研究論文

異なる肥培管理下における水稻栽培の 生産性と環境負荷の総合評価

黒川瑠美子・林 久喜・坂井直樹
筑波大学大学院生命環境科学研究科

Comprehensive Evaluation of Productivity and Environmental Loads in
a Paddy Field Under Different Fertilized Conditions

Rumiko KUROKAWA, Hisayoshi HAYASHI and Naoki SAKAI
Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

1. 緒言

化学肥料や農薬の使用, 高収量品種の導入および機械化に代表される農業の近代化は, 作物収量や労働生産性を飛躍的に向上させた (川田 1976, 丸山 2004). 一方, 近代農業では外部から多量の資材やエネルギーが投入されるため, 環境に与える負荷は強大なものとなり, 世界中でさまざまな問題が起きている (松本 2004, 西尾 2004).

温暖化は地球規模の気候変動をもたらし, 将来, 世界中に大きな被害を与えることが懸念される環境問題の一つである. 温暖化は産業革命以降の人為活動に伴う温室効果ガスの排出量増加により近年深刻化してきており (IPCC 2001), 各方面において温室効果ガスの削減が求められている. 二酸化炭素よりも強力な温暖化ポテンシャルを持つメタンは, 全発生量の 39% が農業セクター由来であり, 水田からはそのうちの 29% が発生している (細野 2000). 水田土壤中で生成されたメタンが大気中へ放出される経路には, 拡散や気泡による放出, 水稻の通気組織を経由しての放出があるが, これらのうち水稻の通気組織を経由して放出される割合が全体の 90% 以上を占めており

(野内ら 1999), 水田からのメタン放出と水稻の生育は密接に関係していると考えられる. 例えば, 多肥栽培は水稻の生育促進を介して, 収量の増加が期待できる一方で, メタン発生量を増加させる恐れがある (Neue 1993, Sass ら 1990). 施肥量の増加は農業の近代化に伴う収量増加に大きく貢献したが (川田 1976), 化学肥料の多投は外部環境へ大きな負荷を与えることが指摘されている (西尾 2005). 水田では稲体に吸収しきれない肥料成分が田面水に溶出し, 土壌に蓄積されていく. このような窒素やリンなどの肥料成分を高濃度を含む田面水が, 系外に排水された場合, 河川や湖沼の富栄養化を招く恐れがある (上沢 2005a). また, 硝酸態窒素や亜硝酸態窒素による地下水の硝酸汚染も問題となっている (上沢 2005a, 西尾 2005). すなわち, 生産性と環境負荷は相反する関係にあると認識されている.

水稻栽培において問題となっているこれら二つの環境負荷が, 外部環境に及ぼす影響や抑制のための研究が現在進められており, すでにいくつかの対策が提案されている (南川 2006, 小川 2005, 陽 2005). 一方, 環境問題の深刻化を受けて, 農業活動による環境影響を評価する試みが様々な分野で行われている. 例えば園芸や畜産, バイオ燃料など幅広い分野で応用されているライフサイクルアセスメント (伊藤・本藤 2007, 林 2006, 上沢 2005b) や, 硝酸汚染および亜酸化窒素発生量について, 既存のデータをもとにモデルを構築し, 改善に向けて利用しようとする取り組み (波多野

平成 20 年 10 月 27 日受付

平成 21 年 8 月 22 日受理

Corresponding author

林 久喜 Hisayoshi HAYASHI

〒305-8572 茨城県つくば市天万台 1-1-1

1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8572, Japan

E-mail : hayashi@sakura.cc.tsukuba.ac.jp

ら 2005) などがある。

このような手法は環境影響評価という性質上、生産性よりも環境負荷に重きが置かれていることが多い。しかし、水稻栽培における二つの環境負荷の例を挙げたように、作物生産において環境負荷と生産性の問題を同時に解決することは極めて困難である一方で、環境負荷のみによる評価手法は持続的作物生産を考える際には不十分であると思われる。生産性を維持したまま、環境負荷を可能な限り低減する作物生産システムの構築に向けての技術を適切に評価していくためには、生産性と環境負荷を同時に評価する必要がある。本研究では、水稻の生育、収量、田面水の水質に強く影響している肥料要素を要因とした時のメタン発生および水質と稲の収量を検討し、さらに、作物生産における生産性と環境負荷の相反する課題を総合的に評価する手法を検討した。

2. 実験方法

1) 栽培経過

実験は 2007 年に筑波大学農林技術センター内の水稻施肥量展示圃で実施した。淡色黒ボク土のこの圃場は、肥培管理が水稻栽培に与える影響を調査するために 1978 年から 30 年間にわたり同一の施肥設計で試験を行っている(米川ら 2001)。処理は窒素、リン酸、カリを各 7.5 kg/10 a ずつ施用する三要素区を標準とし、無窒素、無リン酸、無カリ、窒素倍量、リン酸倍量、カリ倍量、三要素倍量、無肥料、堆肥単用 (1000 kg/10 a)、三要素+堆肥 (1000 kg/10 a)、三要素+ケイカル の 12 試験区で構成されている。本実験はこの水稻施肥量展示圃の中の無肥料区、三要素区、三要素+堆

肥区および窒素倍量区の 4 試験区 (表 1) で実施した。

肥料として、窒素 (N) は硫酸アンモニウム (N : 21% 含有)、リン酸 (P_2O_5) は重過リン酸石灰 (P_2O_5 : 34% 含有)、カリ (K_2O) は硫酸カリウム (K_2O : 50% 含有)、堆肥は 2 年間腐熟させた稲わら堆肥を用いた。なお 1 区面積は 50 m² (10 m×5 m) で、試験区の反復はない。

試験区はコンクリート畦畔で区切られており、水は地下浸透により排水される。入水は 5 月 14 日に開始し、生育中の水管理は原則として最終落水まで常時湛水とした。5 月 17 日に各試験区の施肥設計に従って基肥を施用し、代かきを行った。27 日間育苗した日本晴の苗を 5 月 24 日に栽植密度 30 cm×15 cm、一株 4 本植えて移植した。追肥は、1 回目を幼穂形成期の 7 月 12 日 (移植後 49 日) に、2 回目を減数分裂期 (出穂 20 日前) の 7 月 24 日 (移植後 61 日) に表層施肥した。9 月 16 日に最終落水し、10 月 4 日に収穫した。

2) 調査項目

環境負荷として田面水の水質と水田からのメタンフラックスを測定した。水質は、試験区内の 2ヶ所から田面水を 500 ml ずつ採水し、全窒素濃度 (TN) および全リン濃度 (TP) を測定した。比較のために、水田に入水する前の灌漑水も採取した。全窒素濃度は、アルカリ性ペルオキシ二硫酸カリウム分解・紫外線吸光光度法 (都築・内野 1994)、全リン濃度は、ペルオキシ二硫酸カリウム分解・モリブデン青法 (橘・那須 1994) によって、多項目迅速水質分析計 (HACH 社、DR/5000 型) を用いて分析した。水質調査は 5 月 15 日の入水

表 1 試験区の施肥設計

試験区	N			P_2O_5		稲わら 堆肥
	基肥	追肥 1	追肥 2	基肥	基肥	
無肥料区	—	—	—	—	—	—
三要素区	5.00	1.25	1.25	7.50	7.50	—
三要素+堆肥区	5.00	1.25	1.25	7.50	7.50	1000
窒素倍量区	10.00	2.50	2.50	7.50	7.50	—

注) 1: 稲わら堆肥は基肥施用時に投入した。

2: 追肥は 2 回に分け、1 回目を幼穂形成期 (移植後 49 日) に、2 回目を減数分裂期 (移植後 61 日) に与えた。

3: N として硫酸アンモニウム、 P_2O_5 として重過リン酸石灰、 K_2O として硫酸カリウムを使用した。

後から最終落水前の9月13日まで、2週間ごとに測定した。なお、代かき（移植前7日）や追肥により水質が急激に変化することが予想されたので、これらの作業前後にも調査した。

メタンフラックスは1試験区2ヶ所について、密閉チャンバー法（Yagi and Minami 1990）により測定した。アクリル製のチャンバー（縦60 cm、横60 cm、高さ100 cm）を水稻8株に被せ、チャンバー設置後0、10および20分後のガスを空気採取用ポンプ（柴田科学、MP-2N型）を用いて10秒間採取した。これを、モレキュラーシーブ5Aが充填されたステンレスカラムを装着したガスクロマトグラフ（島津製作所、GC-8AIF）を用いて、FID検出器によりメタン濃度を測定し、濃度変化からメタンフラックスを求めた。調査は移植後18日の6月11日から最終落水後の9月18日まで基本的に2週間ごとに測定した。発生量の急変が予測される時期には、発生量のピークを検出するために測定間隔を短くした。なお、積算メタン発生量は水稻生育期間中のメタンフラックスの変動パターンを積分することにより算出した。メタンフラックスの測定日には、1試験区4ヶ所の深さ5 cmに埋設した白金電極と土壤用Ehメータ（藤原製作所、EHS-120）を用いて、土壤の酸化還元電位を測定した。

水稻の生育は、各試験区の5個体について移植後20日の6月13日から2週間ごとに草丈、茎数（穂数）および葉色（SPAD）を測定した。葉色はSPAD計（コニカミノルタセンシング、SPAD-502）を使用して、最上位完全展開葉の葉身2/3の位置で測定した。収量は、成熟期にメタン調査地点の水稻8株を地際で手刈りし、わら重および籾収量を調査した。

水稻栽培前（4月10日）および栽培後（10月11日）に、各試験区の5ヶ所から地表面を除く深さ10 cmの作土層の土壤を採取し、これを混合して、その試験区の土壤サンプルとした。暗所で風乾させ、2 mmの篩で篩った後、乳鉢で細かく粉碎し、CNコーダー（住化分析センター、SUMIGRAPH NC-800）を用いて土壤中の窒素および炭素含有率を測定した。

3. 結果および考察

1) 収量

生育は移植後4週目頃から試験区による差が顕

著になり始めた。無肥料区は生育が著しく劣っていたのに対し、窒素倍量区は地上部の生育が最も旺盛で、三要素+堆肥区は三要素区と同程度の生育量であった。成熟期におけるわら重は三要素+堆肥区が984 g DW/m²と最も多かったが、三要素区および窒素倍量区との間には差は見られず、精籾重は無肥料区（73 g/m²）<三要素区（655 g/m²）<三要素+堆肥区（747 g/m²）<窒素倍量区（803 g/m²）の順に多かった（表2）。穂数は、無肥料区が3.6本/株と最も少なく、窒素倍量区で16.8本/株と三要素区の129%を示し、最も多かった。

2) 田面水の水質

各試験区の田面水のTNは、基肥および代かきを行った移植前7日目、NおよびK₂Oの追肥後の移植後50日目および62日目の3時期に急激に増加した（図1）。これらの時期のうち、いずれの試験区も追肥後に比べ基肥・代かき時のTNの上昇が著しく、窒素倍量区では28.44 mg N/Lを示した。一方、灌漑水のTNは、生育期間中、0.40～1.80 mg N/Lの間で安定していたことから、田面水のTNは水田の肥培管理に強く影響を受けていることが明らかであった。

表2 坪刈り収量および穂数
(平均値±SE)

試験区	わら重 (g DW/m ²)	精籾重 (g/m ²)	穂数 (本/株)
無肥料区	205±4	73±1	3.6±0.2
三要素区	900±1	655±5	13.0±0.3
三要素+堆肥区	984±60	747±87	11.8±0.4
窒素倍量区	914±106	803±104	16.8±1.0

図1 田面水の全窒素濃度の推移

注) 3 mg N/L は、水稻の過繁茂を引き起こす下限値を示す（中安ら1967）。

図2 田面水の全リン濃度の推移
注) 0.10 mg P/L は、湖沼の環境基準を示す
(環境省 1971)。

田面水の TP が急激に増加した時期は、基肥および代かきを行った移植前 7 日目で、TN の経時変化と異なり、リン酸成分を施用しなかった追肥時には TP の上昇は見られなかった (図 2)。田面水の TP は三要素 + 堆肥区で基肥・代かき後に 0.11 mg P/L となり、4 試験区中最大であった。灌漑水の TP は、生育期間中 0.01~0.02 mg P/L の低濃度で推移しており、TN と同様に田面水の TP も水田の肥培管理に強く影響を受けていた。

高濃度の肥料成分を含んだ田面水が、富栄養化などの環境負荷として問題となるのは、水路や河川などの系外に排水されたときである。環境負荷を判断する基準として、水質汚濁に係る環境基準 (湖沼・類型 V) (環境省 1971) および農業 (水稻) 用水基準 (九州環境管理協会 2008) の値を検討した。TN の湖沼の環境基準は 1.00 mg N/L 以下であり、農業用水基準においても 1.00 mg N/L 以下が水稻の正常な生育のために望ましいとされているが、他の研究では、雨水中の TN でも 1.00 mg N/L を超えるケースが報告されている (金木ら 2002)。そこで TN については、やや過繁茂になるが収量には影響を与えないとされる 3 mg N/L の値を基準とした (中安ら 1967)。TP は農業用水基準については規定されていないため、湖沼の環境基準である 0.10 mg P/L 以下を用いた。田面水が系外へ排出された場合を想定すると、田面水が環境負荷となる時期は、TN では基肥・代かき時と 2 回の追肥後であり、TP では基肥・代かき時の 1 回であることが明らかとなった (図 1, 2)。

3) メタンフラックス

メタンフラックスは、無肥料区を除き、いずれ

図3 生育期間におけるメタンフラックスの推移
注) 図中の最高分けつ期および出穂期の矢印は、それぞれ三要素区の最高分けつ期 (移植後 58 日)、出穂期 (移植後 83 日) を示す。

の試験区も生育の前半では発生が少なく、最高分けつ期の移植後 58 日目以降発生量が増大して、最終落水後には減少するパターンを示した (図 3)。詳細にみると、三要素区の出穂期である移植後 83 日前後で、試験区によりメタン発生量に差がみられた。出穂前では、三要素 + 堆肥区で最も早くからフラックスの増加が始まり、移植後 78 日では 8.89 mg CH₄/m²/h と出穂前では 4 試験区中最大の発生量を示した。しかし出穂以降では、窒素倍量区のメタンフラックスが急激に増加し、移植後 97 日目に 26.24 mg CH₄/m²/h とフラックスのピークを迎えた。無肥料区は生育期間中 0.29 mg CH₄/m²/h 以下の低い値で推移した。

積算メタン発生量は、無肥料区 < 三要素区 < 三要素 + 堆肥区 < 窒素倍量区の順に多くなった (表 3)。三要素区の発生量 7.75 g CH₄/m² に対し、三要素 + 堆肥区でその 159%、窒素倍量区で 174% と発生量が多く、一方、無肥料区は 2% と極めて少なかった。このように肥料要素の違いにより、生育期間中の積算メタン発生量は大きく異なったが、出穂期的前後でメタン発生量を積算すると、試験区にかかわらず出穂後に発生したメタンが全発生量の 72~88% と高い比率を占めていた。このことから、水田からのメタン発生対策としては出穂以降の発生量を抑制することが重要と考えられた。生育期間全体の積算メタン発生量と各形質との相関を見ると、精糞重との間に有意な高い正の相関が見られ、収量が多いほど積算メタン発生量が多いことが明らかとなった (表 4)。

出穂までの積算メタン発生量は栽培前の土壌炭素含有率との間に有意な高い正の相関が見られ、出穂前は栽培前の土壌炭素が多いほど積算メタン発生量が多かった (表 4)。栽培前の炭素含有率は

表 3 生育期間全体の積算メタン発生量と出穂前後の割合

(平均値±SE)

試験区	全生育期間		出穂前 ¹		出穂後 ¹	
	(g CH ₄ /m ²)	(%) ²	(g CH ₄ /m ²)	(%) ²	(g CH ₄ /m ²)	(%) ²
無肥料区	0.19±0.21	100	0.05±0.24	26	0.14±0.03	74
三要素区	7.75±3.68	100	1.12±0.32	14	6.62±3.35	85
三要素+堆肥区	12.32±2.52	100	3.47±1.18	28	8.85±1.34	72
窒素倍量区	13.50±0.13	100	1.66±0.26	12	11.84±0.39	88

注) ¹: 出穂期は三要素の出穂期 (移植後 83 日) を基準とした。²: 生育期間全体の積算メタン発生量を 100 としたときの比率を示す。

表 4 積算メタン発生量と精籾重、穂数および栽培前土壌炭素含有率との相関係数

項目	積算メタン発生量		
	全生育期間	出穂前	出穂後
精籾重	0.970*	0.746	0.964*
穂数	0.916	0.522	0.963*
栽培前土壌炭素含有率	0.738	0.979*	0.616

注) *: 5% 水準で有意。

表 5 水稻栽培前後の土壌炭素含有率
(平均値±SE)

試験区	炭素含有率 (%)	
	栽培前	栽培後
無肥料区	5.07±0.10	5.43±0.06
三要素区	5.32±0.07	6.01±0.05
三要素+堆肥区	5.64±0.02	6.46±0.07
窒素倍量区	5.29±0.02	5.52±0.07

注) 1: 値はいずれも乾物重に対する含有率を示す。

2: 栽培前および栽培後の土壌はそれぞれ 4 月 10 日, 10 月 11 日に採取した。

堆肥を毎年施用している三要素+堆肥区が、5.64% と他の 3 試験区と比べて高かった (表 5)。三要素+堆肥区でメタンフラックスが増加し始めた生育前半 (移植後 60 日) は、水稻の地上部や根圏は生育途中のため小さく、水稻から分泌される有機物が少ないため、メタン生成の基質を土壌中の有機物に大きく依存していると考えられた。

また、出穂以降の積算メタン発生量と穂数との間に有意な高い正の相関が見られ、穂数が多いほど出穂以降のメタン発生量が増加したことが明らかとなった (表 4)。穂数がメタン発生量に及ぼす影響として、全茎数と冠根数との間には有意な正の相関関係が見られた (片野 2004) ことから、穂

数が多くなることで冠根数が増え、根の表面積が増加したものと推察された。さらに、水稻の生育中期以降においては、根からの滲出物と枯死根の分解産物がメタン生成の最も重要な炭素源である (Neue ら 1996) ことから、広い根圏で水稻由来の有機物が増加したことで、出穂期以降のメタン発生量が増大したと考えられた。また、生育期間全体の積算メタン発生量と同様に、出穂以降の積算メタン発生量は精籾重との間に有意な高い正の相関が見られ、精籾重が多いほど出穂以降のメタン発生量が増加し、生育期間全体のメタン発生量の増加につながったことが明らかとなった (表 4)。これらのことから、稲わら堆肥や窒素倍量区の肥料要素が穂数の増加を促して、籾収量とメタン発生量の両方に影響していることが明らかとなった。

4) 生産性と環境負荷の総合評価

肥料要素が複数の環境負荷に及ぼす影響を同時に評価するため、多成分データからなる情報を総合して把握することが可能なレーダーチャート (上田 2003) を作成した。積算メタン発生量と、水質基準を超えた基肥・代かき時、2 回の追肥後の TN、基肥・代かき時の TP について、三要素区の値を 100 としたときの比率で表し、評価した (図 4)。三要素区における環境負荷量を 100 として比較することで、異なる肥料要素が各環境負荷量に及ぼす影響を相対的に検討することができた。

無肥料区の積算メタン発生量は 2 と極めて小さく、他の環境負荷についても 36 以下の低い値であった。三要素+堆肥区では基肥・代かき時および追肥 1 回目の TN への負荷は 72 以下であったが、TP および積算メタン発生量については、それぞれ 129, 159 と三要素区より高かった。窒素倍

量区の環境負荷は、TPを除くすべての項目について4試験区中最も高い値を示し、特に積算メタン発生量は174であった。

作物生産システムにおける持続性を評価する際、環境負荷の低減は大変重要だが、収量性を維持しつつ環境負荷をいかに低減させるかが重要となる。そこで、精籾1g当たりの積算メタン発生量、田面水のTNおよびTPを算出し、さらに肥料要素による影響を比較するために、図4と同様に、三要素区における値を100としたときの比率で表したレーダーチャートを作成した(図5)。この図では環境負荷量が三要素区よりも大きい場合は、その肥料要素が収量よりも環境負荷のほうに強く影響したと判断できる。

図4 肥料要素が環境負荷量に及ぼす影響
注) いずれの形質も三要素区の値を100とした。
TN, TPはそれぞれ田面水の全窒素濃度, 全リン濃度を示す。

図5 肥料要素が精籾1g当たりの環境負荷量に及ぼす影響
注) いずれの形質も三要素区の値を100とした。
TN, TPはそれぞれ田面水の全窒素濃度, 全リン濃度を示す。

無肥料区における積算メタン発生量への影響は22と小さかったものの、基肥・代かき時の水質に及ぼす影響は三要素区の2倍以上と高かった。これは収量性が三要素区の11%と非常に低いことが影響していた。三要素+堆肥区では、図5と同様に、田面水のTNは測定時期にかかわらず60~78のレベルで低かったが、積算メタン発生量は139、基肥・代かき時のTPは113と、いずれも三要素区より高かった。窒素倍量区では積算メタン発生量が142と高く、N倍量施肥による増収効果よりもメタン発生量増加の影響の方が大きいことが明らかとなった。しかし、窒素倍量区では収量性が三要素区の1.2倍と高かったため、図4と比較して、水質を含めた環境負荷量は全体的に減少した。

このように、環境負荷のみでの評価(図4)と収量性を考慮した評価(図5)では、無肥料区や窒素倍量区において異なる結果となった。後者のように環境負荷と同時に収量も評価することで、生産性と環境負荷とのバランスについて、より現実的な評価が可能となった。この評価法の利点は、複数の環境負荷への影響について全体的な傾向として視覚的に判断できることである。しかし、例えば積算メタン発生量や田面水のTNのように、環境負荷の種類により1%という単位の持つ意味が異なることがこの評価法の課題である。

以上のことから、生産性の維持と環境負荷の低減を両立させるために、肥培管理が個々の要素に及ぼす影響を明らかにすると共に、生産性および環境負荷の両面を総合的に評価する手法を用いて、作物生産システムを評価、構築していくことが重要であると考えられた。

4. 摘要

作物生産システムにおける総合的な評価を行う試みとして、肥料要素がメタン発生および田面水の水質の二つの環境負荷並びに籾収量の両面に及ぼす影響について検討した。

田面水の全窒素濃度(TN)は、基肥施肥・代かき時と、窒素およびカリの2回の追肥後の3時期に急激に上昇し、全リン濃度(TP)は基肥施肥・代かき時にのみ増加した。生育期間中の積算メタン発生量および精籾重は、無肥料区<三要素区<三要素+堆肥区<窒素倍量区となり、両者の間には高い正の相関が見られ、収量が増えるほど積算

メタン発生量が高まった。積算メタン発生量の約8割が出穂以降に発生しており、これと穂数との間に高い正の相関が見られた。すなわち、水田では出穂以降のメタン発生が環境負荷に大きな影響を及ぼし、肥培管理が穂数への影響を介して収収量とメタン発生量の双方に影響していることが明らかとなった。一方、出穂前の積算メタン発生量は栽培前の土壤炭素含有率との間に高い正の相関が見られた。

積算メタン発生量、田面水のTNおよびTPを精糲1g当たりの値で算出し、これらの値を三要素区を100としたときの比率で表すレーダーチャートを作成した。このレーダーチャートは肥培管理の違いによる生産性と環境負荷を総合的に評価することが可能であった。その結果、環境負荷は試験区により異なったパターンを示し、肥培管理の違いが収収量を尺度とした各環境負荷量に及ぼす影響は大きく異なることが明らかとなった。

謝辞

本研究は科学研究費補助金、課題番号18580325の支援を受けた。圃場管理にあたっては筑波大学農林技術センター作物生産技術班技術職員の多大なる支援を賜った。記して謝意を表する。

キーワード

環境負荷、水質、生産性、総合評価、メタン発生量、収収量、レーダーチャート

引用文献

波多野隆介・犬伏和之・八木一行・秋山博子・新藤純子・岡本勝男・川島博之・長谷川周一・木村真人(2005): 農業生態系からの環境負荷の測定と予測, 日本土壤肥科学雑誌 76 (2); 229-235.

林 清忠(2006): 農業生産システムの環境影響評価—ORとLCA—, オペレーションズ・リサーチ 51 (5); 268-273.

細野達夫(2000): 水田におけるメタンフラックスと水稻体を通じたメタン放出機構に関する研究, 農業環境技術研究所報告 18; 33-80.

IPCC(2001): (Climate Change 2001: The Scientific Basis), Chapter 1. The Climate System: an Overview, Cambridge University Press, Cambridge, pp.92-96.

伊藤公紀・本藤祐樹(2007): バイオ燃料の可能性とリスク, 現代化学 439; 52-58.

金木亮一・矢部勝彦・小谷廣道・岩間憲治(2002): 田面水の窒素・リン濃度に及ぼす代かき、施肥および土壌の種類の影響, 日本土壤肥料学雑誌 73 (2); 125-133.

環境省(1971): 水質汚濁に係る環境基準について, 別表2 生活環境の保全に関する環境基準, 1 河川(2) 湖沼. <http://www.env.go.jp/kijun/wt2-1-2.html>

片野 學(2004): 水稻1株の全茎数と冠根数との関係, 日本作物学会紀事 73 (1); 6-9.

川田信一郎(1976): (日本作物栽培論), 第8章 水稻の増産期にみられた諸技術(その2), 養賢堂, 東京, pp.180-185.

九州環境管理協会. 環境に関する情報集. みず. 公共用水域. 6 農業用水基準. <http://www.keea.or.jp/qkan/index.htm>

丸山幸夫(2004): (山崎耕字編 農学大事典), 31. 水稻の栽培, 養賢堂, 東京, pp.1054-1055.

松本 聰(2004): (山崎耕字編 農学大事典), 6. 農業と環境, 養賢堂, 東京, pp.208-209.

南川和則(2006): 水田からの温室効果ガス発生を抑制する農作業技術, 農作業研究 41 (3); 115-124.

中安信行・山本 昇・大西公一・中島嗣朗・柳田明德(1967): 都市近郊における水稻汚水害に関する研究, 東京都農業試験場研究報告 4; 9-145.

Neue, H.U.(1993): Methane emission from rice fields, Biosciences 43; 466-474.

Neue, H.U., R. Wassmann, R.S. Lantin, M.C.R. Alberto, J.B. Aduna and A.M. Javellana (1996): Factors affecting methane emission from rice fields, Atmospheric Environment 30; 1751-1754.

西尾道徳(2004): (山崎耕字編 農学大事典), 6. 農業と環境, 養賢堂, 東京, pp.174-178.

西尾道徳(2005): (農業と環境汚染—日本と世界の土壌環境政策と技術—), 4章 農業由来の硝酸、リン酸、重金属類による環境汚染, 農山漁村文化協会, 東京, pp.107-145.

野内 勇・細野達夫・青木一幸(1999): 水田からの水稻を介したメタンの放出, 農業気象 55 (3); 267-287.

- 小川吉雄 (2005) : (農文協編 環境保全型農業大事典① 施肥と土壌管理), 地下水の硝酸汚染と農業からの負荷, 農山漁村文化協会, 東京, pp.55-56.
- Sass, R.L., F.M. Fisher and P.A. Harcombe (1990) : Methane production and emission in a Texas rice field, *Global Biogeochemical Cycles* 4 ; 47-68.
- 橘 治国・那須義和 (1994) : (日本分析化学会北海道支部編 水の分析 (第4版)), 8.7 全リン, 化学同人, 京都, pp.271-273.
- 都築俊文・内野栄治 (1994) : (日本分析化学会北海道支部編 水の分析 (第4版)), 8.5 全窒素, 化学同人, 京都, pp.266-268.
- 上田尚一 (2003) : (統計グラフ), 7. 多成分データのグラフ, 朝倉書店, 東京, pp.91-102.
- 上沢正志 (2005a) : (石井龍一編 環境保全型農業事典), 2章 肥料と肥料成分の環境影響, 2.8 肥料成分の水域環境への影響, 丸善, 東京, pp.236-246.
- 上沢正志 (2005b) : (石井龍一編 環境保全型農業事典), 総論編 VII 農業技術のライフサイクルアセスメント, 丸善, 東京, pp.101-112.
- Yagi, K. and K. Minami (1990) : Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields, *Soil science and plant nutrition* 36 (4) ; 599-610.
- 米川和範・今野 均・菅原慶子・林 久喜・坂井直樹 (2001) : 黒ボク土における水稻の収量に及ぼす連用施肥の影響, 筑波大学農林技術センター研究報告 14 ; 7-18.
- 陽 捷行 (2005) : (農文協編 環境保全型農業大事典① 施肥と土壌管理), 農業生態系からの温室効果微量ガスの発生, 農山漁村文化協会, 東京, pp.90-91.

Summary

The effect of fertilized conditions on environmental loads of methane emissions and water quality in a paddy field and the yield of rice were comprehensively evaluated. The experimental plots were no-fertilizer plot (0), NPK plot (N, P_2O_5 , K_2O 7.5 g/m² each), NPKM plot (N, P_2O_5 , K_2O 7.5 g/m² each, rice straw manure 1000 g/m²) and 2NPK plot (N 15.0 g/m², P_2O_5 , K_2O 7.5 g/m² each). Total nitrogen concentration (TN) in the flood water increased at basal application and top dressings but total phosphorus concentration (TP) increased at basal application only. The total methane emissions during the rice growing period and the weight of winnowed rough rice were ordered as follows : $0 < NPK < NPKM < 2NPK$. There was a positive correlation indicating methane emissions increase with higher rice yield. Approximately 80% of the total methane emissions occurred after heading. Total methane emission, TN and TP were calculated per unit yield of winnowed rough rice, expressed as the proportion of the NPK plot, and recorded in a radar chart. This chart was very useful for comprehensively assessing the productivity and environmental loads. Manure input increased methane emissions but decreased TP. Double input of nitrogen increased methane emissions but didn't affect the environmental loads in the water. Therefore, the influences on environmental loads per unit yield widely differed with the kind and amount of fertilizer used.

Key Words

Comprehensive evaluation, environmental load, methane emission, productivity, radar chart, rough rice yield, water quality