

23. 水田の窒素負荷軽減に向けた止水管理の評価に関する調査検討結果

安瀬地 一作^{1*}・田中 健二¹・針谷 龍之介¹・吉田 貢士¹・飯田 俊彰²

¹茨城大学農学部（〒300-0393 茨城県稲敷郡阿見町中央3-21-1）

²東京大学大学院農学生命科学研究科（〒113-8657 東京都文京区弥生1-1-1）

* E-mail: azechi@mx.ibaraki.ac.jp

施肥により水田に投入された窒素は脱窒作用や作物吸収により減少するが、水田はその営農過程で大量の水を使用するため、窒素排出負荷量は大きくなる。止水管理は、管理期間中給水も排水も行わないため、窒素の表面流出の抑制が期待される。本研究では止水管理の窒素排出負荷軽減効果を評価するため、印旛沼土地改良区・鹿島地区の圃場において流入・流出水量およびT-N濃度の調査を行い、水収支・窒素収支の簡易なモデルシミュレーションによって検討を行った。その結果、観測期間中の現状排水量1770mm、窒素排出負荷量35kgN/haに対し、止水管理を行った場合の排水量は601mm、窒素排出負荷量は15kgN/haとなり、止水管理は約6割の窒素排出負荷削減効果があることが分かった。

Key Words : paddy field, auto irrigation system, nitrogen load, Inbamuma land improvement district

1. はじめに

湖沼などの閉鎖性水域の富栄養化対策を考える際、農地など面減からの窒素排出負荷対策が重要となってくる。特に、国内の農地の約50%を占める水田からの窒素排出負荷削減は重要な課題である^{1)~2)}。水田からの窒素排出は、脱窒作用や作物吸収などによりその濃度は減じられ低くはなるが、水田は営農過程で大量の水を使用するため排出負荷量は大きくなる。この水田からの排出負荷の大きな要因は、土壌条件などによっても異なるが、多くの場合表面排出によるものであることが報告されている^{3)~4)}。特に、代かき田植え期の落水によって、流出負荷が大きく増大することが知られている^{4)~6)}。これら排出負荷削減対策として、排水を再利用する循環灌漑が提案され、大きな削減効果が得られている^{7)~9)}。しかし、循環灌漑を実施するためには、灌漑用揚水機場と圃場からの排水を一時貯留する貯留施設が必要となるため、経済的に有利であるとは言えない。そこで、本研究では、比較的低予算での設備導入が可能な止水管理に着目する。止水管理とは、期間中人為的な表面排水を行わない水管理の方法である。止水管理は自動給水栓を設置するだけよいため比較的手軽に低コストで実現可能である。現状

では、田面水の汚濁物質濃度が高い代かき時や、農薬散布時（農薬の適正使用のため）など、ごく短い期間においてのみ止水管理が行われているが、全期間にわたって行えば、水田からの排出負荷量の大幅な削減効果が期待できる。

本研究では、止水管理の効果を定量的に明らかにするため、現地調査および数値シミュレーションにて検討を行う。まず、現状管理の水深の変化から水収支式により灌漑水量・排出水量等を算出する。得られた灌漑・排水量と観測により得られた窒素濃度および投入窒素量により窒素収支を把握する。その後、簡易シミュレーションにより止水管理をした場合の窒素排出負荷の削減効果を検討する。

2. 調査対象圃場概要

調査対象圃場は、千葉県北西部に位置する印旛沼土地改良区・鹿島地区の圃場である。鹿島地区（図-1の実線太枠）は総受益面積46.1ha、そのうち6.48ha（図-1の破線枠）が本研究で対象とする圃場である。本地区にはすでに自動給水栓が整備されているが、各農家の判断によりほとんどが使われていないのが実態である。本地区へ

は飯野揚水機場のポンプ2機によって印旛沼の水が送水される。本地区は暗渠排水施設が整備されており、排水はすべて暗渠により鹿島川へと排出される。送水系は飯野揚水機場直送式のクローズドパイプラインシステムである。図-2中の自動採水器設置地点には、表面排水口があり、暗渠からの排水と合流する。浸透水は中央の暗渠に集められ、表面排水と混ざって鹿島側へと排出される。



図-1 調査地概

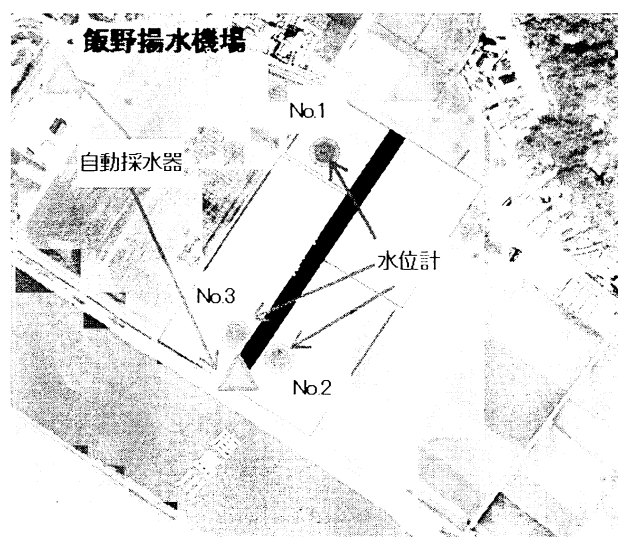


図-2 調査機器の設置概

3. 調査方法・期間

灌漑水および排水の窒素濃度を測定するため、それぞれ飯野揚水機場吸水槽、暗渠に自動採水器を設置した。圃場への灌漑水量および排水量は、直接測定することが困難であったため、本研究では圃場水深の変動から水収支式により算定することとした。採水は、毎日正午頃に行い、全窒素 (T-N) 濃度、硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$) 濃度、アンモニア態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$) 濃度を測定した (ここではT-Nについてのみ示す)。水位は1時間おきに測定

し、これをもとに灌漑水量・表面排出水量・浸透水量等を算出した。また、飯野揚水機場に気象観測器を設置し、湿度・降水量・風速・日射量を測定し、これをもとにペンマンモンティス式により蒸発散量を算定した。観測期間は2012年6月4日から2012年10月31日までであり、圃場への投入施肥量や時期および営農スケジュールは聞き取り調査により把握した。

4. 水収支

対象圃場の水収支は圃場水深の観測結果より算定した。水収支式は(1)式である。

$$h^{t+\Delta t} = h^t + (I^t + R^t - Q^t - P^t - ET^t)\Delta t \quad (1)$$

ここで、 h : 水深 (mm), I : 灌漑水量 (mm/h), R : 雨量 (mm/h), Q : 表面排水量 (mm/h), P : 浸透排水量 (mm/h), ET : 蒸発散量 (mm/h), t : 時間, Δt : 時間ステップ (h) である。これらのうち、雨量 R は観測値、蒸発散量 ET は気象観測結果よりペンマンモンティス法により算出し、表面排水量 Q , 浸透水量 P , 灌漑水量 I は観測水位結果から、以下に示す方法にて算出した。

$$P^t = kh^t \quad (2)$$

$$Q^t = 3600 \times CB(h^t - H)^{3/2} / A \quad (3)$$

$$I^t = (h_{obs}^{t+\Delta t} - h^t) / \Delta t - (R^t - Q^t - P^t - ET^t) \quad (4)$$

k : 浸透係数, C : 越流係数, B : セキ幅 (m), H : セキ高さ (m), A : 水田面積 (m^2), $h_{obs}^{t+\Delta t}$: 次タイムステップの観測水深である。計算手順は次のとおりである。灌漑は8時~18時の10時間だけであるため、灌漑水が停止している夜間の水位変動から浸透係数および越流係数を算定し、その後、(4)式を用いて灌漑水量を算定した。この時の浸透係数は $k = 0.005$, 越流係数 $C = 1.2$, セキ幅は実測結果より $B = 0.4\text{m}$, セキ高さは、聞き取りの結果、降水量や時期に応じて変えているとのことであったが、具体的な時期・高さは不明であったため、フィッティングパラメータとした。

以上により計算された水深変化を図-3に示す (ここではNo.1の水深変化についてのみ示す)。非灌漑期の降雨時の水深変化があまりうまく表現できていないが灌漑期の水深変化は良好に再現できている。No.2およびNo.3も同様に良好な再現結果が得られた。これにより灌漑水量、表面排水量、浸透水量、蒸発散量を算定した結果を図-4に、圃場内の水収支結果のまとめを表-1に示す。この結果、期間を通して給水された灌漑水は1495mmであり、そのうち大部分が表面排水 (=1168mm) として排出されており、排水の55%を占めていた。

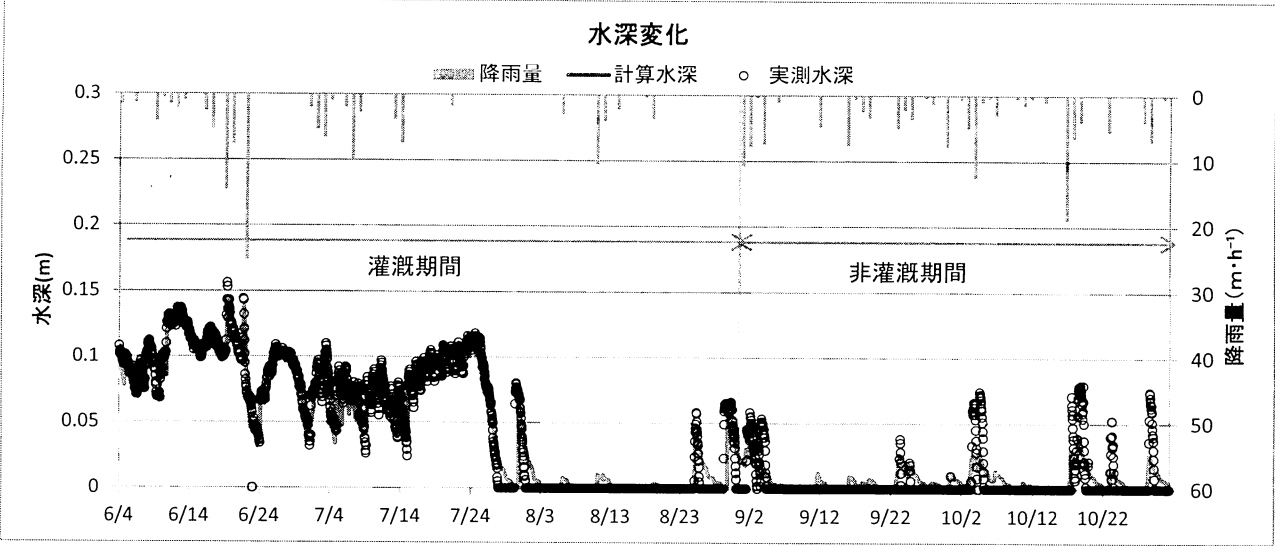


図-3 実測水深と計算水深比較 (No.1 水位計)

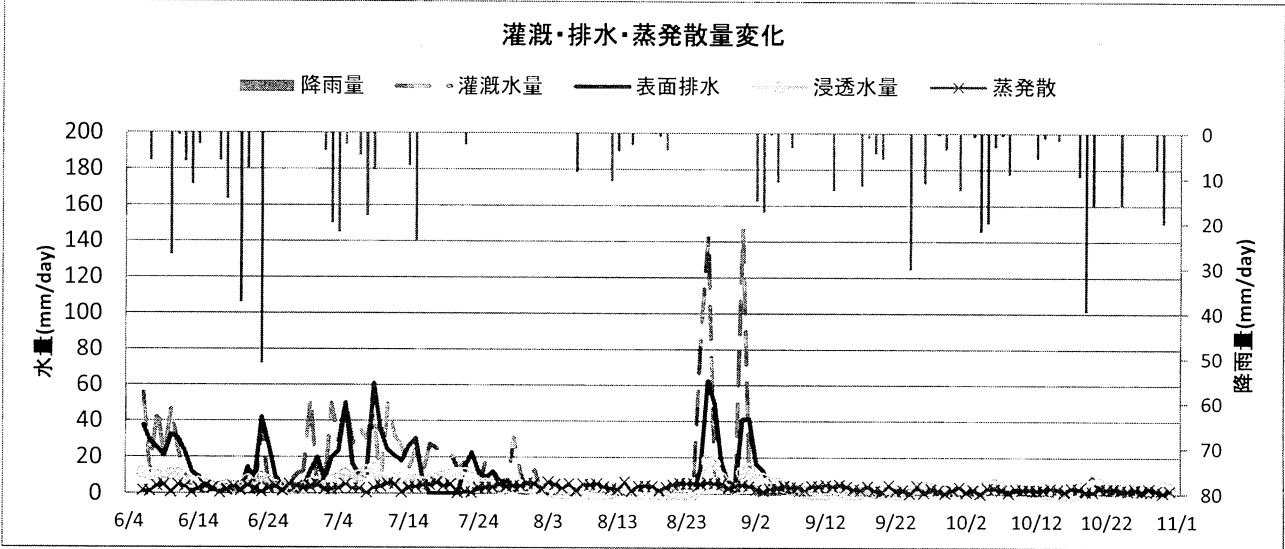
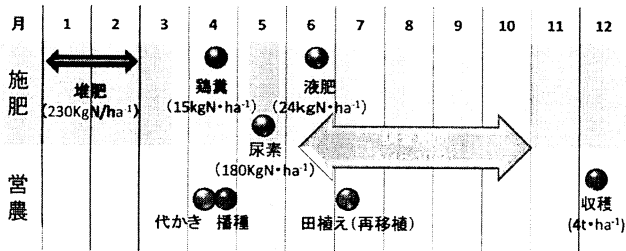


図-4 圃場内水量計算結果

表-1 現状圃場水収支 (現状)

		水量(mm/period)	割合(%)
input	降水量	628	29.6
	灌漑水量	1495	70.4
	(合計)	(2123)	(100)
output	表面排水量	1168	55.0
	浸透量	602	28.4
	蒸発散量	353	16.6
	(合計)	(2123)	(100)

表-2 営農スケジュール



5. 窒素収支

(1) 営農スケジュール

窒素排出負荷量に大きな影響を与える営農スケジュールを聞き取りにより把握した。表-2に営農スケジュールを、以下に聞き取り結果を示す。対象圃場の稲品種は飼料用米のモミロマンであり、4月20日頃に直播が行われた。しかし、その後、雑草により生育不良となったため、7月6日～9日にかけて田植えし直しとなっている。投入窒素肥料は、1月から2月にかけて堆肥で計230kgN/ha、4月8日鶏糞で15kgN/ha、5月20日に尿素で180kgN/ha、6月上旬に液肥で24kgN/ha、合計449kgN/haである。水田の標準施肥量（90～120kgN/ha）とくらべてかなり大量の肥料が投入されているようである。なお、本地区では、再移植が7月上旬と遅かったこともあり、12月上旬とかなり

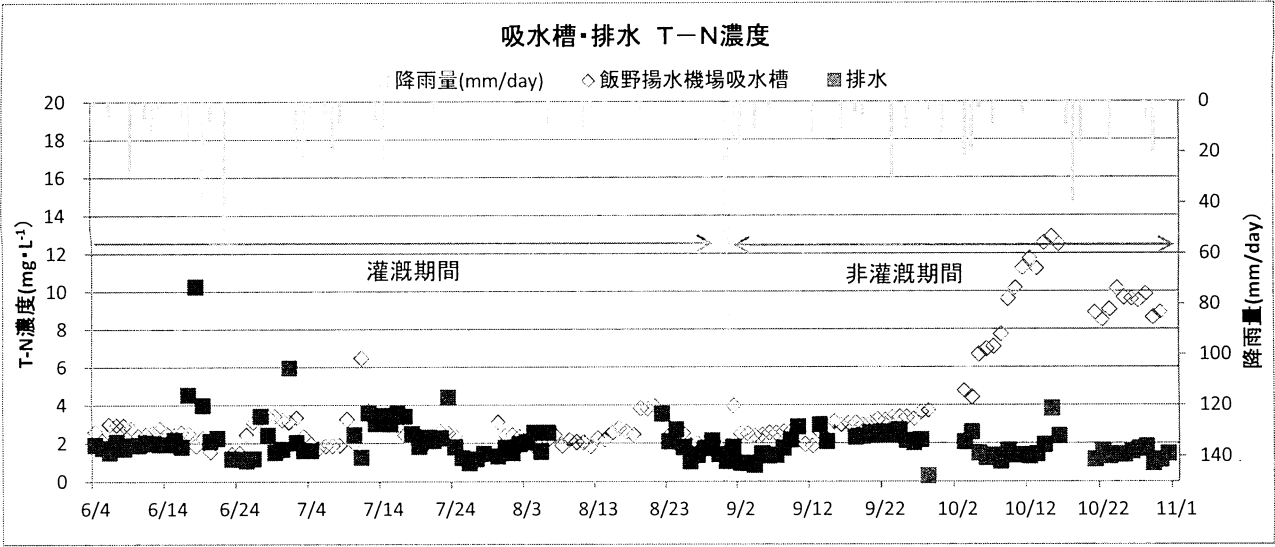


図-5 吸水槽および排水のT-N濃度調査結果

遅い時期に収穫が行われている。このときの収穫量は4t/haであった。

(2) 水質調査結果

図-5に吸水槽（灌漑水）および排水の窒素濃度を示す。灌漑期間中は一時排水のT-N濃度が吸水槽（灌漑水）の濃度より高くなることがあるが、概ね排水の濃度の方が低く、吸水槽（灌漑水）の平均T-N濃度は2.50mg/lに対し、排水のT-N濃度は2.27mg/lであった。本調査圃場では水田の標準的な施肥量を超えてかなり大量の窒素成分が投入されていたにもかかわらず、流入水T-N濃度よりも排出水の方が低い濃度であった。また、非灌漑期間、特に調査対象期間後半において吸水槽のT-N濃度が上昇しているが、これは、揚水ポンプの停止に伴い吸水槽内の水が停滞したために藻類などが発生したことが原因であると考えられる。

(3) 窒素収支計算結果

以上の調査結果および水収支計算結果より圃場の窒素収支を算出した。その結果を表-3に示す。表面排水から23kg/ha、調査対象圃場合計では149kgとなり、かなり多くの窒素が表面排出により印旛沼に流入していることがわかる。この表面流出による窒素排出負荷量は止水管理を行うことで大幅に削減することが可能である。なお、降雨の窒素濃度は、調査圃場から約30km北に位置する茨城大学農学部キャンパスで観測された2012年の降雨中の窒素濃度の平均値である1.2mg/lを用いて算出している。

6. 止水管理の効果

止水管理は、図-6に示すような自動給水栓を用いる。自動給水栓は圃場の水深が設定水深に達すると自動的に

表-3 圃場窒素収支（現状）

		窒素量(kg/ha)	割合(%)
input	堆肥＋鶏糞	245	49.6
	化学肥料	204	41.3
	灌漑	37	7.5
	降雨	8	1.6
	(合計)	(494)	(100)
output	収穫	60	12.1
	表面排水	23	4.7
	浸透	13	2.6
	脱窒及び土壌蓄積	398	80.6
	(合計)	(494)	(100)

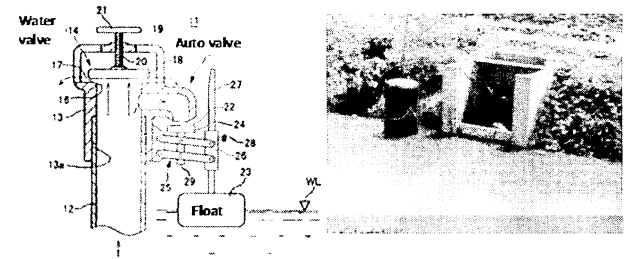


図-6 自動給水栓

弁が閉まり給水を停止することのできるものであり、肥料や薬剤などのかけ流しによる流出を防ぎ、水質汚濁防止および節水に効果的な弁である。設置が容易である上に、一台の価格が5～6万円程度と安価である。本対象地区には自動給水栓が整備されているが、利用されていないようである。

ここでは自動給水栓を用いて水深を一定に保ち表面排水の出ない止水管理を行った場合の水量および窒素排出負荷量削減効果の検討を数値シミュレーションにより行う。計算条件は以下に示す通りである。

- (1) 灌漑期間中の自動給水栓管理水深は5cmとする。
- (2) 圃場への補給は減水深分だけとする。

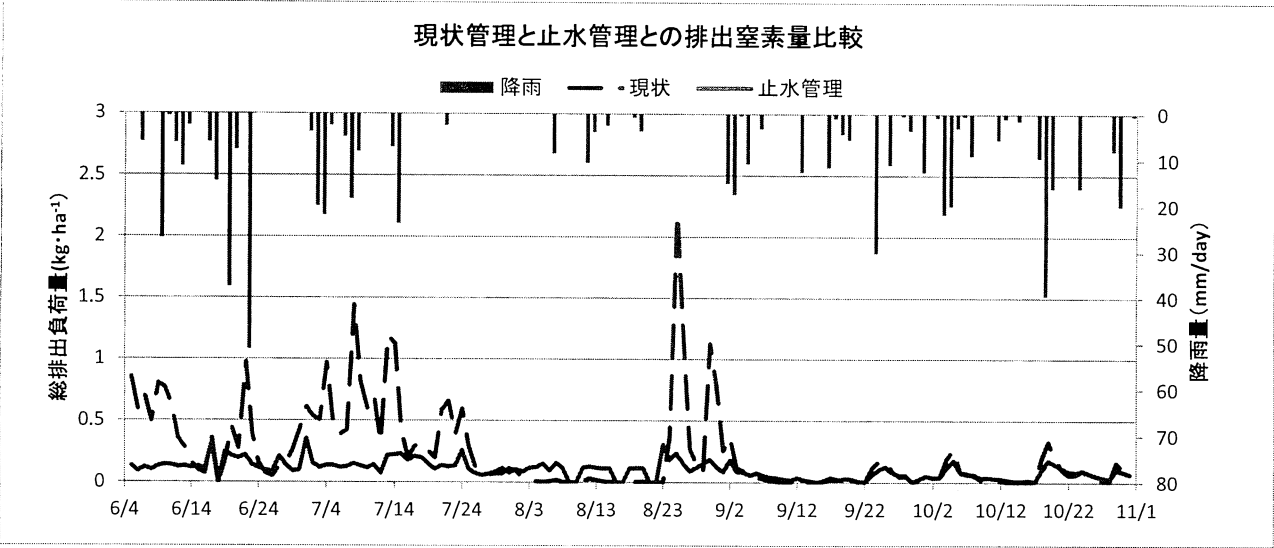


図-7 現状管理と止水管理の窒素排出負荷量の比較

- (3) 排水窒素濃度は排水の観測結果濃度を用いる。
(4) 畦畔高さは15cmとし、降雨によりこれを超える場合は表面排水を行う。

以上の条件により(1)～(4)式および水質調査結果を用いて止水管理数値シミュレーションを行った結果の水収支まとめを表-4に、窒素収支まとめを表-5に、観測期間中の窒素排出負荷量の推移を図-7に示す。今回の数値シミュレーションにおいては、圃場水深が15cmを超えることがなかったため、表面排水はゼロとなっている。止水管理を行った場合には、灌漑水量は、現状管理の約40%まで削減することができた。しかし、浸透量が現状管理にくらべて若干増加しているが、これは、今回のシミュレーションでは灌漑期間中は降雨がない場合には常に水深が5cmとなるよう給水を行う条件としたため、現状の管理よりも期間中の平均水深が大きくなったからである。それによって浸透による窒素排出負荷量も若干増大してはいるが、表面排水が完全にゼロとなったために、窒素排出負荷量合計（表面排水＋浸透排水）でみると60%(21kg/ha)の削減効果が得られた。調査対象圃場全域でみると、136kgの窒素排出負荷削減効果であった。これは自動給水栓を用いて調査対象期間全期間にわたって止水管理を行った場合の結果であるが、自動給水栓が整備されていない場合、期間を通して手動での水管理となるとその労力はかなりの負担になる。そこで、次に、一定期間のみ止水管理を行った場合の効果も検討した。

表面排水による窒素排出負荷は代かき田植期に増大することが知られており^{4)・6)}、本研究においても、図-7から、再田植えを行った7月上旬の前後において窒素排出量が大きいことがわかる。したがって、この期間だけ止水管理を行えば高い効果が得られることが予想される。止水期間を、調査開始日（6月4日）から再田植えが終了

表-4 圃場水収支（止水管理）

		水量(mm/period)	割合(%)
input	降水量	628	51.1
	灌漑水量	601	48.9
	(合計)	(1229)	(100)
output	表面排水量	0	0.0
	浸透量	800	65.1
	蒸発散量	429	34.9
	(合計)	(1229)	(100)

表-5 圃場窒素収支（止水管理）

		窒素量(kg/ha)	割合(%)
input	堆肥＋鶏糞	245	51.9
	化学肥料	204	43.2
	灌漑	15	3.2
	降雨	8	1.7
	(合計)	(472)	(100)
output	収穫	60	12.7
	表面排水	0	0.0
	浸透	15	3.2
	脱窒及び土壌蓄積	397	84.1
	(合計)	(472)	(100)

した日（7月9日）の10日後までの期間としてシミュレーションを行った結果は、表面排水窒素負荷が8kg/ha、浸透排出窒素負荷が12kg/ha、合計20kg/haとなり、現状管理に比べて約45%減という高い削減効果が得られた。

7. まとめ

印旛沼土地改良区鹿島地区の水田群において、水収支・窒素排出負荷量を現地観測結果および数値計算により算定し、止水管理を行った場合の効果を検討した。その結果、本調査圃場には肥料として大量の窒素が投入されていたにも関わらず、水田は浄化型であった。また、現状の水管理では表面排水が全排水量の55%であり、排

出負荷の大部分を占めていた。そこで、排出負荷を削減すべく数値シミュレーションにより止水管理を行った場合の窒素排出負荷削減量を計算した。その結果、全期間を通して止水管理を行った場合には排出負荷は60%削減でき、排出負荷の大きい耕作期前半のみ止水管理を行った場合でも45%と高い削減効果が得られた。以上により、止水管理は窒素排出負荷を大幅に削減できる管理方法であることが確認された。

本研究では対象圃場の品種が飼料用米であったこと、7月に再田植えを行ったこと、投入窒素肥料が通常よりもかなり多いこと、調査開始時期が灌漑開始2か月後であること、また、表面排水と浸透水の窒素濃度が分離できていないことなどからここで得られた結果をそのままより広い流域規模に展開することは困難であるが、止水管理が窒素排出負荷削減に大きな効果があることは示された。今後は、灌漑開始と同時に調査を開始し、表面排水と浸透水を分離するなど、より詳細に検討・評価を行う必要がある。

前述のように、今回の結果をそのまま展開することは正確ではないが、今回の結果を用いて、例えば、鹿島地区全体の排水を農業集落排水処理施設により浄化することを考えた場合の費用と、止水管理のために必要な自動給水栓の費用と比較して経済効果を試算してみる。農業集落排水処理施設の建設費用は、環境省の法令・告示・通達「汚水処理施設の効率的な整備推進について」によれば、対象人口をX(人)、処理場建設費Y(千円)とすると次の二次式で概算される。

$$Y = 11186X^{0.414} + 8.74X + 11027$$

上式を適用するために、止水管理による鹿島地区全域の削減窒素負荷量を人口に換算すると、人の全窒素(T-N)の原単位は一日あたり13g/人¹⁰⁾より、観測期間が150日、削減負荷量21kg/ha、鹿島地区面積46.1haであるから、 $21 \times 46.1 \div 150 \div 0.013 \div 496$ 人となる(通常、施設規模は処理水量で決まるが、水田排水は水量が多いため水量で算定するとかなり大規模な施設となってしまう。そのため、窒素負荷量で概算することとする)。これを上式に適用すると、処理場の建設費用は約15700万円となる。実際はこれに管路施設費用や維持管理費が加わるため、より多くの費用が必要となる。これに対して、自動給水栓を日本の標準的な圃場面積である30aに一つ設置するとすると、合計で154個必要となり、一台を6万円とすると、費用は924万円となり、安価に設置可能である。以上、かなり大雑把な概算ではあるが、水処理施設と比較すると止水管理の経済的効果はかなり大きいものである

と予想される。

謝辞：この研究は環境省地球環境研究総合推進費「気候変動に配慮したアジア環境先進型流域圏の構築と普及」及び、RISTEX問題解決型サービス科学研究プログラム「農業水利サービスの定量的評価と需要主導型提供手法の開発」の支援により行った。ここに謝意を示します。また、現地試験を行うにあたり、協力いただいた当時茨城大学大学院生であった亀井美沙氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 田淵俊雄，高村義親：集水域からの窒素・リンの流出，pp75-129，東京大学出版会，1985.
- 2) 田淵俊雄：農地排水と水質汚濁-水田肥料の流出，農業土木学会誌，43(8)，pp.525～529，1975
- 3) 田淵俊雄，高村義親，久保田治夫，鈴木誠治：水田における窒素，リン濃度とその流出入，農業土木学会誌，47(11)，pp.23-28，1979
- 4) 高村義親，田淵俊雄，鈴木誠治，張替泰，上野忠男，久保田治夫：水田の物質収支に関する研究（第1報）霞ヶ浦流域の水田における窒素およびリンの動向と収支について，日本土壤肥料科学雑誌，47(9)，pp.398～405，1976
- 5) 高村義親，田淵俊雄，張替泰，大槻英明，鈴木誠治，久保田治夫：水田の物質収支に関する研究（第2報）新利根川流域の湿田における窒素およびリンの収支と排出について，日本土壤肥料科学雑誌，48(9)，(10)，pp.431～436，1977
- 6) 近藤正，三沢真一，豊田勝：代かき田植時期のN，P成分の流出特性について，農業土木学会論文集，164，pp.147-155，1993
- 7) 濱武英，中村公人，三野徹：循環灌漑を実施する水田流域の窒素・リンの物質収支，農業農村工学会論文集，250，pp.91-97，2007
- 8) 北村立実，黒田久雄，山本麻美子，根岸正美，田淵俊雄：霞ヶ浦湖岸循環利水水田地区の水収支と物質収支，農業農村工学会論文集，267，pp.35-41，2010.
- 9) 北村立実，黒田久雄，石井裕一，吉尾卓宏，山本麻美子，小松伸行，渡邊圭司，本間隆満，田淵俊雄：代かき田植え期における用排水機場からの負荷特性，水環境学会誌，34(5)，pp.73-80，2011
- 10) 社)日本農業集落排水協会：農業集落排水施設設計指針(案)，p.44，1989.