

Title	塩水楔観測データ解析手法の研究
Author(s)	上野, 博芳
Citation	
Issue Date	2002-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/913
Rights	
Description	Supervisor:松澤 照男, 情報科学研究科, 博士

博士論文

塩水楔観測データ解析手法の研究

指導教官 松澤 照男 教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報システム学専攻

上野 博芳

2002年1月10日

要旨

自然現象の中にある法則を見出したり、未知の物質の存在や振る舞いをを探求するためには、まずその実証段階において、これらの現象を把握する必要がある。そのため研究者たちは、自分自身の手で測定機器を作ってきた。当初基礎研究を目的として出発したこれらの測定機器は、技術革新の恩恵を受けながら発展し、現在の科学計測を支えている。この科学計測を支えるもう一つの技術として、コンピュータがあると言えるだろう。科学計測はコンピュータの活用に最も適したアプリケーションの一つであり、コンピュータ抜きでは今後発展しえない技術であると言っても過言ではない。さらに自然を対象とした計測、いわゆる観測は、計測対象の空間・時間スケールが非常に大きくなり、従来は現象を的確に把握することが出来るようなデータを得ることが困難な場合が多かった。しかしコンピュータの観測への利用が進み、さらにコンピュータの能力向上により、大量の観測データを高速に処理、蓄積することが可能となった。

本論文の塩水楔観測については、従来は、おもに水質測定の一環としてあり、多数の観測点から塩水楔の流動を明らかにしようとするものであった。しかしこの方法では広大な河川が対象では効率が悪く、精度があがらず、観測コストも大きい。これに対し徳岡らの塩水楔観測グループでは、1992年頃から汽水域における塩水の流動、特に塩水楔の動きを、超音波を利用して直接観測する手法を研究してきた。この手法を用いると密度躍層の位置を精度良く、かつ連続的に検出することができる。さらに最近開発された光ファイバーを利用した温度計測システムや塩分・温度測定などを併用することによって、従来と比較して圧倒的に広大な空間の塩水の動きを知ることができる。本研究ではこの観測手法において、効率的なデータ処理、効果的なデータ可視化などを目標とした観測システムの構築を目指した。

実際の観測フィールドとして、鳥根県「江の川」を対象とした。「江の川」は日本の代表的な感潮河川であり、明確な塩水楔が存在することで知られる。この塩水楔観測を通じて解析手法の研究を行った。超音波を利用した塩分躍層動態観測システムでは、躍層抽出や可視化について良好な結果が得られた。また光ファイバ分布温度計については、計測系と観測空間を考慮した後処理を施すことにより、可視化データの精度向上がはかれた。多点型CTセンサーケーブルでは採取データの改善を行った。

本論文では、塩水楔観測システムの効率的なシステム化について、その手法を示した。またこの観測システムを用いた観測は、現在国内のいくつかの河川において適用し、弱混合型以外のすべての河川についても、その有効性を確認しつつある。この手法は国内だけでなく、全世界の河川に適用可能であり、今後の河川河口域の研究や、気候変動による海面上昇の影響予測などに寄与するものと考えられる。

Abstract

Measurement instruments is very important to capture some phenomena for research. They have been developed as technology advance and are a part of scientific measurement system. It seems that some another part is computer systems. Scientific measurement is one of applications suitable to computers. It will be not developed without computers.

Tokuoka et al. have developed the new saline wedge observation systems which measure salinity, temperature and identified the interface between fresh and salt water by sonic echo. In this work, we study to manage the data from the saline wedge observation system, and we have developed the measurement system through a observation in the Gonokawa River, Shimane Pref., Japan.

Saline wedge invasion in the Gonokawa River was observed over lengthy periods in summer and winter in 1998. Saline wedge behavior was captured precisely using newly developed observation systems. To observe saline wedge phenomena, we made use of an acoustic reflection profiling system, and made measurements six times from a boat. We also used other devices placed on the riverbed, and measured the behavior long term. Here we discuss the observed hydrological data from an hydraulic analysis viewpoint.

About the acoustic reflection profiling system, we adjusted the parameters like a constant of time integration, and improved on post processing. We could capture the saline interface with the acoustic reflection profiling systems which were boat-based instruments and were installed on the riverbed with long term observation. The results were more accurate about salinity changes and reliable for visualize. We managed the temperature data from the optical fiber sensor according to measurement and observation space. We fitted the measurement point on the instrument to observation point using some positioning data with a GPS and resampled the visualized data from raw data. The visualized data of temperature became more correct.

From our data, the length of the saline wedge decreased when the river discharge increased. In other words, the saline wedge moved downstream as the fresh water velocity increased. And The length of the saline wedge was negatively correlated with river discharge.

目次

1	はじめに	1
1.1	科学計測とコンピュータ	1
1.2	研究の目的	2
1.3	塩水楔の観測	4
2	観測システム	6
2.1	観測に用いた機器	7
2.2	塩分躍層動態観測システム	8
2.2.1	測定原理	9
2.2.2	データ処理	10
2.2.3	システムの構成	12
2.3	光ファイバ分布温度計	16
2.3.1	測定原理	16
2.3.2	システム構成	16
2.3.3	データの後処理	18
2.4	多点型 CT センサケーブル	22
2.4.1	システム構成と測定手順	22
2.4.2	データの後処理	24
2.4.3	観測結果の例	24
3	河川流と江の川	26
3.1	河川と河口域	26
3.2	混合形式の分類	27
3.3	江の川の塩水楔	28

4	観測	31
4.1	観測地点	31
4.2	航走による塩水楔観測	32
4.3	定点における長期観測	38
4.3.1	1998 年度 A 地点における夏季観測	38
4.3.2	1998 年度 B 地点における冬季観測	42
4.3.3	1999 年度の冬季観測	44
4.3.4	塩水楔の溯上速度	48
5	考察	52
5.1	塩水楔の挙動	52
5.1.1	塩水楔の長さ	52
5.1.2	塩水楔の溯上速度	57
	謝辞	60
	参考文献	61
	本研究に関する発表論文	64
1.	査読付き論文	64
2.	国際会議等	64
3.	その他論文	65
4.	口頭発表等	66

第 1 章

はじめに

本章では研究の背景として、まず科学計測とコンピュータの関わりについて述べる。さらに観測対象として江の川(島根県)における塩水楔観測と、本研究の目的について記し、最後にこれまでの塩水楔観測について述べる。

1.1 科学計測とコンピュータ

自然現象の中にある法則を見出したり、未知の物質の存在や振る舞いをを探索するためには、まずその実証段階において、これらの現象を把握する必要がある。しかし、このような未知の現象を捕らえる手法は確立されていない場合が多く、自ずから種々の測定法を考え、測定機器を作らなければならない。昔から真理の探求のための道具として、研究者たちは自分自身の手で測定機器を作ってきた。また測定器や測定技術で他者の追隨を許さないものを開発してこそ、研究者はその道でのリーダーシップをとることができた [1]。

当初基礎研究を目的として出発したこれらの測定機器は、化学分析機器を主軸にし、新しい形の材料試験機器や医学用の物理計測機器などを含みながら、広く実用計測機器に向かって発展しつつあり、現在の科学計測を支えている。しかし科学計測には非常に幅の広い知識と、それらを巧みに融合させる技術が必要である。そして、この科学計測を支える技術の一つとして、コンピュータがあると言えるだろう。科学計測はコンピュータの活用にもっとも適したアプリケーションであり、あるいは極端な言い方をすれば、コンピュータ抜きでは今後発展しえない技

術の一つであると言っても過言ではない。

一方 1950 年代頃から、産業界ではオートメーション化と呼ばれる動きが活発となっていた。当初はプロセス・オートメーション、メカニカル・オートメーションなどの省人化・合理化をさしていた。その後この考え方がコンピュータの発展にしたがって拡張され、80 年代には計測の自動化として、ラボラトリ・オートメーション（通称 LA）が提唱されるようになった。

初期の段階で成功したのはミニコンタイプであり、特に DEC の PDP シリーズであろう。この当時のアプリケーションの中でも、核物理実験は以後の科学計測の原点ともいえる計測モデルであった。これはミニコンをベースとし、多数の科学計測機器群と組み合わせて、複雑かつ大掛かりなデータ収集・演算・制御などを行う方式であった。このモデルでは多点データの高速同時収集、リアルタイム演算と制御が必須であり、短時間に多量に出力されるデータを取りこぼす事なく収集し、また実験条件の適性自動設定や機器の制御をリアルタイムで実行しなくてはならない。その高速性のために一部は専用のハードウェアに依存しなければならないが、多くの部分はミニコンが担当し、柔軟な計測システムを構築する事が出来た。さらにデータを集中管理する事が可能となり、多くのメリットも生じた。

また近年では、コンピュータ・システム自体の流れとして、データ量やまた複雑なリアルタイム・ジョブの増加に対し、分散処理指向が取られるようになった。さらにコンピュータの小型化が進み、計測器自体にプロセッサが組み込まれる事も多い。これに伴い、各々の計測器が主となるコンピュータに繋がれ（または内蔵し）、各コンピュータがネットワークを介して接続された、分散システムが登場してきた。今後は種々の階層のコンピュータを巧みに選択し、どのようにネットワーク化するか、またどのようにして最適なソフトウェアを準備するかが、計測システム構築のポイントとなるであろう。

1.2 研究の目的

一般に、自然を対象とした計測、いわゆる観測は、計測対象の空間・時間スケールが非常に大きくなる。そのため、従来は現象を的確に把握することが出来るようなデータを得ることが困難な場合が多かった。しかしコンピュータの観測への

利用が進み、さらにコンピュータの能力向上により、大量の観測データを高速に処理、蓄積することが可能となった。

一方、島根大学汽水域研究センターを中心とした塩水楔観測グループでは、1992年頃から汽水域における塩水の流動、特に塩水楔¹の動きを、超音波を利用して直接観測する手法を研究してきた（たとえば[11, 12, 13, 14]）。この手法を用いると、密度躍層の位置を精度良く、かつ連続的に検出することができる。さらに最近開発された光ファイバーを利用した温度計測システムを利用することにより、数 km ~ 10 km オーダーの空間での温度分布が入手可能となった。これらと塩分・温度測定などを併用することによって、従来と比較して圧倒的に広大な空間の塩水の動きを知ることができる。

しかしながらこれらの観測手法は、観測精度と緻密さの向上に伴い、データ量が爆発的に増加した。一般的にある現象について、それをより緻密に表現しようとすると、それに伴い情報量も増加する。今回はまさにこれに該当する。またデータの抽出などの後処理、大量データの表現手法などにも検討すべき点があった。そこで本研究では、この塩水楔観測データの解析手法を確立することを目的とし、前記の観測機器類を利用して得られる観測データに対して、

- 必要なデータを抽出
- 効率的に処理
- 効果的に表現

することを目標とした。

また実際の観測フィールドとして、日本の代表的な感潮河川として有名であり、明確な密度躍層が存在することで知られる島根県「江の川」を対象とし、塩水楔観測を通じて解析手法の研究を行った。

¹河川の形態は淡水と海水の混合の強弱によって、弱混合、緩混合、強混合の3種類に分類される。さらに弱混合の場合に、海水が河川水の下に数 km から 10km を越えるようなスケールで侵入することもあり、これは形が楔に似ていることから、塩水楔と称される。

1.3 塩水楔の観測

まず海外の河川に関する研究、特に河口域について述べる。大陸の河川は規模が大きく、広大な三角州 (delta) を対象にしたものがあり、その代表としては東南アジアのベトナムを流れるメコン川が挙げられる。このメコン川の delta を塩水溯上との関係から研究したものとしては、雨季の大流量時における水質観測を主として塩分等を調査したもの [3] や、同じく干季において観測を行い、さらに懸濁物の移流シミュレーションなどを行ったもの [4] がある。またメコン川と北米大陸のミシシッピー川の両者の河川特性の比較もある [5]。しかながら、その調査法は旧来の水質測定を中心としたものであり、多大な観測コストをかけてせいぜい数十点の観測ポイントにおけるデータから、考察されたものである。

また日本においても、国土交通省による河川管理を目的として調査や、各種研究機関による河川観測・調査、河川モデルを用いた流れ場のシミュレーションなどが行われてきた。特に塩水溯上は河口域居住地への塩水浸入や地下水へまで影響が及ぶことが多く、河川管理上の重要な課題であることから、各河川でも観測が行われてきている。また塩水楔は水理上の興味深い問題としても多くの研究がこれまでになされている [10]。現地観測に基づいた研究としては、例えば石狩川も塩水楔で有名であり、そこでは北海道大学の研究者らによる緻密な現地観測が、長年にわたって行われている。近年では中道ら [6] によって風と混合の関係が明らかにされつつある。

本研究と同じ江の川における観測例としては、多少古くなるが奥田ら [7] の研究がある。奥田らは湧水を機に江の川を調査しており、塩水楔の形状や溯上条件などについて明らかにしている。さらに西條・奥田らは弱混合型 (塩水楔型) の感潮河川での成層と水の運動についての基本的な法則を説明し、観測例として江の川での 1967~68 年の観測結果を示している [15]。また国土交通省による江の川の塩水溯上調査も行われている [16, 17]。

また現在までに開発された河川モデルも、モデル化のためのベースとなる観測データの量的・質的不足と、このような流動場自身の複雑性のため、その現象を再現しているとは言えない (例えば [8])。

これら以外にも、湧水を機に発生した水不足や塩害の原因調査的意味合いを持

つ観測や解析が多数おこなわれている。しかしこれらの観測は、行政が主管したものが多く、単に状況調査に留まっている。さらに一部を除きデータが未公開となっており、河川分野の研究における寄与は望めない。またこれらの行政による観測は、洪水制御などの管理面には一定の成果をあげてはいるものの、観測対象の時間的・空間的スケールの大きさのため、その成果はまだ充分とは言えず、相変わらず水質悪化の問題も存在している。またこれら国内での研究・調査についても、殆どすべて旧来の水質測定を中心としたものであるといっても過言ではない。むしろこのやり方しかなかったというのが実状であろう。特に汽水域²は淡水に海水が複雑に混じり合う流れ場であり、水理学で言う密度躍層を形成する。この密度躍層を効果的に捕らえる事は、従来手法では多点化や同時性の確保などが困難で、計測自体が技術的に難しい上、精度の向上も困難であった。

これまでの塩水楔の観測手法は、流路に沿って多数の観測点を設定し、水質（おもに塩分量の鉛直方向分布）及び流向・流速の測定により塩水楔の形状を同定して、塩水の流動を明らかにしようとするものであった。しかし塩水楔の挙動は複雑であり、さらに河川という広大な自然現象を対象としているので、この方法では効率が悪く、また観測コストも大きい。さらに精度を上げるためには、大きな観測コストを必要とし、観測精度自体の向上にも限界がある。このような観測手法に対し、徳岡らは 1992 年から塩水楔観測システム研究開発グループを設置し、塩分躍層を捕える方法を考案・開発してきた（たとえば [11, 12, 13, 14]）。そこで開発された観測機器としては、①デジタル式水中音響探査機（航走式、SC-3 型）、②塩水楔音響動態観測システム（オンライン式、SC-2 型）、③塩水楔音響動態観測システム（オフライン式、CL-2 型）、④光ファイバ分布型温度計、⑤多点型 CT センサケーブルなどがある。江の川においては、これらの機器を用い 1997 年以降塩水楔の動態観測が行われてきた。

本研究では、このような観測システムを用いることによって、塩水溯上についての詳しい観測データが得られ、塩水の溯上・降下の実態を精度良くかつ具体的に示すことができるようになった。

²一般に淡水と海水が接触する広い水域を「estuary」と呼ぶが、これには河口部だけでなく、大阪湾などの閉鎖水域や、中海のような汽水湖まで含まれる。広義の汽水域はこうした淡水と海水が混合した水域であり、これらを含んでいる。

第 2 章

観測システム

1 章で述べたように、徳岡らは 1992 年から塩分躍層を捕える新しい観測方法を考案・開発してきた。本研究の対象となった観測システムは、これらをさらに発展させたものである。本研究の観測で利用した機器を、手法および原理的に分類すると次の 3 種類となる。

(1) 塩分躍層動態観測システム 超音波を用いた音響インピーダンスの利用 [20] による塩分躍層検出。

- 航走型
- 河床設置型

(2) 光ファイバ分布温度計 光ファイバー中を進むレーザー光が生じるラマン散乱光を利用した温度測定 [21]。

(3) 多点型 CT センサケーブル 海洋観測用 XCTD の転用 [11] による多点温度・塩分計測。

これらの機器は、いずれも計測制御にいわゆるコンピュータ（専用の組み込み型を含む）を利用しており、測定結果となる出力データはすべてデジタル化され、記録される。従って、そのデータ（情報）を利用者にわかる形で伝えるための後処理と、効率的な利用のためのデータベース化が必要となる。（データベース化は別の機会に譲る）後処理については、これらの測定器は筆者らの共同研究グループ

に参加している計測機器メーカーが制作した物であり、必要最小限¹の後処理プログラムが準備されていた。しかしそれらは取得データの確認程度が目的であり、充分な解析機能を有しておらず、例えば得られたデータから実際の塩水楔の流動を推定するのは困難であった。

そこで以下のような観点から、データ処理システム全体を検討し直し、新たに観測システムを構築した。

- 大量データの処理と可視化
- データの同時性確保
- 後処理の効率化

本章ではまず使用した観測機器全般を紹介し、次に主な機器とシステムについて述べる。

2.1 観測に用いた機器

本観測で用いた観測機器類を表.2.1 に示す。①デジタル式水中音響探査機は、航行しながら 200kHz の超音波を水面から水底に向かって発信し、塩水楔で生じる反射波を受信して塩水楔の分布・形状を記録断面として捉えるものである [20]。②塩水楔音響動態観測システムは、200KHz の超音波を発信する送受波器を水底に固定し、水面に向かって超音波を発信する。塩水楔で生じる反射波を連続的に記録し、時間・空間的な動態を捉えるものである [26]。オンライン式動態観測システムでは送受波器は 3 台あり、最長 400m のケーブルで陸上の記録部に接続され、一方③オフライン式動態観測システムはバッテリー駆動のため、設置場所が限定されることがない。④光ファイバ分布型温度計は、光ファイバケーブル自体を温度センサとして利用し、最長 2km の光ファイバケーブルで 1m 毎の多点の温度測定が連続的に行える。よって時間・空間的な温度変化を捉えることができる [27]。⑤多点型 CT センサケーブルは、海洋観測用の XCTD をもとに川床設置型の観測機器と

¹研究目的から、動作確認が主な目的である後処理プログラムが添付されている。

して開発された [11]。延長 700m のケーブルに 5 台の CT センサを取り付け、川床付近の温度と電気伝導度を連続測定して、これから塩分量²を算出する。

表 2.1: 主な観測機器

No.	名称	型式	製造メーカー	観測項目
①	デジタル式水中音響探査機	SC-3	千本電機 (株)	塩分躍層
②	塩水楔音響動態観測システム (オンライン式)	SC-2	千本電機 (株) クローバテック (株)	塩分躍層
③	塩水楔音響動態観測システム (オフライン式)	CL-2	クローバテック (株)	塩分躍層
④	光ファイバ分布型温度計	DTS80	(株) ワイ・オー・システム	温度
⑤	多点型 CT センサケーブル		(株) 鶴見精機	水温, 塩分

2.2 塩分躍層動態観測システム

この機器は汽水の塩分躍層 (正確には密度界面) において生じる音響インピーダンスの違いから、発射した超音波が界面で反射され、反射波として戻ってくることを利用している。この原理を利用している機器は、先に述べた①デジタル式水中音響探査機、②オンライン式および③オフライン式塩水楔音響動態観測システムである。

²いわゆる塩分量の表現には、塩分、塩化物イオン、塩素イオンなどがある。塩分とは海洋学の用語であり、海水中の主要な無機塩類の量を表し、従来は塩素イオン量 (塩素量、千分率：パーセント) に一定の比率をかけて求めていた。しかし、近年電気伝導度から塩分を求める手法が普及し、1982 年ユネスコは実用塩分 PSU (practical salinity unit) を定め、これは無次元の数として扱われている。ただし数値としては新旧の塩分量はほぼ同一である。また一般的に淡水域では、分量を水中の塩化物イオン (mg/l) として測定しており、国土交通省の河川データもこれで表されている。

2.2.1 測定原理

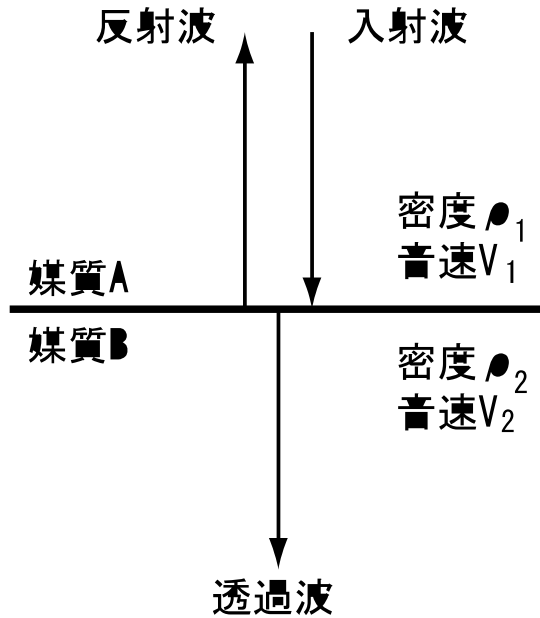


図 2.1: 平面境界における音波の反射

測深機や魚群探知機では、トーン・バースト信号を海底にむけて送信すると、送出された音波は音響インピーダンス³の異なる境界で一部反射し、反射波が戻ってくる。音響インピーダンスの異なる境界は水と海底、水と魚、水とプランクトン、暖流や寒流などが知られている [22]。図 2.1 に示すように、広い平面で相接する 2 つの音響的性質の異なった媒質 A(密度 ρ_1 、音速 V_1) および媒質 B(密度 ρ_2 、音速 V_2) があり、音波が媒質 A を通り境界面に垂直入射すると、音波の一部は反射され反対方向に戻るが、他は媒質 B の中を透過していく。入射波と反射波の振幅比は反射係数を r として、

$$r = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2} \quad (2.1)$$

³媒質の密度と音速の積で表される。

で示される。反射係数の最大値は 1 (または-1) であり、値が大きいほど強い反射を示す。媒質 A と B の音響インピーダンスの差が著しいほど、汽水の場合は音速がほぼ一定であるので密度差が大きいほど、言い換えると塩分の差が大きいほど反射係数 r が大きくなり、強い反射が生じる。またその境界面の位置は、水中での音速が既知であるので、送信された音波が返ってくるまでの時間を測定することによって求めることができる。

2.2.2 データ処理

次に、塩分躍層動態観測システムの動作フローを図 2.2 に示す。測定を開始すると、まず 200kHz の超音波をごく短時間 (1ms 以下のパルス状) 送受波器から発信する (図 2.4 参照)。水中を進行した音波は密度界面で音響インピーダンスの違いから反射を生じる。そして戻ってきた反射波が送受波器で受信され、アナログ信号に変換される。この信号には元信号の 200kHz 成分を含んでいるが、必要なのは信号強度つまり振幅だけであるので、包絡線処理 (時間積分) を施して反射強度に比例した信号を得る。さらにこの反射強度信号を A/D 変換し、データをデジタル化する。このデジタルデータをソフトウェア上で強度のレベル化を行い、カラー表示する。

このように塩分躍層動態観測システムは、すべてデジタル形式でデータが保存されている。当然データは離散化されており、対象媒体からの反射強度のデータ列が、その並び順に送受波器からの距離としての意味をもっている。このデータ列が観測インターバル毎に繰り返され、データそのものは空間上の距離、時間、反射強度 (言い換えると塩分躍層の強さ) という構造を持つ。最終的には、各々のデータ強度を空間・時間の 2 次元上にプロットしていけば良いことになる。そこでこの生データを読み込み作画出力する後処理プログラムを作成した。これには出力の時間範囲、深度範囲、反射強度の設定などが行えるようにした。

ここで特に反射強度の設定について述べておく。得られた出力データの全ての振幅範囲を使って反射強度を正規化すると、弱い躍層面の場合検出できなくなる (いわゆる S/N 比が悪い状態)。そこで 2 つの対策を考えた。

- (1) 現在表示レンジを 16 段階にとっているが、この上下限を任意に設定できるよ

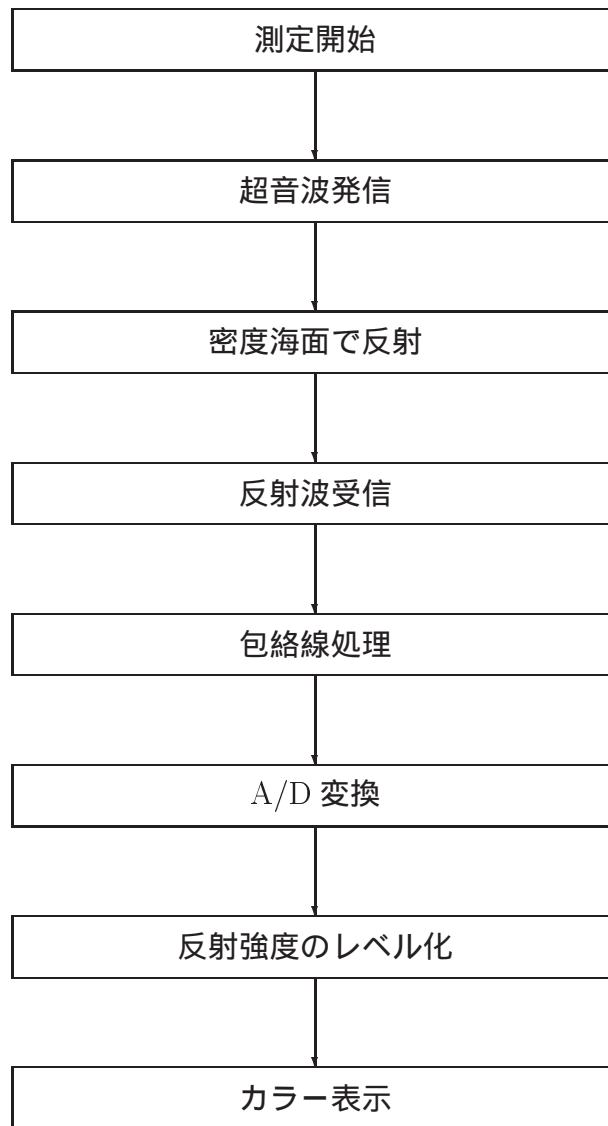


図 2.2: 計測フロー

うにする。

- (2) 生データを表示レンジに対し正規化する際、そのままリニアに正規化するのではなく、指数関数、対数関数などを使い生データを一旦変換し、その変換されたデータに対して正規化を行う。これは反射強度変化が特定の範囲にあり、強度勾配が小さい躍層に対して、その変化部分だけ S/N 比を上げようとするものである。

この後処理用プログラムを使ってデータ処理した例を 2.3 に示す。河床から 1~2m にある塩分躍層に時系列変化が非常にうまく捕らえられている。

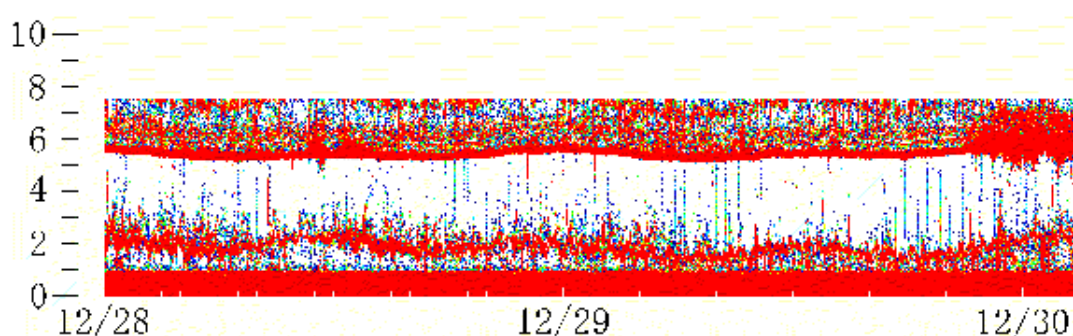


図 2.3: SC-2: 動態観測システム (オンライン式) の観測データの例

2.2.3 システムの構成

本研究で使用した塩分躍層動態観測システムは、水面または川底から音響信号を送信して、音響インピーダンスの異なる塩分躍層で生じる反射波を受信するも

ので、原理的には音響測深機や魚群探知機と変わらない。しかし通常の音響測深機は海底面の反射波を強調して記録するように回路設計されているため、水中の微弱な反射面を検出するには適していない。また魚群探知機は、水中での魚群などの反射情報を得るには適しているが、反射面の正確な位置を測定する精度は備えていない。

初期の塩分躍層動態観測システムは精密音響測深機をベースに改良を加え、受信した反射波形を歪ませることなく、忠実に記録できるようにしたものであった。また検出の分解能を上げ、音響インピーダンス差の小さい躍層面での反射波を検出するには、できるだけ高い周波数の音波を使用すればよいが、そうすると逆に水中での吸収減衰が大きくなり、探査能力が低下してしまう。そこで初期タイプでは 200kHz 付近の周波数を選択し、アナログ式での動態観測システムを開発した。

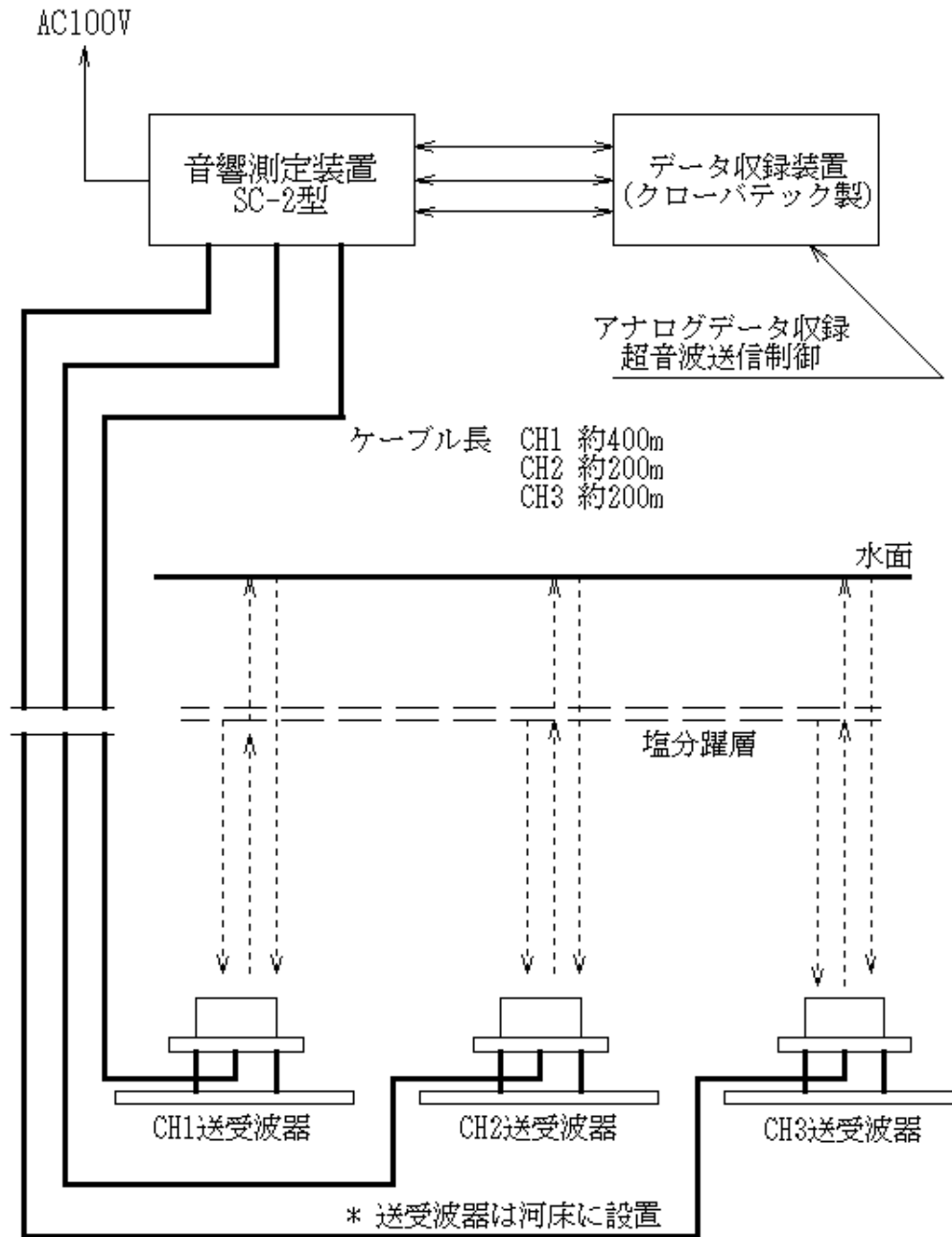
しかしアナログ式では取得したデータの定量的な解析が困難である。そこで次に塩分躍層で生じる反射波の振幅等を数値化できるように、デジタル式の観測システムを開発した。これはアナログ式の動態観測システムに、その出力をアナログ→デジタル変換して大容量のストレージに記録するデジタルレコーダを組み合わせたものである。これによりデータの保存が行える。また収録したデータに対して前述した後処理をすることにより、明瞭な出力を得ることができ、さらに正確で詳細な解析が可能となった。

一方初期の段階では、このデジタルレコーダにおいて A/D 変換器を用いてデータをデジタル化する際、元の出力波形をそのまま 1MHz のサンプリング周波数で変換し、時間積分処理を行って振幅値、すなわち反射強度を算出していた。しかし当面必要とするのはこの反射強度だけ、いわゆる信号でいう振幅だけである。そこで元信号の超音波域の交流波形から振幅値だけを取り出すために、包絡線処理⁴を行なった。またこのとき、塩分躍層の検出に適した積分回路時定数のチューニングを施した。この結果信号成分中の周波数上限が低くなり、A/D 変換器のサンプリング周波数も下げられるという副効果も生じた（結果サンプリングレートは 200kHz となった）。また、これにより観測生データのサイズそのものも小さくなり、後処理についても有利になった。

このデジタルレコーダ式の塩分躍層動態観測システムの構成例として、千本電

⁴これはアナログ的な処理で実現した。すなわち一種の積分回路のを追加した。

気製河床設置型の SC-2 を図 2.4 に示す。これは 3 チャンネル構成で、最小観測インターバル 1 分で長期にわたって塩分躍層の動態観測が可能である。



* SC-2型は、定点長期連続用として、陸上（屋内）で運用される。

図 2.4: SC-2: 動態観測システムの構成例

2.3 光ファイバ分布温度計

光ファイバ温度分布計測システム (DTS: Distributed Temperature Sensor) は、光ファイバ自身が温度センサとなり、連続的に長距離温度分布を計測する全く新しい概念の温度計である [23]。

2.3.1 測定原理

DTS の温度測定原理は、光ファイバに入射したレーザーパルス光により、ガラス分子から発生するラマン散乱光の温度依存性を利用している。原理を図 2.5 に示す。

ラマン散乱光は入射した波長に対して、短波長側の反ストークス光と長波長側のストークス光の両方に発生する、前者は後者に比べて温度変化に対する強度変化率が大きいいため、両者の後方散乱光の強度比から当該箇所の温度が求まる。遠方の測定では、光路における光の減衰を考慮する必要があるため、両ラマン散乱光の強度比を測定して減衰による変動を相殺している。距離情報は、レーザーパルス入射後、入射端に戻ってくるラマン散乱光を時系列的に検出することにより得られる。実際の装置では、光ファイバ中の光速度 (約 $2 \times 10^8 \text{m/sec}$) とサンプリング周波数 ($100 \text{MHz} = 10^8 \text{sec}^{-1}$) の関係から約 1m (往復 2m) 毎で $-200 \sim +600 \text{ }^\circ\text{C}$ の範囲の温度が得られる。

2.3.2 システム構成

図 2.6 に DTS のシステム構成を示す。全体は、①センサとなる光ファイバケーブル、②センサにレーザーを供給し、また検出する DTS 本体、さらに③DTS 本体を制御しデータの収録をおこなうコンピュータ (コントローラ) からなる。コントローラには DTS 本体の制御、データ収集などをおこなう専用プログラムが実装されている。

計測の手順は、任意に設定された測定インターバル毎にコントローラから DTS 本体に測定開始が指示され、光ファイバーの全長にわたる計測が行われる。そして結果として温度データ列がコントローラに返される。コントローラはそれを独自

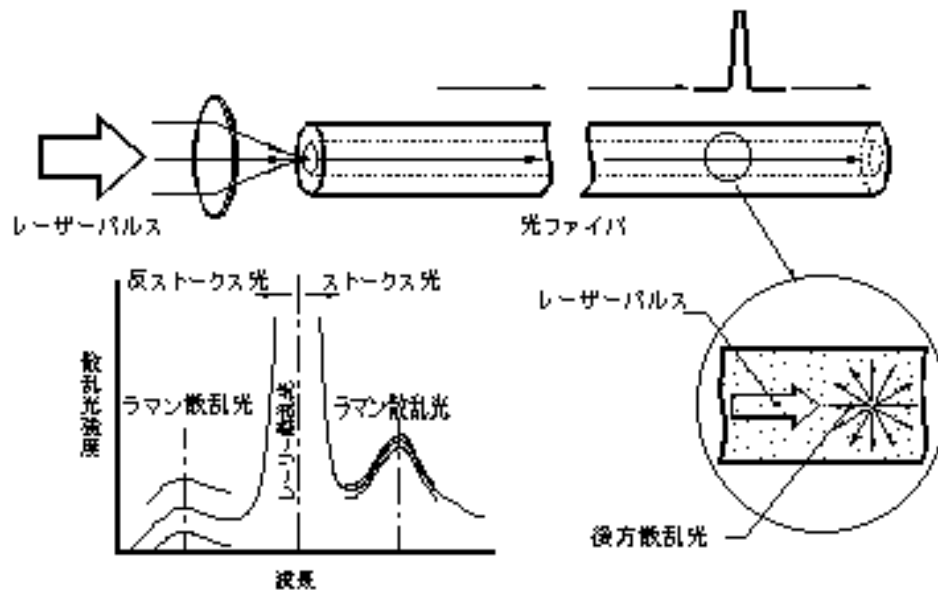


図 2.5: DTS の温度測定原理

形式のフォーマット（バイナリ形式）で磁気ディスクなどに記録し、1回のスキャンが終了する。これを観測期間中繰り返す。この生データは1ファイルに記録されている。

次にこのDTSの1スキャン分のデータを図 2.7 に示す。これは総延長約 2000m のデータであり、そのデータ構造は DTS 本体からの光ファイバケーブルの位置とその点の温度の形となる。このデータの場合は約 2000 個である。最短で約 10 分毎に計測インターバルであるので、この場合で 12×10^3 /時程度のデータ量となる。

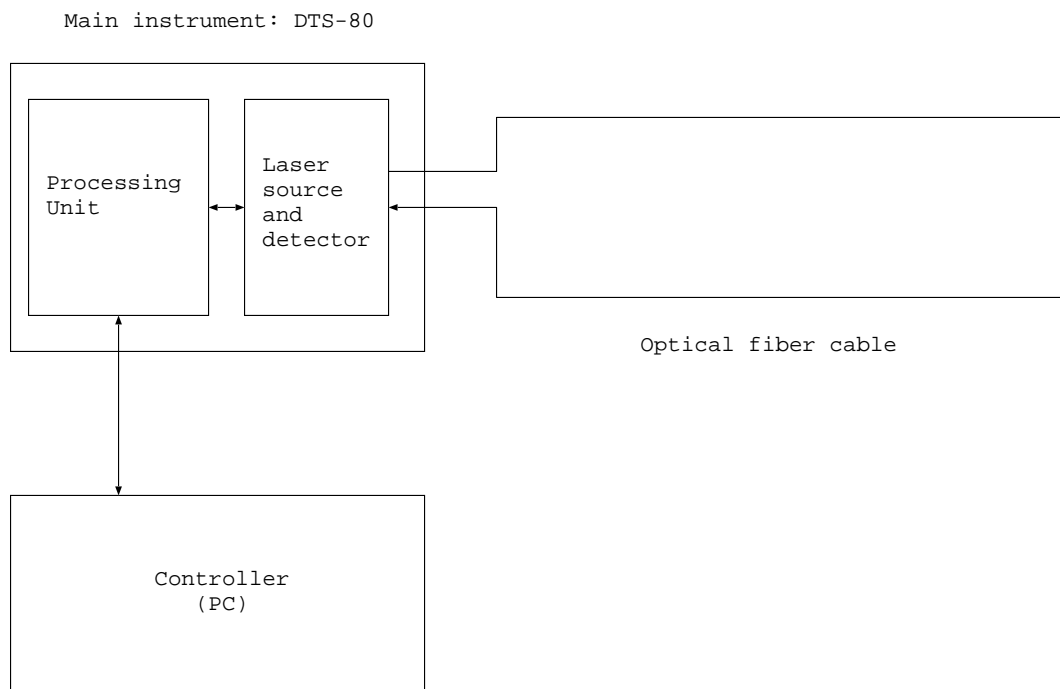


図 2.6: DTS のシステム構成

2.3.3 データの後処理

生データの形式はバイナリであり、このままでは専用のファイル I/O を持つ専用のアプリケーションプログラム⁵でしか後処理を行えない。そこで生データファイルから必要なデータを読み出し、汎用的なファイル形式 (CSV 形式⁶) に書き出すデータ変換プログラム (一般にフィルターソフトとも呼ばれる) を新たに開発した。

また、先に示した 1 スキャン分のデータは、空間上の意味を持つ 1 次元のデータであり、連続観測ではこれを時間的に繰り返す。従って連続観測を行うと、出力は距離と時間との 2 次元の意味を持つ温度データとなる。そこでこのデータを理解し易く表現するには、温度値を色調で表した 2 次元コンタ図が最も適当であろうと考えた。しかしながら、通常コンタ図を作成するには、データの構造化⁷が必

⁵先の図 2.7 に示したような出力が得られる簡単な後処理プログラムが添付されていた。

⁶Comma Separated Value 形式。各データをテキスト形式で表わし、2 次元の複数データをコンマと CR/LF で表現する。

⁷ここで言う構造化とは、次元方向にデータが等間隔で並んでいるという意味である。

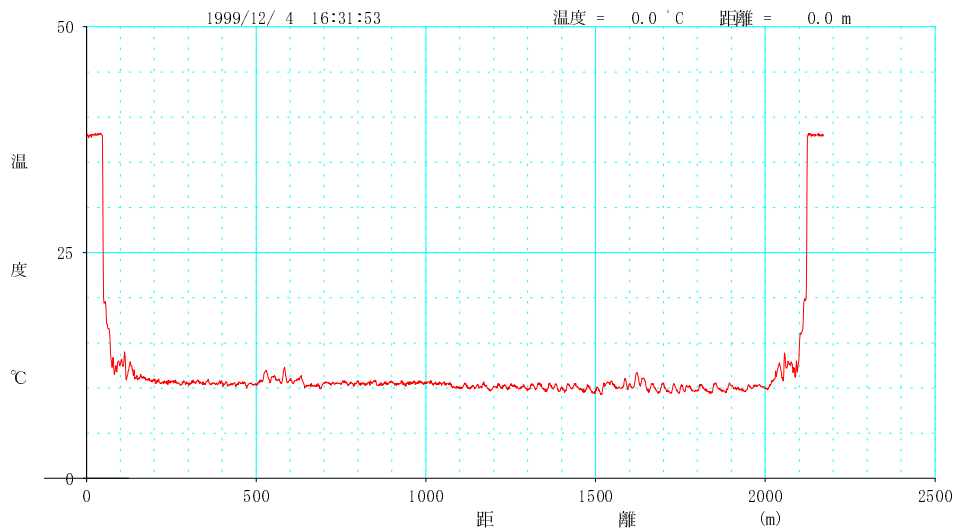


図 2.7: DTS の温度測定例：1 スキャン分

要である。実はこの DTS システムの次元的なデータ構造は、距離方向については計測系上では等間隔に並んでいるが、実際の観測系の空間上では正確に等間隔には並んでいない。これは計測系と設置された観測空間系は、光ファイバー自信の設置誤差⁸から、ずれが生じるためである。

そこで光ファイバーケーブルの約 200m 毎の (ケーブル位置－空間位置) の関係を、GPS を利用して求め、空間位置に対応するよう補正を行った。得られた (ケーブル位置－空間位置) の関係から、スプライン関数を用いて内挿し、計測位置に対する空間位置を求めた。またこの時データが過剰となる場合が多く、再サンプリングしている。また時間に関しても、最速で連続観測した場合、処理時間が一定にはならないため、測定インターバルも一定とはならない。そこで得られた出力

⁸実際の設置に当たってはケーブル自身をロスなく直線状に設置するのは不可能である。どうしてもたるみ、遊び等が生じる。

データから内挿し、データの構造化を行った。内挿には同じくスプライン関数を用いた。これらデータの再サンプリング・内挿は先のフィルタソフト中に実装した。

以上のような考え方で、データ変換プログラムを作成した。コンタ図作成自体は市販のアプリケーションを利用している。処理した例を図 2.8 に示す。これは X 軸方向が距離、Y 軸方向が時間を示しており、12 時頃の観測点（図中右側）方向からの高温水の浸入がわかる。

Temp (°C)

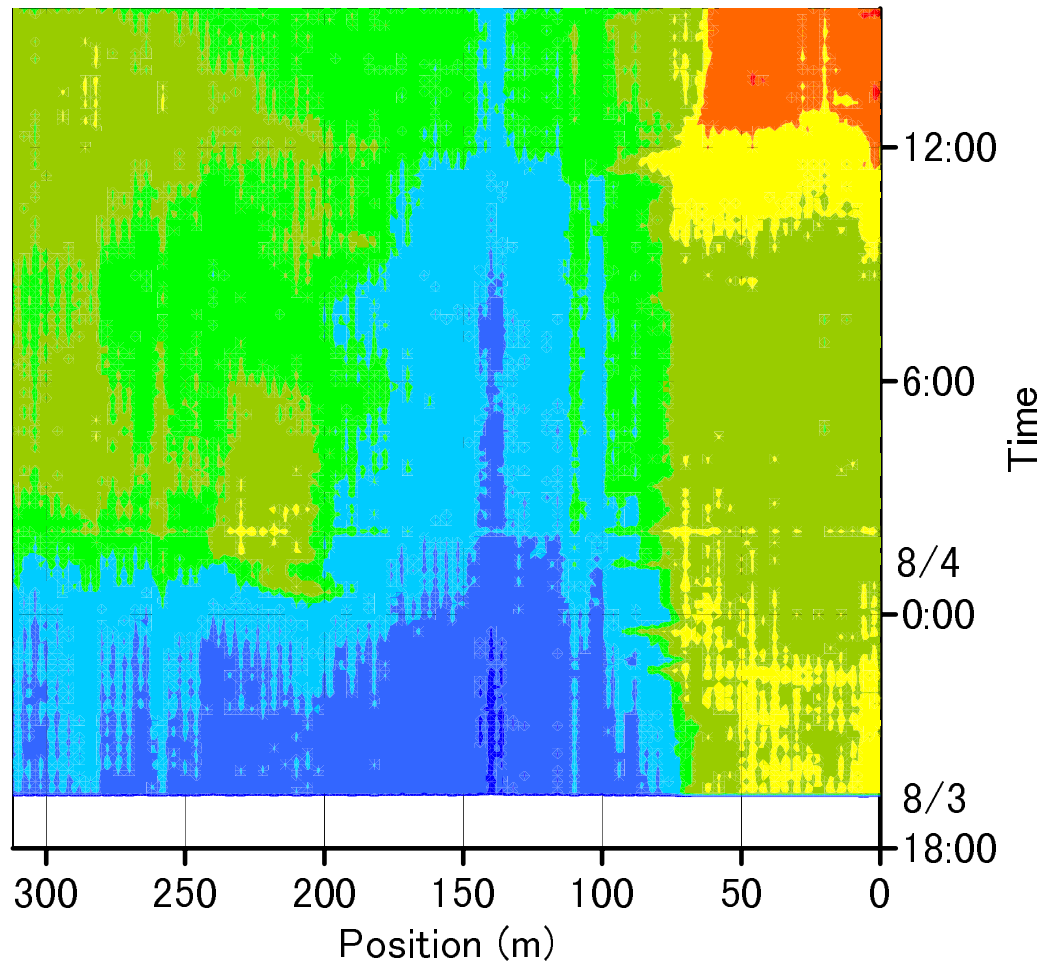
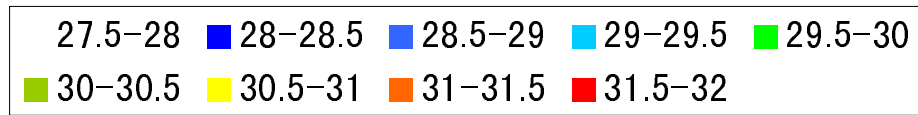


図 2.8: DTS の温度測定例 : コンタ図

2.4 多点型 CT センサケーブル

音響インピーダンスや温度を用いた観測では、塩分との相関のある間接的な情報から、塩分の変化を求めるものであり、実際の塩分値を得ることも当然必要である。淡水から海水まで広範囲の塩分が存在する汽水域では、塩分測定が塩水動態観測の必須であり、多点測定のために低コストで簡便な塩分測定機器が望まれていた。現在塩分は海水の電気伝導度に対し定欽されており、電気伝導度・水温・圧力を測定することにより算出する。そのため水質計を用いて塩分の垂直分布を規定したり、連続観測ではメモリ式塩分・温度計を利用したりしている。しかしメモリ式ではリアルタイムにデータを取得することができず、早い塩水の動態を直接検出できない。また研究室ベースの計測デバイスは、性能的には要求仕様を満足するもののコストが高く、複数設置するのは困難である。

このような経緯から、西村ら [24] は海洋観測用 XCTD (eXpendable Conductivity, Temperature and Depth profiling system) [25] に着目した。この XCTD は投げ捨て型の海洋観測システムで、航行中の船舶から XCTD プループと呼ばれるデバイスを投下し、水深 1000m 程度までの電気伝導度・水温の鉛直分布を短時間で測定するシステムである。この XCTD プループは、

- (1) データがデジタル化されており、長距離のデータ伝送が可能。
- (2) 耐水性、耐圧性を備える。
- (3) センサが高感度、高精度である。
- (4) 本来投げ捨て用のため大量生産されており、コストが低い。

などの特徴がある。そこでこの XCTD プループを流用し、投棄せずに再利用可能な塩分・温度センサ「CT センサ」を開発した。そしてこれらを複数個接続し、汽水域における湖底または河床の水平方向の観測や、あるいは鉛直方向の分布を観測するための、「多点型 CT センサケーブル」とした。

2.4.1 システム構成と測定手順

本研究で用いた多点型 CT センサケーブルの構成を図 2.9 に示す。

これは CT センサを 5 個用いており (5 チャンネル構成)、全長 500m のツイス

トペア 10 対のケーブルの一端にこのセンサを 50m 間隔で接続している。このような通信用の電気ケーブルを用いれば 10km 以上のデータ伝送が可能であると言われている。

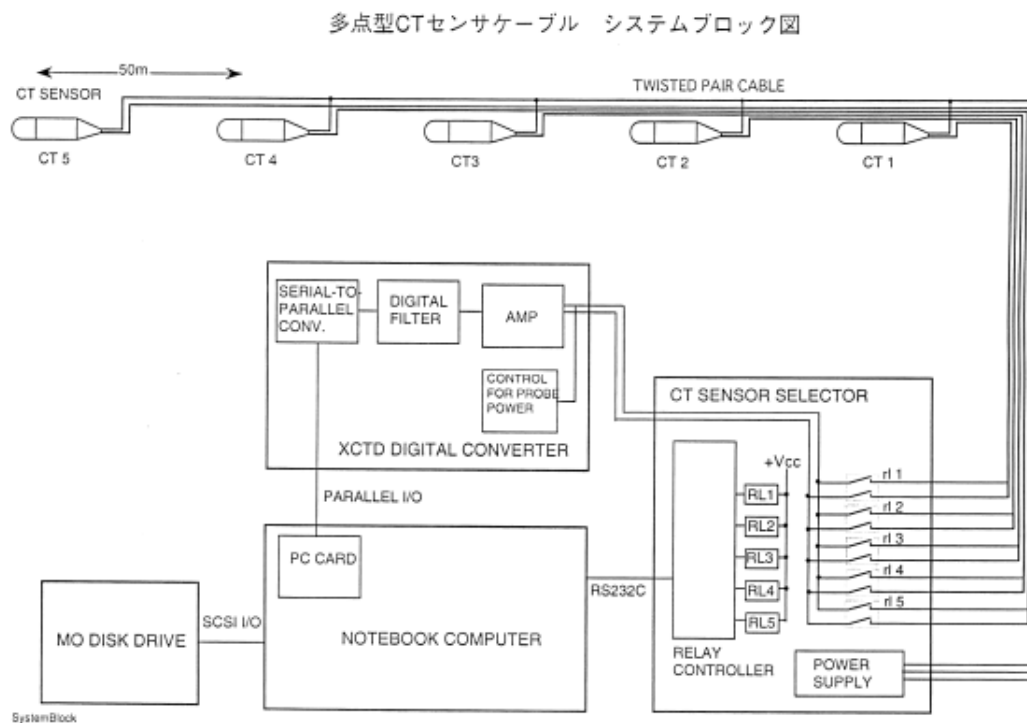


図 2.9: 多点型 CT センサケーブルの構成

全体は大きく① CT センサ、②セクタユニット、③ デジタルコンバータ、④ 制御用 PC の 4 ブロックから成る。またこの観測システムは、④制御用 PC に実装された測定プログラムにより、電気伝導度・温度の測定、データ収集、塩分の算出、データ保存などを設定された時間毎に自動的に行う。最小測定インターバルは 5 分である。

測定手順は、まず制御用 PC からのコマンドによりセクタユニットが各 CT センサ (CT1-5) の出力 (シリアルデータ) を切り替え、デジタルコンバータへ入力される。ここでアナログ的な信号調整を行い、デジタルフィルタを通り、さらにシリ

アルーパラレル変換されて制御用 PC へ取り込まれる。これが CT センサのチャンネル分繰り返されることで、1 スキャンの測定となる。1 スキャン分の処理が終了した時点で、データは磁気メディア等に保存（いわゆる生データ）される。これらの保存されたデータは、任意に設定されたタイミングで（例えば 1 日に 1 度など）、1 データファイルとして作成される⁹。

2.4.2 データの後処理

前述した生データの 1 スキャン分は、各観測時間毎の時間と電気伝導度、温度、塩分から成っている。そしてこれが観測時間分集まり、1 データファイルになる。これを後処理し、例えば時間変化を見るためにグラフ化しなければならない。グラフ化は市販のアプリケーションソフトを用いた¹⁰。そのため、生データから市販ソフトへ入力するためのデータ変換プログラムが必要となり、新たに開発した。

初期のバージョンでは、複数に分割されたファイル上の生データを時間順に連結し、さらにデータを並べ替え、CVS 形式¹¹のデータファイルに変換した。ところが計測システムに不安定な部分¹²があり、ノイズが発生して採取したデータに影響することが判明した。そこでフィルタソフト側に簡単なノイズカッター機能を追加した。

2.4.3 観測結果の例

データ採取後フィルタソフトを通し、後処理した観測結果例を図 2.10 に示す。図において、上が塩分、下が温度の時系列な変化を表す。これは 1997 年度、江の川で採取されたデータを再後処理したものである。

⁹これは主にデータの「安全な」保存のため。例えば停電等の予期せぬ不具合により観測が停止しても、最悪でも前日分までのデータは確保される。

¹⁰特にグラフ作成ルーチンなどは、scratch から開発するよりはるかに効率的であろう。

¹¹Comma Separated Value 形式。各データをテキスト形式で表わし、2 次元の複数データをコンマと CR/LF で表現する。

¹²原因は不明。センサが水中にある、計測ケーブルが長いなど電氣的に不安定な部分が多い。

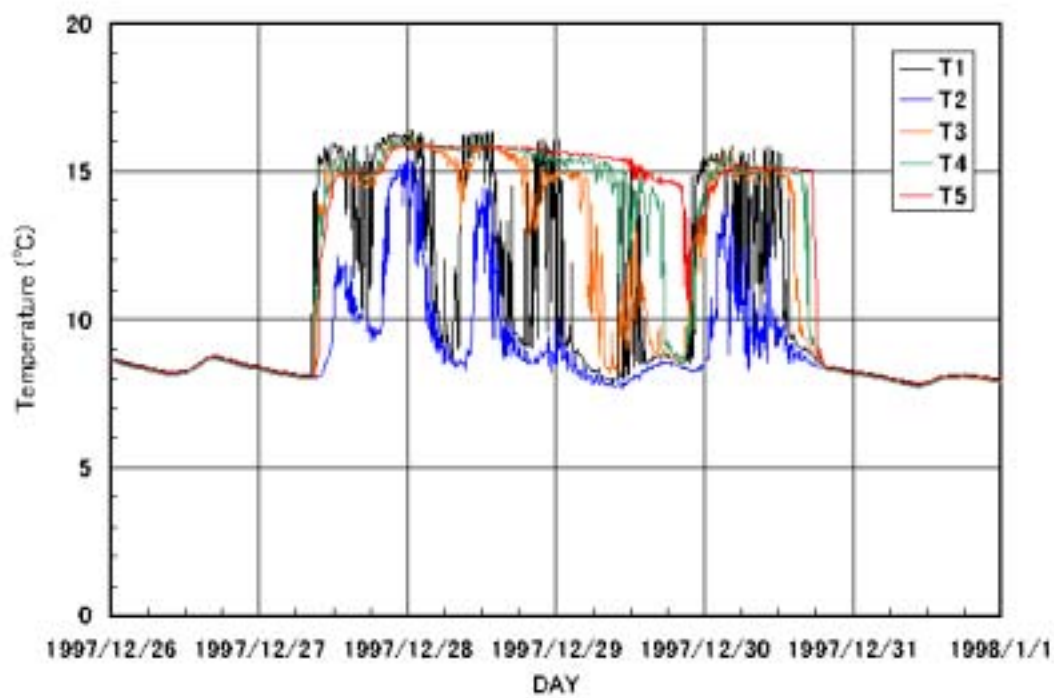
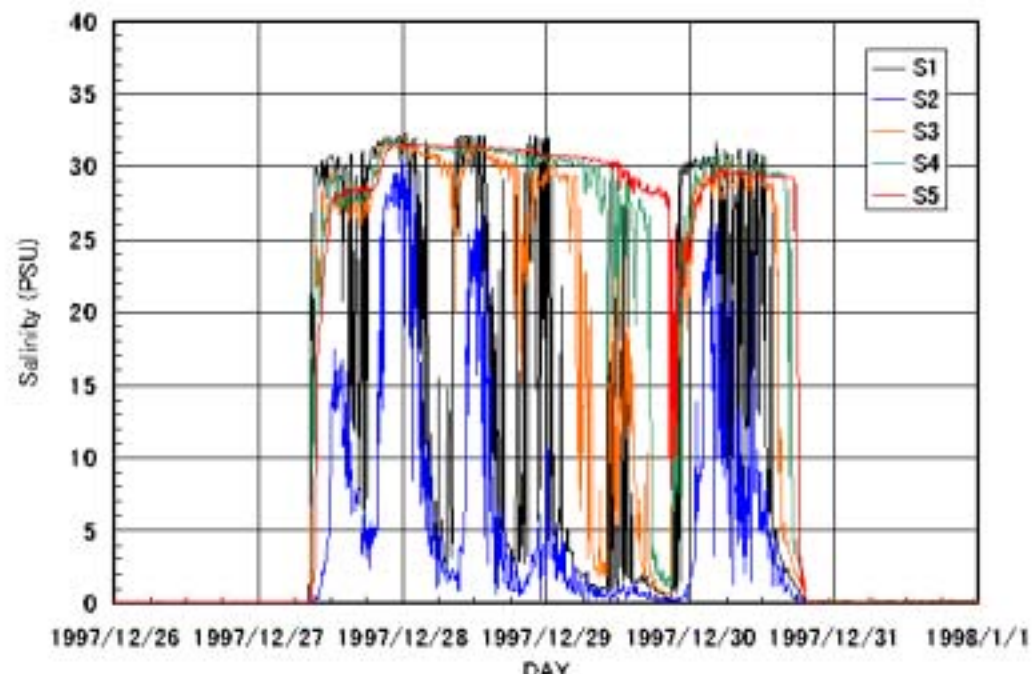


図 2.10: 多点型 CT センサケーブルのデータ例

第 3 章

河川流と江の川

本研究の観測対象となる密度躍層を有する流れ場は、主に河口部にある。本章では河川、河口や河口域、河川流など、特に海水と淡水が混合する流れ場（河川感潮域と呼ぶ）の特性について述べ、さらに江の川の特徴について述べる。

3.1 河川と河口域

一般に河川は内陸の降水を集めて流れ下り海に注ぐが、河口近くでは河川水と海水が接触、混合して複雑な流れや物質の分布が見られる。物理的に見ると、河口に近い河川の下流域では、海の潮汐の影響が伝わって水位や流速に潮の干満に応じた周期的な変動が起こる。このような河川の下流域を「河川感潮域」、あるいは「感潮河川」と呼ぶ [2]。この感潮域の長さは川によって異なり、一般的には勾配が小さく、断面積の大きい河川ほど感潮域は長い。日本の河川は比較的勾配が大きく、感潮域の長さは数 km ~ 数十 km 程度のことが多いが、大陸の勾配の小さな河川では、数百 km に及ぶものも少なくない。

人間と河川の関わりを見てみると、世界的にも多くの文明や大都市は河口近くに発展してきた。これは水が人間の生活に欠かせないものであり、そこではその水が豊富に得られるからに他ならない。そして河川の河口に近い水域は、淡水と海水の混合の状態に応じて独自の生態系が発達しており、その一部は豊富な水産資源として利用されている。また河川感潮域は、内陸と外洋を結ぶ水上輸送において重要な位置を占める場合が多く、そこでは港や安全な航路として利用されて

いる。近年では内陸の輸送は自動車に依存する割合が高くなっているが、世界的に見ると、大きな河川では依然として水上輸送が重要な役割を果たしている。

しかしひとたび干ばつとなると、この海水が上流まで溯って河川水や川沿いの地下水の塩分量が上昇し、水利用が困難となる、いわゆる「塩害」が発生する。さらに近年エルニーニョ現象などによる短周期の気候変動がもたらす小雨によって渇水が発生したり、また長期的にみても地球温暖化による海面上昇などが危惧されている。一般に河口付近の陸地面は海水面に対してわずかに高いか、低い場合さえあるため、何れのケースでも海水面のわずかな上昇で汽水域に対する海水侵入が増大して、冠水、排水不良、塩害などを引き起こす可能性がより高くなる。

このように、この「水」を飲料水をはじめ農産・工業用水などとして利用する社会生活への影響は計り知れない。さらに近年の長良川河口堰問題に代表される環境保護運動の高まりもあり、この観点からも残すべき自然環境としての河川域への関心は高い。

3.2 混合形式の分類

河川感潮部分の水理的な状態は、塩分の空間的な分布から、図 3.1 に示すように、強混合型、緩混合型、弱混合型の 3 種類に大別される [18]。強混合型では、潮汐による入退潮によって海水と淡水が鉛直方向に十分混合されて塩分 (密度) は一様になり、等塩分線は鉛直になって塩分勾配は流れ方向にのみ存在する。この場合には塩分濃度分布は 1 次元拡散方程式で記述される。弱混合では入退潮による混合が弱く、密度の大きい塩水の上を密度が小さい淡水が滑るように流下し、2 つの水層の間に塩分勾配の大きい界面が明瞭に現れる。この界面は塩分躍層と称される。このような塩分分布では、塩水が川底沿いに楔状に溯上しているため塩水楔とも呼ばれており、潮差の小さい日本海側の河川ではこの形態¹が出現する事が多い [10]。しかしながら、現実の河川においては Reynolds 数が非常に大きく、否定常性も重なって種々の乱れが存在するので、上下層間に混合が生じ、塩分が不連続的急変する事は少なく、2 層の界面には混合層が形成されることになる。緩混合型はこれら二つの型の中間的な混合状態であり流下方向にも鉛直方向にも塩分

¹江の川はまさにこれに該当する。

量の変化が存在する。

ただし、特定の河川に常にこの分類のある型が当てはめられるのではなく、ある特定の川でも、場所により、また時間によって、さまざまな形態が出現することに注意しなければならない。しかし須賀 [19] は、水面と底面の塩素イオン濃度比をもとに、これらの形態を定量的に分類した。その定義を表3.1 に示す。さらにこの定義に従って全国の 90 河川について調査を行い整理した。これによると、安定した弱混合河川は約 20 % であり、強混合を呈するのは潮差が 3m 以上の場合で約 10 % 以下である。残る 70 % は緩混合河川と考えられている。

表 3.1: 河口部の混合形態の分類 (須賀による)

混合形式	水面 / 底面の水素イオン濃度比
強混合	0.1 以下
緩混合	0.1 ~ 0.5
弱混合	0.5 以上

3.3 江の川の塩水楔

江の川は中国山地のほぼ中央を貫流して日本海に注ぐ中国地方最大の河川で、幹川流路延長 194 km、流域面積 3900 km^2 の、日本における弱混合型感潮河川の代表的な例として知られている (たとえば西條、奥田 [2])。前節でも述べたように、日本の河川は比較的長さが短く、勾配が大きい。これに対し大陸の河川は長さが長く (規模も大きい) 勾配も小さくなる。従って、勾配の違いから、一般的に大陸の河川の方が塩水浸入域は長く、流速も小さい。また古くからの研究対象となっているのは、前述した通りである。色々な河川の流路における標高と河口からの距離を図 3.2 に示す。これによると江の川の勾配が世界的に見ても大きいことがわかる。

弱混合型の河川では塩水と淡水の混合が少なく、塩水が楔状に淡水の下を河道

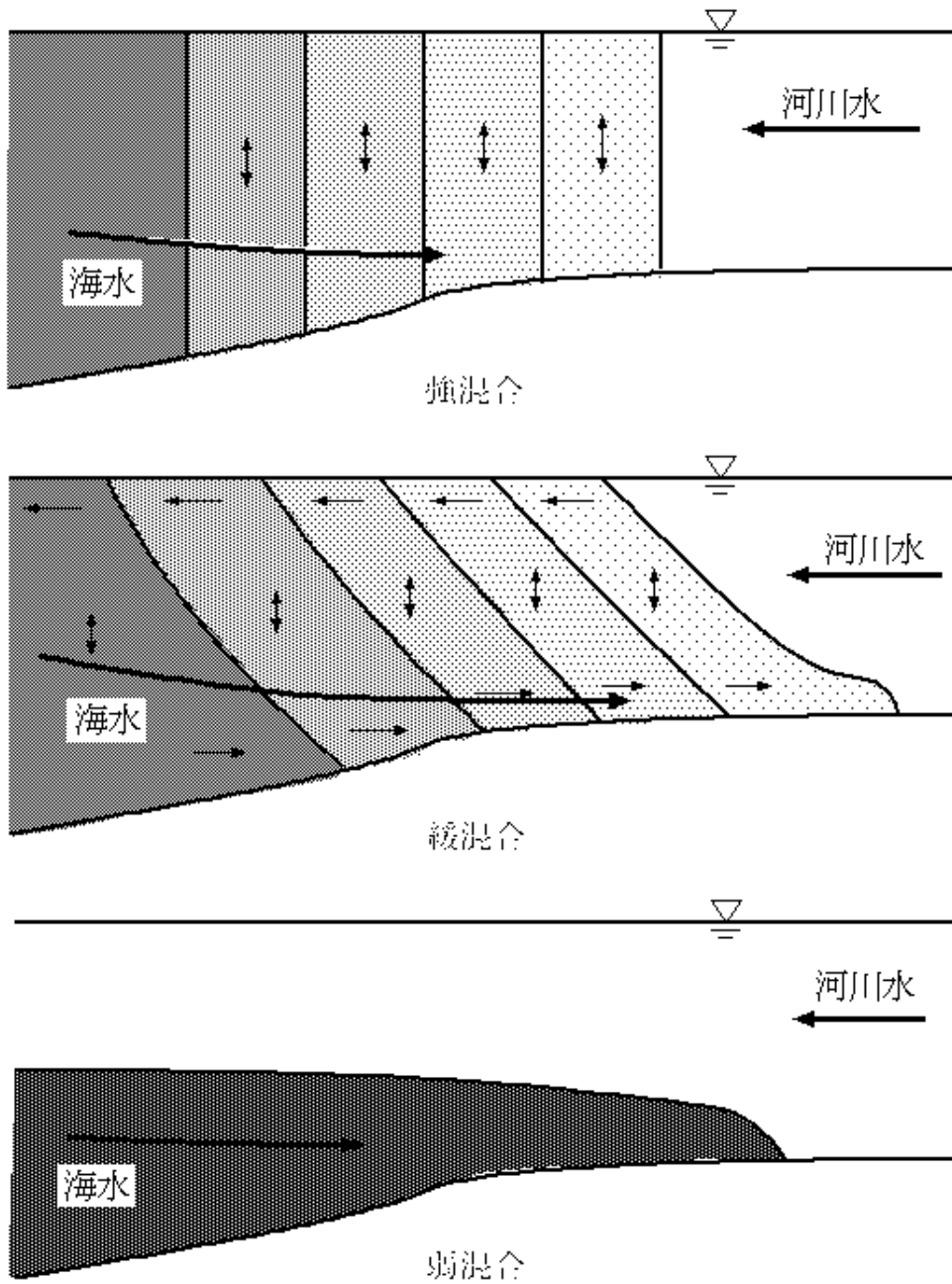


図 3.1: 混合形式による塩水侵入の 3 形態

内に浸入し、いわゆる塩水楔を形成する。その長さは、日本では数 km から 20km 程度までである [9]。特に日本海側の河川は比較的潮汐が小さく弱混合になり易い。図 3.2 に示すように江の川は勾配が大きいいため、塩水溯上域が約 8km と小さく、塩水楔の観測に適している。また江の川は、塩水は通常河口からこの 8km 程度の範囲で溯上・降下を繰り返すが、渇水期にはこの範囲を越えてさらに河口からの約 11km 程度まで溯上することが知られている。

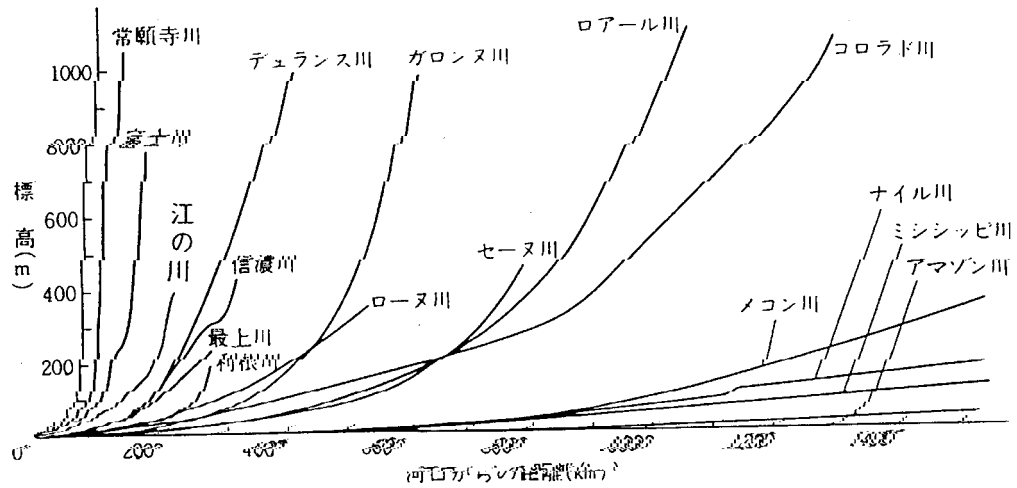


図 3.2: 河川の勾配

第 4 章

観測

筆者らは 1998 年から 99 年にかけて、2 章で示した観測システムを用いて、江の川下流部で塩水楔の観測を行った。ここではその概要について、主に塩分躍層の動態の解明という視点から述べる。

4.1 観測地点

観測対象である江の川河口部付近を図 4.1 に示す。1998 年から 99 年にかけて江の川で行った観測は、観測手法から見ると大きく次の 2 種類に分けられる。一つは水中音響探査機（前記の①）を用いた航走による塩水楔観測であり、もう一つは各種機器（前記②～⑤）を川床に設置した、定点における長期観測である。

このうち 1998 年度においては、長期観測を 2 回実施した。また①による塩水楔観測は、この長期観測期間中に合わせて計 6 回実施した。1997 年度に引き続き、あらかじめ塩水楔の溯上限界を把握した上で、塩水楔の動態を解明するために代表的な条件として以下の 2 条件を想定し、夏冬の 2 回異なる 2 地点で、広範囲な水域を対象に連続観測を行った。

- ・ 1998 年度 A 地点（河口から 3.4～4.2 km、1998 年 8～10 月、図 4.2）

水量が比較的多い夏期で、常に塩水楔が浸入している地点である。流路が下流に向かって大きく右に蛇行しており、河床には 16m 程度の深みがある。

- ・ 1998 年度 B 地点（河口から 6.4～7.6 km、1998 年 12 月～1999 年 2 月、図 4.3）

湧水期（冬季）に塩水楔が溯上する限界域。7.2km 付近に浅瀬があり、そこから 8.2km の赤栗の瀬までの間、流路は上流側から見ると左に大きく蛇行し、深みが続いている。

また 1999 年度は、1998 年度の観測地点よりさらに上流を対象とし、どのような条件で湧水期の塩水楔の溯上限界とされている赤栗の瀬（8.2km）を越えて塩水が溯上するか、を明らかにしようとした。さらに塩水楔観測は、この長期観測期間中と予備調査の合わせて計 3 回実施した。

・ 1999 年度（河口から 7.4～8.2 km、1999 年 12 月～2000 年 2 月、図 4.4）

98 年度 観測ベースから通常期の塩水楔の溯上限界である 8.2km の赤栗の瀬までの地点。一部は前年度と重複しているが、主に赤栗の瀬より下流側の深みである。

4.2 航走による塩水楔観測

超音波を利用した水中音響探査機（SC-3）を使い、小型船を使用して河口から上流に向かって約 5 ノットで航走しながら観測を行った。江の川の場合、塩水が溯上するのは河口から 8km 程度までであり、この観測に要する時間は 1 時間弱である。従って観測における同時性は保たれると考えられる。このシステムは塩分躍層による鉛直方向の音響インピーダンスの違い（つまり密度躍層による反射）を捉え、簡単に塩水楔の状態を 2 次元的に記録することができる。

(1) 塩水楔の観測例

塩水楔の観測例として、1998 年 12 月 23 日の観測結果を図 4.5 に示す。当日は B 地点で連続観測が開始された日であり、それ以前から続いた数年に一度の湧水期にあっていた。河口から溯上した塩水楔が 7.1km 付近の浅瀬を越えて、次の深みへと浸入している状況が良く捉えられている。塩水溯上は河床形状の影響を大きく受けることがこの図からも明らかである。同じく 12 月 23 日の横断方向 7.1～7.4km の観測データを図 4.6 に示す。このように河床断面左側の深い部分、いわゆる澗（ミオ）に沿って塩水が溯上する様子が良くわか

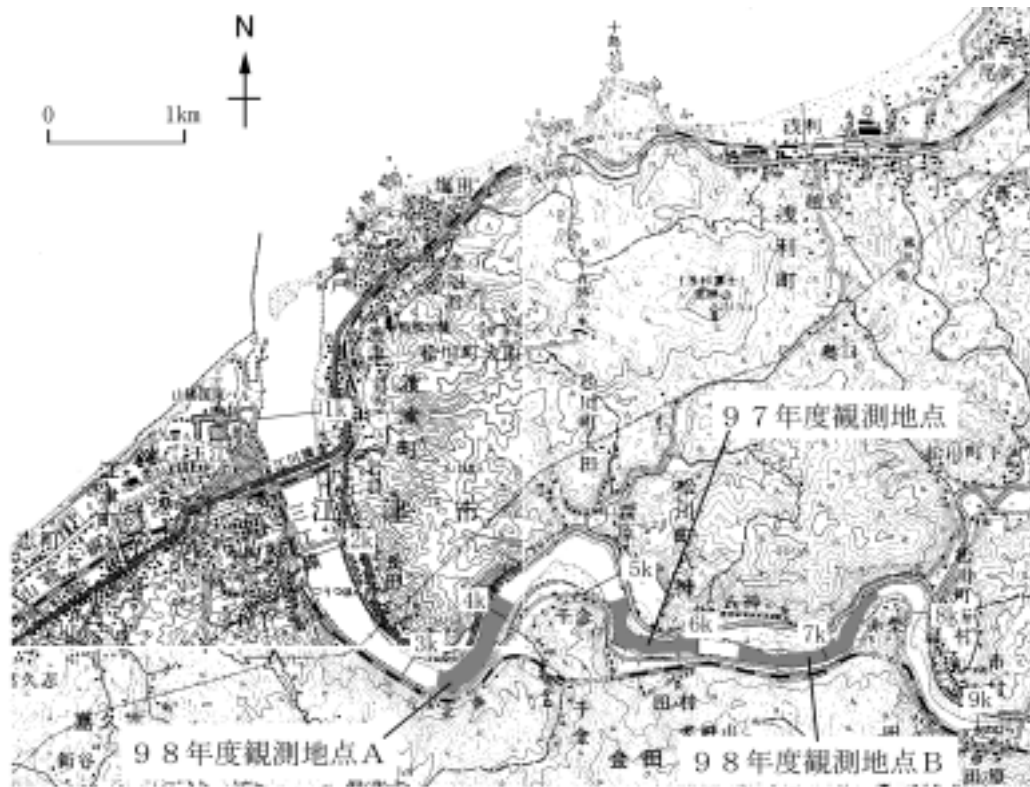


図 4.1: 江の川の河口部と観測地点

る。

ここに示したように、淡塩境界面では連行や内部波が存在し、ましてや塩水楔先端付近では、拡散により塩水塊の成長が不十分になることが多いことから界面の観測には困難が伴うが、本観測で用いた SC-3 は検出能力が高く、塩水楔先端部の密度変化を明瞭に捉えることが可能である [20]。なお実際の観測では音響による密度変化の検出だけでは不十分であるので、数点で鉛直方向の塩分、温度分布測定を行った。12月23日の観測における塩水楔先端部付近（河口から 7km、8km）での鉛直方向の温度および塩分の分布を図 4.7 に示す。温度および塩分躍層と図 4.5 の密度界面の位置はよく一致している。従って、SC-3 の検出能力から密度躍層が充分捉えられていることは明らかである。

(2) 塩水楔の溯上限界

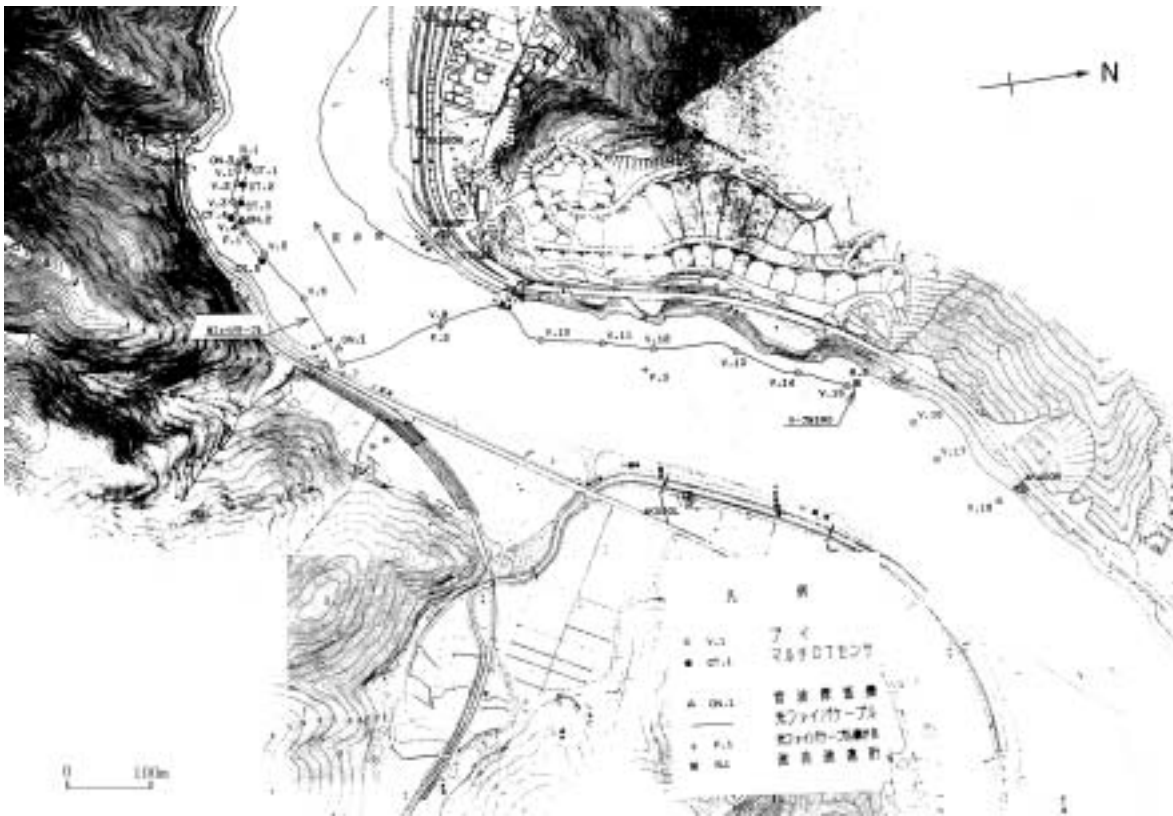


図 4.2: 1998 年度観測 A 地点と観測機器

本調査では、塩水楔の観測を計 9 回行った。これらの観測によって溯上限界がどこに位置するかについての正確なデータが得られた。溯上限界距離と河川流量の関係を図 4.8 に示す。なお流量は河口から 9.1km 地点の川平水位観測所による 1 時間毎のデータである。

これによると流量が増加するに従って溯上距離は小さくなり、明らかに負の相関が見られる。これらのデータから、流量と溯上限界について次の回帰式が得られた。

$$L = -0.0207Q + 8.2142 \quad (4.1)$$



図 4.3: 1998 年度観測 B 地点と観測機器

ここで、 L : 塩水楔の全長 (km)、 Q : 流量 (m^3/s)。

なお徳岡ら [12] によると、1997 年度及び 98 年度の観測データから、江の川における溯上限界と流量の関係について、次の 1 次式が示されており、式 (4.1) はこれとほぼ一致している。

$$L = -0.0267Q + 8.349 \quad (4.2)$$

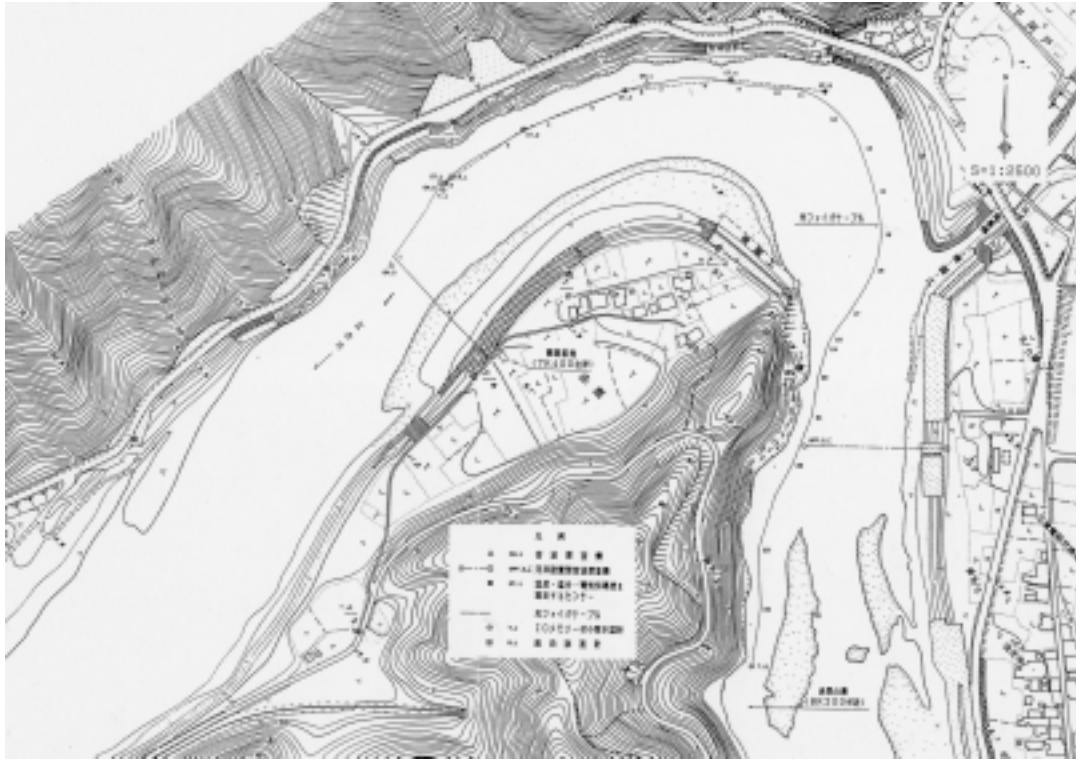


図 4.4: 1999 年度観測地点と観測機器

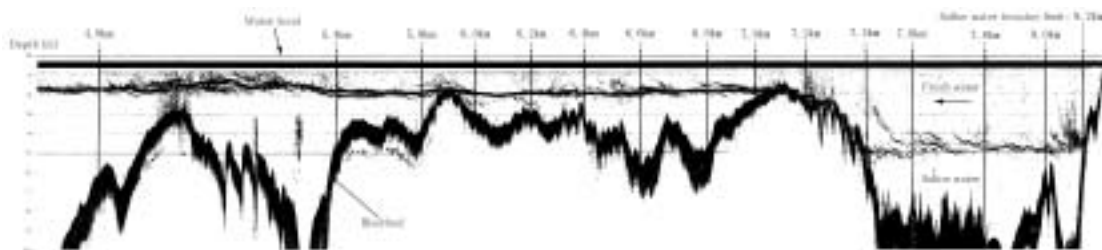


図 4.5: 塩水楔先端部の浸入状況 : 98.12.23

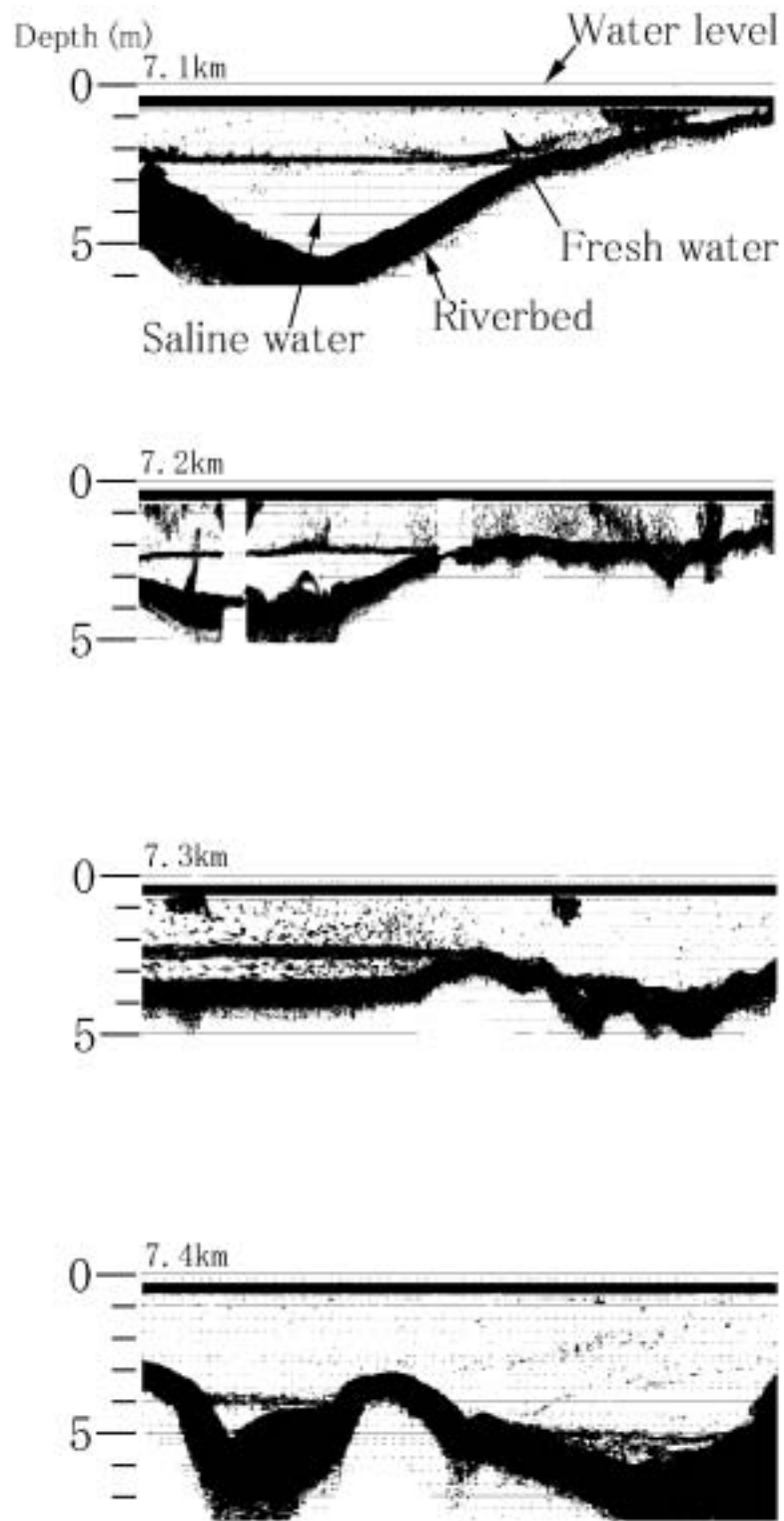


図 4.6: 横断方向の塩分躍層観測結果：河口より 7.1 - 7.4km

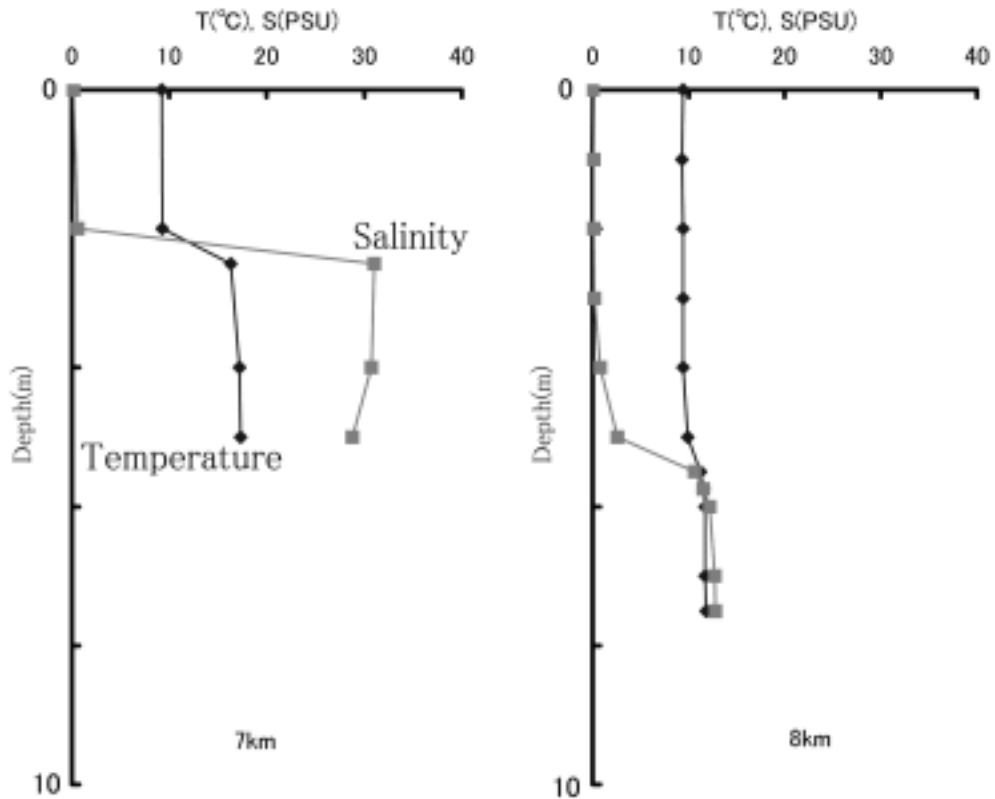


図 4.7: 温度・塩分の鉛直分布：河口より 7km および 8km 地点

4.3 定点における長期観測

4.3.1 1998 年度 A 地点における夏季観測

観測期間中は湧水が続き、塩水は観測区域を越えて殆ど溯上したままであったが、2回の流量の急激な増大があり、塩水楔の先端は観測点より下流に後退し、流量の減少とともに観測点を越えて溯上した。この2ケースに関して、オンライン式動態観測システム（機器②）のデータについて以下に述べる。なおオンライン式動態観測システムの送受波器 ON1、ON2、ON3 の設置位置と水深は次の通りである。

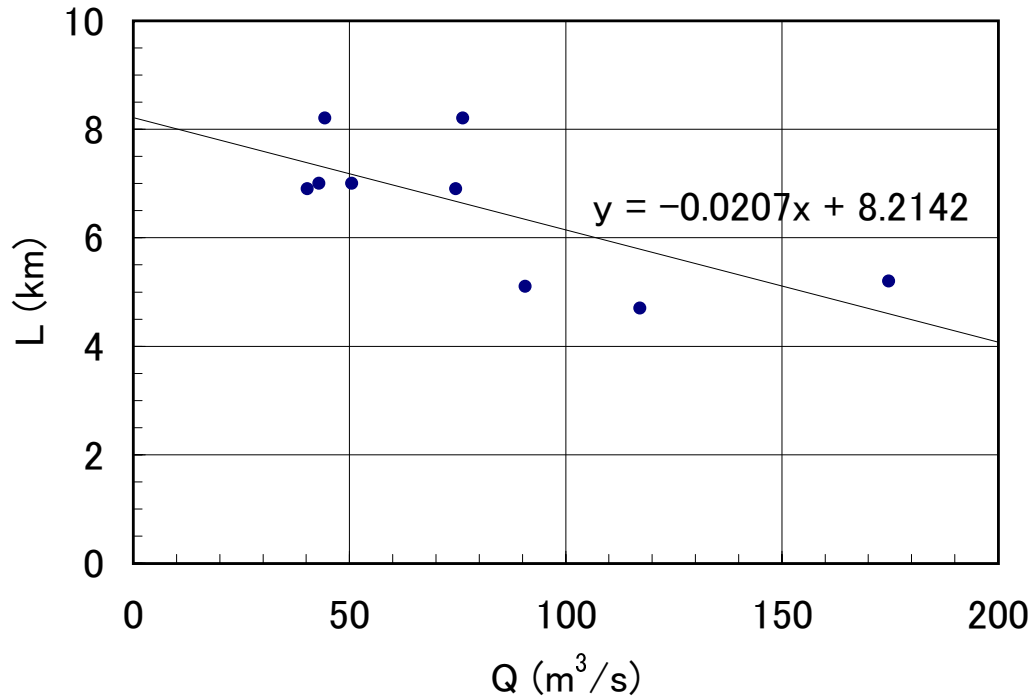


図 4.8: 塩水楔の溯上限界と河川流量の関係

ID	河口からの距離	水深
1) ON1	3.6km	8.0m
2) ON2	3.475km	15.5m
3) ON3	3.4km	16.3m

(1) 1998年9月15~9月20日の観測

この間のオンライン式動態観測システム ON3 (下流側)、ON1 (上流側) および流量の変化を図 4.9 に示す。流量が $200\text{m}^3/\text{s}$ 以上に増大した 9 月 17 日には、ON3 及び ON1 で塩分躍層位置が低下し、上流側の ON1 では塩水楔は降下して川床までが淡水となった。その後 17 日昼以後の流量の減少によって塩水楔はこの地点を越えて溯上した。一方下流側の ON3 では、この間に塩水楔自体は降下したが、深みには塩水がたまったままの状態であり、その後

の流量増大とともに塩分躍層の位置が上昇した。

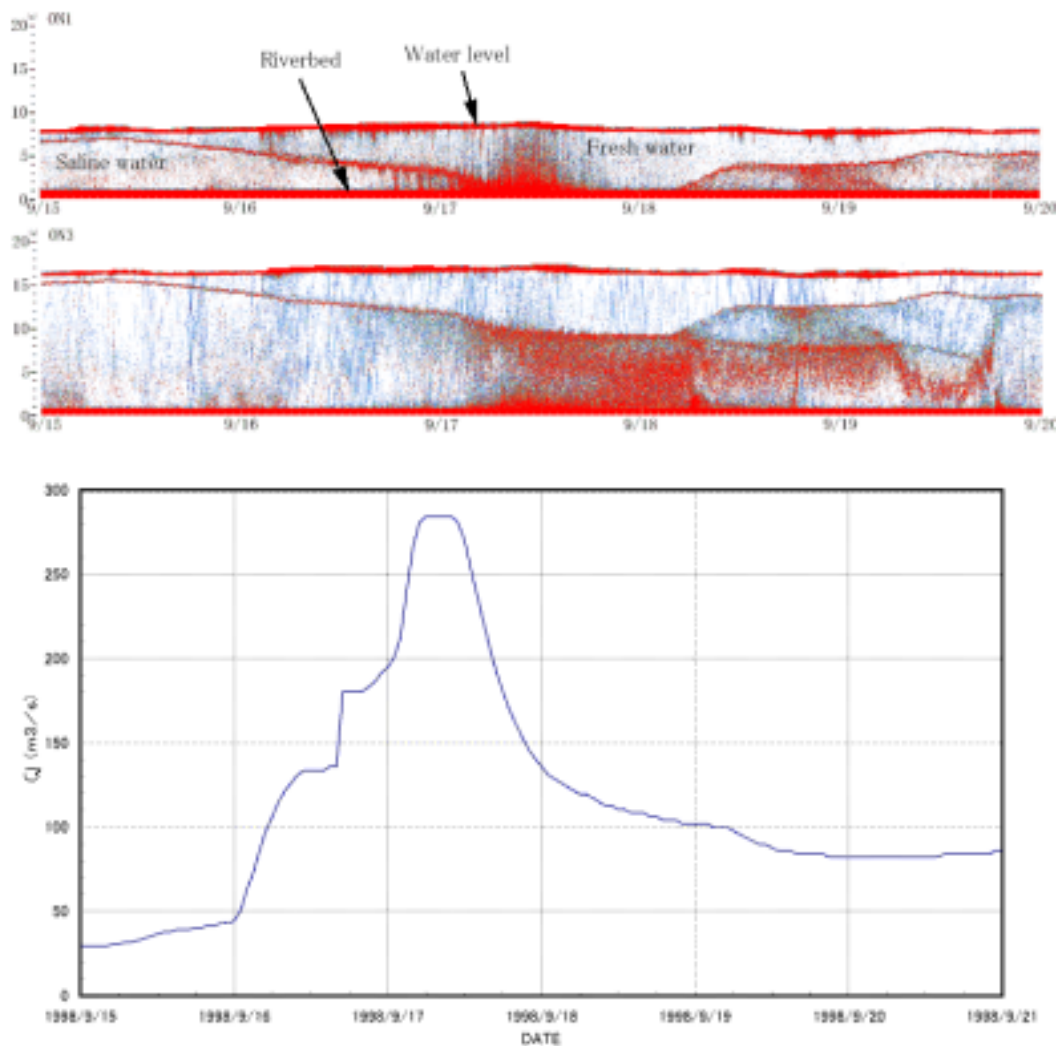


図 4.9: 塩分躍層観測結果と河川流量：A 地点, 98.09.15～20

(2) 1998 年 10 月 7 日～10 月 12 日の観測

この間のオンライン式動態観測システム ON1、ON2、ON3 の記録および流量の変化を図 4.10 に示す。流量が急激に増大した 10 月 8 日の未明には、溯上した塩水は一斉に河床深度に関係なく降下した。その後流量がしだいに減少すると、10 日早朝から塩水楔は溯上し、その先端は下流側の ON3 から上流側の ON2、ON1 の順に急速に溯上していった。

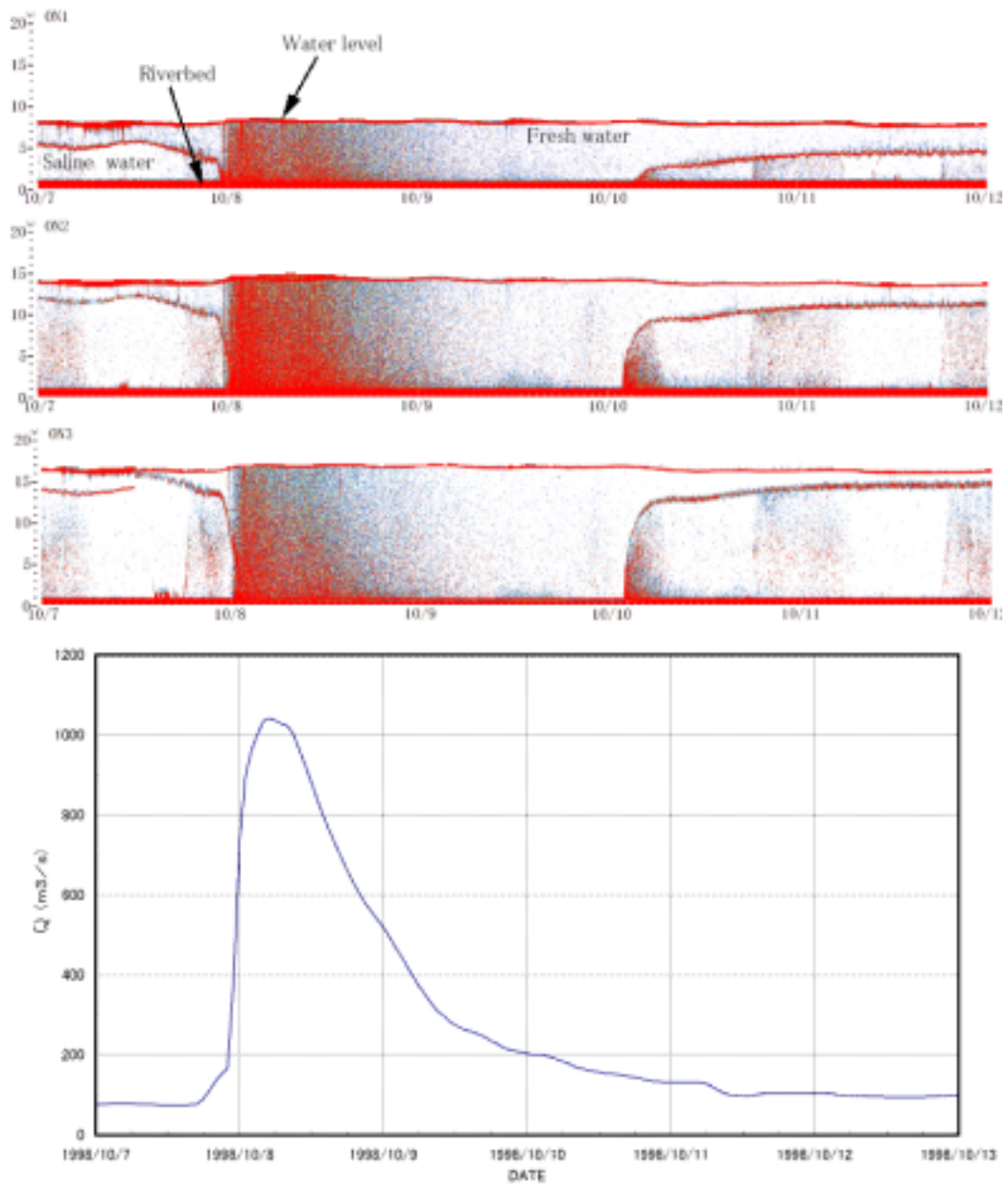


図 4.10: 塩分躍層観測結果と河川流量 : A 地点, 98.10.07 ~ 12

4.3.2 1998 年度 B 地点における冬季観測

各種機器を設置した 1998 年 12 月 23 日から 1999 年 1 月中旬までは、数年に一度しかない冬季の渇水期に当たっていた。この間河川流量は約 $50m^3/s$ で推移した。塩水楔は、溯上限界近くに設定した観測範囲にまで到達し、以下に述べる 3 回の塩水楔の溯上が観測された。なお、オンライン式動態観測システム (機器②) 及び CT センサケーブル (機器⑤) の設置位置と水深は、次の通りである。

- オンライン式動態観測システム

	ID	河口からの距離	水深
1)	ON1	7.1km	7.3m
2)	ON2	7.3km	3.4m
3)	ON3	7.5km	3.2m

- CT センサケーブル

	ID	河口からの距離	水深
1)	CT1	7.3km	3.1m
2)	CT2	7.2km	1.9m
3)	CT3	7.1km	2.7m
4)	CT4	7.05km	3.6m
5)	CT5	6.95km	4.7m

(1) 1998 年 12 月 23 日 ~ 12 月 25 日の観測

この期間のオンライン式動態観測システム ON1(下流側) と ON3(上流側) および流量の記録を図 4.11 に示す¹。ON1、ON3 とともに 12 月 23 日の時点では塩分躍層界面はやや不鮮明であるが、24 日になるとしだいに鮮明になる。これは、塩水溯上時には塩水楔の先端部は淡水と混合しながら溯上し、次第に濃い塩水が到達して躍層が発達して界面が鮮明になっていくことを示していると考えられる。その後塩分躍層界面は、12 月 27 日まで次第に下方に下がってゆくが、これは流量のわずかな上昇に対応している。なお界面には潮汐に起因する変動よりは短周期の振動が見られるが、これは 2 層流場における、いわゆる内部波 [28] が発生しているものと考えられる。

¹ON2 には浸入していない

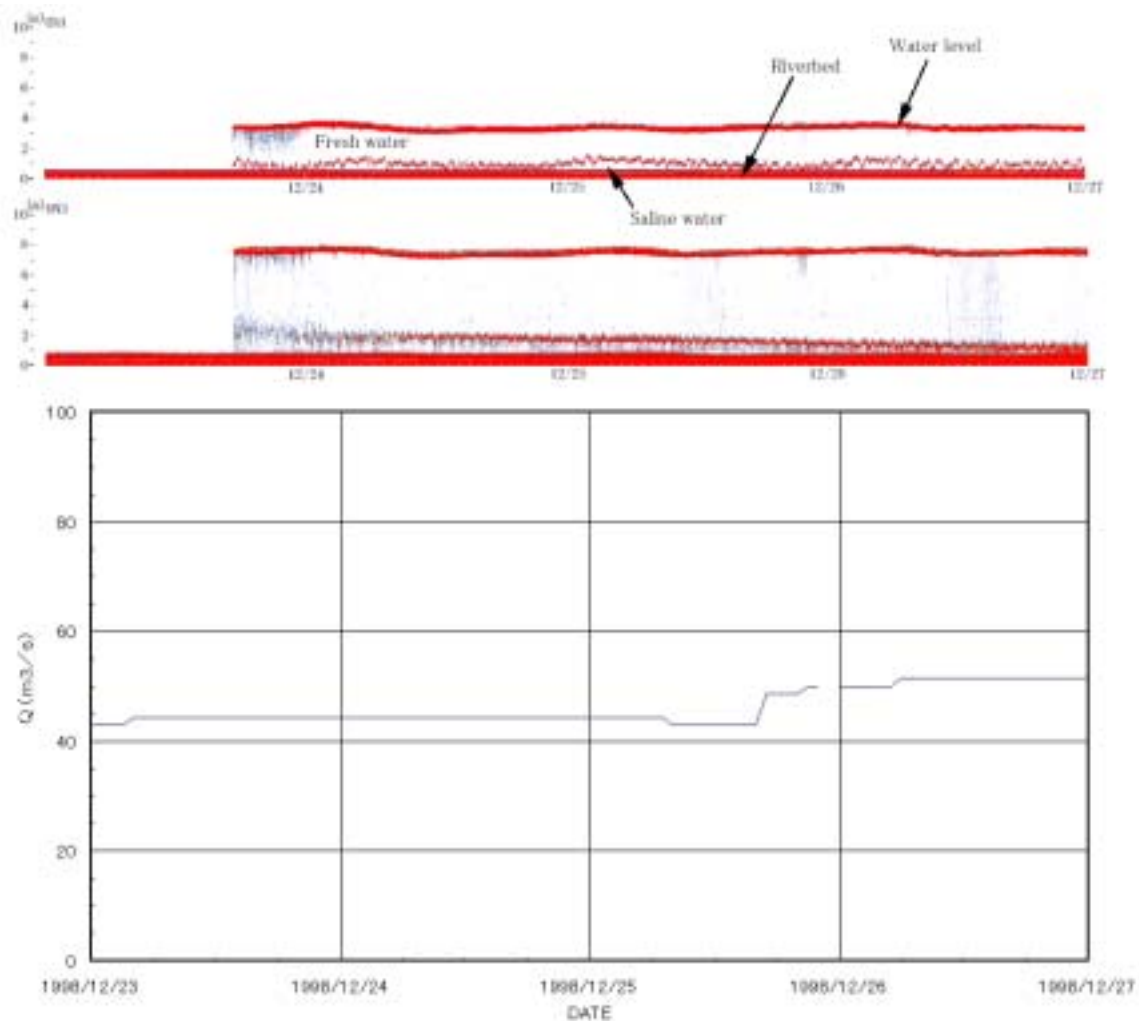


図 4.11: 塩分躍層観測結果と河川流量：B 地点, 98.12.23 ~ 25

(2) 1999 年 2 月 1 日～2 月 3 日の観測

この間のオンライン式動態観測システム ON1 の記録および CT センサケーブルの塩分、温度データと流量の変化を図 4.12 に示す。これらによると、上流側の ON2、ON3 ではこの間の塩水浸入は認められないことから、塩水楔の先端は ON1 を越えたが ON2 には達せず、2 月 2 日からの流量の増加によって観測区域より下流に後退したと思われる。また CT センサケーブルも塩水の溯上に呼応して 2 月 1 日を中心に 25PSU 程度のピークがあり、それ以外の塩分はほとんど 0PSU なので、これが塩水楔の到達を示していると考えら

れる。温度についてみると、小さな規則的な変化の上に、上記と同じ時期に温度のピークがみられることから、高温水塊が塩水であることがわかる。

(3) 1999年2月7日～2月9日の観測

この観測期間中のオンライン式動態観測システム ON1 の記録と CT センサケーブルによる塩分、温度および流量の変化を図 4.13 に示す。この地点には、2月7日の後半から8日にかけて川床から高さ 1m まで塩水が浸入しているが、上流側の ON2 と ON3 では塩水浸入は認められない。このことから、塩水楔の先端は ON1 を越えたが ON2 には達せず、流量のわずかな変化でその間を溯上・降下し、2月8日からの流量の増加によって観測区域より下流に降下したことがわかる。また CT センサケーブルも同様にこの現象を捉えており、2月8日を中心とした温度および塩分のピークが見られる。

また同じく2月6～9日の光ファイバ分布温度計(機器④)の観測データから得られた時間・空間分布図(温度コンタ図)を図 4.14 に示す。これは縦軸が河口からの距離、横軸が時間であり、色の濃淡で温度を示している。この図でも2月7日未明に下流側(図中上側)から高温水が溯上してきた様子が捉えられている。また河口からの距離 6.6km あたりに、ずっと高温水が存在しているのは、塩水が深みにたまったままであることを示している。

4.3.3 1999年度の冬季観測

渇水期の塩水楔の動態、特に赤栗の瀬を越えるような溯上の観測をねらって、1999年12月4日から2000年1月7日まで連続観測を行った。結果的には機器設置を行った12月4日から6日にかけての期間が、観測期間中最も流量が減少した時期に当たっていて、 $50 \text{ m}^3/\text{s}$ を下回ったが、その後は流量はむしろ増加した。流量が管理限界の $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度まで下がる事を期待したが、それは実現しなかった。しかし12月4～6日の流量減少で、赤栗の瀬近くまでの塩水溯上が観測されたので、当初の目的は達成することができた。なお、オンライン式動態観測システム(機器②)の設置位置と水深は、次の通りである。

- オンライン式動態観測システム

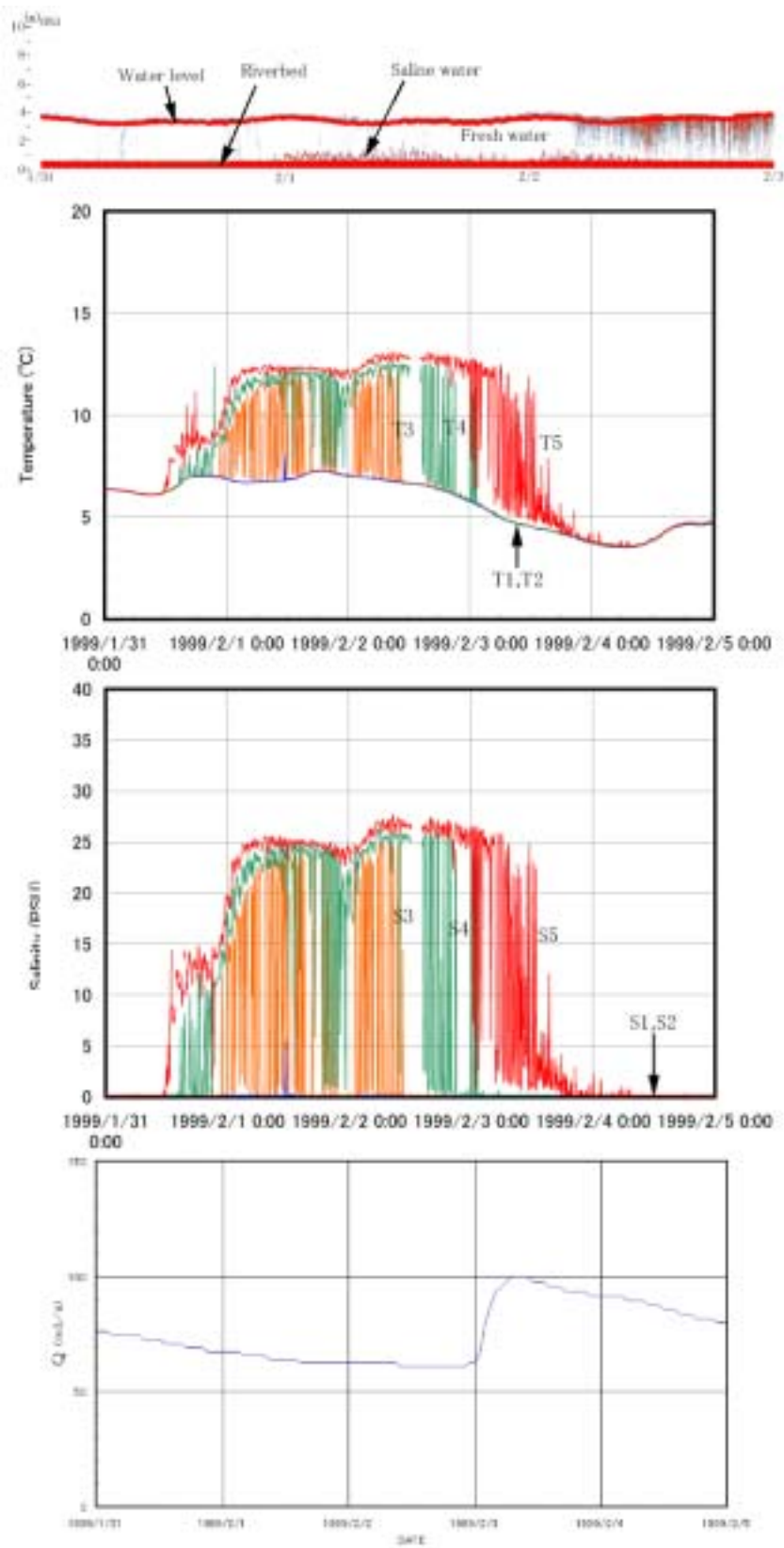


図 4.12: 塩分躍層観測結果と河川流量 : B 地点, 99.02.01 ~ 03

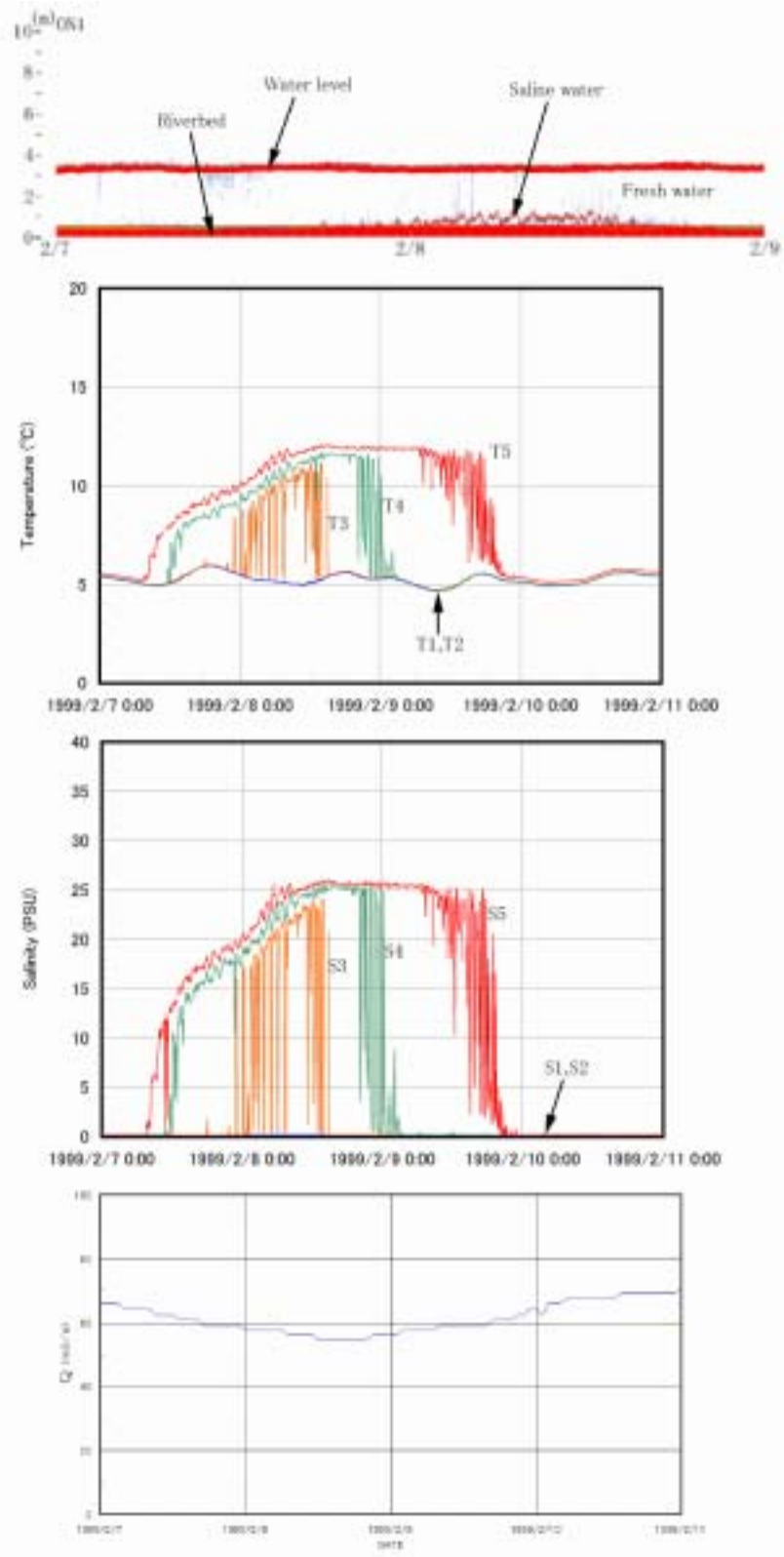


図 4.13: 塩分躍層観測結果と河川流量 : B 地点, 99.02.07 ~ 09

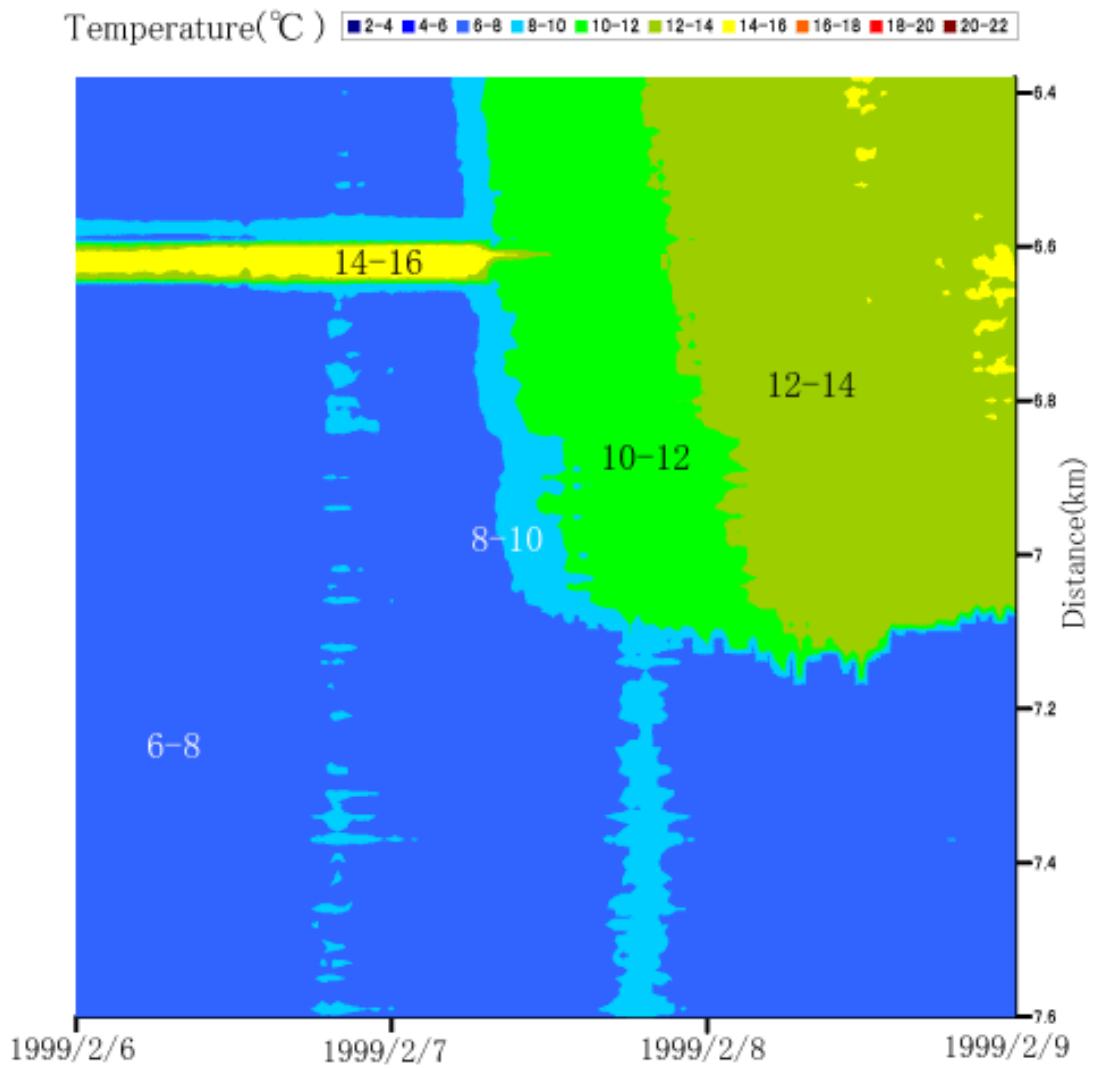


図 4.14: 河床部の温度変化 : B 地点, 99.02.06 ~ 09

	ID	河口からの距離	水深
1)	ON1	7.7km	10.0m
2)	ON2	7.55km	8.0m
3)	ON3	7.45km	8.7m

(1) 1999年12月4日～12月6日の観測

観測期間中に川平水位観測所での流量が $50m^3/s$ を切って、赤栗の瀬に至る塩水溯上がおこった12月4～6日のオンライン式動態観測システムON1～3の記録を図4.15に示す。下流からON3、ON2、ON1と河床をはい上がる塩水塊の通過があったことがわかる。また塩水溯上が時間的に上流に進むにしたがって、淡塩境界面の反射が強くなることから、塩水の濃度が増していくことがわかる。

また同期間の光ファイバ分布温度計の観測データから得られた時間・空間分布図(温度コンタ図)を図4.16に示す。この図でも12月4日深夜に下流側(図中上側)から高温水が溯上してきた様子が捉えられている。12月5日から6日になるとさらに高温の塩水が溯上しており、これはオンライン式動態観測システムと同様に、塩水の濃度が上昇していることを示している。

4.3.4 塩水楔の溯上速度

長期連続観測のメリットの一つは、観測対象に発生したすべてのイベントを時間と共に記録できることである。本観測のように塩水楔の流動を対象とした場合、溯上・降下による先端部の通過を、各観測機器の設置地点でのデータの急変として検出できる。よって各設置地点の位置関係と観測された通過時間から、塩水楔の正確な移動速度を得ることができる。

オンライン式動態観測システムの場合、たとえば1998年度A地点での、ON1とON3の距離は200mである。図4.9から得られる9月18日のON1とON3の淡塩境界面の立ち上がりの時間差は約50分であるから、溯上速度は $6.7cm/s$ となる。

同様にCTセンサーケーブルの場合、同じくB地点でのCT3とCT5の距離が150mである。2月7日のCTセンサーケーブルの記録図4.13を見ると、温度・塩分の急変部(立ち上がり)のCT5とCT3の時間差は約15時間であり、溯上速

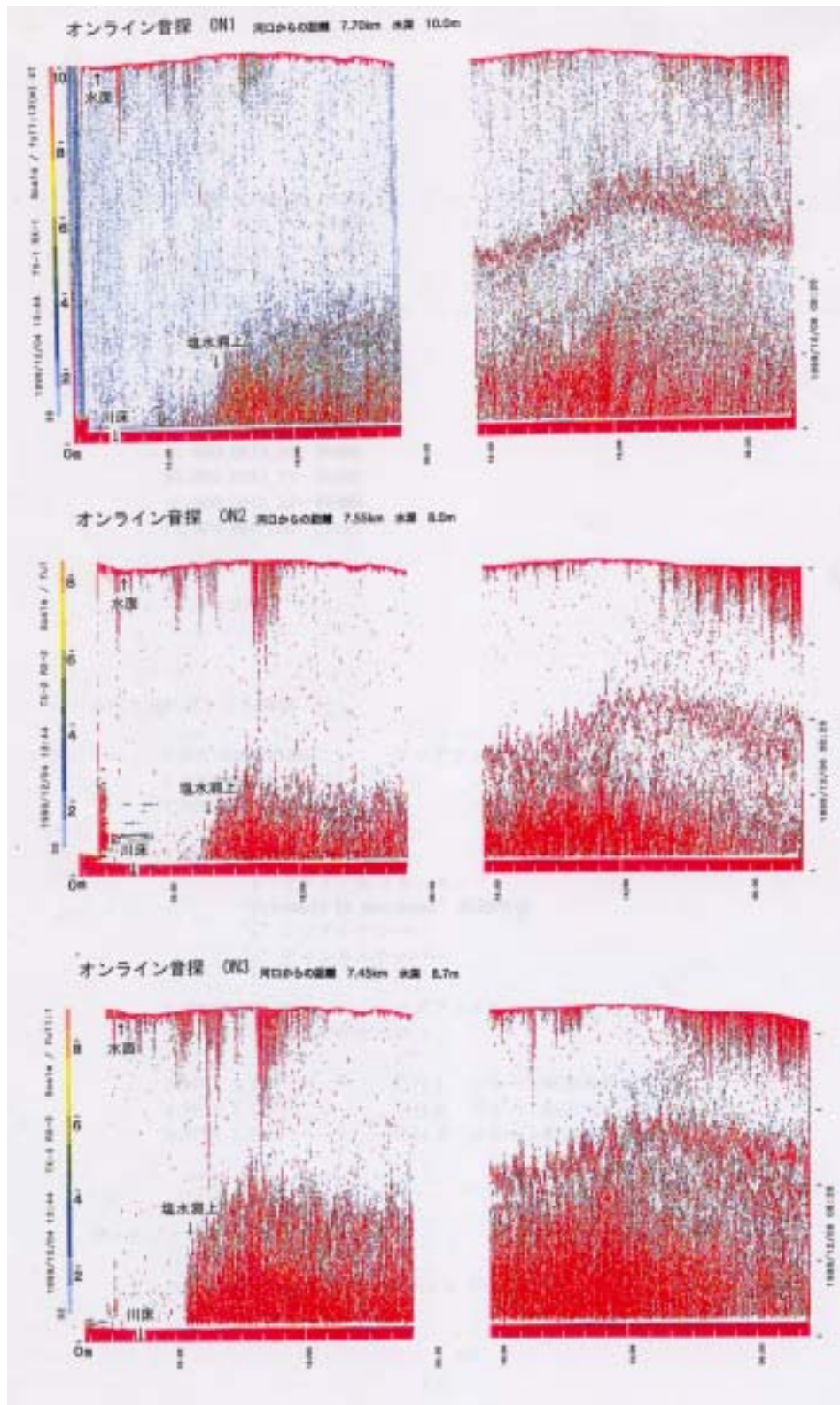


図 4.15: 塩分躍層観測結果：99.12.04 ~ 06

Temperature(°C)

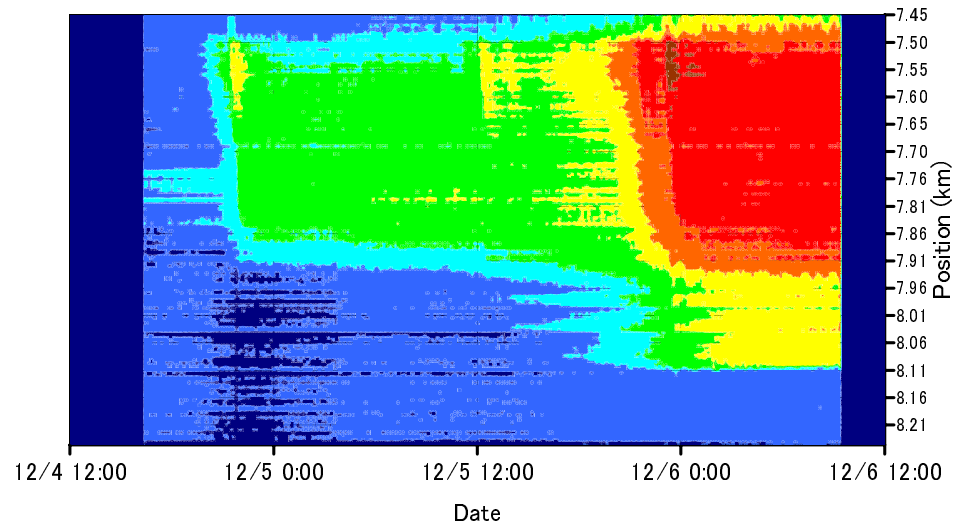
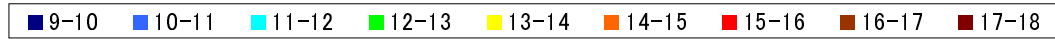


図 4.16: 河床部の温度変化：99.12.04～06

度は 0.28cm/s とかなり小さい。

また図 4.14 に示すような光ファイバ温度計の温度コンタ図の場合は、高温水の浸入を流路方向の位置および時間軸の 2 次元で捉らえることができるので、この濃淡部の境界の傾きそのものが溯上速度となる。この温度コンタ図より 2 月 7 日の塩水楔溯上速度は 2.2cm/s である。

以上のような方法で算出した溯上速度と流量の関係を図 4.17 に示す。なお本報の全観測データ中、溯上速度として算出できたのは図中に示す 9 ケースであった。このうち 1998 年度 A 地点は河口に近いので、比較的大きな流量でも塩水楔は溯上していき、その速度は約 6cm/s であった。同年度の B 地点および 1999 年度

は、冬季で湖上限界に近い所での観測値であり、速度は 0.2~5cm/s とばらついて
 いる。特に CT センサケーブルの観測値は 0.2~0.3cm/s と小さいが、これはその
 設置場所が湖上限界付近に位置しており、塩水楔が湖上から定常状態に移行する
 寸前の、速度が低下した状況を観測していると考えられる。またこれは光ファイ
 バ温度計の温度コンタ図²の濃淡境界の傾きが、先端部の停止寸前では小さくなる
 (図で傾きが横軸に対して小さくなる) ことよりも明らかである。

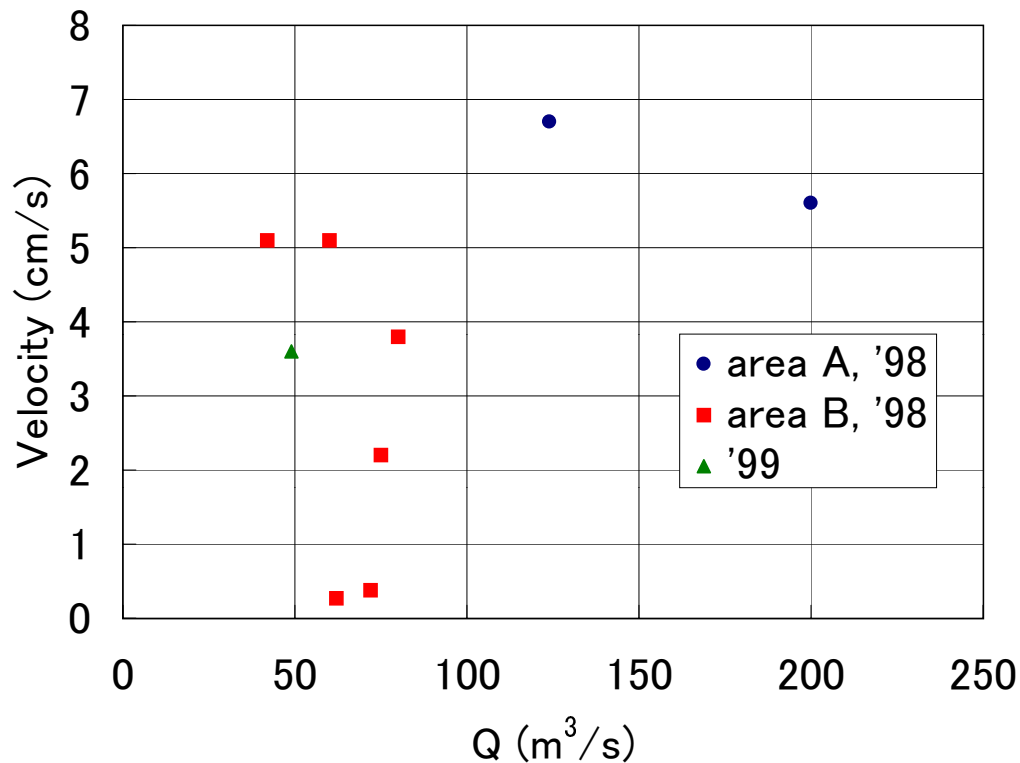


図 4.17: 塩水楔の湖上速度

²図 4.14 参照

第 5 章

考察

5.1 塩水楔の挙動

ここでは 4 章で示した観測データから得られた塩水楔の流動について、水理学諸式に基づき算出した理論値と実測値との比較を行い、考察を加える。

一般的に弱混合型の河川では塩水と淡水の混合が少なく、塩水楔を形成する。このような塩水楔の流動現象について、解析上よく用いられるのは 2 層 1 次元モデルである。江の川の場合、観測結果からみると下流部分には常時塩分躍層が存在し、明らかに弱混合型を呈している。従って本論文ではこの 2 層 1 次元モデルを適用する。

5.1.1 塩水楔の長さ

ここでは塩水楔の運動を表現するモデルとして、2 層 1 次元流を仮定している。さらに水質の鉛直方向分布の観測結果から、上下層間の混合は比較的小さく、連行は無視できる。そこで、

- 連行現象は無視する。
- 全水深は一定である。
- 内部界面抵抗係数は界面上で一定である。
- 下層の流速は 0、従って河床面摩擦は考慮しない。

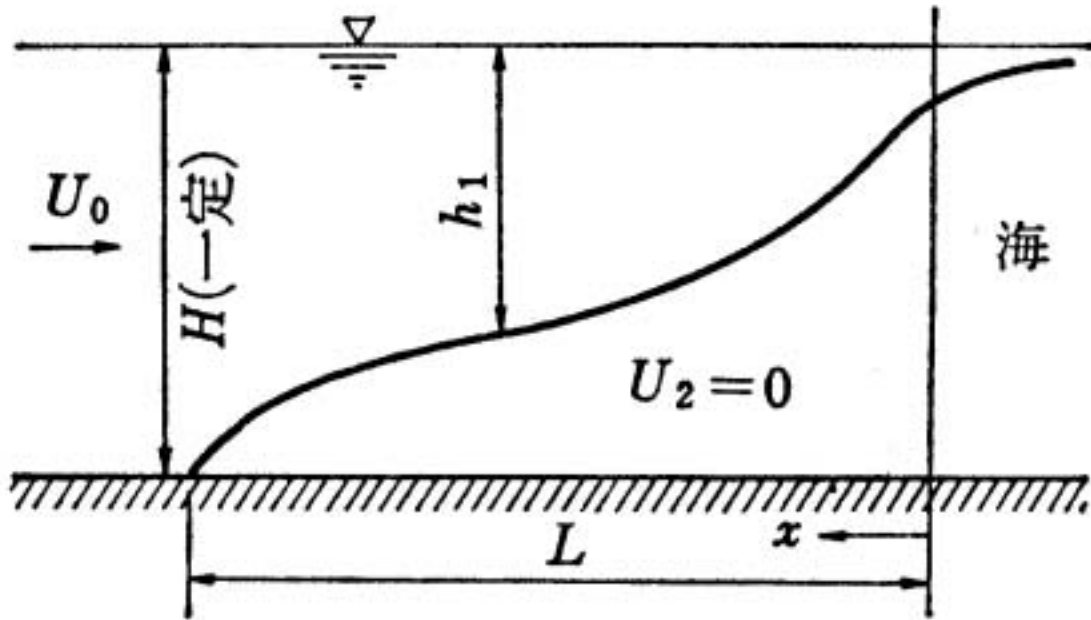


図 5.1: 水平床上の塩水楔

- 河口で上層流は限界水深をとる。

などの仮定を行うことにより、定常状態を前提とした水平床上の停止した塩水楔の長さは (図 5.1 参照) 次式で表すことができる [29]。

$$L = \frac{H}{2\bar{f}_i} \left(\frac{1}{5}F_{d_0}^{-2} - 2 + 3F_{d_0}^{2/3} - \frac{6}{5}F_{d_0}^{4/3} \right) \quad (5.1)$$

ただし、 g : 重力加速度、 L : 塩水楔の全長、 H : 楔先端の全水深、 \bar{f}_i : 楔に沿う平均の界面抵抗係数、 $F_{d_0} = U_0/\sqrt{\varepsilon g H}$: 密度 Froude 数、 U_0 : 楔先端での上層平均流速、 $\varepsilon = (\rho_2 - \rho_1)/\rho_2$ 、 ρ_1 、 ρ_2 : 上層、下層の平均密度で、以下同様に添字 1 と 2 はそれぞれ上層および下層の水理量を表している。

ここで最も問題となるのは、塩水楔の形状に最も影響を与える界面抵抗係数の評価である。本来は詳細な水文や気象条件下での観測から決定すべきであるが、本論文ではまず経験則を用いて界面抵抗係数を評価し、塩水楔長を求めた。そして塩

水楔長の観測結果から、逆に界面抵抗係数の経験則による評価式を提案した。また比較検討のために、観測によって得られた塩水楔の形状から界面抵抗係数の推定を行った。

まず経験則による評価として、次式を用いた [30]。

$$f_i = 0.35\Psi^{-0.5} \quad (5.2)$$

ここで、 $\Psi = Re_1 F_{d_1}^2$ 、 $Re_1 = U_1 h_1 / \nu$ ：上層の Reynolds 数である。

塩水楔長さの推定に関して、淡水流速（上層流速）は流量と観測による川床断面データおよび界面位置から求め、水温・塩分は水質観測の結果を利用した。1998～99年度の観測で、塩水楔の状況が定常的であり、計算に必要なパラメータがそろっているのは以下の7ケースである。

- 1998年8月5日
- 1998年12月23日
- 1999年1月14日
- 1999年2月14日
- 1999年9月10日
- 1999年10月27日
- 1999年12月4日

これらのケースについて推定計算を行った。その結果を流量との関係として、観測値と比較して図 5.2 に示す。流量が増加するに従って計算長さは短くなっており、界面抵抗係数の評価に経験則を用いたにもかかわらず、いずれのケースも観測値と計算値は一致しており、江の川における塩水楔の流動を良く表現していると言える。

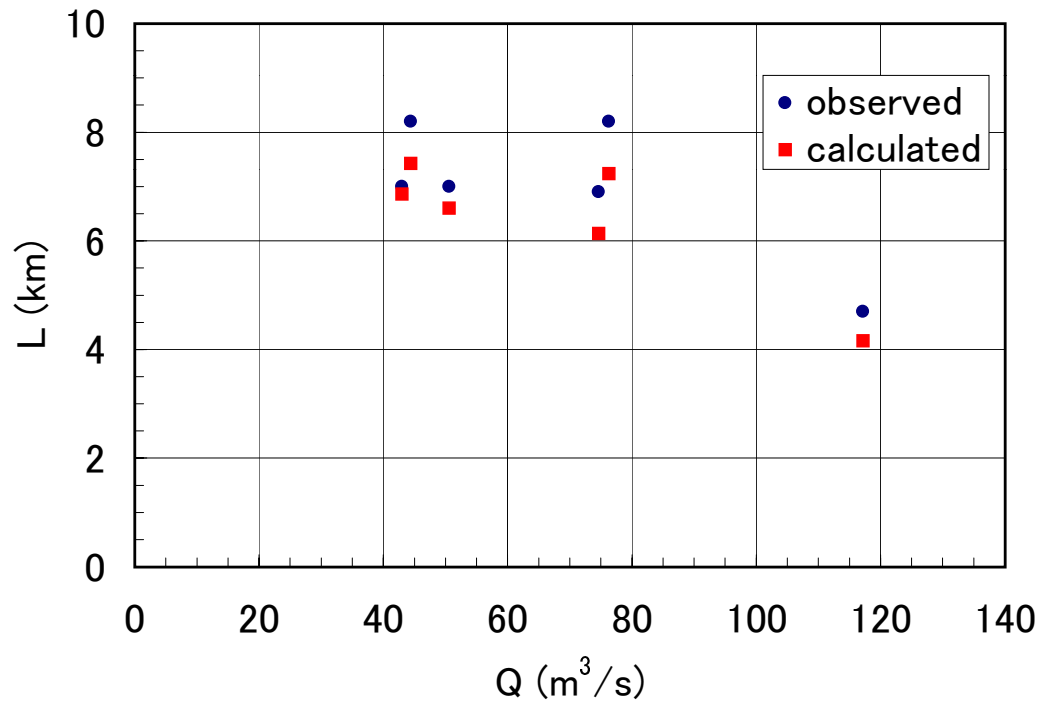


図 5.2: 塩水楔長さの推定

次に、逆に塩水楔長さの観測結果から界面抵抗係数を求める。式 (5.2) と同じく、界面抵抗係数の経験式は一般的には次式となる [29]。

$$f_i = a\Psi^n \quad (5.3)$$

式 (5.2) は、この式 (5.3) において、 $a = 0.35$ 、 $n = 0.5$ としている。塩水楔長計算を行った 7 ケースについて、塩水楔長さの観測値を L に用いて式 (5.1) より f_i を求め、最小二乗法によって a 、 n を同定した。その結果次式が得られた。

$$f_i = 0.5\Psi^{-0.54} \quad (5.4)$$

これが江の川における界面抵抗係数の評価式である。

つぎに塩水楔の形状から界面抵抗係数を求める方法は次式となる [29]。

$$f_i = 2F_{d1}^{-2} \frac{h_2}{h_1 + h_2} \left(- (1 - F_{d1}^2) \frac{\Delta h_1}{\Delta x} + \frac{U_1^2}{\varepsilon g B} \frac{\Delta B}{\Delta x} \right) \quad (5.5)$$

ただし、 h_1 、 h_2 ：上・下層の水深、 B ：水路幅、 x ：下流向きにとった距離座標、 Δ ：区間内の変化量である。塩水楔の観測結果から必要な形状のパラメータを読み取り、この式 (5.5) を用いて界面抵抗係数を算出した。

以上の界面抵抗係数に関する検討結果をまとめて図 5.3 に示す。昭和 60 年度江の川塩分解析検討業務報告書 [16] によると、江の川における界面抵抗係数の近似式は、

$$f_i = 0.4\Psi^{-0.4} \quad (5.6)$$

であり、本論文で我々が提案した式 (5.4) より界面抵抗係数がかなり大きくなる。江の川の水理量が現在と差がないとすると、界面抵抗係数が大きいために塩水楔の長さは相対的に短くなるはずであり、式 (5.6) について言えば、逆に塩水楔長さの観測値が現実より短かった可能性がある。流量を考慮に入れ、塩水楔長の観測データを本報と比較すると、確かにより短い傾向があり、これは観測精度の差と塩水楔先端の定義の違いなどによるところが大きいと考えられる。本研究で用いた塩水楔の観測方法は、非常に精度良く塩水楔の形状を把握することができる。しかし式 (5.5) を用いた楔形状からの界面抵抗係数の算出値はばらつきが大きく、観測とは一致しない。観測結果によれば川床の形状が塩水楔の形状に大

大きく影響しており、1次元解析モデルではこれが表現できないことによると考えられる。

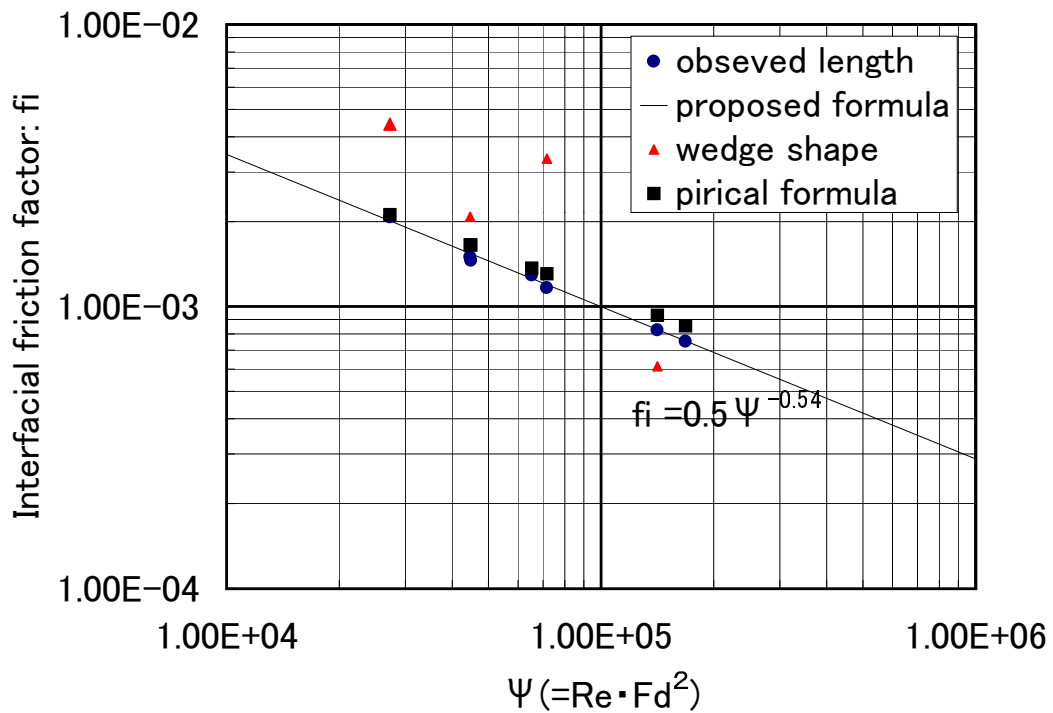


図 5.3: 界面抵抗係数の比較と提案式

5.1.2 塩水楔の溯上速度

本論文では、溯上速度の推定に密度フロントの浸入モデルを用いた。完全流体を前提として、水平床上のダクトから放出される密度フロント先端の進行速度は、 F_Δ を用いて次式で表される [29]。

$$c = (\varepsilon gh_2)^{1/2} F_\Delta \quad (5.7)$$

$$F_{\Delta}^2 = \frac{2 - \varphi}{1 - \varphi^2} \quad (5.8)$$

ここで、 c : 進行速度、 $\varphi = h_2 / (h_1 + h_2)$ である。

この式による評価に必要なパラメータがそろっているのは、1998 年度 B 地点において光ファイバ分布型温度計により塩水楔溯上速度が観測された以下の 4 ケースである。

- 1999 年 1 月 15 日
- 1999 年 1 月 23 日
- 1999 年 1 月 31 日
- 1999 年 2 月 7 日

これらのケースについて溯上速度の推定を行い、観測値との比較を図 5.4 に示す。その結果、観測では溯上速度は 5~6cm/s 程度であり、これは電磁式流向流速計の観測結果 5cm/s[12] と一致する。しかし計算結果は約 120cm/s とこれよりはるかに大きい。これは、

- (1) 計算が非粘性流体を前提としているのに対し、実際の塩水楔溯上は粘性の影響（二層間および河床抵抗）がかなり大きい。
- (2) モデルは静止流体中への進入であるのに対し、河川水の影響は逆に溯上を阻害する方向に作用する

などによると考えられる。さらに溯上時の流量変化を見ると（たとえば図 4.12 ）、流量の低下と観測区域への塩分浸入とはタイミングが一致しており、またその時の流量が大きい程溯上速度が小さい傾向が見られる。これらは明らかに塩水溯上が二層間の粘性に影響されることを示している。

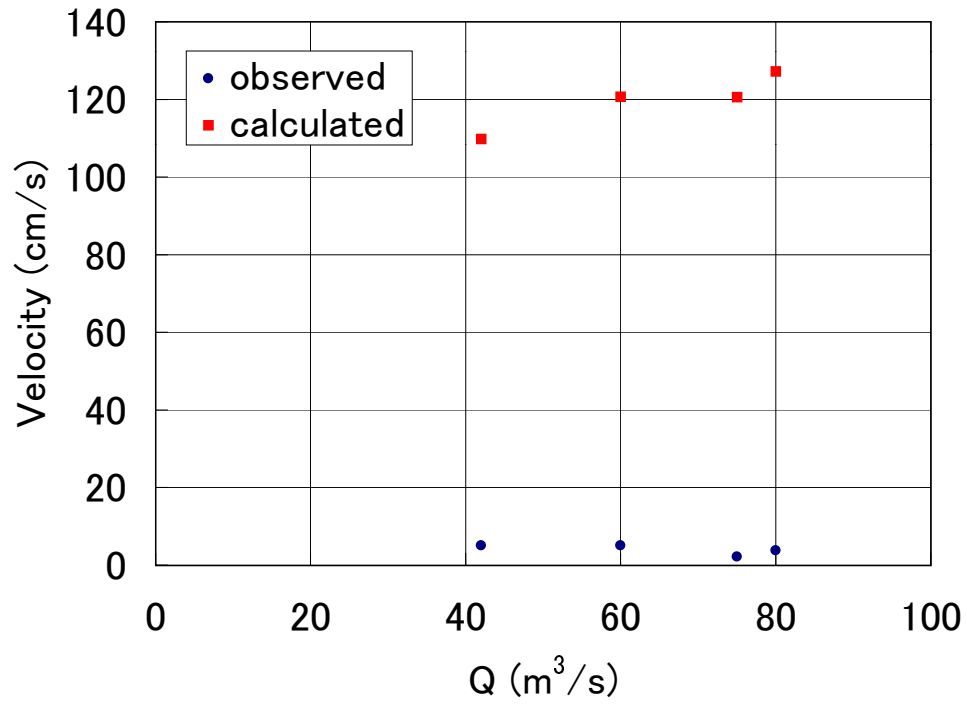


図 5.4: 塩水楔の溯上速度の推定

今回は塩水楔溯上速度の計算モデルとして、完全流体を前提とした密度フロント浸入モデルを用いたが、実際の塩水楔では粘性の影響を無視できなかった。上層の流れ（粘性）が考慮できる二層流モデルを採用した非定常問題としての解析を今後の課題としておきたい。

謝辞

まず最初に、本研究を進めるにあたって貴重な御助言、御指導を賜りました松澤照男教授に深く感謝致します。

本論文で報告した観測データは、塩水楔観測システム研究開発グループによるものです。特にグループの代表者である徳岡隆夫島根大学名誉教授には、3年間にわたり特別研究学生として島根大学汽水域研究センターに受け入れて頂き、さらに観測全般にわたって御指導頂きました。ここに深く感謝いたします。また、産業総合研究所海洋資源環境研究部門西村清和氏、同じく石原丈実氏には、論文原稿をはじめ有益な助言を頂きました。各位に厚く御礼申し上げます。

観測に使用した機器類については、塩水楔音響動態観測システム(オンライン式)は千本電機(株)の須崎聡氏、塩水楔音響動態観測システム(オフライン式)はクローバテック(株)の松田滋夫氏、光ファイバ分布型温度計は(株)OCC(旧(株)ワイ・オー・システム)の久保田俊輔氏、多点型CTセンサーケーブルは(株)鶴見精機の鈴木重教氏にご協力頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

建設省(現国土交通省)浜田工事事務所には観測全般、水位、流量データの提供などご協力頂きました。

最後に、本論文をまとめるに当たって御協力いただいた松澤研究室、島根大学総合理工学部徳岡研究室の諸兄に、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 南茂夫, “科学計測のための波形データ処理出版社”, CQ 出版社, pp9-24, 1986.
- [2] 西條八束/奥田節夫 (編), “河川感潮域 - その自然と変貌 - ”, 名古屋大学出版会, pp1-5, 1996.
- [3] Eric Wolanski, Nguyen Ngoc Huan, Le Trong Dao, Nguyen Huu Nhan, Nguyen Ngoc Thuy, “Fine-sediment Dynamics in the Mekong River Estuary, Vietnam”, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 43, pp565-582, 1996.
- [4] Eric Wolanski, Nguyen Huu Nhan, Simon Spagnol, “Sediment Dynamics During Low Flow Conditions in the Mekong River Estuary, Vietnam”, *Journal of Coastal Research*, 14, 2, pp472-482, 1998.
- [5] Martha Lou Broussard, “DELTAS models for exploration”, *Houston Geological Society*, pp193-207, 1975.
- [6] 中道陽文, 吉田静男, 大谷守正, “弱混合河口密度流における混合機構と表層塩分予測”, 第 59 回大会日本陸水学会講演予稿集, pp127, 1994.
- [7] 奥田節夫, 金成誠一, “江の川塩水溯上調査報告”, (財) 防災研究会, 江の川河川調査報告書, pp1-20, 1968.
- [8] 井上和也, 田中正博, 坂口拓史, 西澤賢太郎, “河口感潮域における塩水浸入の解析”, 京都大学防災研究所年報, No.36, B-2, pp.411-423, 1993.
- [9] 三井嘉都夫, “本報主要河川の塩水溯上型について”, 法政大学文学部紀要, No.16, pp29-44, 1970 .

- [10] 土木学会編, “水理公式集”, 土木学会, pp581-589, 1985.
- [11] 徳岡隆夫, 三瓶良和, 亀井健史, 西村清和, 須崎聡, 松田滋夫, 久保田俊輔, 鈴木重教, “江の川の塩水楔 -塩水溯上の長期連続観測システムの開発-(予報)”, LAGUNA(汽水域研究), No.5, pp197-208, 1998.
- [12] 徳岡隆夫, 三瓶良和, 上野博芳, 西村清和, 須崎聡, 松田滋夫, 久保田俊輔, 鈴木重教, “江の川の塩水楔 - 塩水溯上の長期連続観測システムの開発 -”, (湧水期溯上例, 1998年12月~1999年2月), LAGUNA(汽水域研究), No.6, pp.233-241, 1999.
- [13] 徳岡隆夫, “汽水域をとらえる - 江の川の塩水楔観測”, 月刊「水」2000年11月号, pp16-23, 2000.
- [14] 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, “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(汽水域研究), No.8, pp101-110, 2001.
- [15] 西條八束/奥田節夫(編), “河川感潮域 - その自然と変貌 -”, 名古屋大学出版会, pp63-67, 1996.
- [16] 建設省浜田工事事務所, “江の川塩分解析検討業務報告書”, 1986.
- [17] エヌ・エス・環境科学コンサルタント, 江の川塩水溯上検討業務報告書, 1996.
- [18] 西條八束/奥田節夫(編), “河川感潮域 - その自然と変貌 -”, 名古屋大学出版会, pp47-54, 1996.
- [19] 須賀堯三, “感潮河川における塩水くさびの水理に関する基礎的研究”, 土木研究所資料, No.1537, pp168-169, 1979.
- [20] 西村清和, 安間恵, 土屋洋一, 松田滋夫, 徳岡隆夫, 井内美郎, “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), No.1, pp.1-9, 1994.
- [21] 徳岡隆夫, 三瓶良和, 亀井健史, 玉理圭太郎, 西村清和, 松田滋夫, 須崎聡, “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), No.3, pp73-90, 1996.

- [22] 海洋音響研究会, 海洋音響 -基礎と応用-, 1984.
- [23] 久保田俊輔, “光ファイバ式温度分布計測システムによるプラント監視”, 日刊工業新聞社, オートメーション, Vol.44, No.3, pp79-81, 1999.
- [24] 西村清和, 鈴木重教, 徳岡隆夫, “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 -”, 海洋理工学会誌, Vol.4, No.1, pp41-54, 1998.
- [25] (株) 鶴見精機, “T.S.-XCTD”, 海洋音響学会誌, Vol.24, pp48-49, 1997.
- [26] 徳岡隆夫, 高安克己, 三瓶良和, 瀬戸浩二, 井内美郎, 西村清和, 安間恵, 須崎聡, 松田滋夫, 山中正, “汽水域の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), No.2, pp21-27, 1995.
- [27] 西村清和, 松林修, “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, No.8, pp17-31, 1996.
- [28] 神部勉, 流体力学, 裳華堂, pp202-204, 1995.
- [29] 土木学会編, “水理公式集”, 土木学会, pp57 - 67, 1985.
- [30] 須賀堯三, 高橋晃, “弱混合河川における内部抵抗係数”, 第30回土木学会年次学術講演会講演概要集, , 1975.
- [31] 山本晃一, 高橋晃, 深谷涉, “感潮河川の塩水溯上実態と混合特性”, 建設省土木研究所資料, No.3171, 1993.

本研究に関する発表論文

1. 査読付き論文

- [1] 上野博芳, 徳岡隆夫, 松澤照男, 「江の川の塩水楔 - 1998 年観測データの水理学的解析 - 」, 日本海洋理工学会論文集, 印刷中.

2. 国際会議等

- [2] Hiroyoshi Ueno, Teruo Matsuzawa, Takao Tokuoka, “Hydraulics analysis of saline wedge at River Gonokawa, Japan by the use of newly developed observation system”, IAS/SEPM Environmental Sedimentology Workshop, 2001. (採録決定済)
- [3] Takao Tokuoka, Yoshikazu Sampei, Kiyokazu Nishimura, Akira Suzaki, Shigeo Matsuda, Shunsuke Kubota, Shigenori Suzuki, Hiroyoshi Ueno, Tatsuhiro Ikeda, “Collaboration of saline water and underground water in tidal river : Observation of R. Gonokawa”, TECHNO-OCEAN2000 International Symposium, Proceedings, pp715-720, Nov., 2000.
- [4] Kiyokazu Nishimura, Takao Tokuoka, Yoshikazu Sampei, Akira Suzaki, Shigeo Matsuda, Shunsuke Kubota, Shigenori Suzuki, Hiroyoshi Ueno, “Environmental measurement systems for observation of estuaries and coastal lagoons”, TECHNO-OCEAN2000, International Symposium Proceedings, pp855-858, Nov., 2000.

3. その他論文

- [5] 徳岡隆夫, 三瓶良和, 上野博芳, 西村清和, 須崎聡, 松田滋夫, 久保田俊輔, 鈴木重教, 池田龍彦, 「江の川の塩水楔 - 塩水溯上とその上流の地下塩水との関係 - (1999年12月~2000年2月)」, 島根大学汽水域研究センター紀要 LAGUNA(汽水域研究), No.8, pp67-78, 2001年3月.
- [6] 徳岡隆夫, 三瓶良和, 上野博芳, 西村清和, 須崎聡, 松田滋夫, 久保田俊輔, 鈴木重教, 「大橋川における高塩分水塊の動態観測(1999年秋)」, 島根大学汽水域研究センター紀要 LAGUNA(汽水域研究), No.8, pp79-90, 2001年3月.
- [7] 上野博芳, 徳岡隆夫, 三瓶良和, 高安克巳, 西村清和, 須崎聡, 松田滋夫, 久保田俊輔, 鈴木重教, 「本庄工区パイプ潮とおし付近の底層水の動態観測」, 島根大学汽水域研究センター紀要 LAGUNA(汽水域研究), No.6, pp27-35, 1999年3月.
- [8] 徳岡隆夫, 三瓶良和, 亀井健史, 西村清和, 鈴木重教, 松田滋夫, 久保田俊輔, 須崎聡, 上野博芳, 「塩分躍層(塩水楔)動態観測システムの開発 - 汽水域の貧酸素水塊問題への貢献 - 」, 島根大学汽水域研究センター紀要 LAGUNA(汽水域研究), No.6, pp179-187, 1999年3月.
- [9] 徳岡隆夫, 三瓶良和, 上野博芳, 西村清和, 須崎聡, 松田滋夫, 久保田俊輔, 鈴木重教, 「江の川の塩水楔 - 塩水溯上の長期連続観測システムの開発 - (湯水期溯上例, 1998年12月~1999年2月)」, 島根大学汽水域研究センター紀要 LAGUNA(汽水域研究), No.6, pp233-245, 1999年3月.

4. 口頭発表等

- [10] 上野博芳, 徳岡隆夫, 松澤照男, 「新たに開発された観測システムによる江の川の塩水楔の水理的解析」, 海洋理工学会平成 13 年度秋季大会講演論文集, pp37-40, 2001 年 10 月.
- [11] 上野博芳, 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, 池田龍彦, 「江の川における塩水溯上と地下水との関係 - 2000 年度結果報告 - 」, 島根大学汽水域研究センター: 汽水域・山陰地域研究発表会, 2001 年 1 月.
- [12] 上野博芳, 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, 「大橋川から宍道湖にかけての高塩分水塊の流入観測 - 2000 年度結果報告 - 」, 島根大学汽水域研究センター: 汽水域・山陰地域研究発表会, 2001 年 1 月.
- [13] 上野博芳, 松澤照男, 「日本海における流出油漂流予測数値解析プログラムの利用」, 日本海域研究所国際フォーラム in 金沢, 2000 年 3 月.
- [14] 上野博芳, 塩水楔研究グループ, 「江の川の塩水楔観測におけるデータベースの構築」, 島根大学汽水域研究センター・地域共同研究センター共催討論会: 汽水域の環境計測の現状と計測機器開発, 2000 年 2 月.
- [15] 上野博芳, 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, 「江の川の塩水楔 (1999 年度結果報告)」, 島根大学汽水域研究センター: 汽水域・山陰地域研究発表会, 2000 年 1 月.
- [16] 徳岡隆夫, 三瓶良和, 上野博芳, 西村清和, 須崎聡, 松田滋夫, 久保田俊輔, 鈴木重教, 「大橋川における高塩分層の動態連続観測 (1999 年度) 結果について」, 島根大学汽水域研究センター: 汽水域・山陰地域研究発表会, 2000 年 1 月.
- [17] 松澤照男, 上野博芳, 「日本海における流出油漂流予測数値解析プログラムの実用化」, 日本海域研究所国際フォーラム in 金沢, 1999 年 3 月.

- [18] 上野博芳, 徳岡隆夫, 三瓶良和, 高安克己, 西村清和, 須崎聡, 松田滋夫, 久保田俊輔, 鈴木重教, 「本庄工区パイプ潮通し付近の底層水の動態観測」, 島根大学汽水域研究センター:「本庄水域と中海・宍道湖」研究発表会, 1999年1月.
- [19] 徳岡隆夫, 三瓶良和, 亀井健史, 西村清和, 須崎聡, 松田滋夫, 久保田俊輔, 鈴木重教, 上野博芳, 「塩分躍層動態観測システムの開発」, 島根大学汽水域研究センター:「本庄水域と中海・宍道湖」研究発表会, 1999年1月.
- [20] 松澤照男, 上野博芳, 「流出重油の漂流シミュレーション」, 京都大学防災研究所, 日本海重油汚染にみる総合的環境防災とリスクマネジメントに関する研究集会報告書, 1998年10月.
- [21] 松澤照男, 上野博芳, 「汚染物質の輸送・拡散モデルー油汚染を例にー」, 土木学会1998年度(第34回)水工学に関する夏期研修会講義集Bコース, B-7, 1998年7月.
- [22] 上野博芳, 松澤照男, 「日本海を対象とした数値シミュレーションと漂流解析」, 日本流体力学会年会'98講演論文集, pp261-262, 1998年7月.
- [23] 上野博芳, 松澤照男, 「日本海において流出した重油の漂流解析」, 計算工学講演会論文集, Vol.3, No1, pp121-124, 1998年5月.
- [24] 松澤照男, 上野博芳, 「日本海における流出油漂流予測方法の紹介」, 日本海域研究所国際フォーラム in 金沢ー海上への油流出災害に関する研究発表ー, pp20-23, 1998年3月.
- [25] 上野博芳, 松澤照男, 「日本海西南部の潮流および重油漂着シミュレーション」, 油対応沿岸域GIS研究会第2回例会, 金沢工業大学, 1998年1月.
- [26] 上野博芳, 松澤照男, 「日本海における流出重油の漂流数値解析」, 第11回数値流体力学講演論文集, pp271-272, 1997年12月.