

有機栽培水田における水稲生育・収量・品質の評価と メタンおよび亜酸化窒素発生に関する研究

当真 要¹⁾・丸山 明日香¹⁾・大森 信吾¹⁾
永田 修²⁾・上野 秀人¹⁾

Study of Rice (*Oryza sativa*) Growth, Yield, and Quality, and Variations of Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Field Managed under Organic Farming.

Yo Toma¹⁾, Asuka Maruyama¹⁾, Shingo Omori¹⁾, Osamu Nagata²⁾ and Hideto Ueno¹⁾

Summary

Rice growth, yield and its quality, methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) emissions were investigated in the paddy field. Study was conducted in two paddy fields (conventional paddy (C_{paddy}) and permacultural paddy (P_{paddy}) fields) in experimental farm of Ehime University in 2012. In P_{paddy}, white clover (*Trifolium repens*) was incorporated as a green manure for basal fertilizer. Amount of carbon (C) incorporated in C_{paddy} in 2011 as a residue of rice straw was 72.1 g C m⁻², and in P_{paddy} in 2012 as a green manure was 368 g C m⁻². While, basal and supplemental fertilizer nitrogen (N) (8 g m⁻²) was applied in C_{paddy}, incorporated N by white clover was amount to 20.9 g N m⁻² in P_{paddy}. Plant height, stem number, and chlorophyll concentration of rice (*Oryza sativa*), and CH₄ and N₂O emission were measured in both paddy fields in an every week or every 10 days. Soil sample (0–10-cm depth) was collected, and pH, EC and mineral N concentration were analyzed. In P_{paddy}, stem number of rice was tended to be suppressed. However, non-productive tiller was lower compared with that in C_{paddy}. Number of panicles and brown rice yield were almost same between two paddy fields. Quality of brown rice in P_{paddy} was lower compared with that in C_{paddy} because of increasing the rate of white belly rice due to high temperature during ripening stage and higher protein content due to higher concentration of nitrate after intermitted drainage. Methane flux was increased before the intermitted drainage, and then, decreased toward the end of September in both paddy fields. Higher amount of cumulative CH₄ emission in P_{paddy} compared with C_{paddy} suggests that incorporation of labile organic C from white clover would be a substrate for CH₄ production in C_{paddy}. Though, N₂O flux increased after intermitted drainage in both paddy fields, there were no significant difference in cumulative N₂O emission among two paddy fields. That might show that green manure application as a fertilizer did not always cause increasing N₂O production and emission from paddy field.

1) 愛媛大学農学部 (Faculty of Agriculture, Ehime University)

2) 農研機構北海道農業研究センター (NARO Hokkaido Agricultural Research Center)

緒 言

近年環境や健康に対する意識の高まりなどから、持続的農業生産や環境保全型農業が注目されている。農林水産省は平成11年に改正されたJAS法に基づいて、有機農産物に関する日本農林規格を制定し、有機農産物などに係る検査認証制度を設けている（農林水産省，2014）。例えば有機農産物のJAS規格においては、多年生でない作物の場合栽培前2年以上の間、圃場に使用する種子または苗や、肥培管理、動植物の防除に関する定められた基準に従って農産物の生産を行っていることが認定の条件として定められている。また、地方自治体においても類似の制度が独自に制定されている所もあり、例えば愛媛県においては特別栽培農産物等認証制度（エコえひめ農産物認証制度）に基づき、農薬・化学肥料の使用程度によって「農薬・化学肥料不使用農産物」や「特別栽培農産物」等を設けている（愛媛県，2014）。このような認証を受けた農作物は、そのブランドとしての付加価値に加え、施肥や除草等に関わる労働量の増加から（鈴木ら，1993）、一般的に販売価格が高い。一方で、有機栽培では慣行の栽培管理と比較して、収量や品質で劣ることがあることが指摘されている。例えば山形県における水田においては、有機栽培による収量が少ない場合で慣行栽培の7割程度になったことが報告されている（鈴木ら，1993）。このようなことから、有機栽培の導入においては収益性を確保する上でも慣行栽培との比較から労働や収量・品質の面で評価をする必要がある。

有機栽培では使用できる肥料の種類は基本的に有機質のものに限られている。この有機質肥料の使用は、近年国際的に問題となっている地球温暖化を抑制に貢献できるとも言われている。農地土壌は有機物の形で炭素を多量に含んでいるが、農業活動による耕起等によって有機物が分解され炭素が失われるという事が一般的に生じている。有機栽培においては、有機物を施用することにより有機態の炭素は一部土壌中に蓄積し、本来二酸化炭素（CO₂）として大気に戻る有機態炭素を土壌に隔離（Carbon sequestration）する機能を持つ可能性がある。しかしながら、特に水田においては有機物の施用はCO₂より25倍も熱の保持能が強い温室効果ガスであるメタン（CH₄）が多量に発生する原因となることが指摘されており（IPCC，2007；Naser et al. 2007）、水田における有機物の施用は炭素の蓄積とCH₄の生成を総合的に評価する必要がある。また、窒素肥料としての機能を期待して有機物を施用する場合、CO₂の298倍の熱の保持能が強い温室効果ガスである亜酸化窒素（N₂O）が生成・放出される可能性がある。N₂Oは主に硝化や脱窒の過程で生成されるが、特に脱窒過程においてN₂Oが生成される場合、嫌気呼吸の過程で電子受容体としての硝酸に加え電子供与体としての有機物が必要となり、土壌への有機物の施用は脱窒過程でのN₂O生成を促進する可能性がある。しかしながら、有機栽培におけるこれら温室効果ガス発生に関する知見はまだ少なく、環境にやさしいとされている有機栽培が地球温暖化に与える環境を正しく評価する必要があると考えられる。

以上より、本研究では有機栽培で管理されている水田を対象として、慣行の栽培管理がなされている水田との比較により、有機栽培による水稲の生育や収量および品質について評価を行った。また、水稲有機栽培での有機物の施用がCH₄およびN₂O発生量に与える影響を評価し、有機栽培において発生するCH₄やN₂O発生の抑制方法の確立に有用な知見を与える事を目的として調査を行った。

材料及び方法

(1) 調査地

本研究は愛媛県松山市の愛媛大学農学部附属農場の試験水田にて2012年に行った。松山地方気象台（北緯33度50.6分，東経132度46.6分）の観測では、調査地域の年平均気温は16.5℃、年間降水量は1315mmである。月平均気温は最も暑い8月で27.8℃であり、降水量は梅雨の6月に最も多く平均で224mmである。2012年4月から10月までの月平均気温および月降水量を第1表に示した。

第1表 調査地における2012年4月から10月までの月平均気温及び降水量

	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
月平均気温 (°C)	15.2	19.1	22.3	27.3	28.8	24.8	19
降水量 (mm month ⁻¹)	82.5	38.5	280	199.5	91.0	100.5	98

調査は化学肥料及び除草・防除のための農薬を使用している水田（慣行水田）と5年以上緑肥（シロクローバー，*Trifolium repens*）を用いた無化学肥料・無農薬栽培を行っている水田（有機水田）にて行った。慣行水田と有機水田土壌の物理・化学性をそれぞれ第2表および第3表に示した。慣行水田の土壌サンプルは2月27日に行った土壌断面調査で採取されたものであり、有機水田の土壌サンプルは6月14日に採取したものである。最も表層の土壌に関して、慣行水田と有機水田のpHは同程度だが、ECはそれぞれ29および60.2 $\mu\text{S cm}^{-1}$ と有機水田で高い。全炭素含量は有機水田で慣行水田よりも高く（慣行水田：1.45%、有機水田：1.84%）、礫含量が低い（慣行水田：122 g kg^{-1} 、有機水田：46.3 g kg^{-1} ）。また、有機水田は慣行水田よりも粘土含量が高く（慣行水田：19.2%、有機水田：25.1%）、慣行水田の土性が砂質植壤土であるのに対し有機水田の土性は植壤土と分類された。

第3表 有機水田表層土壌の物理化学性

層位	深さ (cm)	pH [§]	EC [§] ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	全炭素 含量 (%)	全窒素 含量 (%)	C/N	可吸態リン酸 (Truog) ($\text{mg P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$)	仮比重	仮比重 ($< 2\text{mm}$) (g cm^{-3})
表層	0-10	6.30	60.2	1.84	0.16	11.2	11.2	ND	ND
層位	礫含量 (g kg^{-1})	飽和 透水係数 ($\times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$)	(粗砂)	砂 (細砂) (%)	シルト	粘土	土性 (国際法)		
表層	46.3	ND	45.3	16.4	61.7	13.2	25.1	植壤土	CL

§：2012年6月14日から9月19日までの12回の測定の平均値

ND：未測定

第2表 慣行水田土壌の物理化学性

層位	深さ (cm)	pH	EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	全炭素含量 (%)	全窒素含量 (%)	C/N比	可吸態リン酸(ブレイII) ($\text{mg P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$)	遊離酸化鉄含量 (g Fe kg^{-1})
Ap1	0-15	6.4	29	1.45	0.15	9.41	4602	0.52
Ap2	15-19	6.6	31	0.81	0.11	7.16	5869	1.08
Bg1	19-22.5	6.8	29	0.63	0.06	9.91	4079	3.17
Bg2	22.5-31	6.9	31	0.40	0.06	6.64	403	3.91
Bg3	31-42	7.0	29	0.34	0.09	3.71	185	2.29
Bg4	42-45	7.0	29	0.51	0.04	13.1	76.3	2.27
Bg5	45-70	7.5	16	0.34	0.06	5.27	75.5	1.66
Bg6	70-86	7.4	38	0.40	0.10	3.78	73.5	40.3
Bg7	86-96	7.4	31	0.33	0.04	9.24	194	1.83

層位	仮比重 (g cm^{-3})	仮比重 (< 2 mm)	礫含量 (g kg^{-1})	飽和透水係数 (10^{-5} m s^{-1})		砂		シルト (%)	粘土 (%)	土性 (国際法)	
				粗砂	細砂	粗砂	細砂				
Ap1	1.36	1.19	122	0.967	0.967	42.8	22.0	64.8	16.0	19.2	砂質植壤土 SCL
Ap2	1.50	1.35	109	0.035	0.035	31.7	25.1	56.9	17.4	25.8	砂質壤土 SC
Bg1	1.50	1.35	91.6	0.035	0.035	43.4	19.8	63.2	8.9	27.9	砂質壤土 SC
Bg2	1.53	1.40	84.6	0.002	0.002	48.1	16.5	64.6	18.1	17.3	砂質植壤土 SCL
Bg3	1.57	1.37	124	0.059	0.059	50.3	16.5	66.8	11.4	21.8	砂質植壤土 SCL
Bg4	1.60	1.40	124	1.507	1.507	53.3	14.8	68.1	10.8	21.1	砂質植壤土 SCL
Bg5	1.51	0.86	431	0.310	0.310	57.2	9.05	66.2	12.4	21.4	砂質植壤土 SCL
Bg6	1.45	1.24	146	0.107	0.107	45.6	11.2	56.8	12.5	30.7	砂質植土 SC
Bg7	ND	ND	148	ND	ND	46.1	14.9	61.0	10.1	28.9	砂質植土 SC

ND: 未測定

(2) 栽培・圃場管理

慣行水田の水稲 (*Oryza sativa*) の栽培品種はヒノヒカリ、また有機水田の栽培品種は松山三井で、定植密度はどちらも 15.2 株 m^{-2} (株間22cm、条間30cm) とした。慣行水田では2011年の11月16日、および2012年4月24日と6月5日に耕耘を行った。その後、6月17日に基肥を施用し、6月18日に入水および代かきを行い、6月19日に定植した。中干しまでは常時湛水で管理し、7月29日から8月9日まで中干しを実施し、その後は間断灌漑で管理した。中干し後の8月11日に穂肥を施用し、9月11日に最後の入水を行い、10月7日に収量調査を行った。有機水田では2011年11月3日に耕耘した後、11月4日にシロクローバーを播種 (4.0 g m^{-2}) した。その後、2012年5月12日にシロクローバーのバイオマス量の測定を行い、5月20日にシロクローバーを緑肥として土壤にすき込み、6月8日に代かき、6月11日に定植を行った。中干しまでは常時湛水で管理し、定植後はほぼ10日おきに3回 (6月22日、7月4日、7月16日) 機械除草を実施した。8月1日頃から8月9日まで中干しを実施し、以降は間断灌漑を行った。8月31日に最後の入水を行い9月19日に収量調査を行った。

慣行水田では基肥として高度化成肥料および尿素を組み合わせ $\text{N} : \text{P}_2\text{O}_5 : \text{K}_2\text{O} = 4.0 : 4.0 : 4.0 \text{ kg m}^{-2}$ を施用し、穂肥は尿素と塩化カリウムを組み合わせ $\text{N} : \text{P}_2\text{O}_5 : \text{K}_2\text{O} = 4.0 : 0 : 4.0 \text{ kg m}^{-2}$ を施用した。有機水田でのシロクローバーのバイオマス測定は、 0.25 m^2 ($50\text{cm} \times 50\text{cm}$) のコドラートを用いて9反復で地上部を刈り、その後深度10cmまでの地下部を5mmのふるいでふるって地下部のみを採取した。刈り取ったシロクローバーの地上部および地下部は玉ねぎネットに入れ、 $70^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ で48時間以上乾燥させ、乾燥重量を求めた。その後、粉砕機で十分に細かく粉砕し、全炭素含量および全窒素含量をNCアナライザー (Sumigraph NC-80 auto, Sumika Chemical Analysis Service, Osaka, Japan) で分析した。

慣行水田では2011年秋に圃場に残された稲わらの量を測定した。 0.25 m^2 ($50\text{cm} \times 50\text{cm}$) のコドラートを用いて3反復で土壤表面に残された稲わらを集め、シロクローバーの分析と同様にして乾物重、全炭素含量および全窒素含量を求めた。

(3) 生育・収量・玄米品質調査

水稲の生育期間中、水稲の草丈、莖数、および葉色値を測定した。各項目はそれぞれの調査地で30株を対象に調査を行った。頻度は生育期間を通して週に1回から10日に1回程度であった。葉色値は葉色値計 (SPAD-502, Konica Minolta Sensing, Inc., Osaka, Japan) を用い、1株から1枚の展開葉を選びその3カ所を測定し平均値を記録した。

収量調査は慣行水田および有機水田それぞれ10月7日および9月19日に行った。各水田でそれぞれ72株を選別し穂数を数えた後、8株ずつ一まとめに刈り取って束ねた。その後野外にて乾燥させた後、全て10月16日に脱穀、籾すりを行った。脱穀の前後に株の重量を測定し、重量の差分から籾重を求めた。さらに、200g程度の籾の籾すりを行い、その重量を粗玄米重とした。粗玄米を1.85mmのふるいにかけたものを整玄米とし、整玄米の千粒重、整粒歩合、乳白粒割合、タンパク含量 (15%水分)、アミロース含量、および食味値を穀粒判別機 (RGQI 10A, SATAKE CORPORATION, Hiroshima, Japan) および成分分析計 (AN-700, Kett Electric Laboratory, Tokyo, Japan) を用いて分析した。

(4) メタン及び亜酸化窒素発生量調査

CH₄およびN₂Oフラックスをクローズドチャンバー法を用いて測定した。ガスフラックス測定は3反復で行い、水稻の定植直後から週に1回から10日に1回程度の頻度で行った。チャンバーは縦30cm、横60cm、高さ120cmの2段式アクリル製チャンバーを用いた(第1図)。上段のチャンバーにはファンが付いており、チャンバー設置時はバッテリーで作動させチャンバー内部の空気が循環するようになっている。また、上部チャンバーには温度計、圧力調整用の袋、およびガスサンプル採取用の管が付いている。水稻の草丈が50cm程度までは上部チャンバーのみを用い、草丈50cm以上では下段のチャンバーに上部チャンバーを載せて測定を行った。下段のチャンバー使用時は下部10cmを土壌に挿入し、それ以降は圃場に設置したままにした。下段チャンバーの側面には片側2カ所ずつ16mmの穴があり、測定時以外は水の出入りができるようになっている。この穴はフラックス測定時には栓をしてチャンバーを密閉した。



第1図 CH₄、N₂Oフラックス測定用透明チャンバー

ガスサンプルはチャンバーを設置して4分、19分、34分後に20ml容のシリンジで採取し、真空に脱気した10ml容の褐色のバイアル瓶に封入して分析まで保管した。3回のガス採取次にはチャンバー内部の気温も記録した。ガスサンプルのCH₄およびN₂O濃度の分析はそれぞれFIDおよびECDガスクロマトグラフィーにて行った(CH₄:GC-8A, SHIMADZU, Kyoto, Japan、N₂O:GC-14B, SHIMADZU, Kyoto, Japan)。それぞれの濃度から下記の式を用いて非直線回帰によりフラックスを求めた(土壤環境分析法, 2000)。

$$F = \rho \times V/A \times (C_1 - C_0) \frac{2}{t} (2C_1 - C_2 - C_0) \times \ln\{(C_1 - C_0)/(C_2 - C_1)\} \times 273/(273 + T)$$

Fはフラックス (mg C or N m⁻² hr⁻¹)、 ρ はガスの密度 (CH₄-C: 0.538 mg m⁻³、N₂O-N: 1.259 mg m⁻³)、Aはチャンバーの底面積 (m²)、Vはチャンバー内の田面水より上の気体の体積 (m³)、C₀は4分、C₁は19分、C₂は34分のチャンバー内のガス濃度 (ppmv)、tは測定間隔 (t=15/60 hr)、Tはガスサンプル時のチャンバー内の気温 (°C) である。

CH₄およびN₂Oの積算放出量は各フラックスの値を台形法で求めた。積算期間は慣行水田で102日、有機水田で100日とした。

(5) その他測定項目

ガスフラックス測定時にチャンバーの周囲で5cm深の地温を3反復で測定した。また、ガスフラックス測定地点の周囲に白金電極(EP-201, FUJIWARA SCIENTIFIC CO., LTD, Tokyo, Japan)を5cm深に設置し、ガスフラックス測定時の土壌Ehを測定した。また、ガスフラックス測定時に先端を切断した20ml容のシリンジを用い、0-10cmの土壌を3反復で採取した。採取した土壌は実験室に持ち帰り、1:5の水抽出でpH(H₂O)、1:10の水抽出でECを測定した。また1:10のKCl(10%)抽出液を濾過後、アンモニウム態窒素(NH₄⁺)含量をインドフェノール青比色定量法、硝酸態窒素(NO₃⁻)含量を塩化バナジウム(Ⅲ)を用いた比色定量法にて分析した。同じ土壌サンプルを用いて含水率を分析した。

(6) 統計解析

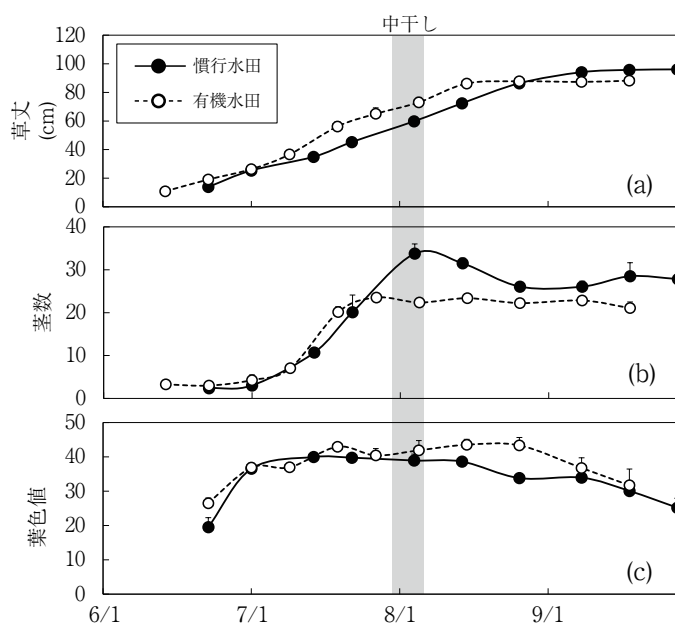
慣行水田と有機水田でのそれぞれの測定値の差の検定を独立2群の差の検定をWelchのt検定にて行った。

結 果

(1) 有機水田の窒素施用量

有機水田におけるシロクローバーの乾物重は地上部で $539 \pm 67.9 \text{ g m}^{-2}$ (平均 \pm 標準偏差)、地下部で $509 \pm 132 \text{ g m}^{-2}$ となり、合計量は $1,048 \pm 195 \text{ g m}^{-2}$ であった。シロクローバーの炭素含量は地上部で $449 \pm 20.1 \text{ g C kg}^{-1}$ 、地下部で $263 \pm 39.6 \text{ g C kg}^{-1}$ であった。この結果より、有機水田への炭素すき込み量は地上部が $240 \pm 21.9 \text{ g C m}^{-2}$ 、地下部が $128 \pm 16.1 \text{ g C m}^{-2}$ となり、合計 $368 \pm 35.5 \text{ g C m}^{-2}$ であった。シロクローバーの窒素含量は地上部で $28.3 \pm 0.36 \text{ g N kg}^{-1}$ 、地下部で $12.4 \pm 2.15 \text{ g N kg}^{-1}$ であった。この結果より、有機水田への窒素すき込み量は地上部が $14.9 \pm 0.56 \text{ g N m}^{-2}$ 、地下部が $6.04 \pm 0.61 \text{ g N m}^{-2}$ となり、合計 $20.9 \pm 1.13 \text{ g N m}^{-2}$ であった。

2011年秋に慣行水田に残された前作の稲わらは乾物重が $178 \pm 56.7 \text{ g C m}^{-2}$ (平均 \pm 標準偏差)であった。炭素含量は $409 \pm 12.8 \text{ g C kg}^{-1}$ であったことから、2011年秋に慣行水田にすき込まれた稲わらの炭素量は $72.1 \pm 21.1 \text{ g C m}^{-2}$ であった。



第2図 草丈 (a)、茎数 (b)、葉色値 (c) の推移

(2) 水稻の生育

水稻は慣行水田で8月29日には7割程度が出穂しており、その後数日で開花を確認した。一方で有機水田では8月16日に出穂が揃い、一部開花しているのが確認できた。草丈は慣行水田及び有機水田で定植後に上昇し、慣行水田では9月9日以降は上昇程度が緩やかになり9月29日に最大(96.1cm)を示し、有機水田では8月16日以降は上昇程度が緩やかになり8月27日に最大(87.7cm)となった(第2図a)。茎数は慣行水田と有機水田それぞれで中干し前の8月5日および7月28日に最大33.8本株⁻¹、23.5本株⁻¹を示した。中干し後に慣行水田では茎数が低下し、最終的には27.8本株⁻¹となった(第2図b)。一方

有機水田では中干し後は一定で推移し、最終的に21.2本株⁻¹となった。慣行水田および有機水田では収穫時の穂数が 371 m^{-2} および 311 m^{-2} であったことから、有効茎歩合はそれぞれ72.5%および87.4%であった。葉色値は、慣行水田と有機水田で定植後から7月始めにかけてそれぞれ36.6および36.9まで急激に上昇し、その後は8月中旬まで一定で推移したが、8月後半以降は徐々に低下した(第1図c)。収穫時の穂数は慣行水田と有機水田で有意な差は無かった(第4表)。一方でワラ重

は慣行水田で725 g m⁻²であったのに対し有機水田で391 g m⁻²となり、慣行水田の方が有機水田よりも2倍程度有意に重かった。

(3) 収量・品質

籾重は慣行水田で有機水田よりも有意に重かったが、整玄米重は両水田間に有意な差は見られなかった(第4表)。千粒重や基白粒割合および青未熟粒割合は両水田間に有意な差が見られなかった一方で、整粒歩合、アミロース含量、および食味値は慣行水田で有意に高く、乳白粒割合、腹白粒割合およびタンパク質含量は有機水田で有意に高かった。特に、整粒歩合は慣行水田で85%を超えたのに対し、有機水田では66%程度であった。また、タンパク質含量が慣行水田では約6.4%であったのに対し、有機水田では1.5%程度高い約8%であった。

第4表 慣行水田および有機水田における、穂数、籾重、ワラ重、整玄米重、千粒重、整粒歩合、乳白粒割合、基白粒割合、腹白粒割合、青未熟粒割合、タンパク質含量(水分15%)、アミロース含量、および食味値

項目	慣行水田			有機水田			t検定結果 (Welch法)
	平均	標準 偏差	標準 誤差	平均	標準 偏差	標準 誤差	
穂数(本 m ⁻²)	371	40.0	23.1	311	28.6	16.5	NS
籾重(g m ⁻²)	684	75.1	43.4	477	10.1	5.84	<i>P</i> < 0.05
ワラ重(g m ⁻²)	725	82.0	47.3	391	8.77	5.06	<i>P</i> < 0.02
整玄米重(g m ⁻²)	490	74.3	42.9	316	3.70	2.14	NS
千粒重(g)	22.3	0.37	0.21	20.9	0.75	0.44	NS
整粒歩合(%)	85.9	1.08	0.62	66.5	1.22	0.71	<i>P</i> < 0.01
乳白粒割合(%)	1.42	0.15	0.09	3.20	0.59	0.34	<i>P</i> < 0.05
基白粒割合(%)	1.72	0.54	0.31	1.67	0.87	0.57	NS
腹白粒割合(%)	0.27	0.13	0.13	1.03	1.43	0.80	<i>P</i> < 0.05
青未熟粒割合(%)	1.00	0.03	0.63	1.80	3.67	6.23	NS
タンパク質含量(15%)(%)	6.38	0.10	0.06	7.97	0.43	0.25	<i>P</i> < 0.02
アミロース含量(%)	19.0	0.10	0.06	18.6	0.02	0.01	<i>P</i> < 0.02
食味値	73.4	0.51	0.29	64.6	2.46	1.42	<i>P</i> < 0.05

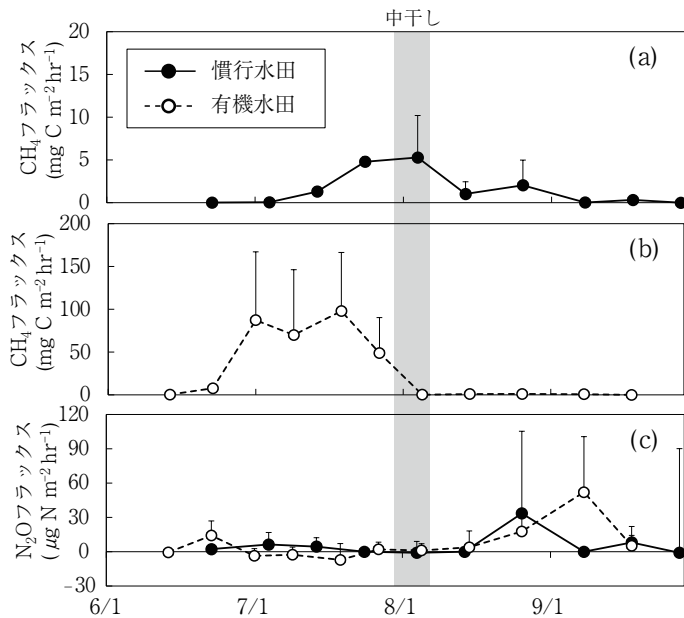
NS：有意差無し

(4) 温室効果ガスの季節変化と発生量

CH₄フラックスは両処理区とも水稻定植後上昇し、慣行水田では8月5日に最大値(5.29 mg C m⁻²hr⁻¹)となり、有機水田では7月20日に最大値(97.9 mg C m⁻²hr⁻¹)となった(第3図a, b)。しかし、中干し開始以降両処理区ともCH₄フラックスは急激に低下し、慣行水田では8月後半以降は1 mg C m⁻²hr⁻¹以下、有機水田では1 mg C m⁻²hr⁻¹程度で推移していた。水稻栽培期間中の積算CH₄発生量は、慣行水田で38.3 ± 24.5 kg C ha⁻¹(平均 ± 標準偏差)、有機水田では666 ± 215 kg C ha⁻¹と、有機水田からのCH₄発生量が慣行水田の17.4倍となり、有意に高かった(第5表)。CH₄発生量の95%信頼区間は慣行水田で38.3 ± 105 kg C ha⁻¹となり、有機水田で666 ± 962 kg C ha⁻¹であっ

た。慣行水田からのCH₄発生量は2011年秋にすき込まれた稲わらの炭素の5.31%であり、有機水田からのCH₄発生量はすき込まれたシロクロバーの炭素の18.1%であった。

中干し前までのN₂Oフラックスは慣行水田で10 μg N m⁻² hr⁻¹以下、有機水田で6月23日に14 μg



第3図 CH₄フラックス（慣行水田：a、有機水田：b）およびN₂Oフラックス（c）の推移（エラーバー：標準偏差）

N m⁻²hr⁻¹が観測されたがそれ以外のほとんど場合負の値を示していた。

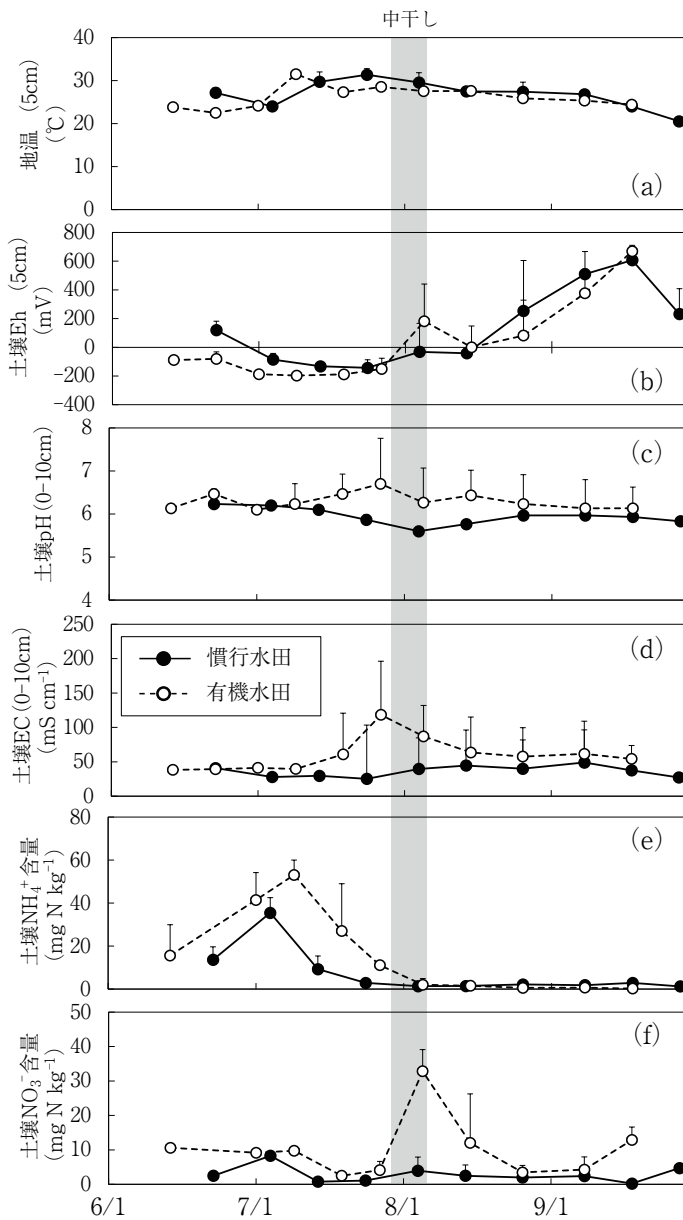
しかしながら、両水田共に中干し後にN₂Oフラックスが上昇し、慣行水田では8月27日に33.5 μg N m⁻²hr⁻¹、有機水田では9月9日に52.0 μg N m⁻²hr⁻¹の最大値を示した。水稻栽培期間中の積算N₂O発生量は、慣行水田で0.15 ± 0.29 kg N ha⁻¹、有機水田では0.22 ± 0.20 kg C ha⁻¹であり、両水田間で積算N₂O発生量に有意な差は認められなかった。N₂O発生量の95%信頼区間は慣行水田で0.15 ± 1.26 kg N ha⁻¹、有機水田で0.22 ± 0.85 kg N ha⁻¹であった。化学肥料や緑肥で施用された窒素からのN₂O発生割合は、慣行水田で0.19%、有機水田では0.1%であった。

第5表 慣行水田および有機水田における積算CH₄およびN₂O発生量

反復	積算CH ₄ 発生量		積算N ₂ O発生量	
	慣行水田 (kg C ha ⁻¹ 102日 ⁻¹)	有機水田 (kg C ha ⁻¹ 100日 ⁻¹)	慣行水田 (kg N ha ⁻¹ 102日 ⁻¹)	有機水田 (kg N ha ⁻¹ 100日 ⁻¹)
1	17.4	839	-0.05	0.05
2	65.2	425	0.01	0.17
3	32.2	735	0.48	0.43
平均	38.3	666	0.15	0.22
標準偏差	24.48	215	0.29	0.20
標準誤差	14.13	124	0.17	0.11
95%信頼区間	38.3 ± 105	666 ± 962	0.15 ± 1.26	0.22 ± 0.85
t検定結果 (Welch法)	<i>P</i> < 0.05		<i>P</i> > 0.10	

(5) 土壌化学性の季節変化

5 cmの地温は慣行水田と有機水田でどちらも20℃～30℃で推移し変動は大きくなかった（第4図a）。期間中の最大値および最小値は慣行水田でそれぞれ31.4℃（7月25日）および20.5℃（9月29日）であり、有機水田ではそれぞれ31.5℃（7月10日）および22.5℃（6月23日）であった。5 cmの土壌Ehは慣行水田と有機水田どちらも移植直後から低下し、慣行水田で7月25日に-143mV



第4図 5 cm地温 (a)、5 cmEh (b)、pH (c)、EC (d)、 NH_4^+ 含量 (e)、 NO_3^- (f) 含量の推移 (エラーバー：標準偏差)

および有機水田で -197mV となった(第4図b)。中干しによりEhは上昇し、中干し後に慣行水田と有機水田で9月19日にそれぞれ 607mV および 668mV に達した。

0-10cmの土壌pHは慣行水田で移植直後から中干し後にかけて6.23から5.6に低下し、その後上昇して5.9前後で推移していた(第4図c)。一方で有機水田では栽培期間中を通して6.10~6.7程度でほぼ一定の値を示した。土壌ECは慣行水田で期間中を通してほぼ一定で推移したが、中干し前の $25.3\sim 41.0\ \mu\text{S cm}^{-1}$ 程度から中干し後には $49.0\ \mu\text{S cm}^{-1}$ まで上昇した(第4図d)。土壌 NH_4^+ 含量は慣行水田で移植2週間程度 $13.7\ \text{mg N kg}^{-1}$ から $35.5\ \text{mg N kg}^{-1}$ に上昇した後に低下し、中干し後は $1.27\sim 2.89\ \text{mg N kg}^{-1}$ で推移した(第4図e)。有機水田の土壌 NH_4^+ 含量も慣行水田と同様な推移を示したが、中干し前までに $53.1\ \text{mg N kg}^{-1}$ まで上昇し、中干し後は $0.28\sim 2.91\ \text{mg N kg}^{-1}$ 程度で推移した。土壌 NO_3^- 含量は慣行水田および有機水田で中干し前は $0.80\sim 9.76\ \text{mg N kg}^{-1}$ で低く推移したが、その後は慣行水田が中干し前と同様な値で推移したのに対し有機水田で中干し直後に $32.8\ \text{mg N kg}^{-1}$ まで大きく上昇し、その後低下するという変化を示した(第4図f)。

考 察

(1) 水稻の生育と収量・品質

慣行水田と有機水田で草丈や茎数の推移は大きく違わなかったが、慣行水田と有機水田で特に中干し前後が異なっていた(第2図)。両水田で品種が異なっていたということもあるが、分けつ数が慣行水田で多かったことは生育初期における土壌中の窒素が水稻の生育に貢献していたと考えられる。施用した窒素の形態は慣行水田が無機態であるのに対し、有機水田がシロクロバーに由来する有機

態であったことから、生育初期の水稲が吸収しやすい窒素が慣行水田で多かったと推測された。しかしながらこのことは土壤 NH_4^+ 含量が慣行水田と比較して有機水田で高かったことと矛盾するため(第4図e)、どのような形態の窒素が茎数の増加に影響を与えていたかについては本研究では明らかにできなかった。有機水田では慣行水田よりも有効茎歩合が高かったことに加え、籾重が低い割には整玄米重が両水田間で差がなかったことから(第4表)、緑肥としてのシロクロバーの施用は緩行的な肥効を示していたと推察される。一方で有機水田区では玄米のタンパク質含量は慣行水田よりも高く、このことが有機水田の食味値が慣行水田よりも劣っていた一因と考えられた(第4表)。土壤 NO_3^- 含量は有機水田で中干し後に大きく上昇しており(第4図f)、この時期に有機物の無機化と硝酸化成が進んで土壤中に無機態窒素が多く存在することになり、その結果水稲登熟期に窒素を多く吸収してしまい玄米のタンパク質含量が上昇したと考えられた。有機水田の整玄米の収量は慣行水田の約64%であり、有意差は無いが低い傾向を示した。慣行水田で有機水田よりも有意に籾数が大きかったことから、この差は受粉や登熟時の温度が要因の一つになったと考えられた。暖地の水稲においては、若松ら(2008)が出穂後20日間の平均気温が 28°C 以上で多発することを報告している。慣行水田の開花以降の9月1日から20日間の日平均気温は 26.3°C であったのに対し、有機水田の開花以降の8月14日から20日間の日平均気温は 28.2°C と高かった。有機水田における8月後半の登熟期の最低気温も $24\sim 25^\circ\text{C}$ と高いことから、呼吸によって光合成産物の損失が大きく籾への転流が少なくなった籾が多くなったと推察された。有機水田で慣行水田よりも乳白粒割合や腹白粒割合が有意に大きく、アミロース含量が有意に低かったことから、登熟期の高温の影響は玄米の品質にも影響を及ぼしていたと考えられる。以上のことから、有機水田では緑肥として施用したシロクロバー由来の窒素が穏やかに機能し、水稲の生育後半においても窒素切れが生じていなかったことが示されたが、生育後半に発現した土壤無機態窒素が多いと玄米の品質を低下させる可能性が示された。玄米収量の差については品種の影響があり、有機栽培による影響は明確には示せなかった。

(2) 水田からの CH_4 および N_2O 発生

有機水田からの CH_4 発生が慣行水田からと比較して大きかった理由として、第一に投入した有機態炭素の量が考えられる(Naser et al., 2007)。慣行水田では2011年に圃場に残された稲わら由来の炭素が2割程度と低く、その分 CH_4 発生量も低かったと考えられた。しかしながら、投入された炭素に対する CH_4 発生量が慣行水田で約18%と有機水田(約5%)よりも高く(第5表)、このことは CH_4 生成の基質となる有機物の質が影響したと考えられる。稲わらのC/Nは約64とシロクロバー(約18)よりも3倍以上高いことに加え、秋から春までに易分解性の炭素が分解されてしまい、難分解性の炭素が水稲栽培期間の CH_4 の基質となったと考えられた。水田からの CH_4 発生については、水稲の品種が影響を与えることが報告されているが、Kesheng and Zhen (1997)の研究では品種間の CH_4 発生量の違いは最大5倍程度であった。本研究では慣行水田と有機水田で17倍以上の違いがあり、このことは品種間による違いよりも有機態炭素の施用量の違いがより影響している可能性がある。 CH_4 フラックスの推移は慣行水田と有機水田で同様であり、どちらも中干し後は CH_4 フラックスが大きく低下していた(第3図a, b)。 CH_4 フラックスは土壤のEhが -200mV 前後で大きくなることが報告されており(Yagi et al., 1996)、本研究でも7月半ばにEhが -200mV 程度の時に CH_4 フラックスが高くなっている。しかしながら、中干し後にはEhは正の値にまで上昇しており、中干しによって形成された酸化的環境が CH_4 フラックスの低下に影響していたことが示唆された。このことから、中干しを CH_4 フラックスの上昇途中に実施することにより、積算の CH_4 発生量を減らすこと

ができると考えられる。実際に中干しを平均6日程長くすることで玄米収量に影響を与えずにメタン発生量を30%程度削減できることが報告されているが (Itoh et al., 2011)、茎数に影響を与える可能性のある中干しの時期を見極めた上で慎重に実施する必要がある。本研究においては、有機水田からのCH₄発生量が600kg C ha⁻¹を超えており、これまで日本で報告されているCH₄発生量 (10~1044kg C ha⁻¹ : Itoh et al., 2011, 40.4~408kg C ha⁻¹ : Naser et al., 2007), 153~365 kg C ha⁻¹ : Kesheng and Zhen, 1997, 48.4~189 kg C ha⁻¹ : Minamikawa and Sakai, 2006) の中でも大きな値である。緑肥を施用した場合にも中干しの延長はCH₄発生量削減に有効であることが報告されている。鈴江ら (2011) は徳島県のコシヒカリを栽培した水田で冬季にレンゲを栽培しすき込んだ後、水稲栽培期間のCH₄発生量を慣行の水管理と中干し期間を1週間延長した処理区を設けてモニタリングを行った。その結果、慣行の水管理の場合CH₄発生量が1178 kg C ha⁻¹であったのに対し、中干し延長区では325 kg C ha⁻¹と28%程度にまで減少した。この試験では基肥を5 g N m⁻²施用しているが、整玄米重は慣行の水管理区で764 g m⁻²および中干し延長区で747 g m⁻²と同程度の収量が得られている。以上のことより、本研究で調査を行った有機栽培の水田においても、中干しの時期と期間を調整することで収量を保ったままCH₄発生量を抑制できる可能性がある。

有機水田では中干し前にN₂Oの吸収が生じていた。メタンが発生する程強還元状態となる湛水条件下にある水稲の生育初期では硝化よりも脱窒の活性が高いと考えられる。実際に有機水田では中干し前まで土壌NH₄⁺含量が土壌NO₃⁻含量よりも高く、すき込まれたシロクローバーの有機体窒素が分解された後硝化の活性が低いことを示している (第3図 e, f)。そのような条件下におけるN₂Oの吸収は、有機水田ではすき込まれたシロクローバー由来の有機物が多い条件も重なり、脱窒菌が電子受容体として少ないNO₃⁻の代わりにN₂Oを吸収している可能性が考えられた。水田におけるN₂Oの吸収は茨城県の灰色低地土や中国の水田においても観測されている (Hua et al., 1997 ; Nishimura et al., 2004)。中干し後は慣行水田と有機水田それぞれN₂Oフラックスが上昇しており、両水田は最終的には若干の放出源となっていた。このようなパターンは他の水田でも観測されている (Cai et al., 1997 ; Hua et al., 1997 ; Nishimura et al., 2004)。どの調査においてもCH₄フラックスの低下と入れ替わりにN₂Oフラックスが上昇しており、本研究でも同様であった (第3図 a, b, c)。その原因として、中干し後の土壌還元状態の緩和と土壌NO₃⁻含量の上昇が考えられる。中干し後は土壌Ehが上昇し土壌が比較的酸化的な環境に変化したのに加え、中干し前は抑制されていた硝化の活性化が原因と考えられる土壌NO₃⁻含量の上昇もあり、脱窒過程においてN₂Oの生成に好ましい条件が一時的に整ったと考えられた。積算N₂O発生量は慣行水田と有機水田で有意な差は無く、0.2 kg N ha⁻¹前後であった。この値は慣行水田および有機水田それぞれにおいて施用またはすき込まれた窒素の0.1~0.2%程度であり、施用窒素から発生するN₂Oが非常に少ない。Akiyama et al. (2006) のまとめでは、水田からのN₂O発生は0.07~0.60 kg N ha⁻¹ (測定期間 : 120~365日) であり、本研究も同様な範囲にあった。従って、有機水田においては緑肥のすき込みによるN₂O発生に対する影響はほとんど無いと考えられた。

結 論

有機水田における水稲の生育は係数が抑えられる傾向があるが、無効分げつが少なく登熟期の高温被害に対する対策により収量と品質は慣行の水田と同程度になる可能性が指摘された。有機水田ではシロクローバーすき込みにより有機態炭素が多く投入されることから、CH₄フラックスが慣行水田よ

りも大きくなり、積算発生量も大きくなる可能性がある。N₂O発生に関しては慣行水田と有機水田で同程度で、緑肥施用によるN₂O発生への影響は無かった。

適 要

シロクローバーを緑肥として施用している有機水田（松山三井）と、慣行の栽培管理を行っている水田（ヒノヒカリ）において、水稻の生育・収量・品質およびCH₄とN₂O発生量の違いを検証した。調査は愛媛大学附属農場の試験水田にて2012年に実施した。慣行水田の2011年の水稻収穫後に圃場に残された稲わらの炭素量は72.1 kg C ha⁻¹であり、有機水田に2012年春にすき込まれたシロクローバーの炭素量は368 kg C ha⁻¹であった。慣行水田には基肥と穂肥で8 g N m⁻²を化学肥料で施用したが、有機水田では緑肥の窒素が201 g N m⁻²すき込まれた。両水田において、水稻の草丈、茎数、葉色値の他、CH₄およびN₂Oフラックスを週に1回から10日に1回程度測定した。さらに、同日に0-10cm深の土壌を採取しpHや無機態窒素等の化学性を測定した。有機水田にて茎数が抑えられる傾向が見られたが、無効分げつが少なく穂数にも違いが見られず、玄米収量には有意差は無かった。しかしながら、有機水田で登熟期の高温の影響による腹白粒割合の増加や中干し後の高い土壌硝酸含量の影響によるタンパク質含量の上昇により、品質は慣行水田よりも劣っていた。CH₄フラックスは両水田共に定植後から中干しまで上昇し中干し後に低下したが、CH₄発生量は有機水田で高く、シロクローバーのすき込みによる易分解性炭素からの多量のCH₄生成が示唆された。N₂Oフラックスも両水田で中干し後の水稻生育後半に上昇する傾向が見られたが、積算N₂O発生量に有意な差は無く、緑肥の施用が必ずしもN₂O生成の増加には影響しないことが明らかとなった。

引 用 文 献

- (1) Akiyama H · Yan X · Yagi K (2006) Estimations of emission factors for fertilizer-induced direct N₂O emissions from agricultural soils in Japan: Summary of available data. *Soil Science and Plant Nutrition*. 52. 774-787.
- (2) Cai Z · Xing G · Yan X · Xu H · Tsuruta H · Yagi K · Minami K (1997) Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management. *Plant and Soil*. 196. 7-14.
- (3) 土壌環境分析法 (2000) 第三章 土壌有機物・土壌生物, 8. 温室効果ガス発生・吸収量, 土壌環境分析法編集委員会, 博友社, 129-137.
- (4) 愛媛県 (2014) 愛媛県特別栽培農産物認証制度. 愛媛県 HP (<http://www.pref.ehime.jp/h35500/tokusai/top.html>)
- (5) Hua X · Guangxi X · Cai ZC · Tsuruta H (1997) Nitrous oxide emissions from three rice paddy fields in China. *Nutrient Cycling in Agroecosystem*. 49. 23-28.
- (6) Itoh M · Sudo S · Mori S · Saito H · Yoshida T · Shiratori Y · Suga S · Yosikawa N · Suzue Y · Mizukami H · Mochida T · Yagi K (2011) Mitigation of methane emissions from paddy field by prolonging midseason drainage. *Agricultura, Ecosystem and Environment*. 141. 359-372.
- (7) Intergovernmental Panel on Climate Change (2007) IPCC Forth Assessment Report: Climate

- Change 2007, the Physical Science Basis, Technical Summary. Available at: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml#.UUBbh1ckrkd
- (8) Kesheng S · Zhen L (1997) Effect of rice cultivars and fertilizer management on methane emission in a rice paddy in Beijing. *Nutrient Cycling in Agroecosyst.* 49. 139-146.
 - (9) Minamikawa K · Sakai N (2006) The practical use of water management based on soil redox potential for decreasing methane emission from a paddy field in Japan. *Agriculture, Ecosystem and Environment.* 116. 181-188.
 - (10) Naser HM · Nagata O · Tamura S · Hatano R (2007) Methane emissions from five paddy fields with different amounts of rice straw application in central Hokkaido, Japan. *Soil Science and Plant Nutrition.* 53. 95-101.
 - (11) Nishimura S · Sawamoto T · Akiyama H · Sudo S (2004) Methane and nitrous oxide emissions from a paddy field with Japanese conventional water management and fertilizer application. 18. GB2017.
 - (12) 農林水産省 (2014) 有機食品の検査認証制度. 農林水産省HP (http://www.maff.go.jp/j/jas/jas_kikaku/yuuki.html)
 - (13) 鈴江康文 · 森本昌子 · 和田健太郎 · 伊藤雅之 · 須藤重人 (2011) 中干し期間の延長はレンゲ (*Astragalus sinicus* L.) すき込み水田からのメタン発生を低減させる. *近畿中国四国農業研究報告.* 18. 7-11.
 - (14) 鈴木雅光 · 長谷川愿 · 宮野齊 · 大場伸一 (1993) 水稻の無農薬 · 無化学肥料栽培の基本指標. *東北農業研究.* 46. 91-92.
 - (15) 若松健一 · 佐々木修 · 上藺一郎 · 田中明男 (2008) 水稻登熟期の高温条件下における背白粒の発生に及ぼす窒素施肥量の影響. *日本作物学会紀事.* 77 (4). pp.424-433.
 - (16) Yagi K · Tsuruta M · Kanda K · Minami K (1996) Effect of water management on methane emission from a Japanese rice paddy field: Automated methane monitoring. *Global Biogeochemical Cycles.* 10 (2). 255-267.