

濃尾平野における扇状地河川からの 地下水涵養量とそれに及ぼすダム補給量の効果

GROUNDWATER RECHARGE FROM RIVER ON AN ALLUVIAL FAN IN THE
NOBI PLAIN AND EFFECT OF WATER SUPPLY FROM THE DAM RESERVOIR

神谷浩二¹・井上やおき²・桑山浩幸³・井上 裕⁴・小澤広幸⁵・木口喬介⁶

Kohji KAMIYA, Yaoki INOUE, Hiroyuki KUWAYAMA, Yutaka INOUE,
Hiroyuki OZAWA and Kyosuke KIGUCHI

¹正会員 工博 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-193 岐阜市柳戸1-1)

²正会員 工修 ㈱エイト日本技術開発 四国支社 (〒790-0054 愛媛県松山市空港通2-9-29)

³学生会員 岐阜大学大学院生 大学院自然科学技術研究科 (〒501-193 岐阜市柳戸1-1)

⁴工修 ㈱テイコク 地質部 (〒501-3133 岐阜市芥見南山2-4-26)

⁵(独)水資源機構 中部支社 (〒460-0001 愛知県名古屋市中区三の丸1-2-1)

⁶(独)水資源機構 木曽川水系連絡導水路建設所 (〒500-8367 岐阜市宇佐南4-18-10)

It is important for the sustainable use of groundwater resource to understand the mechanism of groundwater recharge during the extremely shortage water. In this paper, the groundwater recharge rate from Ibi river on an alluvial fan in the Nobi basin was evaluated based on the measurement of the river discharge changes on the fan. It was recognized that the groundwater recharge was in the range of about 10% to 50% of the river discharge. Furthermore, it was suggested that the groundwater recharge was be able to estimate by a multiple linear regression equation using the observation data of the river water level and the groundwater level.

Key Words : *Groundwater recharge, Alluvial river, River water level, Groundwater level*

1. まえがき

濃尾平野では、木曽三川の河口周辺域を中心として発生した広域地盤沈下に対処するため約50年前に揚水量の規制等を強化して以降、地下水位の回復と地盤沈下の沈静化が継続している。しかしながら、異常渇水時には、1994年に経験したように、降雨等による地下水涵養量の減少と揚水ニーズの増大に起因した地下水位の低下とそれに伴う地盤沈下の再進行が懸念される。本研究は、従来から制御される揚水量に対して降雨等による地下水涵養量との量的バランスを管理する重要性を認識して、濃尾平野の地下水涵養源の特性等を解明してその機能の保全方法を究明するものである。筆者ら^{1) 2)}は、主要な地下水涵養源とみられる扇状地河川に着目して、木曽三川の一つである長良川を対象に、地下水涵養量は河川流量の10%~20%程度であることなどを明らかにした。

本論文は、木曽三川の揖斐川を対象に、扇状地におけ

る揖斐川からの地下水涵養量の実態を調べ、更にその地下水涵養量を河川水位等の観測値によって監視する方法を検討したものである。また、揖斐川の上流に位置するダムからの補給(流水の正常な機能の維持のための補給量)による地下水涵養量への効果についても言及した。

扇状地河川からの地下水涵養量は、扇頂から扇端に至る河川区間における流量差およびその支川・接続水路の流入量・流出量を合わせた水収支に基づいて算出されている^{3)~6)}。佐々木⁴⁾は、21の河川を対象にして単位距離あたりの地下水涵養量(伏流量)が $10^{-1} \text{m}^3/\text{s}/\text{km}$ のオーダーにあることを示した。また、阪田ら⁶⁾は、渇水時には地下水涵養量が減少する傾向を指摘した。本論文では、対象地域の扇頂から扇端の河川区間について、揖斐川の流量および揖斐川に接続する水路等の流量を調査して、従来の方法と同様に揖斐川の水収支に基づき地下水涵養量を求めた。そして、観測される揖斐川の河川水位や揖斐川周辺の地下水位、揖斐川上流でのダム補給量による地下水涵養量への影響を統計的手法によって分析した。

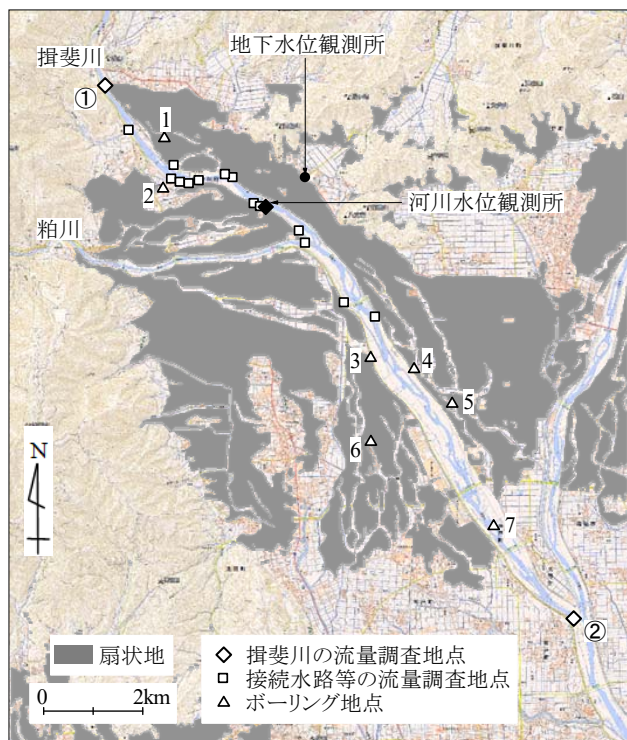


図-1 対象地域

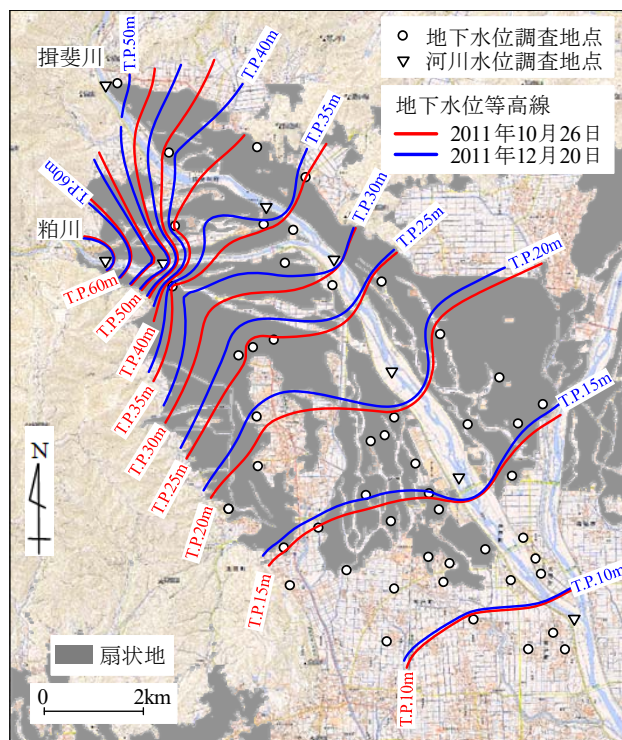


図-3 地下水位等高線

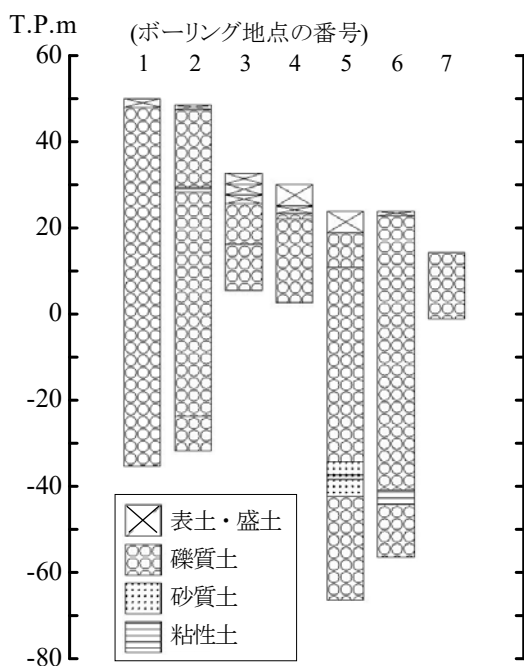


図-2 ボーリング柱状図

2. 対象地域

(1) 地形・地層

対象地域は、図-1に示すように、濃尾平野の北部に位置する揖斐川扇状地である。図-2は対象地域でのボーリング柱状図^{7) 8)}を示したものであり、ボーリング地点を図-1に併記した。扇状地(地点1, 2, 5, 6)では、殆どの

地層が厚い礫質土によって構成される。また、揖斐川の河川堤防(地点3, 4)では堤体下部の基礎地盤が礫質土で構成され、また、揖斐川の河床(地点7)の下層も礫質土で構成されていて、河川水が地下へ漏水しやすい条件にある。

(2) 地下水流動経路

図-3は、筆者らの既往研究⁷⁾において、揖斐川周辺の既設井戸(49地点の消防水利井戸や農業用水井戸等および図-1の地下水位観測所の計50地点)において調べた地下水位(T.P.m)の値を用いて、また、揖斐川(図-1の河川水位観測所を含む6地点)および揖斐川の支川の粕川(2地点)において調べた河川水位(T.P.m)の値を含めて描いた地下水位等高線を示したものである。図-3には地下水位と河川水位の調査地点を併記した。扇頂から扇端に至る範囲において、地下水位等高線には揖斐川を中心として湾曲する地下水嶺が現れ、揖斐川が地下水を涵養する傾向にあることが認められる。

3. 河川からの地下水涵養量

(1) 河川流量の調査

図-1に併記したとおり、揖斐川では扇頂の地点①と扇端付近の地点②において河川流量を調査し、粕川等の2つの支川と9つの排水樋管等の計11地点での流入量、農業用水のための取水樋管等の3地点での流出量をそれぞれ調査した。既往研究⁷⁾では、2010年～2011年の期間に計8回の流量の調査を実施した。揖斐川の渇水流量や低

水流量の流況における調査値を蓄積することを意図して、2018年に計5回の流量調査を次述するように実施した。

揖斐川の地点①について、図-4は、2010年～2011年の既往調査で電磁流速計法によって得られた河川流量 $Q_{①}$ (m^3/s)の値を地点①から約1.5km上流に位置するダムA(発電用)の放流量 Q_A (m^3/s)の観測値に対して示したものであり、2018年に調査(1回)したときの両者の値を併記した。なお、ダムから地点①の扇頂に至る区間では、揖斐川での流入・流出量は殆どないとみられた。図中に実線で示したように地点①の河川流量はダムAの放流量と相関がかなり高いため、本論では、地点①の河川流量 $Q_{①}$ の値は、ダム放流量 Q_A 値を用いて $Q = 1.25Q_A$ の関係によって求められたものとした。

揖斐川の地点②では、比較的簡便に河川流量が推定されるSTIV (Space-Time Image Velocimetry (時空間輝度勾配))法⁹⁾を用いた。STIV法は、定点位置における河川表面流のビデオ画像を取得して、その画像から表面流速の分布を解析して求めるものである⁹⁾。本論では、図-5に示すように、UAV(Unmanned Aerial Vehicle (無人航空機))によって高度50mにおいて河川横断方向における30秒間のビデオ画像を3つ取得した。そして、各ビデオ画像の河川横断方向の測線において、河川の流下方向に20m長さで複数本の検査線を設定して、各検査線での表面流速を求めた。次に、得られた各検査線での表面流速の値に更正係値を乗じることによって水深方向での平均流速に換算し、その平均流速に河川横断における検査線の各範囲での水域の断面積を乗じて河川流量を算出し、これら各流量の合計値によって測線での河川流量 $Q_{②}$ (m^3/s)を求めた。なお、河川横断方向の測線での水域断面積は、既存の河川横断測量データと調査時の河川水位に基づき求めた。ところで、表面流速から平均流速に換算するための更正係数の値には、浮子法等で一般的に用いられる0.85に対して¹⁰⁾、地点②で電磁流速計法によって求めた河川流量に対してSTIV法による流量が合致するときの0.60を用いた。なお、調査時の河川の水深は0.1m～1m程度での範囲であった。そして、3つのビデオ画像のそれぞれでSTIV法によって得られた河川流量の平均値を地点②の流量とした。5回の調査では、3つのビデオ画像による流量値の変動係数は2%～7%程度の範囲内にあった。

支川と排水樋管等の11地点のそれぞれにおいて電磁流速計法によって流量を調べ、揖斐川に流入する流量の合計値 Q_i (m^3/s)を求めた。一方、取水樋管等の3地点のそれぞれにおいて観測値を用いて流量を調べ、揖斐川から流出する流量の合計値 Q_o (m^3/s)を求めた。

なお、既往の2010年～2011年の期間と2018年のそれぞれの調査は1日の間に実施していて、また、調査時における揖斐川は観測河川水位の変化が殆どなく定常的な流れであった。なお、既往では地点①と地点②の河川流量は電磁流速計法によって求め、支川等の流量は2018年の場合と同様の方法であった。

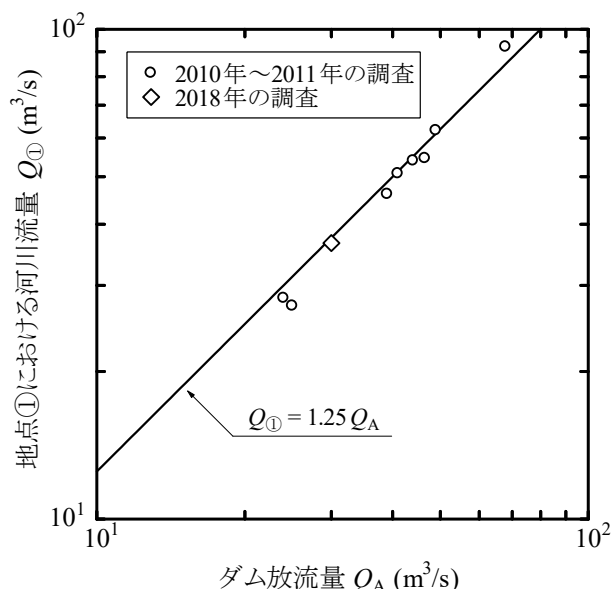


図-4 ダムAからの放流量と地点①における河川流量

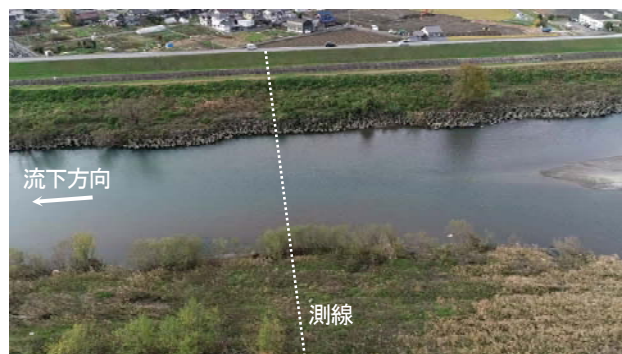


図-5 揖斐川の流量調査地点②(UAVによる撮影画像)

(2) 地下水涵養量の算定

表-1は、2010年～2011年、2018年での調査で得られた揖斐川の地点①と地点②のそれぞれの流量 $Q_{①}$ と $Q_{②}$ 、揖斐川への支川等からの流入量 Q_i 、取水樋管等への流出量 Q_o をそれぞれ示したものである。そして、河川からの蒸発量は微小であると仮定して無視して、次式(1)によって地下水涵養量 Q^* (m^3/s)を算定した。

$$Q^* = Q_{①} - Q_{②} + Q_i - Q_o \quad (1)$$

表-1には算定した地下水涵養量 Q^* の併記した。

調査では、地下水涵養量はおよそ4～20 m^3/s の範囲にある。扇頂から扇端に至る範囲の河川区間の距離を13kmとしてその値を除したとき、単位距離あたりの地下水涵養量は0.3～1.5 $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}$ の範囲である。

(3) 河川流況と地下水涵養量

図-6は、扇頂付近の地点①の河川流量 $Q_{①}$ の値に対して地下水涵養量 Q^* の値を示したものであり、河川流況の渇水流量、低水流量、平水流量、豊水流量のそれぞれでの範囲に区別して示した。地下水涵養量は、渇水流量か

表-1 揖斐川および接続水路等の流量，算定された地下水涵養量

単位：m³/s		2010年		2011年						2018年				
		11月25日	12月21日	9月14日	10月26日	11月10日	11月24日	12月5日	12月20日	10月18日	11月15日	11月21日	11月29日	12月10日
河川流量	地点① $Q_①$	28.25	62.14	54.51	46.07	27.23	92.09	50.72	53.90	41.26	31.89	26.89	29.39	37.53
	流入量 Q_i	2.90	5.41	9.22	8.22	5.61	9.62	5.42	6.14	6.40	4.15	3.58	3.66	4.59
	流出量 Q_o	3.24	3.62	13.17	4.21	4.20	4.52	1.89	0.28	5.03	5.12	5.52	5.07	5.13
	地点② $Q_②$	16.47	44.28	46.60	43.45	19.30	81.25	40.44	53.29	37.42	15.83	13.98	11.89	22.27
地下水涵養量 Q^*		11.44	19.65	3.96	6.63	9.34	15.94	13.81	6.47	5.21	15.09	10.97	16.09	14.72

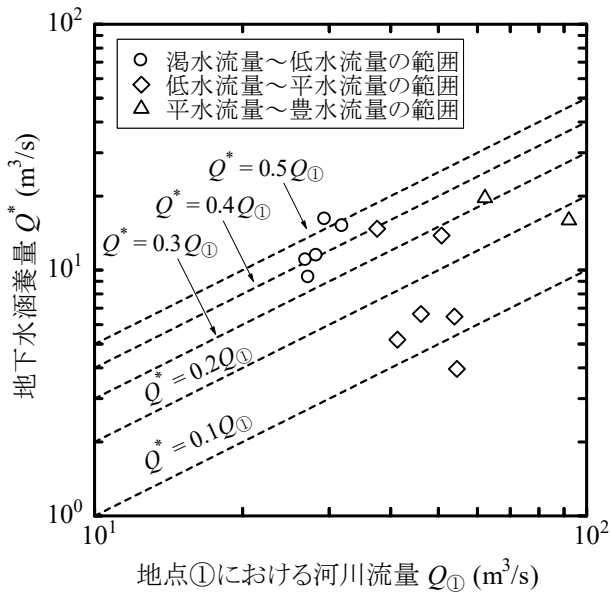


図-6 地点①(扇頂)における河川流量と地下水涵養量

ら低水流量の範囲では9～16m³/s，低水から平水で4～15m³/s，平水から豊水で16～20m³/s程度の範囲にそれぞれある。また，扇頂での河川流量に対する地下水涵養量は，渴水流量から低水流量の範囲で30%～50%，低水から平水で10%～40%，平水から豊水で20%～30%の大きさである。

次に，図-7は，図-1に示した河川水位観測所における調査日での河川水位 H (T.P.m)の日平均値と地下水位観測所における調査日での地下水位 h (T.P.m)の日平均値の差である $(H - h)$ の値に対して地下水涵養量の値を示したものである。図中に破線で示した近似線のように，河川からの地下水涵養時の動水勾配に關係する $(H - h)$ 値が大きくなるに伴い地下水涵養量が増加する傾向にある。図-6では，低水から平水流量の範囲のときに地下水涵養量が少なくなる場合があったが，これは $(H - h)$ 値が小さい場合に対応する。即ち，河川からの地下水涵養量には川幅，河床の透水性，河川水位などの河道状況が影響することが考えられる¹¹⁾，特に河川水位と地下水位が大きく影響することが予想され，本論では，次のように統計的手法によって，観測される河川水位と地下水位の2要因の地下水涵養量への影響関係を分析した。

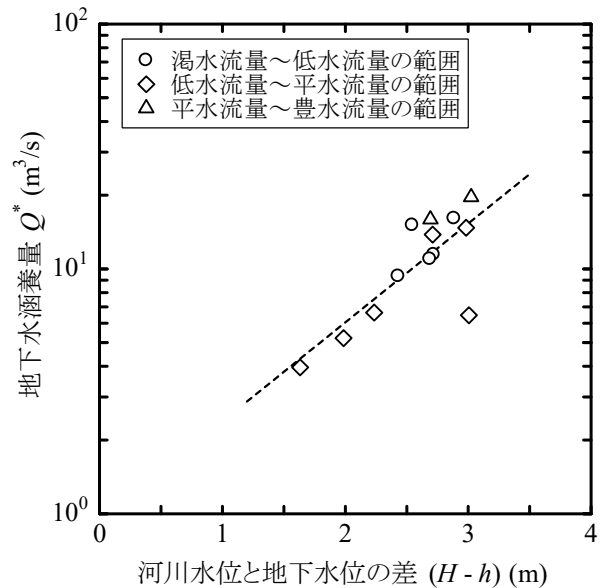


図-7 河川水位・地下水位の差と地下水涵養量

4. 地下水涵養量への河川水位・地下水位の影響

(1) 重回帰式による地下水涵養量の表現

地下水涵養量 Q^* は，河川水位 H と地下水位 h の2つの説明変数を用いて，次の線形重回帰式(2)によって表されるとする。

$$Q^* = aH + bh + c \quad (2)$$

ここで， a (m²/s)は河川影響係数， b (m²/s)は地下水位影響係数， c (m³/s)は定数である。図-1に示した河川水位観測所と地下水位観測所における調査日での日平均値を用いて，式(1)に従って最小二乗法により回帰分析を行い，各影響係数 a と b ，定数 c の値を求めた。なお，河川水位と地下水位の間での相関係数は0.33であり，両者の相関性は高くない。

表-2は，回帰分析で得られた a ， b ， c の値を示したものであり， t 値を併記した。河川水位と地下水位の影響係数の t 値は比較的大きく，両者の信頼性は高い。また，回帰分析で得られた決定係数は0.52であった。図-8は，表-2の a ， b ， c の値を用いて式(2)によって推定された Q^*

表-2 重回帰式(2)の回帰係数とt値

	河川水位 a (m ² /s)	地下水位 b (m ² /s)	定数 c (m ³ /s)
回帰係数	9.40	-8.43	-46.38
t値	1.45	-3.29	-0.21

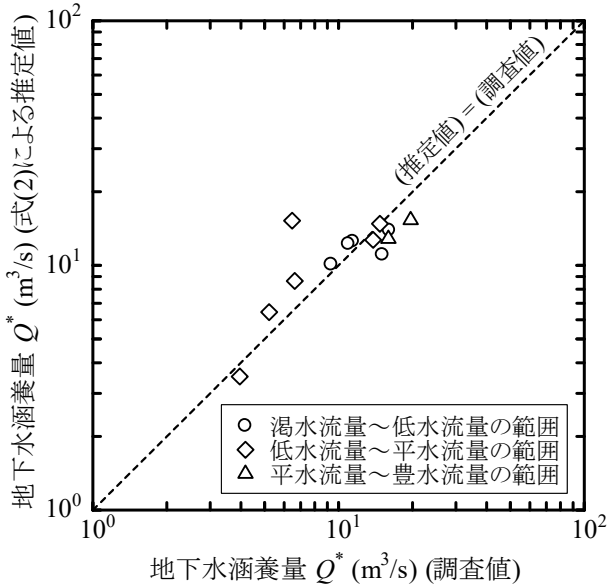


図-8 重回帰式(2)による地下水涵養量の再現性

値を調査による Q^* 値に比較して示したものである。式(2)によって良好な関係で調査値を再現できていることが認められる。また、常時観測される河川水位と地下水位の値を用いて地下水涵養量を監視できる可能性が示唆される。

(2) 河川水位と地下水位による影響

上述の式(2)と表-2によれば、河川水位が上昇もしくは地下水位が低下するほど地下水涵養量が増加する関係にある。換言すると、図-7で整理したように河川水位と地下水位の差($H-h$)の差が大きくなるほど地下水涵養量が増加する関係である。なお、式(2)を用いて平均的な地下水涵養量を試算すると、例えば2009年～2018年の10年間の平均河川水位 $H = \text{T.P.}37.20\text{m}$ 、平均地下水位 $h = \text{T.P.}34.61\text{m}$ であるので $Q^* = 11.54\text{m}^3/\text{s}$ である。また、単位距離あたりの地下水涵養量は $0.89\text{m}^3/\text{s}/\text{km}$ であり、これは佐々木⁴⁾が示した $10^{-1}\text{m}^3/\text{s}/\text{km}$ のオーダーに一致する。

次に、式(2)で用いた目的変数の地下水涵養量 Q^* と説明変数の河川水位 H 、地下水位 h の値をそれぞれ次式(3)によって標準化したときの z 、 u 、 v の値を求め、更に、式(2)の場合と同様に標準化したときの重回帰式(4)に基づき回帰係数 a^* 、 b^* 、 c^* を求めた。

$$z = \frac{Q^* - \bar{Q}^*}{s_{Q^*}}, \quad u = \frac{H - \bar{H}}{s_H}, \quad v = \frac{h - \bar{h}}{s_h} \quad (3)$$

表-3 重回帰式(4)の回帰係数とt値

	河川水位 a^*	地下水位 b^*	定数 c^*
回帰係数	0.34	-0.76	0
t値	1.45	-3.29	—

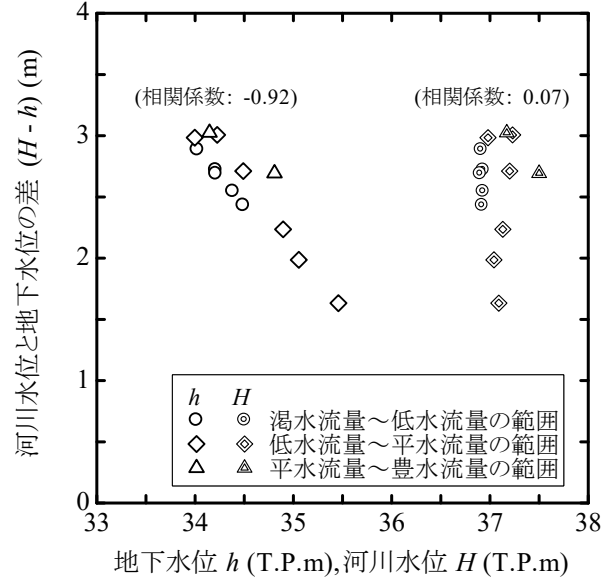


図-9 河川水位・地下水位と両者の水位差

ここで、式(3)の $\bar{Q}^*$ (m³/s)、 $\bar{H}$ (m)、 $\bar{h}$ (m)はそれぞれ式(2)の回帰分析に用いた地下水涵養量、河川水位、地下水位の値の平均、 s_{Q^*} 、 s_H 、 s_h は標準偏差である。表-3は、回帰分析によって得られた係数 a^* 、 b^* 、 c^* の値を示したものであり、t値を併記した。河川水位に関する係数 a^* と地下水位に関する係数 b^* を比較すると、 $|b^*|$ の値は $|a^*|$ の値の約2倍の大きさにあり、地下水涵養量には地下水位の方の影響度が高いことが得られる。図-9は、図-7で整理した($H-h$)値を調査日での河川水位 H あるいは地下水位 h のそれぞれの値に対して示したものである。図中に相関係数を示したように($H-h$)値は H 値に比べると h 値に対する相関が高いことが確認され、このことが地下水位の影響度が高くなる原因ではないかと推察される。

5. 渇水時のダム補給と地下水涵養量

(1) ダム補給量

揖斐川の流量調査地点①から上流に約30kmに位置するダムBでは、「流水の正常な機能の維持」のため渇水時にダム補給が実施される。このダム補給時の流量 $4Q_B$ (m³/s)は、扇頂付近のダムAでの放流量 Q_A に含まれる。図-10は、調査を実施した2010年、2011年、2018年の場合を例に、ダムAの Q_A に対してダムBの補給量 $4Q_B$ の値

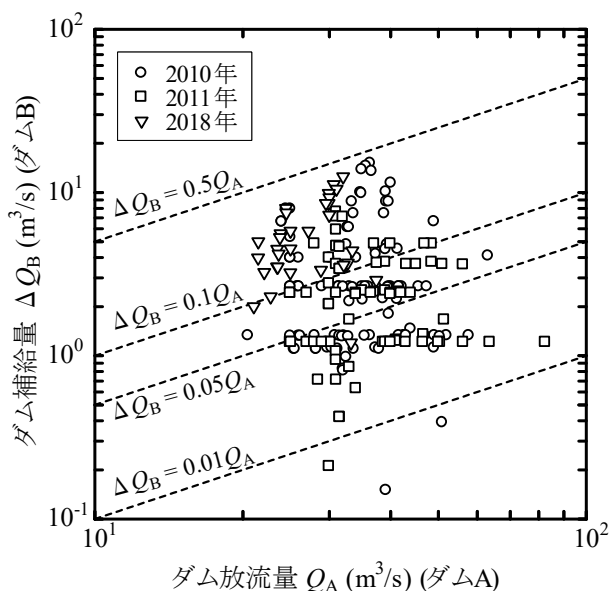


図-10 ダム補給量

を示したものである。 ΔQ_B は、おおよそ数 m^3/s ～十数 m^3/s の範囲にあり、 Q_A の1%～50%程度である。

(2) ダム補給量と地下水涵養量

上述の式(2)によって地下水涵養量は河川水位と地下水位の2要因によって推定できる可能性を示した。この式に従えば、ダム補給がない場合には河川水位は低下するため地下水涵養量が減少することが予想される。

さて、河川水位 H とダム放流量 Q_A の間の相関性が高いことが認められたため、式(2)の H を Q_A で代用できると仮定して、次の重回帰式(5)に書き改める。

$$Q^* = \alpha Q_A + \beta h + \gamma \quad (5)$$

ここで、 α (m^2/s)、 β (m^2/s)、 γ (m^3/s)は回帰係数である。そして、各調査値を用いて最小二乗法によって回帰分析した結果、 $\alpha = 0.157$ (t 値は1.91)、 $\beta = -9.25$ (t 値は-3.68)、 $\gamma = 325.0$ (t 値は3.80)であった。また、決定係数は0.58であった。式(5)の Q_A はダム補給量 ΔQ_B を含む場合があるので、即ち、ダム補給時には $\alpha \Delta Q_B$ がそれによる地下水涵養量の分となり、ダム補給量の約16%が地下水涵養量として供給される。図-10に示した ΔQ_B の値を用いると、最大で $2.4 \text{m}^3/\text{s}$ の地下水涵養量が試算される。また、年間のダム補給量に対する地下水涵養量を算出すると、2010年の場合では495万 $\text{m}^3/\text{年}$ 、2011年では244万 $\text{m}^3/\text{年}$ 、2018年では238万 $\text{m}^3/\text{年}$ である。

6. あとがき

本論文は、濃尾平野の地下水保全のあり方に資するため、揖斐川扇状地における河川からの地下水涵養量の実

態を求めるとともに、河川水位や地下水位等の影響関係を考察した。その結果、主に次述する事項が得られた。

- (1) 揖斐川とその接続水路等の流量の調査に基づいて求められた地下水涵養量は、河川が渇水流量から豊水流量の範囲では4～20 m^3/s 程度の範囲にあり、扇頂での河川流量の10%～50%の大きさにあった。
- (2) 揖斐川からの地下水涵養量は、常時観測される河川水位と揖斐川周辺の地下水位を説明変数としたときの線形重回帰式によって良好に再現できることが明らかになった。即ち、観測値に基づいて地下水涵養量を監視できる可能性があった。
- (3) 上述の線形重回帰式に基づいて、渇水時のダム補給によってその補給量の16%程度が地下水涵養されていることが推定された。

謝辞：本研究は、(公財)河川財団の平成30年度河川基金助成を受けた。関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 神谷浩二、大橋慶介、谷田翔平、近藤貴之：扇状地河川からの地下水涵養量の評価法に関する考察、Kansai Geo-Symposium 2015論文集、pp.57-60、2015。
- 2) 井上 裕、神谷浩二、鈴木結里英、桑山浩幸：河道状況からみた扇状地河川の地下水涵養特性の考察、Kansai Geo-Symposium 2018論文集、pp.65-69、2018。
- 3) 岸 和男、永井 茂：新庄および尾花沢盆地の地下水、地質調査所月報、Vol.18, No.7, pp.477-490、1967。
- 4) 佐々木崇二：扇状地河川の伏流量について、ハイドロロジー、No.6, pp.35-38、1974。
- 5) 森 和紀：伏没涵養河川周辺における自由地下水の性状、水温の研究、Vol.24, No.4, pp.2-6、1980。
- 6) 阪田義隆、池田隆司：可搬式ADVを用いた同時流量観測による扇状地河川の流量変化と伏流量の定量化、水文・水資源学会誌、Vol.25, No.2, pp.89-102、2012。
- 7) 岐阜大学：岐阜県・水資源適正利用調査検討業務報告書、2012。
- 8) 国土交通省、土木研究所、港湾空港技術研究所：国土地盤情報検索サイトKuniJiban、<http://www.kunijiban.pwri.go.jp> (参照：2019-03-18)。
- 9) 藤田一郎、安藤敬済、堤 志帆、岡部健士：STIVによる劣悪な撮影条件での河川洪水流計測、水工学論文集、Vol.53, pp.1003-1008、2009。
- 10) 和泉征良・藤田一郎・谷昂二郎・岡田将治・橘田隆史：洪水時のADCPデータに基づく更正係数の分布特性と流量推定の高度化に関する研究、土木学会論文集B1(水工学)、Vol.72, No.4, pp.I 895-I 900、2016。
- 11) 松尾新一郎、赤井浩一、池田一郎：現地における地盤透水係数の一測定法、土木学会誌、Vol.37, No.2, pp.14-18、1952。

(2019. 4. 2受付)