

## 塩水侵入域の観測井での淡塩境界長期連続観測 (島根県江の川下流の例)

徳岡隆夫<sup>1</sup>・上野博芳<sup>1</sup>・吹田 歩<sup>1</sup>・西村清和<sup>2</sup>・鈴木重教<sup>3</sup>

### Long-term observation of the boundary between fresh and saline water in the subsurface aquifer system beyond the saline water invasion area at River Gonokawa, Shimane Pref., Japan

Takao Tokuoka<sup>1</sup>, Hiroyoshi Ueno<sup>1</sup>, Ayumi Fukita<sup>1</sup>,  
Kiyokazu Nishimura<sup>2</sup> and Shigenori Suzuki<sup>3</sup>

**Abstract:** A well was installed on the bank of the Gonokawa River for the observation of groundwater. The well depth is 50 m and it penetrates alluvial sand and gravels. Long-term observation of the freshwater and saltwater boundary (F/S Boundary) was attempted, using a multi-sensor salinity/temperature measurement system based on the XCTD, a newly developed simplified conductivity measurement system (4 m cable with 40 sensors), and a pressure sensor for measuring the fluctuation of water level. Observation was carried out successfully for one year from September 2001 to August 2002, during which fluctuations of F/S boundary were recorded. This boundary responds to tidal movements with no time lag, and also changes in accordance with abrupt changes of river discharge with little or no time delay. Seasonal fluctuation of F/S boundary of more than 5 m has been detected for the first time by the present long term observation.

**Key words:** saline wedge, ground water, fresh/salt water boundary, R. Gonokawa

#### 1. 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例として知られている(たとえば西條・奥田, 1996)。江の川では, 塩水は通常は河口から 4~7 km の範囲で, また渇水期には河口から 8.2 km の赤栗の瀬を越えて 10 km に至るまで遡上することが知られていて, 最近では著者らのグループが塩水楔の観測方法の開発とともに観測結果を報告している(徳岡ほか, 1998, 1999 および 2001)。塩水楔の観

測のために開発した各種機器を設置しての観測は図 1 に示すように河口から約 8.2 km の赤栗の瀬に至る範囲でこれまでに行われてきた。またこの間に航走用の塩水楔音響探査 SC-3 を用いた観測によって, 塩水楔の形態を可視化して捉えることができるようになった。図 2 (上) はその一例で, 河床にそって侵入した塩水とその上位を流下する淡水の境界がよく捉えられているとともに, 塩水楔の先端の位置が正確に捉えられているのがわかる。SC-3 によるこれまでの観測で捉えられた塩水楔先端の位置と河川流量

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> 産業技術総合研究所 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba 305-8567, Japan

<sup>3</sup> 株鶴見精機 The Tsurumi-Seiki Co. Ltd., 2-20, 2 Tsurumi-cho, Tsurumi-ku 230-0063, Japan

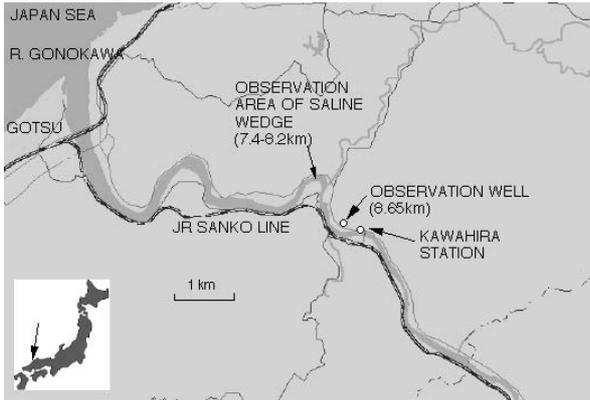


図 1. 江の川と市村観測井の位置

Fig. 1. Index map showing observed area of the lower stream of R. Gonokawa and the site of the Ichimura observation well.

との間には図 2 (下) に示すような規則的な関係が成り立つことが明らかになった (徳岡ほか, 2001).

塩水湖上は江の川の流量 (河口から 9.1 km の川平観測所) が  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  以下になると赤栗の辺りまで達するが,  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  以下の大湧水にならない限りは赤栗の瀬を越えることはない. ところで, 赤栗の瀬を越えた上流側にはやや広い沖積低地があり, 厚さ数 10 m 以上の沖積砂礫層中には高塩分水が存在していることがわかっている. 河口からの距離 9.7 km には河口に位置する日本製紙の取水口 (川の底層水および地下浅所の水を集めて利用) があり, とくに湧水期には取水に伴って塩分が混入することに注意が払われていて, 地下に塩水が存在することが知られてい

る (建設省浜田工事事務所の調査報告などによる). 江の川の塩水湖上とその上流に貯留された高塩分水との関係を模式的に描いて図 3 に示す (地下の地質は上記報告書にもとづく). 江の川にそっては赤栗の瀬までは河川流量が減少すると容易に塩水楔の先端が到達することから, この辺りまでの地下の砂礫層は常に塩水に満たされているが, 淡塩境界はこれより上流の地下に向かって傾斜していると考えられることから, 1999 年度には河口からの距離 8.65 km の江の川右岸の堤防上に深度 50 m の観測井を設置して地下の淡塩境界を捉え, その動きについて観測を行うこととした (図 4). 徳岡ほか (2001) で記述されているように, 地下の地質は一連の砂礫層からなり, すべて沖積層と考えられ, この間に有効な不透水層は存在しないと判断される. 井戸は径 110 mm で, ケーシングには適当な間隔に孔をあけて地下水の移動に問題を生じないような仕上げとなっている. 設置された井戸の位置と江の川との関係, 測定機器と設置状況を写真 (1) ~ (4) に示す.

1999 年度の地下水観測は 1999 年 12 月 4 日 ~ 2000 年 2 月 3 日の 3 ヶ月間, 水位計とともに温度・塩分を新たに開発した多点型 CT センサケーブル (西村ほか, 2000) をもちいて行った. センサは 5 つで, 淡塩境界を中心に上から 2, 1, 1, 2 m 間隔に設置して観測を行った. その結果, 振幅 20 cm までの潮汐と判断される規則的な変動があること, 水位の変動は河川の流量・水位の変動と連動していて, 両者の時間差は認められないこと, 河川の水位が上昇した後

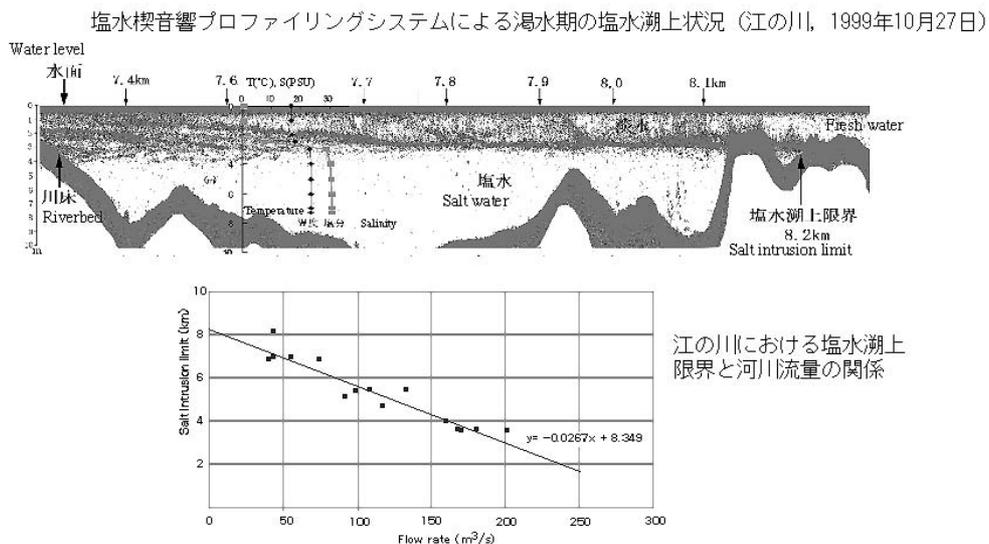


図 2. 江の川の音響探査装置 SC-3 による塩水楔観測 (上) と塩水湖上距離と河川流量の関係 (下)

Fig. 2. Observation of saline wedge of R. Gonokawa by SC-3

Echo-sounding system and relationship between saline invasion limit and discharge amount.

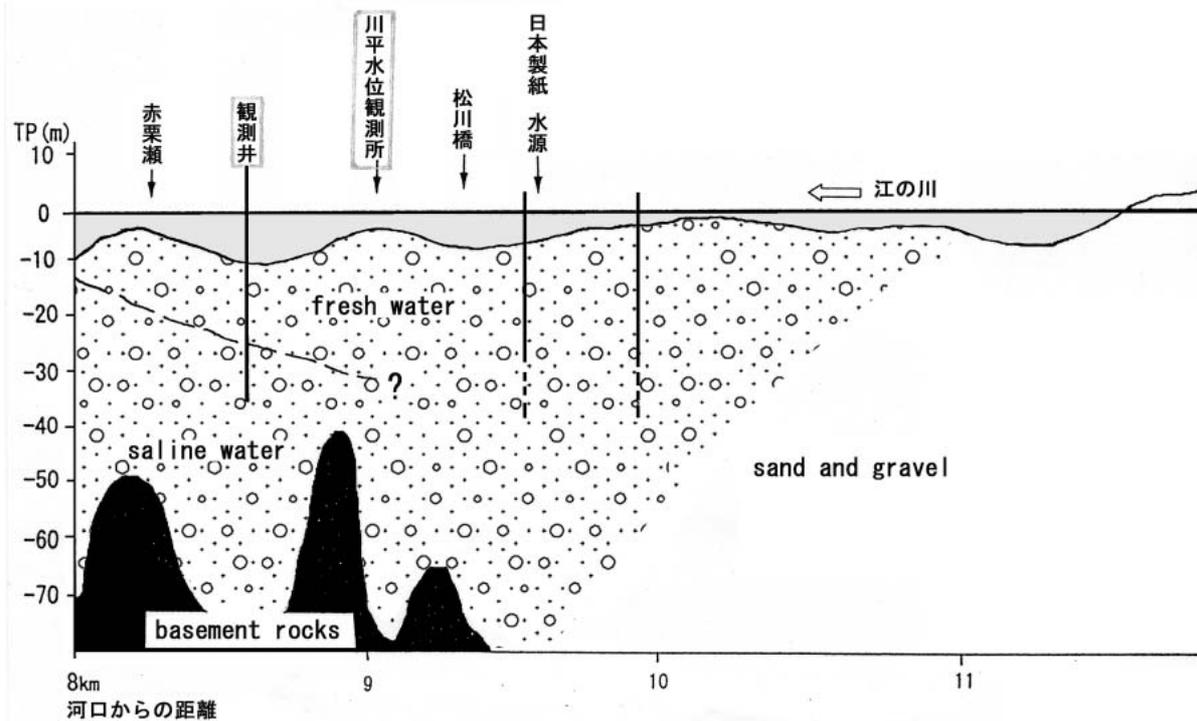


図3. 赤栗より上流域の地下地質と地下の淡塩境界の分布の模式図

Fig. 3. A sketch map of subsurface geology of the area beyond the Akaguri gouge and freshwater/saltwater boundary.

に淡塩境界は降下したことが示された（徳岡ほか，2001）。このような興味ある観測結果は，今後起こりうる渇水の際の対策を検討する上で重要であること，また，さらに言えば，地球温暖化による海面上昇に伴って起こる地下水の塩水化の問題を考える上で貴重なデータを提供することにもなることから，2000年度にはさらに詳しい観測が同じ井戸を用いて2000年10月10日～12月6日にかけて行われ，報告された（徳岡ほか，2002）。この観測では，CTセンサーは淡塩境界を中心として1m間隔に設置して観測が行われた。その結果，河川流量・水位の急激な上昇の直後に淡塩境界は一時的に上昇するという現象が観測された。また，1m間隔で設置したセンサーの動きではその変動の詳細を捉えることはできず，何らかの方法でより詳しく捉える必要があることが明らかになった。また，1999年12月以降の観測井における水質測定で年間を通じた観測を行ったことになり，地下水位の変動幅は約4m以上あること，淡塩境界の変動も同じ規模はあること，地下水（淡水）は季節ごとに温度が異なり，秋から冬にかけては上昇傾向，春から秋にかけては下降傾向にあること，などが明らかになった。観測井でその都度測定された温度および塩分の鉛直分布を図5aおよび5bに示す。

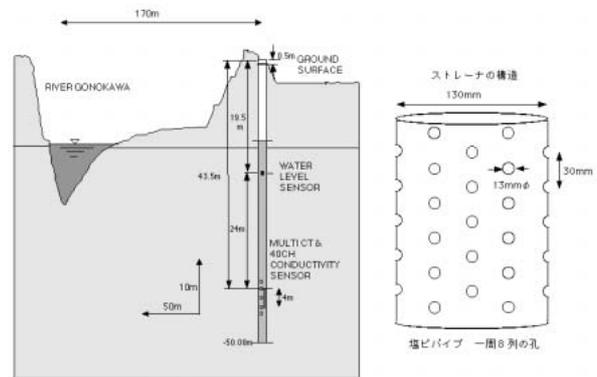


図4. 市村観測井の仕様と江の川との関係

Fig. 4. Configuration of the Ichimura observation well.

上記の結果を踏まえて，同じ井戸をもちいて，2001年度には淡塩境界の変動を10cm間隔で捉えられる簡易電気伝導度計（以下，簡易塩分センサ）を作成して，多点型CTセンサーとともに観測することとした。観測システムを図6に示す。この観測は2001年8月から開始し，その後，少なくとも1年間の観測を継続することとし，年度を越えて2002年8月まで継続して観測を行った。この報告では，これによって得られたデータについて報告する。

謝辞：この研究は国土交通省中国地方整備局浜田工

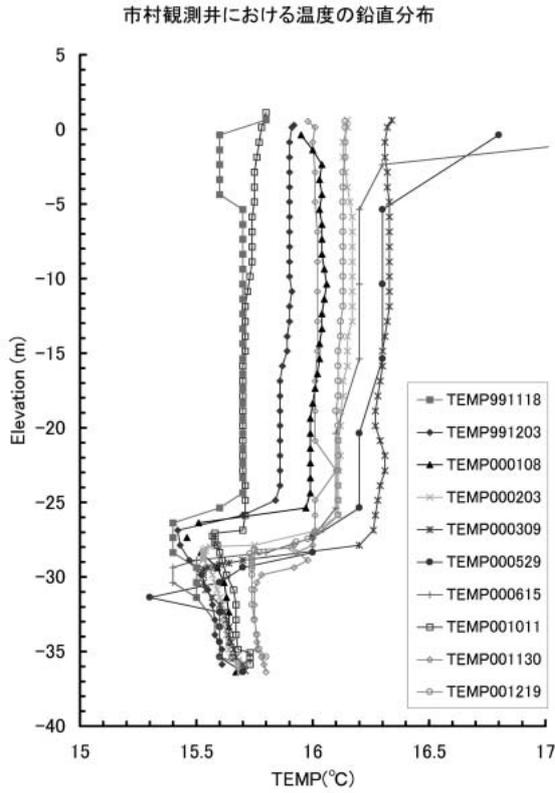


図 5a. 観測井における温度の鉛直分布

Fig. 5a. Temperature distribution at the observation well.

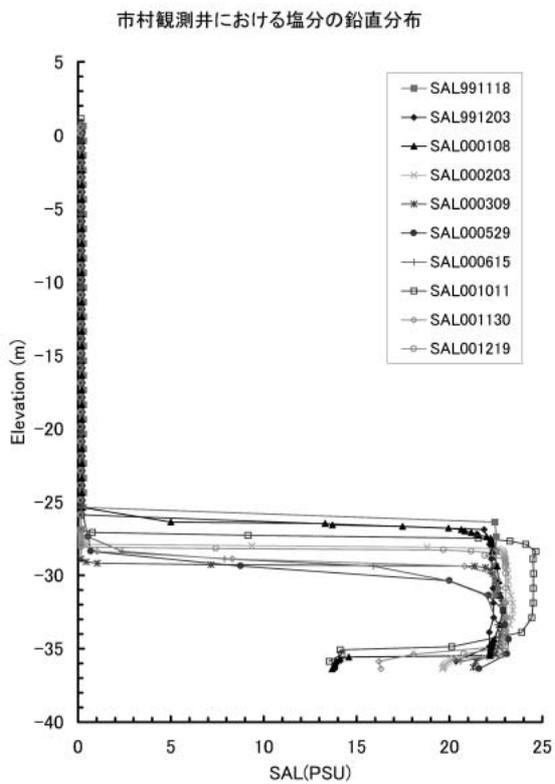


図 5b. 観測井における塩分の鉛直分布

Fig. 5b. Temperature distribution at the observation well.

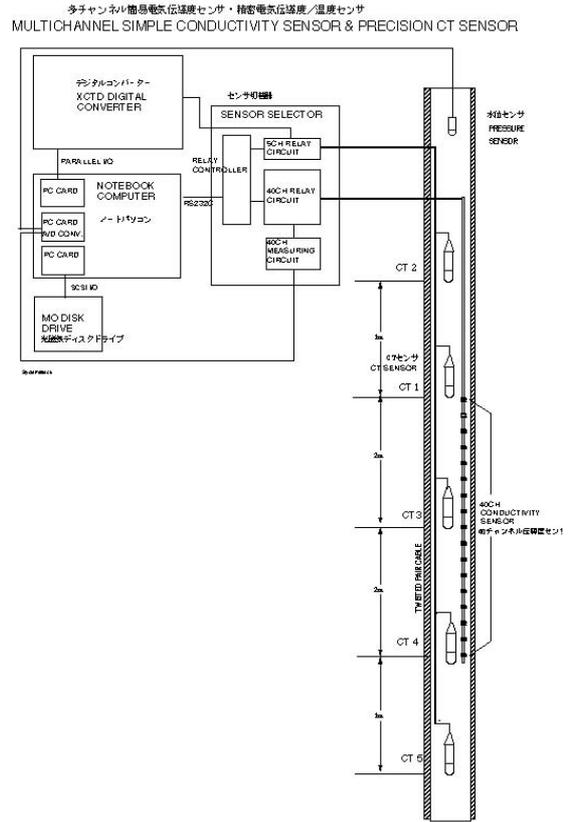


図 6. 各機器の設置状況，多チャンネル簡易電気伝導度センサ，精密電気伝導度/温度センサ，水位センサおよび装置ブロック図

Fig. 6. Configuration of monitoring sensors in the Ichimura observation well installed at 8.65 km from the river mouth, and a block diagram of multichannel simple conductivity sensor, precision CT sensor and water table sensor.

事務所のご協力とご支援のもとに行われたものである。記してお礼申し上げます。

## 2. 市村観測井と観測機器の設置，観測方法，観測期間

松川町市村（右岸 8 k 650）の既設観測井を利用して，多点型 CT センサ，簡易塩分計および水位計 1 台を設置して 1 年間の連続観測を行った。前年度までの観測で淡塩境界が 4 m 以上にわたって変動することがわかったので，多点型 CT センサは各センサ間隔を上から 1, 2, 2, 1 m とし，また，簡易塩分センサは上記の上から 2 番目と 4 番目のセンサ間の 4 m 間に設置して観測を行うこととした。観測井と機器設置の概要，江の川との位置関係は図 4 に示した。

多点型 CT センサは西村ほか（1998）で開発されたもので，投げ棄て式の海洋測器である XCTD

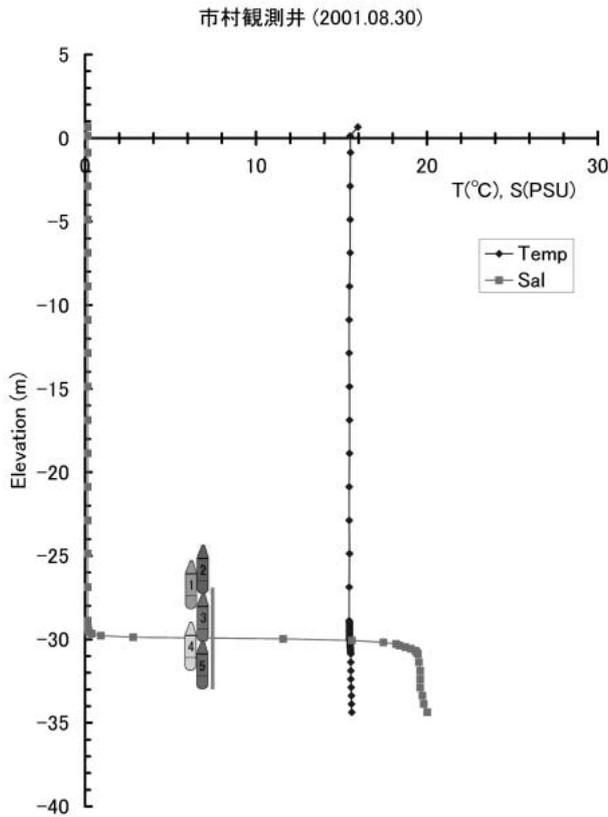


図7. 観測井における温度・塩分の鉛直分布と機器の設置位置

Fig. 7. Temperature and salinity distribution at the observation well (August 30, 2001) and installed equipments.

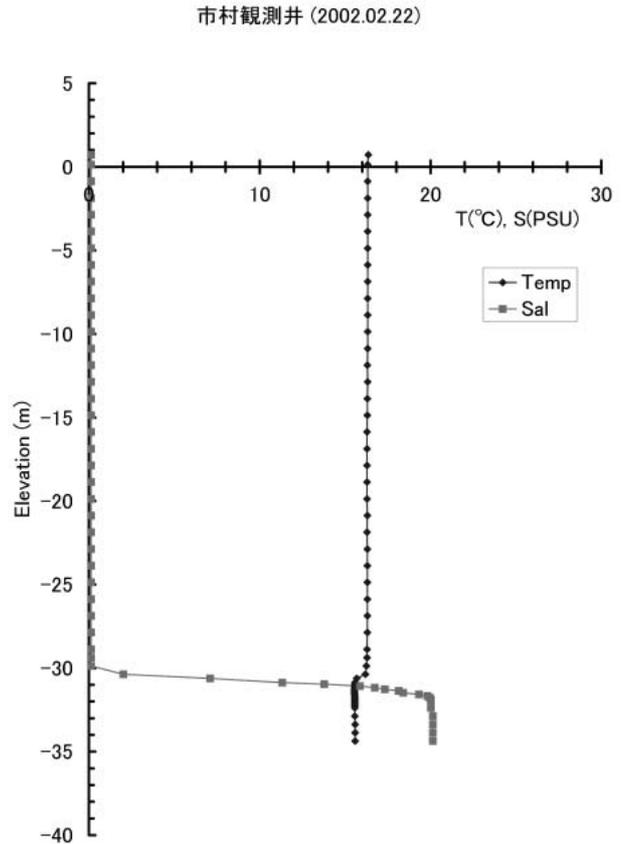


図8. 観測井における温度・塩分の鉛直分布（2002年2月22日）

Fig. 8. Temperature and salinity distributions at the observation well (Feb. 22, 2002).

(Expendable Conductivity, Temperature & Depth Profiling System) をベースに広範囲を多点で温度・電気伝導度・塩分を測定可能にしたもので、西村ほか(2000)によって地下水調査用に開発されたものである。簡易塩分センサは、多点型 CT センサでは困難な淡塩境界の細かい変動を捉えることを目的に、淡水か塩水かを判別する多点の電極式伝導度センサを試作したものである。西村ほか(2002)で報告したように、多芯のケーブルをベースにして、ケーブルの表面に 10 cm 間隔に 40 個の電極を配置し、各電極はケーブルの各芯線に接続している。各センサにかかる電圧の違いから塩水・淡水の識別が可能で、10 cm レベルで淡塩境界の位置の変化を捉えることが可能である。なお、塩分(電気伝導度)と電圧の関係式は未完成である。

連続観測に先立って、水質計(YSI, 600 XL)による 1 m ごとの水質(水温, 塩分, 電気伝導度)の観測を行った。その結果を多点型 CT センサ及び簡易塩分センサの設置位置とあわせて図7に示す。淡塩境界

は TP-30 m の辺りにあり、厚さ数 10 cm の範囲内で塩分は 0 から 20 PSU 以上にシャープに移り変わっている。この間での温度の変化はごくわずかである。なお、この観測の途中(2002年2月22日)の機器を回収しての点検時に行った水質観測結果を図8に示す。図5aおよび5bに示した測定結果とあわせてみると、淡塩境界はいずれの観測においてもシャープな境界をもっていること、その変動幅は 4 m 以上はあること、下位の塩水は 20~25 PSU の範囲で変動していること、温度は上位の淡水での変動幅に比べると下位の塩水の変動幅は小さいことがわかる。また、観測井の最下底の部分で塩分が減少している、その理由は明らかでないが、その下位のそれほど深くない位置に別の地下水系が存在している可能性がある。

なお、以下に示す江の川の流量と水位のデータは国土交通省浜田工事事務所による川平観測所(河口からの距離 9.1 km)によるもので、1時間ごとのデータである。

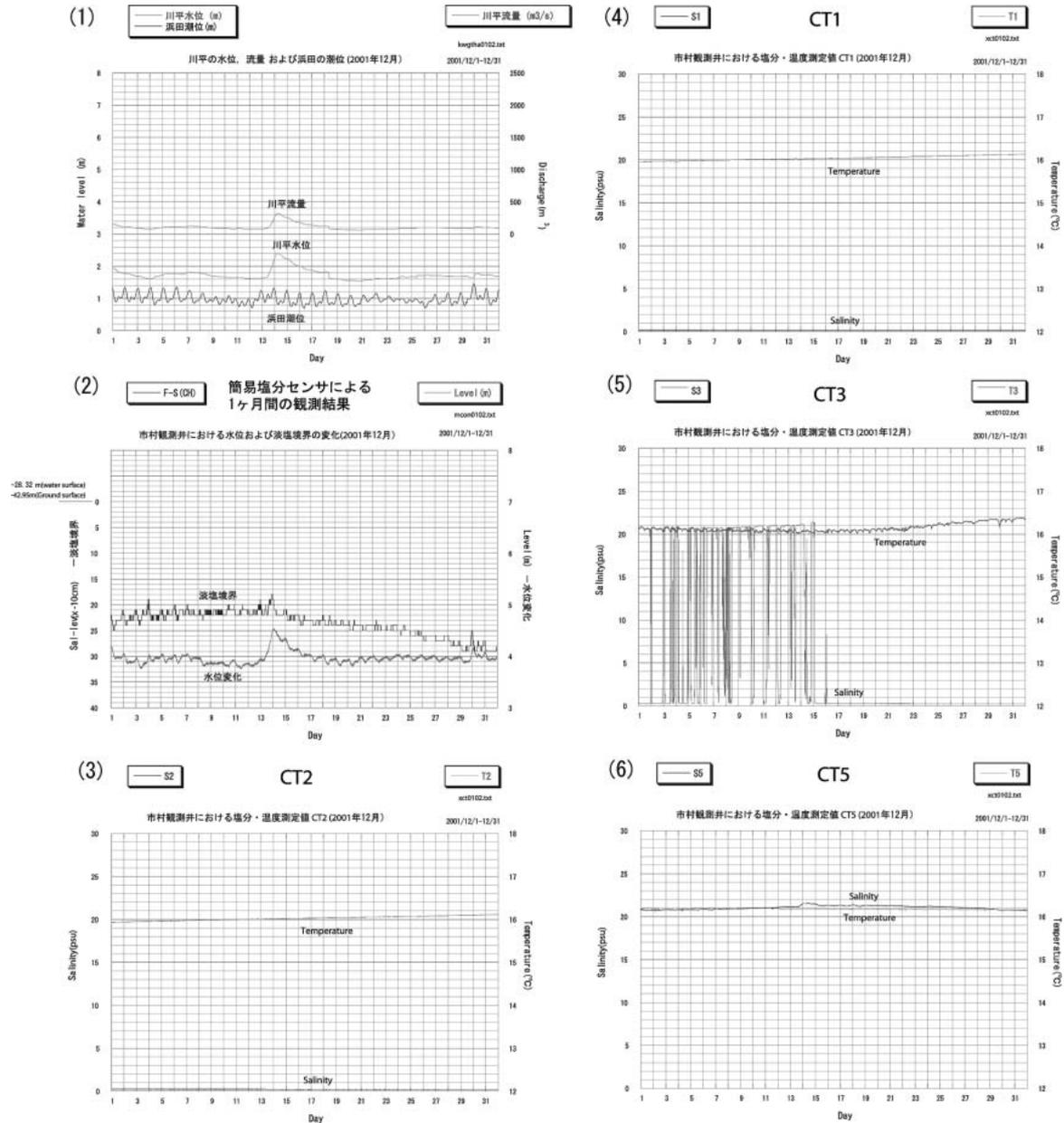


図9. 2001年12月の1ヶ月間の観測結果  
**Fig. 9.** Various data obtained at the observation well during December, 2001.

### 3. 水位計、多点型 CT センサケーブルおよび簡易塩分計による連続観測結果

水位計、多点型 CT センサケーブルおよび簡易塩分計を図4および6に示すように設置して、2001年8月30日~2002年8月30日に連続観測を行った。測定時間間隔はすべて5分である。水位計は地下水水面より約4 m 下位に設置した。

#### 3-1) 2001年12月の1ヶ月間の観測結果

2001年8月30日から1ヶ年にわたる観測記録から

1ヶ月分(2001年12月)を取り出して、以下に述べる。江の川(川平)の流量・水位の変化および浜田の潮位変化を図9(1)に、観測井における地下水位の変化および簡易塩分センサによる淡塩境界の変動を図9(2)に、多点型 CT センサによる温度・塩分変化(CT4はこの間機器のトラブルにより欠測で、除外)を図9(3)~(6)に示す。

観測井における地下水位の変化は川平の流量・水位変化と時間差なしに同調している。地下水位および淡塩境界は、振幅が20 cm までの、潮汐によるものと判断される規則的な変動をしている。13日から

15日にかけて地下水位が大きく上昇しているが、淡塩境界もこれに追従した変動をしている。CTセンサによる塩分変化をみると、CT1およびCT2はこの間は常に淡水中にあり、CT3は月の前半には塩分が20～21 PSUとゼロの間をスイッチしているの、ほぼCT3のあたりに淡塩境界が位置していて、その後は淡塩境界が降下して、淡水中に入ったことがわかる。いっぽう、CT5はこの月中は塩分はほぼ21 PSUであったので、これより上位に淡塩境界が位置していたことがわかる。CTセンサによる1ヶ月間の温度変化をみると、淡水中では温度はわずかに上昇傾向にあり（CT2およびCT1）、塩水中ではほぼ同じで、淡水よりもやや温度が低い。

### 3-2) 1年間の連続観測結果

1年間の連続観測結果について江の川（川平）の水位とともに図10a（2001年9月～2002年2月）および図10b（2002年3月～8月）に示す。多点型CTセンサについては最上位のCT2および最下位のCT5のみの温度・塩分について、簡易塩分計については淡塩境界の深度を地下水位変化とともに示している。なお、図に示したように、観測期間中にいくつかの欠測があるが、これらは機器のトラブルおよび気象条件によるトラブル（夏の高温、冬の低温および雷）によるものである。また、淡塩境界の変動は6mの範囲に収まることを想定して機器の作成を行ったが、この範囲を越えて変動したことから、境界位置のデータが得られない期間が生じた。これらについては今後、改良すべき課題である。

図10aおよび10b（それぞれ上から2段目）に示した地下水位の変動は、上段の江の川に水位変動と比較すると、降雨による水位の上昇と地下水位の上昇が同調していることがわかる。淡塩境界の変動（上から2段目）は横軸に示した簡易塩分計センサの設置範囲（4m間）では10cmごとの変化が明らかで、この範囲を越えた変動については上位についてはCT2（上から3段目）、下位についてはCT5（上から4段目）の塩分の変動からそれぞれこれらの位置を越えて上昇したか、あるいは降下したかを知ることができる。9月16日には一時的に淡塩境界はCT2を越えたこと、10月中旬に淡塩境界が上昇した際には、もっとも高くなった際には上位のCT2に近い位置にまで達したが、これを越えることはなかったこと、4月下旬から6月中旬にかけて淡塩境界がCT5の位置を越えて降下したことがわかる。淡塩境界の変動は地下水位および潮位の変動に同調した変

動が認められるが、季節変動と考えられる、より大きな変動をしている。淡水部の温度の変動をみると（CT2、上から3段目）、秋から冬にかけて次第に上昇し、春から夏にかけて次第に降下している。いっぽう、塩水部についてみると（CT5、上から4段目）、温度は年間を通じてほとんど変化していない。

地下水位と淡塩境界の1年間の変動をまとめて図11に示す。この図では、各CTセンサの位置を右軸に示し、簡易塩分計による淡塩境界の変動がその測定範囲を越えた場合には、上位のCT2および下位のCT5の塩分データを参考にして淡塩境界の位置を推定して示している。淡塩境界の変動には潮汐に同調した小規模の変動、地下水位に追従した中規模の変動とともに、より規模の大きい季節変動とみられる変動が認められる。

## 4. ま と め

江の川の塩水溯上域より上流の地下に貯留された塩水を対象にその淡塩境界の動きを中心に1年間にわたる連続観測を行った。観測中の各種のトラブルによってかなり欠測があり、十分なデータが得られたとは言えないが、以下のことが指摘できる。

- 1) 川平での江の川の水位と観測井での地下水位および淡塩境界はほぼ時間差なしに同調して変化している。
- 2) 水位変動と地下水位の変動の規模はほぼ同程度の大きさである。
- 3) 淡塩境界の変動には短期（1日以下）、中期（数日～1週間程度）および長期（数ヶ月）の3つの変動が認められる。

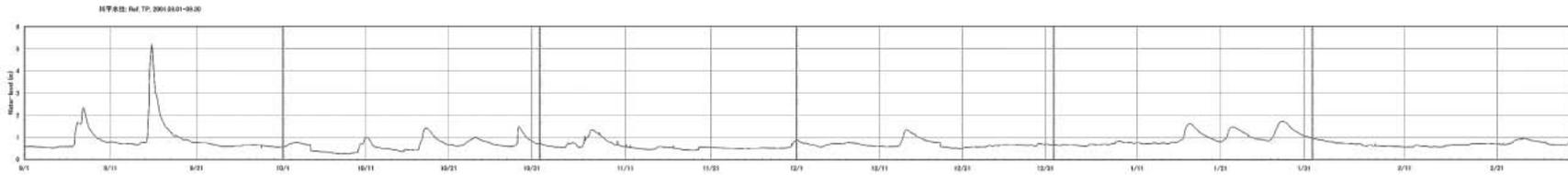
短期の変動（日単位の変化）では淡塩境界と地下水位の変動はよく同調していて、その規模も10～20cmである。河口部（江津）での水位変動（殆どが潮位変動による）ともほぼ時間差なしに同調していて、この変動は潮汐を反映したものと判断される。この変動は地下水位の変動よりは振幅がやや大きい傾向が認められる。

中期の変動（数日～1週間での変化）では、地下水位の変動に時間差なしに同調している。その大きさは地下水位の変化より小さく、地下水位変化が数日であるのに対して、より長期にわたり、地下水位の上昇に対しては結果として降下すると判断される。

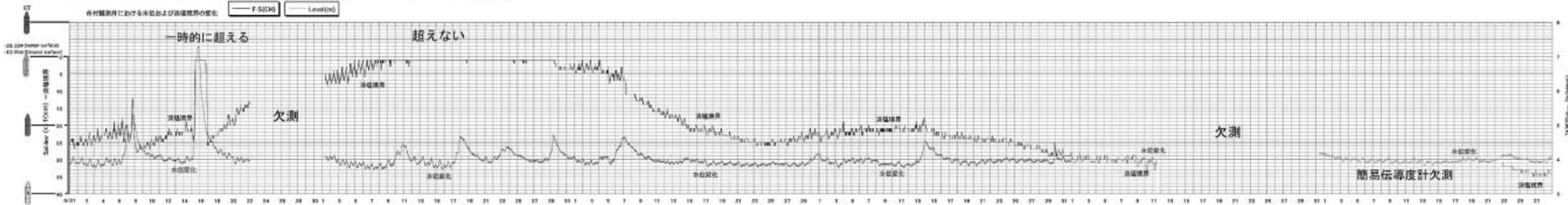
長期の変動は1年間の連続観測で初めて認めら

# 江の川の水位と観測井における地下水位・淡塩境界・温度塩分の長期変動(2001年9月～2002年2月)

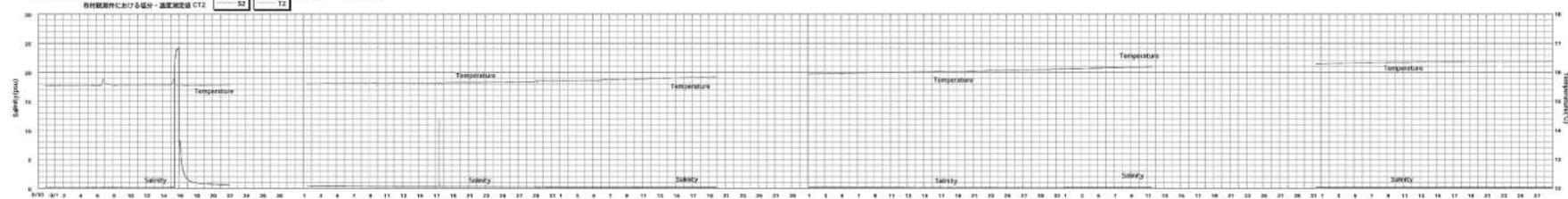
江の川の水位 (河口から9.1km, 川平)



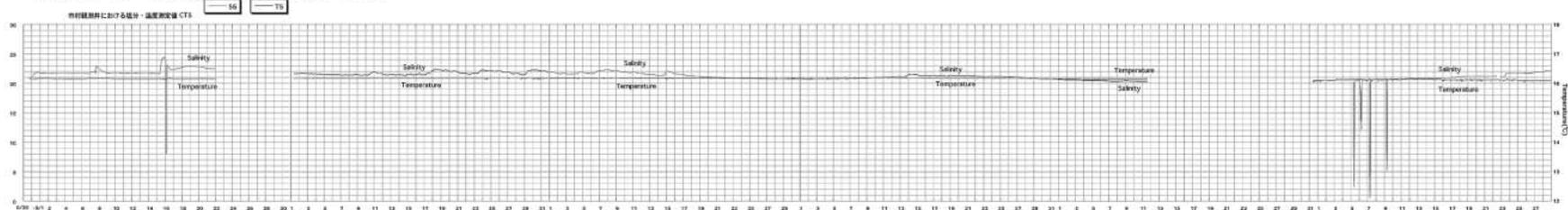
観測井の地下水位と淡塩境界 (河口から8.65km, 市村)



観測井 TP-27.3m (GT2) の温度・塩分



観測井 TP-33.3m (GT5) の温度・塩分



2001年  
9月

10月

11月

12月

2002年  
1月

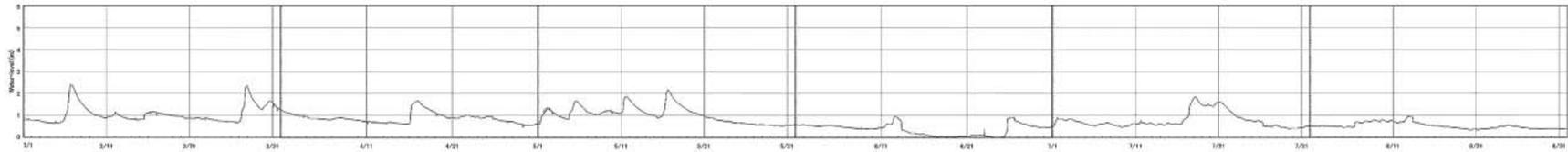
2月

図 10a. 江の川の水位変動と観測井における地下水位と淡塩境界, 多点型 CT センサ (CT 2 および 5) の 1 年間の観測結果 (その 1, 2001 年 9 月～2002 年 2 月)

Fig. 10a. Various data obtained at the observation well during one year (Part 1. September, 2001 to February, 2002).

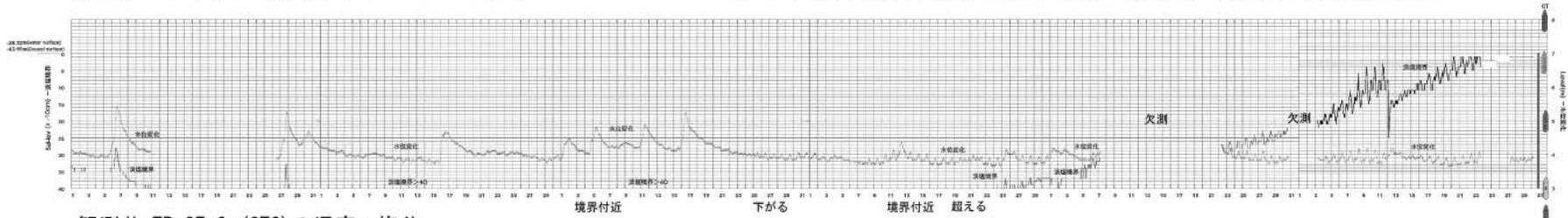
江の川の水位と観測井における地下水位・淡塩境界・温度塩分の長期変動(2002年3月～2002年8月)

江の川の水位(河口から9.1km, 川平)

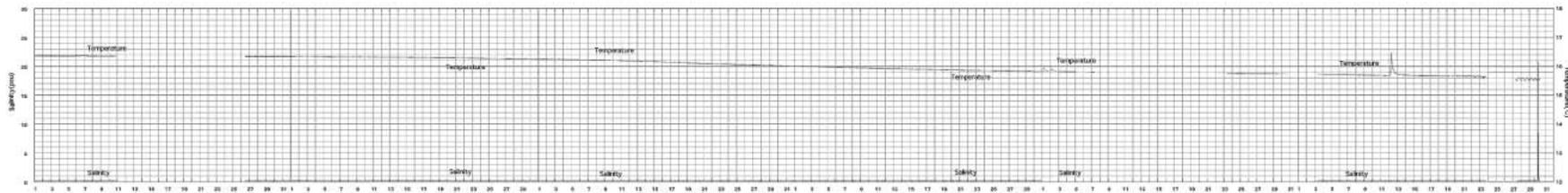


観測井の地下水位と淡塩境界(河口から8.65km, 市村)

年間を通して淡塩境界の変動幅は地下水位のそれよりも数倍大きく, 最大5m以上(6m以下)におよぶ



観測井 TP-27.3m (CT2) の温度・塩分



観測井 TP-33.3m (CT5) の温度・塩分

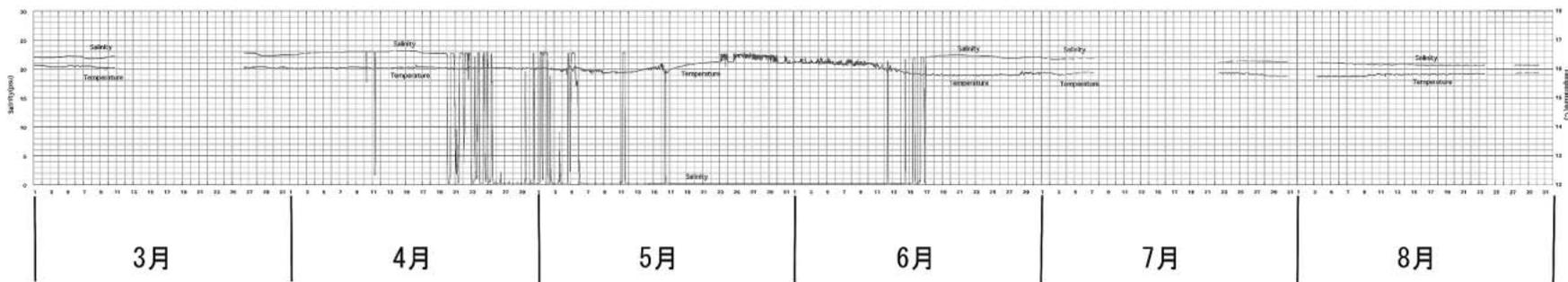


図 10b. 江の川の水位変動と観測井における地下水位と淡塩境界, 多点型 CT センサ (CT2 および 5) の 1 年間の観測結果 (その 2, 2002 年 3 月～2002 年 8 月)

Fig. 10b. Various data obtained at the observation well during one year (Part 2. March, 2002 to August, 2002).

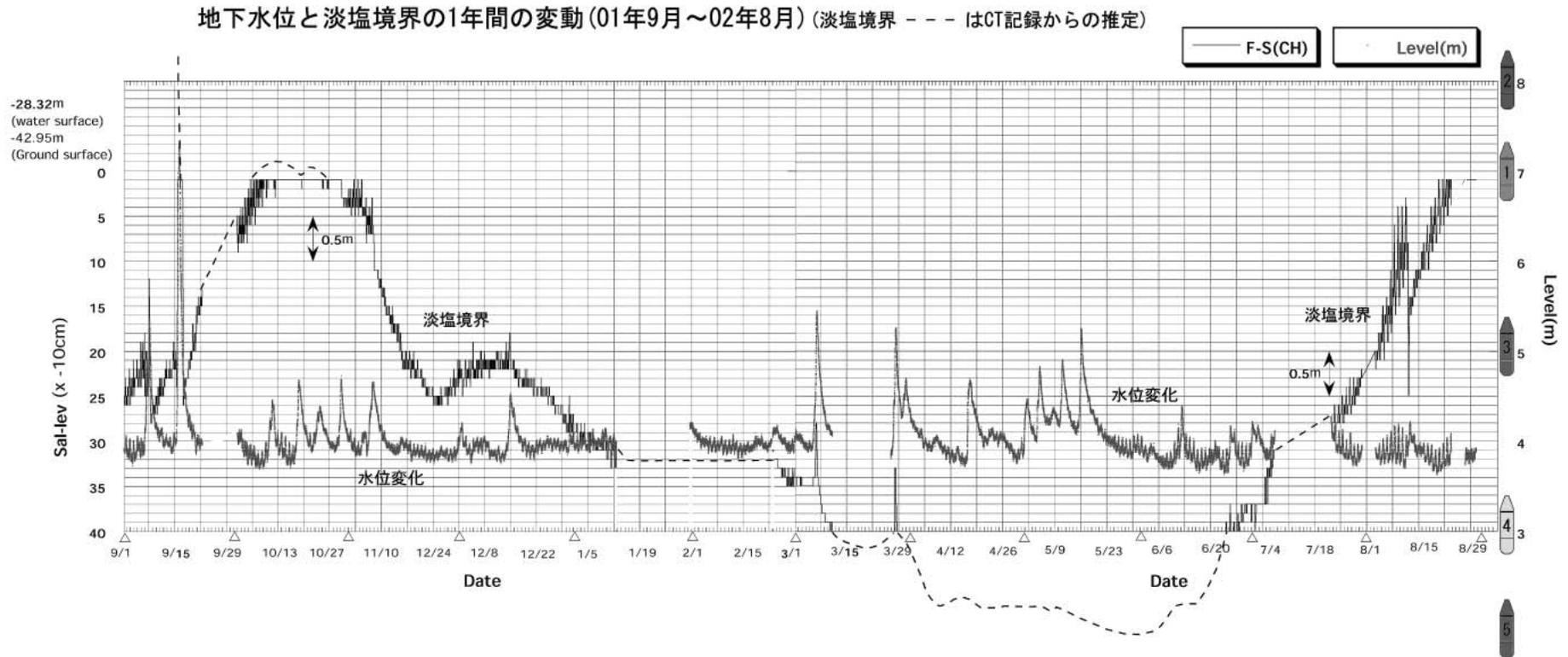


図 11. 観測井における地下水位と淡塩境界の 1 年間の変動

Fig. 11. Annual variation of the ground water table and fresh/salt water boundary at the observation well.

れたもので、地下水位の変化とは直接関係していない。01年10月に高く、02年6月初めに低くなり、8月に再び高くなっている。変動幅は5m以上（最大で6mまでと推定される）である。これは観測井を含む集水域全体の地下水流動を反映したものであると考えられるが、日本海域の年間の潮位変動（夏に高く、冬に低く、その差は60cmにおよぶ）も関係しているのではないかと考えられる。

- 4) 最も上位にあるCT2センサは年間を通じて淡水領域にあった。その温度変化をみると、01年9月の15.5℃から02年3月までは上昇して16.4℃となり、4月以降は降下して7月には15.8℃となっている。すなわち3~4月に高く、8~9月に低いという結果が得られた。これは地下水流動が緩やかなものであることを示唆している。このような地下水の長期流動が上記の淡塩境界の長期変動とも関係している可能性がある。いっぽう、殆どの観測期間中に塩水のなかに位置していたCT5センサの温度データをみると、下位の塩水部では16.0℃程度で、年間を通じてほぼ一定という結果が得られた。

## 引用文献

- 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－. J. Adv. Mar. Sci. Tech. Soci., 4, 41-54.
- 西村清和・鈴木重教・徳岡隆夫・上野博芳（2002）精密および簡易塩分センサケーブルの開発と塩水侵入域の観測井での塩分の長期観測. 地球惑星学会, 2002年6月, 講演要旨.
- 西條八東・奥田節夫（1996 編）河川感潮域. 名古屋大学出版会, 248 p. 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－塩水溯上の長期連続観測システムの開発－（予報）. LAGUNA（汽水域研究, 島根大学汽水域研究センター）, 5号, 197-208.
- 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（1999）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－（渇水期溯 上例, 1998年12月～1999年2月）. LAGUNA（汽水域研究, 島根大学汽水域研究センター）, 6号, 233-245.
- 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（2001）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）. LAGUNA（汽水域研究, 島根大学汽水域研究センター）, 8号, 67-78.

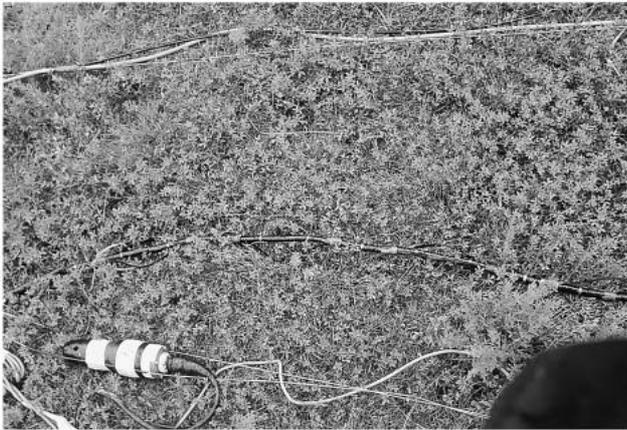
西村清和・鈴木重教・徳岡隆夫（1998）多点型CTセンサケーブル測定システムの開発と汽水域で



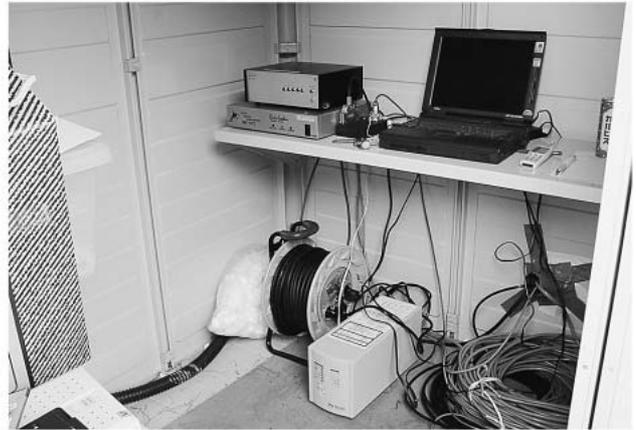
(1) ボーリング地点の堤防から対岸を眺める。急峻な谷地形を埋めて厚さ50~70mの砂礫層が分布する。



(2) 市村観測井(道路の左側は江の川で、手前側が上流；矢印は昭和61年の観測が行われた市村塩分観測所の跡)



(3) 多チャンネル簡易電機伝導度センサ(中央のケーブル、10cmごとにセンサがケーブルに埋め込まれている)と精密電気伝導度/温度センサ(手前)



(4) データレコーダーの下方に設置された安定化電源(停電などへの対処のために設置)

写真(1) - (4) 江の川(上左)と市村観測井(上右)および各種測定機器による観測