

濃尾平野の揖斐川による地下水涵養機構 の地域特性

CHARACTERISTICS OF GROUNDWATER RECHARGE PROCESS FROM IBI
RIVER ON AN ALLUVIAL FAN IN THE NOBI PLAIN

井上 裕¹・神谷浩二²・桑山浩幸³・宮川省三⁴・木口喬介⁵
Yutaka INOUE, Kohji KAMIYA, Hiroyuki KUWAYAMA, Hiroyuki OZAWA
and Kyosuke KIGUCHI

¹工修 ㈱テイコク 地質部 (〒501-3133 岐阜市芥見南山2-4-26)

²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)

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(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)

⁵(独)水資源機構 木津川ダム総合管理所 (〒518-0413 三重県名張市下比奈知2811-2)

It is necessary for the sustainable use of groundwater resource to understand the water balance between groundwater recharge rate and pumping rate in order to avoid groundwater level lowering and ground subsidence. In this paper, it was shown that the groundwater recharge rate from Ibi river evaluated by the river discharge observation on an alluvial fan in the Nobi plain was about 14m³/s during the period of water shortage. Then, the flow path of groundwater recharged from the river was evaluated based on the groundwater recharge rate from the river and on the resemblance of the ions data between the groundwater and the river water. It was revealed that the main groundwater flow path was located along the former river channel of Ibi river.

Key Words : groundwater recharge, groundwater quality, alluvial river, Nobi plain

1. まえがき

濃尾平野では、伊勢湾沿岸部を中心に発生した大規模地下水位低下と広域地盤沈下に対処するため、1950年代後半に主に工業用水の揚水量規制が開始された。その後、1970年代に愛知県等の条例によって揚水量規制等が強化されて以降、地下水位の回復と地盤沈下の沈静化が継続している¹⁾。しかしながら、1994年に経験したような異常渇水に伴う地下水位低下と地盤沈下の再進行に備えるとともに地下水を水資源として持続的に利用するためには、揚水量のみを管理する従来の考え方に対して、降雨等による地下水涵養量と揚水量のバランスを管理することが重要である。本研究は、濃尾平野の地下水涵養源の機能を解明することによって、地下水涵養量の安定等を図るための保全策を究明するものである。

濃尾平野の主要な地下水涵養源とみられる扇状地河川に着目して、Imaizumi et al.²⁾は、木曽三川の一つである

木曽川による地下水涵養量は、1975年から1993年の期間では平均的に3.4億m³/年(= 11m³/s)であることを示した。一方、神谷らは、木曽三川の長良川による地下水涵養は扇頂から扇央辺りに至る地域で多くみられ、その地域の地下水涵養量が1~35m³/s程度の範囲にあったこと^{3), 4)}、木曽三川の揖斐川では調査した地下水涵養量は4~20m³/s程度であったこと^{4), 5), 6)}を得るなど、濃尾平野における地下水涵養量の実態を明らかにしている。

本論文は、濃尾平野の扇状地における揖斐川を対象に、蓄積した地下水涵養量の実態データ^{5), 6)}に基づいて、河川からの地下水涵養・流動経路などの地域的特徴を究明したものである。特に、渇水時の地下水涵養の機構を理解することを意図して、河川位況の渇水位から低水位の範囲における地下水涵養量の特徴なども検討した。本論文では、揖斐川とその周辺地下水の溶存イオンの類似性を調べるとともに、揖斐川の流下方向での地下水涵養量の変化をそれぞれ分析することによって、主要な地下水涵養経路を分析した。

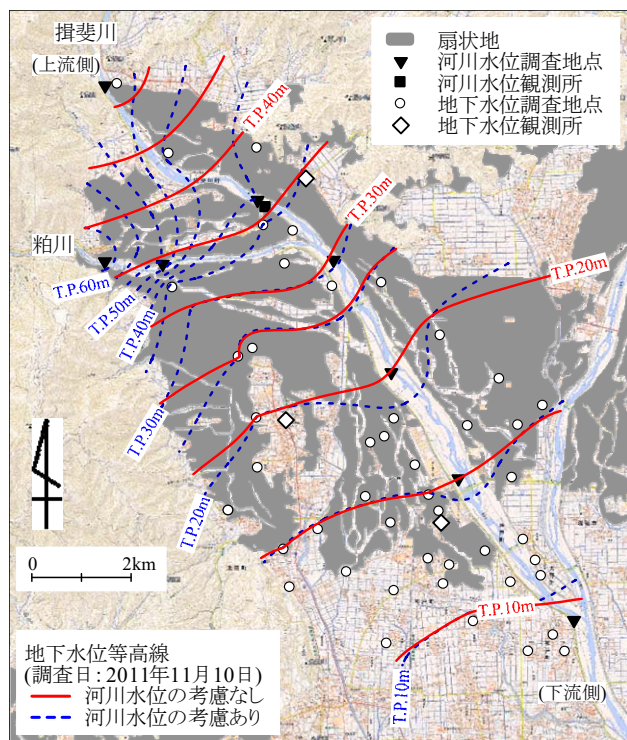


図-1 対象地域と地下水位等高線

2. 掛斐川による地下水涵養量

(1) 対象地域

対象地域は、図-1に示すように、濃尾平野の北西部に位置する掛斐川・粕川扇状地である。この扇状地では、地層の多くが礫質土によって構成されている^{9) 9)}。図-2は、扇端付近における掛斐川の河川堤防および河床におけるボーリング柱状図⁷⁾を示したものであり、図-3はその柱状図の標高に対応させて河川堤防の基礎地盤および河床地盤のそれぞれの透水係数の値⁷⁾を示したものである。河川堤防の基礎地盤および河床地盤は主に礫質土によって構成されていて、礫質土の透水係数がおよそ $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ m/s}$ のオーダーの範囲にあって透水性が高く、河川水が地下へ漏水しやすい条件にある。

(2) 地下水の流動経路

図-1には、神谷らの既往調査⁹⁾において、掛斐川周辺の既設井戸(47地点の消防水利井戸や農業用水井戸等および3地点の地下水位観測所(岐阜県)の計50地点)で調べた地下水位(T.P.m)の値を用いて描いた地下水位等高線(図-1の赤実線)を示した。また、これら地下水位の値と掛斐川(河川水位観測所(国土交通省)を含む7地点)および掛斐川の支川である粕川(2地点)でそれぞれ調べた河川水位(T.P.m)の値を含めて描いた地下水位等高線(図-1の青破線)を重ね合わせて示した。なお、図中には地下水位と河川水位のそれぞれの調査地点および観測所の位置を併記した。また、図-1の地下水位等高線は、掛斐川の位

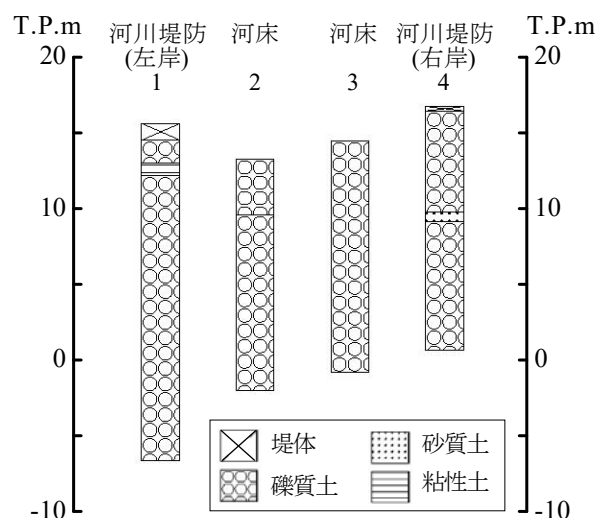


図-2 掛斐川におけるボーリング柱状図

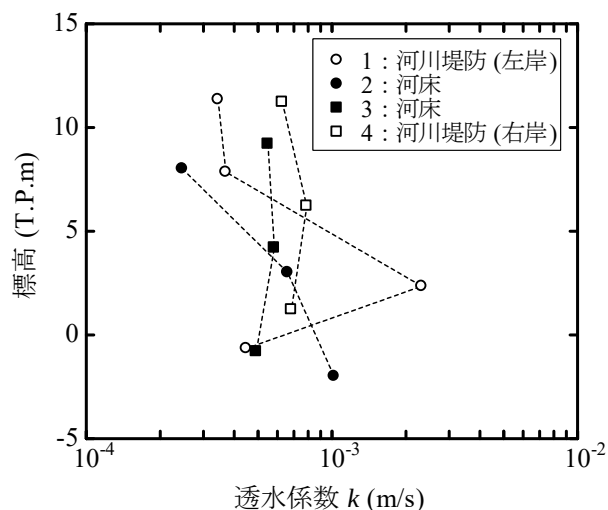


図-3 掛斐川の堤防基礎地盤および河床地盤の透水係数

況が渴水位から低水位の範囲にあるときのものである。掛斐川の右岸側と粕川の左岸側で挟まれた地域では、河川水位を考慮して描いた地下水位等高線(青破線)には粕川を中心として湾曲する地下水嶺がみられるが、それに対して考慮しない場合(赤実線)には北西から南東に平行移動するような形状で描かれる。しかしながら、掛斐川では特に粕川合流点付近から下流側で、両者の場合の地下水位等高線は河川を中心とした地下水嶺がおおよそ現れていて、掛斐川が地下水を涵養する傾向が認められる。

(3) 地下水涵養量の調査概要

扇状地における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る^{9) 9) 10)}。本論文では、扇頂から扇端に至る河川区間について掛斐川の流量と掛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掛斐川の水収支に

基づき地下水涵養量を求めた。

揖斐川では、扇頂付近の地点(後述する図-7の地点Ⅰであり図-1の河川水位調査地点(▼印)の最上流側のものに対応)と扇端付近の地点(図-7の地点Ⅴであり図-1の▼印の最下流側のものに対応)において河川流量を調査し、粕川等の2つの支川および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の3地点での流出量をそれぞれ調査した。既往調査^{9, 9)}では、2010年、2011年、2018年に計13回の流量調査を実施した。これに加えて、揖斐川の位況が渴水位から低水位の範囲のデータを蓄積するため2019年に2回の調査を実施した。

揖斐川の流量について、扇頂付近の地点では、2010年と2011年は電磁流速計法によって調べたが、その電磁流速計法による流量は約1.5km上流に位置するダム(発電用)の放流量の観測値の1.25倍の大きさになる関係であることが判明したため⁹⁾、2018年と2019年の流量は、そのダム放流量の値を用いて電磁流速計法による値に相当するように換算して求めたものとした。扇端付近の地点では、2010年、2011年、2019年は電磁流速計法によって調べ、2018年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¹¹⁾を用いて流量を調べた。なお、STIV法では、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ビデオ画像を取得して、その画像からSTIV法によって表面流速の分布を解析し、表面流速の値に更正係数の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、それに河川横断における水域の断面積を乗じることによって河川流量を求めた⁹⁾。なお、流速換算のための更正係数の値には、扇端付近の地点で別途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。即ち、STIV法によって求めた河川流量は、電磁流速計法によって調べた場合のものと同程度の大きさであると考えられる。一方、支川と排水樋管等の11地点ではそれぞれ電磁流速計法によって流量を調べ、取水樋管の3地点ではそれぞれ観測されている値を用いた。

揖斐川の扇頂付近と扇端付近のそれぞれでの流量 $Q_{①}$ (m^3/s)と $Q_{②}$ (m^3/s)、揖斐川への支川等からの11地点での流入量の合計値 Q_I (m^3/s)、揖斐川から取水樋管への3地点での流出量の合計値 Q_O (m^3/s)のそれぞれの値を用いて、河川からの蒸発量は微少であると仮定して無視し、次式(1)によって地下水涵養量 Q^* (m^3/s)を算定した。

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

(4) 河川の位況による地下水涵養量

図-4は、揖斐川の河川水位観測所(図-1参照)における調査日での日平均河川水位に対して地下水涵養量の値を示したものであり、河川位況の渴水位、低水位、平水位、豊水位のそれぞれでの範囲に区別して示した。

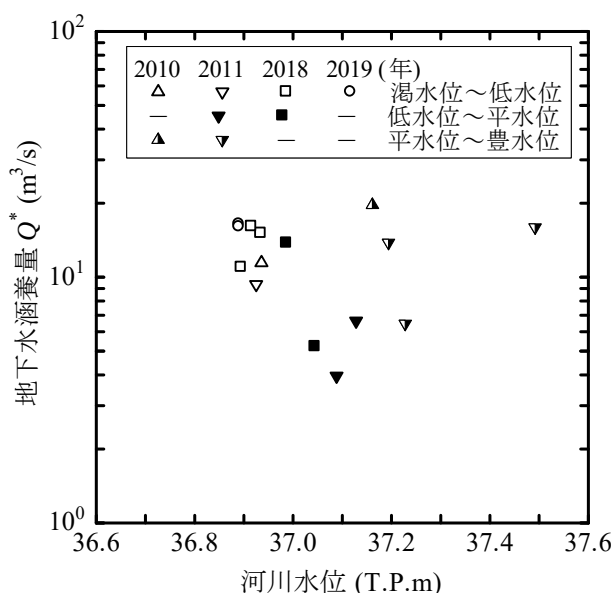


図-4 扇状地における揖斐川からの地下水涵養量

地下水涵養量は、渴水位から低水位の範囲では9～16 m^3/s 、低水位から平水位で4～14 m^3/s 、平水位から豊水位で6～20 m^3/s 程度の範囲にそれぞれある。また、全体的には、地下水涵養量は10～20 m^3/s の範囲にあることが比較的多いが、低水位から豊水位の範囲で5 m^3/s 前後に少なくなる場合もあった。一方で、扇頂から扇端に至る範囲の河川区間の距離の12.8kmの値で除したとき、単位距離あたりの地下水涵養量は0.3～1.5 $m^3/s/km$ の範囲である。佐々木⁸⁾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が平均的に10⁻¹ $m^3/s/km$ のオーダーにあることを示したが、揖斐川では渴水位から低水位の範囲のときの平均値は10⁰ $m^3/s/km$ のオーダーであった。

3. 地下水涵養の地域的特徴

(1) 揖斐川と周辺地下水の水質の類似性

既往調査⁹⁾では、既設井戸(消防水利井戸、生活用水・工業用水・農業用水の採取井戸の計211地点)で採取した地下水について、陽イオンのナトリウムイオン(Na^+)、カリウムイオン(K^+)、カルシウムイオン(Ca^{2+})、マグネシウムイオン(Mg^{2+})、陰イオンの塩化物イオン(Cl^-)、炭酸水素イオン(HCO_3^-)、硫酸イオン(SO_4^{2-})の主要7成分の濃度が分析された。ナトリウムイオン、カリウムイオン、カルシウムイオン、マグネシウムイオン、塩化物イオン、硫酸イオンはイオンクロマトグラフ法により測定し、炭酸水素イオンは硫酸の滴定によるpH4.8アルカリ度にて測定されたものである。また、揖斐川(1地点)についても上記7成分について分析された。図-5には、揖斐川と地下水の採水地点の位置を示した。図-6は、図-5に位置を示した揖斐川の採水地点と地下水の採水地点①～③のそ

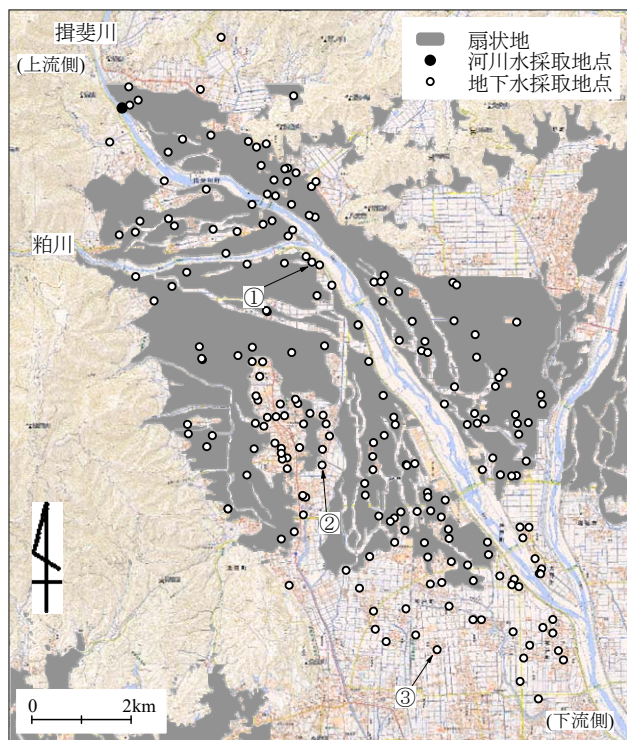


図-5 掛斐川と周辺地下水の採水地点

れぞれの場合を例に、陽イオンと陰イオンの測定値を用いて描いたパターンダイアグラムを示したものである。対象地域では、掛斐川と地下水のいずれの場合においてもパターンダイアグラムは図-6のような重炭酸カルシウム型($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 型)を示した。また、地下水の陽イオン・陰イオンの濃度の値は、掛斐川から離れるに伴って全体的に高くなる傾向にあり、特に陽イオンの Ca^{2+} と陰イオンの HCO_3^- の濃度の変化が顕著である。

次に、上述の陽イオンと陰イオンのデータを用いて、地下水の採水地点*i*(211地点)における水質と河川水のものとの間のユークリッド距離 D_i を次式(2)によって求め、更に、次式(3)によって正規化したユークリッド距離 β_i を求めた¹²⁾。

$$D_i = \sqrt{\sum_{j=1}^7 (u_{ij} - v_j)^2} \quad (2)$$

$$\beta_i = \frac{1}{1 + D_i} \quad (3)$$

ここで、 u_i は次式(4)によって地下水の各イオン濃度を標準化したときの値であり、添字*j*は個体番号で、 $j=1$ のとき Na^+ 、 $j=2$ のとき K^+ 、 $j=3$ のとき Ca^{2+} 、 $j=4$ のとき Mg^{2+} 、 $j=5$ のとき Cl^- 、 $j=6$ のとき HCO_3^- 、 $j=7$ のとき SO_4^{2-} の値であることを表す。また、 v_j は次式(5)によって河川水の各イオン濃度を標準化したときの値である。

$$u_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j} \quad (4)$$

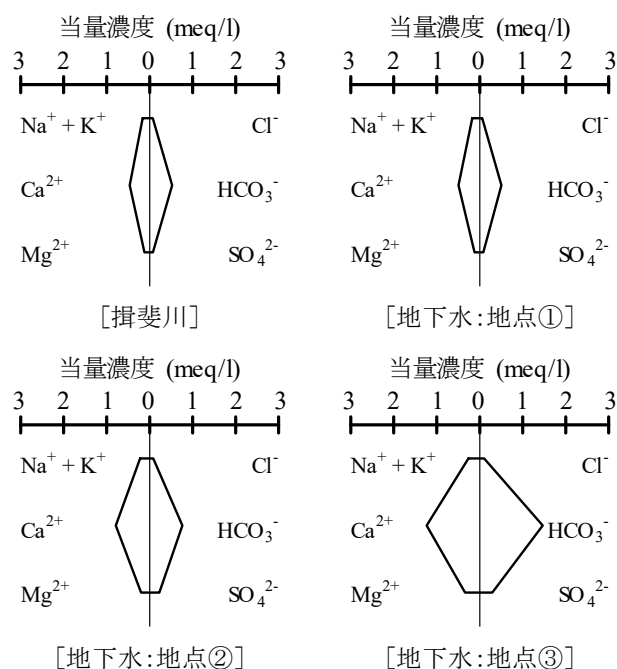


図-6 掛斐川と周辺地下水の水質のパターンダイアグラム

$$v_j = \frac{x_j^* - \bar{x}_j}{s_j} \quad (5)$$

ここで、式(4)の x_{ij} (mg/l)は地下水の各イオンの濃度、 x_j^* (mg/l)は河川水の各イオンの濃度であり、 $\bar{x}_j$ (mg/l)と s_j は地下水および河川水の各イオンの濃度の平均値と標準偏差である。

図-7は、各地点で求めた地下水の β_i の値を用いて描いた分布を示したものである。この β_i 値が1に近いほど地下水の水質が掛斐川のものに近いことを表す。掛斐川近傍で β_i 値が大きめになり、地下水の水質が掛斐川のものに類似性が高くなる。特に、農業用水の取水用の頭首工のある地点Aの付近、粕川との合流点付近で掛斐川の旧河道¹³⁾の付近、工業用水のための揚水のある工業団地の付近において β_i 値が0.6以上になり高めである。

(2) 掛斐川からの主要な地下水涵養経路

図-8は、図-7に示した地点Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴでの既往調査(2010年調査)⁹⁾で得られた掛斐川の流量の値を用いて、また掛斐川の接続樋管等からの流入量と取水樋管への流出量を考慮して、地点Ⅰ～Ⅱ、地点Ⅱ～Ⅲ、地点Ⅲ～Ⅳ、地点Ⅳ～Ⅴの各河川区間で求めた地下水涵養量の値を掛斐川の距離標に対して示したものである。これは、掛斐川の位況が濁水位から低水位の範囲のときのものである。また、図-8には、地点Ⅰ～Ⅴと地点A(農業用水の取水用頭首工の位置)における河川水位の値を併記した。なお、地点Ⅱは図-1に示した掛斐川の河川水位観測所である。また、地点Aの河川水位は頭首工の堰によってT.P.40m程度が維持されている。地点Ⅰ～Ⅱの河川区間

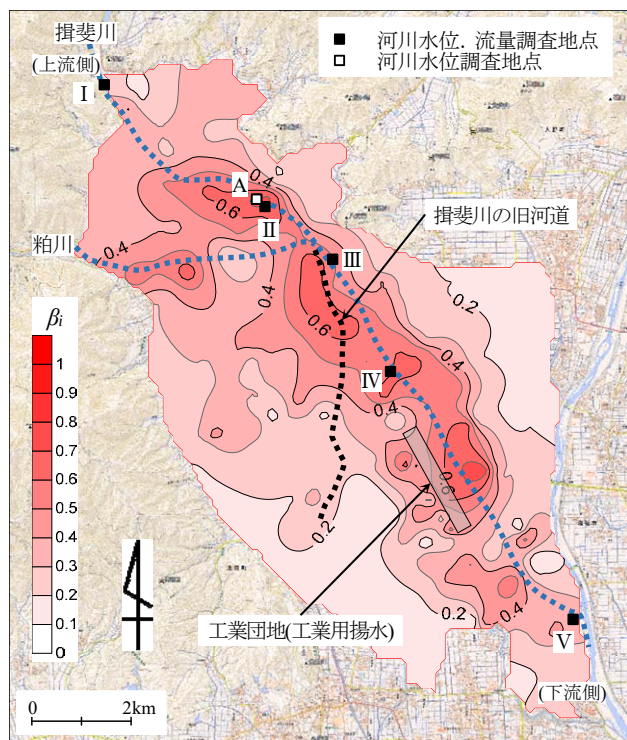


図-7 揖斐川と周辺地下水の水質の類似性(β_i 値)の分布

での地下水涵養量は全河川区間でのものに対して約4割の大きさであり、地点Ⅱ～Ⅲ区間では約3割、地点Ⅲ～地点Ⅳ区間では約1割、地点Ⅳ～Ⅴ区間では約2割である。扇頂から扇央あたりの範囲に位置する地点Ⅰ～Ⅲ区間の地下水涵養量が全体の7割を占める特徴が認められる。一方で、図-8の各河川区間での地下水涵養量を区間距離で除して求めると、地点Ⅰ～Ⅱ区間では $1.1\text{m}^3/\text{s}/\text{km}$ 、地点Ⅱ～Ⅲ区間で $1.9\text{m}^3/\text{s}/\text{km}$ 、地点Ⅲ～Ⅳ区間では $0.45\text{m}^3/\text{s}/\text{km}$ 、地点Ⅳ～Ⅴ区間で $0.37\text{m}^3/\text{s}/\text{km}$ であり、単位距離あたりでの地下水涵養量は地点Ⅱ～Ⅲ区間において最も多い。

次に、図-8と上述の図-7を比較すると、地下水涵養量が多くなる地点Ⅰ～Ⅱ区間には、図-7の β_i 値が高めで地下水の水質が河川水のものに比較的近い傾向を示した農業用水の取水用頭首工(地点A)が含まれ、地点Ⅱ～Ⅲ区間には揖斐川の旧河道付近が含まれる。即ち、取水用頭首工と旧河道付近の河川区間が揖斐川から地下水に涵養する主要な地域であると考えられる。頭首工(地点A)では上述したように高い河川水位が維持されるため、その上流側で湛水域が形成されて河川水の地下への浸透面積が増加することによって地下水涵養量が多くなっていることが考えられる。一方、図-9は、図-1の地下水位等高線(赤実線の場合)に基づき調べた動水勾配の分布を示したものである。地点Ⅲ付近での動水勾配が $5/1000$ 程度で最も高い地域におよそ対応していて、このことが旧河道付近で地下水涵養量を多くしている原因ではないかと考えられる。なお、工業団地付近を含む地点Ⅳ～Ⅴ区間においても地下水涵養量が多い傾向にあるが、この地域で

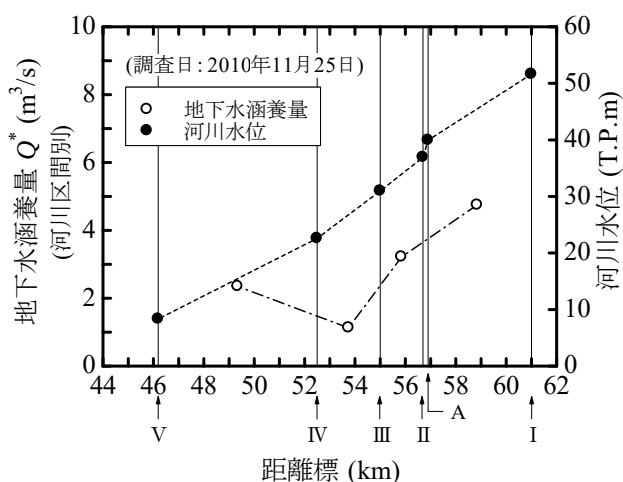


図-8 河川区間別での地下水涵養量および河川水位

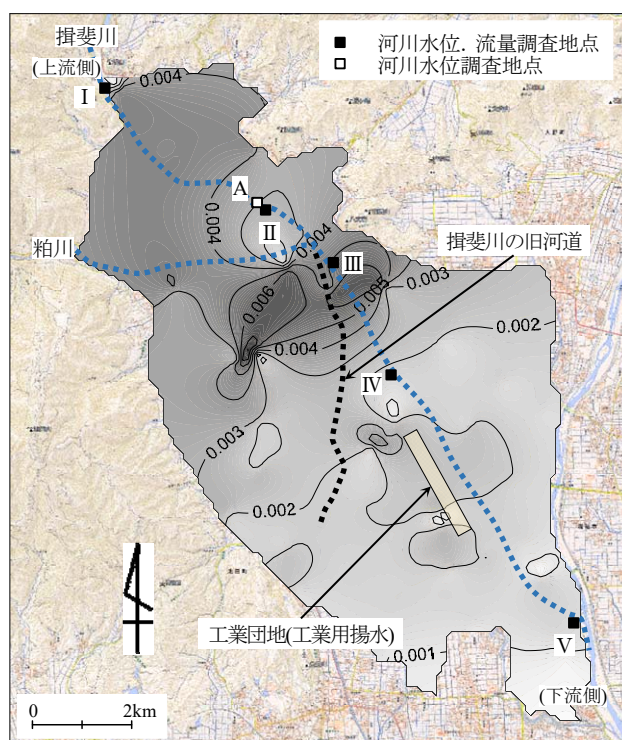


図-9 地下水流の動水勾配の分布

は工業用揚水によって揖斐川周辺の地下水位が河川水位に比べてより低くなっていて動水勾配が大きくなり、そのため揖斐川から誘発涵養されていることが想像される。

(3) 河川水位が比較的低いときの地下水涵養量

上述の図-4に示した湛水位から低水位の範囲での地下水涵養量の値について、地点ⅠとⅤおよび地点Ⅱの揖斐川の流量の値を用いて、また揖斐川の接続樋管等からの流入量と取水樋管への流出量を考慮して地点Ⅰ～Ⅱと地点Ⅱ～Ⅴの各河川区間での地下水涵養量を求めた。図-10は、地点Ⅰの河川流量 Q_1 (m^3/s)の値に対して地点Ⅰ～Ⅱ区間での地下水涵養量 Q^*_{1-2} (m^3/s)の値を示したもの

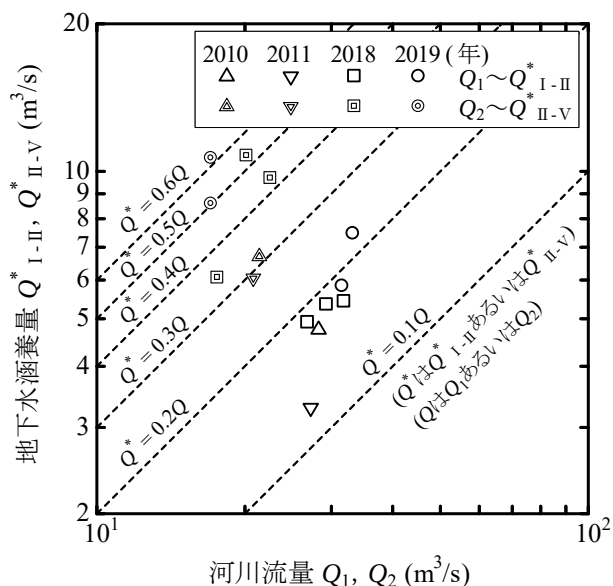


図-10 河川区間別での河川流量と地下水涵養量

であり、地点Ⅱの河川流量 Q_2 (m^3/s)に対して地点Ⅱ～Ⅴ区間での地下水涵養量 $Q^*_{\text{II-V}}$ (m^3/s)の値を重ね合わせて示した。なお、地点Ⅰ～Ⅱ区間と地点Ⅱ～Ⅴ区間での地下水涵養量を比較すると、地点Ⅰ～Ⅱでの地下水涵養量は全河川区間(地点Ⅰ～Ⅴ区間)でのものに対して約4割の大きさである。地点Ⅰ～Ⅱ区間での地下水涵養量は、地点Ⅰの河川流量に対しておよそ2割の大きさに相当する。一方、地点Ⅱでの河川流量に対する地点Ⅱ～Ⅴ区間での地下水涵養量は3割～6割の大きさであって、地下水涵養量は最大で $10\text{m}^3/\text{s}$ 程度である。ところで、地点Ⅱの河川水位観測所では、渇水時における流水の正常な機能の維持のための流量(維持流量)が $10\text{m}^3/\text{s}$ に設定されていて、この流量の大きさの場合には下流側の支川等からの流入量なども関係するが扇端に流下する間に地下水涵養のため河川流量が維持できない場合も懸念される。

4. あとがき

本論文は、濃尾平野における地下水涵養機能の解明とその保全策の検討に資するため、揖斐川の扇状地での地下水涵養経路や地下水涵養量の地域的特徴について分析した。その結果、主に次述する事項が得られた。

- (1) 揖斐川とその支川等の流量の調査に基づき算定された地下水涵養量は、揖斐川の位況が渇水位から低水位の範囲では $9\sim 16\text{m}^3/\text{s}$ 、低水位から平水位で $4\sim 14\text{m}^3/\text{s}$ 、平水位から豊水位で $6\sim 20\text{m}^3/\text{s}$ 程度の範囲にそれぞれあった。
- (2) 対象地域の地下水位等高線や揖斐川と周辺地下水の溶存イオンの類似性に基づいて、扇頂から扇端に至る広範囲にわたって揖斐川は地下水を涵養す

る傾向にあることを認めた。

- (3) 揖斐川の農業用水を取水する頭首工付近と旧河道付近が水質の類似性が高く、またそれらを含む河川区間で地下水涵養量が全体の7割ほどを占めることが得られ、これらの地域が揖斐川による主要な地下水涵養経路であると考えられた。頭首工の上流側で湛水域が形成され、また、旧河道で地下水流の動水勾配が大きくなる特徴を有していて、これらが地下水涵養量を多くする原因ではないかと考えられた。

参考文献

- 1) 東海三県地盤沈下調査会：平成30年度における濃尾平野の地盤沈下の状況，2019。
- 2) Imaizumi, M., Ishida, S. and Tsuchihara, T. : Long-term evaluation of the groundwater recharge function of paddy fields accompanying urbanization in the Nobi Plain, Japan, *Paddy and Water Environment*, Vol.4, No.4 pp.251-263, 2006.
- 3) 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。
- 4) 神谷浩二，桑山浩幸，井上やおき，井上 裕：濃尾平野における扇状地河川からの地下水涵養量とその地域的特徴，*Kansai Geo-Symposium 2019論文集*，pp.211-216，2019。
- 5) 岐阜大学：平成22年度水資源適正利用調査検討業務報告書(岐阜県)，2011。および、平成23年度水資源適正利用調査検討業務報告書(岐阜県)，2012。
- 6) 神谷浩二，井上やおき，桑山浩幸，井上 裕，小澤広幸，木口喬介：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，*河川技術論文集*，Vol.25，pp.1-6，2019。
- 7) 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：2020-03-26)
- 8) 佐々木崇二：扇状地河川の伏没量について，*ハイドロロジー*，No.6，pp.35-38，1974。
- 9) 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。
- 10) 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没量の定量化，*水文・水資源学会誌*，Vol.25，No.2，pp.89-102，2012。
- 11) 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。
- 12) 神谷浩二，眞鍋 洋，山崎 勲：溶存イオンデータの多変量解析に基づいた広域地下水流動系の評価，*地盤工学ジャーナル*，Vol.9，No.2，pp.219-231，2014。
- 13) 国土地理院：数値地図25000(土地条件)，2006。

(2020. 4. 2受付)