

手取川河川整備課題と関連した 扇状地の河道流れと伏流の関係

RELATION BETWEEN INSTREAM FLOW AND UNDERGROUND WATER
IN FLUVIAL FAN
DISCUSSED IN RIVER MANAGEMENT OF THE TEDORI RIVER

辻本哲郎¹・二俣 秀²・郗 慶³・鷺見哲也⁴

Tetsuro TSUJIMOTO, Hiizu FUTAMATA, Xie Qing and Tetsuya SUMI

¹フェロー会員 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²正会員 国土交通省北陸地方整備局 金沢河川国道事務所調査一課長
(〒920-8648 金沢市西念4丁目23番5)

³学生会員 M.E. 名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程学生 土木工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

⁴正会員 博(工) 名古屋大学大学院講師 工学研究科社会基盤工学専攻(同上)

In the Tedori river, the master plan of river improvement are now discussed from the view point of flood control, water resources and river environment. When we focus on the downstream part under direct control by government, it flows on the fluvial fan. The segment in the fluvial reach has higher bed with low safety against flood, but higher water level in the river keeps the higher level of ground water that implies rich water resources and it supports the agricultural and industrial prosperity. In addition, dam controls flood discharge, and the withdrawal facility at the top of the fluvial fan segment has decreased instream flow discharge instead of rich water in irrigation canals. These influence the ecosystem in river zone through the change of surface and subsurface flow conditions. In this paper, we focus on the exchange of surface and subsurface flows, and it has been gradually changed due to human impact in the fluvial fan. We utilized the water stage data of wells distributed in the fluvial fan and along the river, and by analyzing the response of instream flow and fluvial fan ground water we discuss how to manage the fluvial fan river, particularly the Tedori river.

Key Words : River management, flood control, water resources, eco-system, aquatic habitat, fluvial fan, minimum flow, sub-surface flow, underground water

1. まえがき

扇状地河川では、河道内においても表面流と砂州や河床形態内に伏流する流れが複雑に交換している上に、河道内流れと河道周辺の扇状地の浅い地下水流れとの交換も活発であると期待される。利水・水域生息環境を確保する正常流量は河道内表面流として維持する必要がある、砂州と交換する伏流成分は河道内流れの水質維持に重要と考えられる。一方、扇状地では周辺地下水(伏流水)と連動していることが予想され、扇状地河川の治水安全度

向上のための低水路掘削は、扇状地伏流水利用に影響を及ぼしかねない。灌漑に取水されて河道内流量(Instream Flow)は極めて少ない中で、扇状地に広く分布する灌漑水路、農地が扇状地地下水を補給しており、それによって確保された扇上地地下水位は河道内流量の流失を抑制する。こうした視点から、基本方針が策定され現在流域委員会で整備計画が議論されている手取川を題材に、治水安全度確保と(基本方針策定では議論が不十分で調査検討を今後の課題とした)正常流量(の設定手法について)の議論、河道や河川周辺の生態環境の議論をも想定、河道流量と扇状地に散在する井戸の水位の

時系列データをもとに、河川流量・水位と扇状地地下水位相関関係を明らかにしようとするものである。

2. 手取川扇状地区間とその河川整備計画

手取川は、白山 (2702m) を源とし、尾添川、大日川その他の支川を合流して石川郡鶴来町に至り、扇状地を形成して石川郡美川町で日本海の注ぐ幹川流路延長72km、流域面積809km²の一級河川 (図-1) で、その平均河床勾配は1/27、下流直轄部 (鶴来～美川) でも平均勾配1/145の急流河川である。

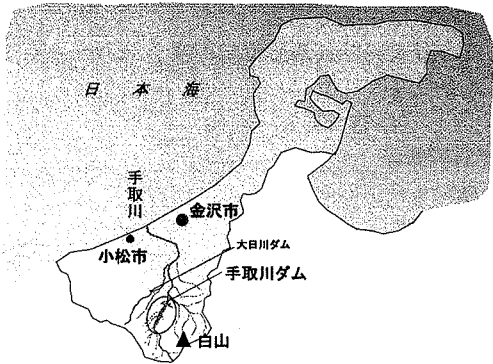


図-1 手取川流域図

昭和9年の大洪水をもとに直轄河川改修事業が着手され、基本高水流量6000m³/秒、主として1980年に完成した手取ダムで1000m³/秒をピークカットした計画高水流量5000m³/sを計画高水流量(工事実施基本計画)として改修が進められてきた。白山周辺は崩壊をおこしやすい地形で、昭和9年災害も土砂の流出が激しく、土石流及び土砂流出による河床上昇が災害の要因であったため、白山周辺での砂防事業も昭和始めから大規模に進められ砂防ダム群が建造された。また災害によって著しく上昇した河床は大規模建設機械を導入して掘削され、その後も天井川解消のため砂利採取が活発に行われ、骨材資源生産場として重宝された。

手取川河川整備の基本方針では治水については工事実施基本計画を踏襲している。整備計画の対象は先述したように下流扇状地区間の17kmである (図-2)。一般に急流河川では洪水時に流れが網流し、河岸侵食が活発でそれが基本的に単断面河道での堤防の決壊につながる恐れから、滞筋(主流)河道中心を固定し、高水敷を洪水時の割り代とする方針がとられている。また、一部なお河床が堤内地盤より高い天井川区間が残り、破堤時に洪水流だけでなく河床流送土砂まで氾濫流とともに堤内地を襲うことも危惧される。こうしたことから低水路掘削案が何度も浮上するが、河川の低水時水位と伏流利用の多い扇状地地下水位との連動から地下水位低下、水資源として

の地下水くみ上げへの影響が心配され、低水路掘削を抑制している。また低水路を掘削して高水敷は確保しさらに利用を図るとなると、河道内の陸域の比高が高くなり、陸化傾向、植生侵入・樹林化が活発化する(手取川では大出水の減少とともに樹林の成長・破壊のバランスが崩れ、樹林かが著しい¹⁾)ことも考えねばならない。

一方、基本方針では扇状地区間(直轄部)の正常流量を決め得なかった。扇状地の効率的な取水(主として農業用水)のため、取水は扇兆部に合口化され(白山合口堰堤)、下流の水利権がない一方、天井川化した河道の少ない流量はしばしば瀬切れ・伏没を起こす(水域の不連続)。今日水生生物生息環境に配慮した環境流量の設定という視点ではこうした伏没現象は避けねばならないが、この現象のためにいわゆる環境維持流量 (Minimum discharge) を設定できない。河道内流量の伏没、還元は河道に発達した交互砂州内部への伏流・還元のほか、河道・扇状地部の横断的交換があり、これらの素過程についての基礎的研究を別途進めている²⁾。



図-2 手取川扇状地区間空中写真

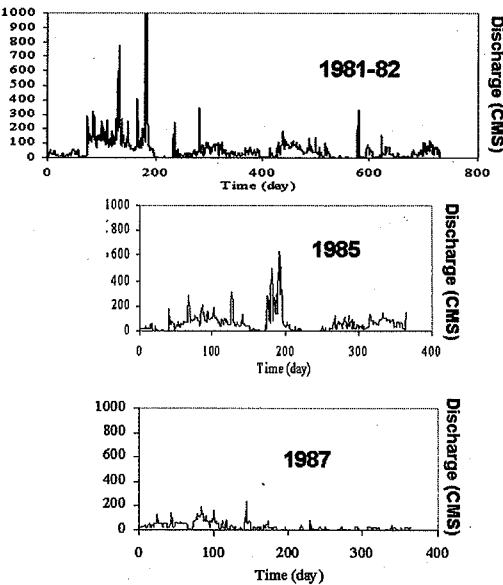


図-3 手取川鶴来地点(扇頂)流況

このように、扇状地河道の河川整備計画を議論するに当たって、扇状地地下水動態・河道内流量の相互作用が、治水(低水路掘削)、利水(伏流水利用)、環境(水域生息環境)に大きな影響を及ぼしており、これを把握し、機

構を理解してとくにインパクトレスポンス予測を可能にしておくことが必要である。

なお、鶴来地点(扇頂部)の流況例を図-3に示す。特徴は春季の比較的恒例の融雪出水、不規則であるが梅雨と台風期の降雨のパターンである。

3. 手取川扇状地観測井戸

手取川扇状地はその豊富な伏流水(不圧地下水)が魅力で、多くの先端産業が誘致され進出している。逆に手取川ダム工業用水は利用されないままとなっているし、扇状地末端での湧水が消滅するなど、何らかの規制を期待する向きもある。こうした地下水資源への関心の高さから扇状地には観測井戸が散在しているが、ここではその中で河川との相関が高いと思われる図-4に示す井戸のデータに着目する。とくに井戸No.51は河川に接しており(河口からの距離で約8km)、これを含んで、井戸No.48、No.49、No.2はほぼ河道に直角に並んでいる。図-5は、これらの井戸の平均水位を河道からの距離とともに示したものである。これよりこの断面では平均的には河川水が扇状地地下水へと補給されているのが読み取れる。手取扇状地堆積層は海拔で-5~-6m程度の不透水層の上にあり、それゆえこの断面での透水層厚さは約35~40mと推定される。

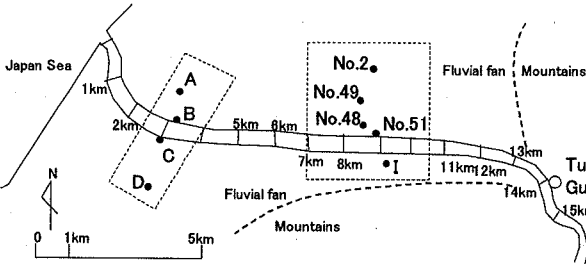


図-4 手取川扇状地区間周辺の観測井戸の位置

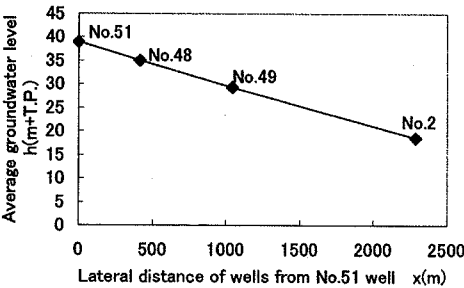


図-5 手取川約8km断面での河道～扇状地の平均地下水位

これらの井戸の水位変動は図-6(T.P.表示)に示すとおりで、扇状地地下水位は河川水位変動(流況)に応じて変動していることが読み取れる。かつてはこうしたデータから同じ時点での河川水位、扇状地地下水位をプロット

しその相関が小さいことをもって、低水路掘削案が肯定されようとしたこともあったが、次章の解析で明確になるように、遅れと減衰を伴う動的応答であると解釈するのが適当である。そしてその応答の減衰と遅れは河道や扇状地を形成している材料の透水係数と関係しているはずである。

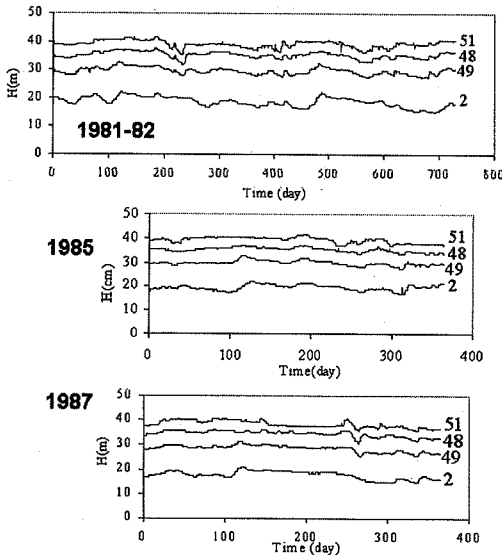


図-6 手取川8km断面での河川水位(井戸No. 51)および扇状地水位(井戸No. 2, 48, 49)の変動

4. 河道水位変動の扇状地地下水位への伝播

(1) 河川と扇状地下水位変動のモデル化

河道内での水位変動が扇状地地下水位に動的に影響するというシナリオを図-7のようにモデル化(水平一次元モデル)、定式化する。

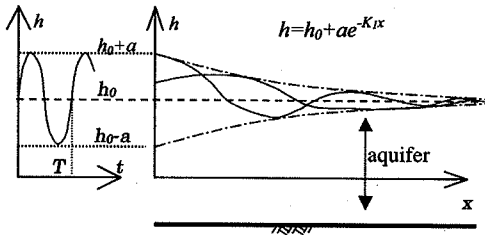


図-7 河川水位と扇状地水位変動の関係

Dupuit-Forchheimerの仮定³⁾から鉛直流速成分を無視し、平均水面も水平にした簡単な式で扱う。Darcy則と連続式から次の式が得られる。

$$\lambda \frac{\partial h}{\partial t} - k \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right) = 0$$

ここに u : Darcy流速, k : 透水係数, $\square$: 空隙率, h : 地下水位である。河道での水位変動が角振動数 $\square$ の正弦波で表さ

れ微小振幅を仮定すると、地下水位変動の支配方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} - \frac{kh_0}{\lambda} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0$$

ここで h_0 は河道から無限遠での地下水位(平均水位)である⁵⁾。その解は次のようになる。

$$h(x,t) = h_0 + ae^{-K_1x} \sin(\omega t - K_1x)$$

$$K_1 = \sqrt{\frac{\omega\lambda}{2kh_0}}$$

これより、河道から距離 x だけ離れた井戸での水位変動と河川水位変動の相互相関関数は以下のように表される。

$$\begin{aligned} R_{0,x}(\tau) &= E\{[h(0,t) - \overline{h(0)}][h(x,t) - \overline{h(x)}]\} \\ &= \frac{a}{2} e^{-K_1x} \sin(\omega\tau - K_1x) \end{aligned}$$

ここに $E[\]$ は期待値操作、上バーは時間平均を示す。を表す。また τ は遅れ時間である。なお、河川水位および河道から距離 x だけ離れた井戸の水位変動の標準偏差はそれぞれ次のように表される。

$$\sigma_{h_0} = \frac{a}{\sqrt{2}} \quad \sigma_{h_x} = \frac{ae^{-K_1x}}{\sqrt{2}}$$

これらを用いて規格化して相互相関係数で表示すると、

$$C_{0,x}(\tau) = \sin(\omega\tau - K_1x) = \sin\{\omega(t - T_{lag})\}$$

であり、河川水位変動と井戸の水位変動の遅れ時間が次のように表されることが導けた。

$$T_{lag} = \frac{K_1}{\omega} = \sqrt{\frac{\omega\lambda}{2kh_0}}$$

この遅れ時間と透水係数の関係を表す式として次が得られる。

$$\frac{k}{\lambda} = \frac{x^2}{2T_{lag}^2 \omega h_0}$$

変動水位の振幅に注目すると、その河川水位のそれとの比は以下のように表される。

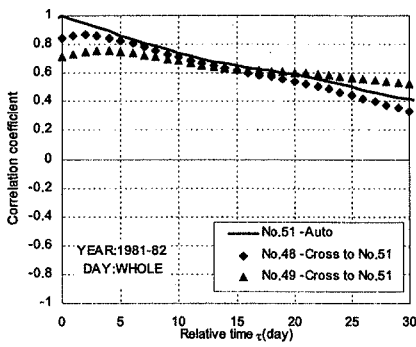
$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{h_x}}{\sigma_{h_0}} &= e^{-K_1x} \\ K_1x &= -\ln(\sigma_{h_0}/\sigma_{h_x}) = \ln(\sigma_{h_0}/\sigma_{h_x}) \end{aligned}$$

結局次式を得る。

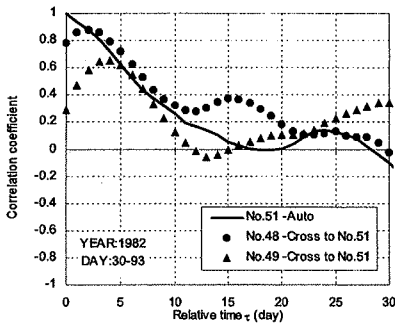
$$\frac{k}{\lambda} = \frac{x^2 \omega}{h_0 [\ln(\sigma_{h_0}/\sigma_{h_x})]^2}$$

(2) 観測データとの照合

観測井戸の水変動時系列をもとに相関解析を行った。



(a) 1981-1982年の2年間のデータ解析結果



(b) 1982年2-3月の2ヶ月間のデータ解析結果

図-8 観測井戸水位変動の自己および相互相関係数

その結果を図-8に示す。図-8(a)は2年間のデータをそのまま相関解析したものであるのに対し、(b)は2ヶ月間という限られた期間のデータに対して解析を行ったものである。いずれも、振幅の減衰と位相遅れが現れているが、短期間に限った解析のほうが減衰・位相ずれが見やすい。これは長期データでは、他の変動要素が想定した変動をぼけさせたといつてよい。

こうした解析の結果は附表-1にまとめた。遅れ距離などは相関係数のピーク近傍の挙動を2次曲線のカーブフィッティングで求めた。これらの結果から、透水層厚さを40mに仮定して、扇状地材料の透水係数を見積もると0.001m/秒から0.1m/秒のオーダーであり、砂礫材料として妥当な値である。なお図-9にさまざまなデータセットから得られた透水性を表すパラメータ k/λ の値を図示した。

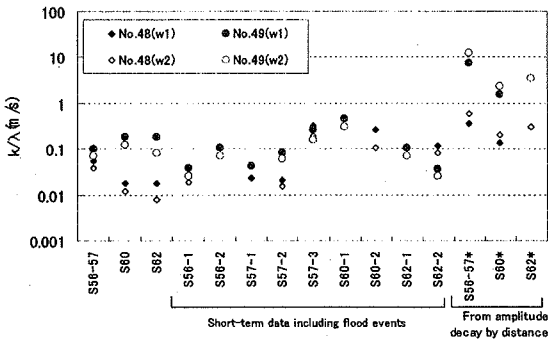


図-9 透水性を表すパラメータの推定結果

位からの偏差で示している。

5. 河道水位・扇状地下水位相関の長期的傾向

本章では、1973～2003の観測井戸データをもとに、河川水位・扇状地下水位の応答を意識した長期変動に付いて考察する。前章では手取川8km周辺のデータを扱ったが、ここではさらに下流の3km周辺での特性に付いても言及する。ちなみに、8km周辺では伏没が、3km周辺では還元が生じやすい状況である。図-10には、鶴来地点(扇頂)での流況と各井戸水位の時系列を示す。

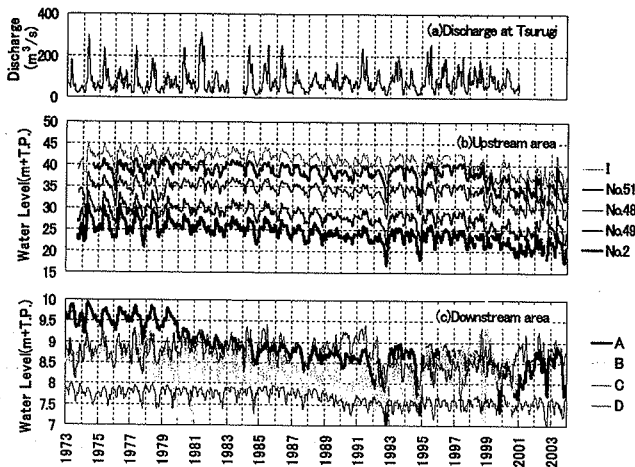
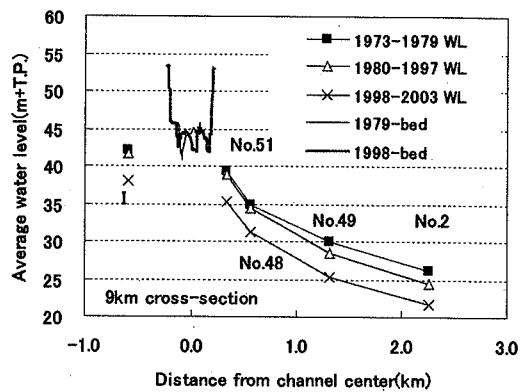


図-10 扇頂流況ならびに河道2断面とそれに直交する軸での扇状地下水位変動時系列

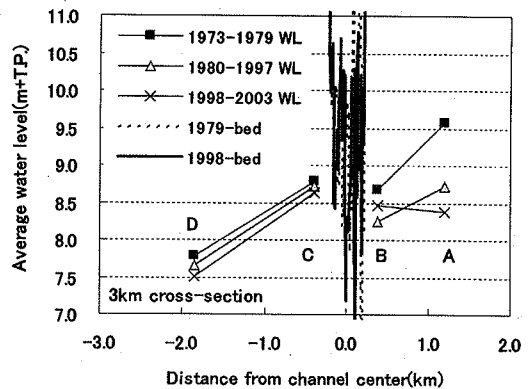
手取川では1980年に上流に手取川ダムが建設され、それ以降、河道流況は変化している。すなわち、ダム建設以前は流況変動は大きくそれに伴って地下水面の変動も大きかった。それがダム建設後はとくに湧水流量の底上げによってより定常的な挙動になっているものと考えられる。

図-11は、8km(扇状地区間上流部)と3km(扇状地区間下流部)別に河道(左右岸それぞれ堤防)からの水平(横断)距離(右岸方向に正)と観測井戸水位をプロットしたもので、先述したように8km地点では河道からはなれるにしたがって地下水位は低下している(河道から扇状地への伏流水の補給)のに対し、3km地点では右岸(扇状地は右岸方向に展開している)では扇状地から河道への還元傾向が見られる一方、左岸側(この地点から河道は右岸方向へと湾曲し始める)には漏水している傾向が見られる。なお、最近(1997年以降)3km左岸側で地下水低下が慢性的で河道からの漏失が気になるところである。

次に地下水利用実態を意識し、週間変動を見たのが図-12である。いくつかの地点で月曜から金曜にかけて地下水位低下、土曜から日曜に回復するパターンが明らかに見て取れ、とくに扇状地下流域での工場等による地下水利用の活発さが見てとれる。図-12の縦軸は平均水



(a) 8km断面(上流部)での平均地下水面横断の経年変化



(b) 3km断面(下流部)での平均地下水面横断の経年変化

図-11 手取川3kmおよび8kmでの河道水位・扇状地下水位横断

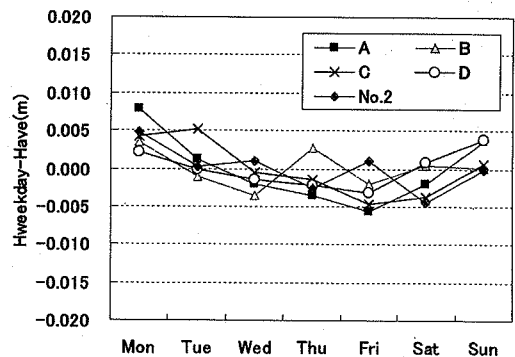


図-12 手取川3km周辺地下水井の週間変動

さらに図-13には年間変動(季節変動)を見た。河川流況はダムで調節されて入るものの、扇頂部ではなお融雪出水、梅雨末期の多雨といった北陸の気候の特徴はなお明確である。注意したいのは、この流況が、扇状区間の河道流況ではないことである。この地点直下流の白山合口堰堤で相当量の取水(最大60m³/秒)がおこなわれ(正常流量が決められていない)河道流量は極めて少ないことが多い。それでも、融雪期には扇状河道にもかなりの流量が確保され、地下水涵養も期待されるかもしれない。

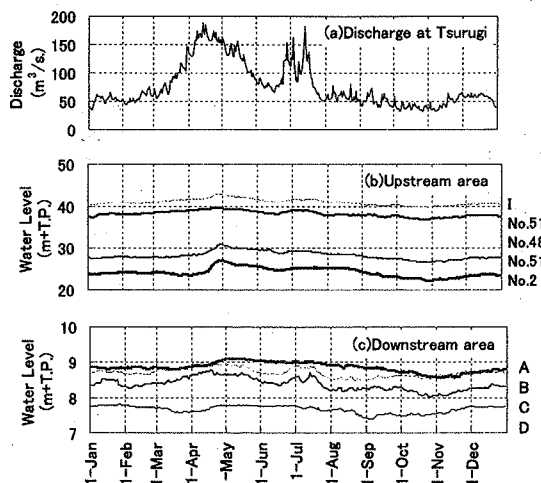


図-13 手取川扇頂部流況と扇状地地下水位の年間変動

6. あとがき

扇状地河川では、河道内においても表面流と砂州や河床形態内に伏流する流れが複雑に交換している上に、河道内流れと河道周辺の扇状地の浅い地下水流れとの交換も活発であると期待される。利水・水域生息環境を確保各地点の井戸水位の経年変化と河川流量、低水位(河川沿いの井戸水位)の経年変化から、扇状地河道周辺で河川水位に連動して変化する領域を見出した。またそのなかで、河道法線に直行する線上の井戸を抽出し、その日変動と河川水位の変動の相関を調べた。その結果、ある遅れ距離をもった強い相関が認められ、遅れ距離は堤防からの距離に比例していることがわかった。これらは扇状地構成材料の透水係数を想定した地下水挙動解析で再現されるが、逆算によって見積もられた河道、扇状地材料の透水係数は実際の材料から推定されるものとオー

ダー的に合致している。

こうした動的応答のメカニズムについての見当に続いて、手取川ダム建設以前からの長期観測データを利用して、河道管理と切り離せない扇状地地下水監視(管理)の視点でのデータ解析と検討を行った。手取川扇状地区間の上流では主として河道から扇状地への漏失が顕著で、かつ河道水位低下に伴って扇状地地下水位も低下傾向にある。一方、扇状下流域ではかつて右岸側扇状地からの河道への還元が認められていたが、近年扇状地地下水位低下に伴い、河道から供給される、すなわち漏失傾向に転じているようである。これが扇状地での地下水利用の活発化に因している可能性から、扇状地地下水位の週間変動を調べた結果ウィークデーでの低下、週末での復元といったパターンが確認された。また年間変動から灌漑期に灌漑水路への補給と河道流量の両方から扇状地地下水が涵養されている可能性が示唆された。こうした結果から、河道(流量)管理と一体化した扇状地地下水管理あるいは監視の必要性が指摘される。

参考文献

- 1) 辻本哲郎, 村上陽子, 安井辰弥: 出水による破壊機会の減少による河道内樹林化, 水工学論文集, 第45巻, pp.1105-1110, 2001.
- 2) 郝慶, 鷺見哲也, 辻本哲郎: 扇状地河川における表面流況に及ぼす伏流の影響と水域生息環境, 河川技術論文集, Vol.11, 2005.
- 3) Bear J.: "Dynamics of Fluids in Porous Media", Dover, 1972.
- 4) 椿東一郎: 水理学II, 森北出版, 1974.

(2005. 4. 7受付)

附表 相関解析結果一覧

		Average and Std. Dev of water level (m)						Time lag (day)		Wave period(day)		Permeability(m/s)	
		No.51 h ₅₁	No.48 h ₄₈	No.49 h ₄₉	No.51 σ ₅₁	No.48 σ ₄₈	No.49 σ ₄₉	No.48-51 T _{lag48}	No.49-51 T _{lag49}	1st T ₁	2nd T ₂	No.48-51 (k/λ) ₄₈	No.49-51 (k/λ) ₄₉
Whole year	1981-82	39.17	35.33	29.59	1.21	1.05	1.12	1.94	3.56	25.6	18.3	0.0894	0.1692
	1985	39.21	35.27	29.77	1.15	0.88	0.94	3.72	2.97	32.0	21.3	0.0183	0.1818
	1987	38.43	34.52	28.51	1.27	1.09	1.30	3.72	2.93	32.0	14.2	0.0183	0.1867
Short term analysis	1981-1	38.15	34.50	29.39	1.27	1.31	0.66	2.09	4.58	16.0	10.7	0.0290	0.0383
	1981-2	39.14	35.96	29.47	0.12	0.27	0.49	4.62	2.77	16.0	10.7	0.0059	0.1050
	1982-1	38.69	34.86	28.66	1.21	0.67	0.55	2.06	3.91	12.8		0.0238	0.0420
	1982-2	38.37	34.48	28.82	1.02	0.79	0.67	2.00	2.57	10.7	8.0	0.0211	0.0810
	1982-3	39.93	35.39	29.26	0.77	0.92	1.21	0.73	2.02	21.3	12.8	0.3193	0.2634
	1985-1	39.18	34.88	29.46	0.71	0.51	0.33	5.41	1.33	16.0	10.7		0.4517
	1985-2	37.82	34.37	29.03	0.57	0.53	0.74	0.98	0.32	32.0	12.8	0.2639	
	1987-1	37.93	33.86	27.43	1.03	1.22	1.28	0.18	1.95	8.0	5.3		0.1053
	1987-2	37.02	33.13	26.78	0.63	0.75	0.60	0.66	2.96	6.4	4.6	0.1161	0.0368
Decay method	1981-82*	39.17	35.33	29.59	1.21	1.05	1.12			42.7	25.6	0.3523	7.5609
	1985*	39.21	35.27	29.77	1.15	0.88	0.94			32.0	21.3	0.1392	1.5695
	1987*	39.21	35.27	29.77	1.15	0.88	0.94			32.0	14.2	0.1392	1.5695