

四万十川の塩水溯上

井内美郎¹・井上卓彦²・中原知明³・徳岡隆夫⁴・吹田 歩⁴

Salt water intrusion into the Shimanto River

Yoshio Inouchi¹, Takahiko Inoue², Tomoaki Nakahara³,
Takao Tokuoka⁴ and Ayumi Fukita⁴

Abstract: Salt water intrusion into the Shimanto River was measured on June 16 and 17, and December 12 and 13, 2004 at spring tide, using a SC-3 acoustic profiling system which determines the spatial distribution of the halocline with the measurements of water quality (temperature, salinity and chlorophyll a). This system is an improved 200 kHz precision echosounder, that records the distribution of the halocline and the thickness of the salt-water layer as profile records. At the Shimanto River saline intrusion has been known to reach up to 9.8 km from the river mouth, and is known to reach in less than 8 km in the present days owing to the deposition of sandy sediments along the downstream area. Our observation has clarified that the saline wedge usually remains at the deep of 5.6 km, and that it exceeds sometimes upstream up to 7.5 km during flood tide. The behavior of the salt wedge at the moderately mixed rivers are clearly visualized by the present study.

Key words: Shimanto River, salt intrusion, saline wedge, echo-sounding survey

1 はじめに

四万十川は日本に残された数少ない清流の1つとして知られ、河口域に生息するアカメが淡水・海水境界を行き来して遊泳する姿の放映などにより、豊かな汽水環境が残されている川として話題を呼んでいる(図1)。四万十川名産のアオノリも、塩水が溯上することによって生育することが知られている。四万十川には、本流にダムが存在せず、比較的自然状態を保った河川であり、緩混合型とされている塩水溯上の実態を知るには適したフィールドであるといえる。河口域に形成される塩水くさびや塩水溯上時に形成される淡水・塩水の境界面の動きについて

の理論的な考察は行われているが(たとえば宇野木ほか, 1973, 土木学会水理委員会, 1999 など), その基礎となるデータは水質の鉛直分布を地点ごとに測定することによっていたために, 実態が十分に把握されていたとは言えない。日本各地の河川の塩水溯上については三井(1970)の報告があり, 建設省土木研究所(1993)は全国の感潮河川の実態についてまとめている。また, 西條・奥田(1996)では河川感潮域についての解説とともに, いくつかの実例が報告されている。塩水くさび・塩分躍層を音響を使って可視化し, 正確に捉える方法については徳岡ほか(1994)と西村ほか(1994)で提案され, その後, 江の川(徳岡ほか, 1998)や中海と宍道湖を繋ぐ大橋川

¹ 愛媛大学沿岸環境科学研究センター Research Center For Marine Environmental Studies, Ehime University, Matsuyama 790-8577, Japan

² 愛媛大学理工学研究科 Graduate School of Science and Technology, Ehime University, Matsuyama 790-8577, Japan (現 産業技術総合研究所地質情報研究部門)

³ 愛媛大学理学部 Faculty of Science, Ehime University, Matsuyama 790-8577, Japan

⁴ 徳岡汽水環境研究所 Tokuoka Laboratory for Studies of Brackish Water Environments, Matsue 690-0823 m Japan

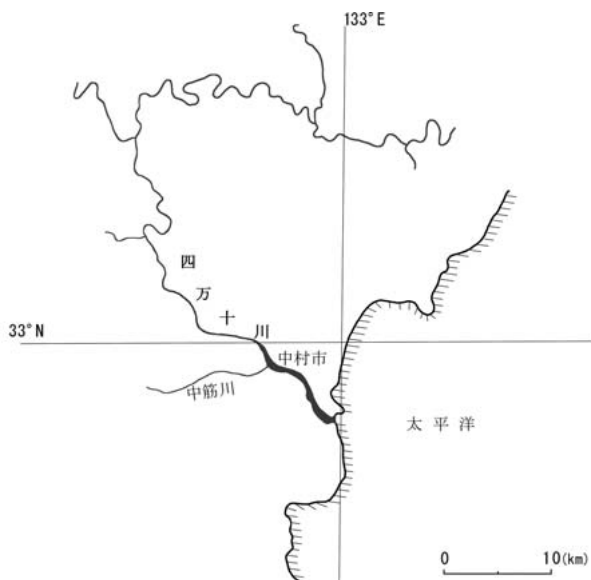


図 1. 四万十川の位置

Fig. 1. Index map.

(徳岡ほか, 2002)で報告されている。また徳岡ほか(2001)では塩水くさび・塩分躍層の観測法が紹介されている。この報告では、四万十川において2004年6月および12月の大潮時に音響探査と水質計を併用して観測を行った結果について述べる。なお、音響を用いた塩水溯上の調査については、関東的那珂川(熊沢ほか, 1994)、北海道の網走湖(池永ほか, 2002)や中国の長江(Shi and Kirby, 2003)などでも報告されている。

2 調査地域および調査方法

四万十川(渡川)の潮位変動量は大潮時で1.9 m, 小潮時で0.7 m, 感潮区間は河口から9.8 km, 既

往の塩水溯上距離は河口から9.8 km, 混合形態は緩混合とされている(建設省土木研究所, 1993)。塩水溯上距離については、近年では砂利採取が禁止されて久しく、河床の環境が保全されるようになったことから、塩水の溯上は通常は河口から5.6 kmの淵までで、この先の瀬を越えることはまれであるとみられている。四万十川の河床地形については国土交通省中村河川事務所によって200 mごとの横断地形が定期的に測量されていて、2002年の測量図によると、塩水溯上域にはいくつかの瀬と淵があることがわかる。河床地形は出水のたびごとに変わることが知られているが、今回の何回かの縦断観測でも、これらの地形はほぼ維持されていたと言えるので、ここでは記述の便宜のために「実崎(さんざき)の瀬(実崎から四万十大橋を越えるあたりまでの浅い部分, 写真1)」、「龍ヶ淵(その上流の水深15 mを越える深み, 写真2)」、「爪搔(つめがき)の瀬(左岸の丘陵部の延長にあたる浅い部分)」、「井沢の淵(井沢(後川との出会いの先)の深み)」、「山路の瀬(井沢より上流の浅い部分)と仮称することにする。今回の観測は、四万十川河口近くの一文字堤から山路の瀬を越えてその先の淵に至る河口から7.6 kmまでの範囲である。観測は2004年6月16~17日と12月12~13日の大潮時に行った。観測は以下に述べる塩水楔音響プロファイリングシステム(航走式SC-3型, 徳岡ほか, 2001)と水中投入式クロロフィル測定装置ACL 215(アレック電子), および一部は水質計Quanta-Q(ハイドロラボ)を用いて行った。測位にはDGPSを用い、船の測線誘導および調査後の航跡書き出しにはフリー地図ソフト「カシミール3D」(杉本, 2002)を用いた。なお、この測位システムの利用については吹田・西村(2005)で解説されている。



写真 1. 実崎の瀬と四万十大橋(2004.12.12)

Photo 1. The shoal at Sanzaki and Shimanto-ohashi Bridge (Dec.12, 2004)



写真 2. 龍ヶ淵付近(2004.12.13)

Photo 2. The Ryugafuchi pool (Dec.13, 2004)

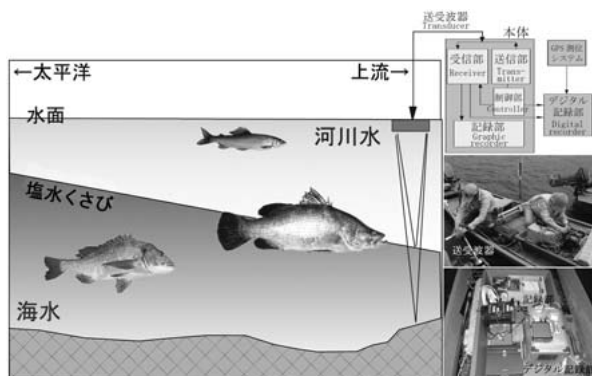


図2. SC-3音響プロファイリングシステムと四万十川の塩水溯上のイメージ

Fig. 2. SC-3 acoustic profiling system and an image of salt intrusion into the Shimanto River.

航走式 SC-3 型塩水楔音響プロファイリングシステム

本体（制御部、アナログ記録部）と送受波器（SC-3：千本電機製）、デジタル記録部（SC-3 R：クローバーテック製）から構成されている（図2）。送受波器を船の舷側に固定し、送受体を水面下 30 cm に固定した。船を走らせながら超音波（200 kHz）を水面から水底に向かって発信し、淡水と海水の境界（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。反射信号はアナログ記録部で書き出すと同時にデジタル化されデータ収録部に記録される。デジタル記録機には、SC-3の音響データとともにGPSの測位データが記録される。

メモリークロック ACL 215 型（アレック電子）

水中投入式の多項目水質計で、測定用のセンサーズンデと記録・保存用のディスプレイユニットから構成されている。水質データは深度、水温、塩分、クロロフィル a 量、光量子量を同時に測定する。内部メモリー型でセンサーを水中に 0.5 m/s で降下させることにより、0.1 m 毎にデータを得ることが出来る。

観測にあたっては、潮汐データは海上保安庁による土佐清水の潮汐値を参考とし、河川水位は国土交通省水文水質データベースによる実崎（河口から 3 km）および具同（河口から 9.5 km）の値（1 時間ごとの速報値）を使用した。

3 2004 年 6 月の観測

2004 年 6 月 16 および 17 日（大潮時）に観測を行った。観測期間中の実崎および具同の水位変化をそれぞれの観測時間帯とともに図 3（上）に、測線を図 4

に示す。具同での水位変化記録によると、6 月 12 日の降雨により増大した流量が平常に戻る前で、漸減し、やや水位が高い状況下での観測であった。16 日の干潮時および 17 日の満潮時に、河口から塩水溯上範囲までを航走して得られた記録を図 5 に、くさび先端部付近について、潮位の変化に合わせて観測した記録を、水質測定結果とともに図 6 に示す。また、6 月 17 日の水質測定結果をまとめて図 7 に示す。

図 5 に示すように、塩水溯上範囲は河口から 5.8 km の井沢の淵までで、水深 2 m あたりに比較的シャープで、ほぼ水平な淡水・塩水境界（以下では、音響的に認められる下位の塩分層と上位の低塩分～淡水層とのシャープな境界を便宜的に淡塩境界と呼ぶ）が認められる。この境界は河口から 5 km より上流ではややくさび状となり、流下する淡水の下に潜り込んでいる。干潮時と満潮時の記録を比較すると、実崎の瀬で明らかのように、満潮時には淡塩境界面が干潮時に比べて底上げされていることがわかる。干潮時と満潮時の実崎での水位差は 1.5 m であるので、この分が底上げされていることになる。16 日干潮時のくさび先端の井沢の淵では、表層で 0.1 PSU 以下、4 m 以深では 31.6 PSU、河口部では表層で 1.7 PSU、2 m 以深では 34.3 PSU であり、17 日の満潮時のくさび先端に近い井沢の淵では表層で 0.17 PSU、4 m 以深では 31.9 PSU、河口部では表層で 4.0 PSU、2 m 以深では 33.7 PSU であった。すばわち海水がほとんど希釈されずに井沢の淵にまで達し、その上を流下する淡水がごくわずかに下位の海水と混合しながら、明瞭な境界面をもって河口まで達することがわかる。なお、干潮時のほうが全体として淡塩境界が明瞭で、また、くさび先端付近での連行が顕著である。

図 6 には、井沢の淵におけるくさび先端部について、16 日の干潮時（A）と満潮時（B, C, D）、17 日の満潮時（E, F）の記録を示している。くさび先端は、満潮時には井沢の淵を越えようとする位置にあるが、満潮に向けてわずかではあるが前進している。音響反射面と水質測定の結果からみると、下流側から河床にそって海水が注入され、次第に上位の混合層を押し上げて行き、最終的には山路の瀬を越えて、くさびの先端がさらに前進するものと考えられる。ただし、この淵より上流には水深 1 m より浅い瀬が続くことから、これを越えて溯上することはまれで、より潮位が上昇したり、渇水が続いた時のみ、溯上が起こると推定される。いっぽう、増水時や潮位がより低下した際には、塩水くさびの先端は

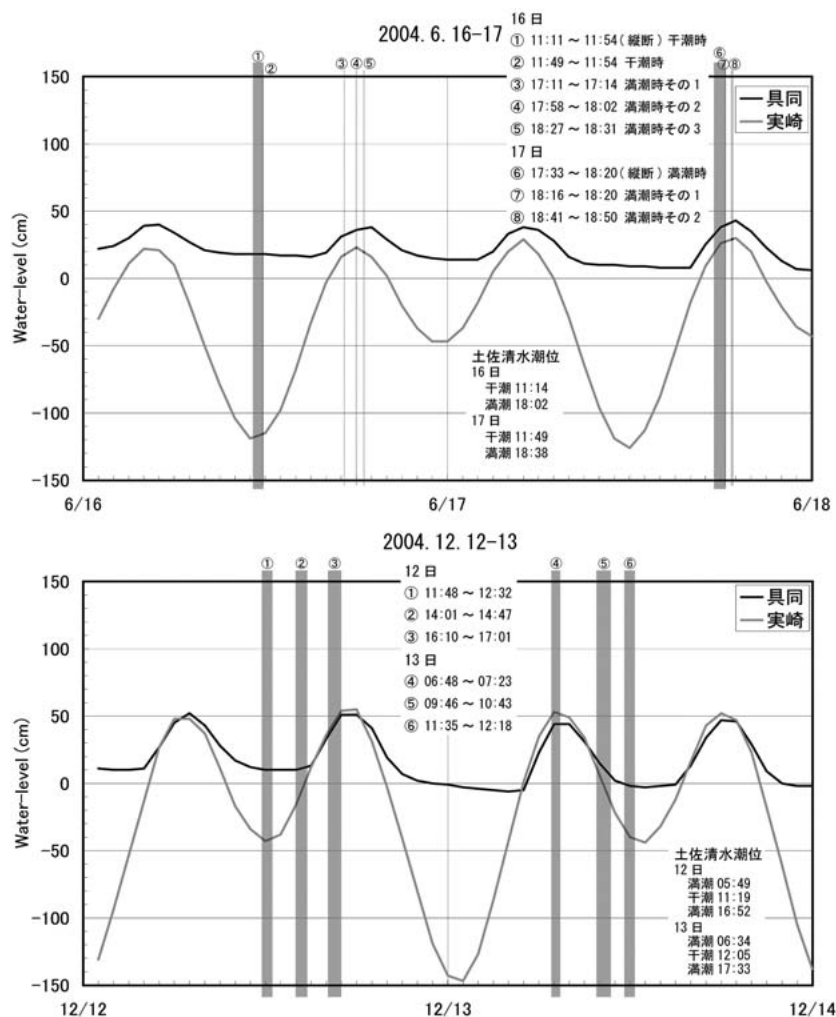


図3. 観測期間中(20004.6.16~17,2005.12.12~13, いずれも大潮時)の四万十川水位変化(実崎および具同). 観測時間帯をあわせて示す. 河口から上流への縦断観測は2004年6月16日の①および17日の⑥, これら以外は塩水くさび先端部付近の観測.

Fig. 3. Water-level changes at the Sanzaki and Gudo Stations, Shimanto River (June 16~17 and Dec. 12~13, 2005; spring tide)

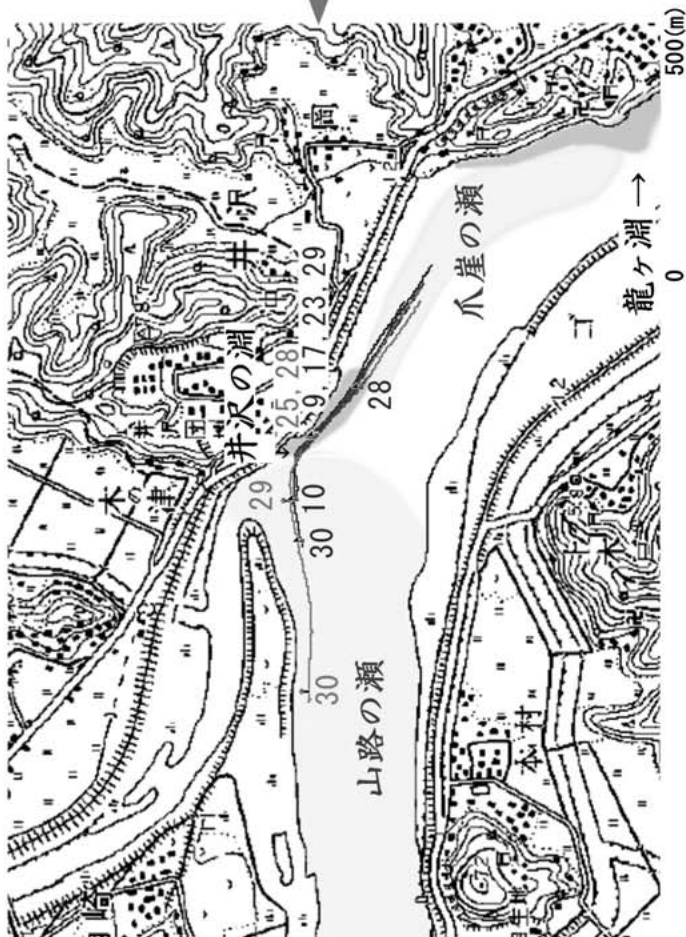
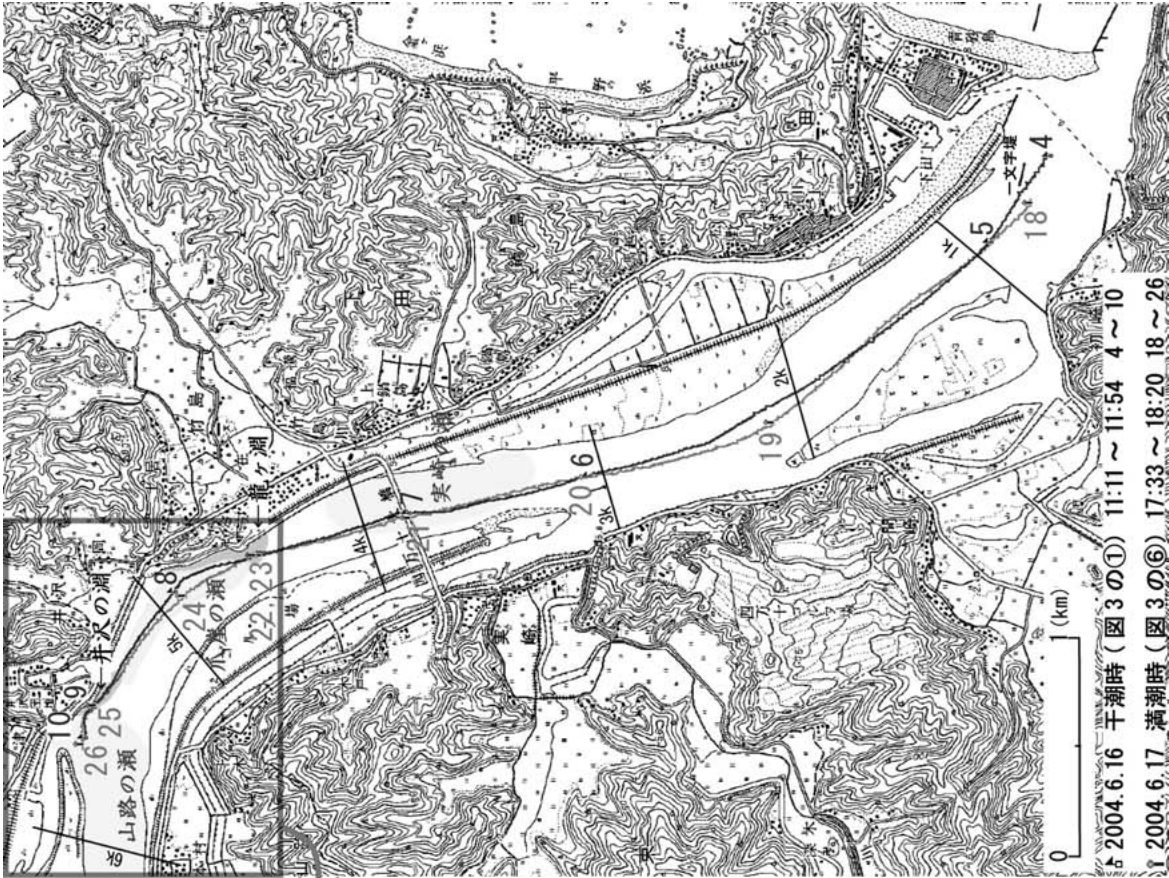
四万十大橋(河口から3.8 km)より下流に後退し, これより上流の2つの淵(龍ヶ淵と井沢の淵)には塩水がトラップされる状況が出現するものと考えられる.

4 2004年12月の観測

12月12および13日(大潮時)に, 6月とほぼ同様の観測を行った. 具同での水位変化記録によると, 12月5日を中心とした降雨により増大した流量が平常に戻りつつ, 漸減する状況下での観測であった. ただし, 通常の渇水期の冬と比べると, 水位はやや高かった. 前述の6月16, 17日の観測と比較すると, 具同の水位は全体として低いので, 流量はやや小

い状況にあった. また, 実崎の水位は, 満潮時には12月のほうが高い状況にあった. したがって, 12月の観測時には, 塩水の溯上がより進む状況にあったことがわかる. この観測では, 船を2艘使用し, 音響観測と水質観測を平行して行った. 観測期間中の実崎および具同の水位変化は, それぞれの観測時間帯とともに図3(下)に示されている.

SC-3による縦断観測の測線を図8に, 得られた音響記録については, 12日(干潮時, アゲシオ時, 満潮時の順に3回)および13日(満潮時, サゲシオ時, 干潮時の順に3回)をまとめて図9に示す. 水質データ(温度・塩分・クロロフィルa)についてはまとめて図10(12月12日)および図11(12月13日)に示す. なお, 塩分の鉛直分布については代表的な地点



塩水くさび先端付近観測 SC-3 測線 (丸数字は図3参照)

2004.6.16	(マーク)
A 干潮時 ②	11:49 ~ 11:54 9 10
B 満潮時その1 ③	17:11 ~ 17:14 17
C 満潮時その2 ④	17:58 ~ 18:02 23
D 満潮時その3 ⑤	18:27 ~ 18:31 28 29 30
2004.6.17	
E 満潮時その1	18:16 ~ 18:20 25
F 満潮時その2	18:41 ~ 18:50 28 29 30

図4. SC-3 音響探査測線 (2004.6.16 干潮時および6.17 満潮時) 拡大図は塩水楔先端付近の SC3 測線で、地形図は2.5 万分の1「土佐清水」による。

Fig. 4. Surveyed routes at the Shimanto River (June 16 ~ 17, 2004)

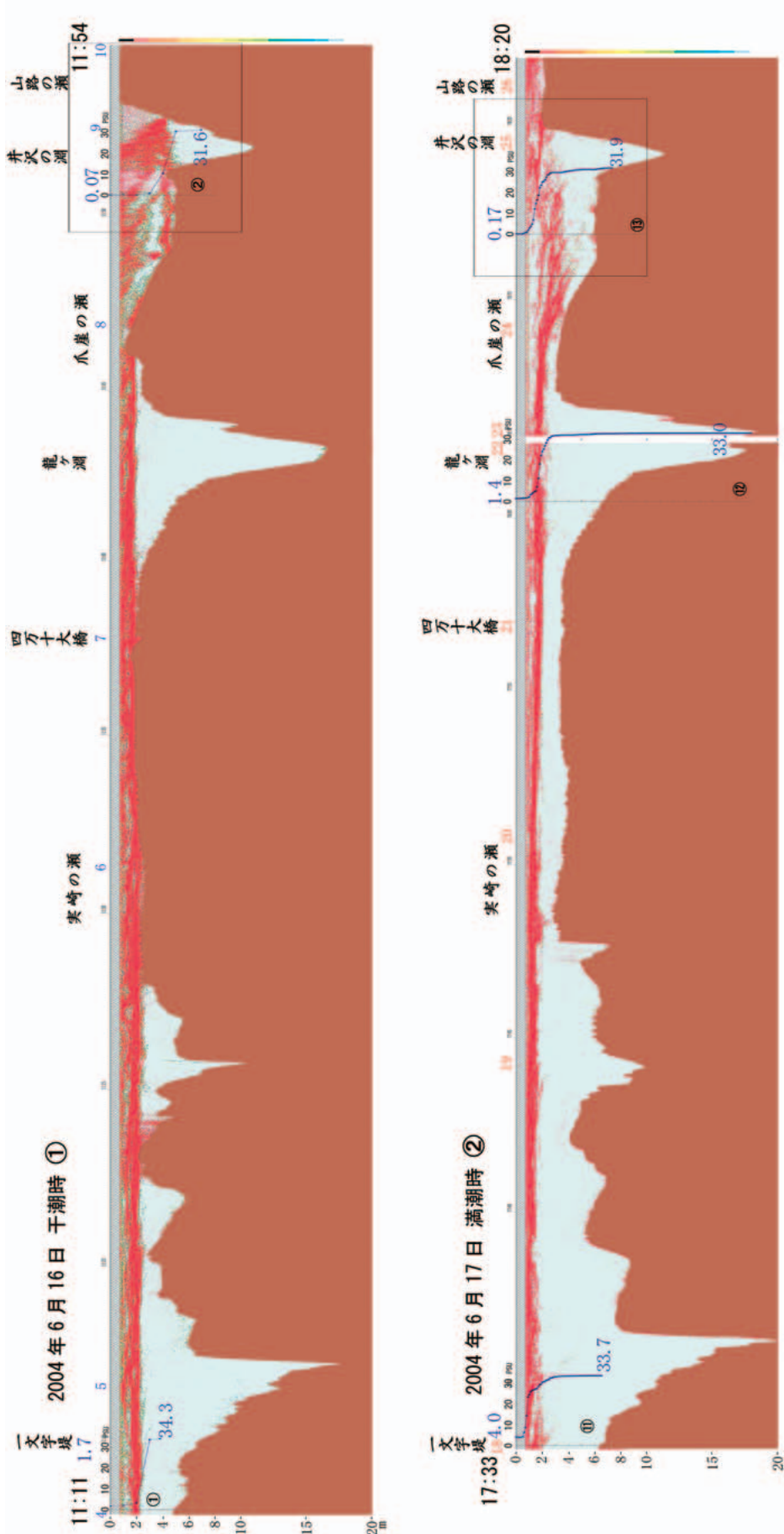


図 5. SC-3 音響探査結果 (2004.6.16 日の干潮時および 17 日の満潮時の縦断観測)

Fig. 5. The data of the SC-3 acoustic profiling system (June 16, ebb tide and June 17, flood tide)

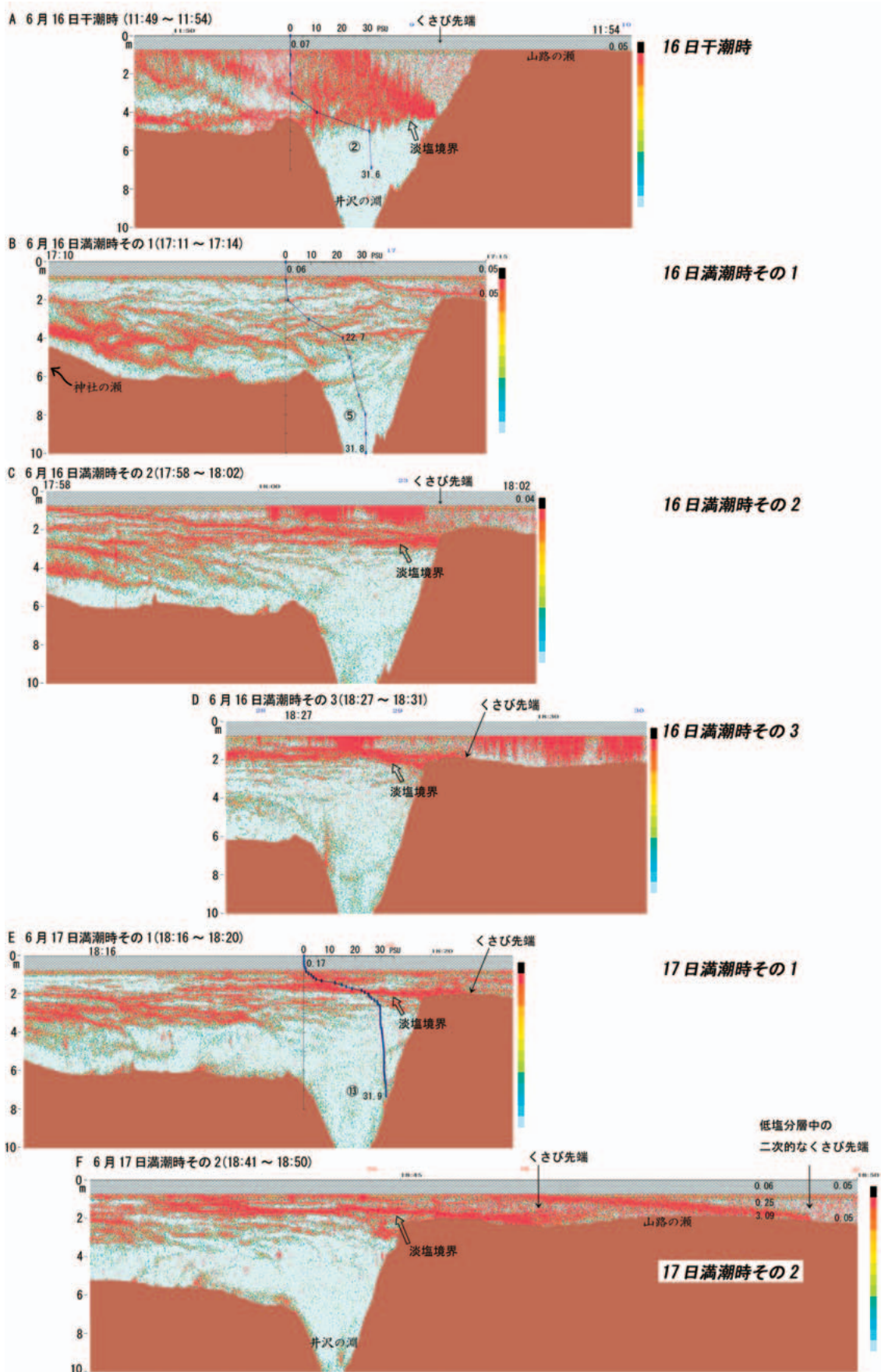


図 6. SC-3 音響探査結果 (2004.6.16~17, 塩水くさび先端部の動態). 井沢の淵で干潮時の淡塩境界 (A) が次第に上昇し, 満潮時 (B~F) に山路の瀬を越えて塩水くさびとして前進する状況を時系列で示す.

Fig. 6. The time-series behavior of flontal part of saline wedge by the SC-3 acoustic profiling system (June 16~17, 2004)

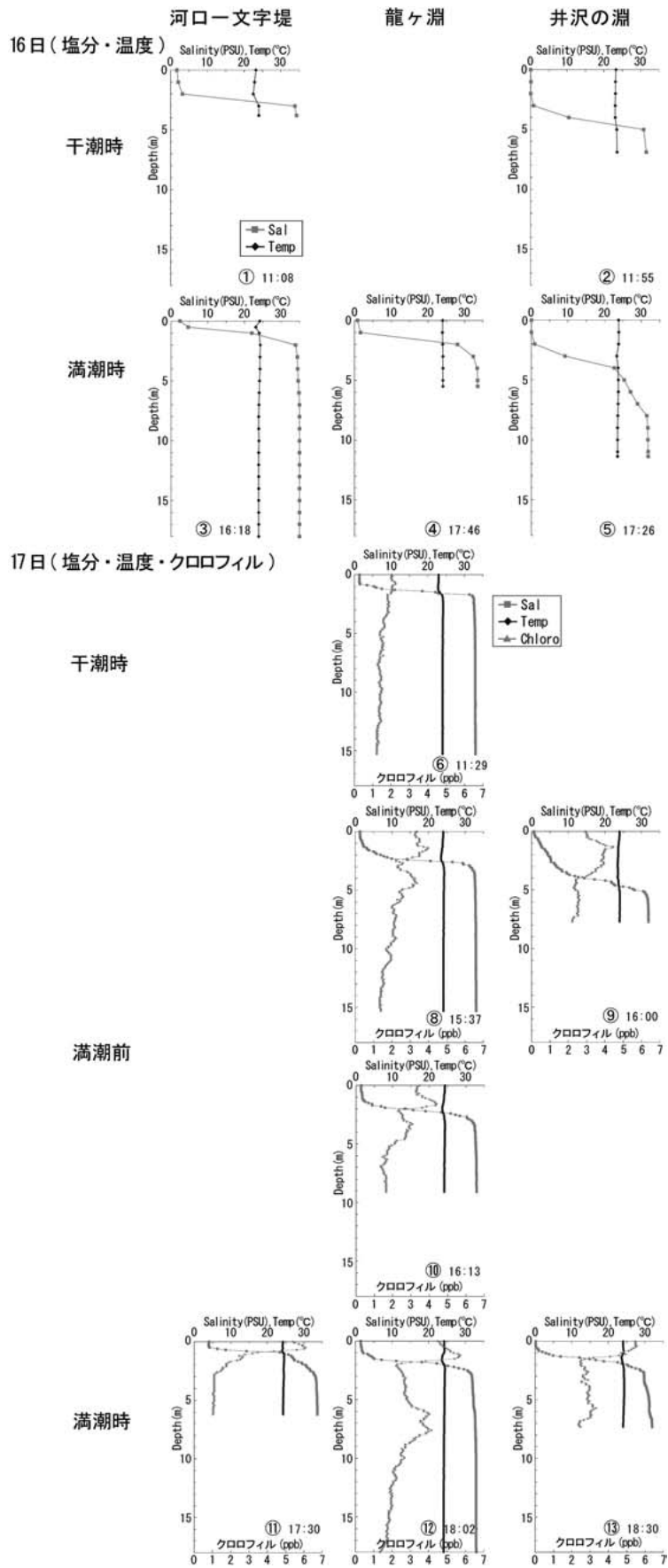


図7. 水質(温度・塩分・クロロフィル a)の鉛直分布(2004.6.16~17)
 Fig. 7. Vertical distribution of temperature, salinity and chlorophyll-a (June 16~17, 2004)

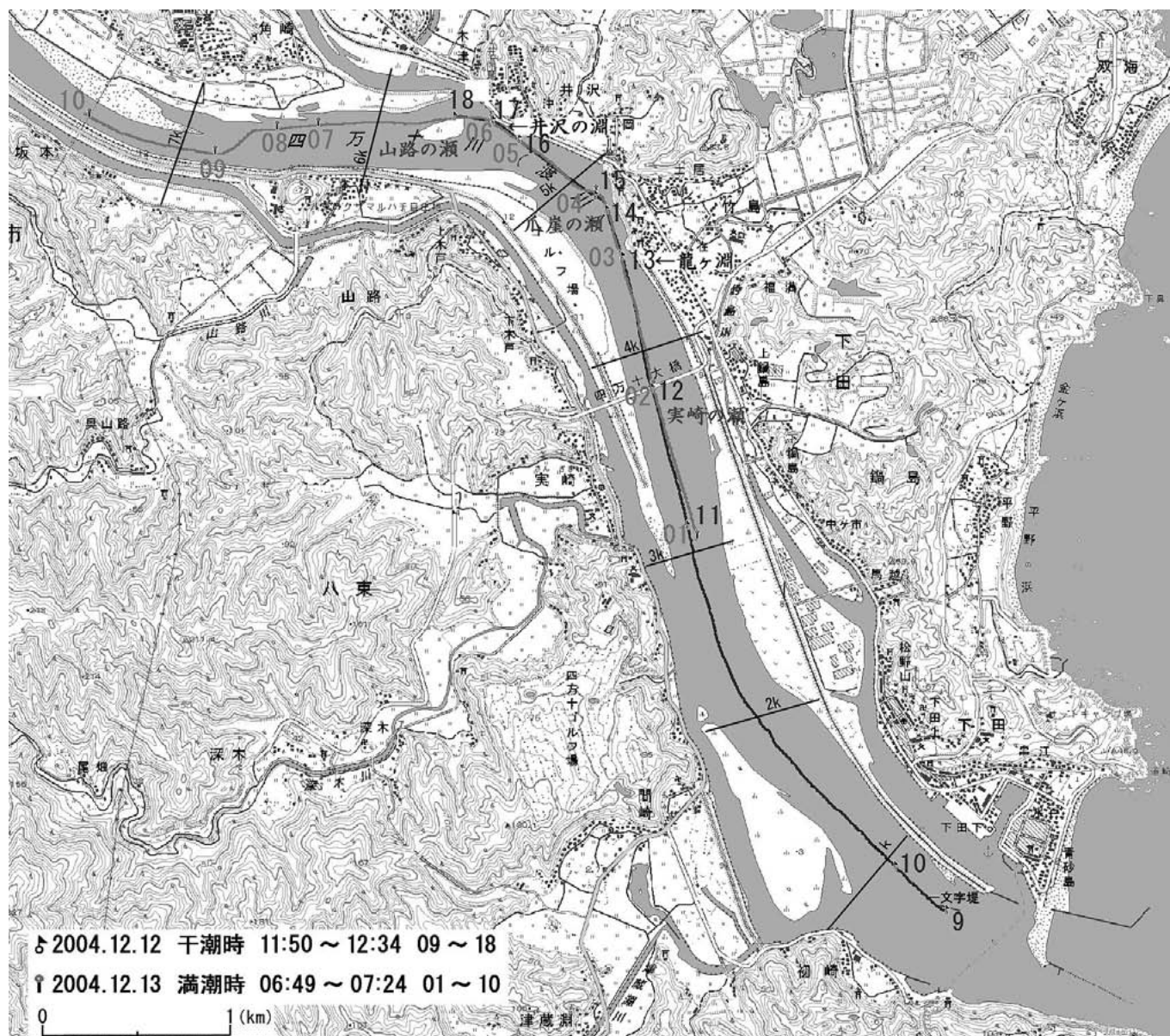


図 8. SC-3 音響探査測線 (2004.12.12 日および 13 日)

地形図は 2.5 万分の 1「土佐清水」による。

Fig. 8. Surveyed routes at the Shimanto River (Dec. 12~13, 2004)

について図 9 の中に示している。

12 月 12 日 (図 9, 上 3 段) : 干潮時①, アゲシオ時②, および満潮時③の 3 回である。なお, 満潮時③は, デジタル記録が収録時のトラブルで失われたために, アナログ記録を示している。干潮時①の記録を 6 月 16 日の干潮時の記録と比較すると, 塩水がより侵入した状況にあって, くさびの先端は井沢の淵では, より高い位置にある。これは具同での水位から推定される河川流量が 6 月 16 日より小さかったことと調和的である。アゲシオ時②の記録では淡塩境界が干潮時と比較してやや厚くなっていて, 境界部で混合がより進んでいると推定される。くさびの

先端は, 井沢の淵を越えて山路の瀬にかかっている。満潮時③の記録では, 淡塩境界はアゲシオ時とくらべてさらに厚くなっている。また, くさびの先端はより前進して, 山路の瀬を進んでいる。くさびの先端部では音響的に 2 つの境界が認められるが, 塩分測定からは上位の境界は薄い塩水中の境界 (二次的な境界と呼ぶ) であって, 下位の境界がくさびの先端とみることができる。満潮時③の記録を 6 月 17 日の満潮時の記録と比較すると, くさびの先端の位置はより前進していることが明らかである。これは具同および実崎の水位がより高く, また両者の水位差が殆んどないことと調和的である。

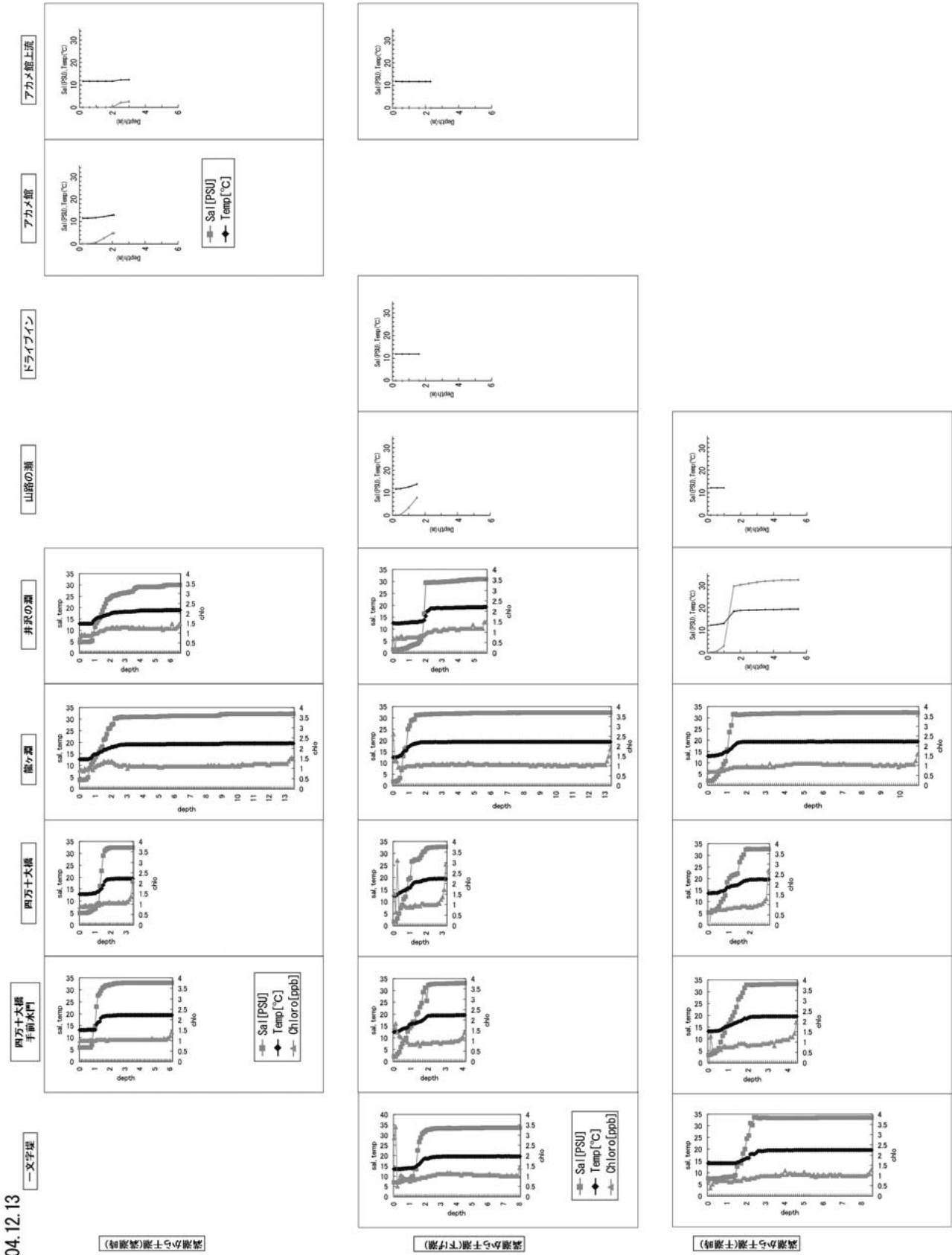


図 11. 水質 (温度・塩分・クロロフィル a) の鉛直分布 (2004.12.13)
 Fig. 11. Vertical distribution of temperature, salinity and chlorophyll-a (Dec. 13, 2004)

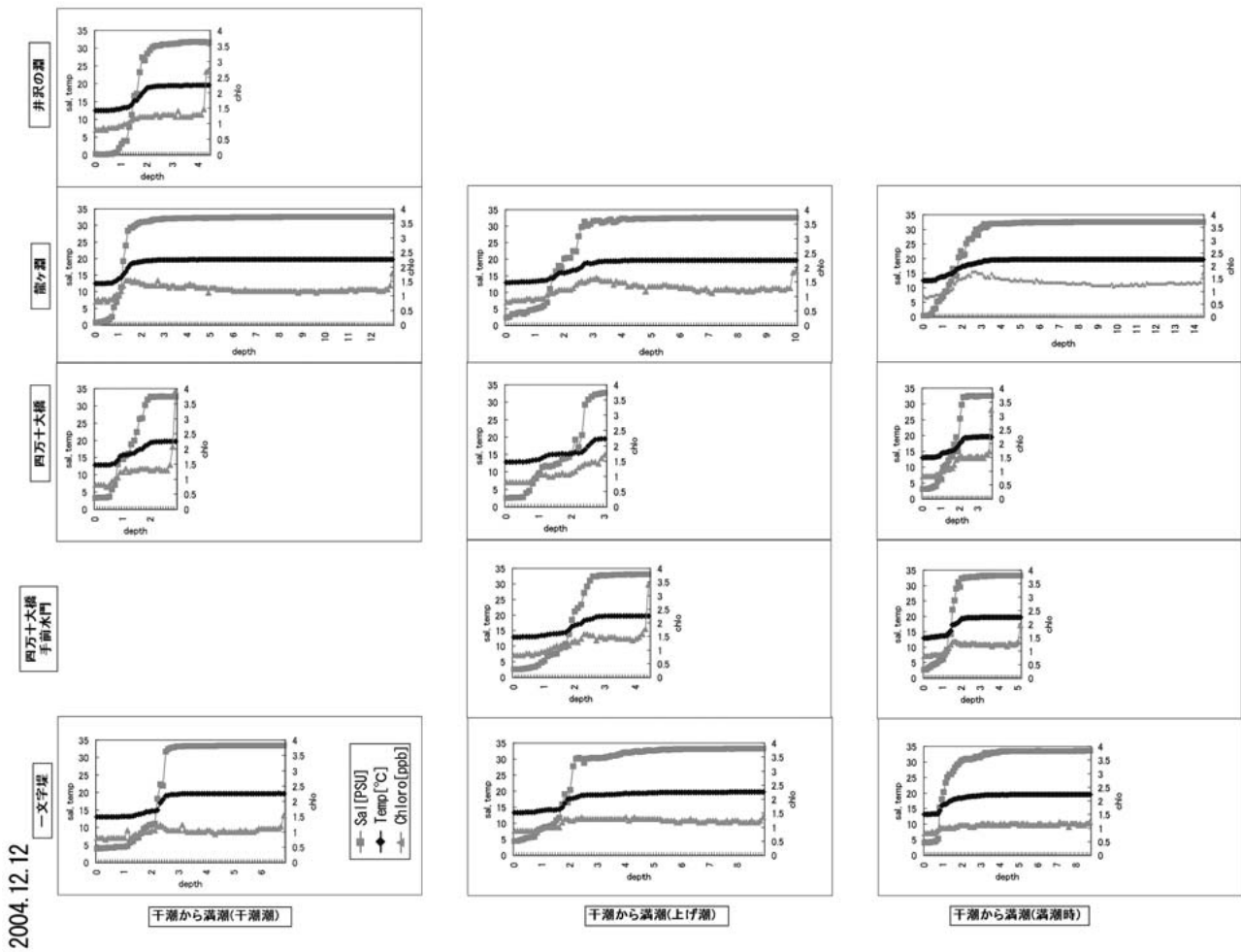


図 10. 水質 (温度・塩分・クロロフィル a) の鉛直分布 (2004.12.12)
Fig. 10. Vertical distribution of temperature, salinity and chlorophyll-a (Dec. 12, 2004)

12月13日(図9, 下3段): 満潮時④, サゲシオ時⑤, および干潮時⑥の3回である。満潮時の記録④は, 前日の満潮時に比べると実崎および具同の水位で見るとほぼ同じであるが, くさびの先端はやや前進していて, 二次的なくさびの先端は山路の瀬の先の深みに垂れ込んでいる。サゲシオ時⑤から干潮時⑥にかけては, くさびの先端は次第に後退している。サゲシオ時の淡塩境界・塩水くさびの先端の形態は12日の干潮時①とほぼ同じである。6月16日の干潮時と比べると塩水くさびはより浸入していて, 山路の瀬を越える位置にある。この後, 干潮時⑥に向けてくさびの先端は後退し, 前日の干潮時①の状態とほぼ同じになる。

5 まとめ

四万十川の塩水溯上について2004年6月と12月の大潮時に塩水くさび音響プロファイリング装置SC-3と水質計を用いて調査を行った。四万十川では大潮時に潮位変動量は1.9m, 混合形態は緩混合とされているが, この装置によって塩水溯上の実態を可視化して捉えることができた。これは緩混合の河川では初めての例である。6月の調査では干潮時と満潮時の調査から, 塩水溯上は通常は河口から5.6kmの井沢の淵までであることを明らかにした(図5)。また, 塩水くさびの先端が潮の干満によってどのように変化し, 井沢の淵を越えて溯上する状況を捉えることができた(図6)。塩水(海水)はアゲシオ時に下流側から河床に供給され, 淡塩境界を押し上げて行き, 次第に境界が明瞭になって行く状況が明らかになった。さらに潮位が上昇したり, あるいは流量の減少時には井沢の淵を越えてその先の山路の瀬へと塩水くさびが侵入することは容易に起こりうることである。12月の調査では干潮時から満潮時まで, また満潮時から干潮時まで計6回の縦断観測を行い, 干満による淡塩境界面の変化と塩水くさびの侵入・後退の様子を水質測定とあわせて行い, 可視化して示した(図9)。6月の観測と比較すると河川流量がより小さかったことなどから, 塩水溯上がより起こりやすい条件にあった。くさびの先端は干潮時には井沢の淵にあったが, 満潮時に向けて山路の瀬を越え, 河口から7kmより上流の深みにまで達することが明らかになった。

淡塩境界のこのような形態は生物分布とも密接に関係していて, 多くの生物がこの境界面を利用して生息しているものと考えられる。四万十川では河口

域において海棲種である「アカメ」が淡塩境界面を自由に行き来する姿が放映され, 四万十川の名をさらに高めている。四万十川では塩水(海水)の溯上は河口から5.8kmの井沢の淵までは通常は溯上していることから, 海棲種はここまでは生息範囲である。ただし, これより下流の実崎の瀬は水深2mまでと浅く, 上流の淵へと連なる深い澗筋は河床地形からは認められないので, 龍が淵から井沢の淵にかけては流量の増大時と潮位が大きく低下する場合には海水がトラップされる条件にある。したがって, ここでの棲息種は限定されるものと考えられる。また, 四万十川の名産として高い評価を得ているアオノリは, 現地の漁業者によると, 塩水溯上域で収穫され, とくに塩水が井沢の淵を越えて上流にまで溯上する際に, そこに大発生するとのことである。現在の河床状況からすると, 山路の瀬への四万十川の塩水くさびの侵入は上述のように限られた条件下にあると言える。

四万十川の河口域では昭和49年当時に海水の浸透による農業被害をめぐって裁判で争われたことがあり, 中筋川「塩害訴訟」事件として知られている。その場所は四万十川の河口から約6kmあたりの四万十川右岸にあり, 現在の塩水溯上限界あたりで起こった問題である。この裁判の一審では, 農業用水として使用していた地下水の塩水化の原因を川底の砂利採取と新中筋川の開設として, 国の賠償責任を認めたが, 二審においては利用していた地下水は淡水レンズをなす被圧地下水であり, 井戸の汲みすぎによる塩水化であって, 中筋川の改修とは関係なく, また川の塩水化は受忍限度を越えるものとは言えないということから, 原告敗訴となった(判例時報, 760, 84~93および判例タイムズ, 473, 152~162, 1982および553, 168~182, 1985)。一審判決で記述されているように, 使用していた井戸が地表下6~15mの沖積砂礫層の地下水であること, 当時は砂利採取が盛んに行われていて, 地形図をみても河口からこの辺りまでの砂州のほとんどは消失していたことを考慮すると, 徳岡ほか(2001)の江の川での報告でも明らかのように, その原因は四万十川の塩水溯上と関係していた可能性が高い

【謝辞】 この調査を行うにあたってはアカメ館とNHK松山放送局の武内俊輔氏にご協力をいただいた。アカメ館の柴岡善教, 高岡和哲, 秋森 圭の各氏には操船とともに, 四万十川についていろいろと教えていただいた。また, 国土交通省中村河川事務

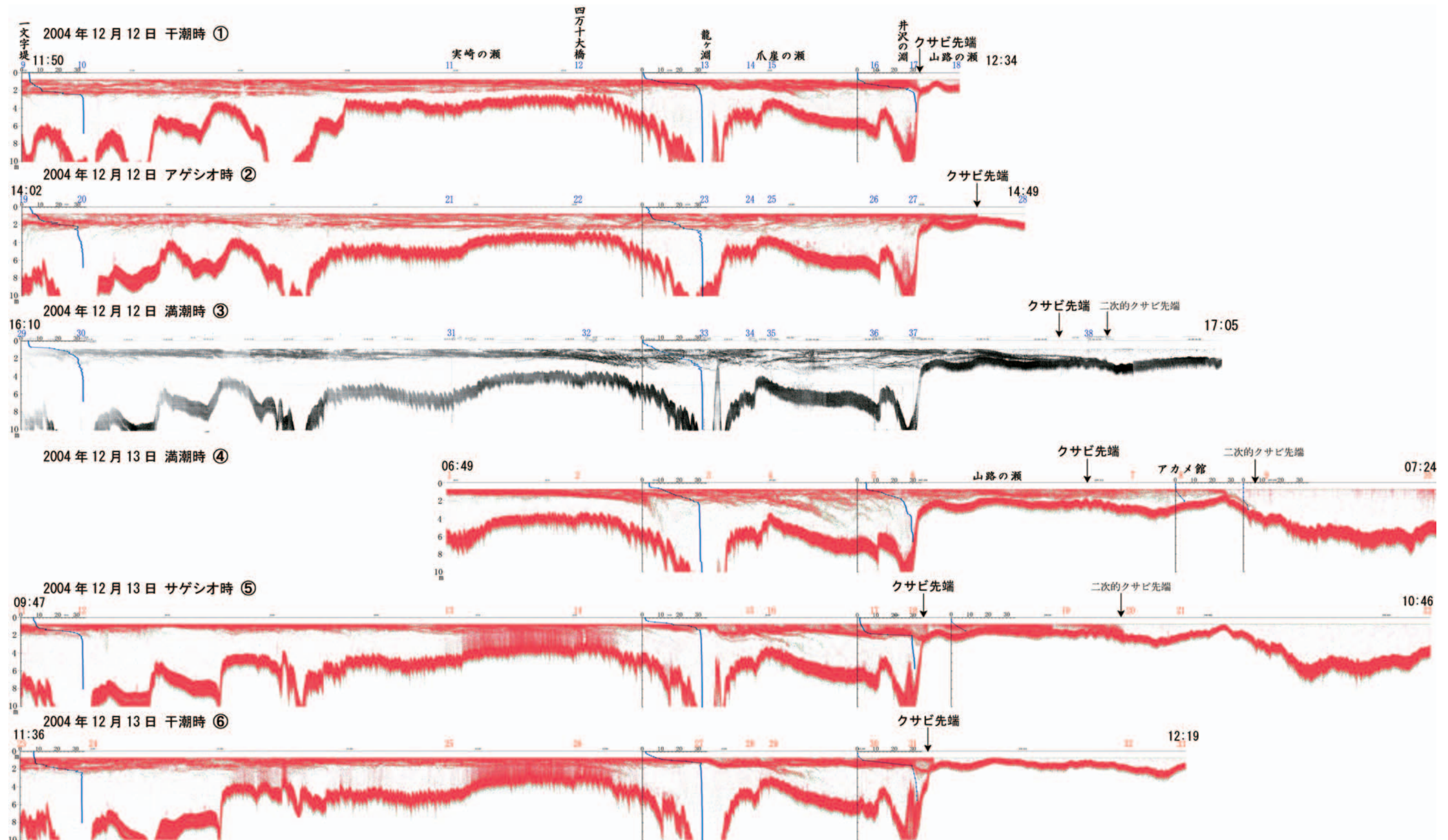


図9. SC-3音響探査結果(2004.12.12, 縦断観測および2004.12.13, 縦断観測)
 Fig. 9. The data of the SC-3 acoustic profiling system (Dec. 12 and 13, 2004)

所による四万十川水位データおよび平成13年度定期測量の河川地形資料を利用させていただいた。記してお礼申し上げます。

引用文献

- 土木学会水理委員会編(1999)水理公式集: 713 p.
- 吹田 歩・西村清和(2005)フリーソフト「カシミール3D」を利用した汽水・沿岸域調査用ナビゲーションシステム, 海洋理工学会, 11: 81-87.
- 池永 均・向山公人・大島伸介・吉本健太郎・山田正(2002)網走湖における青潮発生に関する現地観測と数値解析の比較, 土木学会論文集, 775, II - 69: 11-27.
- 建設省土木研究所河川研究室(1993)土木研究所資料, 感潮河川の塩水潮上実態と混合特性: 82 p.
- 熊沢紀之・井内美郎・安田 聡・吉川秀樹(1994)那珂川の塩水くさび, 茨城大学教養部紀要, 26: 227-237.
- 三井嘉都夫(1970)本邦主要河川の塩水遡上型について, 法政大学文学部紀要: 29-44.
- 西條八束・奥田節夫編(1996)河川感潮域, 名古屋大学出版会: 248 p.
- 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波探査機の開発, LAGUNA (汽水域研究), 1: 1-9.
- Shi Z. and R. Kirby (2003) Observations of fine suspended sediment processes in the turbidity maximum at the north passage of the Changjiang Estuary, China, Jour. Coastal Research, 19: 529-540.
- 杉本智彦(2002)カシミール3D入門, 実業之日本社, 東京: 147 p.
- 徳岡隆夫・大西郁夫・三瓶良和・瀬戸浩二・田村嘉之・高安克己・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・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(1998)江の川の塩水楔—塩水潮上の長期連続観測システムの開発—(予報). LAGUNA (汽水域研究), 5: 197-208.
- 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(汽水域研究), 8: 101-110.
- 徳岡隆夫・上野博芳・三瓶良和・西村清和・須崎聡・松田滋夫・久保田俊輔・鈴木重教(2002)大橋川～宍道湖における高塩分水塊の動態観測(2000年夏), LAGUNA, (汽水域研究), 9: 83-93.
- 宇野木早苗・上嶋英機・山下浩一(1973)河川潮汐の研究(第3報), 海岸工学論文集, 20: 371-376.