

江の川の塩水楔—塩水湖上の長期連続観測 システムの開発— (予報)

徳岡隆夫¹・三瓶良和¹・亀井健史¹・西村清和²・須崎 聰³・
松田滋夫⁴・久保田俊輔⁵・鈴木重教⁶

Saline wedge at River Gonokawa -Development of long-term observation system of saline wedge behaviour- (Preliminary report)

Takao TOKUOKA¹, Yoshikazu SAMPEI¹, Takeshi KAMEI¹, Kiyokazu NISHIMURA²,
Satoshi SUZAKI³, Shigeo MATSUDA⁴, Shunsuke KUBOTA⁵ and Shigenori SUZUKI⁶

Abstract: We have developed a long-term observation system for the study of saline wedge at the mouth of river. The observation were carried out at the lower stream of River Gonokawa of Shimane Prefecture during December 14, 1997 and January 24, 1998. The following instruments were used for observation: (1) Underwater acoustic profiler for survey of saline wedge (SC-1 of Senbon Denki Co., Ltd.), (2) On-line type, underwater acoustic observation system for detecting of halocline (SC-2 of Senbon Denki Co., Ltd.), (3) Off-line type, underwater acoustic observation for detecting of halocline (CL-1 of Clover Tech Inc.), (4) Thermometry system using optical fiber distributed temperature sensor (DTS-80 of Y.O. systems Inc.), (5) CT multi-sensor cable remodeled by XCTD probes for measurement of salinity and temperature (Tsurumi-Seiki Co., Ltd.), (5) Electromagnetic current meter (Alec Electronics Co., Ltd.) and (6) Compact water temperature recorder (T.S. WaDaR of Tsurumi-Seiki Co., Ltd.). On the basis of acoustic profiling survey by ship, the front of saline wedge at River Gonokawa was observed to be located at 7.0km point from the river mouth on Dec. 14, 1997 and at 4.0 km point on Jan. 14, 1998, respectively. All instruments were arranged on the said date at the area between 5.4 km and 6.0 km from the river mouth. It was successfully observed that saline water had invaded at least twice to this area. This newly developed system has indicated to be very useful for long-term observation of saline-wedge.

Key words: saline wedge, echo sounder, optical fiber system, Gonokawa.

¹ 島根大学総合理工学部

Faculty of Science and Technology, Shimane University, Matsue 690-8504, JAPAN

² 工業技術院地質調査所海洋地質部

Marine Geology Department, Geological Survey of Japan.

³ 千本電機株式会社

Senbon Denki Co., Ltd.

⁴ クローバテック株式会社

Clovertech Inc.

⁵ 株式会社ワイ・オー・システム

Y. O. Systems Inc.

⁶ 株式会社鶴見精機

The Tsurumi-Seiki Co., Ltd.

はじめに

江の川は弱混合型（塩水楔型）の感潮河川の日本における代表的な例として知られている（図 1）。江の川では、通常塩水は河口から 4~7km の範囲で、潟水期には河口から上流 10km に至るまで溯上することがある。このような塩水溯上は気象的な原因（潟水や潮位・風・気圧の変化）や人為的な原因（利水や河口域の浚渫など）で生じたり、促進されることがあり、河川管理上でも問題とされている。また、地球温暖化による海面上昇では河口域での塩水侵入による被害や地下水への影響が生じる。

塩水楔は淡水と塩水の混合が弱く、両層間に明瞭な界面をもって下流側から淡水層の下に塩水層が楔型に溯上することから名付けられたものである。これまで塩水楔については水理学的研究の大きなテーマとして多くの観測例と数理的な取り扱いがされてきている（たとえば土木学会、水理公式集、昭和 60 年版）。しかしながら、江の川のみならずどの河川においても数理的な取り扱いの基礎となる観測データが各地点ごとの水質（とくに塩分）および流向流速を測定するという方法によっているために塩水楔の複雑な挙動を解明するには多くの弱点があり、またこの方法で精度を上げようとしても限界がある。

このような方法に対して、著者らは淡塩境界を音波探査によって捉え、塩水楔の挙動を観測するシステムを構築し、おもに汽水湖の中海・宍道湖で研究してきた（徳岡ほか、1994、1995；西村ほか、1994）。また、これらに光ファイバ式温度分布計測システムや流向流速計を併用することによって中海で塩分躍層の長期動態観測を行い、その挙動と気象条件との関係等について明らかにしてきている。（徳岡ほか、1996）。この観測方法は河口域の塩水楔にもそのまま適用が可能であることから、平成 9 年度の河川整備基金により江の川において観測を行う機会を得たので、同様の観測を行った。なお、本文中で述べるマルチ CT センサは共著者の西村清和（地質調査所）と鈴木重教（鶴見精機）により開発され、別途報告される（西村・鈴木・徳岡、1998 投稿中）。またオフライン式塩水楔探査システムについては西村清和（地質調査所）と松田滋夫（クローバテック）により開発中のもので、詳しくは別途報告の予定である。

江の川での観測の概要

江の川は中国山地を越えて日本海に注ぐ先行性河川で、下流部では豊富な水量と日本海側に位置していることから潮位差が小さく、また塩水溯上域に堰

堤などの溯上を妨げる構造物がなく自然状態がよく保存されていて観測に好適な河川であることなどの理由から塩水楔の実態把握にはもっとも条件の良い場所として知られている（たとえば西條・奥田、1996）。

次項で述べる 2 回の船上からの淡塩境界の探査結果と種々の観測条件を考慮して、観測区域を図 1 のように設定した。河口から 5.5km 地点を基点として各種機器を設置した。川床設置オンライン式の塩水楔音響探査システムはケーブル長が最大 400m、光ファイバは 700m、マルチ CT センサはケーブル長が 500m である。観測期間は潮の干満を考慮して 1 ヶ月以上とし、塩水溯上の起こりやすい冬季に行うこととした。結果としてこの期は異常気象から潟水は起こらなかったが、幸いにして観測期間中（1997 年 12 月 14 日~1998 年 1 月 24 日）に 2 回（あるいは 3 回）の塩水溯上を観測することができた。なお、各種機器の設置にあたってはスキューバダイビングによって設置状況を確認し、撤去時にも確認を行った。

使用・設置したのは以下の機器である。

- ・塩水楔音響探査システム（川床設置オンライン式、SC-2 型、千本電機株式会社製）

- 音響送受波器 3 基を川底に設置し、塩水溯上・降下の連続観測をオンラインで行った。

- ・塩水楔音響探査システム（川床設置オフライン式、CL-1 型、クローバテック株式会社試作）

- 音響送受波器 3 基を備えたバッテリー内蔵のオフライン探査装置を川底に設置し、塩水溯上・降下の連続観測を行った。

- ・光ファイバ式温度分布計測システム DTS80（株式会社ワイ・オー・システム製）

- 光ファイバケーブル（有効長 700m）を川底に設置し、水温分布の連続測定を行った。

- ・マルチ CT センサ（株式会社鶴見精機試作）

- ケーブル延長 500m の多芯ケーブルに電気伝導度・温度（CT）センサ 5 基を 50m 間隔に接続し、これを川底に敷設し、塩分・水温の連続測定を行った。

- ・流向流速計 2 基（メモリー電磁流速計 ACM-8M 型および ACM-16M 型、いずれもアレック電子株式会社製）

- 塩水楔音響探査システム SC-2 型および CL-1 型の近くの川床にそれぞれ設置し、流向・流速・水温（および 1 基では水深・塩分・濁度についても）の連続測定を行った。

- ・IC メモリ式小型水温計 T.S.WaDaR（株式会社鶴見精機製）

- 光ファイバの 2 地点に連結して水温の連続測定を行った。

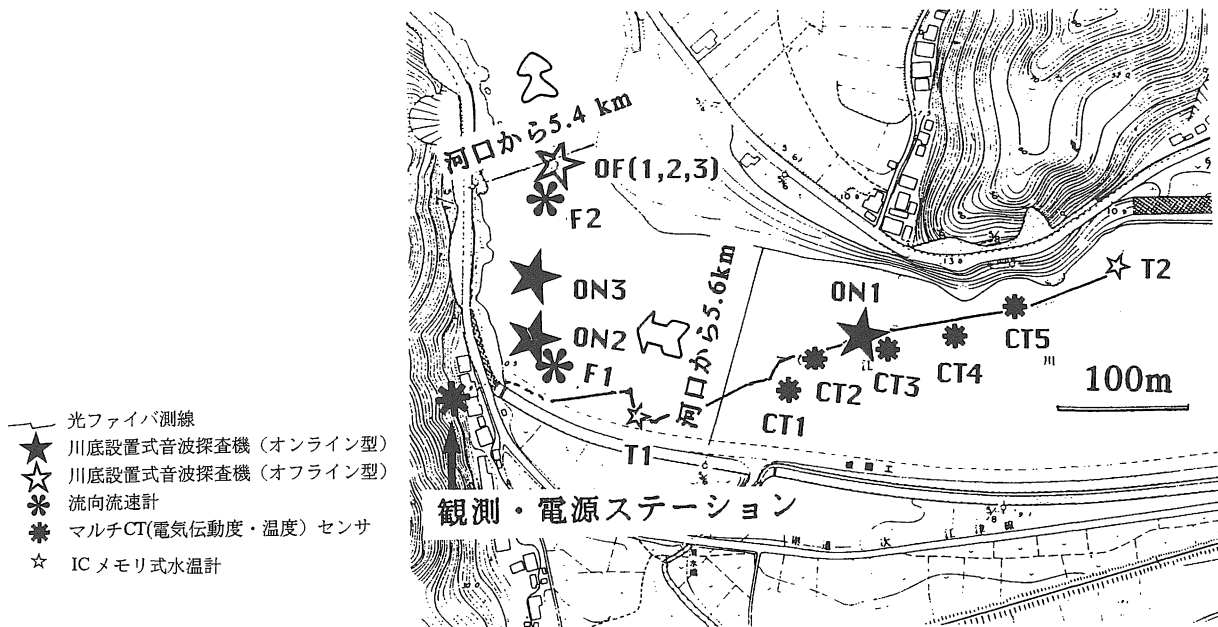
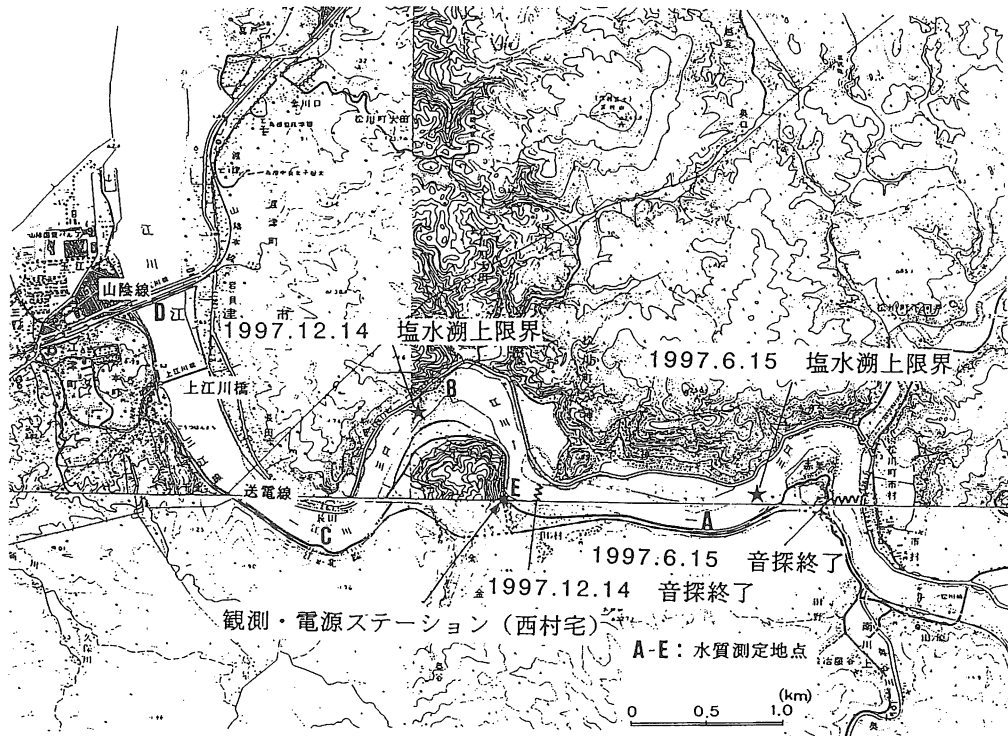


図1. 江の川の位置と下流部における塩水溯上調査 (1997年12月14日~1998年1月24日)
 上図は2万5千分の1国土地理院地形図(江津・浅利・都野津・川戸), 下図は建設省浜田工
 事事務所による江の川水系河川平面図5千分の1地形図で, 観測・電源ステーションおよび各種観
 測地点を示す.

Fig. 1 Index map showing observed area of the lower stream of R. Gonokawa.

なお、これらの設置に先だって船上からの淡塩境界の観測を塩水楔音響探査システム（航走式、SC-1型、千本電機株式会社製）によって1997年6月15日および機器設置日の1997年12月14日に行った。また、前者の機会に水温・塩分・溶存酸素などの測定を水深ごとに4地点（図1のA～D）で行った。

塩水楔音響探査システム（航走式、SC-1型）による塩水遡上状況の観測

塩水楔音響探査システム（航走式、SC-1型）は水中の躍層（おもに塩分・水温による）を捉えるために測深機をもとに改造・開発されたものである（徳岡ほか，1994；西村ほか，1994）。その基本原理は魚群探知機や音響測深機と同様に媒質中の音響インピーダンスの異なる境界（躍層）での音波の一部反射を捉えるものである。送受信周波数は200kHzである。

1997年6月15日の塩水遡上限界付近の記録を簡略化して図2に示す。塩水の遡上は河口から7.0km地点までである。また、12月14日には河口から4.0km地点までであった。記録に示されるように淡塩境界は一般にシャープな反射面として記録される。このことは淡塩境界が比較的薄い漸移帯で接していることを示している。水質測定の結果を図3に示す。淡塩境界は地点B,Cではシャープである。地点Aでは測定間隔が粗かったので問題があるが、同様にシャープに変化していると推定される。地点Dでは厚さ1mほどの間で変化している。境界面下の塩水はどの地点でも30psuを越えていて、海水がほとんど薄められることなく遡上してきていることがわかる。なお、後に図9でのべるように遡上する塩水の平均的な塩分は、上位の淡水との境界部を除けば30psu程度である。

塩水楔音響探査システム（川床設置オンライン式、SC-2型）による淡塩境界の時系列変化の観測

SC-2型は上記のSC-1型をもとに水底に設置するように開発したもので、設置地点での淡塩境界の状態変化を時系列で捉えることができる（徳岡ほか，1995）。ここでは径50cmの円形鉄板を台座として取付けた音響送受波器3基を図1のように設置した。送受信周波数は200kHzである。ON1（水深3.7m）、ON2（水深5.2m）、ON3（水深7.5m）はそれぞれ長さ400、200、200mのケーブルで探査システム本体に連結している。ON3の12月25日から12月31

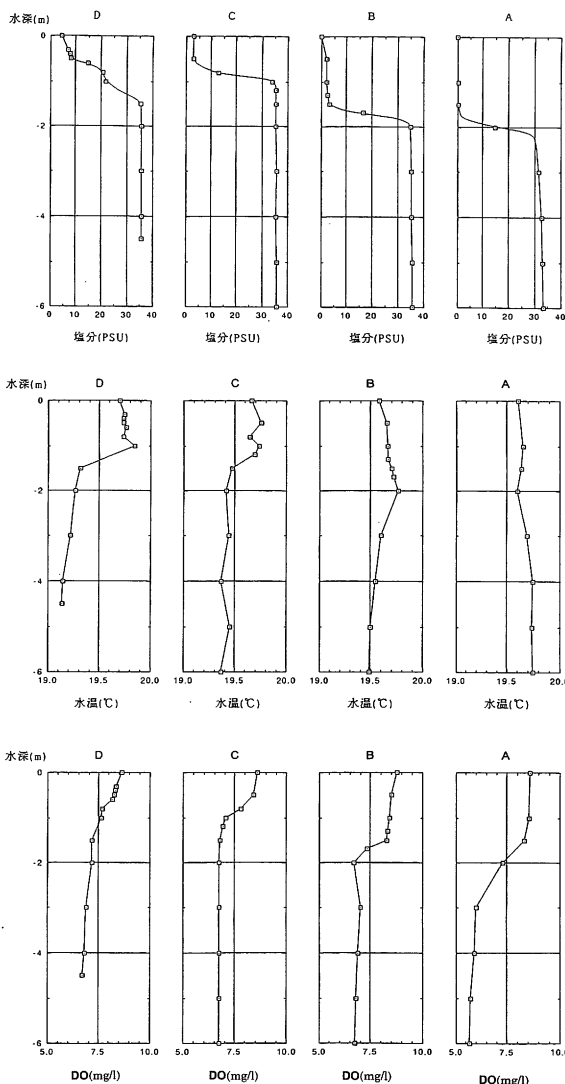


図3. 水質計による水質測定

塩水楔音響探査システムSC-1型によって1997年6月15日に船上から探査を行った際の塩分・水温・溶存酸素の測定結果。A～Dについては図1を参照。

Fig. 3 Salinity, water temperature and dissolved oxygen measurements at R. Gonokawa

日にかけての塩水遡上と降下の記録を簡略化して図4に示す。ON3地点を遡上する塩水が通過するのは1997年12月25日10時50分で、降下していくのは12月31日5時40分である。また図には示していないが、同様の遡上が1998年1月1日、降下が1月5日に起こっていて、観測期間中に2回の遡上・降下があったこと確認されている。同様のことは50m上流に設置されたON2でも観測された。ここでは遡上はON3に比べてやや遅れ、降下はやや先行している。なお、これらの送受波器は設置高が14cmあることと音源の残響が強く（記録では赤く）記録されることから川底から1mまでの高さについては観測はできない。従ってここでの記述は川底より1m

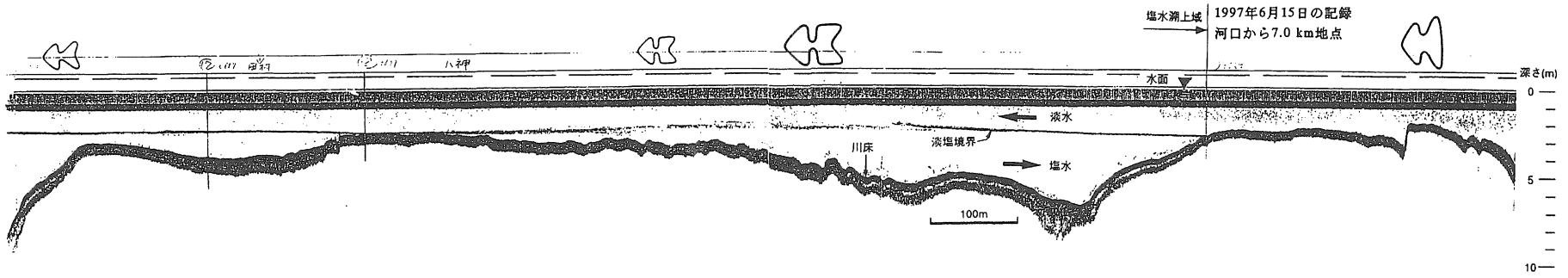


図2. 船上からの探査による江の川の塩水潮上状況

塩水楔音響探査システム（航走式，SC-1型，千本電機株式会社製）による1997年6月15日の記録で，塩水潮上限界付近の淡塩境界の状況を示す．位置は図1を参照．
Fig.2 Saline water invasion at R. Gonokawa observed by echo-sounding system (SC-1, Senbon Denki Co. Ltd.).

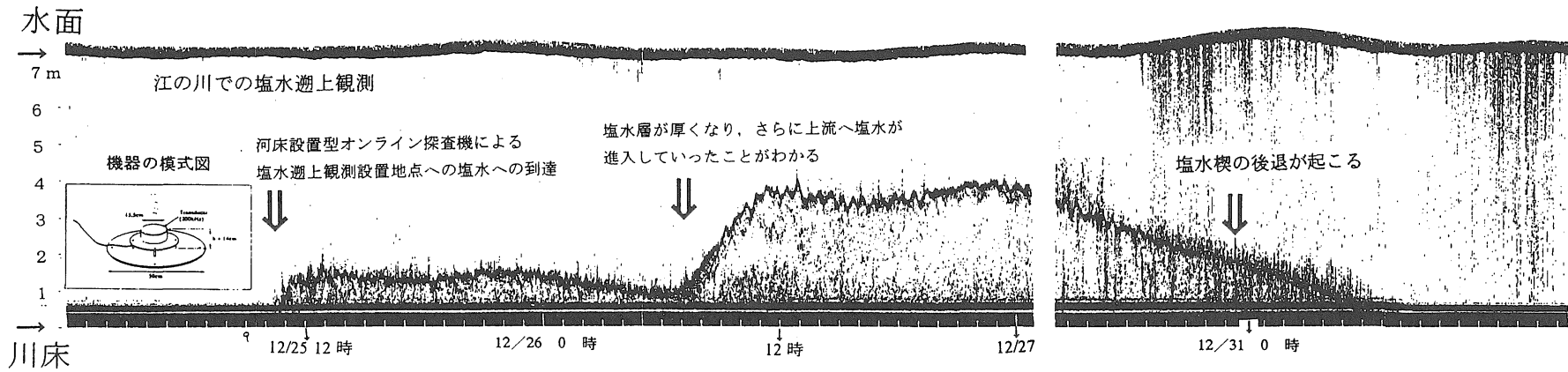


図4. 塩水楔音響探査システム（川床設置オンライン式，SC-2型，千本電機株式会社製）による塩水潮上観測

1997年12月25日から12月31日にかけての塩水潮上と降下が記録されている．3基設置したもっとも下流側の音響送受波器ON3の記録．左岸側の深みに設置されていて，位置は図1を参照．

Fig.4 Saline water invasion at R. Gonokawa observed by echo-sounding system (SC-2, Senbon Denki Co. Ltd.).

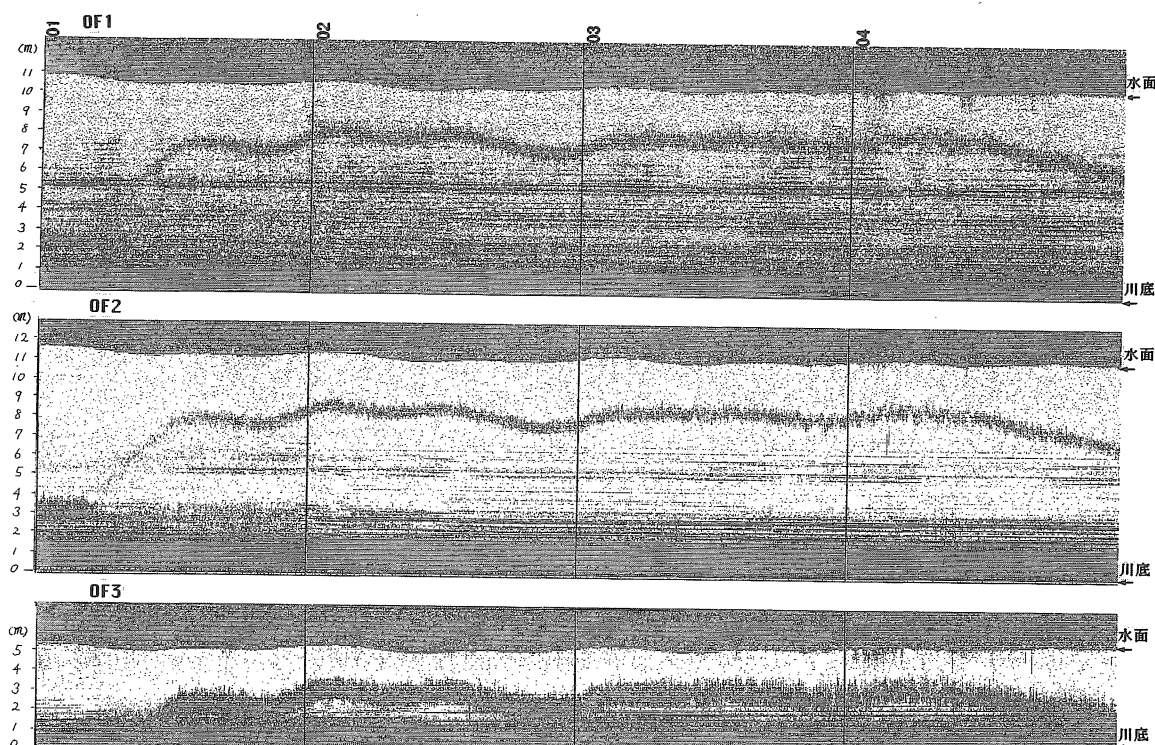


図 5. 塩水楔音響探査システム（川床設置オフライン式，CL-1 型，クローバテック株式会社試作）による塩水溯上観測（その 2）

1998 年 1 月 1 日から 1 月 4 日にかけての塩水溯上と降下が川を横断するルートで設置された 3 基の音響送受波器（OF 中央部，水深 11m；OF2 左岸側の深み，水深 13m；OF3 右岸側の浅部，水深 6m に記録されている．位置は図 1 を参照．

Fig.5 Saline water invasion at R. Gonokawa observed by echo-sounding system (CL-1, Clover Tech. Inc.).

の高さでのことである．ON2 と ON3 ではその間の距離は 50m，川底高は上流側の前者が 5.2m，下流側の後者が 7.5m であり，上記の時間差はこれらのことを反映している．このことから塩水塊の移動速度を計算できることになるが，設置地点の水深が異なり，川底微地形の測量が十分でないので，今後の課題としておくことにする．なお，ON1 にも塩水溯上があったことが他の観測機器によって捉えられているが，その期間中には設置上のトラブルから記録が得られていない．

本機器による連続観測では設置地点での塩水溯上や降下とともに潮汐によると考えられる水面の緩やかで規則的な振動が捉えられた．淡塩境界面が短い周期で振動していることも記録されたが，その解釈は今後の課題である．

塩水楔音響探査システム（川床設置オフライン式，CL-1 型）による淡塩境界の時系列変化の観測

CL-1 型は淡塩境界の探査を設置場所の制約を受けずに，しかも廉価で供給できる機器の製作を目的

として試作された装置である．本機は電源を内蔵し，音響送受波器 3 基（ケーブル長 5，40，40m）を備え，送信周波数約 200kHz を用い，得られたデータを A/D 変換して記録する．図 1 に示すように今回の観測でもっとも下流部にスキューバダイビングにより送受波器 3 基を，川を横断するように，OF1（中心部で水深 11m），OF2（左岸側で水深 13m），OF3（右岸側で水深 6m）の 3 地点に設置し，観測を行った．得られた記録の一部を図 5 に示す．今回は試験的な観測であり，淡塩境界を確実に捉えようとしたために感度を上げすぎていて，ノイズが大きく出ている．上記のオンライン式の装置に比べると記録の鮮明さにやや劣るが，3 地点とも 1998 年 1 月 1 日に溯上する塩水が通過していったこと，さらに 1 月 4 日に降下していったことが明瞭に記録されている．また，淡塩境界が振動していることも記録されている．なお，記録を示していないが，観測期間中に OF1 と OF2 では 3 回の塩水溯上・降下が記録された．これらのうちの後の 2 回が上記のオンライン式探査装置によってこれより上流部で観測されている塩水溯上・降下に対応するものである．なお，OF1 と OF2 では第 2 回の降下と第 3 回の溯上とは連続していて，両地点には塩水が入ったままで次の溯上が起こった

ことが記録されている。第1回目の溯上・降下はOF1とOF2で観測されているが(OF1,OF2で溯上:1997年12月21日6時,降下12月21日15時),これより上流域には及ばなかったことがわかる。

光ファイバ式温度分布計測システムによる川底での水温分布の連続測定

今回使用した光ファイバ式温度分布計測システムDTS80は光ファイバケーブル自体を温度センサとして利用する計測システムであり,海洋・湖沼への適用例は西村・松林(1996),徳岡ほか(1996)で述べられている。このシステムでは1本の光ファイバケーブルで多点の温度測定が同時に,しかも連続的に行える。ケーブルの1mごとに温度が測定され,精度は±0.3℃程度である。今回は約9分ごとに1回の測定を行うように設定した。光ファイバケーブルを観測ステーションから700mまでの川底に設置した。ケーブルは先端部を折り返したループ式になっているので,ファイバの全長は1400mである。ケーブルの設置はなるべく川底の深みにそって敷設するようにしたが,操船の困難さから図1に示すような結果となった。また,図6に示す川底地形はおおよそのものである。

光ファイバ設置区間を塩水が溯上していった1997年12月27日から降下した1998年1月16日までの代表的な記録を図6に示す。次項で述べるマルチCTセンサによる水温と塩分の関係(図9)から,観測期間中に約15~16℃を保っていた水塊は塩水(ほぼ海水に近い)で,6~7℃を保っていた水塊は淡水(河川水)であることは明らかで,光ファイバに記録された明瞭な温度差は塩水塊と淡水塊の違いを示している。図6に示したように,塩水が溯上していく際に光ファイバによる温度分布型の先端部が凹凸のある記録となって現れるのは光ファイバが川底の凹凸を反映して設置されていることを示している。これらの記録により比較的高温の塩水塊がより低温で流下する河川水の下位に潜り込んで溯上し,また後退していく様子が温度変化として捉えられていることがわかる。

光ファイバケーブルによる水温については,クロスチェックのためにICメモリ式小型水温計(T.S WaDaR,測定範囲-2~35℃,精度は±0.064℃)を図1に示すように2地点(T1,T2)に光ファイバに連結して設置して測定した。測定は5分間隔であり,その下流部の結果を図7に示す。図7ではT1地点に1997年12月25日に高温水(塩水)がこの地点に溯上,1998年1月9日に降下したことがわかる。また上流部の記録を図8に示すが,ここではT2地点

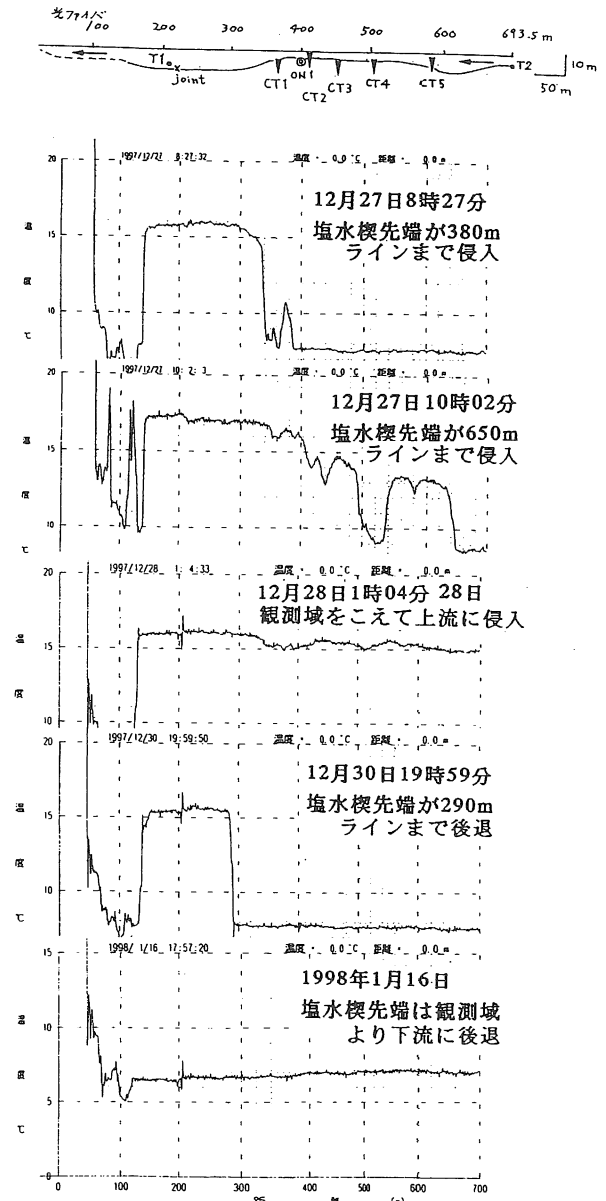


図6. 光ファイバ敷設範囲の川底地形と光ファイバによる川底温度分布状況

川底地形は1998年1月24日の機器撤収時の測深および道路上からの位置測定によるもので,測定時の天候事情から川底地形は大略を示すものである。温度測定は光ファイバ式温度分布計測システム(株式会社ワイ・オー・システム)によって700m間の水温の連続観測を行ったもので,1997年12月27日からの塩水溯上とその後の降下の状況を示す。位置は図1を参照。

Fig.6 Saline water invasion indicated by the time series data of temperature at R. Gonokawa on the basis of the optical fiber cable system (Y.O.System Co. Ltd.).

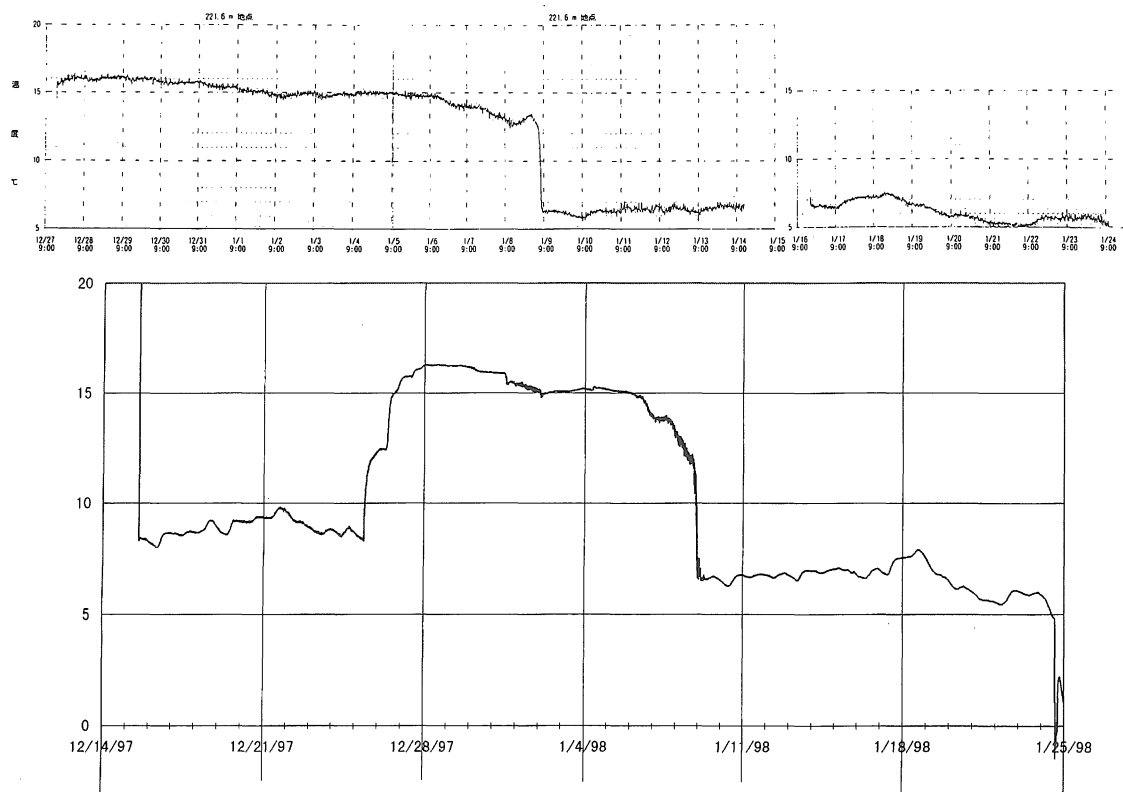


図7. 光ファイバ 221.6m 地点および IC メモリ付き小型水温計 T1 地点における川底水温の時系列変化
Fig. 7 Time series data of bottom water temperature by optical fiber system at its 221.6m point and that by the thermometer with IC memory

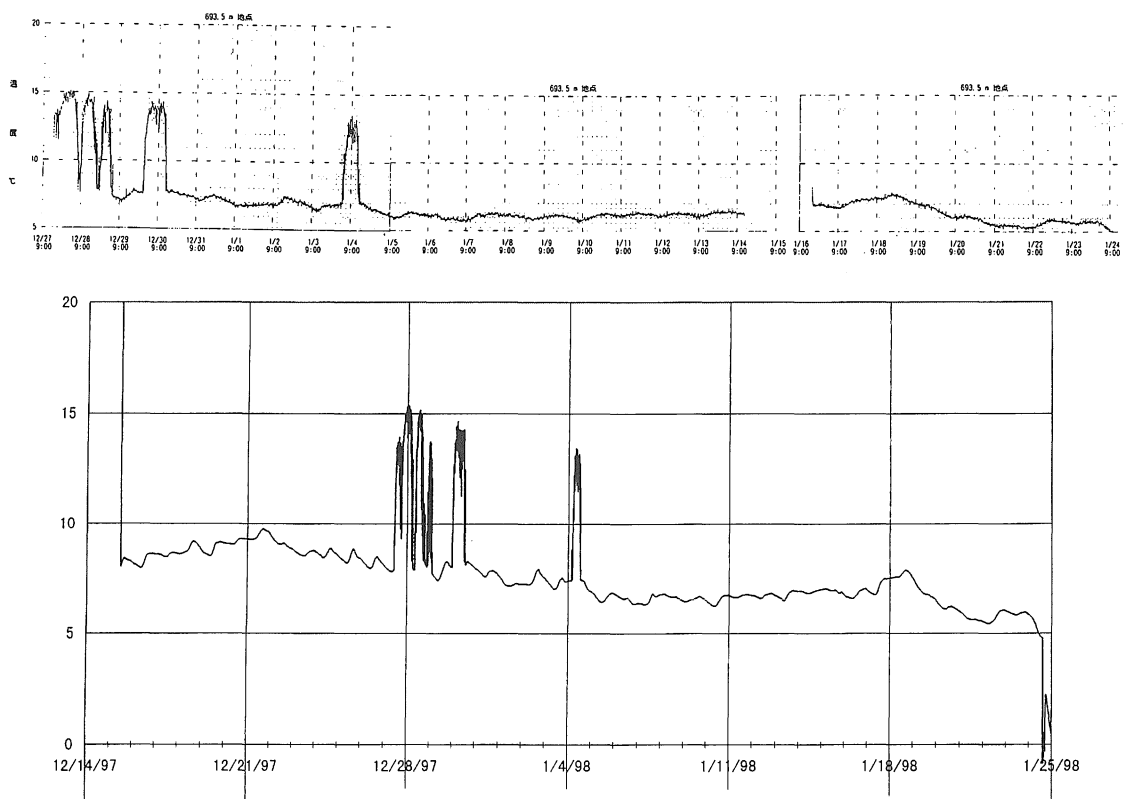


図8. 光ファイバ 693.5m 地点および IC メモリ付き小型水温計 T2 地点における川底水温の時系列変化
Fig. 8 Time series data of bottom water temperature by optical fiber system at its 693.5m point and that by the thermometer with IC memory.

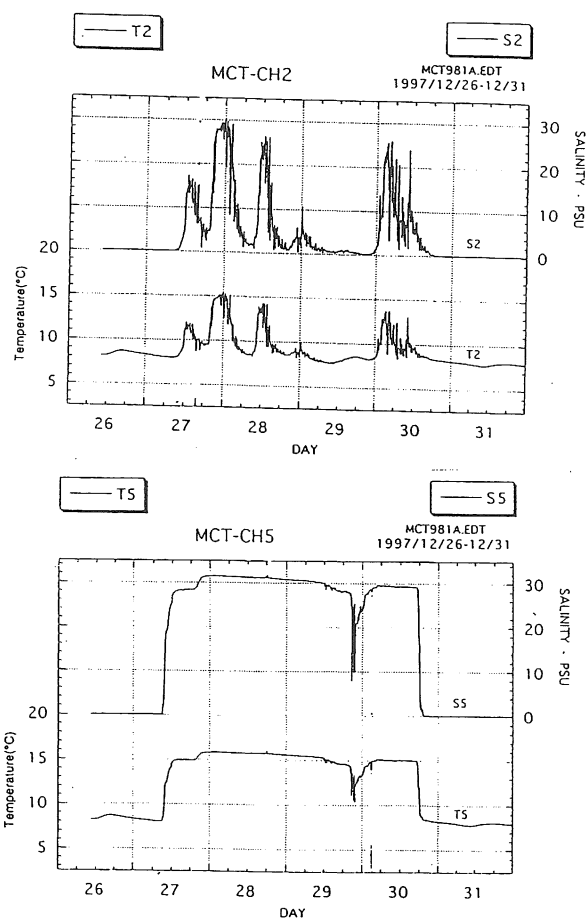


図9. マルチCT センサによる川底の水温・塩分分布の連続測定

川底から 15cm 上位の水温と塩分を各点 10 分ごとに 1 回、40 秒間で測定。位置は図 1 参照。水温和塩分とは同時に変化している。

Fig. 9 Time series data of bottom water temperature and salinity by the Multi-CT(Conductivity and Temperature) sensor

が今回の観測期間を通じて塩水湖上限界付近にあり、12月27日から1月4日にかけて塩水楔の先端部が何回かここまで到達したことがわかる。小型水温計による温度と光ファイバ温度計測システムによる水温の時系列変化お互いによく一致している。

マルチCT センサによる川底5地点での温度・塩分変化の連続測定

マルチCTセンサはXCTD(Expendable Conductivity, Temperature & Depth Profiling System) をもとに川床設置型の観測機器として試作され、今回初めて使用されたものである。詳しくは西村ほか(1998)で報告される。延長700mのケーブルに温度・電気伝

導度センサ5個を付け、川底近く(川底から15cm上)の水温・電気伝導度を連続測定し、両者から塩分を換算する仕様となっている。光ファイバの測線にはほぼ平行するようにケーブルの敷設を行い、センサ5個(CT1~5)を図1に示すように設置した。塩水湖上のあった1997年12月26日~31日のCT2とCT5の水温和塩分の記録を図9に示す。塩水湖上時には各センサとも水温・塩分に明瞭な変化が現れている。水温和塩分がよく相関していることが明らかである。

メモリー電磁流速計による流向・流速・水温(および塩分)の連続測定

メモリー電磁流速計ACM-16M型およびACM-8M型を前者(F1, 測定1時間ごと)をオンライン型音波探査機ON2の近くに、後者(F2, 測定30分ごと)をオフライン型音波探査機のチャンネル1(OFF1)に近接して図1に示すように設置した。F1での1997年12月14日~1998年1月24日の塩分、流向、流速、水温の時系列変化を図10に、1997年12月26日~27日にかけての塩水湖上時の特徴的な記録を図11に示す。塩水湖上時に塩分と水温に大きな変化が起こることが記録されている。

江の川の水位・流量データ

建設省浜田工事事務所から江の川の水位・流量についての観測データを提供していただいた。このうちもっとも関係の深い川平観測所(河口から9.1km)の水位・流量データ(1997.12.11日~1998.1.24日)をグラフ化して図12に示す。1997年12月26日に水量の減少、12月31日からの増大、1998年1月1日から2日にかけての減少、1月5日からの増大、および1月8日からの急激な増大が塩水湖上・降下と密接に関係していることは明らかである。また、12月21日から22日にかけての水量の小さな変化も下流域で小規模な湖上・降下を引き起こしている。川底設置式探査装置(2種)、光ファイバ、マルチCTセンサ、水温計、電磁流速計(2基)の記録の全てが塩水湖上・降下を記録していて、これらの記録はすべて塩水の湖上と下降が水位・流量の変化と密接に関係していることを示している。

ま と め

本研究で得られた主要な結果を以下に列記する。

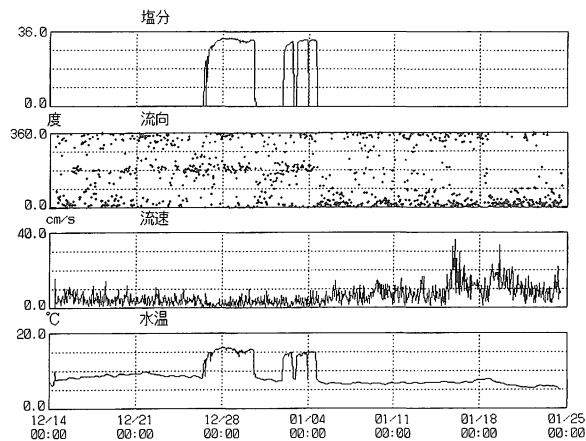


図 10. メモリー電磁流速計（アレック電子 ACM-16M 型）による F1 地点での塩分・流向・流速・水温の連続測定結果（1997.12.14～1998.1.24）

Fig. 10 Time series data of salinity, flow-direction and velocity, and water temperature at F1 point by ACM-16M of Allec Electronics Co. Ltd.(Dec. 14, 1997~Jan. 24, 1998).

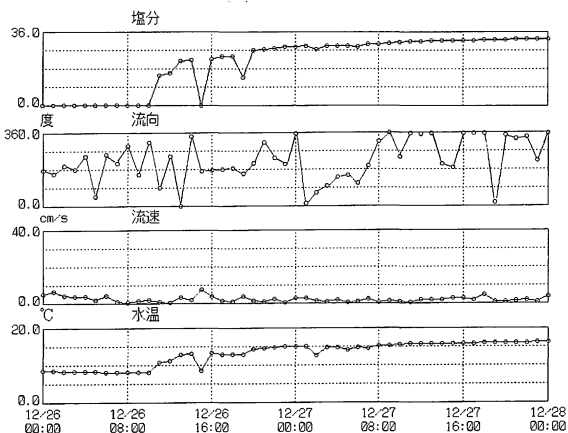


図 11. メモリー電磁流速計（アレック電子 ACM-16M 型）による F1 地点での塩分・流向・流速・水温の連続測定結果（1997.12.26～1997.12.27）

Fig. 11 Time series data of salinity, current-direction and velocity, and water temperature at F1 pint by ACM-16M of Alec Electronics Co. Ltd.(Dec. 26~27, 1997).

1. 塩水楔音響探査システム（航走式，SC-1 型）による船上からの調査では淡塩境界が明瞭に識別され，塩水溯上がどの範囲で起こっているかを明らかにすることができた。水温・塩分などの測定を水深ごとに行った結果，淡塩境界の上下では淡水塊とほぼ海水に近い塩分の水塊がごく狭い漸移帯をもって接していることを明らかにした。塩水楔の調査は従来から水質を地点ごとに測定することによって把握されてきたが，このシステムによってより容易に，

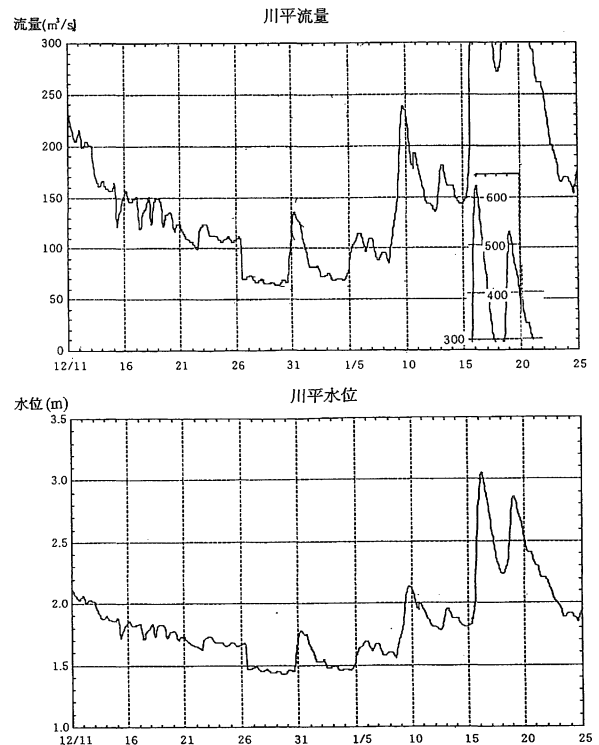


図 12. 川平水位観測所における流量・水位記録

建設省中国地方建設局浜田工事事務所によるデータで，川平の流量および水位の変動と塩水の溯上・降下がよく対応していることがわかる。

Fig. 12 Flow amount and water level at Kawahira Observatory, Hamada Branch Office, Ministry of Construction.

しかも広域的かつ視覚的にその挙動を捉えることができる。

2. 塩水楔音響探査システム（川床設置オンライン式，SC-2 型）による塩水溯上の連続観測では設置以前に河口より 4.0km にあった塩水楔の先端が観測期間中に河口より 5.4～5.5km の川底に設置した 2 つの音響送受波器上を通過し，2 回の溯上・降下を捉えることができた。本機はオンライン方式のため送受波器の設置場所がケーブルの長さ制限される（現在のところ最大 400m までの範囲）が，得られた記録はシャープであり，塩水溯上を定点で捉えるということでは優れた機器であることが明らかになった。

3. 塩水楔音響探査システム（川床設置オフライン式，CL-1 型）は今回初めて使用した試作機で，もっとも下流に設置して連続観測を行い，淡塩境界をとらえることに成功した。上記 2 回の溯上・降下はこの地点では一連であり，それ以前にもう一回の小規模の溯上・降下がこの地点に及んでいたことがわかった。

4. 光ファイバ式温度分布計測システムにより光ファイバを延長 700m にわたって設置し，水温の連続観測を行った。その結果水温の変化が塩水の侵入に

よるものであることは別の観測から明らかで、光ファイバ式温度分布計測システムが塩水楔溯上速度の測定などの動態観測にきわめて有効であることが明らかになった。

5. マルチ CT センサはケーブル延長 500m を川底に敷設し、これにセンサ 5 台をつけて水温・塩分の連続観測を行うシステムとして今回試作されたものであり、川底での水温と塩分の連続測定を行った。この結果、塩水溯上・降下を明瞭に捉えることができた。

6. 流向流速計 2 基を川床に設置して連続測定を行った結果、塩水溯上・降下時の状況をどちらにおいても捉えることができた。今回は測定間隔が長いので溯上・降下の速度を議論できないが、上記の機器と併用して観測を行うことが塩水楔の動態観測に有効である。

7. 上記によって明らかにされた塩水溯上・降下の時期を河口から 9.5km の位置にある川平の水位・水量の変化と比較すると、水位降下・水量減少と塩水溯上とが、水位上昇・水量増大と塩水降下とが密接に関係していることが明らかになった。なお、潮位・気圧・風向などとも関係については今後の課題である。

8. 今回の観測期間中に捉えられた 2 回の塩水溯上・降下の動態は以下のようにまとめられる。各種機器の設置された水深は異なるので溯上・降下の速度については具体的な検討はできないが、塩分あるいは水温の変化からみた代表的な地点を塩水塊の先端が前進あるいは後退した日時を以下に示す。なお、それぞれの地点の水深は OF1 (11m), ON3 (7.5m), T1 (10.2m), CT5 (8.9m), T2 (6.2m) であり、地点間の直線距離は OF1-ON3 (94m), ON3-T1 (118m), T1-CT5 (300m), CT5-T2 (88m) である。

第 1 回溯上・降下

溯上：OF1 (1997 年 12 月 25 日 09:30) → ON3 (25 日 10:30) → T1 (25 日 11 時頃) → CT5 (27 日 09:00) → T2 (27 日 9 時ごろ)

降下：T2 (12 月 30 日 15:00) → CT5 (30 日 19:00) → (T1 では塩水が停滞したまま) → ON3 (31 日 06:00) → (OF1 では塩水が停滞したまま)

第 2 回溯上・降下

溯上：OF1 (1998 年 1 月 1 日 08:30 停滞していた塩水が溯上開始) → ON3 (1 日 11:55) → (T1 で停滞していた塩水に合流) → CT5 (2 日 00:00) → T2 (4 日 03:00)

降下：T2 (1 月 4 日 15:00) → CT5 (4 日 16~18 時頃) → T1 (塩水が停滞, 1 月 9 日 08:00 に塩水なくなる) → ON3 (5 日 06:50) → OF1 (6 日 15:20)

第 1 回の溯上は OF1 から T2 まで約 2 日を要してお

り、降下は途中 (T1) に塩水を残しながらも急激で、1 日かからずに起こっている。この溯上・降下は上流 3.5km にある川平での流量が 1997 年 12 月 26 日 10:00 に 108m³/s から 11:00 に 72m³/s に急激に減少し、その後 60m³/s 程度となり、12 月 30 日 15:00 には 72m³/s から次第に増加し始め 31 日 04:00 には 136m³/s となっていることによく対応している。第 2 回目の溯上は OF1 から T2 まで 2.5 日以上を要しており、降下には 2 日を要している。この溯上・降下現象は河川流量が 1998 年 1 月 1 日 01:00 の 106m³/s から 3 日 14:00 の 69m³/s まで次第に減少し、1 月 4 日 16:00 の 71m³/s から次第に増加し始め 6 日 01:00 に 115m³/s となっていることによく対応している。なお、T1 に取り残されていた塩水は 1 月 9 日までそこに留まっていたが、9 日からの急激な流量の増大 (たとえば 9 日 08:00 に 161m³/s) によって消失した。

9. 今回は塩水溯上を捉えることを第一の目的とし、その点では成功であったといえるが、精密な溯上・降下の速度を明らかにするためには機器の設置された川底地形が正確に把握されている必要があり、底質についてもその諸特性を把握しておく必要がある。さらに、各機器で塩水溯上を感知する位置は異なっているため、正確な水塊の移動速度の算出には機器の設置方法についても十分考慮する必要がある。

10. 河口域の塩水侵入は河口域での人為的な地形の改変や上流での水利用などで変化し、社会的にも問題を起こす可能性がある。さらに地球温暖化による海面上昇では塩水侵入が加速することから、各種の被害が起こることが予測されている。このような諸問題への対処のためにも、塩水楔の実体を明らかにしておく必要がある。さらに、海面上昇を敏感に反映する塩水侵入を日常的にモニターすることによって逆に海面上昇の進行を捉えることができると予想される。

謝辞：この調査は財団法人河川環境管理財団による平成 9 年度の河川整備基金助成金により行った。また、実際の調査にあたっては建設省中国地方建設局浜田工事事務所の全面的な協力を頂いた。また、出雲グリーン株式会社には現地調査で協力を頂いた。島根大学理学部地質学科の吉松康隆君と梅木香里さんには調査に協力していただいた。船の借用・操船にあたっては江津漁業協同組合の協力をいただいた。江の川漁業協同組合には調査への協力と河川状況についての情報を提供していただいた。これらの各位および機関に厚く御礼申し上げます。

文 献

西條八束・奥田節夫（編）（1996）河川感潮域－その自然と変貌－，名古屋大出版会，248p.

西村清和・松林 修（1996）光ファイバ分布型温度センサの海洋および湖沼調査への適用，海洋調査技術，8：17-31.

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（汽水域研究），（1）：1-9.

西村清和・鈴木重教・徳岡隆夫（1998）多点型 CT センサケーブル測定システムの開発と汽水域での塩分・温度観測実験－，海洋理工学雑誌（投稿中）.

徳岡隆夫・大西郁夫・三瓶良和・瀬戸浩二・田村嘉之・高安克巳・安間 恵・土屋洋一・松田滋夫・井内美郎・西村清和（1994）音波探査による中海・宍道湖の塩分躍層の検討とその意義，LAGUNA（汽水域研究），（1）：11-26.

徳岡隆夫・高安克巳・三瓶良和・瀬戸浩二・井内美郎・西村清和・安間 恵・須崎 聰・松田滋夫・山中 正（1995）汽水湖塩分躍層の動態長期観測システムの開発（予報），LAGUNA（汽水域研究），（2）：21-27.

徳岡隆夫・三瓶良和・亀井健史・玉里圭太郎・西村清和・松田滋夫・須崎 聰（1996）汽水湖中海における塩分躍層動態の長期観測，LAGUNA（汽水域研究），（3）：73-90.