

水田からの汚濁負荷の流出特性

Discharge Characteristics of Pollutants from Paddy Fields

笹田 康子

石原 暁

岡井 隆

Yasuko SASADA

Akira ISHIHARA

Takashi OKAI

要 旨

香川県における公共用水域は、環境基準達成率が低迷し水質改善が進まない状況で推移しており、農地を含めた流域からの効率的な汚濁負荷の削減が強く求められている。そこで、水田における汚濁負荷流出の特性を施肥や水管理などの要因から調査し、削減対策の基礎的情報を得たので報告する。

調査によると、水田から排出される水量は約400m³/10aであり、きめ細かな水管理によって節水でき、排出量を抑制できることが分った。また、代かき後の強制落水の排水が負荷削減に大きく寄与し対策法も明らかになった。水田からの差し引き排出量¹⁾はCOD 負荷量0.08~2.7kg/10a、りん 負荷量0.09~0.12kg/10aであったが、窒素負荷量は0.49~0.53kg/10aが浄化吸収されており、水田のもつ水質浄化機能の一面が実証された。さらに、水田における物質収支の評価を試み、肥料減量化傾向や地力保全機能を検証した。

キーワード：水田，施肥，水管理，汚濁負荷，物質収支

I はじめに

香川県の公共用水域における水質汚濁は平成14年度の河川の環境基準達成率が57%、海域の達成率は43%と、水質改善が進まない状況で推移している。そこで、農地を含めた流域からの効率的な汚濁負荷の削減が強く求められている。平成14年度から県下の小規模事業場等負荷量削減対策検討調査事業が行われてきた。一昨年は既報¹⁾で一律排水基準が適用されない日平均排水量50m³未満の小規模事業場の排水実態について報告した。今回はこの事業の一環として、流域の水質管理の基礎資料を得るために、水田における窒素、りん等の挙動について調査し、施肥、水管理などの要因から汚濁負荷流出の特性を検討したので報告する。

II 調査方法

農耕地（水田）からの汚濁負荷流出量の調査は香川県下の2軒の農家の協力を得て、水稻作付け期間中に調査を実施した。

1 調査水田

綾歌郡綾上町の隣接した2区画、A水田は面積が12aあり、早植えのコシヒカリを作付けした期間5月1日~9月3日間、B水田は面積が16aあり、キヌヒカリを作付けした期間5月27日~9月16日間、それぞれの水田に機器を設置して調査を実施した。調査水田は両方とも水稻栽培のみで、冬季の作付けはしていなかった。この地区では農業基盤整備事業が行われており、農業用水の供給はその時に整備された灌漑設備によって近くの河川から導水し、貯留タンクを経由してパイプラインで水田に給水され、取水はバルブの開閉操作で行われた。

図1に調査水田とその周辺の状況及び測定機器の配置を示す。なお、A水田とB水田は土盛りの際を挟んで接している。調査水田には暗渠排水の設備があるが、調査期間中は使用しなかった。

水田土壌は灰色低地土で県下総水田面積の77%を占める代表的土壌群²⁾であり、図2にA水田の土壌断面を示すが、農業基盤整備事業で旧水田の表土の上に約65cm盛土した水田であった。

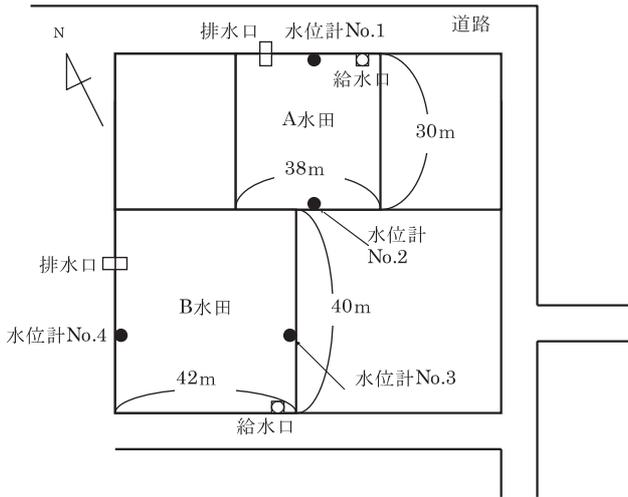


図1 調査水田

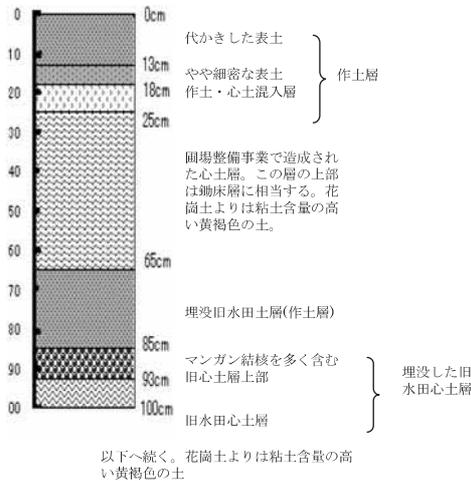


図2 A水田の北側畦畔付近の土壌断面

2 調査項目

水田の用水の流入量については、パイプラインからの取水量と雨水量を測定し、流出量については排水口からの表面排水量のみを測定した。流出量としては稲からの蒸散と田面からの蒸発及び地下浸透量があり、蒸発散量は直接的な測定が困難であるので参考文献³⁾を引用し、地下浸透量については、水の流入量から表面排水量と蒸発散量を差し引いた値とした。また、田面水の水位を測定し水量の変動を観測した。

さらに、隣接する水田の畦を通して横方向の浸透流出入が考えられるので、2箇所減水深を測定した。

(1) 取水量の概査

パイプラインのバルブからの水が通過するよう

に設置された三角堰の水位を10分毎にデータロガに記録し、水位から計算される流量を積算して求めた。また補助的給水に用いられる給水バルブに積算流量計を接続して1週間毎に読み取った。(写真1)



写真1 取水量の測定用三角堰

(2) 雨水量

降水量については約1km南に位置する観測所のデータを用いた。降水量に水田の面積を掛けて雨水量を求めたが、周辺の道路からの流入は考慮しなかった。

(3) 表面流出水量の概査

排水口からの流出量は、取水口と同様に設置した三角堰の水位を10分毎データロガに記録し流量を積算して求めた。(写真2)



写真2 流出量の測定用三角堰

(4) 水位の観測

田面水の水位を2台の水位計で10分ごとにデータロガに記録した。水位の変化は原則的に2台の平均値を用いた。(写真3)



写真3 田面水の水位計

(5) 田面水の採水と水質測定

水位計付近の田面水を代かき、田植え時には採水間隔を短く、通常時は1週間おきに採水し水質調査した。ガラス瓶を減圧にし、ノズル状の採水口を田面水につけ泥を巻き上げないように採取した。(写真4)水質調査項目はCOD, SS, T N, T P, 溶存態 N, 溶存態 P, りん酸態 P を, JIS K 0102法により測定した。



写真4 採水用減圧瓶とノズル

(6) 地下浸透水等の水質調査

水田にガラスポラスカップを用いた土中採水器(藤原製作所製)⁴⁾を設置し、1週間毎に地表から15cm, 30cm, 50cm, 100cmの浸透水を採取し、陰イオン、陽イオンの含有量を測定した。(写真5)



写真5 土中採水器

(7) 稲体の窒素, りんの吸収量

水田で収穫した稲体を稲わらともみに別け、70℃で乾燥し、粉碎して窒素, りんの含有率を測定し、10aあたりの養分吸収量を算出した。

(8) 水田土壌の窒素, りん等含有量

作付け前に採取した土壌を「土壌環境分析法」に準じて無機態窒素, 可給態窒素, 無機態りん, 有効態りんを測定し、作土の厚さ15cm, 仮比重(かさ比重)を1と仮定して、10aあたりの含有量を試算した。

(9) その他

施肥量, 玄米の収穫量等は耕作者に直接聞き取り調査した。

3 物質収支

図3に農地における物質収支の概要図⁵⁾を示す。

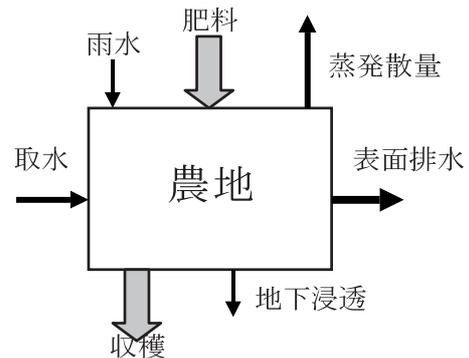


図3 物質収支の概要図

流入量としてはパイプライン水(取水)と雨水に含まれるもの、さらに肥料として投入された量を考える。パイプライン水は5月~8月にかけて計7回採水して分析した濃度の平均値(表1)を用いた。雨水は水田横にロート付ガロン瓶を設置し、期間中に計5回サンプリングした雨水中の濃度の平均値(表1)を用いた。

COD, 窒素及びりんの流出量としては排水口からの表面排水量と排水口付近で採水された田面水の濃度を掛けた値を用いた。分析サンプルは田植え1週間後から1週間毎の間隔で採取しているので、排出された日に一番近い分析値を用いた。

蒸発散量は水量としての収支に関係するが、窒素・りんの物質収支には関与しないこととした。

表1 取水と雨水の水質

	COD (mg/l)	窒素 (mg/l)	りん (mg/l)
パイプライン水(取水)	4.5	1.1	0.085
雨水	1.3	0.81	0.020

表2 稲作の栽培ごよみ

水田別 (作付け品種)	A水田 (コシヒカリ)	B水田 (キヌヒカリ)
代かき	5月2日	5月29日
田植え	5月3日	6月2日
中干し	6月2日~ 6月10日	7月18日~ 8月2日
出穂期	7月24日	8月12日
稲刈り	9月3日	9月16日

Ⅲ 稲作の栽培条件

図4に作付け期間中の降水量と日照時間を示すが、平成15年は比較的雨が多く(平年比113%)、8月の月間降水量は平年の3倍で観測史上最多を記録した。日照時間は短く(平年比88%)、6月中旬から8月中旬まで平年より少ない傾向が続いた⁶⁾。さらに台風の影響(台風4号、6号、10号)もあり、稲作の気象条件としては厳しい状況で、作況指数98(平成15年12月8日公表された農林水産統計)であった。

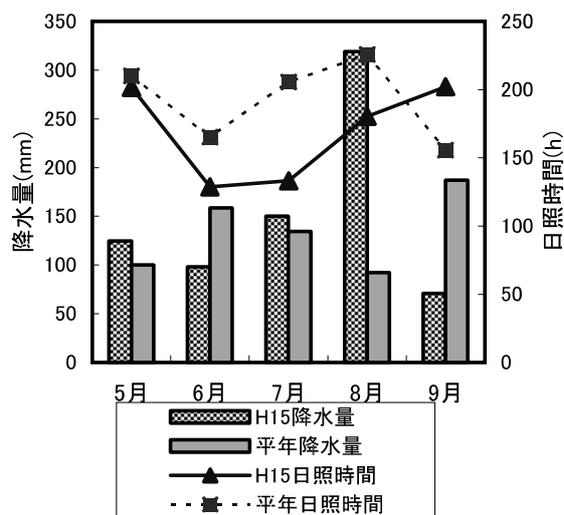


図4 月別降水量と日照時間の平年(1992~2001)との比較(資料 高松地方気象台「香川の気象」)

表2にそれぞれの水田の栽培ごよみを示した。A水田は典型的な兼業農家が耕作し、農作業は休祭日を中心に行われ、水管理も省力的であった。一方B水田は専業農家で、水管理がきめ細かく行われていた。

表3に施肥の種類と量、表4に米の収量を示す。気象の影響で両方の水田とも平年に比べ収量は低いようであった。なお、B水田の収量が低いのは出穂時に、台風に見舞われたためと思われる。

表3 施肥量と種類

	A水田	B水田
基肥	コシ一発 55kg/10a	さぬき中生2回 40kg/10a
穂肥		同上 20kg/10a
合計	55kg/10a 内訳N5.5kg/10a P ₂ O ₅ 5.5kg/10a K ₂ O 5.5kg/10a	60kg/10a 内訳N8.4kg/10a P ₂ O ₅ 8.4kg/10a K ₂ O 8.4kg/10a

表4 玄米の収量

	A水田	B水田
総収量	630kg	810kg
10aあたりの収量	525kg/10a	506kg/10a

Ⅳ 結果及び考察

1 田面水の水質

図5に田面水のCOD、窒素、りんの推移を示すが、各水田とも代かき後に水質の濃度が急激に上昇した。その後、稲の草丈の低い間は降雨時の泥の巻き上げによる水質濃度の上昇が認められるが、生長がある程度進むと雨の影響を受けなくなり水質の変動も減少した。B水田では8月穂肥の影響で窒素・りんが少し上昇していた。

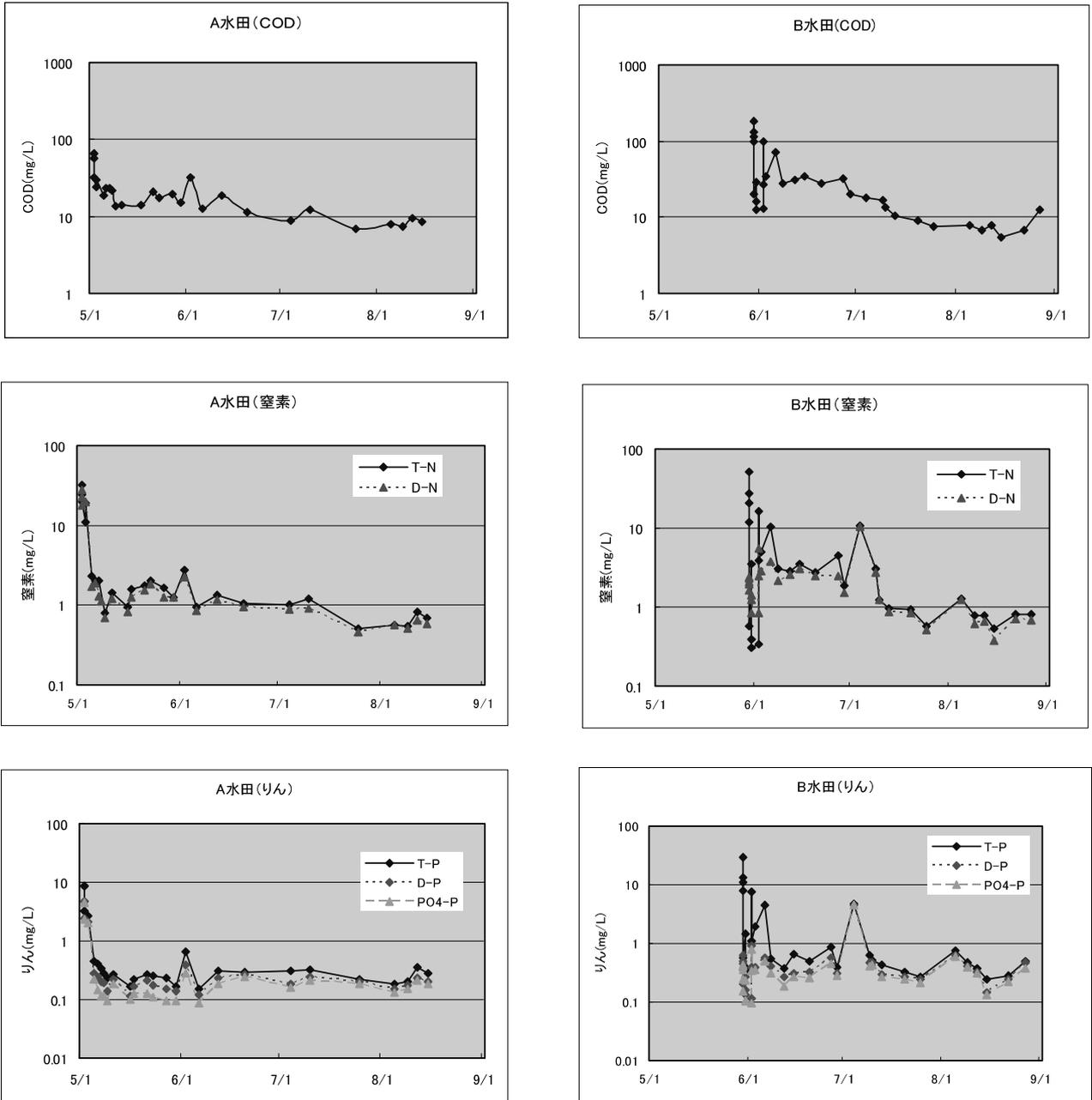


図5 田面水の水質(COD, 窒素, りん)の推移

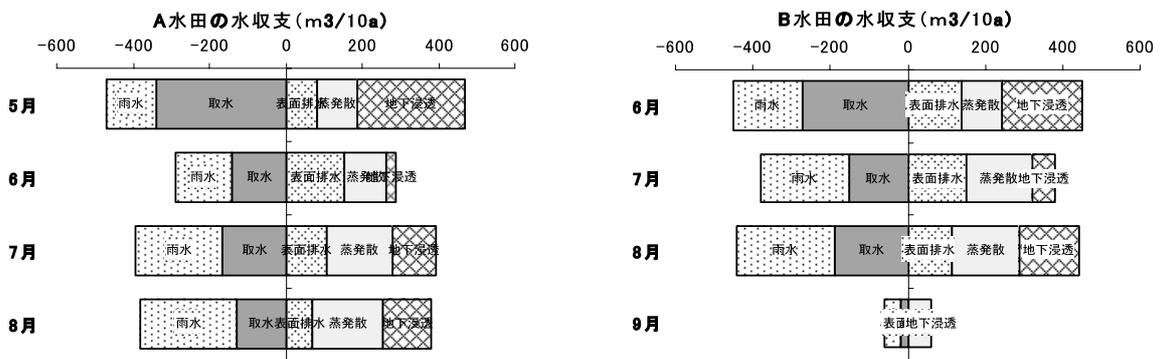


図6 水量収支の月別推移

2 水量収支

表5に水田の水量収支を示す。流入量として取水量と雨水量が約半量ずつ占め、流出量として蒸発散量が38%、地下浸透量が32~35%、表面排水量が27%~30%を占めていた。

表面排水量は耕作者が意図的に落水する代かき後と中干し時以外は降雨量に關係することが排水記録から分った。30mm/日以上降雨量がある時、また、それ以下の降雨量でも連続して降れば排水していた。

なお、B水田はA水田に比べ流入水の合計水量が約200m³/10a少ないが、水管理をきめ細かくすることで節水できていると考えられた。また、図6に各水田の水量収支の月別推移を示すが、流入側では両水田とも最初の1ヶ月間の取水量が多く、流出側では最初の1ヶ月間の地下浸透量が多いのが特徴的であった。

表5 水量収支 (m³/10aあたり)

		A水田	B水田
流入量	取水量	773 (51%)	635 (48%)
	雨水量	753 (49%)	695 (52%)
	合計	1526 (100%)	1330 (100%)
流出量	表面排水量	414 (27%)	402 (30%)
	蒸発散量	575 (38%)	509 (38%)
	地下浸透量	537 (35%)	419 (32%)

3 COD 負荷量

図7に水田の用排水のCOD負荷量の概査を示す。作付け期間のCOD排出量は6.5kg/10aであった。さらに農地の発生負荷を「差し引き排出量」⁷⁾で評価すると、今回の調査では、表面排水から取水及び雨水のCOD負荷量との差は、A水田で0.8kg/10a、B水田で2.7kg/10aであった。

注)「差し引き排出量」= (表面排水量 + 地下浸透量) - (取水量 + 雨水量)

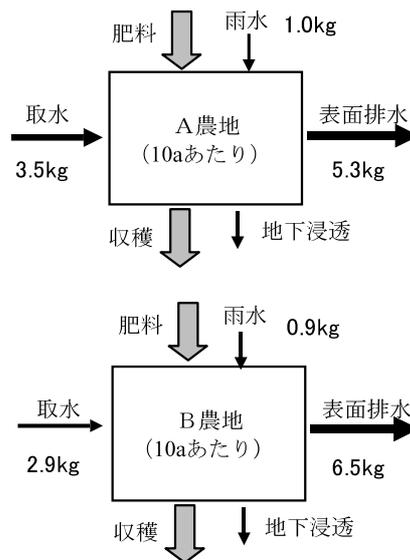


図7 用排水のCOD負荷量

4 窒素・りん負荷量

作付け期間の窒素流出量は図8に示すとおりA水田で0.89kg/10a、B水田で0.66kg/10aであるが、差し引き排出量はA水田で0.49kg/10a、B水田で0.53kg/10aの浄化吸収型⁸⁾になっている。

りん流出量はA水田B水田共に0.18kg/10aであり、差し引き排出量はA水田で0.09kg/10a、B水田で0.12kg/10aの汚濁排出型⁷⁾になっている。

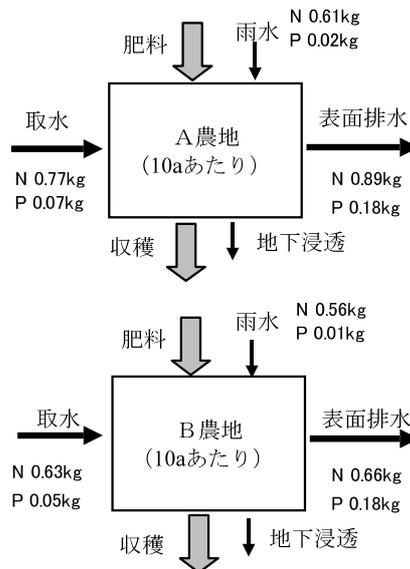


図8 用排水の窒素・りん負荷量

5 代かき後の落水排水の負荷量

表6に調査水田の代かき後の落水の負荷量を示すが、2つの水田で大きな差が見られた。A水田は作付

け期間中の窒素負荷量の60%，りん負荷量の51%が代かき後の落水で排出されていた。B水田は窒素負荷量で5%，りん負荷量で3%の排出であった。この両者の違いは代かき後の落水時期と施肥時期の異差によると思われる。A水田では代かき用水を田に張ったところに施肥し，代かきを行いその後6時間経過して落水して，翌日田植えを行っていた。他方B水田では代かき後2日後から2日間かけて徐々に落水し，肥料は田植え時に機械により側条施肥⁹⁾していた。

表6 代かき後の流出負荷量

	A水田		B水田	
	代かき後の流出負荷量	全負荷量に占める割合	代かき後の流出負荷量	全負荷量に占める割合
表面排出水量 ($\text{m}^3/10\text{a}$)	32	8%	27	7%
COD 負荷量 ($\text{kg}/10\text{a}$)	0.92	17%	0.31	5%
窒素負荷量 ($\text{kg}/10\text{a}$)	0.53	60%	0.03	5%
りん負荷量 ($\text{kg}/10\text{a}$)	0.09	51%	0.01	3%

6 窒素・りんの地下浸透流出

今回調査した水田は暗渠排水の設備は使用されなかったが，隣接する水田が代かき後，暗渠排水から流出したので，流出水を採取し分析した結果，窒素 $4\text{mg}/\ell$ （水溶性窒素 $1.3\text{mg}/\ell$ ），りん $0.20\text{mg}/\ell$ （水溶性りん $0.15\text{mg}/\ell$ ）が検出された。この水田の代かき時は無施肥だったので，窒素りんは土壌由来のものと考えられた。代かき時の水田の水量を計算すると，田面水の水深を 3cm ，作土層（実測した孔隙率は 65% であった。）を 15cm と仮定すると 10a あたり約 130m^3 と計算された。従って，土壌中には窒素 $1.4\text{mg}/\ell \times 130\text{m}^3 = 180\text{g}/10\text{a}$ ，りん $0.20\text{mg}/\ell \times 130\text{m}^3 = 26\text{g}/10\text{a}$ があったと想定された。この量は施肥量に比べるとごく僅かであった。

図9に土中採水器で採取した浸透水の窒素の主な成分であるアンモニア態窒素，硝酸態窒素の濃度推移を土壌深別（ 15cm ， 30cm ， 50cm ， 100cm ）に示した。A水田の作土層（土壌深 15cm ）では6月3日（施肥32日後）までアンモニア態窒素は $15\sim 13\text{mg}/\ell$ の高い濃度であったが，同時期の土壌深 30cm の浸透水の濃度は

$0.7\text{mg}/\ell$ 以下，土壌深 50cm では $0.1\text{mg}/\ell$ 以下ときわめて少なく，下方への浸透流出は認められなかった。また，この時期以後のアンモニア態窒素の濃度は急激に低下し， 30cm より深い層と同様 $0.1\text{mg}/\ell$ 以下となった。上記期間以外はすべて取水の窒素濃度以下であった。硝酸態窒素についても土壌深 100cm の濃度が一時的に $1.7\text{mg}/\ell$ を示したが，それ以外はすべて $0.3\text{mg}/\ell$ 以下で推移した。以上より窒素の下方への地下浸透量はきわめて少ないものと思われた。また，りん酸態りんについても調査期間中 $0.01\text{mg}/\ell$ 以下であり，りんの下方への流出は無視できる量であった。

B水田の作土層（土壌深 15cm ）のアンモニア態窒素は7月20日まで $3\sim 1\text{mg}/\ell$ で経過しており，田面水の窒素の推移と類似した。6月12日以降はどの土壌深でも取水の窒素濃度より低い濃度を示した。硝酸態窒素についても同様に6月12日以降は全層にわたり $0.5\text{mg}/\ell$ 以下で経過し，地下浸透による窒素の流亡は認められなかった。りんも同様に流亡は認められなかった。

7 窒素・りんの物質収支

水田における窒素・りんの物質収支を表7に示した。浸透水の窒素・りん量は前記述のとおり無視できるものと考えた。

稲の養分の吸収量は実際に収穫した稲体の窒素・りんの含有量からA水田の玄米 $525\text{kg}/10\text{a}$ あたりの窒素吸収量は $9.51\text{kg}/10\text{a}$ ，りん吸収量は $1.95\text{kg}/10\text{a}$ （りん酸として $4.47\text{kg}/10\text{a}$ ）であった。内訳はもみの窒素吸収量 $5.17\text{kg}/10\text{a}$ ，稲わらが $4.34\text{kg}/10\text{a}$ で，もみのりん吸収量 $1.58\text{kg}/10\text{a}$ ，稲わら $0.37\text{kg}/10\text{a}$ であった。同様にB水田の玄米 $506\text{kg}/10\text{a}$ あたりの窒素吸収量は $10.76\text{kg}/10\text{a}$ ，りん吸収量は $1.97\text{kg}/10\text{a}$ （りん酸として $4.51\text{kg}/10\text{a}$ ）であった。内訳はもみの窒素吸収量 $5.49\text{kg}/10\text{a}$ ，稲わらが $5.27\text{kg}/10\text{a}$ で，もみのりん吸収量 $1.62\text{kg}/10\text{a}$ ，稲わら $0.35\text{kg}/10\text{a}$ であり，品種による吸収量の違いはなかった。

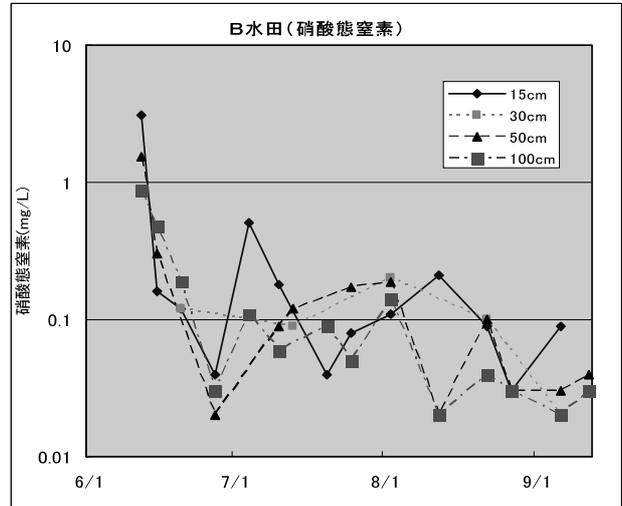
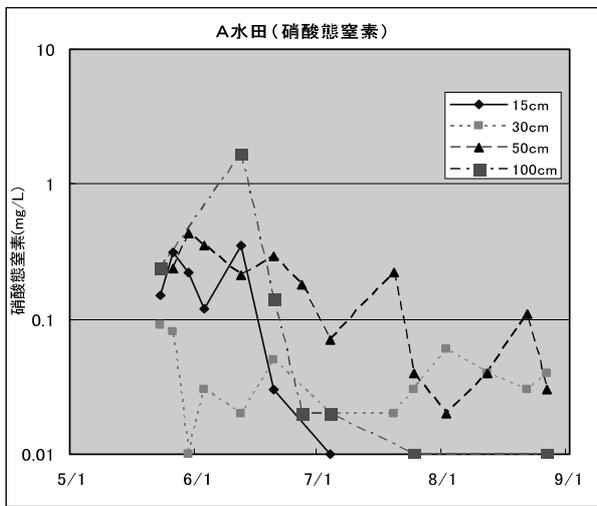
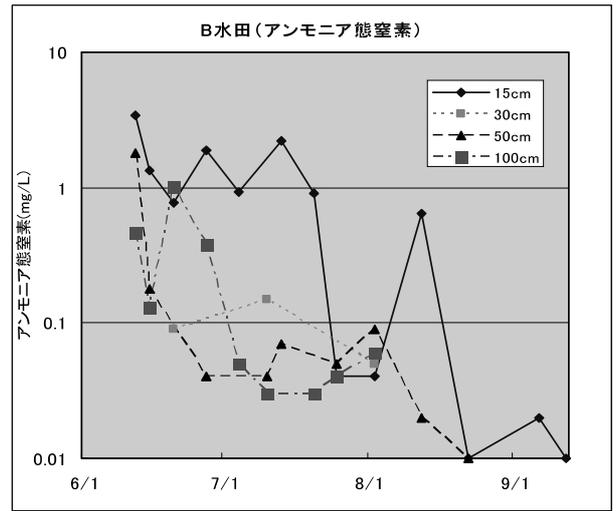
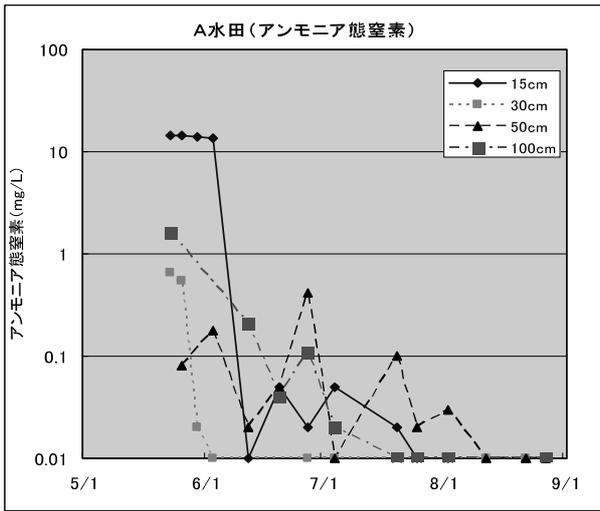


図9 水深別浸透水のアンモニア態窒素，硝酸態窒素の推移

比較のため「農業技術大系 土壌肥料編」農文協のデータ¹¹⁾を示したが、その値に対してA水田の窒素・りん施肥量はともに約50%、B水田の窒素・りん施肥量は約20%低く肥料減量型稲作といえる。比較データは流入量に窒素固定を、流出量に脱窒で失われる量が考慮されていたが、今回は調査していないので省略した。

水稻の施肥量を全国平均でみると、N69.5、P35.9、K53.2kg/ha (2001年)¹²⁾で1980~1985年の最高水準(108~109kgN/ha)から年々減少して、全体としての施肥量は1980年代の約6割に減っている¹³⁾との報告がある。

稲わらの窒素が比較データに比べ多量に含まれ、物質循環機能の増進の役割を果たしているといえる。

表7 水田における窒素・りんの物質収支 (kg/10a)

要因	A水田		B水田		農業技術大系土壌肥料編		
	窒素	りん	窒素	りん	窒素	りん	
流入量	取水	0.77	0.07	0.63	0.05	0.48	0.01
	雨水	0.61	0.02	0.56	0.01	1.34	0.12
	肥料	5.50	2.40	8.40	3.67	10.54	4.77
	稲わら	4.34	0.37	5.27	0.35	3.51	0.65
計	11.22	2.86	14.86	4.08	15.87	5.55	
流出量	表面排水	0.89	0.18	0.66	0.18	0.53	0.03
	浸透水	0	0	0	0	1.50	0.07
	稲体	9.51	1.95	10.76	1.97	9.80	2.02
	計	10.40	2.13	11.42	2.15	11.83	2.12
流入量と流出量の差	0.82	0.73	3.44	1.93	4.04	3.43	

流入量と流出量の差し引き分の窒素・りんは土壤中に養分として蓄積され、地力を保持すると考えられる¹⁾。実際に調査水田の作付け前の土壌の窒素・りんの含有量を表8に示す。この値は農水省が出している水田における地力増進基本指針による改善目標(平成9年5月29日改正)をA水田B水田共に満たしており地力に関しては良好な水田といえる。

表8 作付け前の水田土壌の窒素・りん含有量(kg/10a)

		A水田	B水田	改善目標
全窒素	(kg/10a)	310	380	
無機態窒素 (kg/10a)	NH ₄ -N	1.4	1.8	
	NO ₂ -N及びNO ₃ -N	1.8	0.76	
可給態窒素	(kg/10a)	22	26	12以上30以下
全りん (kg/10a)	P	140	120	
	P ₂ O ₅	330	280	
有効態りん (kg/10a)	P	14	9.4	
	P ₂ O ₅	32	22	

V まとめ

今回の調査結果は以下のとおりである。

- 1 水田から排出される水量は平成15年の調査では約400m³/10aであった。ただし、排水量は降雨量と密接に関係しており地域や年により変動するので、今回の水量の評価は困難であるが、きめ細かな水管理によって節水が可能であり、排出量も抑制できることが分かった。
- 2 代かき後の落水排水が排出負荷量に大きく影響しており、落水時期と施肥時期を調整することによって大幅に削減できると期待される。
- 3 水田の差し引き排出量はCOD負荷量0.08~2.7kg/10a、りん負荷量0.09~0.12kg/10aであった。窒素負荷量は0.49~0.53kg/10aが浄化吸収されていた。
- 4 水田における窒素・りんの物質収支を評価すると、肥料減量化の傾向が見られたが、水田の持つ地力保全機能は維持されていた。

今回の調査は水田の作付け期間に限定した負荷量であるので、今後精度の高い汚濁負荷量の評価を行うには年間を通じての調査や継続したデータの集積が必要であり、

今後の課題である。

文献

- 1) 笹田康子, 土取みゆき, 石原暁: 小規模事業場の汚濁負荷量削減調査, 香川県環境保健研究センター所報, 1, 60 - 67, (2002)
- 2) 香川県農業試験場土壌肥料: 地力保全基本調査総合成績書(香川県), 36 - 40, (1978)
- 3) 中川昭一郎: 水田用水量調節計画法(その2), 農土誌, 34(2), 22 - 32, (1966)
- 4) 日本土壌肥科学会編: 水田土壌の窒素無機化と施肥, 146, 博友社, (1990)
- 5) 国松孝夫, 綾戸幹, 武田育郎: 農林地からの窒素・リン負荷, 水, 32(4), (1990)
- 6) 高松地方気象台: 香川県の気象, (2003)
- 7) 山根一郎: 水田土壌学, 325 - 333, 農村漁村文化協会, (1982)
- 8) 宇土顕彦, 竺文彦, 大久保卓也, 中村正久: 灌漑期の水田における水量収支と栄養塩収支, 水環境学会誌, 23(5), 301 - 302, (2000)
- 9) 環境保全型農業技術指針検討委員会編: 作物別環境保全型農業技術, 32, 社団法人家の光協会, (1997)
- 10) 木戸三夫: おいしいコシヒカリ11俵どり新技術, 132 - 171, 富民協会, (1989)
- 11) 関矢信一郎: 水田のはたらき, 104, 社団法人家の光協会, (1992)
- 12) 農林水産省生産局生産資材課監修: ポケット肥料要覧2002/2003, 87, 農林統計協会, (2003)
- 13) 國松孝男, 駒井幸男: 農林地の水質化学研究の新展開, 環境技術, 33(5), 368 - 369, (2004)