

## 武庫川下流部塩水遡上調査報告

古武家善成\*

### 1. はじめに

兵庫県は武庫川の総合治水管理をめざし、「武庫川水系河川整備計画」(2011)に従って、2013年1月より、下流部築堤区間において河床掘削のための護岸整備工事を始めた。

この整備計画の中に、河川対策の河道対策として潮止堰の撤去が含まれている。阪神電鉄武庫川橋梁南側に位置する潮止堰は、大正期の武庫川改修工事の一環で床止堰として計画された。これは1923年に建設されたが、戦後の高度経済成長期に生じた大阪湾沿岸部の地盤沈下により、地下水の塩水化が見られるようになった。そこで、その対策のために床止堰が改築され、1992年に魚道を備えた洪水時自動転倒型の新潮止堰が完成した<sup>1)</sup>。

潮止堰の撤去工事は、整備計画第1期(2011~2015年度)中に着手され、第2期(2016~2020)中に完了することが決まっている<sup>2)</sup>。2012年度からは、撤去に伴う地下水への影響関連事業として地下水利用実態調査も実施されている。

武庫川市民学会は、武庫川づくりと流域連携を進める会(武庫流会)とともに、潮止堰撤去による水環境への影響に注目し、武庫川下流部における塩水遡上の影響を検討するための基礎資料として、現状把握調査を行った。その結果を報告する。

### 2. 調査方法

第1回調査は予備調査と位置づけ2013年7月6日(土)に、第2回調査は同年10月6日(日)に、第3

表1 各調査日における天候および尼崎港の干・満潮の時刻・潮位

調査	調査日	干潮		満潮		規模
		時刻	潮位(cm)	時刻	潮位(cm)	
第1回	2013/07/06(土)	11:58	39.3	18:42	145.4	中潮
	曇りのち雨					
第2回	2013/10/06(日)	13:35	60.3	19:35	167.4	大潮
	晴					
第3回	2015/05/17(日)	12:22	13.7	18:48	154.0	大潮
	晴のち曇り					



図1 調査地点

回調査は2015年5月17日(日)にそれぞれ実施した。いずれも昼頃が干潮、夕方頃が満潮になり、潮汐規模が大潮またはそれに近い時期を選んだ。直近の尼崎港の干・満潮時刻、潮位は表1のとおりである。

測定地点は、第1回、第2回調査は阪神鉄橋および南武橋、第3回調査は南武橋である(図1)。阪神鉄橋は潮止堰よりも上流側に位置し、河口より4.0km上流、川幅108mである。南武橋は河口より3.2km上流、川幅131mである。なお、第2回調査では、阪神鉄橋での測定は調査の初めのみで行い、主たる測定は南武橋で行った。第3回調査では南武橋のみで行った。

横断方向の測点は、第1回調査の場合、両河岸より10m点(右岸測点、左岸測点)および流心(中央測点)の計3点、第2回調査の場合、両河岸より5m点(右岸測点、左岸測点)、流心(中央測点)および河岸測点一流心間の中央(右中央測点、左中央測点)の計5点を設定した。第3回調査の場合は第1回調査と同様に計3点の測点を設定した。

第1回調査では採水器としてハイロート採水器(250mL:アズワン製)を、試水の塩分測定用に塩分濃度屈折計(田中三次郎商店製)を用いた。ハイロート採水器は栓付ガラス容器で、栓と容器それぞれにチェーンが付き、水中に沈めた後に所定の水深で栓のチェーンを引いて蓋を開けることにより、任意の水深の水

\*武庫川づくりと流域連携を進める会/神戸学院大学

を採取することができる。塩分濃度屈折計は、塩分が異なる水は光に対して異なる屈折率を示すという原理を用いたものである。この調査では水温および塩分を測定した。

第2回調査では、塩分その他の測定に直読式総合水質計（JFEアドバンテック製）を用い、水質計を水中で降下させながら0.1mごとの鉛直自動測定を行った。総合水質計先端には塩分をはじめ複数のセンサーが装備されており、高速応答により、0.5m/sの速度で水中を降下中に各種項目を自動的に測定することが可能である。この調査では水温、塩分、DO（溶存酸素）、濁度、クロロフィルa（植物プランクトン細胞中の光合成色素）の5項目を測定した。

なお、直読式総合水質計の場合、河川の表層（0m）および底層（Bottom）において、気泡や底泥の巻き上げによる測定誤差が生じることがある。そこで、本調査では両層の測定結果を除いて解析を行った。

第3回調査では、水温、塩分、DO、COD、硝酸態窒素（NO<sub>3</sub>-N）、リン酸態リン（PO<sub>4</sub>-P）の6項目を測定した。測定には、塩分：塩分濃度屈折計（田中三次郎商店製）およびデジタル塩分計（Digital Instruments社製）、DO：溶存酸素キット（共立理化学研究所製）、COD、NO<sub>3</sub>-N、PO<sub>4</sub>-P：各パックテストキット（共立理化学研究所製）を用いた。

### 3. 結果

本調査では、第1回、第2回調査は阪神鉄橋および南武橋で行い、第3回調査は南武橋のみで調査を行った。また、それぞれの橋での採水は、第2回調査では右岸測点、右中央測点、中央測点、左中央測点、左岸測点の5測点で行ったが、第1回、第3回調査では右岸測点、中央測点、左岸測点の3測点で行った。

そこで、結果および考察の記述においては、塩水遡上の観測を目的とすることから南武橋に、測点については3回の調査に共通する右岸測点、中央測点および左岸測点に、それぞれ重点を置いた。

また、第1回、第3回調査では、各測定項目について表層、底層の2層の測定値が得られたが、第2回調

査では、直読式総合水質計を用いたことにより深さ0.1mごとの測定値による連続鉛直分布が得られている。そこで、結果を図化するにあたっては、3回の結果を比較しやすいように、第1回、第3回調査についても鉛直分布のグラフ形式で表示した。

なお、調査潮時に示した時刻はその時の調査時間幅の中での代表的な時刻とした。

#### 3.1 第1回調査

この調査では、阪神鉄橋では干潮時（12:30）、漲潮時（15:30）、満潮時（18:30）、南武橋では干潮時（13:00）、漲潮時（16:00）、満潮時（19:00）の各3回調査を行った。項目としては水温、塩分の2項目を測定した。

阪神鉄橋では、水温は干潮時：27.0～28.3℃、漲潮時：27.7～28.2℃、満潮時：27.8～28.1℃であり、表層・底層、3測点全体として大きな違いは認められなかった。塩分については、干潮時、漲潮時は両層、3測点ともに0‰、満潮時でも両層、3測点全体として0～1‰であり、潮止堰が塩水の遡上を効果的に止めていることが確認された。

南武橋における塩分の測定結果を図2に示す。表層では、干潮時、漲潮時にはいずれの測点でも0～1‰であり、満潮時には2～3‰と多少の増加が認められた。しかし、底層では、干潮時には、14‰を示す左岸測点を除き0～1‰であったが、漲潮時には2～6‰に増加し、満潮時には14～16‰になった。これらの結果は、河川水（淡水）よりも比重が大きい海水（塩水）が、潮汐に伴い底層から河口域に侵入し武庫川を遡上していることを推察させる。左岸測点底層では干潮時にもかかわらず14‰の塩水が検出されたが、これについては考察で検討する。

図には示していないが、水温については、干潮時：27.1～27.8℃（左岸測点底層26.7℃を除く）、漲潮時：27.2～28.0℃と概ね27℃台であったが、満潮時には表層：27.0～27.1℃であるのに対し底層：25.2～25.8℃となり、表層と底層で異なる水塊が存在することを推察させた。この結果は塩分の測定結果によく対応していると考えられる。

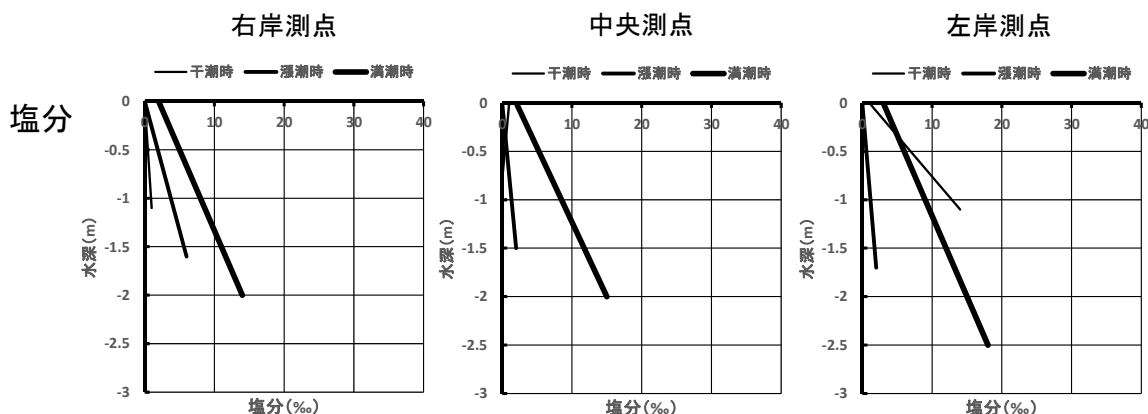


図2 武庫川下流部塩水遡上調査 第1回調査結果（南武橋）

### 3.2 第2回調査

この調査では、阪神鉄橋では干潮前の12:30に1回測定し、南武橋では干潮時(13:30)、干-漲潮時(15:00)、漲潮時(16:30)、漲-満潮時(18:00)、満潮時(19:30)の5回調査を行った。項目としては水温、塩分、DO、濁度、クロロフィルa (Chla) の5項目を測定した。

阪神鉄橋では、塩分はいずれの測点でも最下層で多少検出(最高7‰)されるのみであり、第1回調査結果と同様に堰の塩水せき止め効果が確認された。DOは全測点・全層一律に概ね100~110%であった。濁度、Chlaはともに最下層で検出された。南武橋の場合と同様に計測時の底泥巻き上がりの影響が考えられるが、詳細は不明である。検出範囲は濁度:3~130FTU (Formazin Turbidity Unit:ホルマジン標準液を用いた測定単位)、Chla:0.3~7 $\mu$ g/Lであった。水温は全測点・全層で概ね23~24 $^{\circ}$ Cと一定であった。

南武橋について塩分、DO、Chlaの結果を図3に示す。

南武橋では干潮時においても塩分が表層で25~29‰、最下層で31‰程度あり、第1回調査の場合と異なり表層付近でも淡水の影響がほとんど認められない。この傾向は満潮までの全ての潮時で類似した。

DOは、測点・層・潮時ごとに多少変動しながら表層の70~90%程度から深さ方向に漸減し、最下層では50~60%となっている。満潮時は水深が最も深くなるので、右岸測点、左岸測点では最下層のDOは40%台を示す。満潮時に低酸素海水が底層を遡上している可能性が考えられる。また、表層のDOに関し、阪神鉄橋では全測点で100%を超えていたが南武橋では70~90%程度と低かった。この理由は明確でなく検討する必要がある。

Chlaは、同一測点においても潮時による変動が激しい。特に中央測点では、いくつかの潮時で水深0.3m付近に極大が認められ、干潮、漲潮、満潮時には最下層で濃度の増加が顕著である。図には示していないが、濁度が全ての潮時・測点で最下層における濃度の増加を示すことから、巻き上がった底泥中の植物プランク

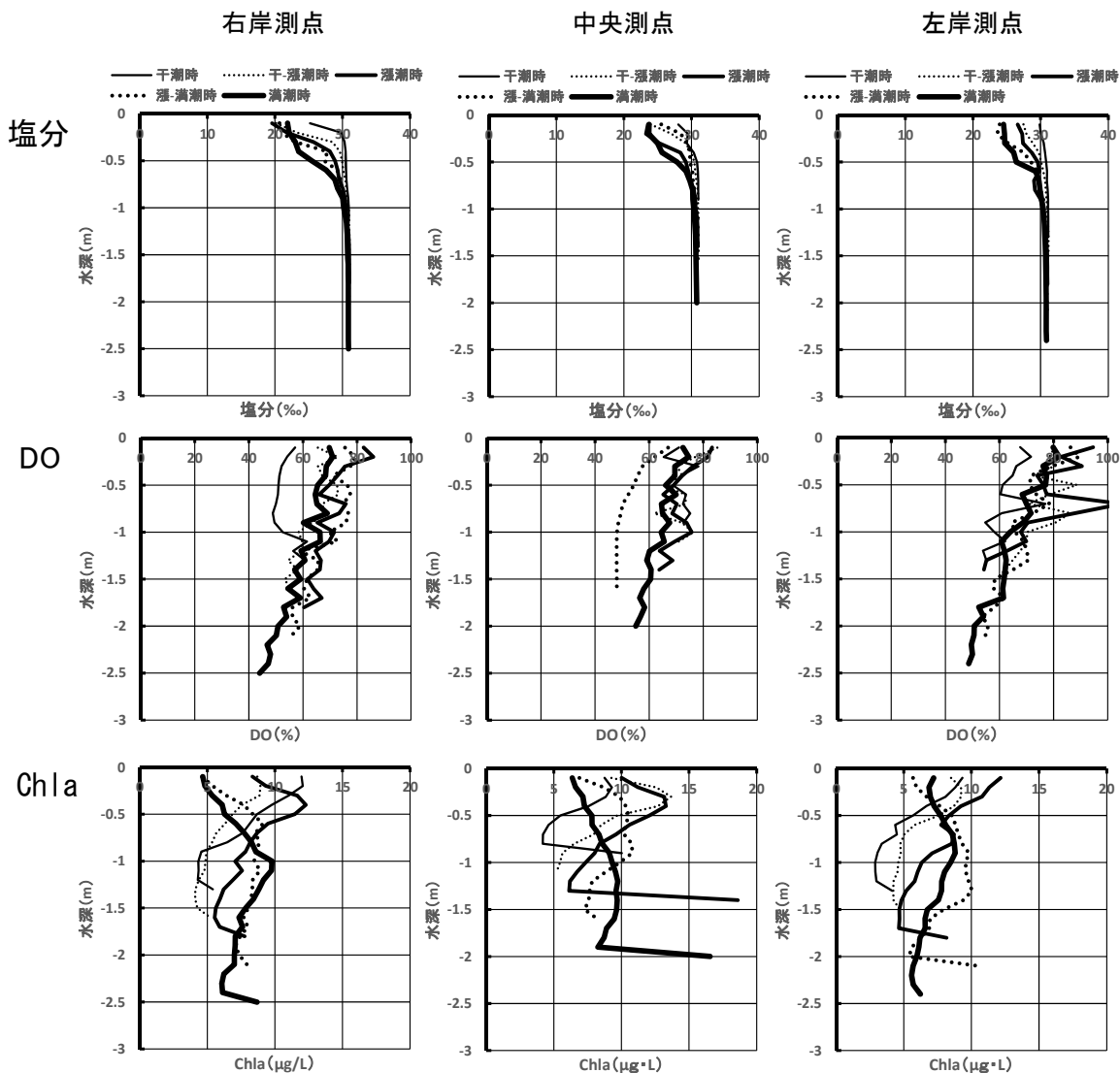


図3 武庫川下流部塩水遡上調査 第2回調査結果 (南武橋)

トンの影響が考えられるが、この結果のみでは詳細は不明である。

図には示していないが水温については、全ての潮時・測点で 24℃台であり横断方向、鉛直方向ともに変動は小さかった。

### 3.3 第3回調査

この調査では、南武橋のみで干潮時 (12:00)、干 - 漲潮時 (13:30)、漲潮時 (15:00)、漲 - 満潮時 (16:30)、満潮時 (18:00) の5回調査を行った。項目としては水温、塩分、DO、COD、NO<sub>3</sub>-N、PO<sub>4</sub>-P の6項目を測定した。

各項目の測定結果を図4-1、図4-2に示す。表層と底層の間に差が見られたことから図4-1には水温についても示した。水温は、全ての潮時・測点で表層では 23

～24℃であるのに対し、右岸および中央測点の底層では 20～21℃と 3～4℃低い。ただし、左岸測点では 21～23℃でその差は前2測点よりも小さい。

表層の塩分は全ての潮時・測点で 0‰である。一方、底層の塩分は、右岸および中央測点では、干 - 漲潮時に右岸測点が 0.5‰と非常に低いことを除けば 23～26‰を示す。なお、左岸測点では潮時により変動が激しい。

DOは、表層では全ての潮時・測点で 6.5～7mg/Lである。底層については、3測点ともに漲潮時までは 4～5.5mg/Lと高いが、満潮時には低くなり 3mg/Lを示す。

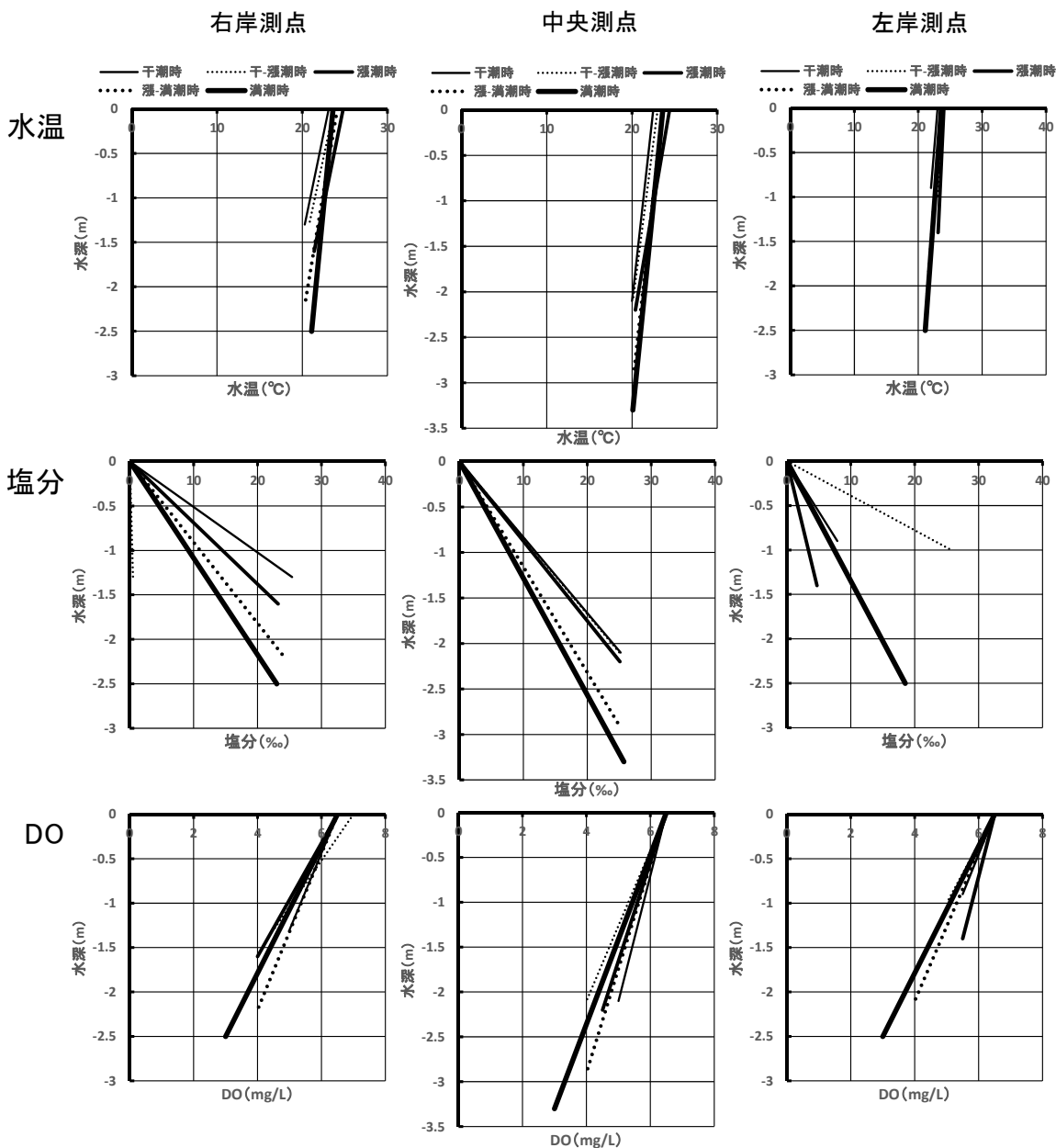


図4-1 武庫川下流部塩水遡上調査 第3回調査結果 (南武橋)

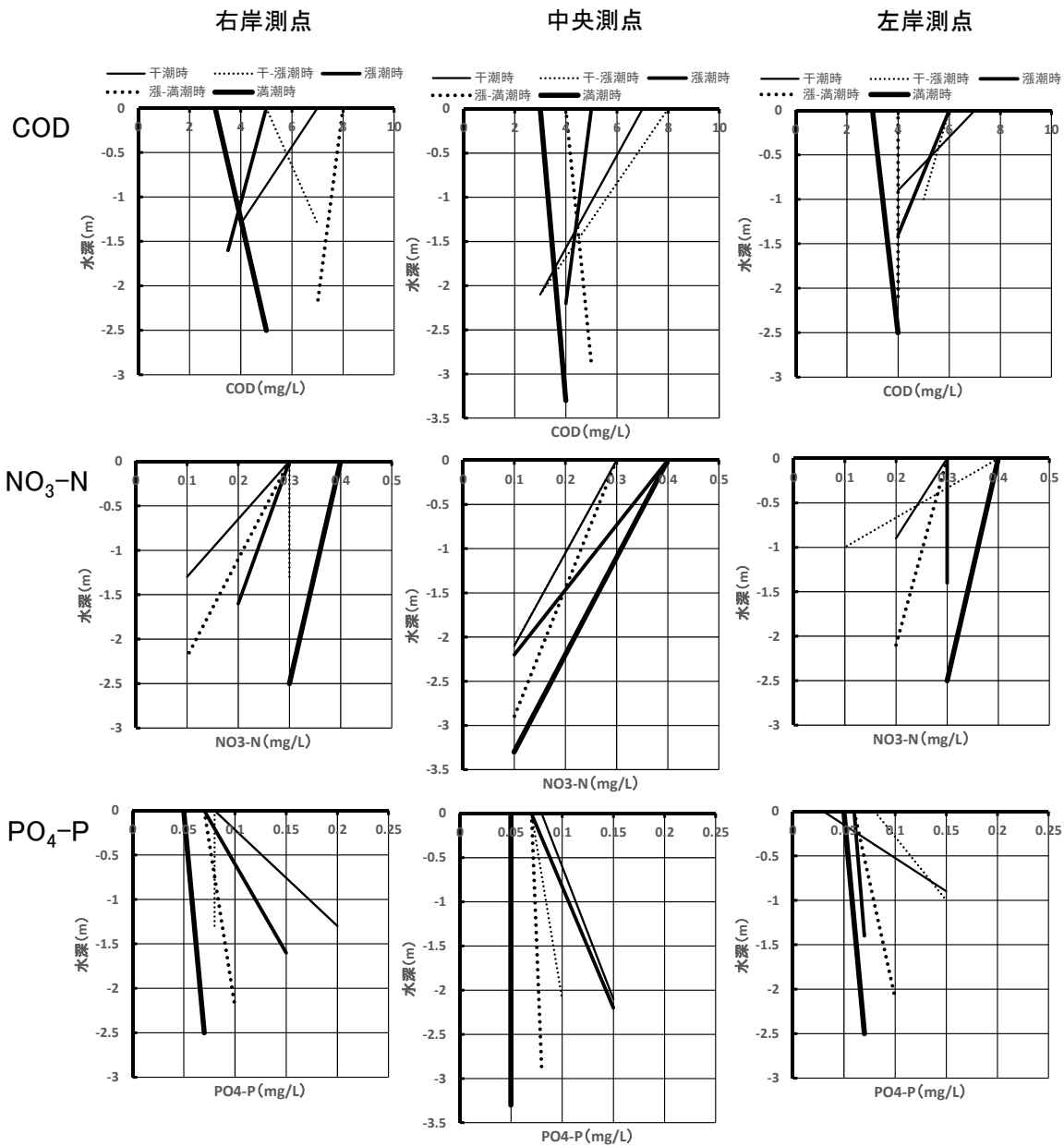


図 4-2 武庫川下流部塩水遡上調査 第 3 回調査結果 (南武橋)

COD,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$  についてはいずれも変動が激しいが、表層に関しては、COD および  $\text{PO}_4\text{-P}$  は干潮時に高く満潮時に低く、 $\text{NO}_3\text{-N}$  は干潮時に低く満潮時に高い傾向が認められる。底層についても  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$  については同様の傾向がみられる。COD および栄養塩項目に関しては第 3 回調査のみの結果であることから、その変化の再現性を含めさらに調査する必要がある。

#### 4. 考察

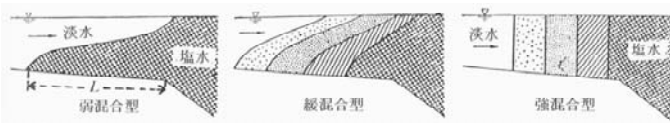


図 5 河川感潮域における塩分の分布型<sup>3)</sup>

3 回の調査結果を塩分についてまとめると以下のようになる。第 1 回、第 3 回の結果では、表層の塩分はいずれの潮時でも 0‰ またはそれに近い値を示した。底層の塩分は、第 1 回では潮時が進むにつれて塩分が増加したが、第 3 回の調査では干潮時から塩分が高くそのまま推移した。一方、第 2 回調査では表層の塩分も干潮時から 20‰ 以上と高く、底層の塩分は 30‰ 以上を維持した。

河川の最下流部である感潮域の水の流れと塩分の分布に関係する主要因として、河川流量等の水文条件、海水の遡上を決める潮汐条件、および下流部の河川地形があり、副次的要因として吹走流や鉛直方向の水温分布に影響する気象条件が挙げられる。そして、河川の感潮域では、これらの要因が影響しあって生じる塩分分布として、弱混合型、緩混合型、強混合型の 3 種

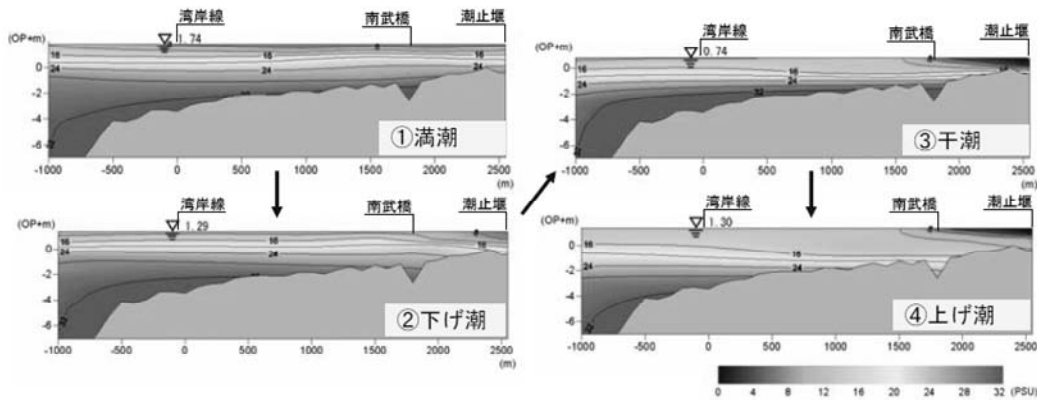


図6 兵庫県による武庫川塩水遡上調査事例（2009.7.7：大潮）<sup>4)</sup>

類の分布が認められる（図5）<sup>3)</sup>。

弱混合型では、淡水と塩水（海水）の混合が弱く、高密度の塩水の上を低密度の淡水が流下し、二つの水の層の間に塩分勾配（塩分差）の大きい境界面（界面）が明瞭に生じる。塩水が川底に沿って楔状に遡上することから、この現象は“塩水楔”と呼ばれる。

強混合型では、鉛直（水深）方向の十分な混合により塩分勾配は鉛直方向には生じず、すなわち等塩分線は鉛直（水深方向に塩分が一樣）であり、水平方向にのみ塩分勾配が生じる。

緩混合型は、弱混合型と強混合型の中間的な混合状態であり、等塩分線は図のように斜めに傾く。塩分勾配は水平、鉛直の両方向に生じる。

弱混合型（塩水楔）は河川流量が大きく淡水と塩水の混合作用をもたらす潮汐流が弱い（干満の潮差が小さい）河川、強混合型は河川流量が小さく潮差が大きい河川に、それぞれ生じやすいと言われているが、同一河川においても、その時々々の流量、潮位、気象条件などにより前記3種類の混合型がいずれも現れることが観測されている<sup>3)</sup>。

このような観点から3回の調査結果を検討すると、第1回調査時は、表層では淡水状態が続き底層では塩水が徐々に侵入していることから緩混合型、第2回調査時は、表層、底層ともに塩水状態が続いていることから強混合型、第3回調査時は、表層では淡水状態が続き底層では塩水状態が続いていることから弱混合型になっていたことが示唆される。

下流部の基準点である甲武橋（河口より9.4km上流）における各調査時の流量（調査時間平均）について、兵庫県から提供を受けた甲武橋の水位データと2013年度（最新）のH-Q式（水位Hより流量Qを算出する式）

$$Q = a^2 \times (H + d/a)^2 \quad a = 8.85 \quad b = 4.10$$

（適用水位：0.48～0.83m）

より求めると、

- 第1回（2013.7.6：平均水位0.80m）：127m<sup>3</sup>/s
- 第2回（2013.10.6：平均水位0.63m）：96m<sup>3</sup>/s
- 第3回（2015.5.17：平均水位0.76m）：119m<sup>3</sup>/s

となる。この流量と前記で判断した混合型とを比較すると、強混合型と判断された第2回調査時の流量は3回の調査の中で相対的に少なかったことから、矛盾しない結果と言える。

図6は兵庫県が実施した武庫川塩水遡上調査事例<sup>4)</sup>である。注目すべきは南部橋付近の河床に凹部があり、干潮時においても塩水が残存していることが認められることである。第1回調査では、左岸測点底層において干潮時にもかかわらず14‰の塩水が検出されたが、この結果は県の調査で得られた塩水の残存現象と関係する可能性がある。ただし、底層の水深は凹部であることを特に示してはいない。第3回調査では、左岸測点底層の塩分変動が激しかったことを合わせて考えると、この底層の塩分変化に関する要因について慎重に検討する必要がある。

淡水と海水がまじりあう河口付近では、河川流量の違いにより塩水の遡上状況が異なる。今回の調査では混合型と流量の関係性も示唆されたが、南武橋における塩水遡上現象の把握には、様々な流量時での調査の積み重ねが必要である。

## 5. おわりに

武庫川下流部において3回の塩水遡上調査を行い、第2回調査では総合水質計により塩分の鉛直分布が得られた。しかし、河口域にみられる楔形塩水遡上現象（塩水楔）は十分把握されなかった。今後調査方法の再検討も行いながら観測を重ね、種々の塩水遡上現象のデータを収集する必要がある。

## 参考文献

- 1) 樋口和夫（2013）武庫川の潮止堰について、武庫川市民学会第2回セミナー資料集、1-4.
- 2) 兵庫県（2014）武庫川水系整備計画進行管理報告書〔平成26年度版〕、81pp..
- 3) 西條八東，奥田節夫編（1996）河川感潮域 - その自然と変貌 - ，248pp.，名古屋大学出版会，名古屋.
- 4) 兵庫県（2011）武庫川水系河川整備計画 資料編（1-8）.