

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23580087

研究課題名(和文) 水田土壌炭素の変動を予測するためのイネの根から分泌される有機態炭素量の測定

研究課題名(英文) Determining the amounts of organic carbon from root exudates to estimate soil C changes in rice paddy

研究代表者

程 為国 (CHENG, Weiguo)

山形大学・農学部・准教授

研究者番号：80450279

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：イネの根から分泌される有機態炭素量は、水耕実験と土耕実験を用いて測定することができた。水耕実験では、水稻根から分泌される有機態炭素量は、植物個体あたりよりも、乾物生産あたりの品種間において差異性が顕著であった。また、砂質土壌を用いた土耕実験では、土壌溶液中に溶存したTOCとCH<sub>4</sub>量、または総CH<sub>4</sub>放出量は、品質が異なる3品種間に有意な違いも認められた。さらに、土壌有機態炭素量の少ないC<sub>4</sub>土壌と安定同位体自然存在比測定法を用いた土耕実験では、1つ栽培シーズン後、土壌に転流された炭素量は、植物イネ炭素同化量の11.6%と推定され、土壌中の炭素の約1割は、イネの根から転流されたことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The amounts of organic carbon from rice root exudates to solution or soil were successfully measured. In the hydroponic culture experiment, the difference of amounts of organic carbon per dry biomass exuded from rice root was more remarkably than that calculating by per plant among 8 kinds of rice cultivars. In the sandy soil culture experiment, the total organic carbon and CH<sub>4</sub> in soil solution, and CH<sub>4</sub> emissions from the plants were significant difference among 3 kinds of rice cultivars. Furthermore, after rice planted in the C<sub>4</sub> soil which organic carbon was low at 0.5% for one season, the soil organic carbon from rice root exudates was measured by stable isotope nature abundance ( $\delta^{13}C$ ) method. As the results, the soil organic carbon from rice plant was 11.6% of the total assimilation carbon (plant biomass carbon). Approximately 10% of new soil organic carbon was translocated from the roots during one rice growth season.

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農芸化学 ・ 植物栄養学・土壌学

キーワード：イネ 有機態炭素 根の分泌物 品種 水耕栽培 メタン 安定同位体

### 1. 研究開始当初の背景

土壌に貯蔵されている炭素は、大気中のCO<sub>2</sub>に含まれる炭素の約2倍、陸上の植物バイオマス中の炭素の約3倍に相当する。土壌有機物として土壌中に存在する土壌有機態炭素は、もともと土壌中にあるものではなく、植物の光合成炭素に由来する。また土壌有機物は、土壌微生物によって、絶えず生成と分解がなされている。水田はイネの生育期間に土壌表面は水で覆われているため、その期間の土壌中の有機物とイネ根から分泌される有機態炭素が嫌氣的に分解され、CO<sub>2</sub>だけではなく、CH<sub>4</sub>まで生成する。稲藁施用を行っていない水田では発生するメタン量の約80%がイネの光合成産物に由来していたことも報告されている。

また、炭素の自然安定同位体を用いてCO<sub>2</sub>濃度を上昇させた水田圃場とチャンパー実験では、有機物に富み、土壌炭素量が8%ある黒ボク土でも、イネ分けつ期以後に、土壌中に存在するCO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>の50%以上は、植物由来であることが明らかにされている。

従って、水田土壌中の炭素変動とCH<sub>4</sub>発生量を予測するためには、イネの光合成産物が、どの程度の割合で根圏に分泌され、CH<sub>4</sub>生成に利用されるのかを解明することが不可欠である。残念ながら、現在のところ、イネの根から分泌される有機態炭素の量は、不明である。これまでイネの根から分泌される有機態炭素の量が、明らかにされてこなかった理由としては、主に2つ挙げられる。第一の理由は、根から分泌される有機態炭素量の、土壌炭素循環における重要性が軽視されていたことである。第二の理由は、測定が確立されていなかったことである。土壌を用いたポット栽培法または圃場栽培レベルでは、イネの根から分泌される可溶性有機物の採集はきわめて難しいと考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究は、イネを対象として、インディカ、ジャポニカ、及びハイブリッドの異なる品種の水耕栽培を行ない、これまで圃場実験で測定されていなかったイネの根から分泌される有機態炭素量とその組成を品種間で比較する。また、各品種の分泌物量の生育ステージによる違いを調べ、イネの光合成活性との関係を明らかにする。さらに、水耕栽培から得られる分泌量と土耕実験から測定したCH<sub>4</sub>放出量との関係を定量化し、水田土壌炭素の動態変化を予測することも目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) イネの根から分泌される有機態炭素量とその組成の品種間差

本研究には、ジャポニカ(日本晴、コシヒカリ、アキタコマチ)、インディカ(タカナリ、Dular、IR72)、ハイブリッド(Shanyou63、Liangyoupei9)の異なるイネ8品種を供試した。まず、8品種のイネ種を発芽させ、芽が

出そろったら、育苗バットにそれぞれ播種した。全体の葉齢が3または4葉になってから、10L容バットに正確な分量の標準培養液にそれぞれ苗を移植し、コントロール区を入れた9区で水耕栽培実験を3反復で8週間の生育期間で行なった。室内で8週間水耕栽培を行なった。ここで培養液を調整用の水は、有機物を含まない脱塩水を使用した。培養液を交換する際に溶液のサンプリングを行い、その溶液中に分泌された有機態炭素量をTOCアナライザーで測定した。また、2週間おきに植物体のサンプリングに合わせて、そのイネの根部を脱塩水に24時間浸し、1日の分泌量も求めた。その後、イネを葉・茎・根に分解し、熱乾燥(70℃)を行った後、それぞれの乾物重を秤量した。さらに生育調査も定期的に行なった。

#### (2) イネからのメタン放出量と根由来の有機物量におけるイネ品種間差の検討

山形大学農学部ガラス室内で、コシヒカリ(ジャポニカ)、IR72(インディカ)、SY63(ハイブリッド)の3品種を供試して土耕・水耕の2つの栽培実験を同時に行なった。2012年6月25日に移植開始し、コシヒカリは10月2日、IR72とSY63は、10月16日に収穫した。土耕栽培では有機態炭素が少ない(0.5%)砂質土壌を供試し、施肥を2回行なった。移植後2週目から1、または2週間おきにCH<sub>4</sub>フラックスを測定した。同時に土壌溶液を回収し、土壌溶液中に溶存した全有機態炭素(TOC)、CH<sub>4</sub>とCO<sub>2</sub>量を測定した。水耕栽培では毎週1回培養液交換を行なった。CH<sub>4</sub>フラックス測定日と同じ日に水耕栽培したイネを採取し、0.4mM CaCl<sub>2</sub>溶液に1日漬けて根分泌物の定量実験(1日処理実験)を行ない、根由来の有機態炭素量を測定した。また、土耕栽培では収穫期、水耕栽培で1日処理後のイネの乾物重は器官ごとに秤量した。

#### (3) C4土壌を用いたイネ由来有機態炭素の測定

光合成様式の異なるC3植物とC4植物の炭素の安定同位体自然存在比(<sup>13</sup>C)が異なるため、長年C3とC4植物が生育した土壌(C3とC4土壌という)の炭素<sup>13</sup>C値も異なる。この特徴を利用し、本研究では、C4土壌(沖縄県石垣島サトウキビ畑土壌)にC3植物イネを移植し、湛水条件で植物イネを介した土壌への植物由来有機態炭素の蓄積量を調べた。イネは春から秋にかけて湛水で栽培し、生育が終了後、植物の地上部は器官別に切り分け、乾燥後乾物重を求めた。土壌は地中に植物根を残したまま縦半分になり、その断面の上から3分の1を上層、残りの3分の2を下層として植物根を避けてサンプリングを行なった。その後、土壌と植物のサンプルは細かく粉碎し、IR-MSを用いてそれぞれサンプルの炭素含有量と<sup>13</sup>C値を測定した。切り替え栽培を行なったC4土壌にC3植物由来の有機態

炭素の割合は、下記のマスバランス法で計算した。

$$fp = (t - s) / (p - s)$$

fp : 土壌における新たな植物由来の割合

t : サンプル時の土壌有機態炭素同位体比

s : 元の土壌有機態炭素同位体比 (C4 土壌)

p : 植物炭素同位体比 (C3 植物イネ)

#### 4. 研究成果

(1) イネの根から分泌される有機態炭素量とその組成の品種間差

8 品種を用いた水耕栽培実験で、8 週間の生育期間を通して乾物重と有機態炭素分泌量ともに品種間において有意な差が認められた。全生育期間における植物個体あたりの有機態炭素分泌量は  $60.7 \sim 79.7 \text{ mg plant}^{-1}$  の範囲で、変動係数は 9.8%であった。また、植物体の全乾物重あたりの有機態炭素分泌量では  $3.5 \sim 11.8 \text{ mg g}^{-1}$  の範囲で変動係数は 41.7%であり、品種間における変動幅は植物個体あたりより大きかった (図 1)。さらに 24 時間処理でも、根乾物重あたりの有機態炭素分泌量の差異性は、全乾物重あたりのものと同様に大きかった。以上のことから、水稻根から分泌される有機態炭素量は、植物個体あたりよりも、乾物生産あたりの品種間において差異性が顕著であることが示唆された。

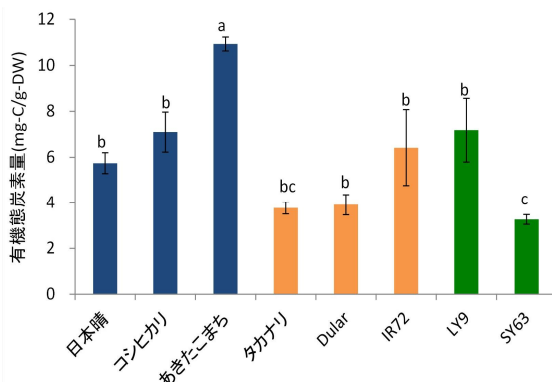


図 1. 水耕栽培 8 週間におけるイネ 8 品種の全乾物重あたりの全有機態炭素分泌量。アルファベットは LSD 法検定による 0.05%水準を示す。

(2) イネからのメタン放出量と根由来の有機物量におけるイネ品種間差の検討

ガラス室内で、コシヒカリ、IR72 と SY63 の 3 品種を供試して土耕・水耕の 2 つの栽培実験では、3 品種の全乾物量は水耕・土耕栽培でともに SY63 > IR72 > コシヒカリの多い順であった。水耕栽培実験から求めた根分泌物量は、1 日処理実験日ごとに変動があり、また全生育期間において、株あたりの根由来の有機態炭素量に規則的な傾向は認められなかった。土耕栽培実験では、供試 3 品種ともに移植 4 週間目から  $\text{CH}_4$  放出が検出され、それぞれ 10-13 週間目にピークとなった (図 2)。全生育期間における総  $\text{CH}_4$  放出量では、

IR72 と SY63 が同程度で、コシヒカリより有意に多かった。また、土壌溶液中に溶存した TOC 量は、3 品種とも生育に伴い増加傾向があり、生育段階にかかわらず IR72 と SY63 でコシヒカリよりも多かった。同様に、溶存  $\text{CH}_4$  量でも 3 品種とも生育に伴い増加し、生育前半はコシヒカリ、後半は IR72、SY63 が多くなった。さらに、総  $\text{CH}_4$  放出量と植物バイオマス量は正の相関を示していたが、収量に対する総  $\text{CH}_4$  放出量では品種間の差はなかった (図 3)。

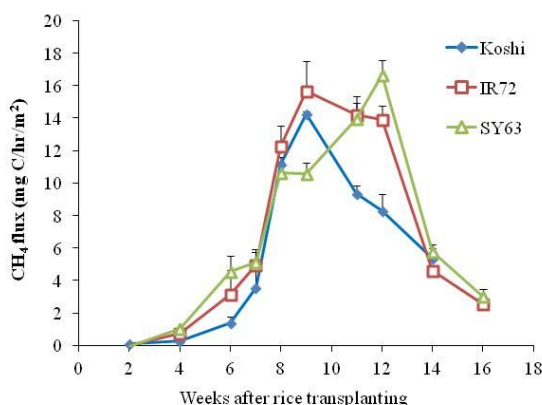


図 2. 土耕栽培実験におけるイネ 3 品種の  $\text{CH}_4$  全フラックスの時期変化。Koshi はコシヒカリのことである。

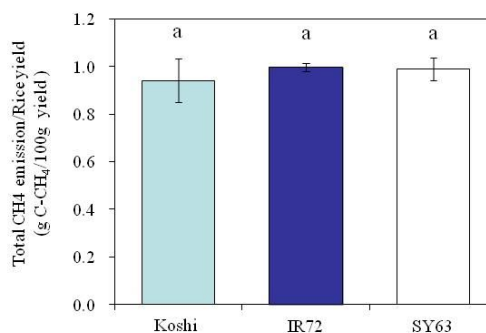


図 3. 土耕栽培実験におけるイネ 3 品種の  $\text{CH}_4$  総放出量とイネ収量の割合。Koshi はコシヒカリのことである。

以上の結果から、水耕栽培では、根由来の有機態炭素量における品種間の差がなく、土耕栽培からの  $\text{CH}_4$  放出との相互関係は明確ではなかった。土耕栽培では、土壌溶液中に溶存した TOC と  $\text{CH}_4$  の量、または総  $\text{CH}_4$  放出量とは、品種間における違いが認められたが、イネ収量あたりの総  $\text{CH}_4$  放出量の品種間差が認められなかった。

(3) C4 土壌を用いたイネ由来有機態炭素の測定

C4 土壌の  $^{13}\text{C}$  値は、イネ栽培前の  $-19.22\%$  から  $-19.84\%$  まで低下した。イネの植物体の  $^{13}\text{C}$  値は、器官より少しちがっていたが、概ね  $-26\%$  から  $-28\%$  であった。ここで土壌への

転流炭素の  $^{13}\text{C}$  値は、イネ根の値-26.78‰とした。マスバランス法を用いて計算した結果により、イネ植物由来の割合が 8.20%であった。1つ栽培シーズンで、ポットあたりイネ植物由来炭素は、2.93 g/potであった(表1)。また、ポットあたりのイネ植物のバイオマス量は、63.38 g/pot であり、植物体の炭素含有量が 40%であったため、土壤に転流された炭素量は、イネ植物に同化された全体バイオマス炭素量の 11.56%と推定された。

以上の結果から、イネ植物を介して、土壤へ新規投入された植物由来有機態炭素の割合は、炭素の安定同位体自然存在比を用いて推定することができた。土壤有機態炭素量が少なく(0.5%)、C4 サトウキビ畑土壤では、1つ栽培シーズンで、土壤中の炭素の約1割(8.2%)は、イネの根から転流されたことが示唆された。

表1：土壤中にイネ植物由来炭素含量の推定

栽培前 土壤 $^{13}\text{C}$	栽培後 土壤 $^{13}\text{C}$	イネ 植物体 $^{13}\text{C}$	植物由 来炭素 の割合	ポット の土壤 充填量	土壤の 炭素 含有量	植物 由来 炭素量
(‰)	(‰)	(‰)	(%)	(kg DW)	(%)	(g/pot)
-19.22	-19.84	-26.78	8.20	7.15	0.50	2.93

本研究の結果をまとめると、これまで測定されていなかったイネの根から分泌される有機態炭素量は、水耕栽培実験や、炭素の安定同位体を用いた土耕栽培実験を通じて測定することができた。水耕実験では、水稻根から分泌される有機態炭素量は、植物個体あたりよりも、乾物生産あたりの品種間において差異性が顕著であることが示唆された。また、土耕栽培では、土壤溶液中に溶存した TOC と  $\text{CH}_4$  の量、または総  $\text{CH}_4$  放出量は、品種間における違いが認められたが、イネ収量あたりの総  $\text{CH}_4$  放出量の品種間差が認められなかった。さらに、土壤有機態炭素量が少ない C4 サトウキビ畑土壤を利用し、炭素の安定同位体自然存在比を用いた実験では、1つ栽培シーズンでは、土壤に転流された炭素量は、イネ植物に同化された全体バイオマス炭素量の 11.56%と推定され、土壤中の炭素の約1割(8.2%)は、イネの根から転流されたことが示唆された。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3件)

Fumoto, T., Hasegawa, T., Cheng, W., Hoque, M.M., Yamakawa, Y., Shimono, H., Kobayashi, K., Okada, M., Li, C., Yagi, K. (2013) Application of a process-based biogeochemistry model, DNDC-Rice, to a rice field under free-air  $\text{CO}_2$  enrichment (FACE). Journal of Agricultural

Meteorology, 69: 173-190. (査読有)

Zhu, C., Cheng, W., Sakai, H., Oikawa, S., Laza, R.C., Usui, Y., Hasegawa, T. (2013) Effects of elevated  $[\text{CO}_2]$  on stem and root lodging among rice cultivars. Chinese Sciences Bulletin, 58: 1787-1794. (査読有)

Tokida, T., Cheng, W., Adachi, M., Matsunami, T., Nakamura, H., Okada, M., Hasegawa, T. (2013) The contribution of entrapped gas bubbles to the soil methane pool and their role in methane emission from rice paddy soil in free-air  $[\text{CO}_2]$  enrichment and soil warming experiments. Plant and Soil, 364: 131-143. (査読有)

[学会発表](計 13件)

程 為国 (2014) 気候変動が作物生産と温室効果ガスに与える影響：稲作生産とメタン放出のバランスについて、日本作物学会第237回講演会、千葉、講演要旨・資料集 日本作物学会記事 第83巻別号1、p.474-475、(2014年3月)

Weiguo Cheng, Yuka Okamoto, Shuhei Sato, Katsuya Kasahara, Keitaro Tawaraya, Hironori Yasuda (2013) Combined use of Azolla and loach suppressed weed Monochoria vaginalis and increased organically farmed rice yield. The 11th International Symposium on Integrated Field Science "Utilization of organic resources and Environmental protection" August 1-2, 2013, Matsushima, Japan.

程 為国・湯 水栄・笠原勝也・依谷圭太郎・長谷川利弘：水田圃場における土壤炭素・窒素量の年次変動に及ぼす温度上昇の影響、2013年度日本農業気象学会東北支部大会、盛岡、(2013年8月)

程 為国・劉 田・湯 水栄・服部 聡・林田光祐・依谷圭太郎・黄 耀：水田と湿地土壤における炭素分解能と窒素無機化のモデル解析、日本土壤肥料学会2013年大会、名古屋、講演要旨集 第59集、p.178、(2013年9月)

程 為国・岡本有加・佐藤秀平・笠原勝也・依谷圭太郎：イネからのメタン放出量と根由来の有機物量におけるイネ品種間差の検討、日本土壤肥料学会2013年度東北支部会、福島、講演要旨資料、p.5、(2013年7月)

Weiguo Cheng (2012) Organic rice production by applying Azolla and loach. 2nd international workshop on Sustainable rice production. September 14-15, 2012, Tsuruoka, Japan

W. Cheng, Y. Okamoto, H. Kikuchi, S. Kobayashi, A. Kajihara, K. Tawaraya, and T. Wagatsuma (2012) Determining the amounts of organic carbon from root exudates among 8 kinds of rice cultivars by hydroponics at pH 5.2. The 8th

international symposium on plant soil interactions at low pH. October 18-22, 2012, Bengaluru, India

Shuirong Tang, Weiguo Cheng, Minehiko Fukuoka, Mayumi Yoshimoto, Hidemitsu Sakai, Takeshi Tokida, Keitaro Tawaraya, Toshihiro Hasegawa (2012) Dynamics of soil carbon and nitrogen influenced by elevated temperature in a Japanese rice paddy field. World Crop FACE Workshop 2012. July 9-12, 2012, Tsukuba, Japan

劉 田・岡本有加・佐藤秀平・笠原勝也・湯 水栄・服部 聡・林田光祐・俵谷圭太郎・程 為国：湿地化した放棄水田と継続水田における土壌炭素分解能の比較、日本土壌肥料学会 2012 年大会、鳥取、講演要旨集 第 58 集、p.190、(2012 年 9 月)

Miwa Matsushima, Weiguo Cheng, Takeshi Tokida, Hirofumi Nakamura, Kazuyuki Inubushi, Masumi Okada, Toshihiro Hasegawa. (2011) Soil microbial biomass C and  $^{13}C$  values of total and soluble organic C responded to free air  $CO_2$  enrichment (FACE) in rice paddy. Soil Science Society of America, San Antonio TX, USA. Oct. 16-19.

程 為国、小林理美、酒井英光、俵谷圭太郎、長谷川利拡：過去 100 年のイネ品種の生育とメタン放出に及ぼす二酸化炭素濃度上昇の影響、日本農業気象学会東北支部 2011 年大会、山形市 (2011 年 11 月)

岡本有加、程 為国、菊地 遥、小林理美、梶原晶彦、我妻忠雄、俵谷圭太郎：水稻根から分泌される有機態炭素量の品種間における差異性、日本土壌肥料学会 2011 年大会、つくば、講演要旨集 第 57 集、p.98、(2011 年 8 月)

程 為国、菊地 遥、俵谷圭太郎：安定同位体自然存在比を用いた湛水土壤中における植物由来の有機態炭素量の推定：C3 植物と C4 植物の切替え栽培 4 年目の結果、日本土壌肥料学会 2011 年大会、つくば、講演要旨集 第 57 集、p.15、(2011 年 8 月)

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

程 為国 (CHENG, Weiguo)

山形大学・農学部・准教授

研究者番号：8 0 4 5 0 2 7 9