河川技術論文集, 第 23 巻, 2017 年 6 月

千種川水系における河川改修に伴う周辺地下水・河川環境影響検討と対策

Influence and measures to river and grand water environment by river improvement,in CHIKUSAGAWA river.

眞間修一[1]・大石朗[2]・寺谷毅[3]・勝野真[3]・白壁和久[3]・杉陽生[3]
朝長哲也[2]・渡辺修[2]・鷲見浩司[2]

Shuichi MAMA ,Akira OISHI ,Tuyoshi TERATANI , Makoto KATSUNO ,Kazuhisa SIRAKABE,
Haruo SUGI ,Osamu WATANABE and Koji WASIMI

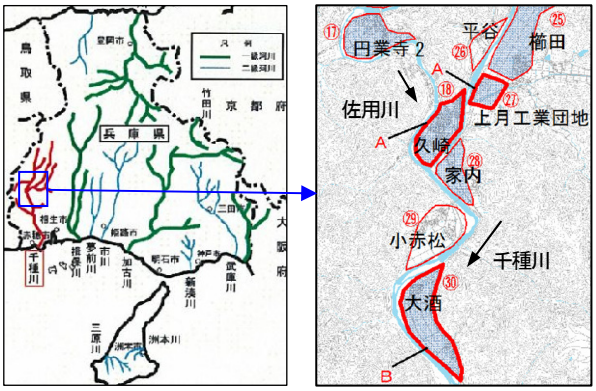
[1]正会員 八千代エンジニヤリング株式会社総合事業本部（〒111-8648 東京都台東区浅草橋 5-20-8ＣＳタワー）
[2]正会員 八千代エンジニヤリング株式会社大阪支店（〒540-0001 大阪市中央区城見 1-4-70）
[3]会員 兵庫県西播磨県民局光都土木事務所河川復興室(H.25 年在籍：〒679-5301 兵庫県佐用郡佐用町佐用 1096-1)

There was serious flood disaster caused by typhoon No.9 at Chigusagawa River in August 2009. Hyogo Prefecture decided that to start the river improvement project of Chikusagawa river.
However, because of river improvement, there occurs degradation of river bed and reduction of reservoir area. As a result, the Influence to river and grand water was expected.

Key Words *: river improvement, groundwater inventory , river-bed water , groundwater preservation, three-dimensional groundwater analysis ,groundwater environment fluid bed*

１．まえがき

兵庫県西部に位置する千種川は、流域面積 754km^2、法定河川延長 72km のほぼ南に流下する二級河川である。平成 21 年 8 月の台風 9 号豪雨では、1 時間雨量 81.5mm 、24 時間雨量 326.5mm といずれも過去最大を記録した。流量は上郡地点で 2,700m^3/s に達し、越水、破堤により甚大な被害が発生した。



［位置図］　［地下水対策検討地区の一部］

図-1　千種川の位置

再度災害防止のために、平成 21～27 年度に未改修区間延長 54.6km について、下流の既改修規模に合わせた緊急河道対策（引堤、河床掘削、堤防嵩上げ、橋梁・井堰の改築等による河積拡大）を実施する計画が立案された。

千種川沿川では地下水利用が多く、緊急河道対策に伴う地下水位低下による河川環境や地下水利用への影響が懸念された。このため、河川改修が与える影響を把握し、その影響を最小化するための対策を検討した。

２．地下水対策の検討方針

(1) 検討目的

地下水対策の目的は、改修後も千種川水系の特徴である河道と堤内地が一体となった地下水環境を極力保全することで、河川環境保全、沿川での地下水利用の継続性を確保することにある。このため、「地下水対策」の着目点を次の２点とした。

1:地下水環境対策：旧河道を媒介とした河川と堤内地間の地下水流動環境の保全対策

2:地下水取水対策：既設井戸掘り下げ、追加井戸新設などの地下水利用継続のための対策

また、平成 26 年 4 月 2 日公布の「水循環基本法」は、「水の利用に当たっては、水循環に及ぼす影響が回避され又は最小となり、健全な水循環が維持されるよう配慮されなければならないこと」を基本理念の一つとしている。本検討はこの主旨にも合致した、千種川沿川の水循環保全にも寄与すると期待できる。

(2) 地下水対策検討地区の選定

氾濫原に山間平野が形成され、河川改修による地下水影響が発生する可能性を有する 38 地区について(図-1 右)、次の 4 条件から、検討対象地区を選定した。

優先度Ａ～Ｃに 3 区分した結果は図-2 に示す。優先度Ａ、Ｂの 7 地区（佐用中央病院地区、佐用浄水場地区、真盛浄水場地区、久崎浄水場地区、上月工業団地、大酒浄水場地区、大枝・大枝新浄水場地区）について、具体的対策を検討した。本報告では、対策の検討例として優先度Ａ地区の一つである久崎地区を取りあげ説明する。

条件 1：旧河道による堤内地と河川が一体となった地下水流動環境の存在

条件 2：改修後の河床が現在の沖積層から洪積層、あるいは岩盤への変化

条件 3：堰統廃合による堰湛水区間の消失

条件 4：沿川の地下水源の大口利用

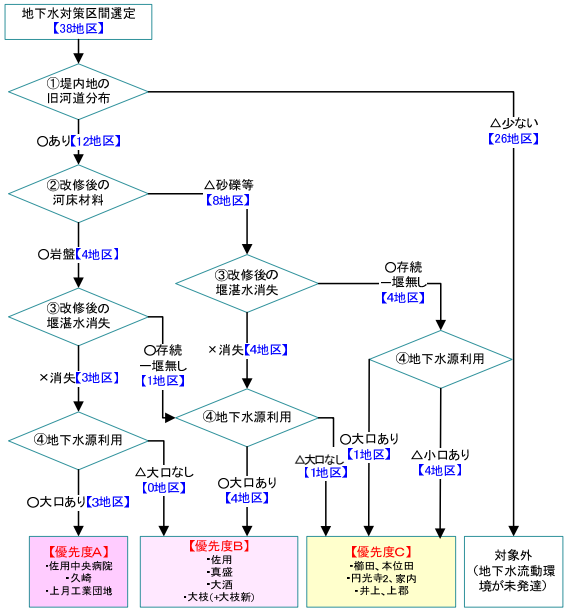


図-2　地下水対策の対象区間選定フロー

(3) 地下水解析方針

河川改修による河川環境および地下水流動への影響は、改修種別ごとのインパクトに対して、図-3 に示す水理的レスポンスを予想し、表流水減水区間発生や地下水取水可能量減少が生じると予想した。

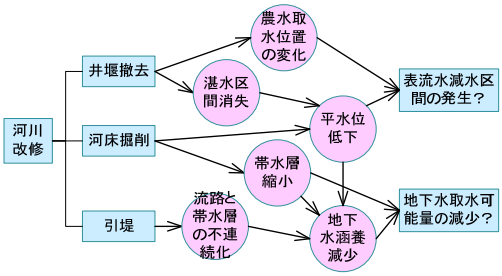


図-3　河川改修による河川環境・地下水流動環境への影響

これを踏まえ、改修に伴う千種川の事業区間沿川における地下水流動の変化を解析し、現況、改修後および地下水対策後における影響評価、対策効果を検討した。

(4) 影響評価・効果検証の指標

本検討では 3 つの指標で、河川改修による河川環境と地下水流動への影響及び対策効果を評価する方針とした。

a) 事業区間における河川環境（流量）への影響検証

河川環境への影響は、図-4 に示す様に『河道水収支縦断』を現況、改修後、対策後の 3 時点で比較し、対策後の水位、流量が現況から大きく変化しないことを基準に対策効果を判定した。

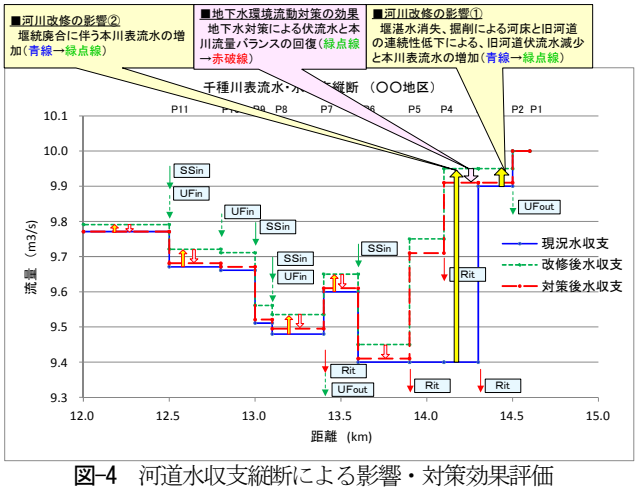
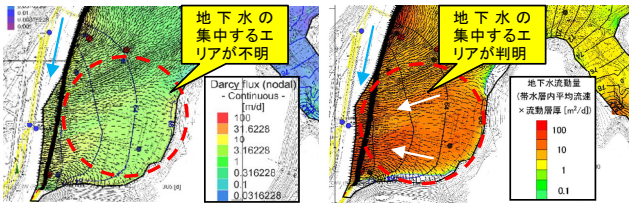


図-4　河道水収支縦断による影響・対策効果評価

b) 河川改修後の地下水流動環境への影響検証

河道改修前後の地下水流動環境変化および対策後の効果は、『地下水流動環境』の保全（図-5）の視点で定性的に検証した。地下水流動状況は、流速[m/day]ではなく流動量（帯水層内流速×層厚）[m^2/day]として示すことで、対策の保全、回復効果を視覚化し判定した。



［流速図］　　［流動量図］

図-5　地下水流動機構の視覚化の例

c) 地下水源対策効果の確認

地下水の継続的取水が可能であるかは、実績取水量、河川水位を条件に 3 次元地下水流動解析モデルで非定常解析を行い、対策により従前の利用実態に影響を与えないことを基準に判定した。

３．地下水対策の枠組み

(1) 地下水環境対策（地下水涵養）

地下水環境対策は、「堤内地と河川が一体となった地下水環境の保全」を目的とするもので、「地下水環境流動層の設置」と「水位環境の保全」で構成する。

a) 地下水環境流動層の設置

本報告では、河川と堤内地の旧河道を媒介とした地下水流動環境保全のために、堀込河道に設置する施設を「地下水環境流動層」と呼ぶ。この施設は、河道掘削で岩盤露出等により、砂礫層を通した流動環境が消失する場合

の対策となる。

本検討では次の3種を検討した。

・現地盤の透水性の高い材料へ置換

・通常護岸の透水性護岸への変更整備(図-6)

・整備済護岸への水抜孔削孔による透水性向上

また、透水性の高い材料を河岸部に設置することに対しての構造的安定性、出水時の水道水源への濁水流入に関しても、問題のないことを確認した。

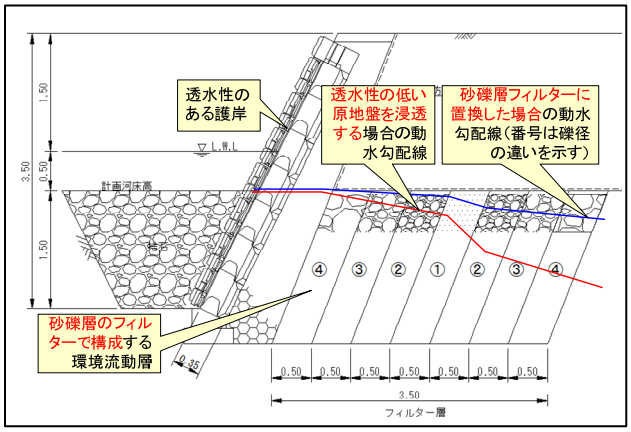


図-6　地下水環境流動層（岩盤を砂礫フィルターに置換）例

b）水位環境の保全

水位環境の保全は、固定堰統廃合による堰撤去、あるいは可動堰に変更される区間において、地下水位ポテンシャルを保持する対策である。本検討では、次の2種の対策を候補とした。堰の常時起立については、非かんがい期の堰運用との調整が必要となる。

・可動堰起立

・矢板打設

(2) 地下水取水対策（地下水利用）

地下水取水対策は、「従前の利用実態に基づいた所定の水量を揚水可能とする。」ことを目的とし、次の2種を候補とした。既設井戸の構造上の改善可能性、既設井戸との干渉を考慮した追加井戸の場所選定、などが必要となる。

・既設井戸の堀増し（掘り下げ）やポンプ運用見直し[1]

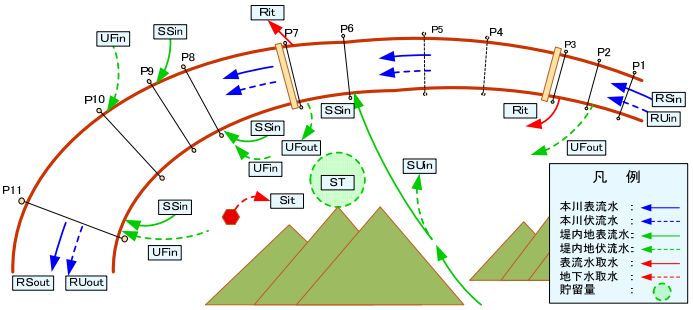
・追加井戸の新設

4．水収支及び地下水流動解析

(1) 解析モデルの概要

河川改修の影響や対策効果を示す指標値を解析するための解析モデルは、タンクモデル、1 次元河道水収支モデルと 3 次元地下水解析モデルを組み合わせることで、効率的に河川環境、地下水環境、地下水取水量の変化程度を把握可能とした。モデル構成概要を図-7 に示す。

モデルは、図-1 に示す対象区ごとに構築し、基本的にはタンクモデルで降雨～流出量、地下水解析モデルで貯留量や河道と堤内地間の地下水流動量を解析し、これらに表流水取水量、還元量等を考慮し、河道水収支モデルの数値を算定し河道水利縦断を求めた。



収支区間	本川水収支 (m^3/s)											
種類	河道・区間流入量		事業区間				事業区間外				河道・区間流出量	
			支川・水路流	河道内流入	取水量	河道外流出	支川・水路流	河道内流入	取水量	河道外流出		
水種別	表流水	伏流水	表流水	伏流水	表流水	伏流水	表流水	伏流水	表流水	伏流水	表流水	伏流水
記号	RSin	RUin	SSin	UFin	Rit	UFout	SSin	UFin	Rit	UFout	RSout	RUout
計算式	①=⑧$_{-1}$	②=⑨$_{-1}$	④$_A$	⑤$_A$	⑥$_A$	⑦$_A$	④$_B$	⑤$_B$	⑥$_B$	⑦$_B$	⑧=⑧$_{-1}$+①+Σ$_{A\sim B}$(④+⑤-⑥-⑦)	⑨
算出方法	実績統計値	同時流量観測推定値	タンクモデル比流量	地下水流動解析値	許可量	地下水流動解析値	タンクモデル比流量	タンクモデル比流量	許可量	－	収支計算値	同時流量観測推定値

図-7　解析モデルの内容

(2) 地下水解析モデルの概要

３次元地下水解析モデルは平面的に 5m程度の正三角形に近い形でメッシュ区分し、護岸整備、井戸整備等の対策工が反映できるよう部分的に細密化を図った。

地層区分は、基本を沖積層（帯水層）と基盤岩（難透水層）とし、沖積層はさらに河床堆積物、氾濫原堆積物、自然堤防堆積物等に区分した。地層別の透水係数は、透水試験結果を一次設定値とし解析を実施し、その後、各観測井の平均水位再現性を改善するように調整した。

涵養量は、H24. 11～H25. 3(非かんがい期、渇水期）の佐用平均雨量 2. 2mm/日から平均可能蒸発散量（ペンマン法とソーンスウェイト法で得られた量の平均）を差し引いた量から 1mm/日とした。

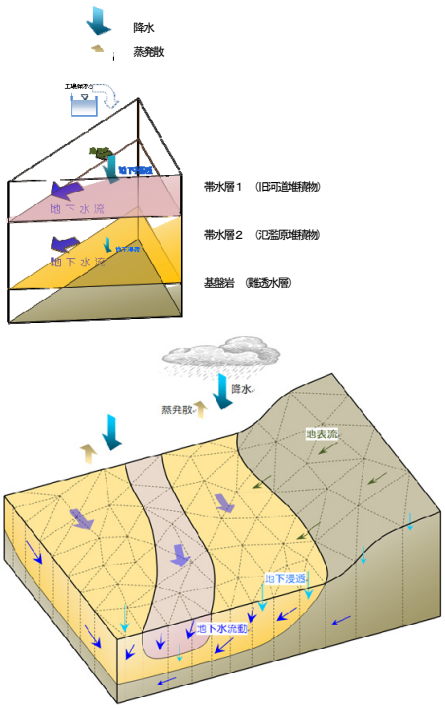


図-8　解析メッシュの概要

[1] ポンプ稼働時間および時間当たり取水量を平準化することによる、日取水可能量の増強を図る方法

(3) 地下水解析手法

浸透流解析は、地下水の流動をダルシーの法則および質量保存則から導かれる以下の支配方程式に基づいて表現する手法である。解析プログラムは、国内外での実績を有する有限要素法（FEM）による３次元浸透流解析のプログラム、FEFLOW（DHI-WASY 社）を使用した。

（非定常計算の場合）

$$\frac{\partial}{\partial x}\left\{k_x\frac{\partial h}{\partial x}\right\}+\frac{\partial}{\partial y}\left\{k_y\frac{\partial h}{\partial y}\right\}+\frac{\partial}{\partial z}\left\{k_z\frac{\partial h}{\partial z}\right\}-W(x,y,z)=S_s\frac{\partial h}{\partial t}$$

（定常計算の場合）

$$\frac{\partial}{\partial x}\left\{k_x\frac{\partial h}{\partial x}\right\}+\frac{\partial}{\partial y}\left\{k_y\frac{\partial h}{\partial y}\right\}+\frac{\partial}{\partial z}\left\{k_z\frac{\partial h}{\partial z}\right\}-W(x,y,z)=0$$

ここで、x，y，z ：空間座標系[L]（長さの単位），

t ：時間座標系［T］（時間の単位）

h ：地下水頭（地下水標高）［L］

k_x，k_y，k_z ：透水係数テンソル（空間座標方向毎に設定可能:異方性）［L/T］

W ：単位体積当たりの吸い込み・湧き出し量［L^3/T］（単位時間当たりの量の単位）

S_s ：貯留係数［1/L］

式-1　地下水浸透流解析で用いられる支配方程式

５．地下水対策の検討

(1) 久崎地区の地下水対策取水方法の検討

a) 地区の概要

久崎地区は、千種川と佐用川に挟まれた氾濫原堆積物と自然堤防堆積物で形成された土地である（図-10）。さらに千種川の旧河道がほぼ平行に位置し、千種川から現在の井戸位置まで地下水流動があることが推定できる。

河川改修により、2m 程度河床が低下する（図-9）ことにより、周辺地下水位も低下することが予想された。

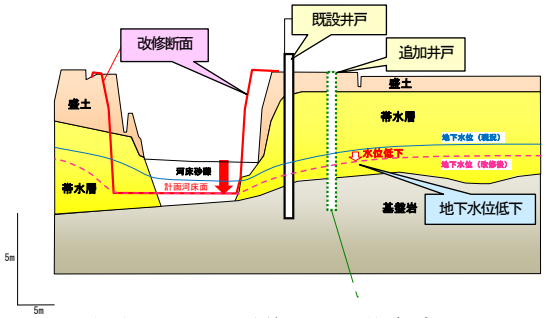


図-9　久崎地区の河川改修による影響概念図

b) 具体的対策の検討

対策無（河川改修は実施、地下水対策無の状態）では地下水位流動環境の変化とともに、水道取水が困難となることが分かった。そのため、地下水対策として表-1 に示す４案を比較検討した。なお、矢板は、旧河道から河川への地下水の流出を防ぎ、既設井周辺の地下水位低下を防ぐ配置に施工済みであった。目標とすべき取水量は認可量の 2,000m³／日である。

- 小赤松井堰左岸の透水護岸化（削孔）
- 千種川右岸の透水性護岸整備（200m）
- 小赤松井堰の起立運用（地下水位低下抑制）
- 追加取水井戸設置（小赤松井堰近傍上流側）

表-1　久崎地区における地下水対策

地区名		河川名	左右岸	対象地区の特性						地下水対策				
				改修後河床材料		改修後の堰湛水		地下水源利用		地下水環境流動対策		井戸対策		湛水対策
				ランク	解説	ランク	解説	ランク	解説	透水性護岸	地下水環境流動層		目標取水量(m3/日)	
⑱	久崎	佐用川	左岸	◎	夜久野塩基性岩類が露出	○	小赤松井堰	○	久崎浄水場	A1：小赤松井堰左岸を透水性護岸とし、地下水流動を促進	－	B1：小赤松井堰付近に井戸新設	2000（認可取水量）	C1：小赤松井堰を起立状態とし、地下水流動ポテンシャルを確保
		千種川	右岸			×	大酒井堰			A2：千種川右岸の旧河道付近を透水性護岸とし地下水流動を促進	－	－		－
表内記号の凡例				◎：岩 ○：洪積層 △：沖積層		×：湛水区間消失 ○：堰存続 －：当初から堰		○：大口利用 △：小口利用						

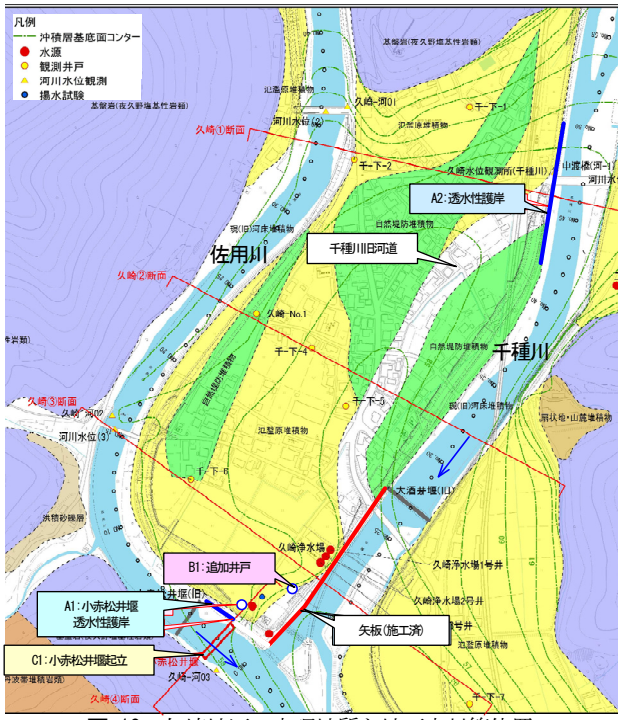


図-10　久崎地区の水理地質と地下水対策位置

(2) 対策の効果検証

久崎地区においては、水道認可量の 2,000m³／日に対して、改修後は対策無の場合に取水可能量は 460m³／日に低下した。前記の対策実施後は、2,320m³／日取水可能となることが確認できた。

a) 評価基準Ａ：河道水収支縦断

図-4 形式で整理したところ、現況（河川改修前）と比べ地下水対策後に流量は千種川では微増し、佐用川では微減した。また、流況変化に伴う位況変化は数 mm 以下であり河川環境面での変化は微小と判断した。

b) 評価基準Ｂ：地下水流動環境

現況で特徴的であるのは、千種川上流右岸からの旧河道を通じた地下水流動である。河川改修後（対策無）では、旧河道を通じた地下水流動がほぼ消失している様子が見える（図-11）。

改修後・対策有では、千種川上流右岸の透水性護岸整備、千種川と佐用川合流点付近の矢板整備等で、旧河道での地下水流動環境が回復している。ただし、佐用川の小赤松井堰を起立させている影響で、合流点付近堤内地の地下水位コンターは、やや現況と異なる状況となった。

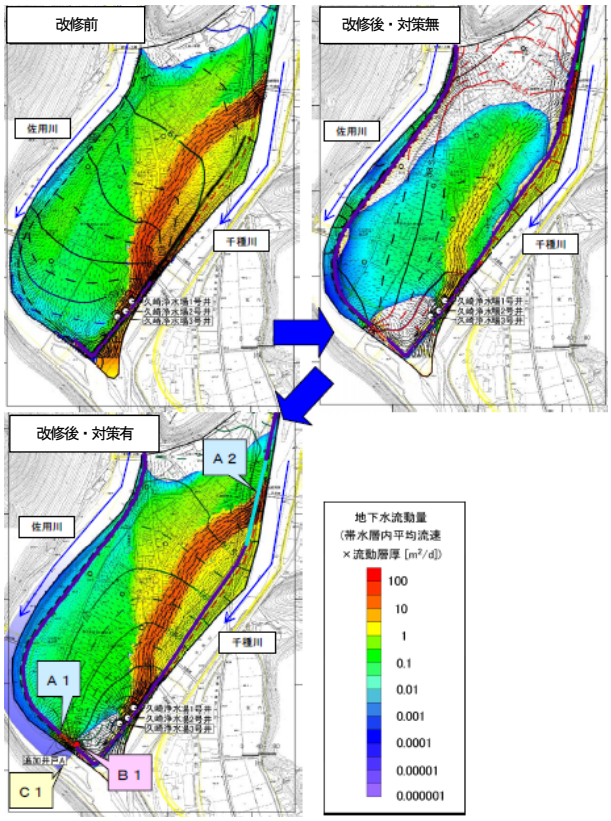


図-11　久崎地区の地下水流動の変化（記号は表-1 の対策）

c) 評価基準Ｃ：地下水利用の継続性

図-12（青線）の実測値に示す通り、久崎地区では既に河川改修の影響により地下水位が低下している状況であった。しかし、対策後計算値ではポンプ停止水位まで地下水位が低下せず、地下水利用環境が改善されている。

久崎地区では、現在は最大取水量が認可量に達していない(図-13 上段)。このため、将来的に取水が増加した場合も対応可能であることを検証するために、実績取水パターンを元に認可量の 2,000m³／日となるように引き伸ばした取水パターンで検証した(図-13 下段)。

結果は、図-12（赤点線）に示すとおり、3 号井では水位が一時的にポンプ停止水位に到達するが、ポンプ停止後速やかに回復することが確認でき取水上問題はない。

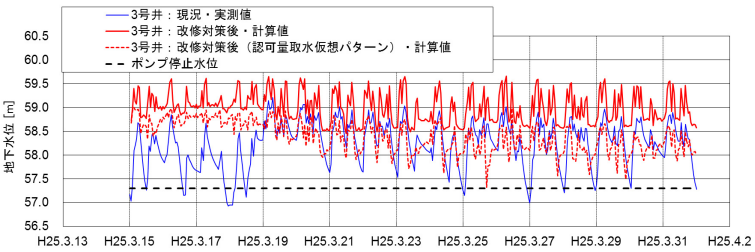


図-12　久崎地区の非定常解析・対策後（時間単位）

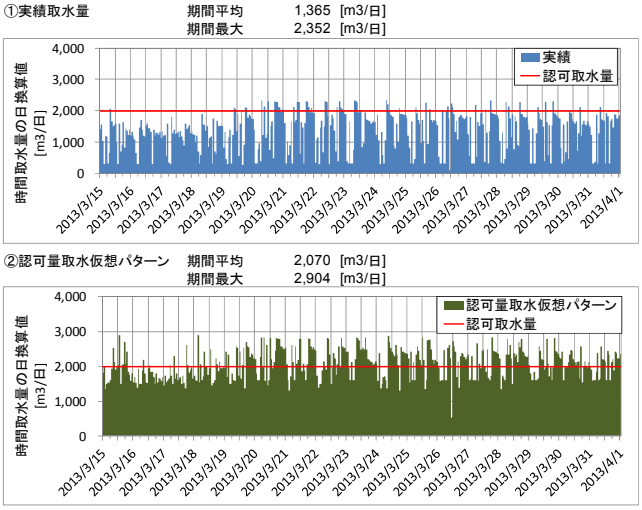


図-13　久崎地区の非定常解析時の取水量（時間単位）

6．モニタリングの考え方

地下水対策の妥当性検証、および地下水対策で当初予想した効果が得られない場合の原因把握、および対策検討を行う場合の参考とするモニタリングの考え方を整理した。

(1) 原因究明および対策検討のための条件整理

地下水対策実施後の各地区において、当初予想と異なり、従前の地下水利用の継続性などに問題が生じる場合も想定される。速やかな対応のためには、障害発生要因を事前に推定し、原因究明の手順を明確化しておくことが重要である。

地下水利用障害の発生要因を、本検討に用いた地下水解析流動モデルの条件設定を参考に抽出した。

条件１：境界条件（地下水位、河川水位、涵養量）
条件２：地下水取水条件
条件３：地盤条件（透水係数、貯留係数、地盤構造）
条件４：対策施設規模（材料、諸元、施工）

これらの条件に基づいた、地下水利用に障害の発生する要因分析結果を、図-14 に示す。

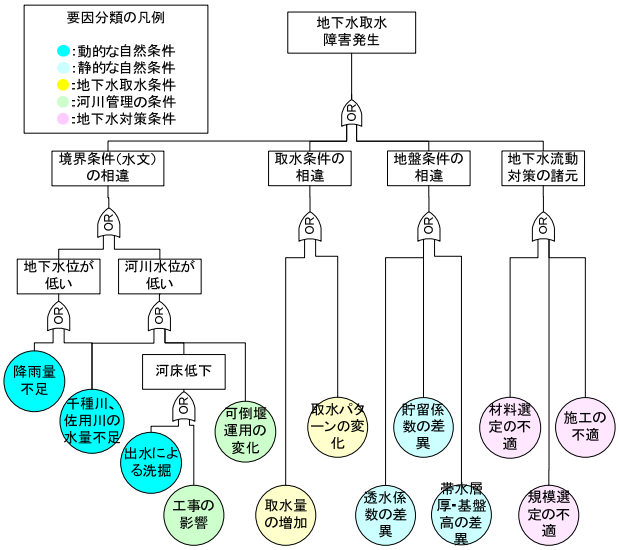


図-14 地下水利用における支障発生の要因分析

(2) モニタリングの参考とする感度分析

a) 感度分析の解析条件

本検討では、3 次元地下水解析モデルにより地下水流動を解析した。地下水流動量は、大きくは涵養量、帯水層厚及びその透水係数、貯留係数により変化する。

このため、構築したモデルの感度分析を事前に実施しておくことは、問題発生の原因を探る際の参考となる。

b) 透水係数感度分析例

前出の条件の中で、解析において最も不確実で影響が大きい要素は、「地盤の透水係数」である。参考として、透水係数感度分析例を以下に示す。

透水係数の変動幅は、地下水解析で用いた帯水層の透水係数から半オーダーの増減（透水係数を 2 倍に仮定した場合と 0.5 倍に仮定した場合）とした。

帯水層の透水性が低くなると、取水に対する水位の落ち込みが大きくなり、また、取水後の水位回復も遅延する。図-15 に示すように、透水係数の感度分析結果を取水量と地下水位の関係としてグラフ化しておけば、モニタリング時の取水量に対する地下水位低下が異常か否かの判断の参考となる。

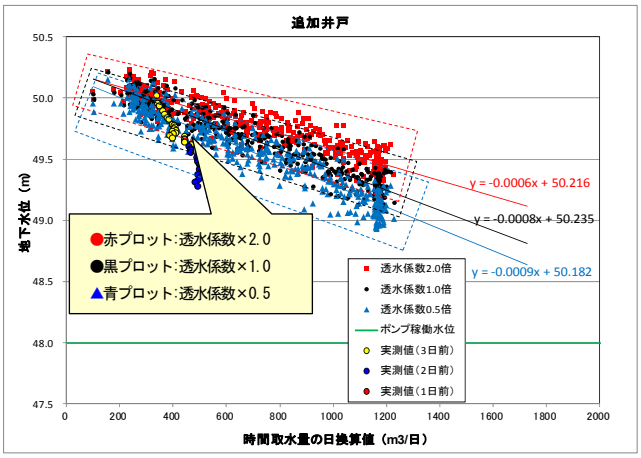


図-15 ポンプ取水量と地下水位の関係
（透水係数を増減した感度分析例）

7．考察

本検討では、洪水被害軽減のために実施する河川改修が、河川環境および地域の地下水環境に与える影響を把握し、保全あるいは影響を低減する方策を検討した。

この際、河道掘削等による平常時河川水位の低下という周辺地下水環境に対する大きな境界条件変化が生じる中で、いかに河川と地下水との水循環への影響を最小化するかに着目した。その状態を把握するために、3 次元地下水解析モデルと 1 次元河道水収支モデルを組み合わせ利用した。

さらに、河川改修の影響程度、地下水対策の効果を評価する指標として、河道水収支縦断による区間流量と断面水位の変化程度（定量評価）、河川と堤内地をつなぐ地下水流動機構の変化（定性評価）、沿川の地下水利用の継続性（定量評価）の 3 つの指標を提示した。これらの指標により、具体的な地下水対策の方策、位置、諸元を決定することができた。

この結果、河川管理者としての河川改修による治水安全度の確保とともに、環境面で果たすべき責任を明確化し、さらに地域への事業説明を客観的データに基づき行い、河川改修の必要性に関する議論を進めることが可能となった。

写真-1 透水性護岸（環境流動層）の施工状況

謝辞：本報告は，西垣誠岡山大学教授、道奥康治法政大学教授を委員とする「千種川水系における地下水対策検討委員会」における検討成果に基づきまとめたものです．貴重なご助言，ご指導をいただいたことにお礼申し上げます．

参考文献

1) 8 月 9 日の局地的豪雨による千種川水系被害状況等について平成 21 年 11 月　兵庫県
2) 日本地下水学会「地下水シミュレーション-これだけは知っておきたい基礎理論」技報堂出版 2010

(2017. 4. 3 受付)