

研究助成実施報告書

助成実施年度	2020 年度
研究課題（タイトル）	濃尾平野の扇状地における水田地帯の地下水涵養効果とその保全策
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	148 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2020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	濃尾平野の扇状地における水田地帯の地下水涵養効果とその保全策
(概要)	
<p>濃尾平野では、1994年に経験したような異常渇水時の地盤沈下再進行に対処しながら地下水を水資源として持続利用するには、気象状況等によって変化する地下水涵養量に応じて地下水利用量を制御するとともに、地下水涵養機能を保全することが重要である。本研究では、濃尾平野の扇状地を対象に、水田の灌漑に伴う地下水涵養量やその機構を分析した。扇頂、扇央、扇端に位置する水田のそれぞれで浸透能を調査してそれに基づき地下水涵養量を評価する手法を検討した。更には、水田の作付状況と地下水涵養量の関係を考察した。そして、水田の作土層に比べると鋤床層の透水性が高い特徴が得られ、特に旧河道に位置する地点では鋤床層の透水性が高めになることが明らかになった。また、地下水涵養量は旧河道に位置して扇頂や扇央付近で多くなることが予測された。一方で、水田の水稻作付面積の減少に伴い地下水涵養量が減少傾向にあるが、耕作放棄地の湛水事業等の実施による地下水涵養量保全が期待された。</p>	

1. 研究の目的
<p>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工業用水法や条例によって揚水量が規制され、それに伴い地下水位の回復と地盤沈下の沈静化が続いている¹⁾。一方で、揚水量規制地域外(岐阜県地域)などでは、上水道、農業用水や工業用水等における地下水利用ニーズは継続していて、地下水は濃尾平野において重要な水資源の一つとして位置付けられる。そのため、1994年に経験したような異常渇水時の地下水位低下と地盤沈下再進行に備えながら地下水を持続利用するには、揚水量を規制する従来の考え方に対比して、気象状況等によって変化する地下水涵養量に応じて大規模な地下水位低下を防止しながら揚水量を制御することが重要である。本研究の全体構想は、濃尾平野の扇状地における地下水涵養機能を解明するとともに、将来の気象変化や土地利用変化による地下水涵養量を予測して、地下水涵養機能の保全策を究明するものである。</p> <p>主な地下水涵養源には、扇状地における灌漑期の水田の底面からの浸透水、河川の河床からの浸透水、畑地等の降雨による浸透水などが挙げられる。筆者らは、濃尾平野の扇状地において掛斐川や長良川による地下水涵養量等を明らかにしてきた^{2), 3)}。本研究課題は、濃尾平野扇状地の水田灌漑を対象に、水田の透水性評価や地下水涵養を表現する浸透流解析に基づき、地下水涵養の地域性やその機構を分析したものである。更に、水田の作付状況と地下水涵養量の関係について言及した。</p>

2. 研究の経過

対象地域は、図 2.1 に示すように濃尾平野の北西部に位置する粕川(揖斐川の支川)の扇状地である。図 2.2 は、対象地域でのボーリング柱状図の例を示したものであり、ボーリング調査地点を図 2.1 に併記した。扇状地は、粘性土が介在する場合があるが、厚い礫質土によって構成される。また、地形地質分類図⁴⁾によれば、図 2.1 に示したように、対象地域では粕川の旧河道が入り組んで存在している。

2.1 地下水涵養量の評価

水田からの地下水涵養量は、従来、用排水路や降雨からの水田への流入量、水田からの用排水路への流出量、水田の減水深、蒸発散量の測定に基づいた水収支によって推定される⁵⁾。しかしながら、水田の畦畔から排水路等への漏水が懸念され上述の水収支評価のための漏水量の把握が困難な場合があるとみられ、本報告では次の方法による地下水涵養量の推定を検討した。非灌漑期の水田において、地表面に設置した円筒管に湛水させる透水試験を実施してその透水性に基づき浸透流解析によって地下水涵養量を推定するものである。

2.1.1 水田における透水試験

透水試験の実施地点は、図 2.1 に併記したように、粕川の扇頂付近に位置する地点 A、扇央付近の地点 B と地点 C、扇端付近の地点 D の計 4 地点とした。図 2.1 に示したように、地点 A、B、C は粕川の旧河道付近に位置する。そして、水田の地表から約 0.2m 深さの範囲にある作土層とその下部の鋤床層(層厚 0.2m 程度とみられる)のそれぞれについて後述の透水試験を実施した。なお、鋤床層の下部には、図 2.2 を参照して、礫質土層が現れる。

表 2.1 は、各地点の作土層と鋤床層のそれぞれの粒度組成を示したものである。なお、地点 C の作土層について、粒度試験および後述の透水試験を実施していないため、本報告ではそれらの結果を示していない。表 2.1 によれば、鋤床層に比べると作土層の細粒分含有率が幾らか高めにある。また、表 2.1 には、100cc サンプラーを用いて土試料を採取して調べた乾燥密度 ρ_d (g/cm³) を併記した。

本報告での透水試験は、Noborio et al.⁶⁾、竹下ら⁷⁾が示した装置・方法に基づいたものである。図 2.3 は透水試験の装置の概要を示したものであり装置の写真を併せて示した。装置は、下部に刃(長さ 0.03m)が付いた円筒管台(内径 ϕ 0.1m の円筒で鋼製)、円筒管(長さ 1m、内径 ϕ 0.1m のアクリル製)、水位計によって構成される。試験では、刃を下向きにした円筒管台を水平になるように

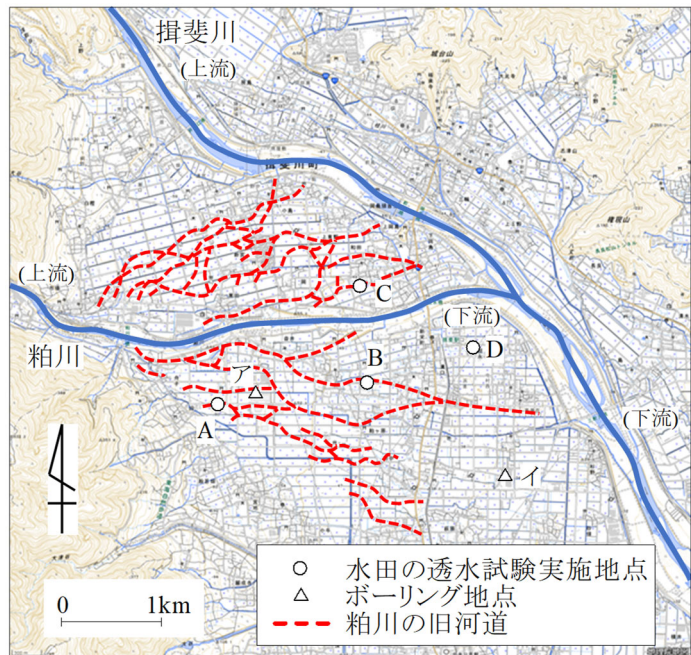


図 2.1 対象地域

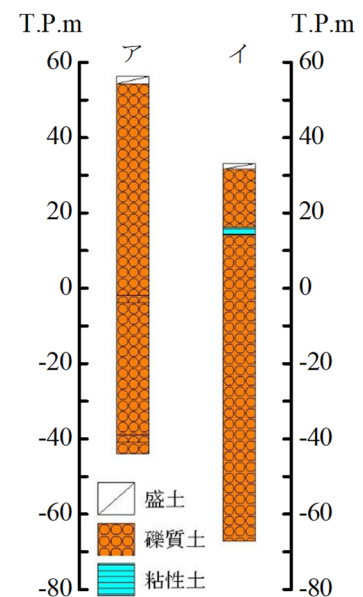


図 2.2 ボーリング柱状図

水田の地表面に打設した後、その上部に円筒管を静かに設置する。そして、円筒管内に湛水して地表面から鉛直浸透させ、このときの円筒管内の水位 H (m)の経時変化を水位計によって測定した。作土層では地表面から 0.05m 程度深さまで掘削して水平にした後に装置を設置し、鋤床層では 0.2m 程度深さに設置した。そして、円筒管の初期水位を地表面から

表 2.1 作土層と鋤床層の粒度組成と乾燥密度

地点	土層	礫分 (%)	砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)
A	作土層	8.3	31.6	36.9	23.2	1.353
	鋤床層	22.2	30.8	35.9	11.0	1.553
B	作土層	14.9	33.9	33.0	18.2	1.507
	鋤床層	10.5	43.6	34.3	11.6	1.510
C	作土層	—	—	—	—	—
	鋤床層	12.5	42.2	31.1	14.1	1.534
D	作土層	3.6	32.3	42.3	21.9	1.479
	鋤床層	4.0	38.9	38.7	18.4	1.610

0.4~0.5m 程度の高さにし、その水位が 0.2m 程度の高さに低下あるいは試験時間が 24hr 程度経過するまで試験を継続した(水位の測定は 10s 間隔)。透水試験は水田の稲刈り後で 2021 年の 10~11 月に実施した。

本報告の透水試験は変水位型であるが、後述する図 3.1 の透水時の水位 H の経時変化は直線的であり、地盤への浸透流量がほぼ一定であった定常浸透に近いとみられた。そのため、後述の図 3.1 の水位変化を縦軸方向で 10 分割して、各々の水位変化量 ΔH (m) ($\Delta H = 0.005 \sim 0.04$ m の範囲にある)とその ΔH に対応する時間間隔 Δt (s) のそれぞれの値を用いて浸透流量 Q_s (m³/s) = $\Delta H / \Delta t \cdot A$ (ここで A (m²)は円筒管の断面積)を求め、次の定常浸透に関する次式^{7),8)}によって、各水位変化量に対応する現場飽和透水係数 k_{fs} (m/s) を算出した。

$$k_{fs} = \frac{\alpha G Q_s}{r_0 \alpha H + r_0 + G \alpha \pi r_0^2}, \quad G = 0.316 \frac{d}{r_0} + 0.184$$

ここで、 α (1/m)は土の種類によるパラメータ(本報告では $\alpha = 12$)、 r_0 (m)は円筒管の半径、 H (m)は円筒管内の水位(本報告では水位を分割した範囲での最大値と最小値の中間の値)、 d (m)は円筒管台の刃の地表面からの挿入深さである。但し、透水開始時は地盤が不飽和状態であるため、各 ΔH において算出した k_{fs} の値がほぼ一定になったときの平均を現場飽和透水係数とした。

2.1.2 浸透流解析に基づいた地下水涵養量

2次元飽和不飽和浸透流解析に基づき、上述の図 2.1 の地点 A、地点 B、地点 D を対象に、水田に湛水したときを想定して水田底面からの漏水量としての地下水涵養量を推定した。

図 2.4 は、浸透流解析モデルの概要を示したものである。幅 50m、地表からの深さ 50m の範囲として、水田の幅を 30m、作土層と鋤床層のそれぞれの厚さを 0.2m とした。また、水田下部の土層は、図 2.2 を参照して、礫質土層とした。なお、作土層と鋤土層の側面は不透水境界として扱い設定した。浸透流解析に必要な地盤パラメータには、作土層と鋤床層の透水係数は上述の透

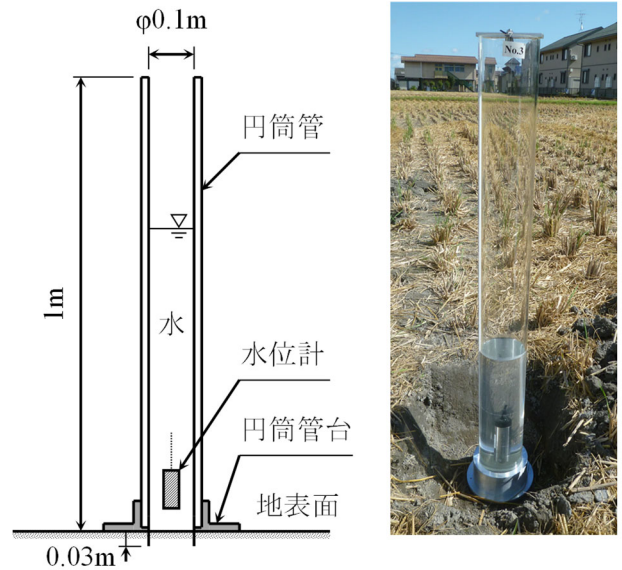


図 2.3 透水試験装置の概要

水試験で得られたものを設定し、礫質土層では既往資料²⁾を参照し $5.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ とした。また、不飽和浸透特性値は、参考文献⁹⁾に例示された土の種類による関係を用いた。そして、図 2.4 の水田の作土層上面に湛水深を想定して 0.2m の圧力水頭を与え、また、地下水位には既往調査の地下水位等高線²⁾を参照して、地点 A では深さ 25m、地点 B では 15m、地点 D では 5m の位置に境界条件として与え、定常解析を実施した。

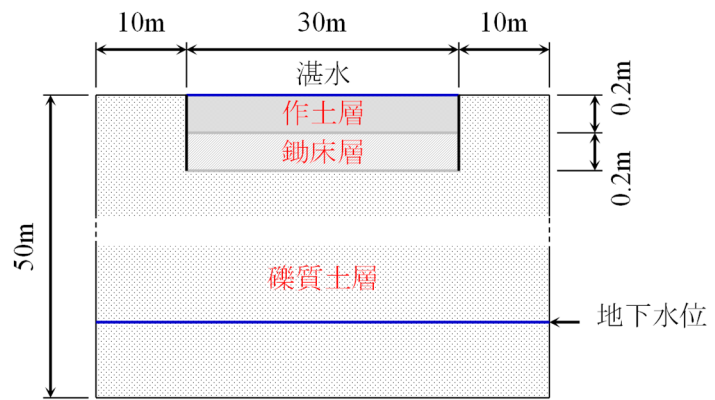


図 2.4 浸透流解析モデルの概要

浸透流解析によって得られる水田底面での下向き流れでの流量の総和を求め、この値に基づき単位面積あたりの日地下水涵養量 Q^* ($\text{m}^3/\text{day}/\text{m}^2$) を算出した。

2.2 土地利用と地下水涵養量

対象地域にあたる岐阜県池田町を対象として岐阜県統計書¹⁰⁾に示された耕地面積(田)と農作物作付面積(水稲)の値を用いて、水田による地下水涵養量の経年的変化の特徴などを考察した。図 2.5 は、耕地面積(田)、農作物作付面積(水稲)の経年変化を示したものであり、両者とも減少傾向にある。そして、上述で求められた単位面積あたりの日地下水涵養量 Q^* の値に農作物作付面積(水稲) (m^2) を乗じることによって対象地域の日地下水涵養量(m^3/day)を算出した。なお、地下水涵養量 Q^* の値は、地点 A、地点 B、地点 D で求められた値の平均とした。

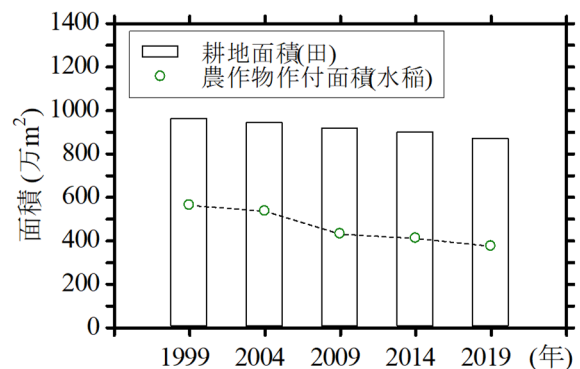


図 2.5 耕地面積と農作物作付面積

3. 研究の成果

3.1 水田における透水性

図 3.1 は、各地点における透水試験で得られた円筒管内の水位 H の経時変化を示したものである。時間 t (s) と H の直線的な関係の傾きを調べると、作土層に比べて鋤床層でのものは、地点 A で約 5 倍、地点 B で約 0.1 倍、地点 D で同程度である。この傾きは浸透速度に相当し、鋤床層での浸透速度の大きさは地点 C, B, A, D の順にある。

図 3.2 は、間隙比 e に対して現場飽和透水係数 k_{rs} の値を示したものである。間隙比は、透水試験後に採取した土試料の湿潤密度、含水比、土粒子密度に基づき求めた。現場飽和透水係数は、 $10^{-7} \sim 10^{-6} \text{m/s}$ のオーダーにあり、下部の礫質土層の透水係数の $1/100 \sim 1/1000$ の大きさにある。また、西田ら¹¹⁾が示したとおり e と $\log_{10} k_{rs}$ の関係は図中の破線のような直線になる傾向にあり、この関係に基づくと同じ間隙比のときの鋤床層の現場飽和透水係数は作土層のもの約 10 倍の大きさにある。一方、鋤床層について、扇端付近の地点 D に対比して、扇頂付近の地点 A、扇中央付近の地点 B や C の順で透水係数が大きくなる。地点 A, B, C は、図 2.1 によれば粕川の旧河道に位置し、また表 2.1 によれば粗粒分が比較的多い粒度を有しているため、これらの地点で透水

性が高くなる原因と考えられる。即ち、旧河道に位置する地点では鋤床層の透水係数が大きめにあって、水田から地下に向かう漏水量としての地下水涵養量が多くなることが予想される。

3.2 地下水涵養量の地域性

浸透流解析に基づいて、地下水涵養量 Q^* は、扇頂付近の地点 A では $0.86\text{m}^3/\text{day}/\text{m}^2$ 、扇央付近の地点 B では $0.21\text{m}^3/\text{day}/\text{m}^2$ 、扇端付近の地点 D では $0.07\text{m}^3/\text{day}/\text{m}^2$ であることが推定された。特に、旧河道に位置する地点 A と地点 B での地下水涵養量が地点 D に比べると多くなる傾向にある。図 3.2 に基づき各地点での作土層と鋤床層の両者の平均的な透水係数を試算すると、地点 A では $9.8 \times 10^{-7}\text{m}/\text{s}$ 、地点 B では $1.5 \times 10^{-7}\text{m}/\text{s}$ 、地点 D では $2.7 \times 10^{-7}\text{m}/\text{s}$ であり、地点 A が最も大きい。また、浸透流解析の境界条件として与えた地下水位は地点 A、地点 B、地点 D の順で深い位置にあるため、水田からの下向きの浸透流の動水勾配も同様に大きくなることが想像される。即ち、透水係数や地下水位の位置によって地下水涵養量が影響されることが推察される。

3.3 地下水涵養量の経年変化とその保全

図 3.3 は、農作物作付面積(水稲)から概算した水田による地下水涵養量の経年変化を示したものである。1999 年の 214 万 m^3/day の日地下水涵養量に対して、2019 年では 143 万 m^3/day であり約 67% の量に減少している。対象地域では、図 2.5 に示したように、耕地面積(田)に対して、農作物作付面積(水稲)の割合は近年で約 45% であり、小麦や大豆の作付面積を除外すると、約 10% が耕作放棄地に相当するとみられる。2019 年では、耕作放棄地の面積は 98 万 m^2 であり、日地下水涵養量に換算すると 37 万 m^3/day である。従って、

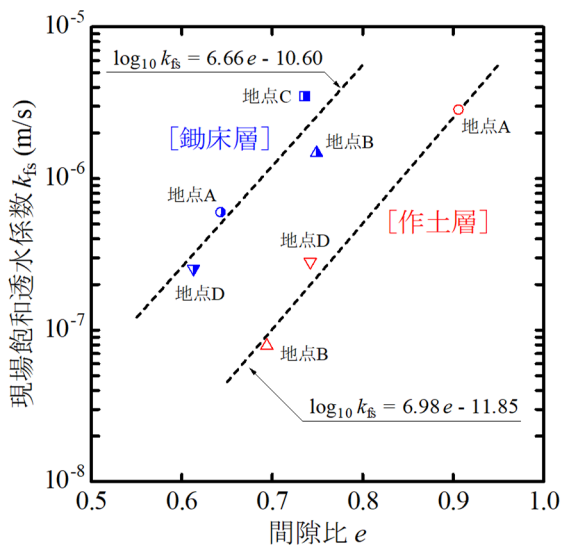


図 3.2 間隙比と現場飽和透水係数

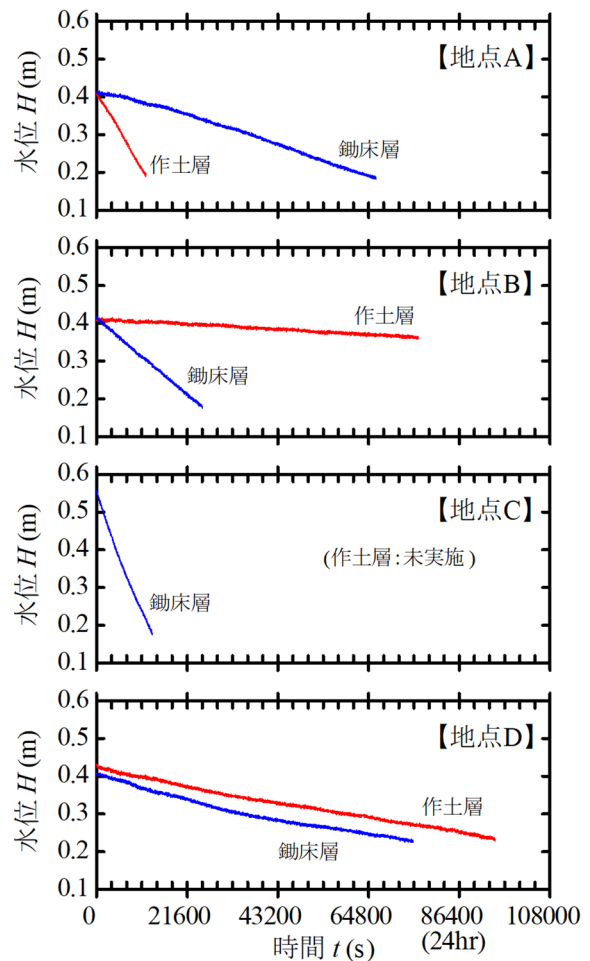


図 3.1 透水試験での管内水位の経時変化

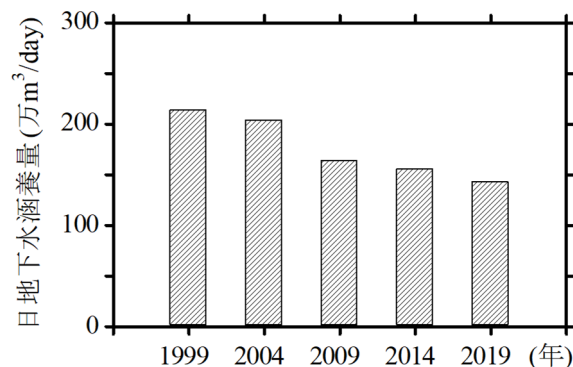


図 3.3 地下水涵養量の経年変化

耕作放棄地の湛水事業等の実施によって2019年の場合を例に日地下水涵養量が1.3倍ほどに増加する可能性が予測される。一方で、非灌漑期に水田に湛水させることによる地下水涵養量の増加も期待される。なお、対象地域では、筆者らの調査によれば、渇水期での揖斐川による日地下水涵養量は約120万 m^3/day にあった²⁾。即ち、水田灌漑や揖斐川が重要な地下水涵養源である。

4. 今後の課題

本研究は、濃尾平野における地下水の水資源としての持続利用のための保全策に資するものであり、地下水涵養源の一つである水田灌漑による効果等を究明したものである。水田による地下水涵養量の評価手法を新たに検討して、その地下水涵養量が他地域事例と比較しても大差ない結果を得たが、従来の評価手法との比較などによって本報告での手法の精度検証等を進める予定である。また、対象地域での扇頂、扇央、扇端の代表地点での透水性評価などに基づいて、地下水涵養量やその機能の地域性が明らかになってきた。広範にわたる水田の透水性評価などを継続して、地域全体の地下水涵養量の適切な評価に繋げることを検討する計画である。一方で、水田による地下水涵養効果の成果に基づき、耕作放棄地の湛水事業、非灌漑期の湛水事業などによる地下水涵養の保全に貢献したいと考える。

【参考文献】

- 1) 東海三県地盤沈下調査会：令和2年における濃尾平野の地盤沈下の状況，2021.
- 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) 桑山浩幸，神谷浩二，井上 裕，小島悠揮：濃尾平野の長良川扇状地における河川と地下水の交流，河川技術論文集，Vol.27，pp.493-498，2021.
- 4) 国土地理院：地理院地図・地形地質分類図(更新版(2007～2021年))，<https://maps.gsi.go.jp/> (参照：2022-03-22).
- 5) 堀 順一，高山 久，渡辺哲子，富樫 均，塩原 孝，斎藤龍司：水田を利用した地下水涵養調査，長野県環境保全研究所研究報告，No.5，pp.39-43，2009.
- 6) Noborio, K., Ito, Y., He, H., Li, M., Kojima, Y., Hara, H. and Mizoguchi, M. : 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.
- 7) 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.
- 8) 地盤工学会：地下水面より上の地盤を対象とした透水試験方法(JGS 1319-2017)，丸善出版，pp.1-35，2018.
- 9) 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.
- 10) 岐阜県：岐阜県統計書(平成12年，平成17年，平成22年，平成27年，令和2年).
- 11) 西田義親，堀文二：粘土の透水係数の一推定式，土と基礎，Vol.9，No.3，pp.34-36，1961.