

新利根川土地改良区における循環灌漑導入に向けた EC の解析

Electric Conductivity Analysis toward Circulated Irrigation Scheme Installation in Shintone River Land Improvement District

加藤 亮* 池田周平** 直江次男***
(KATO Tasuku) (IKEDA Shuhei) (NAOE Tsugio)

I. はじめに

霞ヶ浦に代表されるように、宅地と農業地域を流域内に持つ湖沼の水環境は、生活排水の対策が進んだことにより一時期改善が見られたが、その後、横ばい傾向を示している¹⁾。これは、農地に施用された余剰肥料の影響や、土壌に蓄積した窒素やリンなどの汚濁負荷の影響が長期にわたり継続しているためではないかと考えられている²⁾。したがって、湖沼のさらなる水環境の改善のためには、農業排水の対策が期待されており、水田地帯における循環灌漑は、その対策の一つと考えられている³⁾。

循環灌漑を導入するには、取水、排水の水質と同時に、流出先や受益地内の水質にも気を配る必要がある。下流側に湖沼がある場合、循環灌漑による排出負荷量の低減は、湖沼水環境の向上が期待できるが、灌漑用水としては、循環される負荷が灌漑地区内にとどまるため汚濁が進むと考えられる⁴⁾。流出先である湖沼の水質浄化効果と受益地内の水質の両方が満足するような、循環灌漑を検討する必要がある。

そこで、霞ヶ浦流域内の新利根川土地改良区内の排水ブロックを対象に、湖沼への水質浄化効果と排水ブロック内の負荷の蓄積を解析するために、比較的安価で連続観測可能な電気伝導度 (EC) を測定した。ポンプの稼働量から求めた水収支と合わせ EC の変動を明らかにし、循環灌漑を導入する場合の、霞ヶ浦への水環境保全効果と排水ブロック内の EC の上昇について解析を実施した。

II. 調査概要

1. 調査地概要

新利根川土地改良区 (図-1) は、水郷地帯であるため洪水多発地区である。そのため、常時排水を行うポンプと新利根川 (一部を利根川) からの灌漑用のポンプの複数の揚水機場を設置する国営土地改良事業を通じて、水田稲作が主体の低平地農業地区が展開されて

いる。地区排水は、新利根川を經由して霞ヶ浦へ流入している。土地改良区全体の受益面積は 5,720 ha であり、水田は 5,562 ha である。排水ブロック面積は 2,020 ha であるが、宅地が点在しているので受益面積は 1,620 ha である。

このブロックの主要な用水系統は 2 系統で、一つは新利根川から太田金江津用水機場 (以下、「太田用水機場」という) (6.33 m³/s) を通じて、もう一つは利根川から十平用水機場 (0.69 m³/s) を通じて、それぞれ取水されパイプラインで圃場に灌漑されている (図-1)。排水は中央排水路から金江津排水機場を通じて、新利根川に排水され、その後霞ヶ浦へと流出する。

2. 調査方法

測定期間は 2017 年 1~12 月である。用水機場が稼働した 4 月 16 日から 9 月 15 日を灌漑期、それ以外を非灌漑期とした。連続測定用の水位計 (Onset 社, Hobo U20L 04) と EC 計 (Onset 社, Hobo U24-001) を太田用水機場と金江津排水機場に、十平機場には EC 計のみを設置した。補正用の大気圧測定 (Onset 社, Hobo U20L 04) は、金江津排水機場に設置した。それぞれの測定器具は、水面より 1 m 程度の位置にケースに入れてワイヤーで吊り下げ、月に 1 回データを回収した。金江津排水機場の水位計、EC 計は機場のプールに接続する中央排水路内に設置した。ポンプ稼働量は、各機場の管理月報の値を日データにまとめ

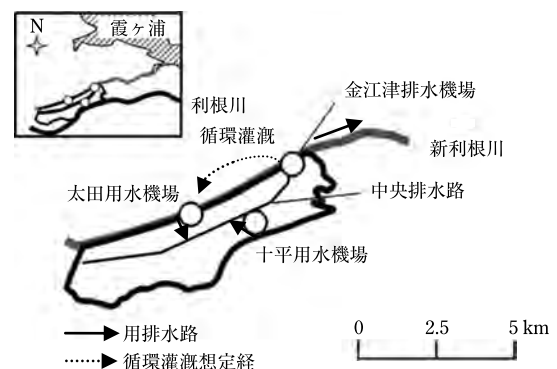


図-1 対象地域概要図

*東京農工大学大学院農学研究院, **東京農工大学大学院農学府
***関東農政局利根川水系土地改良調査管理事務所

湖沼水環境, 循環灌漑, 水収支, 霞ヶ浦, 電気伝導度 (EC)

た。本報では、水収支を求める際にこのポンプ稼働データを利用し、水位計はポンプ稼働の確認として利用している。また、降水量は気象庁の江戸崎観測所(アメダス)の降水量データを使用した。蒸発散量は、つくば(館野)高層気象台のデータを用いてPenman-Monteith式で求めた可能蒸発散量に作物係数1.3を乗じた⁵⁾。

3. 水収支・ECフラックスの算定方法

モニタリングデータとポンプ稼働量をもとに、水収支および日当たりのECフラックスを求めた。ここで、ECフラックスとは、既往の研究にならい^{6),7)}、ECを溶存イオンの総量に比例すると仮定し、水量を乗じて日当たりの負荷量として扱うものである。

排水ブロックを一つの境界とし、水収支、ECフラックス収支を求めた。灌漑期は、降水量、灌漑用水量を流入とし、蒸発散量、排水揚水量を流出として求めた。流入と流出の差分は、排水ブロック内での貯留もしくは系外損失(地下浸透または横浸透)として扱った。ECフラックス収支は、水の流入、流出項目にEC値を乗じて求めた。

$$\Delta ECL = ECL_{in} - ECL_{out} \dots\dots\dots (1)$$

$$ECL_{in} = R \cdot EC_{rain} + Q_1 \cdot EC_1 + \Sigma In \cdot EC_{in} \dots\dots\dots (2)$$

$$ECL_{out} = Out \cdot EC_{out} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 ΔECL (mS m²/d) はブロック内のECフラックスの日当たりの変化、 ECL_{in} 、 ECL_{out} は流入ECフラックス、流出ECフラックスの合計である。 R は降水量(mm/d)にブロック面積2,020haを乗じて、m³/dに単位を変換して求めた。 Q_1 は太田用水機場、 In はその他各用水機場からの流入量で Out は金江津排水量、単位はm³/dである。それぞれ、運転記録から得られた日単位のデータである。 EC_{rain} は降水のEC(平均値3mS/m)、 EC_1 は太田用水機場、 EC_{in} はその他の用水機場、 EC_{out} は金江津排水機場のEC(mS/m)である。

4. 循環灌漑を導入した場合のEC上昇

循環灌漑を導入した際、霞ヶ浦に流出するECフラックスの削減量と排水ブロック内のECの上昇を予測した。循環灌漑の枠組みは、図-1の点線の矢印が示すように、金江津排水機場の排水を、太田用水機場

まで新規パイプラインによる送水を想定している。この際、循環灌漑の取水源は新利根川ではなく中央排水路となる。金江津排水機場の排出量は、通常太田用水機場よりも多く、太田用水機場での取水量を供給することができ、金江津排水機場からの霞ヶ浦へ流出するECフラックスを削減できることを想定している。

同時に循環灌漑を実施すれば、高いEC値を示す金江津排水機場の排水が灌漑用水として反復されるため、結果として排水ブロックのECは上昇すると考えられる。そこで、ECフラックス算定の(2)、(3)式の、太田用水機場の流入ECである EC_1 を金江津排水機場の流出ECである EC_{out} に置き換える。このとき、灌漑用水として取水する分のみを置換えの対象とする。また、 EC_{out} は循環灌漑を実施しない場合と比べると上昇するため、上昇率 α を乗じて、排水ブロック内のECの上昇分を考慮した。

$$\Delta ECL_1 = (ECL_{in} - Q_1 (EC_1 - \alpha EC_{out})) - (ECL_{out} + Out (\alpha - 1) EC_{out}) \dots\dots (4)$$

ここで、 ΔECL_1 は灌漑地区内のECフラックスの変化量であるが、モニタリングデータの結果である ΔECL と同じ値、すなわちブロック内のECフラックスの変化量は現行のままと仮定して α を求める。 α は循環灌漑を実施した際の灌漑地区の流出ECの上昇率とした。計算には、エクセルのソルバーを用いた。

以上により、ECフラックスの算定から、循環灌漑地区内の排水路におけるECの増加分を推定した。

III. 調査結果と削減量の予測

1. 調査結果

ECの通年の平均値は、新利根川を取水源とする太田用水機場で33.4mS/m、利根川を取水源とする十平用水機場で37.7mS/m、金江津排水機場60.1mS/mであった。期別ごとのECを表に示す(表-1)。排水のECが取水より高いことが明らかである。

図-2~4は、1月、5月、9月の金江津排水機場の降水量(mm/d)、水位変動(m)とEC(mS/cm)である。金江津排水機場は、洪水対策のため常時排水が行われており、排水路水位によって自動オン・オフ制御されている。そのため、排水路水位は振動を繰り返す

表-1 各機場のECの値(単位:mS/m)

	太田用水機場			十平用水機場			金江津排水機場		
	非灌漑期 1/1~4/15	灌漑期 4/16~9/15	非灌漑期 9/16~12/31	非灌漑期 1/1~4/15	灌漑期 4/16~9/15	非灌漑期 9/16~12/31	非灌漑期 1/1~4/15	灌漑期 4/16~9/15	非灌漑期 9/16~12/31
平均値	38.6	30.7	31.4	51.8	29.5	25.6	79.2	50.5	55.4
標準偏差	4.0	6.4	2.7	6.8	8.4	2.9	12.1	7.6	11.7
最小	17.4	2.6	3.7	24.2	12.7	23.2	33.8	17.2	8.6
最大	43.5	56.0	37.6	65.7	61.0	35.1	111.9	75.4	70.8
標本数	249.6	369.5	129.6	249.6	369.6	39.9	249.6	369.6	256.8

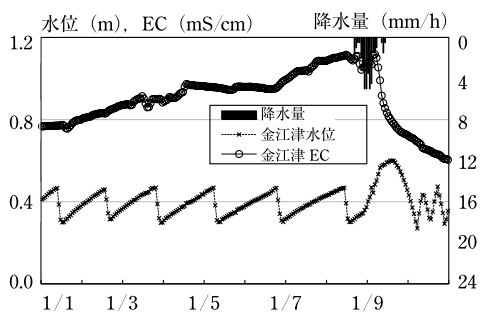


図-2 金江津排水機場の水位と EC (2017 年 1 月)

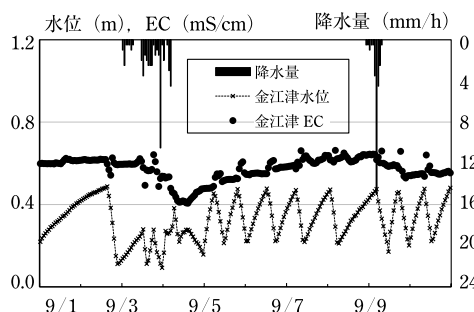


図-4 金江津排水機場の水位と EC (2017 年 9 月)

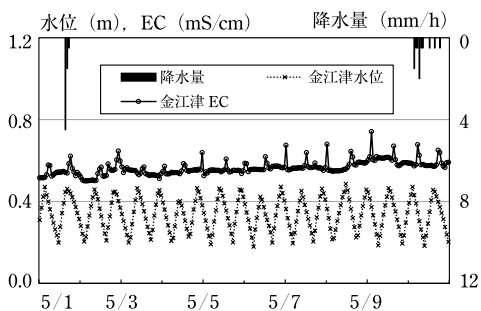


図-3 金江津排水機場の水位と EC (2017 年 5 月)

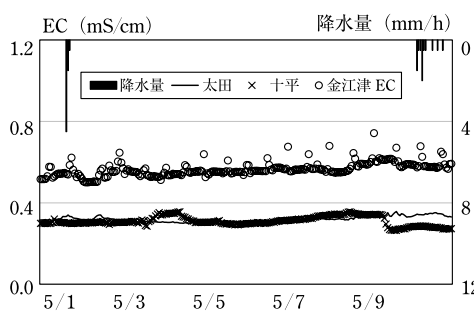


図-5 各機場の EC (2017 年 5 月)

挙動を示している。1 月は無降水期間が長く、排水ブロックからの流出量が少ないため、ポンプの稼働間隔が長く水位の回復が遅い。EC は 100 mS/m を超える時期もあり、流域からの排水が減少するほど高くなる。地下水の EC が高いと考えられ、降水によって希釈される状況が観測された。一方、田植え後の 5 月や台風時の 9 月を見ると、EC は 60 mS/m あたりに低下し、ポンプの稼働に伴い変動するのが見て取れる。これは、底泥などがポンプ稼働時に巻き上げられ、ポンプ稼働により水位が低下する際に流速が発生し、EC が針状のような急激な上昇を示し、ポンプ停止とともに元の濃度に回復するものと考えられる。

金江津排水機場の灌漑期と非灌漑期を EC で比較すると、灌漑期は平均 50.5 mS/m、非灌漑期は灌漑期前は平均 79.2 mS/m、灌漑期後は平均 55.4 mS/m であり、灌漑用水による水質希釈効果が見られた。水田の多面的機能の一つである浄化機能が働いている場合もあるので、その数値的な検討は今後の課題としたい。

一方、太田・十平の用水機場は、河川から直接取水

していることもあり、EC に大きな特徴的な変動は見られなかった (図-5)。

2. 水・EC フラックス収支の解析

水収支の結果を表に示す (表-2)。非灌漑期は、湿地に近い状態であると仮定し Penman-Monteith 式で求めた蒸発量をあてはめた。用排水機場の揚水量を実データから求めたところ、おおむね排水ブロックの収支がつりあった。若干のマイナスがあるため、ブロックへの系外からの流入量を計上しているが、今後長期観測を行うことで補正できると考えられる。

次に、EC フラックスの収支解析を示す (表-3)。EC フラックスにおいては、年間を通じて流出フラックス量が灌漑用水を通じた流入フラックス量を上回っていた。 ΔECL がマイナスの場合、ブロックからの流出フラックスが流入フラックスを上回る。このフラックスの発生源は、土地利用状況から、水田における施肥、レンコン畑としての利用、宅地からの排水などと仮定している。今後、これらの値を特定できれば、収

表-2 年間および期別水収支 (上段単位: 10^6 m^3)

	流入		流出		残差
	降水量	用水機場	蒸発散	排水機場	
通年	24.6 1,216 mm	24.5	16.8 832 mm	35.0	-2.7 流入
灌漑期 4/16~9/15	8.4 416 mm	23.8	10.8 534 mm	21.2	0.2 流出
非灌漑期 1/1~4/15, 9/16~12/31	16.1 800 mm	0.7	6.1 300 mm	13.8	-3.0 流入

表-3 年間および気別 EC 負荷収支 (上段単位: 10^3 S m^2 , 下段 mS/m)

	流入 (ECL_{in})		流出 (ECL_{out})		残差 (ΔECL)
	降水負荷	用水機場負荷	排水機場負荷	ブロック内貯留変化	
通年	73.7 平均 EC 3	772 平均 EC 31.5	1,882 平均 EC 60.0		-1,038
灌漑期 4/16~9/15	25.2 平均 EC 3	751 平均 EC 31.5	1,109 平均 EC 52.9		-334
非灌漑期 1/1~4/15, 9/16~12/31	48.4 平均 EC 3	22 平均 EC 29.4	773 平均 EC 66.1		-704

支がつりあうことが期待できる。フラックスの発生量は施肥やバイオマスの分解が原因であると考えれば、灌漑期 ($334 \times 10^3 \text{ S m}^2$) は非灌漑期 ($704 \times 10^5 \text{ S m}^2$) よりも、排水ブロックでのフラックス発生量が減少している。水田の自然浄化作用を示唆している可能性がある。灌漑期は 52.9 mS/m であり、非灌漑期の 66.1 mS/m より下がることが実測より示されている。

水田地帯の排水ブロックの EC は河川水 (新利根川の灌漑期平均 EC は 31.5 mS/m) よりも高く、農家には、循環灌漑は栽培上好まれない可能性がある。どの程度上昇するのか見積もりが必要である。次節では EC フラックス収支に基づき、湖沼へのフラックス軽減と、水田ブロック内の EC の上昇を解析する。

3. シナリオ解析

EC フラックス収支解析をもとに、取水先を中央排水路 (金江津排水機場) から循環すると想定し (図-1), EC フラックスの算定を (4) 式にて行い、EC の上昇分を求めた。結果として、灌漑地区に、本来湖沼に排出されるフラックスが還元されるため、金江津排水機場の EC 濃度は、平均で 1.5 倍 (灌漑期 EC, $52.9 \text{ mS/m} \rightarrow 79.3 \text{ mS/m}$) となった。一方、湖沼への流出フラックスの削減分は、循環灌漑を実施しない場合の新利根川に流出するフラックスと比較すると、灌漑期には約 41% ($1.1 \times 10^6 \text{ S m}^2 \rightarrow 0.65 \times 10^6 \text{ S m}^2$), 1 年では約 25% の効果が得られることが示された (図-6)。なお、図-6 では、非灌漑期にも霞ヶ浦への EC フラックスが発生しているが、金江津排水機場は洪水対策として常時排水が行われるためである。

循環灌漑の適用を考慮する際、湖沼への排出フラックス量を削減するとともに農業への影響も限定的なものにするための最適な循環強度を今後検討したい。

IV. まとめ

霞ヶ浦流域の新利根川土地改良区において、循環灌漑の導入に向け、EC の連続モニタリングを実施し、水・物質収支を求めた。この結果をもとに、循環灌漑を導入した際の、霞ヶ浦への流出フラックスの削減量およびブロック内の EC の濃度上昇について検討した。

今後の課題は、窒素、リンを対象とした評価指標で循環灌漑の効果を評価するとともに、その際は頻度の高い水質サンプリングが望めないことから、どの程度のサンプリング頻度が、循環灌漑の評価にふさわしいのかについても検討したい。

謝辞 本研究を進めるに当たり、農林水産省関東農政

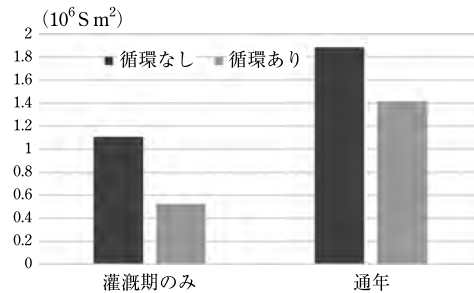


図-6 循環灌漑による EC 負荷量の削減量

局大学連携事業、土地改良建設協会フィールド事業、新利根川土地改良区によりご支援をいただいた。ここに記して感謝いたします。

引用文献

- 茨城県：霞ヶ浦に係る湖沼水質保全計画 (第7期) (2017), <https://www.pref.ibaraki.jp/seikatsukankyo/kantai/kasumigaura/lake/documents/7honbun.pdf> (参照 2018 年 5 月 22 日)
- 田淵俊雄：湖の水質保全を考えるー霞ヶ浦からの発信 (はなしシリーズ), 技法堂出版 (2005)
- 金木亮一：小講座「循環灌漑」, 農土誌 73(4), p.26 (2005)
- 金木亮一：循環灌漑による琵琶湖への流入負荷削減効果, 農土誌 57(7) pp.39~44 (1989)
- 丸山利輔ほか：新編灌漑排水 上巻, 養賢堂, pp.63~66 (1986)
- 中曽根英雄, 黒田久雄, 鈴木光剛, 久保田健歳：灌漑用水の EC フラックスの水田による削減とその予測モデルについて, 農土論集 179, pp.69~77 (1995)
- 落合博之, 登尾浩助：牧草地へのふん尿散布が地下水の水質に与える影響, 農土論集 228, pp.1~8 (2003)

[2018.7.3.受理]

加藤 亮 (正会員)



1967年 東京都に生まれる
1998年 東京大学大学院博士課程修了
茨城大学農学部を経て
2011年 東京農工大学准教授
現在に至る

池田 周平



1994年 大阪府に生まれる
2018年 東京農工大学卒業
東京農工大学大学院修士課程
現在に至る

直江 次男 (正会員・CPD 個人登録者)



1962年 茨城県に生まれる
1986年 茨城大学農学部卒業
農林水産省入省
2016年 関東農政局利根川水系土地改良調査管理事務所
現在に至る