

沖積平野における 地下水の動態解明と涵養量の推定

ESTIMATION OF GROUNDWATER MOVEMENT AND RECHARGE AMOUNT WITHIN AN ALLUVIAL PLAIN

大橋慶介¹・神谷浩二²・児島利治³

Keisuke OHASHI, Kouji KAMIYA and Toshiharu KOJIMA

¹ 正会員 博士(工学) 岐阜大学助教 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)

² 正会員 博士(工学) 岐阜大学准教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)

³ 正会員 博士(工学) 岐阜大学准教授 流域圏科学研究センター (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)

At the point of view of water resources management, groundwater recharge is important in order to control a water balance, however, groundwater recharge amount is not to be clarified yet. In this study, we estimate groundwater recharge amount by a measurement of river discharge and a saturation flow analysis within an alluvial plain. In the measurement of river discharge, acoustic Doppler current profiler (ADCP) is used for evaluating groundwater recharge from difference of discharge between survey sections. The measurement implies that groundwater-recharge increases at former river bed. Saturation flow analysis clarifies directions of groundwater flow and concludes that former river bed plays a role of underground stream predominantly and groundwater recharge amount does not always correspond to variation of river water level.

Key Words: Groundwater recharge, Water resources management, ADCP

1. はじめに

我が国の人口や産業は沖積平野に集中しており、利用が容易な地下水への依存度は高い。高度成長期には過剰揚水による地盤沈下が社会問題化し、揚水制限等の対策によって近年では地下水位は回復してきている。一方、地下水位が高いほど液状化のリスクが高まることから、地下水利用量を適切にコントロールして、利水あるいは防災において最適な地下水位を保つことの重要性が指摘されている¹⁾。地下水位をコントロールするには入力である地下水涵養量を知る必要があるが、その詳細は明らかになっていない。そこで本研究は、地下水への主な供給源である河川に着目して、沖積扇状地地帯での地下水涵養量の推定を試みるものである。

2. 研究概要

(1) 研究方法と対象地域

本研究では、2種類のアプローチによって地下水涵養量の推定を試みる。ひとつの方法は、扇状地上流端、中間部、および下流端に設定した3つの観測断面について、ADCPを用いて河川流量を計測し、その流量差から涵養量を推定するものである。長良川扇状地においては、殆どの地域で河川水位より地下水位が低く、河川から地下水盆へ飽和浸透しながら不圧地下水層を涵

養している状況であり、この区間での長良川は失水河川²⁾であると考えて良い。もうひとつは、観測された河川水位および地下水位から動水勾配を求め、定常飽和浸透流解析によって、河道から扇状地へ平面的に広がっていく地下水動態を確認するものである。

対象地域は、濃尾平野の北部である岐阜市長良川扇状地周辺であり、岐阜市の人口が密集する地域であるとともに、市の主たる水道水源である鏡岩水源地在存在することから、地下水利用における重要な地域である。地下水を水道水源とすることから推察できるとおり、長良川扇状地は透水性の高い砂礫層が厚く分布し、長良川旧河道域には砂・粘土といった後背湿地堆積物が分布している³⁾。その領域の概要を図-1に示す。流量計測のための観測断面は、千鳥地点S₁(57.4km付近)、忠節地点S₂(50.2km付近)、および鏡島地点S₃(47.6km付近)に設けた。観測断面の直上流には道路橋が架かっており、出水時にも橋上から流量観測できることを考慮している。河川区間としては、河口から46.0~57.6km区間の総延長11.6kmが対象となっている。その長良川調査区間において接続する支川・用排水路は、左岸側では鏡岩水源を含めて6地点、右岸側では3地点存在する。その一覧を表-1に示す。B_{LO}の鏡岩水源は定常的に取水されるため一定量の誘発涵養に寄与していると考えられる。また、長良川右岸側の扇状地には、1939年(昭和14年)の長良川改修工事

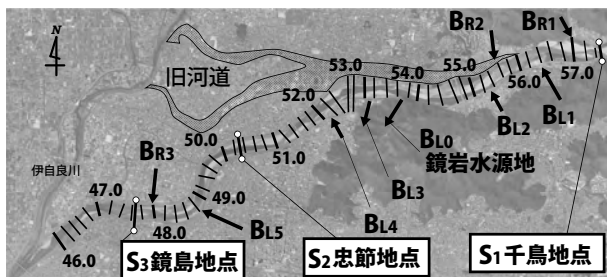


図-1 調査地域の概要（観測地点、河川距離標および支川・用排水路とその接続方向）

表-1 長良川に接続する支川・用排水路の一覧

位置	地点番号	観測地点名	接続
左岸	BL0	鏡岩水源地	流出
	BL1	堂後排水樋門	流入
	BL2	日野揚排水機場	流入
	BL3	忠節用水	流出
	BL4	忠節用水	流入
右岸	BL5	今泉排水樋門	流入
	BR1	古津谷川	流入
	BR2	岩舟川	流入
	BR3	東島排水樋門	流入

で締め切られた長良川旧河道（長良古川，長良古々川）が広がっており⁴⁾，地下水涵養に大きな影響を与えていることが予想される。

(2) 調査方法について

扇状地内の地下水動態を把握するには，広範囲で河川流量，支川・用排水路流量および地下水位を同時観測する必要がある．そこで，それぞれの観測作業を3班で分担して，平成25年10/8，10/28，12/17の計3回調査を実施した．河川水位の変動が地下水動態へ与える影響を知るため，河川水位・流量の異なる条件下で観測している．図-2は過去5年間の長良川忠節水位観測所における流況曲線と3回の調査時の流況を示している．流量は以下の水位流量曲線式（HQ式，平成23年度暫定値）

$$Q = \begin{cases} 49.78(H + 4.28)^2 & \text{if } -3.67 < H \leq -2.31 \\ 72.63(H + 3.94)^2 & \text{if } -2.31 < H \leq 1.44 \end{cases} \quad (1)$$

から求められている．ここで， H と Q は，それぞれ忠節地点での水位（m）および流量（ m^3/s ）である．この流況曲線から調査時の流況は，おおよそ豊水，低水，および渇水流量に相当していることがわかる．なお，忠節地点での記録によると，10/8，10/28，12/17における観測開始時刻（9時）に対する終了時刻（概ね17時）の各水位変化は，それぞれ，+5cm，-10cm，0cmであった．

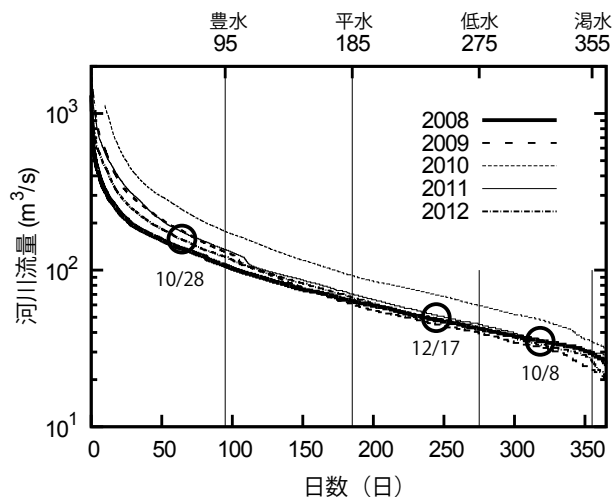


図-2 忠節地点における過去5年間の流況曲線（日付は観測時の流況を示す）

表-2 支川・用排水路の流量

観測点		流量 (×10 ⁻³ m ³ /s)		
		10/8	10/28	12/17
右岸	B _{R1}	8	36	14
	B _{R2}	0	21	0
	B _{R3}	0	0	0
左岸	B _{L1}	33	71	0
	B _{L2}	0	0	0
	B _{L3}	0	0	0
	B _{L4}	11	20	13
	B _{L5}	27	10	15

3. 河川流量観測に基づく地下水涵養量推定

(1) 支川・用排水路での流入出流量の観測

複数断面の河川流量の差から涵養量を推定するためには，その断面間の流入量或いは流出量を正確に把握しなければならない．そこで主な接続流路について本川流量観測と並行して接続流路の流量観測を実施した．流量計測については，落差工が存在する場合は越流水深から流量公式によって算定し，落差工がない流路では浮子法を用いた．その結果を表-2に示す．それぞれの流入出流量のうち最大を示したものは10/28の古津谷川BR1であるが，その量は $71 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ であり，長良川本川の渇水流量が $30 \text{m}^3/\text{s}$ 前後であることを考えると，今回の観測条件に限って言えば，その流入出流量は無視できるほど小さいことがわかった．

(2) ADCPによる河川流量観測と基準測線の決定

ADCPはTeledyne RD Instruments社のWork Horse ADCP Rio Grandeを用い，フロートとしてのトリマラ

表-3 ADCP 解析流量

断面	10/8		10/28		12/17 (参考)	
	Q	$\Delta Q/Q$	Q	$\Delta Q/Q$	Q	$\Delta Q/Q$
S ₁	34.4		135.9		42.6	
S ₂	27.5	-20%	107.6	-21%	28.8	-32%
S ₃	26.3	-4%	108.1	+1%	46.0	+60%

ン型曳航観測用ボート（ハイスピードリバーボート）に搭載した。なお曳航観測の方法は、河川流量や観測断面の状況に応じて、杭ワイヤーを使った併走艇による操作、および図-3 に示す橋上操作を使い分けている。

ADCP で曳航観測する場合、局所的な流速の違いによって航路に蛇行が生じる。正確な流量算定のために航跡直線化補正の必要性⁵⁾が指摘されているが、後述の複数計測データの時間平均化においても同一平面上に流速ベクトルが並んでいることが望ましい。ここでは、図-4 のように全速度ベクトルの水平成分を合成し、その合成ベクトルに直交する面を基準測線断面とした。

(3) 複数計測データの時間平均化

出水時の観測を考慮して橋梁直下流に設定した観測断面であるが、橋脚影響でその後流は大きく乱れている。こうした状況で代表的な流量値を得るためには、同一断面において複数回往復計測させることが重要である。しかし、ADCP 付属の解析ソフトである WinRiver が直接出力する流量のばらつきは大きく、流量算出の方法も不明確であるため、ここでは ASCII データとして出力した 3 次元流速データに基づいて流速分布を時間平均化と内外挿補完によって代表流量を求める。そうして作られた流量をここでは解析流量と呼ぶこととする。また、同一断面の計測であっても、航路の蛇行によって横断距離が異なるが、特に橋上曳航の際にその傾向は顕著である。しかし、航跡の直線化補正によって計測ごとの位置合わせは容易になり、多数の計測データが存在してもほぼ同一の河床形状が再現することができる。一方、ADCP では水流の乱れによる欠測がしばしば発生する。なかには、広い範囲で欠測になる場合もあり、欠測データ周辺値による内挿補完でさえも容易ではないことがある。このような場合、図-5 のように欠測を含んだまま複数断面データを時間平均化して、平均流速分布を求めることで、欠測箇所を大幅に減らすことができる。その上で、欠測箇所を周辺値によって内挿補完して解析流量を求めた。なお、時間平均化に用いた断面流速分布の数は、千鳥、忠節、鏡島の順に、10/8 では 6, 3, 3, 10/28 では 4, 4, 4, 12/17 では 2, 4, 2 であった。



図-3 橋上操作による ADCP 流量観測風景（10 月 8 日忠節地点）

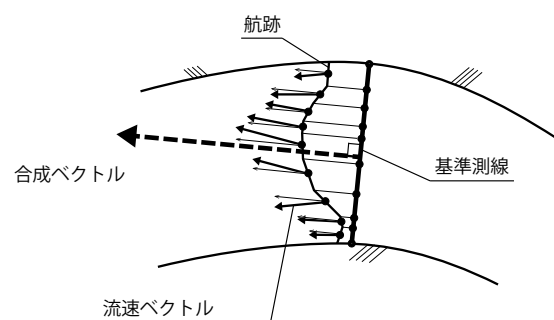


図-4 断面流速分布の基準測線の決定

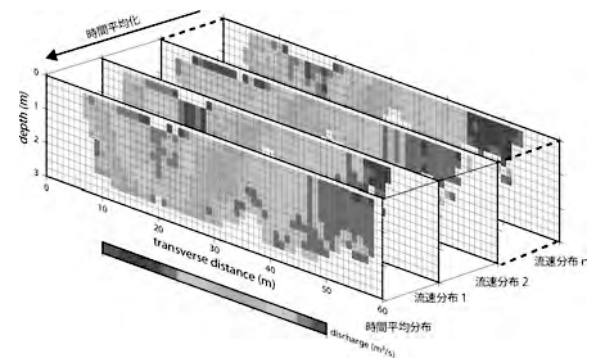


図-5 解析流量の時間平均化の概念図

(4) 河川流量観測に基づいた推定涵養量

3 次元流速データから得た解析流量を表-3 に示す。渇水流量である 10/8 と、豊水流量である 10/28 の値をみると、流況が大きく異なるにもかかわらず、断面 S₁～S₂ 間において流量はいずれも約 20%減少しており、この間で相当量浸透している可能性が考えられる。一方、断面 S₂～S₃ 間では数%の増減しかなく、ADCP の計測精度を考えると、この区間では殆ど浸透がないと考えられる。ところが、低水～渇水流量である 12/17 の結果をみると、先ほどの傾向と大きく異なり、特に断面 S₂～S₃ 間では、60%流量が増加するという不自然な結果

となっているが、これは誤設定により低分解能で流量観測した理由によるものであった。そのため 12/17 の ADCP データに関わる値は参考値として扱うこととする。10/8 と 10/28 の比較では、浸透量は断面 $S_1 \sim S_2$ において卓越しており、当初の予想通り旧河道の存在が寄与している可能性が高い。ただし、この推定方法では浸透流の流動方向は特定できていないため、次述の飽和浸透流解析によって地下水動態を明らかにする。

4. 定常飽和浸透流解析による地下水涵養量の推定

(1) 河川水位の推定

飽和浸透流解析では、河川水位と地下水位から求まる動水勾配が必要である。地下水位分布は、河川流量観測と同じタイミングで実施した 49 本の消防用井戸の水位観測によって、明らかであるため、連続した河川水位が未知量として残されている。そこで、HQ 式から求めた流量を上流端境界条件とし、測量成果の一般断面を用いた 1 次元不定流計算によって連続した河川水位を推定した。調査時間内における水位変化は、忠節地点での水位観測記録によると 1cm から 10cm 程度であったため、ここでは各断面での流量が一定であることを仮定して、流れが定常に達したときの値を採用した。計算には以下の連続式と浅水方程式を用いた。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial uQ}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{gn^2 u^2}{\bar{h}^3} = 0 \quad (3)$$

ここで各変数は、断面積 A (m^2)、流量 Q (m^3/s)、断面平均流速 u (m/s)、重力加速度 g (m/s^2)、水位 H (m)、マンニングの粗度係数 n ($\text{m}^{1/3}/\text{s}$)、平均水深 $\bar{h}$ (m) である。 $\bar{h}$ は A を水面幅で除した値であり、水面幅については、連続式から求まる断面積 A と断面形から決定している。上流端流量は、忠節水位観測所の水位から HQ 式によって推定された値を用い、粗度係数 n は HQ 式による推定流量を与えた計算結果が、観測既知量である忠節地点水位と一致するよう試行的に決定した。得られた水位変化を図-6 に示す。推定水位は、3つの観測断面における観測成果の水位に対して誤差 10cm 以内と良く一致しており、妥当な推定結果が得られたと考えられる。

(2) 岐阜市扇状地の地下水位分布

推定された河川水位と地下水位データを統合して得た等水位線図を図-7 に示す。図中の数値はそれぞれの調査日に対応する水位を、丸印は観測井の位置を示している。上流側から水位 16 m の付近までは、河川水位と地下水位がほぼ一致し、等値線は直線であって河川からの失水も得水もない平衡状態である。水位 14 m から 12 m 付近では、等値線は大きく曲がり、右岸方向へ河川水が飽和浸透流として移動していることがわかる。その地点は、図-1 で示した旧河道の分派領域であり、等

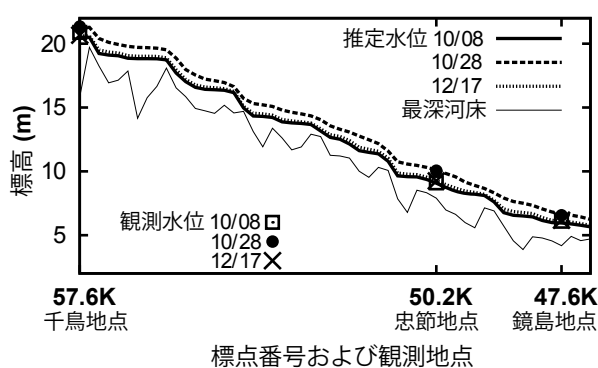


図-6 不定流計算で推定された河川水位

値線間隔も密であることから、この地点で大きく涵養されている可能性が高いと考えられる。一方、同区間の左岸側でも比較的少ないものの涵養が生じていると思われる。上流から 10/28 水位 8 m 付近までは河川水位が地下水位より高い状況が続いているが、そこから下流側では地下水位が高い場所もあり、等値線は複雑な形状になっている。このことは、合流する伊自良川と距離が接近していることから、伊自良川方面からの地下水供給による影響か、或いは一旦、長良川旧河道へ向かった地下水が復帰流として再合流していることも考えられる。これについては、伊自良川の水位を調べる必要があり、今後の課題である。

(3) 定常飽和浸透流解析

河川から不圧地下水として浸透している涵養量をダルシー則を用いた定常飽和浸透流解析によって求める。このとき、単位幅あたりの浸透量 q は、

$$q = -k \frac{dh}{dl} \quad (4)$$

として与えられる。 k は透水係数 (m/s)、 dh/dl は動水勾配であり、ここでは dh は河川水位と地下水位の差 (m)、 dl は経路長 (m) である。そのモデルの概念図を図-8 に示す。 dl を点 P までの水平距離と近似し、周辺の観測井水位と河川水位によって決定される地下水位面から動水勾配が求められる。この解析では、河川縦断方向 200 m 毎に設定された横断測量断面の延長線上において、水際から 100 m 離れた位置に点 P を設定し、その地点を通過する浸透流の大きさを求めることとする。ボーリング調査資料によると、不透水層基盤までの深さは川幅と比較して浅く、Dupuit の準一様流の仮定⁷⁾が成立することから、飽和浸透流を水平流とみなして解析した。透水係数 k は、ボーリング資料の透水試験結果に基づき 0.0018 m/s を用いている。不圧地下水層の厚さ Z については、扇状地内部が複雑な地層構造を有するゆえに、その決定は容易ではないが、ボーリング調査結果に基づいて粘土層の出現頻度が高くなる深さを根拠として $Z = 20$ とした。

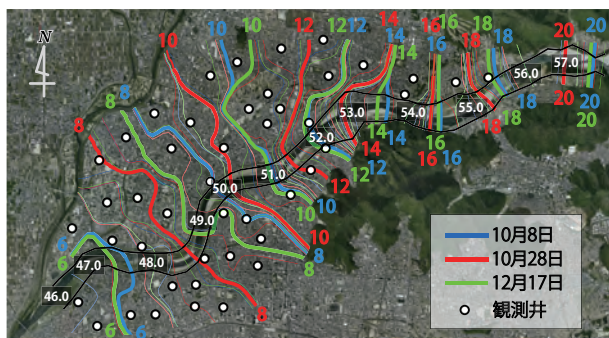


図-7 長良川扇状地における河川水位および地下水位の等水位線図（白色数字は河川距離標を示す）

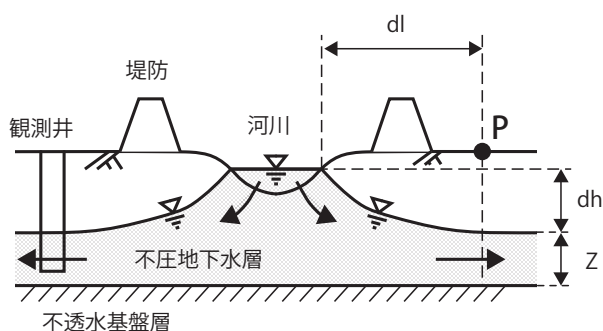


図-8 飽和浸透解析の模式図

表-4 定常飽和浸透流解析から推定した単位幅浸透量

調査日	涵養量 (m ³ /s)		
	左岸側	右岸側	合計
10/8	2.96	9.14	12.11
10/28	3.81	10.12	13.93
12/17	3.54	9.95	13.49

5. 定常飽和浸透流解析の結果

解析結果に基づき、200m 毎の河川横断面に沿った堤内方向への単位幅涵養量を左岸と右岸に分けて図-9 に示す。左岸側の河口から 53km 地点より上流側では、山体隣接のため浸透流出は無視している。浸透量全体をみわたすと、河川水位が高い 10/28 の値が最も大きく、河川水位が浸透量に関係していることがわかる。浸透が卓越する区間は、旧河道が存在する 56.0 から 52.0km 区間であり、ADCP 観測結果と一致する。特に、うかい大橋が架かる 55.0km 付近で浸透量は最大を示していて、長良古川、古々川の締め切り工事記念碑がある 52.4km 地点よりかなり上流で大きな浸透が生じていることがわかった。左岸と右岸を比較すると、50km 地点より上流はほぼ同じ値で推移し、それより下流では左岸側へ浸透が卓越している。53.0km 地点には水道水源

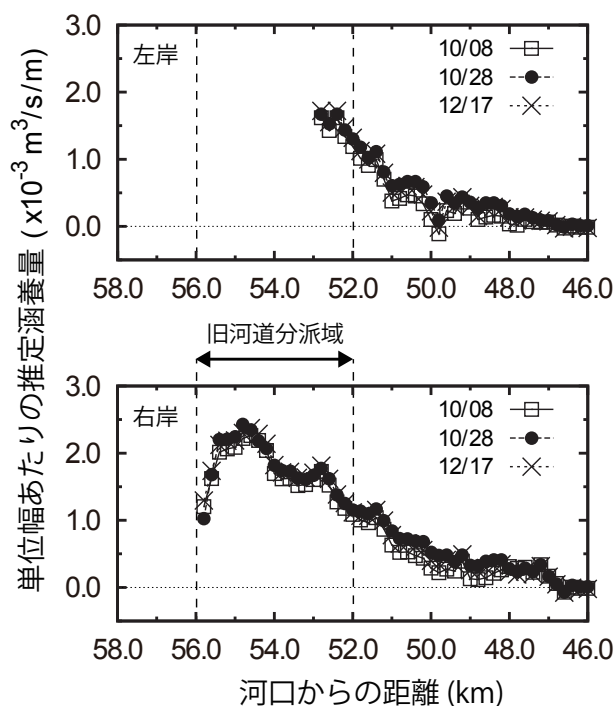


図-9 定常飽和浸透流解析による単位幅涵養量の縦断変化

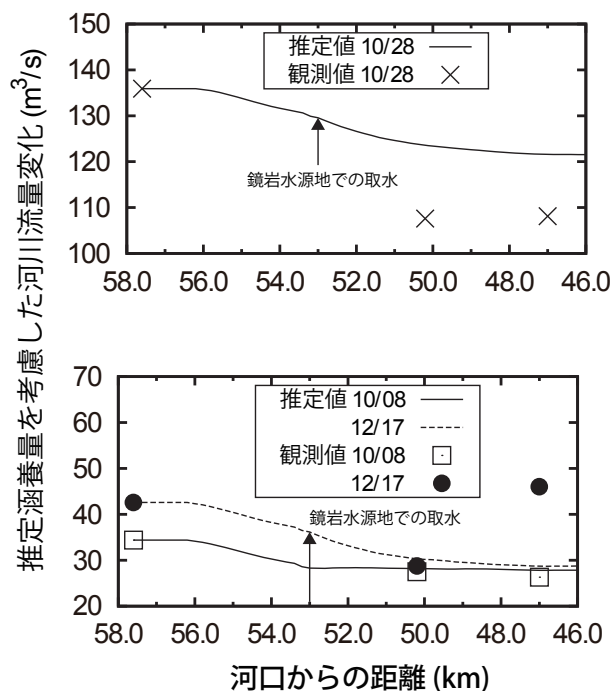


図-10 推定涵養量を用いた河川流量変化（上図：豊水時 10/28，下図：低水時 12/17，渇水時 10/8）

である鏡岩水源地在左岸側に存在するが、左岸側の地下水位情報が乏しく、その影響は確認できていない。右岸 53.0km において浸透量の小さなピークがみられるが、この原因は定かではない。左右両岸において 50km 付近まで浸透量が漸減していて、50km 地点より下流側では負の値、つまり、地下水から河川方向へ交換が生

じている地点も存在している。この事実は直接観測によって確認されているものではないが、図-7 の等水位線図でも明らかなように、地下水位が河川水位よりも高いことから、その可能性は十分考えられ、河川水と地下水の交換を考えるうえで興味深い地点である。

浸透流量を全調査区間において積算した結果を表-4 に示す。積算区間が異なるため左右岸の単純比較はできないが、その量は右岸が左岸に比べて2倍から3倍大きな値となっている。左岸右岸の合計値をみると、その絶対量の変化は小さく、河川水位あるいは河川流量の変動に比較して、浸透量の変動は小さいことがわかる。これは、河川水位の上昇に対して、早い応答時間で地下水位が上昇していて、河川流量が多くても水頭差は僅かであり、結果として浸透量として表れないことを示している。ただし、地下水位の上昇時には非定常的な地下水流動が起きていることは明白であるため、河川流量の変化に対応する地下流動を調べるうえでは、非定常解析が必要であると考えられる。

また、千鳥地点 S_1 での ADCP 観測流量を調査区間上流端の河川流量として考え、その河川流量から解析結果の浸透量だけ減少させていったきの河川流量変化を流況別に分けて図-10 に示す。図中に矢印で示した地点では、鏡岩水源地での取水量分を河川流量から減じており、その平均取水量は $0.4\text{m}^3/\text{s}$ と仮定⁸⁾している。浸透量と同様、河川流量は 56.0km から 52.0km 区間において大きく減少し、そこから下流はほぼ収束した値となっているが、10/8 の水位収束は少し上流の 53.0km 地点で生じている。図中のプロットは ADCP による流量観測値を示しており、10/8 のデータ、参考値抜いではあるが 12/17 のデータも鏡島地点以外では推定値と良く一致している。ただし、豊水流量であった 10/28 では、推定値は観測値から大きく乖離している。ADCP 計測では、水深が大きくなるほど不感帯が占める相対的な比率が小さくなるため、計測精度は向上するはずであり、この乖離は器械誤差によるものとは考えにくい。ひとつの原因として、大きな出水ほど洪水波の伝搬速度が速いため、流量観測している間に河川流量が予想より早く減少している可能性が考えられる。もしそうであるならば、この河川流量減少分を涵養量として過大評価されていることは否めない。このことから、出水時において ADCP 流量観測から涵養量を正確に推定するためには、複数の ADCP での同時観測や、数値計算によって流量変化を補正するなど観測態勢および評価方法に改善の余地があることが明らかになった。

6. おわりに

本研究では、ADCP を用いた河川流量観測、および飽和浸透流解析によって、長良川を対象として沖積平

野扇状地地帯での地下水涵養の実態解明を試み、以下の点を明らかにした。

1. ADCP 流量観測結果から、長良川旧河道を含む長良川扇状地の扇頂 (S_1 : 千鳥地点) から中間部 (S_2 : 忠節地点) までの区間において、豊水時 (10/28) および低水時 (10/8) の河川流量の約 20% が浸透し、地下水涵養に寄与していることがわかった。
2. 河川流量と地下水位の同時調査によって、扇状地での水位分布と地下水流動方向が明らかになり、旧河道の存在が大きく影響していることがわかった。
3. 定常飽和浸透流解析によって、長良川分流域締め切り地点よりかなり上流の 55.0km 地点において浸透流量が最大であり、その値は約 $2.5 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ であることがわかった。また、調査区間全体の日涵養量は $12 \sim 14\text{m}^3$ であった。
4. 定常飽和浸透流解析では、河川流量の変化と比較して地下水涵養量の変化が小さいという結果となったが、河川水位上昇期の地下水位上昇が考慮されていないため、地下水流動の非定常解析の必要性が明らかとなった。

謝辞

この研究は、国土交通省平成 25 年度河川砂防技術研究開発公募（地域課題分野）「濃尾平野における水資源総合管理のための地下水涵養機能評価モデルに関する研究」（代表：神谷浩二）の助成にて遂行され、国土交通省中部地方整備局木曽川上流河川事務所の多方面に亘る共同支援、また岐阜大学工学部社会基盤工学科の清水達貴氏、西元亮氏、谷田翔平氏の協力によってこの研究がなされたことを記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 地盤工学会：ジオテクノート 15 濃尾平野の地盤－沖積層を中心に－, p. 90, 1991.
- 2) 日本地下水学会編：雨水浸透・地下水涵養（21 世紀の地下水管理）、理工図書株式会社, 2001.
- 3) 建設省中部地方建設局：中部地方土木地質図, 1991.
- 4) 日本地図センター：地図で見る岐阜の変遷-都市変遷図, 1920（大正 9）年頃 2 万 5 千分 1, 1995.
- 5) 橘田隆史、岡田将治、新井励、下田力、出口恭：ラジコンボートを用いた ADCP 移動観測の計測精度評価法に関する一考察、河川技術論文集、第 14 巻, 2008.
- 6) 萬矢敦啓、菅野裕也、深見和彦：河川実務者の観点から見た ADCP による流量観測技術開発の論点、河川流量観測の新時代, 2010.
- 7) 河野伊一郎：地下水工学、鹿島出版社, p. 30, 1997.
- 8) 岐阜市上下水道事業部：岐阜市水道ビジョン（岐阜市水道事業基本計画）概要版・健全で活力ある都市を支える水道～安全でおいしい水を持続的に供給するシステムの再構築～, 2008.

(2014. 4. 3 受付)