

研究助成実施報告書

助成実施年度	2022 年度
研究課題（タイトル）	濃尾平野の生活基盤を支える地下水資源の涵養機能の将来予測
研究者名※	神谷 浩二
所属組織※	岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 教授
研究種別	研究助成
研究分野	都市環境工学
助成金額	146 万円
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

（ ）は、報告書提出時所属先。

大林財団 2022 年度研究助成実施報告書

所属機関名 岐阜大学

申請者氏名 神谷浩二

研究課題	濃尾平野の生活基盤を支える地下水資源の涵養機能の将来予測
(概要) 濃尾平野の重要な水資源の一つである地下水を持続利用するため、本研究課題では、河川等の地下水涵養の機能の保全について検討したものである。そのため、濃尾平野の北西部の扇状地地域を対象に、河川からの地下水涵養量と灌漑期の水田からの地下水涵養量の状況を分析して、それら地下水涵養量への主な影響要因を特定することによって地下水涵養量の表現手法を検討した。そして、河川では平常時に約 160 万 m^3/day の地下水涵養量が見込まれ、水田では灌漑期に約 20 万 m^3/day であることが得られた。また、地下水涵養量を保全する観点では、特に、河川では河床の透水性等の河道状況を管理し、水田では農地確保と湛水管理が重要であることが示唆された。今後、地下水涵養の機構の検討課題を解決して、地下水涵養機能の具体的な保全策に繋ぐ予定である。	

1. 研究の目的
濃尾平野では、伊勢湾沿岸部を中心に発生した広域地盤沈下に対処するため約 60 年前に法的に揚水量規制が開始されて以降、地下水位の回復と地盤沈下の沈静化が継続している¹⁾。その一方で、揚水量規制地域外(岐阜県等)も含めて生活用水や農業用水などの多くを地下水に依存する現状にあり、地下水は生活基盤を支える重要な水資源の一つである¹⁾。地下水を水資源として持続利用するには、地下水涵養機能を維持・向上させるとともに、気象状況などによって変化する地下水涵養量とのバランスに応じて揚水量を制御して大規模な地下水位低下を抑制する管理が重要である。本研究課題では、濃尾平野北西部に広がる扇状地について、河川の河床からの浸透水や水田の灌漑に伴う底面からの浸透水による地下水涵養機能を評価・予測することによって、扇状地の地下水涵養機能の維持・向上の保全策に提案等に繋ぐ。そのため、河川と水田の地下水涵養の機構を分析しつつ、気象変化や土地利用変化などを要因としたときの地下水涵養量の表現手法を検討する。

2. 研究の経過
対象地域は、図 2-1 に示すように濃尾平野北西部に位置する地域であり、揖斐川とその支川の粕川、根尾川によって形成された扇状地である(岐阜県の揖斐川町、池田町、大野町の地内に対応する地域である)。本研究課題では、地下水涵養源を河川と水田にそれぞれ区別して、地下水涵養量の表現手法等を検討する。なお、当初、広域的な浸透流解析に基づいて河川と水田の両者を統合的に検討する予定であったが、それぞれの地下水涵養量の簡易的な表現手法の検討に主眼を置いた。 <u>2.1 河川による地下水涵養</u> 河川による地下水涵養量は、扇頂から扇端に至る河川区間での河川流量の差および河川に接続する

水路等の流入量・流出量の水収支に基づき求められる。筆者らの既往調査^{2), 3)}では、図 2-1 の揖斐川とその支川の粕川を対象にして、地下水涵養量を求めた。なお、揖斐川では図 2-1 の地点 I-1 から地点 I-2 に至る河川区間、粕川では地点 K-1 から地点 K-2 に至る河川区間にてそれぞれ調査した。本研究課題では、図 2-1 の根尾川(揖斐川の支川)における地下水涵養量を追加して調査し、対象地域における河川からの地下水涵養機構など検討した。

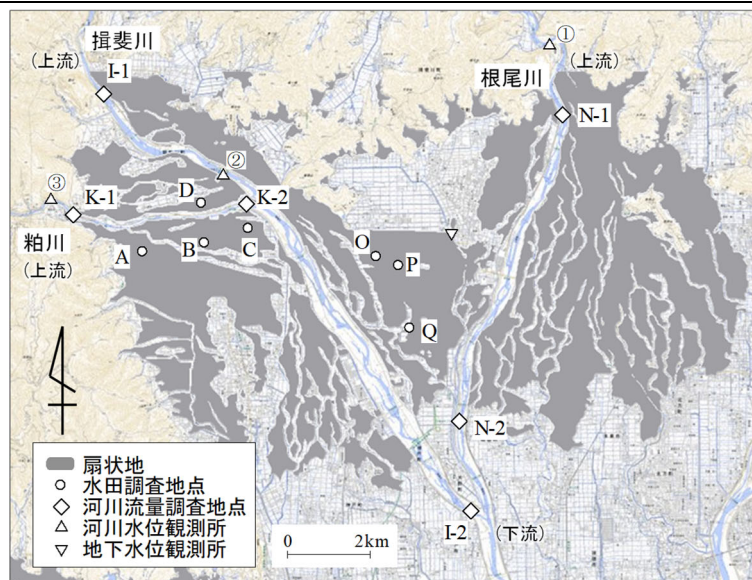


図 2-1 対象地域

2.1.1 根尾川の地下水涵養量： 根尾川からの地下水涵養量を把握するため、

図 2-1 の扇頂付近の地点 N-1 と扇端付近の地点 N-2 のそれぞれにおいて、電磁流速計法を用いて河川流量 Q_{N-1} (m^3/s) と Q_{N-2} (m^3/s) を調査した(写真 2-1 参照)。また、地点 N-1 と地点 N-2 の河川区間において、接続水路(1 箇所)の根尾川への流入量 Q_I (m^3/s) を調査した。そして、地下水涵養量 Q_r (m^3/s) は、河川からの蒸発量は微少であると仮定して無視し、 $Q_r = (Q_{N-1} - Q_{N-2}) + Q_I$ の算定式によって求めた。河川流量調査は、根尾川の位況が低水位から平水位の範囲にあった 2023 年 11 月 21 日と 12 月 14 日に計 2 回の調査を実施した。



写真 2-1 河川流量調査(地点 N-1)

2.1.2 河川の地下水涵養に及ぼす影響要因： 揖斐川、粕川、根尾川の河川による地下水涵養量の実態の意味等を解釈して表現手法を検討するため、浸透流解析に基づいて、地下水涵養量に影響する主な要因を分析するとともに、河床からの浸透挙動について考察した。

MODFLOW などの解析コードを用いた地下水流動解析では、河川による単位長さあたりの地下水涵養量 Q_r ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$) は、 $Q_r = k_b / D \cdot H_b B$ の関係を用いて算定される場合がある⁴⁾。ここで、 k_b (m/s) は河床堆積層の透水係数、 D (m) は河床の堆積層の厚さ、 H_b (m) は河川の湛水深、 B (m) は河川幅である。即ち、地下水涵養量には、河床の透水性、水理境界条件としての河川水位、浸透面積が主に影響することを表現したものである。これを参照して、本研究課題では、河床の透水係数、水理境界条件としての河川水位と地下水位の 3 要因に着目して、これらの地下水涵養量への影響を調べた。

河川からの地下水涵養量を表現するために、鉛直一次元下向き流れの非定常不飽和浸透流解析を実施した。地盤モデルに関して、上部に厚さが 0.5m の河床堆積層を設定して、その下部に 29.5m の範囲の礫層を設定した。解析に必要な地盤パラメータの飽和透水係数について、礫層の透水係数 k_g (m/s) は $5 \times 10^{-4} \text{m/s}$ (既往調査データを参考(揖斐川・河川堤防の浸透に対する安全性の詳細点検結果・土質試験データを引用))とし、河床堆積層の透水係数 k_b (m/s) は礫層の k_g の 1/100~1 倍の範囲にあると仮定した。水分特性曲線は、参考文献 5) に例示された土の種類によるものを用いて、それに関数モデルである van Genuchten 式⁹⁾をフィッティングさせたときの圧力水頭 h_p (m) と体積含水率 θ の関係を用いた。そして、地盤モデルの地表面には河川の湛水深 H_b を 0.1m~0.9m の範囲で一定にして与え、下方には

地下水位 h (m) を G.L.-5m～G.L.-20m の範囲で一定にして与えた。そして、浸透流解析によって河床堆積層の下面の流量としての地下水涵養量 Q_{ra} ($\text{m}^3/\text{day}/\text{m}^2$) を求め、河床堆積層の透水係数 k_b 、河川の湛水深 H_b 、地下水位 h のそれぞれの影響を分析した。また、浸透流解析によって得られた圧力水頭分布などに基づき、河床堆積層と礫層での浸透挙動の特徴などを整理した。

2.2 水田による地下水涵養

水田による地下水涵養量は、水田の水収支の調査に基づく従来手法⁷⁾に対比して、水田土壌の透水性と保水性、灌漑期の湛水深や周辺の地下水位のデータを用いたときの浸透流解析によって評価した。筆者らの既往の調査⁸⁾では、図 2-1 の地点 A、地点 B、地点 C、地点 D において原位置透水試験によって現場透水係数を評価して、水田土壌の透水性などを分析した。本研究課題では、図 2-1 の地点 O、地点 P、地点 Q において、水田を対象に、灌漑期の湛水深、水田地表付近の透水性や保水性を調べてそれらの特徴を分析し、また、浸透流解析に基づき地下水涵養量の推定を試みた。

2.2.1 水田の透水性・保水性と灌漑期の湛水深の調査： 水田の作土層と鋤床層の現場飽和透水係数 k_{fs} (m/s) を求めるため、原位置透水試験を実施した。この透水試験は、Noborio et al.⁹⁾、竹下ら¹⁰⁾が示した装置・方法に基づいたものである。作土層と鋤床層のそれぞれの地表面に円筒管(長さ 1m, 内径 $\phi 0.1\text{m}$ のアクリル製)を設置して、円筒管に湛水(水道水を使用)して地表面から鉛直浸透させ、このときの円筒管の水位の経時変化を水位計によって測定する(写真 2-2 参照)。 k_{fs} は、その水位の経時変化を用いて算出される^{9), 10)}。透水試験終了後には、乱さないように採取した土試料の湿潤密度と含水比、土粒子密度をそれぞれ調べ、乾燥密度 ρ_d (g/cm^3) と間隙比 e を求めた。乾燥密度は、地点 O、P、Q において、作土層では $\rho_d = 1.2 \sim 1.3 \text{g}/\text{cm}^3$ 程度の範囲にあり、鋤床層では $\rho_d = 1.5 \sim 1.6 \text{g}/\text{cm}^3$ 程度にあった。なお、これら試験は 2023 年 10 月～11 月の非灌漑期にて実施した。また、上記透水試験に併せて地点 O、P、Q の作土層と鋤床層で採取した土試料を用いて、保水性試験(蒸発法(試験装置には市販の hyprop(METER 社)を使用))を実施して、水分特性曲線を調べた。一方で、2023 年 5 月～9 月の灌漑期に地点 O、P、Q の水田の地表面に水位計を設置して、灌漑期の湛水深 H_f (m)(毎時)を調べた(写真 2-3 参照)。



写真 2-2 原位置透水試験(地点 O)



写真 2-3 湛水深調査(地点 P)

2.2.2 水田の地下水涵養量とその影響要因： 地点 O、P、Q のそれぞれにおける地下水涵養量を推定するために、鉛直一次元下向き流れの非定常不飽和浸透流解析を実施した。

浸透流解析の地盤モデルは、上部に水田を想定して作土層と鋤床層でそれぞれ厚さ 0.2m を設定し、その下部に 14.6m 範囲の礫層を設定した。解析に必要な地盤パラメータの飽和透水係数は、水田では上記の透水試験で得られた k_{fs} の値に基づき設定し、礫層の透水係数 k_g は $5 \times 10^{-4} \text{m/s}$ (既往調査データを参考(揖斐川・河川堤防の浸透に対する安全性の詳細点検結果・土質試験データを引用))とした。水分特性曲線は、水田では上記の保水性試験で得られたデータに対して、また礫層は参考文献 5) に例示された土の種類によるものを用いて、それぞれ関数モデルである van Genuchten 式⁶⁾をフィッティングさせたときの圧力水頭 h_p (m) と体積含水率 θ の関係を用いた。

浸透流解析では、各地点において、地盤モデルの地表面には調査した湛水深の値を圧力水頭として与え、その下方には地下水位を圧力水頭として与えた。なお、地下水位は、筆者らの既往調査¹¹⁾によ

って得られた地下水位等高線と観測所(図 2-1 参照)の地下水位データを用いて各地点について推定したものである。そして、浸透流解析によって水田の鋤床層の下面の流量としての地下水涵養量 Q_f (mm/day)(単位面積あたり)を推定して、水田の湛水深 H_f 、地下水位 h のそれぞれの影響を分析し、また、水田と礫層の浸透挙動の特徴などを整理した。

2.3 地下水涵養量の予測

上記の結果に基づき、河川と水田のそれぞれの地下水涵養量に影響する主な要因を特定して、その要因によって地下水涵養量を推定する手法を検討した。そして、気象変化や土地利用変化を考慮しつつ、将来の地下水涵養機能の維持・向上について言及した。

3. 研究の成果

3.1 河川の地下水涵養

図 3-1 は、揖斐川、粕川、根尾川における地下水涵養量 Q_r (m^3/s)を各河川の観測河川水位 H (m)(図 2-1 の河川水位観測所①～③での零点高さを基準にした河川水位)に対して示したものであり、図 3-2 にはその地下水涵養量を河川区間距離で除して求めた単位距離あたりの地下水涵養量 Q_r^* ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}$)を示した。地下水涵養量は、揖斐川では $4\sim 20\text{m}^3/\text{s}$ 程度の範囲にあり、粕川では $0.8\sim 5\text{m}^3/\text{s}$ 程度、根尾川では $4\text{m}^3/\text{s}$ 程度であった。単位距離あたりでは、揖斐川では $0.3\sim 1.3\text{m}^3/\text{s}/\text{km}$ 程度、粕川では $0.2\sim 1.2\text{m}^3/\text{s}/\text{km}$ 程度、根尾川では $0.5\text{m}^3/\text{s}/\text{km}$ 程度であり、3 つの河川では比較的近い値を示した。ところで、図 3-1 や図 3-2 によれば、地下水涵養量は河川水位の上昇によって増加する傾向にみられるが、例えば揖斐川では同程度の河川水位のときに地下水涵養量が数倍異なるなどするため、地下水涵養量には河川水位のみならず種々の要因が影響するとみられる。

図 3-3 と図 3-4 のそれぞれは、浸透流解析によって得られた地下水涵養量 Q_{ra} ($\text{m}^3/\text{day}/\text{m}^2$)の値を、解析条件でもある河床堆積層と礫層の透水係数比 k_b / k_g 、河川の湛水深 H_b のそれぞれに対して示したものである。河川からの地下水涵養量は、河床堆積層の透水係数が小さくなる場合、地下水位が高い場合、湛水深が小さい場合のそれぞれの条件によって減少する傾向が認められる。この原因は、各状況によって飽和浸透流あるいは不飽和浸透流に変化し、また、河床堆積層での動水勾配が増減することによると考えられる。特に、湛水深(河川水位)や地下水位に比べると、河床堆積層の透水係数の地下水涵養量への影響が強く現れる傾向にあり、出水等に伴うその透水性の変化が

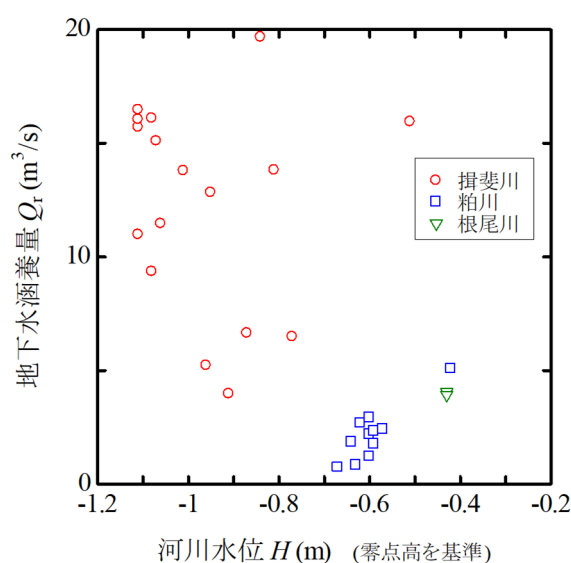


図 3-1 河川からの地下水涵養量

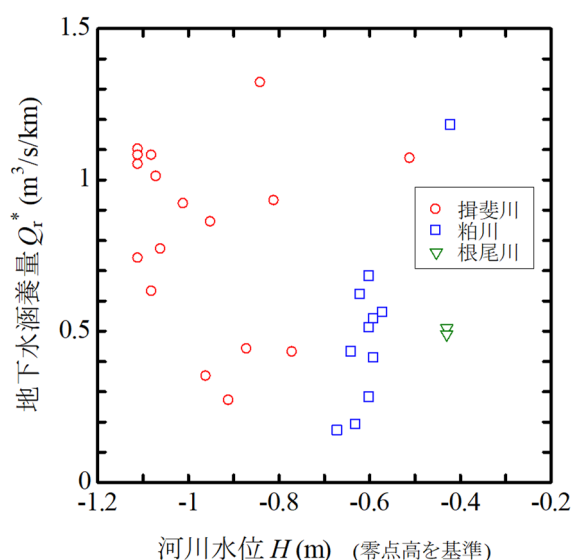


図 3-2 河川からの地下水涵養量(単位距離あたり)

図 3-1 の同じ河川水位のときに地下水涵養量が異なる理由の一つではないかと考えられる。今後、河川による地下水涵養量の表現・予測手法の構築に向けて、河床堆積層の透水性とともに流砂などの堆積などによる河床変化について検討する必要がある。

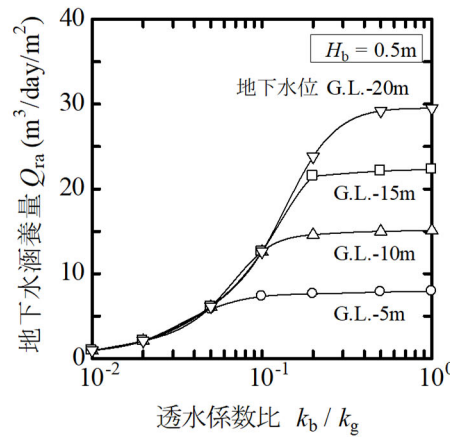


図 3-3 河床の透水性と地下水涵養量

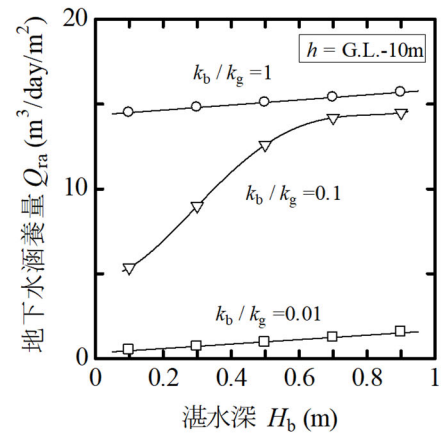


図 3-4 河川の湛水深と地下水涵養量

3.2 水田の地下水涵養

図 3-5 は、地点 O～Q について間隙比 e に対して現場飽和透水係数 k_{fs} の値を示したものであり、既往調査⁸⁾にて揖斐川扇状地の揖斐川右岸側の地域の地点 A～D の水田において調べた k_{fs} の値を併せて示した。鋤床層では e が 0.6～0.7 程度の範囲で k_{fs} は $3 \times 10^{-7} \text{m/s} \sim 3 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 程度の 1 オーダーの範囲にあり、作土層では $e = 0.7 \sim 1.1$ 程度の範囲で k_{fs} は $8 \times 10^{-8} \text{m/s} \sim 1 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 程度の 2 オーダーの範囲にあり、鋤床層に比べると間隙比と現場飽和透水係数の範囲が広がる傾向にある。図 3-6 は、地点 O～Q について圧力水頭 $|h_p|$ (m) と体積含水率 θ の関係による水分特性曲線を示したものである。圧力水頭が 0～10m 程度の範囲のとき体積含水率は 0.5～0.35 程度の範囲で変化し、保水性が非常に高いことが確認される。また、同じ体積含水率のときに鋤床層に比べると作土層の圧力水頭が大きくなり、作土層の方が保水性は高い傾向にある。次に、図 3-7 は、地点 O～Q について湛水深 H_f の経時変化を示したものである。地点 O では 0～0.1m 程度の範囲で変化し、地点 P では 0～0.15m 程度、地点 Q では 0～0.2m 程度の変化である。湛水深の変化には用水路からの流入や降水などが影響し、また、地点によって中干し時期が異なるなど湛水管理の状況は様々であった。なお、図 3-7 には、対象地域にある地下水位観測所(岐阜県管理)における地下水位 h (T.P.m)(毎時)の経時変化を重ね合わせて示した。

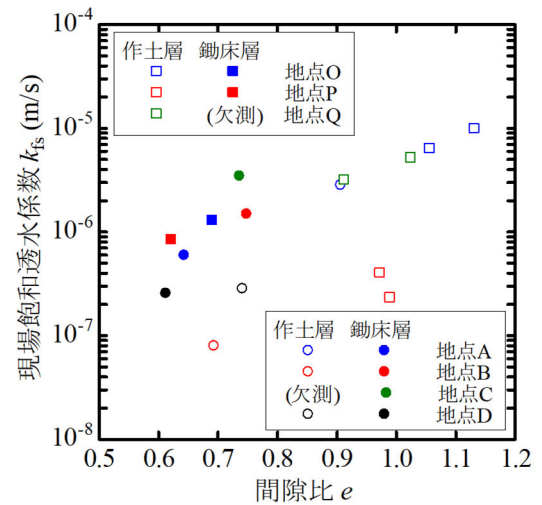


図 3-5 水田土壌の透水係数

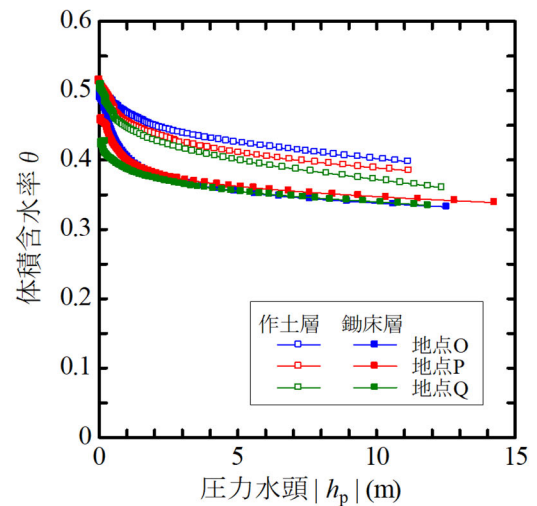


図 3-6 水田土壌の水分特性曲線

そして、図 3-5～図 3-7 のデータを用いて浸透流解析によって推定した地下水涵養量 Q_r の経時変化を示したのが図 3-8 である。なお、浸透流解析で用いた透水係数は、図 3-5 に基づき平均的な値とし、作土層では $1 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 、鋤床層では $1 \times 10^{-6} \text{m/s}$ とした。地下水涵養量は、地点 O では 5～10mm/day 程度の範囲で推移し、地点 P と地点 Q では 5～20mm/day 程度である。一方で、浸透流解析で得られた圧力水頭の鉛直方向の分布を調べると、圧力水頭は作土

層上面では湛水深によって正值を示すが、深さ方向で徐々に小さくなり、鋤床層・礫層では負値を示す傾向にあった。即ち、保水性が低く透水性が高い礫層の上部に保水性が非常に高く透水性が非常に低い鋤床層や作土層が存在する地層構造では、水田の表面付近では湛水の影響があつて飽和浸透流が生じるが、その下部では不飽和浸透流が生じ易くなることが考えられる。

次に、図 3-8 の地下水涵養量 Q_f を目的変数、図 3-7 の水田の

湛水深 H_f と地下水位 h を説明変数としたときの線形重回帰式を用いて、最小二乗法によって回帰分析を実施した。その結果、地下水涵養量は、「 $Q_f = 84.1H_f + 0.18h$ 」の関係式によって良好に再現できることが認められた。この関係式によれば、 $H_f = 0 \sim 0.2\text{m}$ の範囲のとき地下水涵養量を $0 \sim 16.8\text{mm/day}$ の範囲で変化させ、 $h = \text{T.P.}18.3\text{m} \sim \text{T.P.}19.4\text{m}$ の範囲(図 3-7 参照)のとき $3.3 \sim 3.5\text{mm/day}$ の範囲で変化させる影響にあつて、地下水位に比べると湛水深の影響が強く現れる。

3.3 地下水涵養機能の保全

揖斐川とその支川の粕川、根尾川による扇状地では、平常時には河川から約 $160 \text{ 万 m}^3/\text{day}$ の地下水涵養量が見込まれた。しかしながら、地下水涵養量には、河川水位と地下水の水利境界条件に加えて、河床の透水性の影響が大きいことが得られた。更に、地下水涵養量には、河川の浸透面積としての水域面積も影響する。即ち、河川の地下水涵養機能を検討するうえで、河床変動も含めた河道状況を管理することが重要である。

一方、水田の地下水涵養量には、灌漑に伴う湛水深が大きく影響することが特定された。また、浸透面積に対応する水田の水稻栽培面積も影響する。対象の扇状地では、近年の水稻栽培面積は約 $2,500\text{ha}$ であり、単位面積あたりの地下水涵養量を 8mm/day (湛水深 0.1m を仮定)とすると、全体の地下水涵養量は約 $20 \text{ 万 m}^3/\text{day}$ であることが算出され、これは河川の地下水涵養量の 1 割程度に相当する。水稻栽培面積が減少傾向にある中で、水田の地下水涵養機能の保全には、農地面積の確保と湛水管理が重要となる。

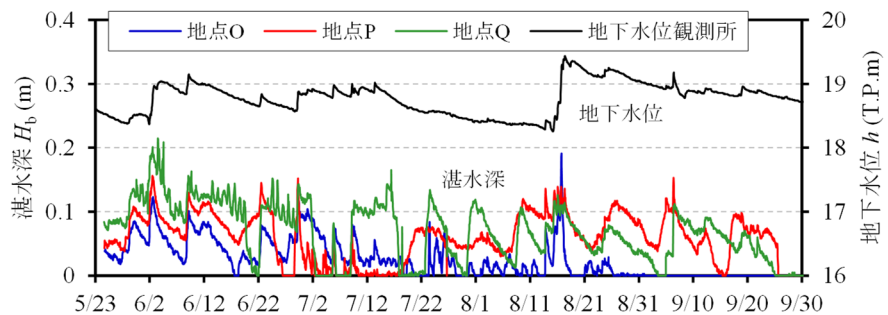


図 3-7 水田の湛水深の変化

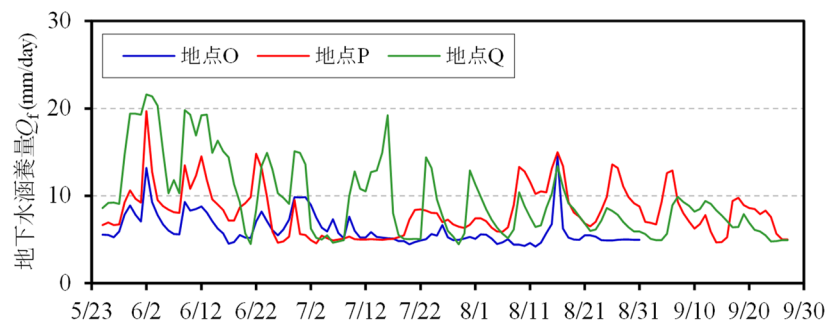


図 3-8 水田の地下水涵養量

4. 今後の課題

本研究課題では、将来の地下水涵養量の具体的な予測手法の構築に至ることができなかったが、河川と水田の地下水涵養への影響要因を抽出して、その機能保全のための必要な手段等に言及した。地下水涵養機能の保全の視点では、河川では河道整備において河川水位の維持に加え河床の状況を把握

するなど河道特性の管理の重要性を見出し、また、水田では農地確保と湛水管理の重要性を明らかにした。今後、地下水涵養の機構の解明のために河床の透水性評価や水田の湛水管理のあり方、気象条件による河川水位・灌漑湛水の変化の影響などの個別課題の検討を継続する予定である。そして、地域の地下水涵養機能の維持・向上に向けた対策などに言及したいと考えている。

【参考文献】

- 1) 東海三県地盤沈下調査会：令和4年における濃尾平野の地盤沈下の状況，2023.
- 2) 井上 裕，神谷浩二，桑山浩幸，宮川省三，木口喬介：濃尾平野の揖斐川による地下水涵養機構の地域特性，河川技術論文集，Vol.26，pp.1-6，2020.
- 3) 神谷浩二，川合厚志，井上 裕，小島悠揮：濃尾平野における渇水時の中小河川の地下水涵養特性，河川技術論文集，Vol.28，pp.331-336，2022.
- 4) 藤縄克之 監訳：地下水モデル，共立出版，pp.74-79，1994.
- 5) 国土技術センター：河川堤防の構造検討の手引き(改訂版)，pp.51-56，2012.
- 6) van Genuchten, M. Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society of America Journal, Vol. 44, pp. 892-898, 1980.
- 7) 天野弘基，市川 勉，平野葉一，中川 啓：阿蘇南郷谷における水循環への水田の影響について，土木学会論文集 G(環境)，Vol.76，No.5，pp.I_495-I_503，2020.
- 8) 神谷浩二，高見一輝，伊藤廉真，小島悠揮：濃尾平野扇状地における水田の透水特性と地下水涵養量，Kansai Geo-Symposium 2022 論文集，pp.41-46，2022.
- 9) K. Noborio, Y. Ito, H. He, M. Li, Y. Kojima, H. Hara and M. Mizoguchi : A new and simple method for measuring in situ field-saturated hydraulic conductivity using a falling-head single cylinder, Paddy and Water Environment, Vol.16, No.1, pp.81-87, 2018.
- 10) 竹下祐二，三木愛実，池田 結：簡易型変水位透水試験による現場飽和透水係数の原位置測定方法，土木学会論文集 C(地圏工学)，Vol.77，No.3，pp.314-324，2021.
- 11) 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.