接合部に近くなるあたりからは表層近くに音響的に躍層が認められるようになり, 大橋川に入ると図7に示したように躍層が明瞭になり(図6の水質データ⑤⑥⑦を参照), 多賀神社(地点26)のあたりにくさびの先端が位置していることがわかる. これは宍道湖側から流下する表層近くの低塩分水塊と中海側から河床にそって遡上する中塩分水塊(ここでは約20 psu)の境界である. 図7の音響記録はノイズが強く出ているが, 台風による風の影響が残っているためである. 図7(上段)では TPM

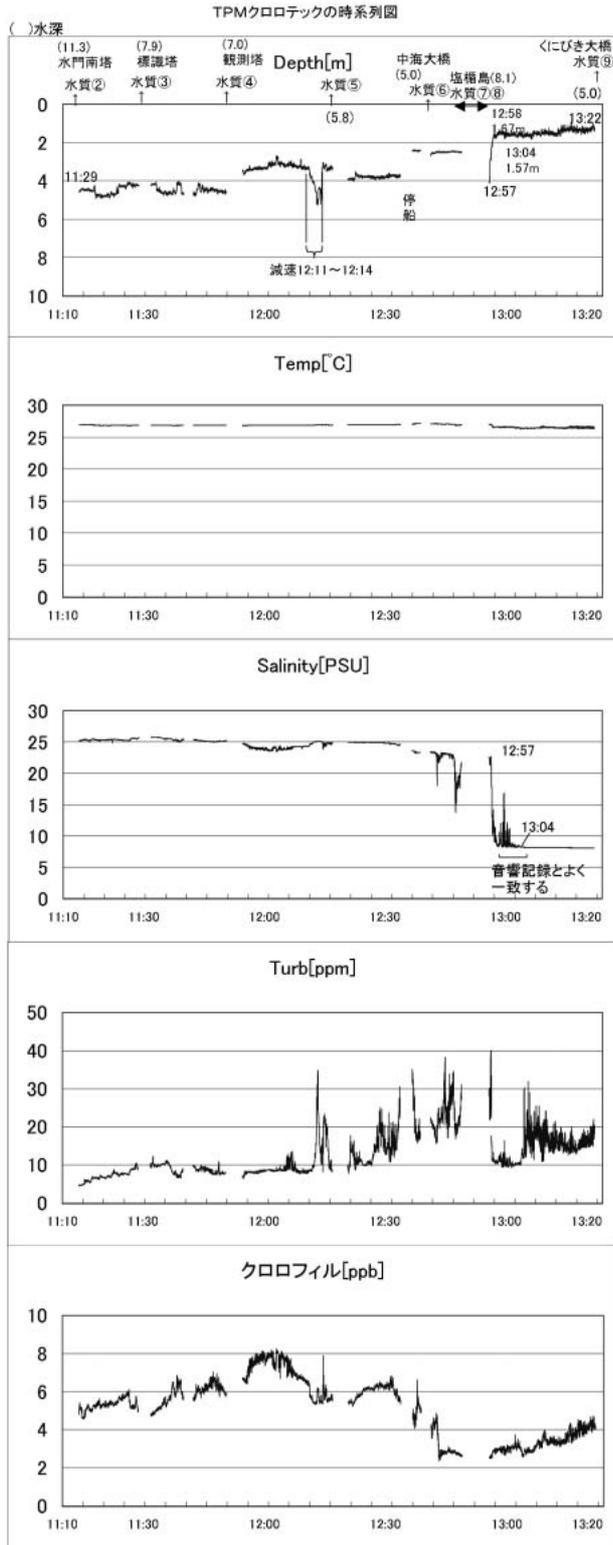


図5. 中海一大橋川調査における TPM CLOROTEC による深度・温度・塩分・濁度・クロロフィル a の時系列変化 (測定は 1 秒ごと)。
Fig. 5. Time-series data of Depth, Temperature, Salinity, Turbidity and Chlorophyll-a by TPM CLOROTEC at Lake Nakaumi-R. Oohasi.

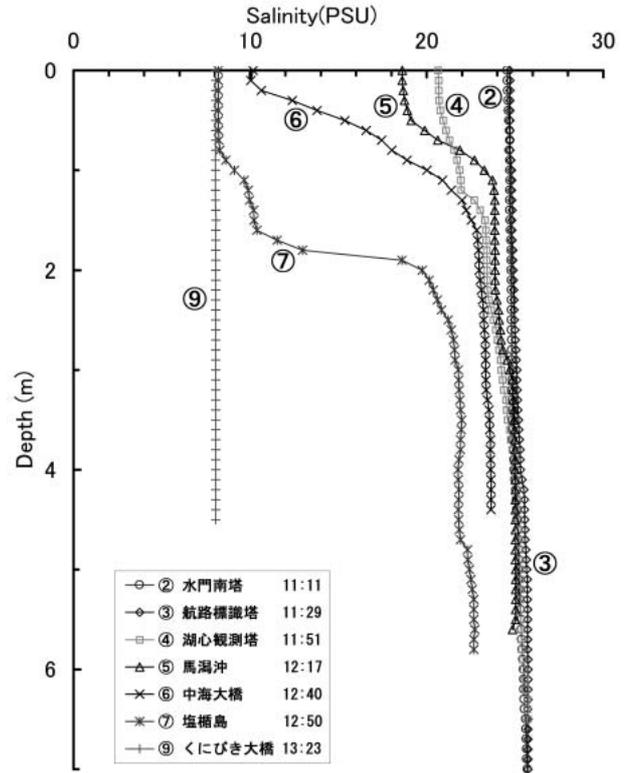
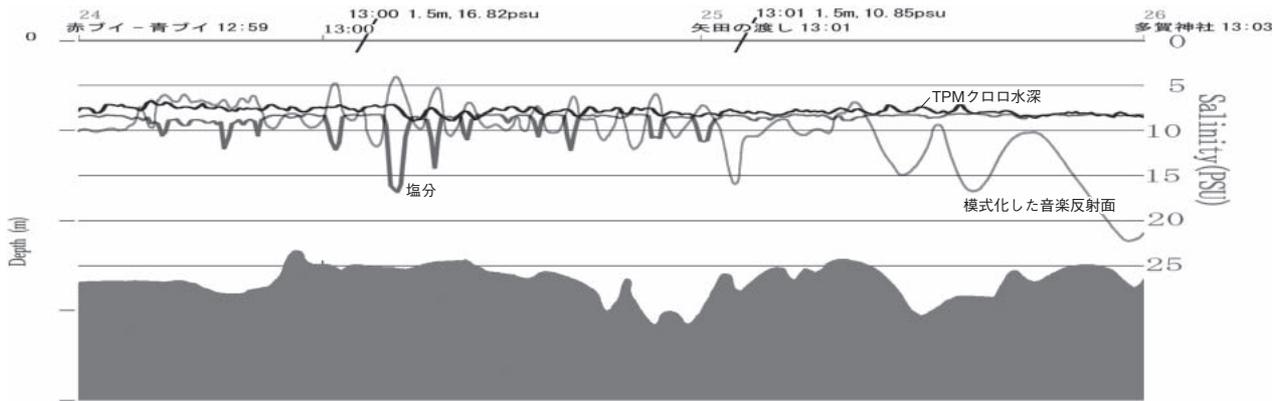


図6. COMPACT-CTD による地点ごとの水質 (塩分のみを示す) の深度変化 (地点については図4を参照)。
Fig. 6. Vertical distributions of salinity by COMPACT CTD at Lake Nakaumi-R. Oohasi.

CLOROTEC のセンサ位置が常に躍層より下位にあり、塩分もほぼ 23 psu 程度で一定している。これに対して図7(下段)では、躍層面が凹凸を繰り返しながらだいに深くなり、多賀神社を越えた辺りにくさびの先端が位置しているが、この間では TPM CLOROTEC のセンサ部が躍層面の上にあるか、あるいはその下に位置しているかで塩分の値が変化しているのがわかる。図7(下段)の音響記録と TPM CLOROTEC のセンサ位置 (深度)・塩分の変化を模式化して図8に示す。すなわち、音響記録と TPM CLOROTEC の塩分値の変化はよく対応していることがわかる。

コンパクト CTD で水質測定を行った地点について、TPM CLOROTEC で得られた水質データについて比較して表1に示す。後者は曳航していることにより深度に変動があるが、安定した深度帯のデータについて前者の同じ深度のデータと比較したものである。濁度に関しては、検定を TPM CLOROTEC はカオリン、COMPACT-CTD はホルマジンで実施しているためにほぼ倍の差が出た。また、クロロフィル a はセンサ形状の問題でややばらつきがある



10 -

図 8. 大橋川における音響記録と TPM CLOROTEC による深度・塩分データとの対応(地点 24~26 間の模式図).

Fig. 8. Schematic illustration of the relation between saline-wedge obtained by SC-3 and Depth/Salinity data by TPM CLOROTEC.

表 1. TPM CLOROTEC と COMPACT-CTD による温度・塩分データの比較 (後者の安定した深度の温度・塩分値を前者の同深度のそれぞれの値と比較).

Table 1. The comparison of Temperature/Salinity data obtained by TPM CLOROTEC with those by COMPACT CTD.

位置	コンパクトSTD 測定時刻	対応するTPM 安定した時刻	深度 (m)	温度 (°C)	塩分 (PSU)	濁度 (ppm)	クロロフィル (ppb)
②中洲水門南塔	11:11	11:15	4.5	27.0	25.4	5.8	5.0
			4.5	26.9	25.2 1.5(~1.9)		3.9
③航路標識塔	11:29	11:27	4.3	26.8	25.4	8.9	5.3
			4.3	26.8	25.3	4.0	4.8
④湖心観測塔	11:51	11:49	4.5	26.8	25.1	8.1	6.2
			4.5	26.8	25.2 2.7(~3.0)		4.4
⑤馬淵沖	12:17	12:16	3.4	26.9	24.8 10~19		5.6
			3.4	26.9	24.9	3.2	4.4
⑥中海大橋	12:40	12:39	2.5	27.1	23.5	18.5	4.8
			2.5	27.2	23.2 5.0(~5.9)		3.7
⑦塩橋島	12:50	12:49	2.5	27.0	21.9	28.0	2.7
			2.5	26.9	20.9 7.5(~8.8)		1.8
⑨くびき大橋	13:23	13:21	1.4	26.5	8.0	16.4	4.2
			1.4	26.4	8.1	7.7	2.8

が(精皮内), 温度および塩分についてはよい一致が得られている. この観測では5~7ノット, TPM CLOROTECの測定は1秒ごととしたが, このような曳航で精度良く測定ができたといえることができる.

4. ま と め

潮汐, 河川流量, 風・気圧などの気象条件によって汽水環境はさまざまに変化することから, その時空的变化を迅速に, 可視化して捉えることは重要である. 阿賀野川河口域と中海と宍道湖をつなぐ大橋

川での塩水くさびを曳航式の音響探査機・水質測定機器を用いてリアルタイムで観測した例について紹介した. このような観測方法は汽水域の水環境の研究と保全にとって有効である.

謝 辞

この調査を行うにあたり島根大学汽水域研究センターには江島分室および船の利用でお世話になった. 同センターの松本定夫氏には操船を, 大学院の中村健作氏には調査に協力いただいた. 阿賀野川の調査では松浜漁業協同組合に船の利用と操船でお世話になり, 伊藤健作氏には調査に協力いただいた. これらの機関と各氏にお礼申し上げます.

参 考 文 献

- 徳岡隆夫・三瓶良和・西村清和・須崎 聡・松田滋夫・久保田俊輔・鈴木重教・上野博芳(2001)塩水楔観測システムの開発(テクノオーシャン 2000 ポスター展示の紹介), LAGUNA, 8, 101-110.
- 西村清和・安間 恵・土屋洋一・松田滋夫・徳岡隆夫・井内美郎(1994)塩水楔調査のための水中音響探査機の開発, LAGUNA, 1, 1-9.