

武庫川河口域の水理地質構造と現況の水文環境

HYDROLOGICAL ENVIROMENT AND HYDROGEOLOGICAL STURUCTURE OF THE MUKO-RIVER ESTUARINE REGION

川口泰廣*・柳田三徳**

Yasuhiro KAWAGUCHI and Mitsunori YANAGIDA

The Muko-river is located near the border of Osaka and Hyogo Prefecture, and flows down between the cities of Amagasaki and Nishinomiya at the estuarine region. River improvement has been planned in order to reduce flood damage as the risk of inland flood is increasing, especially within the downstream area due to abnormal climatic condition in recent years. The project will consist of removal of present river structures and channel dredging. Since the work will probably adversely affect the hydrological environment by drawdown of ground water level (GWL), progression of ground water salination, and so on, hydrological and hydrogeological investigations were made to clarify actual conditions. These included survey of well inventory, drilling and electronic conductivity (Ec) logging of boreholes, and monitoring of GWL fluctuation. The outcome revealed two aquifers, consisting of alluvial gravel and sand, distributed on a clay layer within 10 m depth, and that seawater intrusion is governed by the surface features of the clay layer.

Keywords : drawdown of GWL, ground water salination, Ec logging, hydrogeology

1. はじめに

兵庫県南部は、瀬戸内式気候を呈し全国的にみても平均降水量が少ない地域である。一方で近年は、平成 16 年の台風 23 号に伴う豪雨、あるいは平成 21 年の兵庫県西・北部豪雨など、大規模な集中豪雨が多発し河川災害が頻発する傾向が強まっており、このような豪雨への対応が急務となっている。

武庫川下流域は、住宅密集地であり、堤防直近まで住宅が迫る。また、河床勾配が平坦となるため、下流部は上流部より流下能力が低下する区間でもあり、河川が氾濫しやすい資産や人命に甚大な被害が生じる可能性が高い。

このような地域特性を踏まえ、兵庫県では平成 23 年度から 42 年度にわたり、武庫川水系河川整備計画¹⁾に基づいて、総合的な治水対策に取り組んでいる。喫緊の課題は、人口が集中する築堤区間の武庫川河口から仁川合流点について、安全性を早期に向上させることである。この安全性向上のため武庫川では、河道掘削及び河道拡幅が計画されている。その一方で、河川環境を現況の河川構造物構築前に戻すため、感潮区間にある可動式の潮止堰や床止を撤去することも併せて検討されている。

しかし、武庫川の下流築堤区間は、天井川で、河川水が地下水を涵養しており、河道掘削による河川水位の低下は、周辺地下水位の低下や河川の塩水遡上に繋がり水文環境へ

の影響が懸念される。

武庫川沿川の地下水利用施設としては、鳴尾浄水場や民生井戸、農業用井戸など多数あり、水文環境の変化は、これらの利水に大きな影響を与える可能性がある。

図-1 に調査位置図を示す。平成 24 年度に筆者らは、河川整備施工前の武庫川河口域の水理地質構造と水文環境を

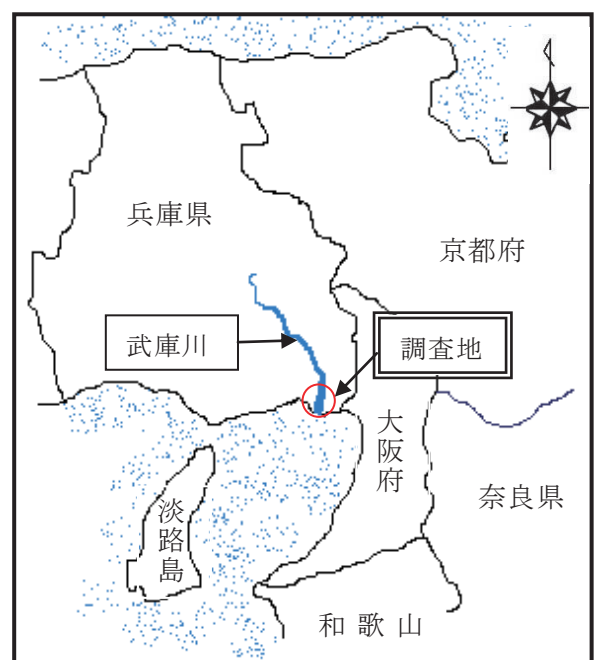


図-1 調査位置図

* コンサルタント国内事業本部 大阪支店 技術第二部

** コンサルタント国内事業本部 流域防災事業部 地盤環境部

4. 水文調査計画

(1) 観測計画

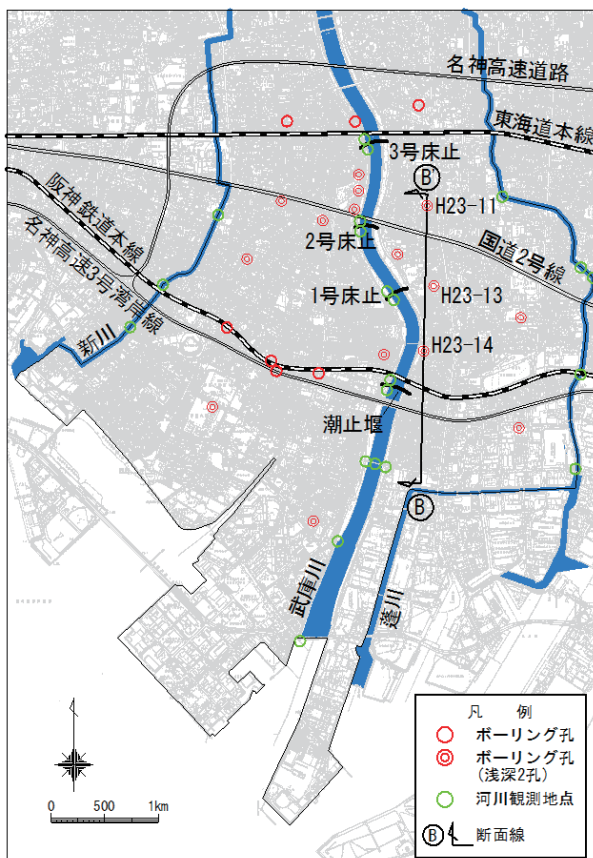
観測計画は、調査・解析範囲の地下水流動方向や、武庫川と地下水の交流関係、潮位と地下水位の相関、地下水塩水化の現状等を把握することを目的として策定した。

具体的な調査項目は、イベント毎の広域の地下水位分布を把握するための民生井戸を含めた一斉測水、季節変化を含めた年間の地下水位・電気伝導度変動を捉えるための自記水位計・電気伝導度計の設置と観測、塩淡水境界を把握するための各観測孔を用いた電気伝導度検層等である。

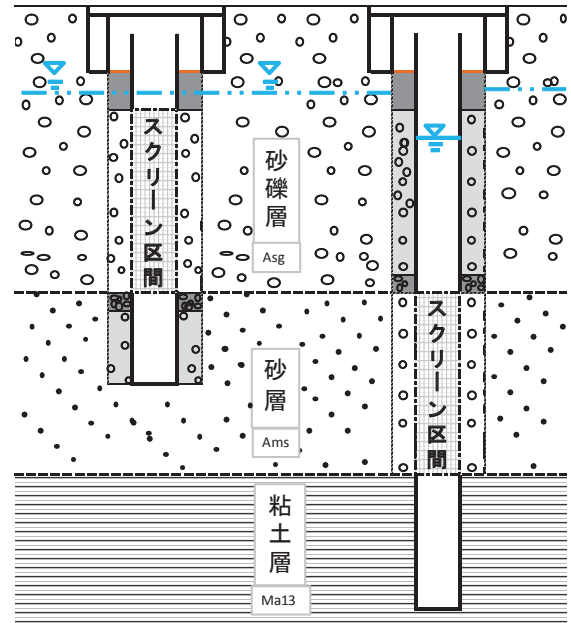
(2) 地下水観測力所の選定

地下水観測地点としては、まず、用途や構造から観測可能な既設井戸を抽出した。さらに、その不足を補うように新規観測孔の位置を選定し、観測網を整備した。また、これらの観測地点は次のような、重要な保全対象物・水理地質の特徴を考慮し選定した。

- 重要保全対象物の周辺
 - 粘土層（Ma13; 後出）の不陸による尾根境界付近
 - 枝川（埋め立て河川）周辺
 - 電気伝導度が高い区域
 - 潮止堰や床止撤去時の影響が懸念される武庫川近傍
- 観測地点及び観測孔の配置図を図－5 に示す。



図－5 観測地点の配置図



図－6 浅層（左）及び深層（右）観測孔の模式図

(3) 新設観測孔の仕様

新設観測孔は、民生井戸及び鳴尾浄水場の主な取水層となっている透水性の良い砂礫層（Asg; 後出）と、その下位に位置する非取水層の砂層（Ams; 同）の地下水位と水質を、それぞれ個別に観測できるよう各地層別にスクリーンを設け、1地点に2孔ずつ設置した。新設観測孔は、ボーリング工により孔径φ116mmで削孔しφ65mmの塩ビ管を立て込んだ。なお、観測孔仕上げ上の留意点は下記である。

- 塩ビ管のスクリーン区間の開口率は10%以上とした。
- スクリーン区間の周囲には、豆砂利を充填した。
- スクリーン区間にはフィルターを装着し土砂の流入を減少させた。
- スクリーン上部の無孔区間は、モルタル入りベントナイトペレットで境界部を止水し、その上位もセメント入りの砂利や土砂で充填した。

図－6 に浅層及び深層観測孔の模式図を示す。

5. 武庫川河口域の水理地質構造と水文環境

(1) 地質分布

調査・解析範囲には、広く武庫川起源の氾濫源の粗粒堆積物と海進時の粗～細粒堆積物が連続性良く分布する。海進時の細粒堆積物（粘土層; Ma13）が難透水層となり上下の帯水層を分断するが、上流部の3号床止付近にかけて消失する。

(2) 地質各説

武庫川河口の地質層序を表－2 に示す。

表－２ 武庫川河口付近の地質層序表

地質時代	地質	層相	記号	層厚
新生代第四紀	現世	盛土	礫混じり土砂	b 0.3～2m
	完新世	三角州堆積物	砂礫	Asg 5m
			砂	Ams 5m
			粘土	Ma13 0.5～10m
	更新世	扇状地堆積物	洪積砂礫	Dsg <10m
			固結シルト	Dc

1) 三角州堆積物 砂礫層 (Asg)

砂礫層は、武庫川の氾濫を起源とする河成層からなり鳴尾浄水場付近上流側や、旧河道付近の氾濫源に分布する。なお、武庫川上流側でも旧河道から離れた地点あるいは下流側に向かうに従って礫が減少し礫混じり砂や粗砂となる。全般に不均質で淘汰が悪い。

2) 三角州堆積物 砂層 (Ams)

砂層は、貝殻片を含む淘汰の良い均質な中砂で構成される海成層である。上下流で大きな粒径変化はないが、下流に向かうにつれ細砂層を挟む等の部分的な細粒化は認められる。上位の砂礫層との地質境界は明瞭である。

3) 三角州堆積物 粘土層 (Ma13)

砂層の下位には、縄文海進時に堆積した海性の粘性土層が分布する。Ma13 粘土層と呼ばれ、均質な高粘性の粘性土からなり、上下位の地質境界付近では砂層や礫層が混入し漸移的となる。全般に二枚貝の貝殻片や炭化木片を含む。

4) 扇状地堆積物 洪積砂礫層 (Dsg) と固結シルト層 (Dc)

洪積砂礫層は、淘汰が悪い粗粒堆積物で、礫の含有率は30～40%程度である。礫は、最大径6cm程度で、平均1cm程度である。礫は、亜円～円礫を呈する。礫種は、花崗岩主体で、閃緑岩、砂岩、頁岩、チャートを含む。基質は、粗砂からなり、地質境界部ではややシルト質となる。

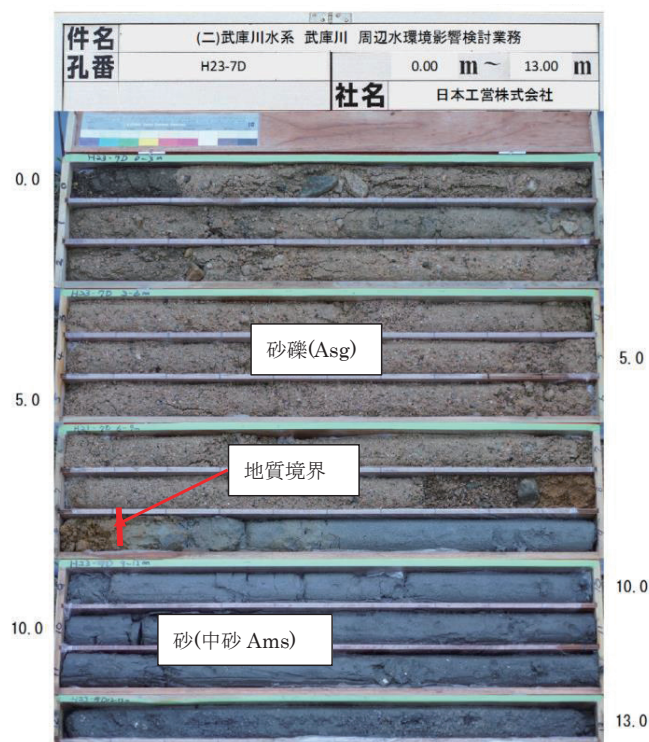
下位の固結シルト層は、半固結状のシルト層である。均質で、上位の粘土層で見られた貝殻片や炭化木片を含まない。

(3) 帯水層の酸化還元状況

帯水層である三角州堆積物上部層の砂礫層 (Asg) と砂層 (Ams) は、観測孔設置時に得られたボーリングコア観察において特徴的な色調を示した。図－7 に代表的なボーリングコア写真を示す。

ボーリングコアの色調は、砂礫層が酸化を示すような褐色を呈することが多く、一方、その下位の砂層は、還元を示すような青灰色を呈するとともに、硫黄臭が確認された。

このような現象は、上位の砂礫層では、地下水の流動性が



図－7 砂礫層及び砂層の酸化還元状況

良くて溶存酸素を多く含み酸化状態になりやすいのに対し、下位の砂層においては、地下水の流動性が悪くて滞留時間が長くなり還元状態に至ったことに起因していると考えられる。

(4) 帯水層の透水性

孔内透水試験結果から帯水層毎の透水係数を整理して、表－3 に示した。透水試験は、観測孔設置後に実施したため、スクリーン長が最低1mから最大10m程度までひらきがあり粒度と透水性に多少ばらつきがある。砂礫層 (Asg) は、下位の砂層 (Ams) と比べ3倍弱程度透水係数大きい。

(5) 地質構造

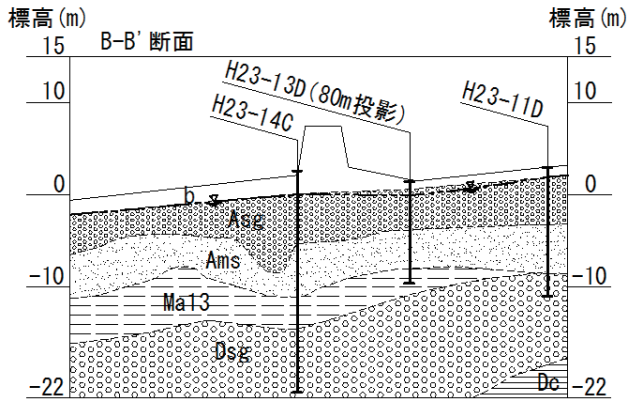
関西地盤図²⁾及び既存報告書⁵⁾やボーリング調査結果をもとに地質断面図(一例は図－8)を作成した。さらに、各地層上面の分布形状を確認するため、複数の断面図をもとに砂礫層 (Asg) と砂層 (Ams) の地質境界である砂層上面等高線図、難透水層である粘土層 (Ma13) の上面等高線図及び等層厚線図、固結シルト層 (Dc) の上面等高線図等を作成し、地質構造解析に供した。作成した各図面を図－9～図－12に示す。

1) 砂層 (Ams) 上面の分布形状

砂層 (Ams) 上面等高線図を図－9に示す。海退時に中砂層が浸食され、谷状地形を形成したと考えられる。さらにそ

表－3 各帯水層の透水係数

層相区分	砂礫 (Asg)	砂 (Ams)	洪積砂礫 (Dsg)
透水係数 (m/s)	2.27E-04	8.39E-05	8.33E-05



図－8 B-B' 地質断面図

の谷地形は、増水時に武庫川から氾濫し堆積した砂礫層に覆われ、現地形を形成したと考えられる。

谷地形は、現在の武庫川、新川、旧枝川の位置と調和的で、武庫川の3号床止付近を起点として放射状に分布する。一方、蓬川付近には、現河川に沿って尾根状地形が認められる。また、武庫川左岸の潮止堰直上流には窪地が認められる。

2) 粘土層 (Ma13) 上面の分布形状

粘土層 (Ma13) 上面等高線図を図－10に示す。

粘土層表面形状における尾根部は、現地形と異なり、武庫川等の河川を横切って分布している。武庫川から新川までの間に3筋の尾根が分布する。武庫川左岸の、潮止堰直上流

には、中砂層と同じように窪地が認められる。

武庫川右岸の内陸部に、切れ込んだ谷が分布することが特徴である。

3) 粘土層 (Ma13) の層厚分布

粘土層 (Ma13) 等層厚線図を図－11に示す。粘土層は、上流に向かうにつれ薄くなり3号床止付近で消滅する。上流部では、礫混じり粘性土や砂混じり粘性土となる。一方河口付近では、層厚10mを超え最大13m以上となる。尼崎側の、潮止堰直上流では、局所的に層厚がやや薄くなる。

4) 固結シルト層 (Dc) 上面の分布形状

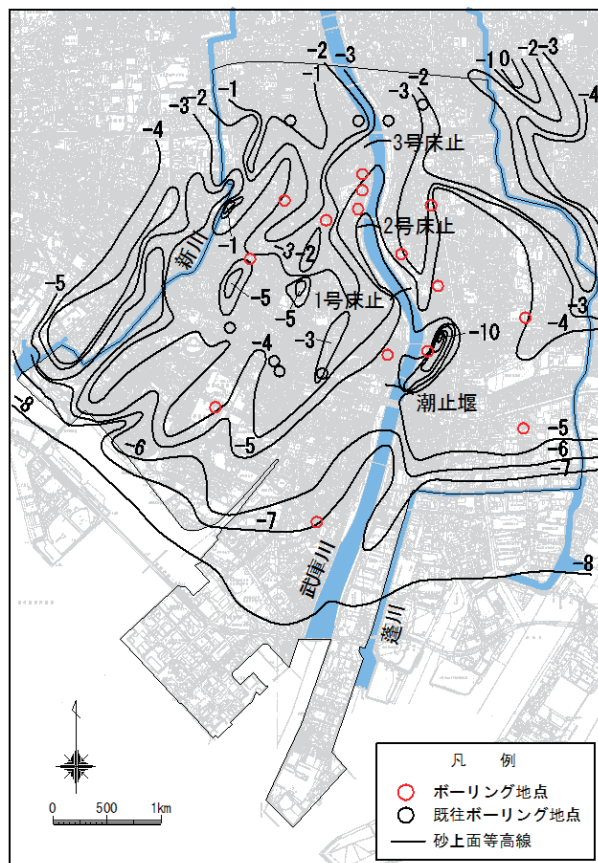
固結シルト層 (Dc) 上面等高線図を図－12に示す。固結シルト層 (Dc) と粘土層 (Ma13) は、より深部の第二帯水層となる洪積砂礫層 (Dsg) を挟む。難透水層である固結シルト層の上面は、比較的不陸が少なく、下流方向へ急傾斜する。

(6) 秋期豊水期の地下水位分布

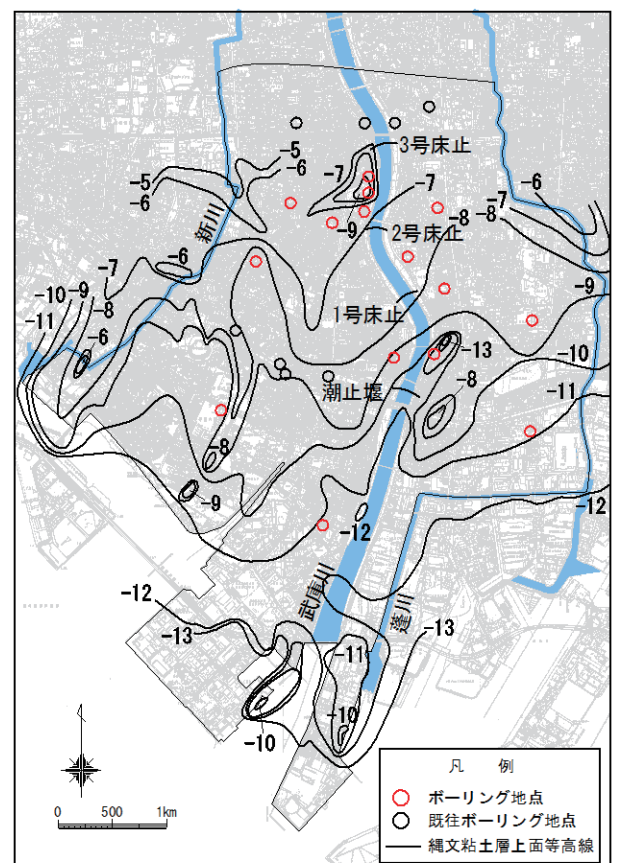
地下水の流動状況を把握するため、民生井戸39カ所の秋期豊水期の一斉観測結果から地下水位等高線図を作成した(図－13)。

図－13によると、調査地域の地下水は、武庫川と密接に関係しながら、北から南に向かって流動しており、その特徴をまとめると以下になる。

- 河川直近を除き、等高線は武庫川流路にほぼ直交する。



図－9 砂層 (Ams) 上面等高線図



図－10 粘土層 (Ma13) 上面等高線図

- 武庫川下流右岸の内陸部の広い範囲に、窪み状の水面形が認められる。
- ただし、西端に位置する新川の水位が高く、その付近の地下水位勾配は北西から南東へ傾いている。

(7) 冬期渇水期の地下水位分布

冬期渇水期の地下水の流動状況を把握するため、2月中旬に民生井戸41カ所の一斉観測を行い、その結果で地下水位等高線図を作成した(図-14)。その特徴は下記になる。

- 潮止堰から上流にかけては河川から地下水に向かう流れが認められる。
- 旧枝川沿いには、自然堤防状の地形に添って地下水位の尾根が現れている。
- 秋期豊水期と同様、武庫川下流右岸部に地下水位の窪みが認められ、中心部の水位は豊水期よりも低下する。
- 武庫川左岸では、地下水位は、上下流の広い範囲で地形にならって分布する。動水勾配は蓬川に向かって傾いており、蓬川の水位が低いことによる地下水の湧出が推定される。

(8) 豊水期と渇水期の地下水位変動の比較

豊水期と渇水期の地下水位変動(地下水流動状況)の違いを整理すると以下ようになる。

- 平常時の河川水位は、潮止堰や床止の堤高に規制さ

れ、渇水期と豊水期を比較しても大きな差異はない。

- 一方、豊水期と較べて渇水期の地下水位は、河川水位がほとんど変わらないにもかかわらず低下しており、地下水の涵養が河川だけでなく、山地の地下水涵養の影響も受けていることが示唆される。

(9) 帯水層別地下水位変動の比較

浅層地下水位観測孔による砂礫層(Asg)の水位と、深層地下水位観測孔による砂層(Ams)の水位変化を図-15～図-17に示す。

まず、浅深地下水位の上下関係に着目すると、鳴尾浄水場内のH23-7とH23-9以外の地点では、相対的に砂層の水位が低く、浄水場内の2カ所のみ砂層の水位が高いことがわかる(この現象は浄水場の取水が砂礫層を対象としていることで説明できる)。このように、浅深地下水位では、上位の砂礫層より下位の砂層の水位が低い傾向が認められる。

一方、浅深地下水位の水位差は、H23-2孔が約17cm、次にH23-4孔が約3cmで、その他は1cm前後である。H23-2孔の水位差は全観測孔中最大であるとともに、経時的にその差がほとんど変化しない水位変動パターンを示す。この変動パターンに関しては、他孔でも同様の傾向が認められる。

図-16に示す浄水場内H23-9孔の水位変動は、砂層より砂礫層の水位が高い例であるが、水位差の平均値は1.4cmとわずかである。

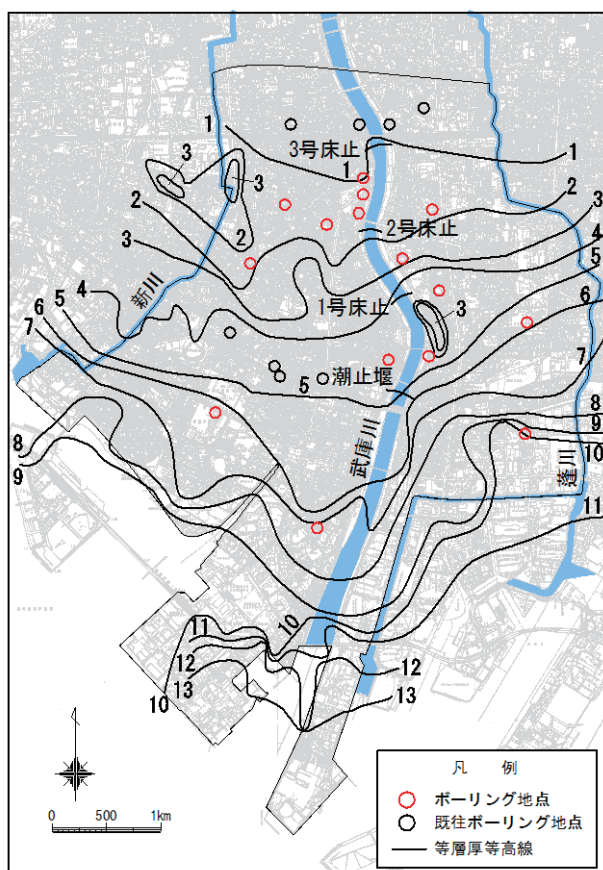


図-11 粘土層(Ma13)等層厚線図

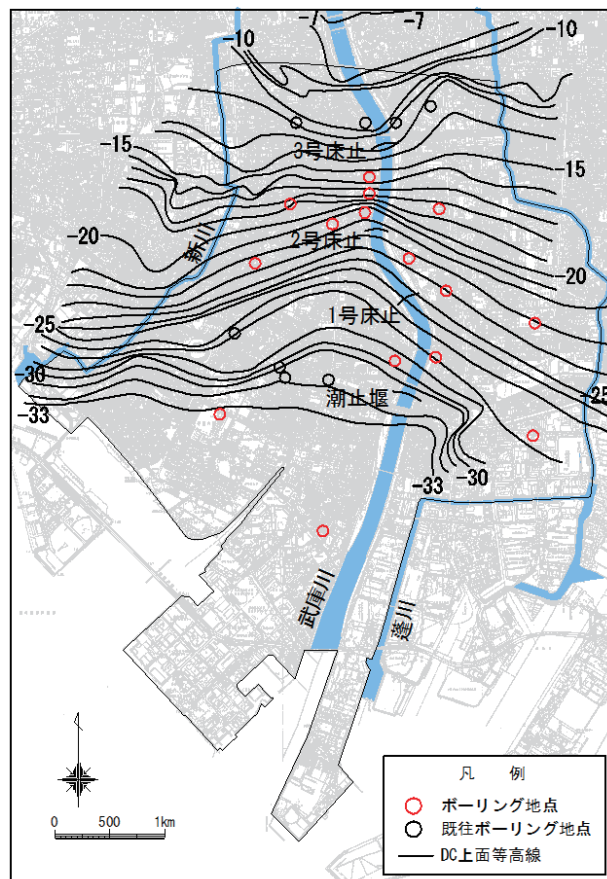
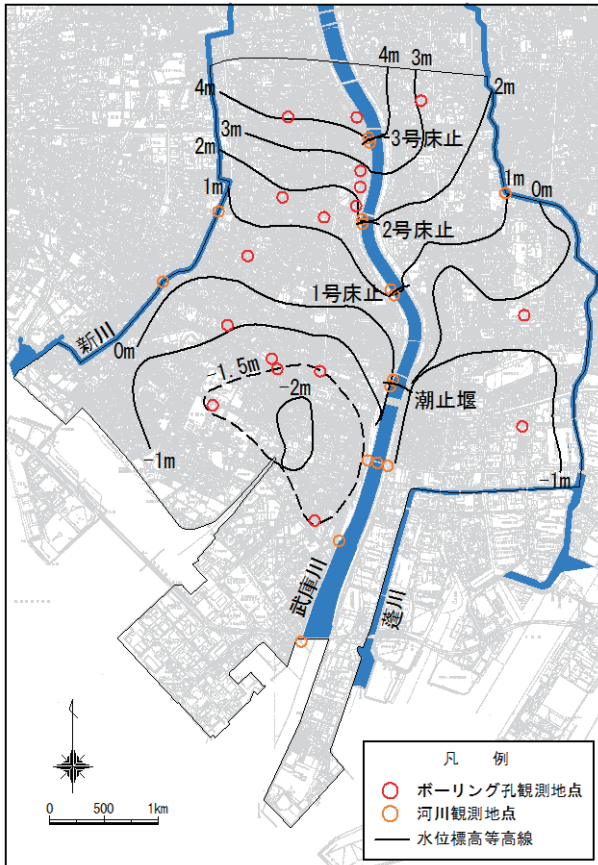
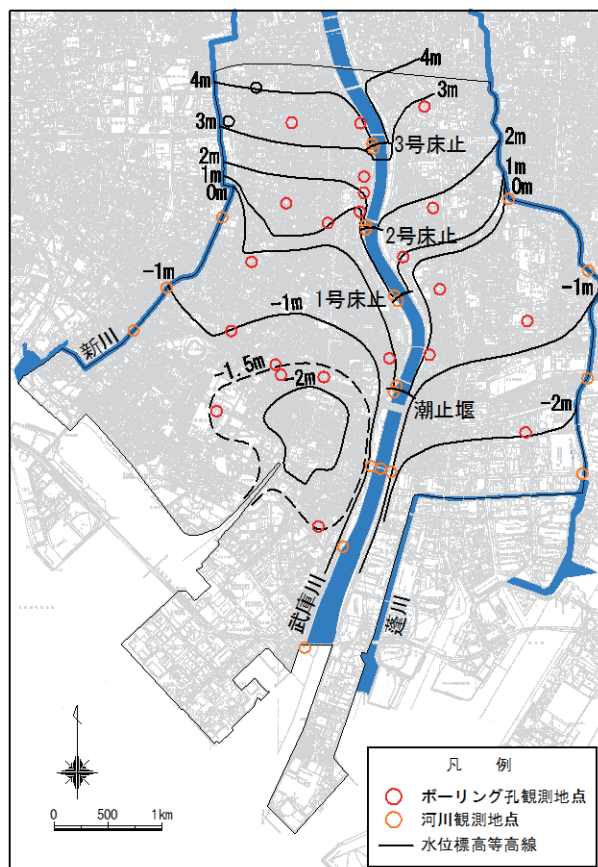


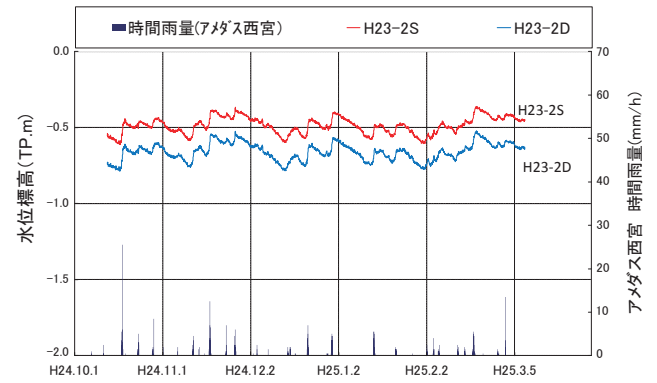
図-12 固結シルト層(Dc)上面等高線図



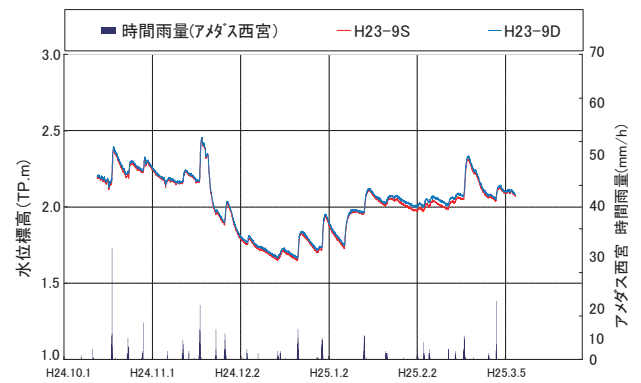
図－13 秋期豊水期の地下水位等高線図



図－14 冬期渇水期の地下水位等高線図



図－15 H23-2 孔の地下水位変化

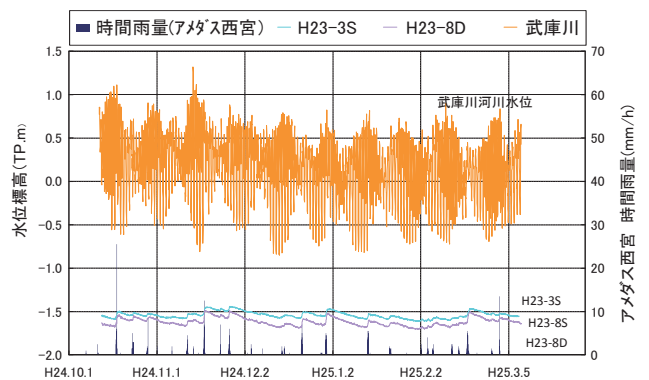


図－16 H23-9 孔の地下水位変化

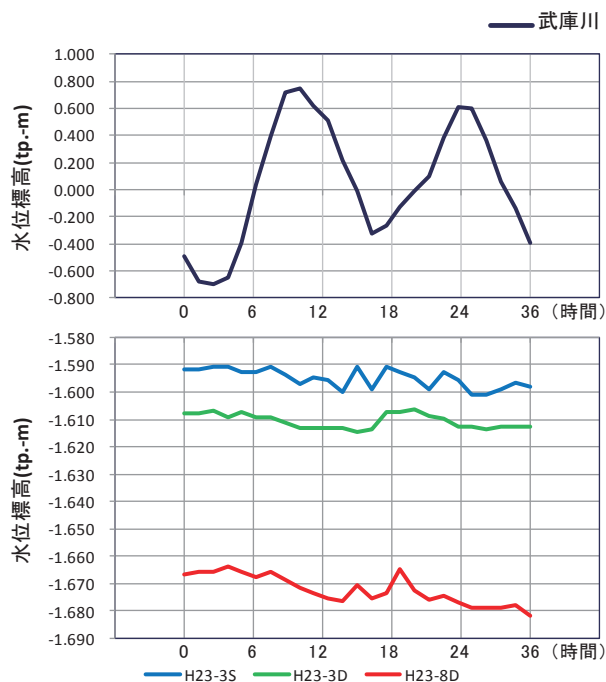
(10) 地下水位と潮位の関連性

武庫川河口部は、海水が河川に沿って遡上する感潮区間となっているため、その河川水位と水質は、潮位変動の影響を受けている。潮位と地下水位の変動を図－17～図－18に示す。なお、図－17中に潮位として表示したのは、武庫川の潮止堰の下流側で観測された河川水位データである。

両図により、毎日の潮位変化（図－17）や大潮小潮のような長周期変化（図－18）と地下水位の変動を比較すると、潮位と地下水位の相関はさほど高くはないことがわかる。むしろ、地下水位と降雨との相関が良好であり、降雨時に顕著に地下水位が上昇することがわかる。



図－17 潮位（短周期）と地下水位の変動



図－18 潮位（長周期）と地下水位の相関

ただし、無降雨時のデータで地下水位と潮位を比較すると、1日単位の潮位差が1m以上あるのに対して、地下水位の変動量は1cm程度と小さいが、潮位変動に符合する変化が地下水位の変動にも認められる。従って、潮位のピークとはずれるが、潮位の影響を僅かながら被って地下水位も変動している可能性は否定できない。

(11) 水温変化

河川水温は、気温に左右されやすく、地下水温は地温に左右される。地表付近の地温は、夏冬の季節的な気温変化等により変動するが、深度が深くなるにつれ地温変化は乏しくなり、深度5m以深ではほとんど変化がなくなる。また、地表付近の地温の変動は、熱伝導により徐々に地下深部に伝達するため、その変動のピークは深くなるほど気温のピークより遅れる。こうした特性を勘案し、観測孔の地下水温と河川水温の観測結果を考察する。

武庫川とその他の河川水並びに観測孔のH23-1からH23-10までの水温の変化を図－19示す。Asg層にスクリーンを設けた浅層観測孔（孔長約5m）の水温は、河川水温に追従し冬期になると低下（5℃以下）する。一方、Ams層にスクリーンを設けた深層観測孔（孔長約12m）の水温は、冬期においても大きく変動（1℃以下）しない。

深浅両帯水層は、水温変動傾向が異なり、交流に乏しいと考えられる。

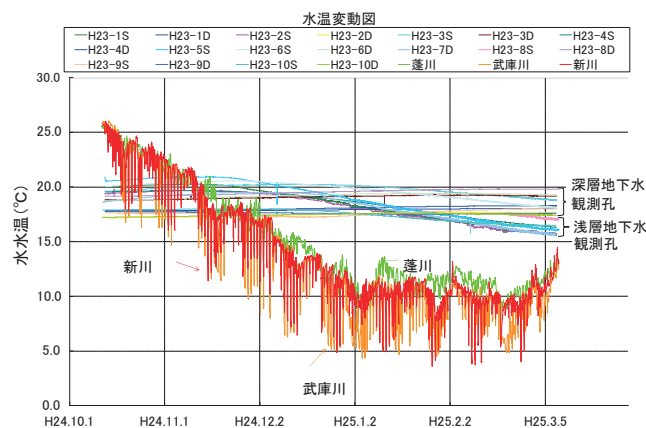
(12) 鉛直方向の電気伝導度分布

地下水への塩水進入の現状を把握するために、観測孔を利用して鉛直方向の電気伝導度分布を測定した。

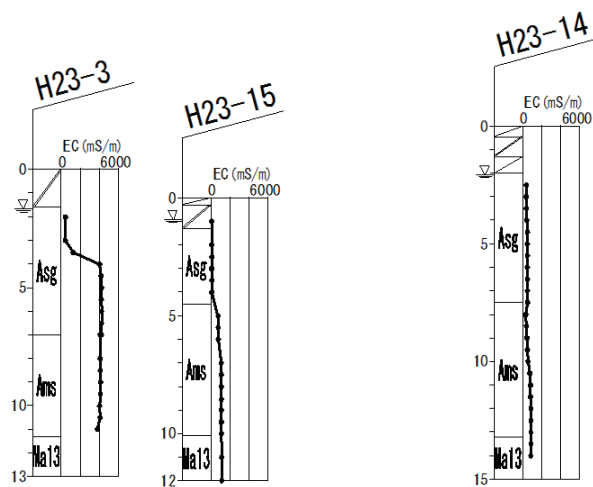
潮止堰下流付近に位置するH23-3では、砂礫層中に電気

伝導度の変化点が現れ、GL. -4m以深で4,000mS/mと極めて高い値を示した。潮止堰直上流で武庫川沿岸に位置するH23-14とH23-15では、砂層中に変化点が現れ、最大1,000mS/m程度の電気伝導度値が得られた（図－20）。

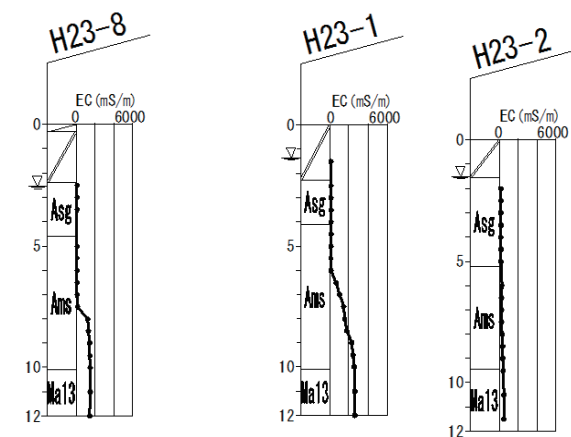
また、海岸に近い内陸部でも、電気伝導度の変化点が認められ、H23-1、H23-8孔は、下位の砂層で2000mS/m前後の電気伝導度が観測された。一方、左岸側の内陸に位置するH23-2では砂層でわずかに電気伝導度が上昇する程度で



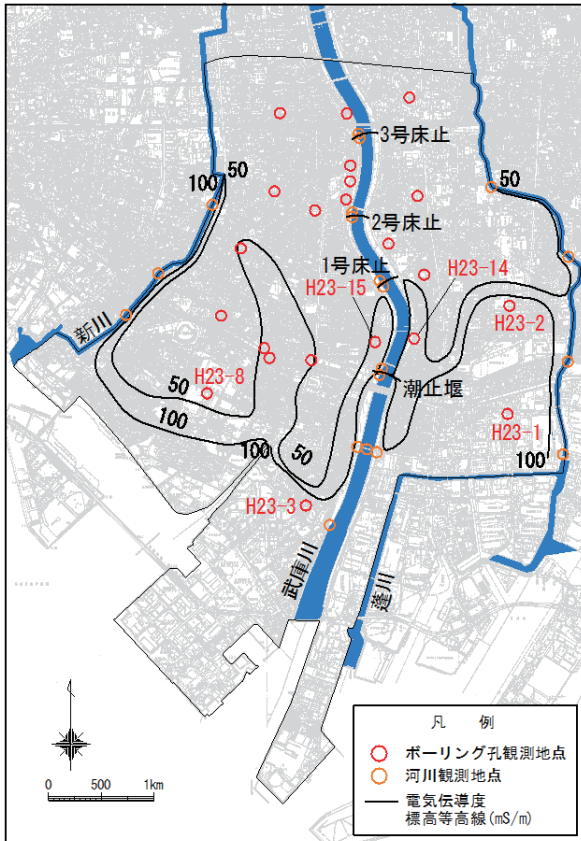
図－19 連続水温観測結果



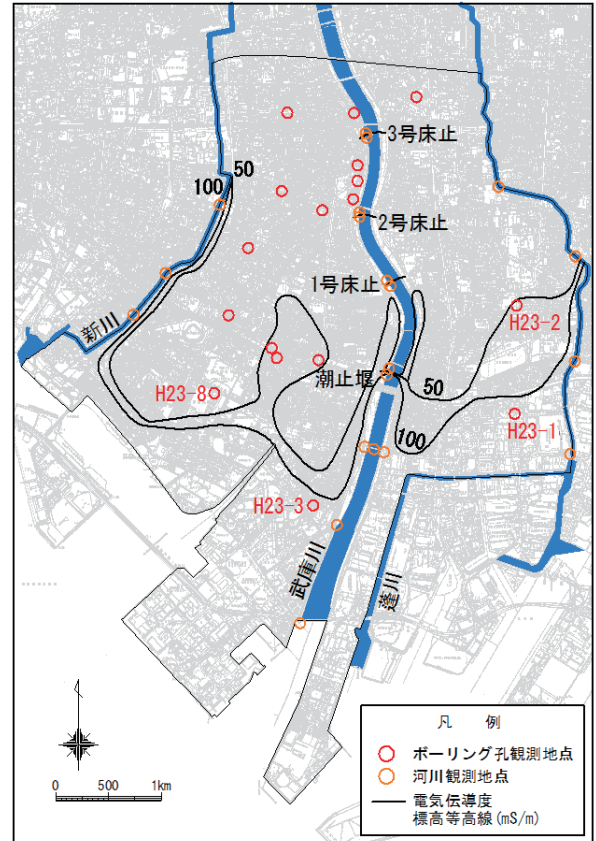
図－20 観測孔の電気伝導度観測結果（河川部）



図－21 観測孔の電気伝導度観測結果（内陸部）



図－ 22 渇水期（干潮時）の電気伝導度分布



図－ 23 豊水期（満潮時）の電気伝導度分布

ある（図－ 21）。

この調査結果からは、海岸部では既に塩水化が生じており、内陸に向かうにつれ徐々に淡水と混合し塩分濃度が薄まる傾向が認められる。塩水化は、海岸部に最も近い H23-3 孔では、砂礫層まで達しているが、その他の地点では砂層にとどまっていることが判明した。本地域の塩水化は、粘土層（Ma13）に規制されて進行し、まず、下位の砂層が塩水化した後、砂礫層に到達すると考えられる。

(13) 表層地下水の電気伝導度分布平面図

渇水期と豊水期の一斉観測時に得られた地下水面付近の電気伝導度を利用して電気伝導度の平面分布図を作成した（図－ 22、図－ 23）。

渇水期と豊水期を比較すると、表層部地下水の電気伝導度の高い範囲は、豊水期より渇水期に内陸部へ拡大する傾向にある。渇水期には、地下水位が豊水期より相対的に低下するため、淡水の海側への押し出しが弱まり、塩水が侵入し易くなるためと考えられる。

武庫川右岸に半島状に 50mS/m の等高線が位置するが、この等高線も、豊水期に比べ渇水期に、より内陸に向かって移動する。

武庫川左岸は、右岸に比べて 100mS/m の等高線がより内陸部まで後退している状況が認められ、渇水期にはさらに内陸部へ等高線が移動する。一方、右岸側では、100mS/m

の等高線の位置は、渇水期干潮時と豊水期満潮時ではほとんど変化が認められない。

6. 調査結果のまとめと今後の課題

(1) 水理地質構造と地下水動態との関係

本調査地域の深度 10m 付近までの地下水は、帯水層である砂礫層と砂層のそれぞれに流動している。特に、砂層の地下水は、粘土層の上面の不陸に規制されて流動し、塩水も、粘土層の上面に添って侵入すると考えられる。一方、砂礫層の地下水は、流下速度が早く、表流水とも活発に交流しながら流下していると考えられる。

武庫川は天井川であり、調査地域の地下水は常時、武庫川河川水の涵養を受けている。潮止堰や床止の存在で武庫川の河川水位が一年を通してほぼ一定であるのに対し、渇水期と豊水期の地下位等高線図を比較すると、渇水期の地下水位が低いことが分かる。これらの事実は、①武庫川からの地下水涵養は、豊水期に比較し渇水期においてより活発になること、②渇水期には、山側からの涵養が大きく減少し、武庫川からの涵養の割合が相対的に増加する（逆に言えば、豊水期には、武庫川起源の涵養量以上に、周辺山地からの地下水涵養が増加する）ことを強く示唆している。

(2) 地下水位の変動特性

帯水層である砂礫層と砂層の境界には、両層を遮る難透水層の分布は認められないが、両層の水位には、わずかではあるが差異が認められた。その上下関係をみると、総じて砂層の水位が下位にあるが、例えば浄水場のように、利水状況によっては逆転する箇所もあることが確認されている。

深度方向の水位差は、一般的には、より深部（洪積砂礫層以深）の水位（水頭）分布の影響を受けて生じたものと考えられる。ただし、砂礫層と較べて砂層は、透水性が相対的に低く、地下水の滞留時間も長いと考えられることから、前記した特徴的な水位（水頭）分布の発生には、層毎に異なる透水性が多少なりとも関与している可能性がある。

(3) 潮汐と地下水位の相関関係

潮位及び沿岸部観測孔の無降雨時の地下水位連続観測記録によれば、地下水位の微少な日変動は、日単位の潮位汐変動と調和的であり、その影響を受けている可能性が高い。一方で、大潮小潮のような長周期の潮位変動の影響は見られなかった。

この結果は、武庫川では海水の遡上を潮止堰で防止していることから、特に潮止堰より上流では、塩水遡上の影響をほとんど受けていないことを示唆していると考えられる。また、感潮区間の武庫川両河岸や海岸には矢板が施工されていることと、新川及び蓬川の河口には水門があり、塩水の浸入を防いでいることも一つの要因として考えられる。

(4) 今後の課題

調査範囲内における地下水の流動状況の概要は把握できたが、いくつか課題も残っている。一つは、地下水の涵養機構の解明であり、調査地域に賦存・流動する地下水の主な涵養源は、武庫川・新川・蓬川等の河川なのか、あるいは山側

の地下水を主たる起源とするのか、また、それらは、どの程度の割合になっているか、季節による変動はどの程度かなどについては、不明な点が多い。地下水涵養源（地下水涵養機構）の把握は、工事による影響範囲を正確に把握することや、対策とその効果の検討・検証に有意義であると考えられることから、例えば、主要溶存成分項目の水質分析、あるいは地下水中の水素・酸素の安定同位体比の測定なども追加実施し、その解明を行う必要があると考える。

また、武庫川河口域では、異常気象により頻発する豪雨災害に備えた河川改修事業として、河道掘削を主体とした工事が計画されているため、地下水環境に関しては特に、塩水化の進行や地下水位の低下が懸念される。このことを踏まえて今後は、内陸部で行う詳細な水文調査に加え、特に、武庫川近傍沿岸域の地下水の動態変化を把握するための、電気伝導度・温度・地下水位の連続観測や、定期的な電気伝導度検層、温度検層等を、工事前・中・後を通して実施することが重要となろう。

このように、沿岸域の地下水の特徴を踏まえた種々の水文調査の実施と観測の継続並びにデータの蓄積を行うとともに、それらの成果に基づいた水理地質詳細モデルの構築（あるいはアップデート）、さらには地下水流動モデルによる地下水低下・塩水化の予測、そして対策工の定量化等々を行う必要があると考えている。

参考文献

- 1) 兵庫県：武庫川水系河川整備計画、平成 23 年 8 月
- 2) 関西地盤情報ネットワーク：関西圏地盤情報 DB
- 3) 応用地質技術年報：阪神地域における地盤構成と神戸市街地地盤の特徴、兵庫県南部地震特集号、pp.47-62、1997
- 4) 旧版地形図：明治（7～23 年）
- 5) （二）武庫川水系武庫川総合的な治水対策検討業務（その 7）