

高CO<sub>2</sub>濃度・温暖化環境が水田からのメタン発生に及ぼす影響の解明と予測

独立行政法人農業環境技術研究所

大気環境研究領域 長谷川利拡・程為国

物質循環研究領域 麓 多門・八木一行

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 東北農業研究センター

寒冷地温暖化チーム

鮫島良次・中村浩史・大川原佳伸

&lt;研究協力者&gt; 日本学術振興会特別研究員 (独) 農業環境技術研究所 常田岳志

岩手大学農学部 岡田益己

秋田県農林水産技術センター農業試験場 松波寿典

平成18~20年度合計予算額 59,804千円

(うち、平成20年度当初予算額 18,331千円)

## [要旨]

本研究は、今後予想される高CO<sub>2</sub>濃度・温暖化環境が水田からのCH<sub>4</sub>発生を助長する機構を解明し、その影響を予測することを通じて、水田からのCH<sub>4</sub>発生量の予測と抑制技術の評価に資することを目的とする。そのために、過去に実施されたCH<sub>4</sub>発生に及ぼす高CO<sub>2</sub>影響に関するメタ解析、チャンパー・開放系大気CO<sub>2</sub>増加 (FACE)・水温上昇による実験的な影響解明、生物地球化学モデル (DNDC-Rice) による影響解析を行った。水田からのCH<sub>4</sub>発生に及ぼす高CO<sub>2</sub>影響に関するメタ解析では、外気+200~300ppmの高CO<sub>2</sub>処理によるCH<sub>4</sub>発生の促進率は、平均51% (95%信頼区間、45~57%, n=21) で、イネの乾物増加率に比べて4倍近くも大きかった。CH<sub>4</sub>発生に関する品種間差異をチャンパーで実験したところ、積算CH<sub>4</sub>発生量とその高CO<sub>2</sub>応答で顕著な差異が認められ、根重、根数の大きさがCH<sub>4</sub>発生と密接に関連することがわかった。夜温とCO<sub>2</sub>濃度がCH<sub>4</sub>発生に及ぼす影響をチャンパー実験で調査したところ、高CO<sub>2</sub>によるCH<sub>4</sub>発生の促進は、高夜温区で低い傾向にあった。また、終日一定温度とした高夜温区でもCH<sub>4</sub>発生速度に日変化が認められるなど、光合成などの植物生理による影響が大きいことがわかった。FACE (外気+200ppm)・水温上昇(対照区+2℃)の組み合わせ処理を世界に先駆けて実施したところ、水田からのCH<sub>4</sub>発生は、FACEによって22-29%、水温上昇により40-48%も増加することがわかった。特に温度依存性はQ<sub>10</sub>換算で7に相当するもので、これは加温によって土壌有機物分解が促進されたことに加えて、根から土壌への炭素供給が加速されたことによるものと推察された。DNDC-Rice モデルを用いて、日本、中国のFACE実験結果を解析したところ、モデルは、施肥、有機物管理の違いによるCH<sub>4</sub>発生量の変動は概ね再現できたが、高CO<sub>2</sub>濃度と温暖化によるCH<sub>4</sub>発生の促進は過小評価したことから、現状のモデルを将来予測に用いた場合、CH<sub>4</sub>発生に及ぼす気候変化の影響を過小評価する可能性が示唆された。

[キーワード] 水田、メタン、二酸化炭素、品種間差異、水温上昇

## 1. はじめに

水田は世界人口の半数以上の主食を供給する重要な生産基盤である。今後もコメを主食とする人口が増加することから、その重要性はこれまで以上に高まるものと考えられる。一方、水田は二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) に次いで温暖化の寄与率が高いメタン (CH<sub>4</sub>) の主要な発生源とされる。これらの温室効果ガスの増加になどによる温度の上昇は、さらに CH<sub>4</sub> 発生を促進する。また、今後も確実視される大気 CO<sub>2</sub> の増加は、光合成速度の促進を通じてイネの生産力を高める一方、水田からの CH<sub>4</sub> 発生を助長する恐れがあることが最近の研究で明らかになってきた<sup>1, 3, 7, 15, 16)</sup>。さらに、CO<sub>2</sub> 濃度による CH<sub>4</sub> 発生の促進度合いは、温度条件によって変化するとの報告もある<sup>1, 16)</sup>。

産業革命以降、急激な増加を示した大気中の CH<sub>4</sub> 濃度 (産業革命以前の 715ppb から 2005 年には 1774ppb) は、近年安定化傾向を示しているものの、その起源や収支については不明な点が多い。加えて、高 CO<sub>2</sub> 濃度・温暖化環境が、水田からの CH<sub>4</sub> 発生をどの程度助長するかについては、実験条件などによって著しい変動があり、一定の見解は得られていない。CO<sub>2</sub> 濃度の上昇と温暖化による CH<sub>4</sub> 発生へのフィードバック機構とその変動要因を解明することは、将来の高 CO<sub>2</sub> 濃度・温暖化環境における CH<sub>4</sub> 発生量の予測や抑制技術の開発に貢献する。

水田からの CH<sub>4</sub> 発生には、土壌中の有機物分解、還元、大気への輸送など様々な過程が関連し、温度や CO<sub>2</sub> 濃度は、直接的に、あるいは植物体を通して間接的にこれらの過程に影響する。また、土壌タイプ、品種、水管理・施肥・有機物施用などの栽培管理技術は、CH<sub>4</sub> 発生に少なからず影響する。温暖化・高 CO<sub>2</sub> 環境による CH<sub>4</sub> 発生促進と、これらの技術的要因の相互作用を解明することは、CH<sub>4</sub> 発生量の予測だけでなく、ガス発生の軽減技術を確立するためにも極めて重要である。こうした影響を実験的手法で網羅することは困難であるが、(1) 過去に収集された環境操作実験データを有効に活用しながら、(2) 不足している知見を環境操作実験で補い、(3) 関連諸過程が良く定義された予測モデルと連携することによって、多くの要因の相互作用を定量的に評価することができるものと考えられる。

## 2. 研究目的

本研究は、今後予想される高CO<sub>2</sub>濃度・温暖化環境が、水田からのCH<sub>4</sub>発生を助長する機構を解明し、その促進程度が土壌、品種や栽培管理によってどの程度変動するかを明らかにすることを目的とする。以上の結果を、水田生態系の生物地球化学モデルに導入し、高CO<sub>2</sub>・温暖化環境における水田からのCH<sub>4</sub>発生量の予測と抑制技術の評価に資する。以上の目的を達成するため、以下の構成で3ヵ年の研究を実施した。

- (1) CH<sub>4</sub>発生に及ぼす高CO<sub>2</sub>影響の定量的レビュー (メタ解析)
- (2) 培養実験における土壌有機物分解モデルの検証
- (3) チャンバー実験によるCH<sub>4</sub>発生量に関するイネ品種とCO<sub>2</sub>濃度増加の相互作用の評価
- (4) チャンバー実験によるCO<sub>2</sub>濃度と夜温上昇が水田土壌からのCH<sub>4</sub>発生に及ぼす影響
- (5) チャンバー実験によるイネから土壌への炭素分配に及ぼすCO<sub>2</sub>濃度の影響
- (6) 開放系大気CO<sub>2</sub>増加 (Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment: FACE) ・水温上昇実験による実証的影響評価
- (7) DNDC-Riceモデルを利用した実験結果のモデル解析

### 3. 研究方法

#### (1) CH<sub>4</sub>発生に及ぼす高CO<sub>2</sub>影響の定量的レビュー（メタ解析）

高CO<sub>2</sub>濃度が水田からのCH<sub>4</sub>発生量に及ぼす影響を調査した論文を検索し、4試験地（日本、中国、フィリピン、アメリカ）で実施された21組のCH<sub>4</sub>発生量データを収集した（表1）。いずれの論文も、チャンバーあるいは開放系大気CO<sub>2</sub>増加（FACE）を用いてCO<sub>2</sub>濃度処理を実施したものである。なお、高CO<sub>2</sub>処理条件はすべて同一ではないが、ほぼ外気+200~300ppmであったため、一括して高CO<sub>2</sub>濃度処理として扱った。その他の条件としては、化学肥料窒素水準、有機物施用水準、温度水準などが含まれる。それぞれの実験条件のデータを個々の独立データとして、外気CO<sub>2</sub>濃度区に対する高CO<sub>2</sub>濃度区のCH<sub>4</sub>発生量の応答比を、Hedges et al.<sup>6)</sup>に準じて、メタ解析用ソフトウェア、Meta Win ver. 2.11)を用いて解析した。

表 1. CH<sub>4</sub>発生に及ぼす高CO<sub>2</sub>影響の定量的レビュー（メタ解析）に用いたデータの概要

| Study description  | Reference                            |
|--|--------------------------------------|
| Rice (IR72), Open-top chambers (+300 ppm), Los Banos, The Phillipines  | Ziska <i>et al.</i> <sup>16)</sup>   |
| Rice (IR72), Open-top chambers, ambient +4°C, (+300 ppm), Los Banos, The Phillipines   | Ziska <i>et al.</i> <sup>16)</sup>   |
| Rice (Nipponbare), Closed chamber (+300 ppm), Tsukuba, Japan   | Cheng <i>et al.</i> <sup>3)</sup>    |
| Rice (IR72), Closed Chamber (660 ppm), Day/night T (32/23 °C), Gainesville, Florida, USA   | Allen <i>et al.</i> <sup>1)</sup>    |
| Rice (IR72), Closed Chamber (660 ppm), Day/night T (35/26 °C), Gainesville, Florida, USA   | Allen <i>et al.</i> <sup>1)</sup>    |
| Rice (IR72), Closed Chamber (660 ppm), Day/night T (38/29 °C), Gainesville, Florida,   | Allen <i>et al.</i> <sup>1)</sup>    |
| Rice (Akitakomachi), Japan FACE (+200 ppm) in 1998, 1999 & 2000, Shizukuishi, Iwate, Japan   | Inubushi <i>et al.</i> <sup>7)</sup> |
| Rice ( Wuxiangjing 14), China FACE (+200 ppm), High N (250 kg N ha <sup>-1</sup> ) in 2001, 2002 & 2003, Wuxi, Jiangsu, China                            | Zheng <i>et al.</i> <sup>15)</sup>   |
| Rice (Wuxiangjing 14), China FACE (+200 ppm), Medium N (150 kg N ha <sup>-1</sup> ) in 2001, 2002 & 2003, Wuxi, Jiangsu, China                           | Zheng <i>et al.</i> <sup>15)</sup>   |
| Rice (Wuxiangjing 14), China FACE (+200 ppm), Medium N (150 kg N ha <sup>-1</sup> ) and high residue application 2001, 2002 & 2003, Wuxi, Jiangsu, China | Zheng <i>et al.</i> <sup>15)</sup>   |

#### (2) 培養実験による土壌中の有機物分解量のモデル検証

Cheng et al.<sup>2)</sup>が実施した、日本の7府県（北緯35° 01' から39° 41'、東経135° 37' から141° 00'）の10種類の土壌の室内培養実験を基に、土壌有機物分解速度の違いを土壌の理化学性を用いて定量的に再現できるかを検討した。なお、用いた10種類の土壌の理化学性は表2に示すとおりである。No. 1は黒ボク土であり、No. 2、3、6、9、および10は灰色低地土であり、No. 4、5、および8番はグライ低地土である（No. 8は砂質グライ土の一種である）。黒ボク土、灰色低地土、およびグライ低地土は日本のすべての水田のそれぞれ10%、37%、および31%を占める<sup>8)</sup>。したがって、これら10種類の土壌は日本の水田土壌を代表するものと考えられる。

培養実験の方法は次のとおりである。すなわち、嫌気培養実験を開始する前に、すべての土壌サンプルを2週間WFPS（充水間隙、water filled pore space）40%で前培養した。その後、土壌サンプル（乾土あたり5g）を68-mlの血清ボトル18本に小分けにした。次に、10 mLの純水を各々の

ボトルに注いだ。すべてのボトルにブチルラバー栓で蓋をし、ボトルの空気を真空ガス置換装置でN<sub>2</sub>ガスに置き換えた。すべてのボトルを30°Cで培養した。1週間、2週間、4週間、8週間、および16週間の培養を施した後(計5回)、培養器から1サンプルにつき3本のボトルを取り出し、まず、ボトルのヘッドスペース中のCO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>の濃度をガスクロマトグラフ(GC-7A、島津、京都)で測定した。次に、40 mLのCH<sub>3</sub>COONa溶液(1.25 M pH 2.8)を土壌に加え、抽出したFe<sup>2+</sup>を測定した。培養16週間後には、3ボトルについて10%塩化カリウム溶液で抽出したNH<sub>4</sub><sup>+</sup>生成量を測定した。16週間の培養期間中に発生されたC-CO<sub>2</sub>とC-CH<sub>4</sub>の積算値を分解炭素量、生成されたFe<sup>2+</sup>を被還元性鉄量、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>生成量(16週間後のNH<sub>4</sub><sup>+</sup>から培養前のNH<sub>4</sub><sup>+</sup>を差し引いた量)を可給態窒素量とした。

表2. 解析に用いた10種類の土壌の理化学性

| No. | 土壌類別    | 管理     | 収集地      | 仮密度<br>(g cm <sup>-3</sup> ) | pH   | 全炭素<br>(%) | 全窒素<br>(%) | C/N   | 全鉄<br>(%) | 全Mn<br>(mg g <sup>-1</sup> ) |
|-----|---------|--------|----------|------------------------------|------|------------|------------|-------|-----------|------------------------------|
| 1   | 黒ボク土    | 慣行     | 岩手県、雫石   | 0.65                         | 6.08 | 8.03       | 0.53       | 15.08 | 3.95      | 0.62                         |
| 2   | 細粒灰色低地土 | 稲わら施用  | 山形県、山形   | 0.93                         | 5.91 | 2.16       | 0.17       | 12.69 | 5.33      | 0.96                         |
| 3   | 細粒灰色低地土 | 牛糞堆肥施用 | 山形県、山形   | 0.94                         | 6.58 | 2.58       | 0.20       | 13.21 | 5.36      | 0.94                         |
| 4   | 細粒強グライ土 | 整備圃場   | 新潟県、長岡   | 0.89                         | 5.75 | 1.89       | 0.17       | 11.18 | 3.66      | 0.63                         |
| 5   | 細粒強グライ土 | 未整備圃場  | 新潟県、長岡   | 0.77                         | 5.20 | 2.71       | 0.24       | 11.14 | 3.80      | 0.49                         |
| 6   | 普通灰色低地土 | 慣行     | 福島県、郡山   | 0.99                         | 6.61 | 1.77       | 0.16       | 11.37 | 4.06      | 0.63                         |
| 7   | 灰色低地土   | 2年間放置土 | 茨城県、谷和原  | 0.83                         | 5.76 | 1.97       | 0.20       | 10.11 | 4.57      | 0.69                         |
| 8   | 砂質土     | 慣行     | 千葉県、九十九里 | 1.25                         | 6.24 | 0.81       | 0.09       | 9.42  | 3.53      | 0.70                         |
| 9   | 灰色低地土   | 化学施肥   | 京都府、亀岡   | 1.01                         | 7.12 | 1.74       | 0.17       | 10.20 | 3.09      | 1.14                         |
| 10  | 灰色低地土   | 牛糞堆肥   | 京都府、亀岡   | 1.01                         | 7.12 | 2.25       | 0.21       | 10.49 | 2.96      | 1.00                         |

データは Cheng et al. (Journal of Environmental Quality, 36: 1920-1925 (2007)) から。

以上の土壌培養実験における炭素の分解過程を、炭素・窒素代謝を表すDNDC (DeNitrification DeComposition) モデル(Li et al.<sup>9)</sup>が開発し、Fumoto et al.<sup>4)</sup>が水田用に改良) が再現できるかについて検証した。シミュレーションにあたり、有機物施用について特に情報が無い場合は、毎年稲わら(2000 kg C ha<sup>-1</sup> 相当)が施用されているものと仮定(土壌No. 2、4~6、8~10)、また堆肥施用圃場(土壌No. 3、10)では毎年2000 kg C ha<sup>-1</sup> 相当の堆肥が施用されているものと仮定した。ただし、No. 7の谷和原土壌は、水田から採取後2年間野積状態で放置したもので考察から除いた。土壌採取の前年(2003年)まで数年以上同様の条件で水稻が栽培されたと仮定し、2004年の5月に作土を採取して湛水し、30°Cで16週間培養するという設定でシミュレーションを行った。

### (3) CH<sub>4</sub>発生量に関するイネ品種とCO<sub>2</sub>濃度増加の相互作用

#### ①CH<sub>4</sub>発生に及ぼす高CO<sub>2</sub>濃度の影響における品種間差異(半閉鎖型環境制御チャンバー実験)

CO<sub>2</sub>濃度、温湿度を制御できる自然光型半閉鎖型環境制御チャンバー(茨城県つくば市)を用いて、来歴の異なるイネ4品種(IR72、改良インディカ、フィリッピン; Dular、早生インディカ、アウスイネ、バングラデッシュ; IR65598、熱帯ジャポニカとインディカの交雑種、New Plant Type(以下、NPT)、フィリッピン; コシヒカリ、温帯ジャポニカ、以下JP)を2水準のCO<sub>2</sub>濃度条件でポット栽培実験した結果から、CH<sub>4</sub>発生の高CO<sub>2</sub>応答の品種差異に関わる要因を解析した。なお、

本実験ではCO<sub>2</sub>濃度は、高濃度区では570ppmとし、標準濃度区では大気レベルの370ppmとした。両チャンバー気温は昼と夜それぞれ32と24℃にし、相対湿度は60%以上に同じレベルで維持した。また、システム誤差を避けるため、3週間ごとにチャンバーローテーション、1週間ごとにチャンバー内のブロックローテーションを行なった。27.3 L容の角型ポットに千葉県九十九里町水田から採取した砂丘未熟土を充填し、1ポット当たり2株（1株2本植え）を移植し、各区各品種につき3反復（ポット）設けた。チッソ、リン、カリは各成分で36 : 13 : 30 g m<sup>-2</sup>施用した。イネ生育期間中に、2週間ごとに、ポット2株のうち1株を対象に、クローズドチャンバー法でCH<sub>4</sub>フラックスのサンプルを採集し、ガスクロマトグラフィーで分析した。

#### ②CH<sub>4</sub>発生量の品種間差をもたらすイネ形態特性の解析（CO<sub>2</sub>濃度制御型温度勾配チャンバー実験）

植物体を介したCH<sub>4</sub>の発生およびその高CO<sub>2</sub>応答に品種間差異が生じる要因を明らかにするために、岩手県盛岡市東北農業研究センターCO<sub>2</sub>濃度制御型温度勾配型チャンバーにて、(3) ①実験で用いた4品種（IR72、Dular、IR65598、コシヒカリ）に加えて、コシヒカリとは早晚性が異なるジャポニカ5品種（かけはし、あきたこまち、ひとめぼれ、日本晴、ユメヒカリ）をポット栽培し、形態特性との関連を解析した。

供試10品種を5月2日に播種し、5月30日に1/5000ワグネルポットに2個体ずつ移植した。実験土壌には黒ボク土を用い、窒素施肥は0.3gN/pot（標準）と0.6gN/pot（高窒素）の2水準設けた。これらを東北農業研究センターグラディオトロンの温度勾配チャンバー（以下、TGC）2棟に配置した。一方のTGCには外気をそのまま導入し外気CO<sub>2</sub>濃度（8月31日までの平均：396ppm）とした。他方のTGCは外気区に対して+200ppmのCO<sub>2</sub>濃度（同：596ppm）に制御した。両TGCの同一温度区（同：25.1℃）にサンプルを配置し、温度処理は設けなかった。各品種とも窒素、CO<sub>2</sub>濃度の各処理につき2反復設け、出穂期にイネを解体して部位別乾物重、分けつ数、葉数、主根数などを調査した。

#### (4) CO<sub>2</sub>濃度と夜温上昇が水田土壌からのCH<sub>4</sub>発生に及ぼす影響

過去100年間の全球表面温度は、最高よりも最低気温で上昇が著しかった。一方、これまで実施された温度とCO<sub>2</sub>濃度の上昇の組み合わせチャンバー実験は、いずれも昼夜ともに温度上昇させたものであった<sup>1, 16)</sup>。今後の温暖化予測において、日較差の動向には大きな不確実性が含まれるが、高CO<sub>2</sub>環境下で夜温が上昇した場合のCH<sub>4</sub>発生量が、一般的な温度反応のみから予測可能であるか否かは実験的に解明する必要がある。また、大気CO<sub>2</sub>濃度の上昇は、CH<sub>4</sub>の通り道となる茎や根の数を増加させること、および根から土壌への炭素供給を高めることを通じてCH<sub>4</sub>発生量を増加させることが報告されているが、これらのうち前者は生育前半の形態形成過程を通じて影響するのに対して、後者は生育全般を通して影響するものと考えられる。一方、高CO<sub>2</sub>濃度と高夜温の組み合わせは、作物体の炭素代謝バランスに影響することが予想される。高CO<sub>2</sub>濃度と高夜温が茎数や根数の違い以外の形質を通して現れる影響を解析するために、半閉鎖型環境制御チャンバーにて、生育後半のみを対象とした高夜温・高CO<sub>2</sub>濃度処理を行った。

2006年6月26日に、農業環境技術研究所において、(3) ①で使用したのと同じ砂質水田土壌を充填した15個のポット（直径20cm、深さ27cm、8L）にイネ品種IR72を1ポットあたり3本移植し、屋外にて59日間（生殖成長中期頃まで）栽培した。その後、2水準の温度（高夜温32℃、低夜温22℃、昼温はともに32℃）と2水準のCO<sub>2</sub>濃度（標準濃度380ppmv、高濃度680ppmv）を組み合わせ4処理区（高CO<sub>2</sub>濃度高夜温、EH区；標準CO<sub>2</sub>濃度高夜温、AH区；高CO<sub>2</sub>濃度低夜温、EL区；標準

CO<sub>2</sub>濃度低夜温、AL区) とした4基の半閉鎖型環境制御チャンバー(4 x 2 x 2m、L x W x H)に、3ポットずつを移し、処理実験を開始した。残り3ポットを解体し、処理前のサンプルとした。実験スケジュールおよび処理前後の気温変化は図1に示した。CH<sub>4</sub>フラックスは、処理前は昼間だけ、処理開始後は毎週、昼夜の2回行なった。なお、夜間収集したガスサンプリングのCO<sub>2</sub>発生量をイネの暗呼吸とした。また、CH<sub>4</sub>フラックスサンプリングと同時に土壤水を採水管で採集し、CO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>の溶存量をガスクロマトグラフィーで分析した。また、週ごとに分けつ数、草丈などの植物生育形質を調査した。処理開始後の56日と63日目に、それぞれ高夜温処理区と低夜温処理区の収穫を行ない、収量と各器官のバイオマス調査をした。

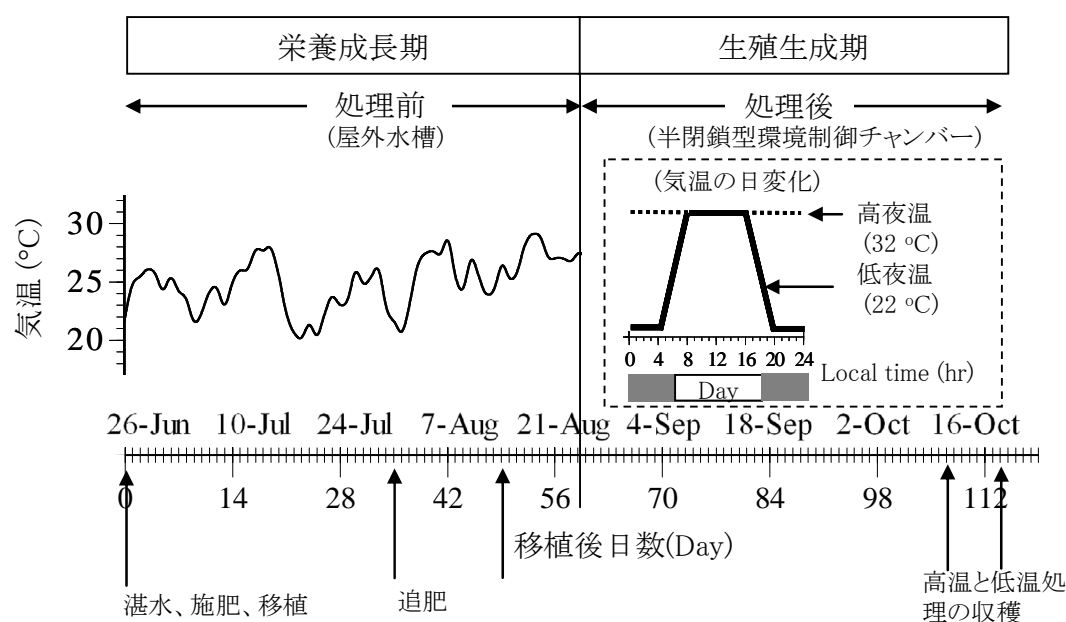


図1. 茨城県つくば市農業環境技術研究所の半閉鎖型自然光環境制御チャンバーにおける高CO<sub>2</sub>濃度・高夜温処理の組み合わせ実験のスケジュールと処理前後の気温変化。

#### (5) イネから土壤への炭素分配に及ぼすCO<sub>2</sub>濃度の影響

これまでの研究や本研究のメタ解析、FACE・温暖化実験などから、高CO<sub>2</sub>濃度や温度に対するCH<sub>4</sub>生成の影響を予測するためには、植物から土壤への炭素供給の把握が極めて重要であることが明らかになってきた。しかし、植物から土壤への炭素供給を実験的に定量する手法は確立しておらず、正確に見積もるのは困難である。測定が困難な理由の1つに、土壤在来の炭素量と植物から新たに供給された炭素の区別が難しいことが挙げられる。しかし、土壤中の炭素が、イネから供給される炭素と区別可能であれば、作付け期間中に植物から供給された炭素量を見積もることができるかもしれない。C<sub>4</sub>植物が長期間栽培されていた土壤のδ<sup>13</sup>C値は、C<sub>3</sub>植物が固定する炭素のδ<sup>13</sup>C値よりも大きいことから、C<sub>4</sub>土壤を用いたイネの栽培実験で、土壤のδ<sup>13</sup>C値の変化を調査することで、イネから土壤への炭素供給を定量できる可能性がある。そこで本研究では、C<sub>4</sub>植物のサトウキビ畑の土壤を充填したポットを用いて2水準のCO<sub>2</sub>濃度条件下でイネを栽培し、土壤中のδ<sup>13</sup>Cの変化を測定することを通じて、CO<sub>2</sub>濃度上昇がイネから土壤への炭素供給に及ぼす影響の解

明を試みた。すなわち、石垣島のサトウキビ畑から土壌を収集し8L容ポット(直径18cm、高さ27 cm)に充填した。湛水後、イネを移植し、農業環境技術研究所構内にある半閉鎖型環境制御チャンバー(クライマトロン)において、2水準のCO<sub>2</sub>濃度(標準区が380ppm、上昇区が680ppm)条件で栽培した。実験は2007、2008年の2季行った。ただし、供試品種は、2007年はインディカのIR72、2008年はジャポニカのコシヒカリとした。土壌水中の溶存CO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>を定量するために、採水管で2週間ごとに土壌水を採集し、ガスクロマトグラフィーで分析した。成熟期に、植物地上部のバイオマスは器官別に分け、80°Cで乾燥した後、秤量した。土壌は上層(0-5cm)と下層(5-15cm)に分けて採種し、風乾粉碎後、炭素含有量と $\delta^{13}\text{C}$ を測定した。なお、同条件での無植栽土壌ポットも設けた。実験用サトウキビ畑の土壌は全炭素含有量が0.5%、 $\delta^{13}\text{C}$ 値が $-15\text{‰}$ であった。土壌中に植物由来炭素の推定は、マスバランス法より下記の式で計算した。

$$f_p = (\delta_t - \delta_o) / (\delta_p - \delta_o)$$

$f_p$ : 植物起源の割合;  $\delta_t$ : サンプルング時点の土壌の炭素同位体比;  $\delta_o$ : 元の土壌の炭素同位体比;  $\delta_p$ : 植物炭素同位体比、根の値とした。

#### (6) 開放系大気CO<sub>2</sub>増加 (Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment: FACE) ・温暖化実験

FACE・水地温上昇実験は、将来の地球環境下における水田からのCH<sub>4</sub>発生量を予測する上で貴重な実証的データを提供する。一方、得られる結果は、対象とする水田が置かれている気候条件や土壌特性、あるいは栽培管理法にも大きく影響を受ける。したがって、環境操作実験から得られる知見を他の条件下にも活用するためには、FACE・温暖化が水田からのCH<sub>4</sub>発生に及ぼす影響を、土壌・栽培条件などとの相互作用を含めて定量的に解明することが必要である。そのために以下の項目について調査・研究した。

##### ① FACE・温暖化実験におけるCH<sub>4</sub>フラックスの観測

2006年度に開発した水・地温上昇装置を純CO<sub>2</sub>発生型のFACE装置<sup>11)</sup>に導入したFACE・温暖化実験を、2007年度と2008年度に岩手県雫石町の農家水田6筆で実施した。区制はCO<sub>2</sub>濃度を主区、水地温を副区とする分割区法とした。CO<sub>2</sub>濃度処理は外気CO<sub>2</sub>濃度区 (Ambient、以下Amb区) と外気+200ppmに設定した高CO<sub>2</sub>濃度区 (以下、FACE区) の2段階として、3反復で実施した。なお、FACE区のCO<sub>2</sub>発生が他区に影響しないように、FACE区と対照区は60m以上離して設置した。FACE、Amb区(差し渡し12mの八角形状)内に、対照温度区と、水・地温を2°C上昇させる加温区を設置した。加温処理は、いずれの反復においても塩ビ製の波板で囲った5.5m×2.7mの面積を対象とした。各畝間中央の土壌表面にケーブルヒーター(150W, 5m長)を30cm間隔で固定した。対照区の水温を測定し、データロガーを用いてヒーターをon-off制御し、対照区の水温に対して加温区の水温を+2°Cに維持した。

水稻品種あきたこまちを5月下旬に移植した(2007年は5月23日、2008年は5月22日)。施肥は窒素9kg/10a、リン酸30kg/10a、カリウム15kg/10aを全量基肥として与えた。CH<sub>4</sub>フラックスはイネ2株分を覆うことができるアクリル製チャンバー(35×30×104.5cm)を各区2反復設置し、クロードチャンバー法で測定した。チャンバー設置時間は30分とし、0、15、30分後のガスを採取後、ガスクロマトグラフィーでCH<sub>4</sub>濃度を定量し、チャンバー内CH<sub>4</sub>濃度の増加からCH<sub>4</sub>フラックスを求めた。

##### ② 土壌Fe<sup>3+</sup>の還元速度のモニタリングと共変量としての利用

CH<sub>4</sub>は有機物の発酵による分解で生成される電子供与体である水素や酢酸から生成される。その際、CH<sub>4</sub>生成反応で得られるエネルギーは他の還元反応と比べて小さいため、他に電子受容体があるとその還元が先行し、CH<sub>4</sub>の生成は著しく阻害される。特に水田土壌では鉄の還元が電子供与体の消費の半分以上を占める場合も多く、CH<sub>4</sub>生成を大きく阻害する<sup>14)</sup>。さらに被還元性鉄の含有量は土壌によっても大きく異なるため<sup>2, 14)</sup>、広域適用性を検討するうえでも鉄還元プロセスの把握は重要である。本研究ではFe<sup>3+</sup>の還元による電子供与体の消費を、土壌Fe<sup>2+</sup>生成量を経時的に測定することにより求めた。

またFACEによるCH<sub>4</sub>フラックスの増加効果を検定するにあたり、圃場毎のもともとの土壌特性の違いが問題になりうるものが昨年度までの試験でわかってきた。すなわち、FACE区の水田土壌ではもともと非還元性鉄含有量が多く、CH<sub>4</sub>生成がAmb区と比べ抑制される傾向が強いことが鉄還元量のモニタリングから確かめられた。昨年度は、この問題を回避するために鉄還元量が比較的均一な圃場のデータ(2反復)のみを用いて解析した結果を報告した。本年度は三反復のデータ全てを活用し、圃場毎の鉄還元量を共変量とする共分散分析を行うことにより、平均的な鉄還元量の下でのメタン発生量を推定した。なお共分散分析は生育期間中の積算フラックスについてのみ行い、各測定日のデータはCH<sub>4</sub>フラックスの測定値そのものを示した。

### ③ 加温が土壌中の有機物分解と土壌Fe<sup>3+</sup>の還元速度に与える影響

2006年度の結果より、加温によってCH<sub>4</sub>発生量が大きく増加することが予測された。これは水田土壌中で生じるCH<sub>4</sub>生成が加温によって大きく促進されることを示唆する。CH<sub>4</sub>生成に必要な電子供与体は有機物の分解により生成される。電子供与体となる有機物には、1. 土壌有機物、2. イネ残渣、3. 堆肥等の有機肥料、4. 栽培中のイネの根からの滲出物や枯死根、がある。本実験では有機肥料は施用しておらず、稲ワラは刈り株を除き、圃場外へ持ち出した。したがって、本圃場における電子供与体の主な起源は、土壌有機物とイネ体からの供給と考えられる。

加温が土壌中のCH<sub>4</sub>生成過程に与えた影響は、電子供与体の供給・消費という化学量論的観点から解析することが望ましい。そこで、電子供与体の供給という観点から、土壌有機物分解速度とその温度依存性を、現地土壌を圃場内で密閉培養し、無機化された窒素量を定期的に測定することで求めた。窒素無機化量から電子供与体生成量への変換は、窒素無機化量と炭素分解量の関係式<sup>2)</sup>(質量比でC:N=5.28:1)と改良DNDCモデル(DNDC-Rice)<sup>4)</sup>と同様の化学量論的關係から算出した。また定期的にイネ体の根のバイオマスを調査することにより、加温が根量の変化に与える影響を調べた。電子供与体の消費という面からは、三価の鉄がメタン生成と競合する主要な電子受容体であるため、鉄還元速度の温度依存性を調査した。

### (7) DNDC-Riceモデルを利用した実験結果のモデル解析

図2に表したように、DNDC-Riceモデルは土壌、気象および栽培管理の入力データに基づき、土壌の物理環境、作物の生育、および土壌中の生物化学的プロセスを計算する。本研究では、DNDC-Riceモデルに、水稻の生育に対する水温の影響を考慮した窒素依存型水稻生育モデル<sup>5)</sup>のアルゴリズムを導入した。この水稻生育モデルは、葉面積の増加を生育ステージ、窒素吸収量ならびに水温または気温の関数として計算し、水温と気温の上昇は葉面積増加を促進する。また、光合成速度は気温、日射量、大気CO<sub>2</sub>濃度および葉の窒素含有率の関数であり、大気CO<sub>2</sub>濃度の影響は次式のβファクターモデルで推定する。



$$F_{CO_2} = 1 + \beta \log \frac{[CO_2]_X}{[CO_2]_A}$$

ここで、 $F_{CO_2}$ はCO<sub>2</sub>濃度による光合成速度の変化を表す係数 (-)、 $\beta$ は経験的パラメータ (-)、 $[CO_2]_X$ は大気CO<sub>2</sub>濃度 (ppm)、 $[CO_2]_A$ は対照CO<sub>2</sub>濃度 (ppm) である。

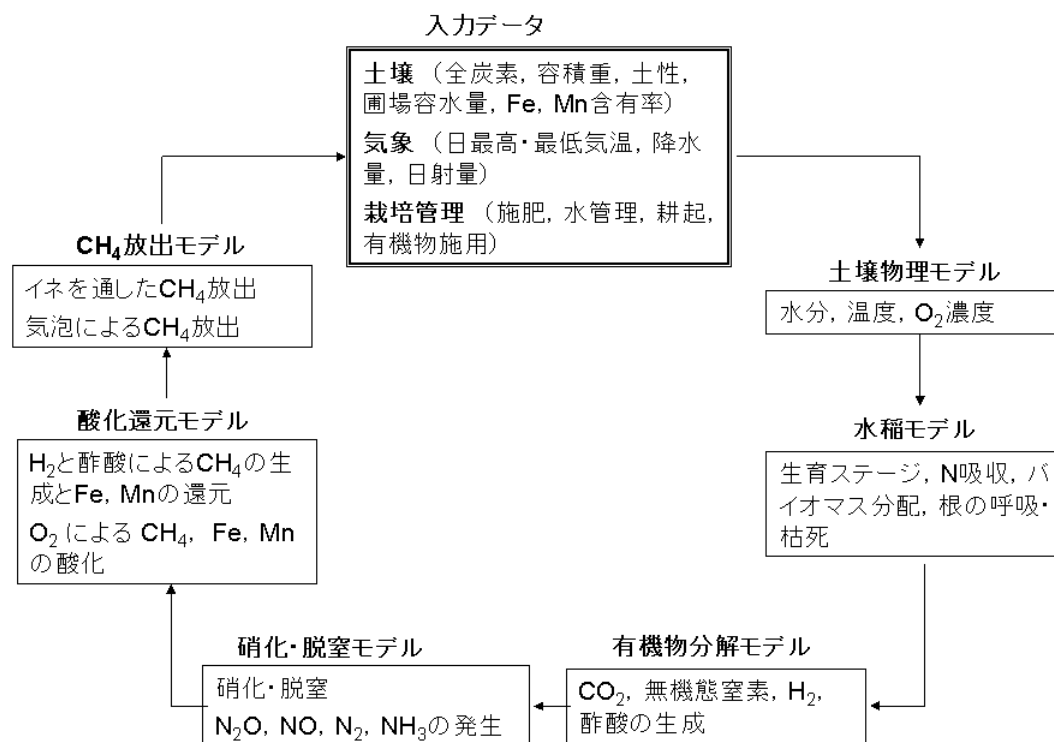


図2 DNDC-Rice モデルの計算の概略

岩手県雫石町および中国江蘇省無錫市で行われたFACE実験の観測データを用いて、高CO<sub>2</sub>・温暖化環境下の水田のメタン発生量についてDNDC-Riceを検証した。雫石については1998年から2008年までの3期のFACE実験のデータを用い、無錫については2001～2003年の観測データ<sup>13,15)</sup>を用いた。無錫では、作付け体系を水稲 (japonica 99-15) - 冬小麦の二毛作とし、FACE区のCO<sub>2</sub>濃度を外気より200ppm高く設定し、窒素施肥量と小麦残渣の投入量を変えた試験が行われた (表3)。土壌、気象および栽培管理について現地のデータをDNDC-Riceモデルに入力し、水稲成長量、メタン発生量などを推定した。その際、CO<sub>2</sub>濃度に対する光合成の応答は水稲品種によって異なると考え、それぞれの地点でFACEによる登熟期地上部乾物重の平均増加率が観測値と一致するように $\beta$ を校正した。以上により修正モデルがCH<sub>4</sub>発生に及ぼすFACE処理、温暖化処理、有機物や施肥処理などの影響を再現できるかについて検討した。

表3 無錫FACE実験での栽培条件

| 年    | 水稻作窒素施肥量 (kg N ha <sup>-1</sup> )              |                |
|------|--|----------------|
|      | 150  | 250            |
|      | 麦わら投入量 (kg C ha <sup>-1</sup> )                |                |
| 2001 | 1910 (150N-HR) *                               | 1910 (250N-HR) |
| 2002 | 950 (150N-MR)                                  | 950 (250N-MR)  |
| 2003 | 0 (150N-ZR)<br>820 (150N-MR)<br>1850 (150N-HR) | 820 (250N-MR)  |

\*カッコ内は処理の略称。

#### 4. 結果・考察

##### (1) CH<sub>4</sub>発生に及ぼす高CO<sub>2</sub>影響の定量的レビュー (メタ解析)

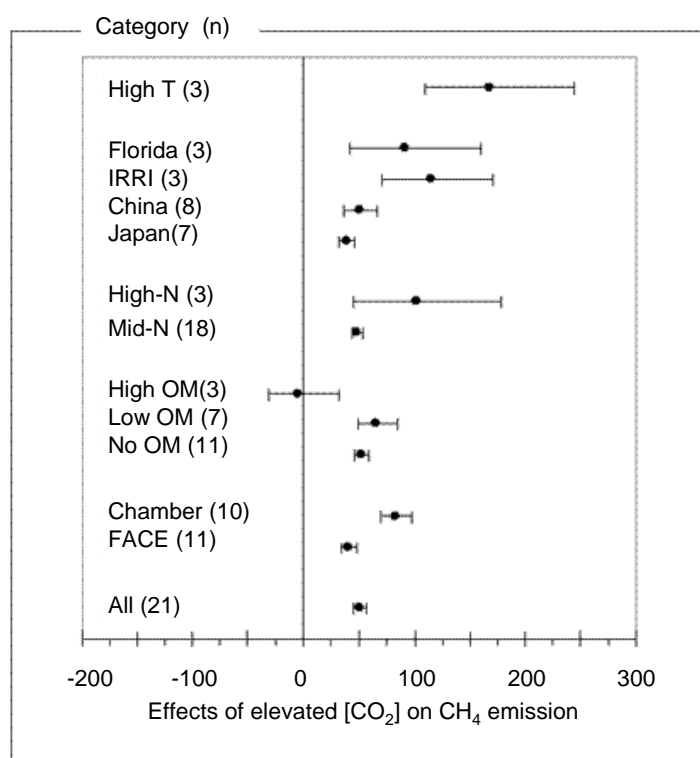


図3 大気CO<sub>2</sub>濃度の上昇が水田からのCH<sub>4</sub>放出量に及ぼす影響のメタ解析結果 (6論文21データセットの解析結果)。値は高CO<sub>2</sub>濃度処理 (外気+200~300ppm) による平均増加率±95%信頼区間。ただし、IRRIはフィリピンにある国際イネ研究所、Nは窒素処理を、OMは有機物施用処理、Chamberはチャンバーでの高CO<sub>2</sub>実験、FACEは圃場における開放系CO<sub>2</sub>増加実験 (日本雫石と中国江蘇省無錫)。

過去に論文掲載された21データセットには、異なる試験地、窒素、有機物施用、温度条件で得られたデータが含まれているとともに、CO<sub>2</sub>増加処理方法もFACE実験 (岩手県雫石町および中国江蘇省無錫、計11セット)、チャンバー実験 (オープントップチャンバー3、半閉鎖系自然光型チャンバー7セット) と異なるが、CO<sub>2</sub>増加処理は、有機物多施用条件を除きCH<sub>4</sub>発生量を有意に増加させることがわかった (図3)。有機物多施用区においてCO<sub>2</sub>濃度の影響が認められなかったのは、対照区においてもCH<sub>4</sub>の基質が十分で、高CO<sub>2</sub>による炭素供給増加効果が認められなかったことによ

るものと考えられる。また、CO<sub>2</sub>濃度処理方法間の比較では、FACE処理によるCH<sub>4</sub>増加率が41%であったのに対して、チャンバー実験では83%と高かったが、チャンバー実験で高温処理区を除いた平均CH<sub>4</sub>発生増加率は48%で、FACE実験のそれと大差なかった。

以上、21データセットの高CO<sub>2</sub>処理（200～300ppmの濃度上昇）によるCH<sub>4</sub>発生の増加率は、平均で51%であった。これは、CO<sub>2</sub>濃度上昇がCH<sub>4</sub>発生に及ぼすフィードバック現象の程度を表す数値と考えられる。一方、これまで植物のCO<sub>2</sub>を扱ったFACE実験のメタ解析では、C<sub>3</sub>植物のCO<sub>2</sub>増加による子実重の平均増加率は23%であった<sup>10)</sup>。また、日本と中国のイネFACE実験のメタ解析では、200ppmのCO<sub>2</sub>濃度上昇によるイネの増収率は、コムギやダイズといった主要C<sub>3</sub>作物と同様に15%で、C<sub>3</sub>植物の平均的な応答よりも小さいことが示されている。このように本研究で明らかになった高CO<sub>2</sub>によるCH<sub>4</sub>発生の促進率は、イネの増収率に比べて著しく大きかった。以下の環境操作実験では、そのメカニズム解明を試みた。

表4 16週間嫌気培養した後の炭素分岐量、窒素無機化量および鉄還元量。

| No.                    | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | 炭素分解<br>量<br>(C=A+B) | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup><br>(D) | 易分解性<br>C/N<br>(C/D) | 還元鉄<br>(Fe <sup>2+</sup> )<br>(mg g <sup>-1</sup> ) |
|------------------------|-----------------|-----------------|----------------------|-------------------------------------|----------------------|---|
|                        | (A)             | (B)             |                      |                                     |                      |   |
| 1                      | 956.67          | 153.57          | 1110.24              | 213.39                              | 5.20                 | 5.82  |
| 2                      | 522.49          | 10.40           | 532.89               | 97.29                               | 5.48                 | 8.64  |
| 3                      | 417.72          | 5.24            | 422.96               | 94.89                               | 4.46                 | 7.32  |
| 4                      | 699.32          | 243.13          | 942.45               | 159.71                              | 5.90                 | 5.18  |
| 5                      | 983.49          | 347.86          | 1331.35              | 261.68                              | 5.09                 | 5.74  |
| 6                      | 447.71          | 18.28           | 465.99               | 82.36                               | 5.66                 | 7.14  |
| 7                      | 414.99          | 0.06            | 415.05               | 61.04                               | 6.80                 | 3.06  |
| 8                      | 212.47          | 27.70           | 240.17               | 29.03                               | 8.27                 | 0.51  |
| 9                      | 321.70          | 27.36           | 349.06               | 68.89                               | 5.07                 | 4.53  |
| 10                     | 445.02          | 133.11          | 578.12               | 105.30                              | 5.49                 | 4.70  |
| LSD ( <i>P</i> =0.01)* | 50.10           | 35.67           | 80.55                | 20.8                                |                      | 0.76  |
| Mean                   | 542.16          | 96.67           | 638.83               | 117.36                              | 5.74                 | 5.26  |
| CV (%)                 | 47.6            | 124.3           | 56.6                 | 61.9                                | 18.8                 | 43.9  |

\*LSD: least significant difference among the 10 kinds of soils by ANOVA at *P*=0.01

## (2) 土壌の化学性が土壌中の有機物分解量に及ぼす影響のモデル検証（培養実験）

日本の7府県から採取した10種類の土壌の培養実験結果<sup>2)</sup>の概要は表4および以下に示すとおりである。すなわち、有機物の分解、鉄の還元およびCH<sub>4</sub>生成の量と速度とも数倍以上の極めて大きな違いがあった。また、全分解炭素量とCH<sub>4</sub>生成量、全炭素分解量と窒素無機化量との間には有意な相互関係があった ( $r^2 = 0.821$ 、 $r^2 = 0.969$ 、ともに  $P < 0.01$ )。また、16週間の嫌気培養の後の炭素分解量、CH<sub>4</sub>、およびFe<sup>2+</sup>の生成量を分子単位で計算したところ、CH<sub>4</sub>生成量と、炭素分解量からFe<sup>2+</sup>生成量を差し引いた値との間には下の下記の式によって表される有意な相互関係がみられた (図4、 $r^2 = 0.852$ 、 $P < 0.01$ )。

$$P_{\text{CH}_4} = 0.294 (C_{\text{edc}} - 1/4 F_{e_{\text{red}}}) \quad (\text{モル単位}) \quad (1)$$

ただし、 $P_{CH_4}$ は、 $CH_4$ 生成量、 $C_{edc}$ は分解し易い炭素の量、そして、 $Fe_{red}$ は被還元性鉄量である。

16週間の培養中に分解（無機化）された炭素量について、実測値とDNDCモデルによる予測値を比較した（図4）。

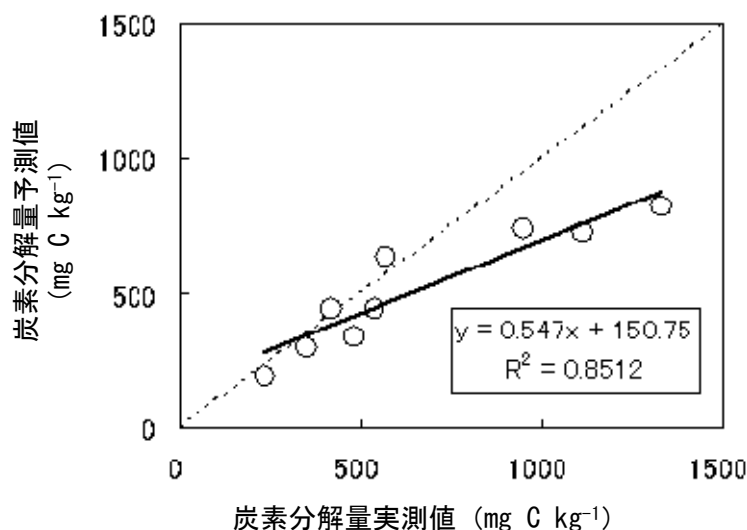


図4 16週間の土壌培養実験における炭素分解量の実測値とDNDCモデルによる予測値の比較。破線は1:1の関係を示す。

実測された炭素分解量は、雫石、長岡などの寒冷地、積雪地で高い傾向があり、非耕作期間の低温や高い土壌水分が易分解性有機物の蓄積を促進していることを示唆した。炭素分解量の予測値は実測値と高い相関があったが、炭素分解量が大きいうちに過小評価になった。これは、これらの土壌では特に培養初期段階の分解速度が高かったことによる（図5）。そこで、培養初期の分解速度は風乾処理の影響を受けていると考え、培養後半（57日目以降）の平均分解速度を求め、モデルによる予測値と比較した。その結果、予測された炭素分解速度は実測値の変動再現した（RMSE = 0.61 mg C kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>、図6）。

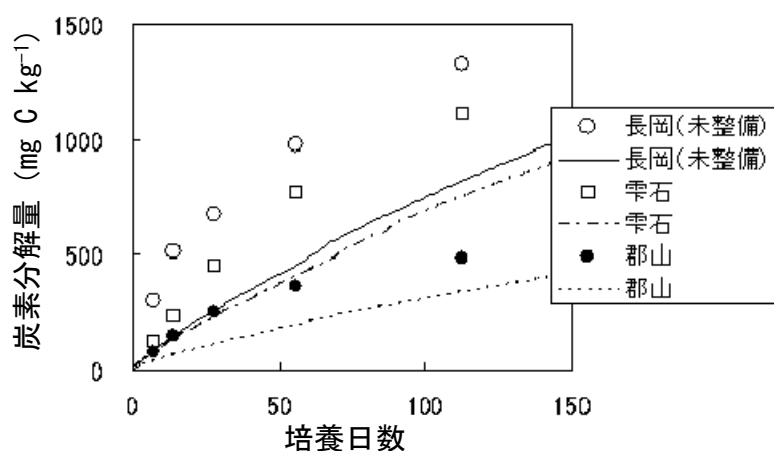


図5 土壌培養実験による炭素分解量（積算値）の例。図中のシンボルは実測値を示し、曲線はDNDCモデルによる予測値を示す。

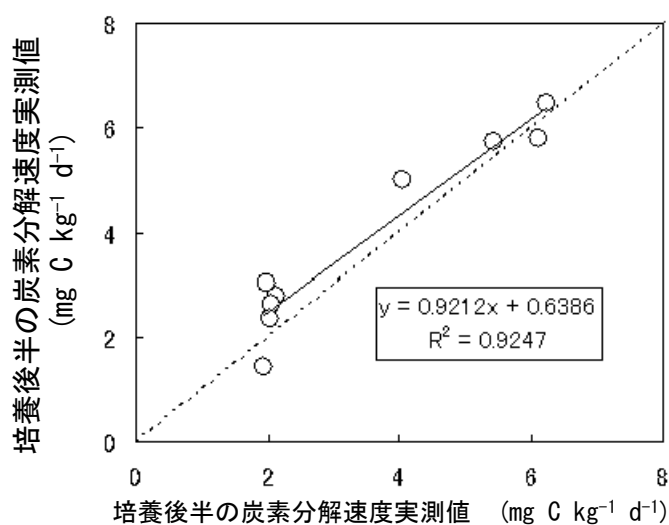


図6 土壤培養実験後半（57日目以降）の平均炭素分解速度の実測値とDNDCモデルによる予測値の比較。図中の破線は1:1の関係を示す。

これらの結果から、DNDCモデルにより、広範な地域から得られた物理、理化学性および栽培管理などが異なる水田土壌の炭素分解過程を予測できると考えられた。実際の水田からの $\text{CH}_4$ 発生には、主に植物体を通じた輸送過程が関連する。それらを含めた包括的なモデルの評価は、圃場レベルでの実験結果と照合することで行う。

(3)  $\text{CH}_4$ 発生量に関するイネ品種と $\text{CO}_2$ 濃度増加の相互作用

① $\text{CH}_4$ 発生に及ぼす高 $\text{CO}_2$ 濃度の影響における品種間差異（半閉鎖型環境制御チャンバー実験）

半閉鎖型環境制御チャンバーにて、砂丘未熟土を用いたポット栽培実験における生育期間を通じた $\text{CH}_4$ 発生量は、品種間で2倍以上に及ぶ顕著な違いが認められ、IR72、Dularなどのインディカ品種で大きく、JPで最も小さかった(図7)。また、これまでの報告と同様に、高 $\text{CO}_2$ 濃度は $\text{CH}_4$ 発生量を増加させたが、その増加率にも9-23%の有意な品種間差異が認められた。トータル $\text{CH}_4$ 発生量とイネ諸形質との相関解析を行ったところ、到穂日数や生育期間との間には有意な相関が認められなかったことから、トータル発生量の違いは主として日平均 $\text{CH}_4$ フラックスの違いによるものと考えられた(表5)。

日平均 $\text{CH}_4$ フラックスおよび最大 $\text{CH}_4$ フラックスは茎数、乾物重と有意な関係にあったが、特に乾物重との関係が密

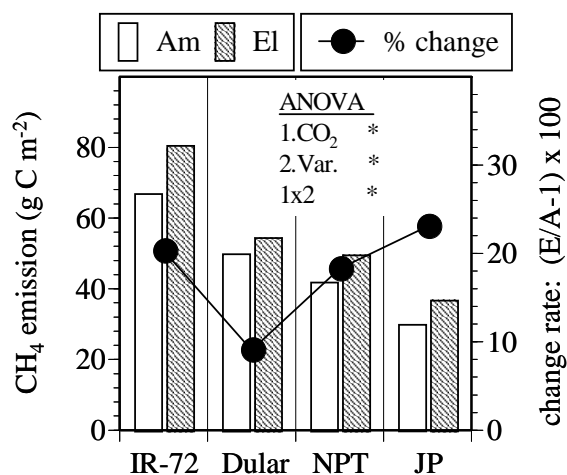


図7 半閉鎖型環境制御チャンバーにおける $\text{CH}_4$ 放出量および高 $\text{CO}_2$ 濃度による $\text{CH}_4$ 増加率の品種間差異. Am: 標準 $\text{CO}_2$ 濃度; El: 高 $\text{CO}_2$ 濃度; %change: 高 $\text{CO}_2$ 濃度の増加率. NPT, New Plant Type (IR65598); JP, コシヒカリ. \*,  $P < 0.05$ .

接であったことから、CH<sub>4</sub>フラックスの品種、CO<sub>2</sub>濃度間の違いは、イネの乾物重を強く反映したものと推察された。砂丘未熟土を用いた本実験では、収穫期乾物重が20%程度大きくなれば、日平均CH<sub>4</sub>フラックスは約45%増加した。この増加率は、(1)のメタ解析結果と極めて近い値であった(図8)。

表5 4品種2水準のCO<sub>2</sub>濃度実験から求めたCH<sub>4</sub>フラックスとイネ乾物重および茎数などの相関関係。

|         | トータル<br>CH <sub>4</sub><br>放出量 | 日平均<br>CH <sub>4</sub><br>フラックス | 最大CH <sub>4</sub><br>フラックス |
|---------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| 収穫期乾物重  | 0.78 *                         | 0.98 **                         | 0.96 **                    |
| 出穂期茎数   | 0.84 **                        | 0.80 *                          | 0.73 *                     |
| 最高茎数    | 0.80 *                         | 0.77 *                          | 0.69                       |
| 移植-出穂日数 | 0.26                           | -0.33                           | -0.53                      |
| 移植-収穫日数 | 0.42                           | -0.16                           | -0.40                      |

\* :  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ .

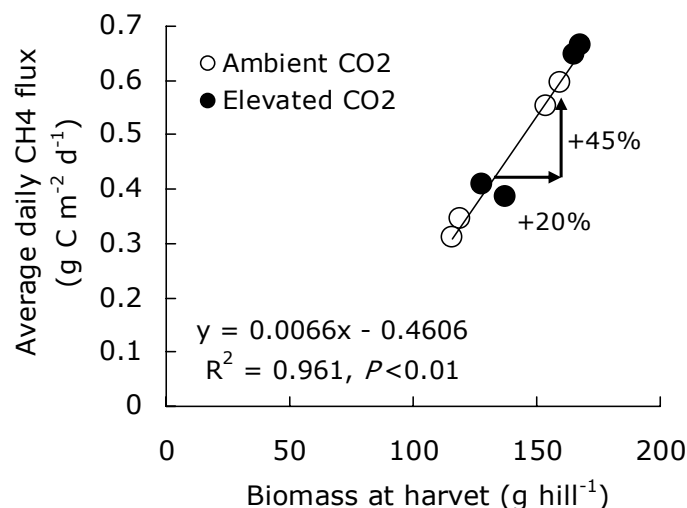


図8 4品種2水準のCO<sub>2</sub>濃度実験における収穫期乾物重と日平均CH<sub>4</sub>フラックス(トータルCH<sub>4</sub>放出/移植~収穫まで日数)。矢印と+数値は乾物重増加に伴うCH<sub>4</sub>フラックス増加率の一例。

表6 東北農業研究センターにおけるCO<sub>2</sub>濃度制御型温度勾配チャンバーにて実施した品種xCO<sub>2</sub>実験の出穂期における根数、分けつ数、根乾物重、地上部乾物重の品種間差

| 品種      | 出穂日   | 主根数<br>(1/pot) | 分けつ数<br>(1/pot) | 根重<br>(g/pot) | 地上部重<br>(g/pot) | 根重/根数<br>(x1000) | 地上部重<br>/分けつ数 | 根数<br>/分けつ<br>数 | 地上部重<br>/根重 |
|---------|-------|----------------|-----------------|---------------|-----------------|------------------|---------------|-----------------|-------------|
| かけはし    | 6月27日 | 527            | 41.1            | 2.4           | 18.0            | 4.6              | 0.4           | 12.8            | 7.5         |
| Dular   | 7月30日 | 695            | 24.6            | 11.6          | 88.9            | 16.7             | 3.6           | 28.2            | 7.7         |
| あきたこまち  | 8月1日  | 1115           | 35.1            | 7.6           | 83.9            | 6.8              | 2.4           | 31.7            | 11.1        |
| ひとめぼれ   | 8月5日  | 1270           | 42.0            | 8.4           | 100.1           | 6.6              | 2.4           | 30.2            | 11.9        |
| IR65598 | 8月7日  | 927            | 20.5            | 7.3           | 80.8            | 7.9              | 3.9           | 45.2            | 11.0        |
| コシヒカリ   | 8月15日 | 1217           | 41.1            | 13.2          | 120.8           | 10.9             | 2.9           | 29.6            | 9.1         |
| IR72    | 8月15日 | 1568           | 51.6            | 14.0          | 116.3           | 8.9              | 2.3           | 30.4            | 8.3         |
| 日本晴     | 8月23日 | 1899           | 41.3            | 13.6          | 113.7           | 7.1              | 2.8           | 46.0            | 8.4         |
| ユメヒカリ   | 8月30日 | 1514           | 39.0            | 16.2          | 123.4           | 10.7             | 3.2           | 38.8            | 7.6         |

出穂日は標準CO<sub>2</sub>区、標準窒素区の観測値。他の形質や、全CO<sub>2</sub>、窒素区の平均値。

## ②CH<sub>4</sub>発生量の品種間差をもたらすイネ形態特性の解析(CO<sub>2</sub>濃度制御型温度勾配チャンバー実験)

CO<sub>2</sub>濃度制御型温度勾配チャンバー実験におけるイネ9品種の出穂日における各品種の形質を表6に示す。かけはしは、通常年の出穂に比べて3~4週間早く、早期異常出穂と推定された。このため乾物重は他品種に比べて著しく小さくなった。正常に出穂した他の8品種について考察する。CH<sub>4</sub>発生に関わるイネの形質として、コンダクタンスを担う根数あるいは分けつ数、また土壌への

CH<sub>4</sub>基質供給能に関与する根乾物重あるいは地上部乾物重が重要と考える。これら4つの形質は早生品種に比べて晩生品種ほど大きいと予想されたが、出穂期が近い品種間でも大きな違いがあることが判明した。例えば、Dularは主根数が少なく根乾物重が比較的大きいため、両者の比は全品種の中で最大となった。また穂重型のIR65598は分けつ数が極めて少なく、穂数型のIR72は極めて多いなどの特長が認められる。インディカの3品種に限らず、ジャポニカ品種間にも大きな形質の差があった。

コシヒカリより早い品種はCH<sub>4</sub>フラックスをほとんど検出できなかった。灌水に用いた水道水による殺菌作用とみられるが、正確な原因は不明である。コシヒカリ以降の4品種については、通常レベルのフラックスを観測できたので、以下、これら4品種を対象とする。品種特性を抽出するため、CO<sub>2</sub>と窒素処理の全サンプル平均値について、CH<sub>4</sub>フラックスと形態的形質との相関を求めた。相関係数は、主根数：0.88、分けつ数：0.20、葉数：0.14、地上部乾物重：0.25、根乾物重：0.55となり、根数および根乾物重と高い相関が得られた。主根数と根乾物重の相関が低い(R=0.03)ので、両者を変数とする重回帰分析を行ったところ、

高い決定率(R<sup>2</sup>=0.99)を得た。図9は全処理平均値に対して求めた重回帰式を使って、各処理別にCH<sub>4</sub>フラックスを推定した結果である。CO<sub>2</sub>と窒素処理に伴う変動を十分には再現できていないが、品種間の差異を高い精度で再現できた。この重回帰式を用いて他インディカ品種のCH<sub>4</sub>発生量を推定したところ、IR72(根数、根重ともに大) > Dular(根数小、根重大) > IR65598(根数中、根重小)となり、(3)①の測定結果とよく一致した。以上から、根のバイオマス量とその形態がCH<sub>4</sub>発生量の品種間差をもたらす要因として示唆された。

#### (4) CO<sub>2</sub>濃度と夜温上昇が水田土壌からのCH<sub>4</sub>発生に及ぼす影響

本実験においては、高CO<sub>2</sub>・高夜温処理を、生殖成長期以降に実施したため、イネの最高分けつ数、有効分けつ数にCO<sub>2</sub>濃度と夜温処理による影響はみられなかった(図10)。草丈は、処理を節間伸長期に開始したため、高夜温によって増加したが、CO<sub>2</sub>濃度の効果は認められなかった(図10)。処理開始後の葉と根の乾物重増加は僅かで、処理区の間には有意差がなかったが、穂乾物重は高夜温処理によって有意に減少した。一方、高夜温処理は、茎乾物重を有意に増加させた(図11)。

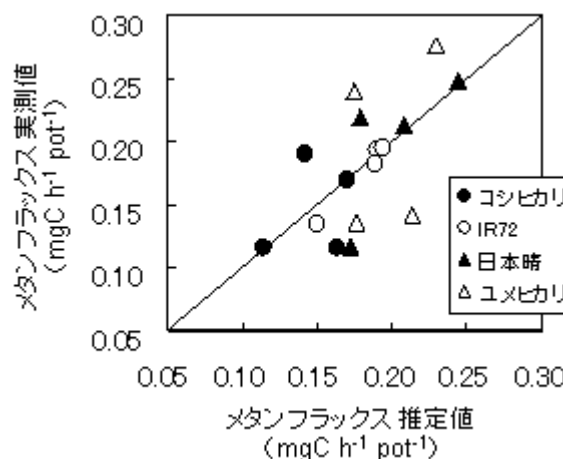


図 9. 重回帰式による CH<sub>4</sub> 放出量の推定値と実測値の比較

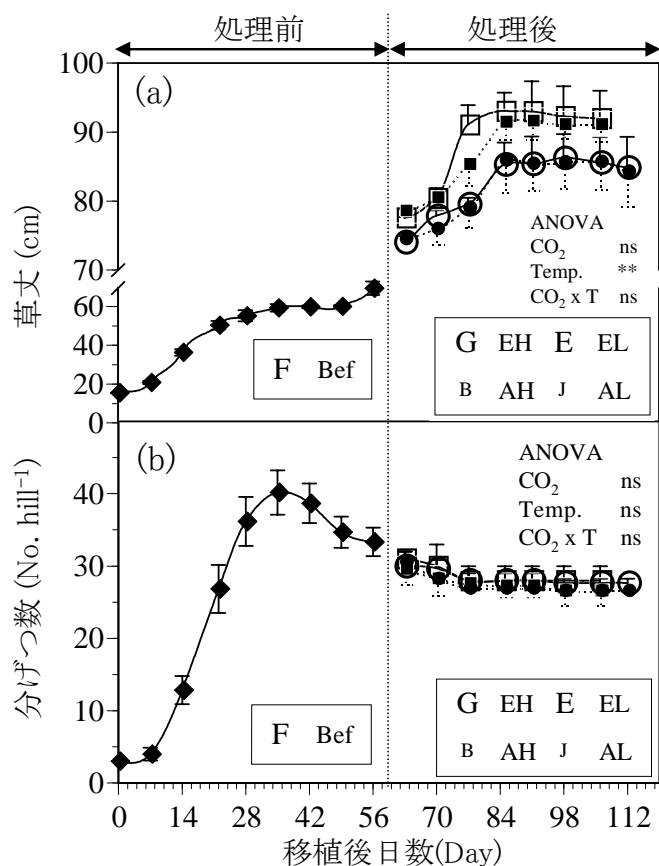


図10. 生育期間中の草丈と分けつ数の推移。棒は標準偏差 (n=3). Bef: 処理前; EH: 高CO<sub>2</sub>高夜温; AH: 標準CO<sub>2</sub>高夜温; EL: 高CO<sub>2</sub>低夜温; AL: 標準CO<sub>2</sub>低夜温. ANOVAによる統計結果では、ns: 無差異; \*: P<0.05; \*\*: P<0.01.

高CO<sub>2</sub>濃度・高夜温処理開始後のCH<sub>4</sub>フラックスは、出穂期頃まで増加した後に減少するという有意な季節変化を示した(図12)。高夜温は、いずれのCO<sub>2</sub>濃度条件においてもCH<sub>4</sub>発生量を大きく増加させた(平均で約50%)。高CO<sub>2</sub>濃度も、茎数への影響がない生育後半のみの処理であったが、CH<sub>4</sub>発生量を有意に増加させることがわかった。しかしながら、その増加率は温度条件で異なり、低夜温区で32%と高かったのに対し、高夜温区では4%と小さかった。すなわち、CO<sub>2</sub>濃度上昇による水田からのCH<sub>4</sub>発生の促進は、高夜温によって抑制されることが示唆された。また、昼のCH<sub>4</sub>フラックスと夜のCH<sub>4</sub>フラックスを同一の地温条件で比べると、昼のCH<sub>4</sub>フラックスは夜よりのそれより多く発生したこと(図13)、暗呼吸とCH<sub>4</sub>フラックスとの間に相関関係があったこと(図14)から、CO<sub>2</sub>濃度と夜温上昇が水田からのCH<sub>4</sub>発生に及ぼす影響は、主としてイネの光合成・乾物生産への影響を介したものと推察された。



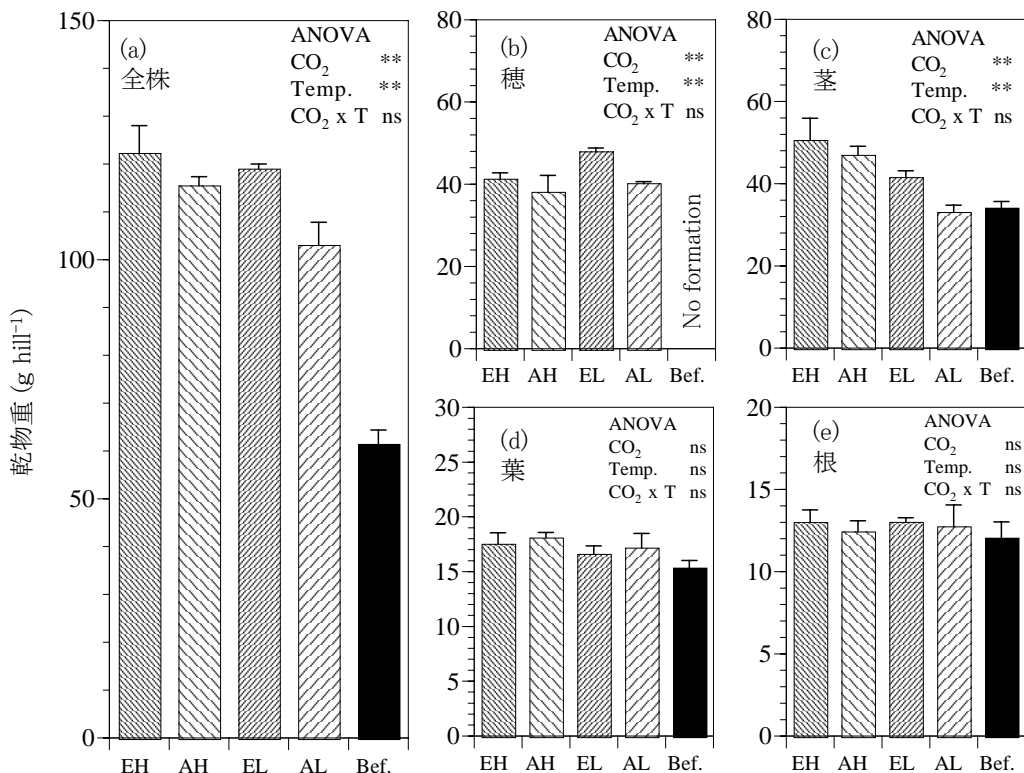


図 11. 処理前後の各器官および全株の乾物重差異。棒は標準偏差 (n=3). Bef: 処理前; EH: 高 CO<sub>2</sub> 高夜温; AH: 標準 CO<sub>2</sub> 高夜温; EL: 高 CO<sub>2</sub> 低夜温; AL: 標準 CO<sub>2</sub> 低夜温. ANOVA による統計結果では、ns: 無差異; \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ .

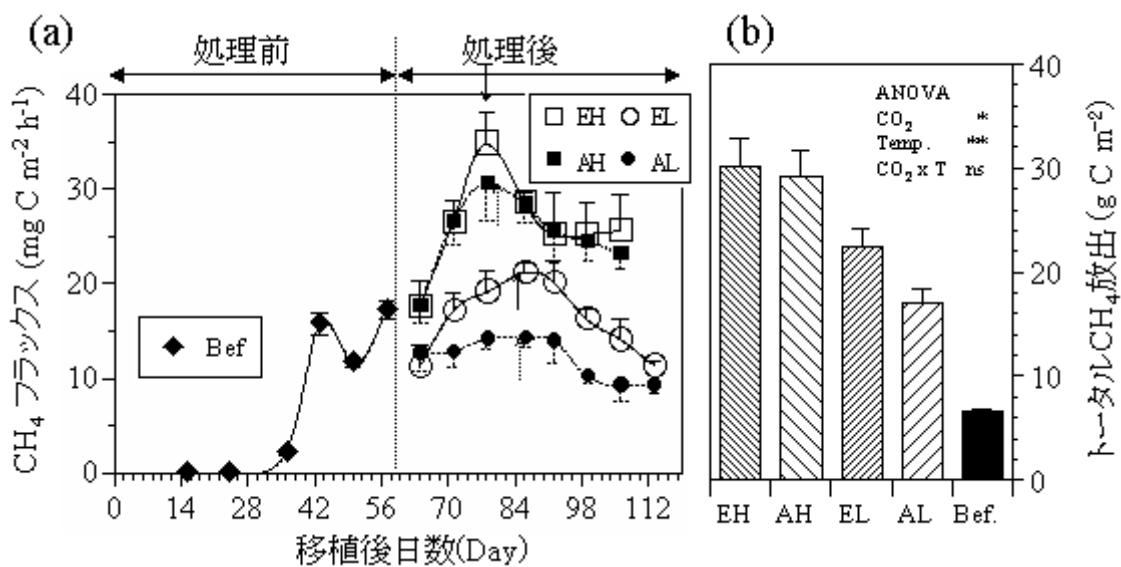


図 12 生育期間中における CH<sub>4</sub> フラックスの推移(a)およびトータル CH<sub>4</sub> 発生量。棒は標準偏差 (n=3). Bef、処理前; EH、高 CO<sub>2</sub> 高夜温; AH、標準 CO<sub>2</sub> 高夜温; EL、高 CO<sub>2</sub> 低夜温; AL、標準 CO<sub>2</sub> 低夜温。

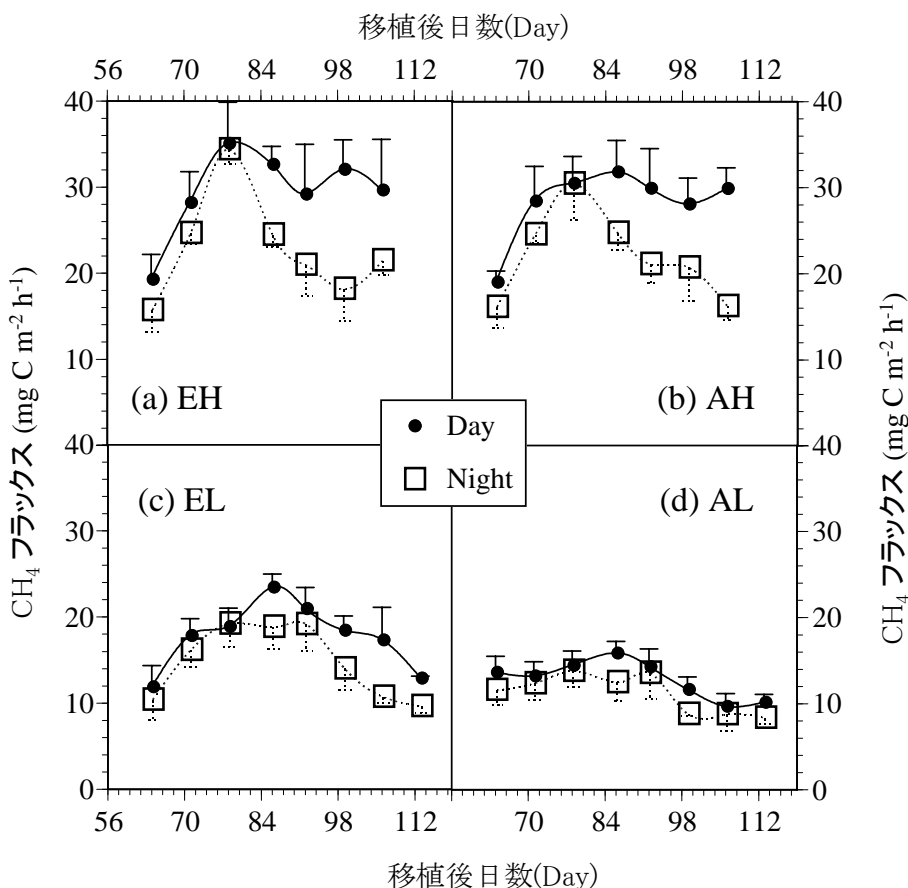


図 13. 各処理区における昼間と夜間の CH<sub>4</sub> フラックスの推移。 縦棒は標準偏差 (n=3). Bef、処理前； EH、高 CO<sub>2</sub> 高夜温； AH、標準 CO<sub>2</sub> 高夜温； EL、高 CO<sub>2</sub> 低夜温； AL、標準 CO<sub>2</sub> 低夜温。

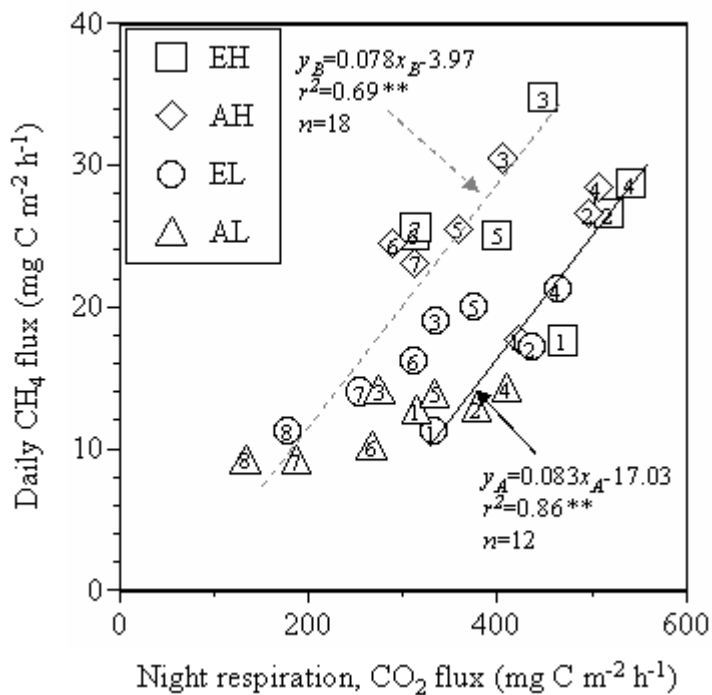


図 14. 夜間の呼吸速度と CH<sub>4</sub> フラックスの関係。シンボル内の数値は処理開後週数。両者の関係は、a、b の 2 グループに分けられる。a は 1、2、4 目週後の測定値、b は 3、5、6、7、8 週の測定値。Y<sub>a</sub>、Y<sub>b</sub> はそれぞれ、a グループ、b グループの回帰直線。処理区は外気 CO<sub>2</sub> 濃度区 (A)、高 CO<sub>2</sub> 濃度区 (E)、低夜温区 (L)、高夜温区 (H) の組み合わせ。

(5) イネから土壌への炭素分配に及ぼすCO<sub>2</sub>濃度の影響

C<sub>4</sub>植物であるサトウキビ畑の土壌をイネのポット栽培に供試し、半閉鎖型環境制御チャンバーを用いて、高CO<sub>2</sub>がイネから土壌への炭素供給に及ぼす影響を2年間調査した。2007年に供試したIR72については、CO<sub>2</sub>濃度処理は穂数と草丈ともに有意な影響を与えなかったが、2008年に供試したコシヒカリの穂数は、高CO<sub>2</sub>濃度により有意的に増加した。また、高CO<sub>2</sub>濃度区の地上部炭素同化量は、対照区に比べて2007年で12% ( $P < 0.1$ )、2008年で29% ( $P < 0.01$ ) 大きかった (図15)。

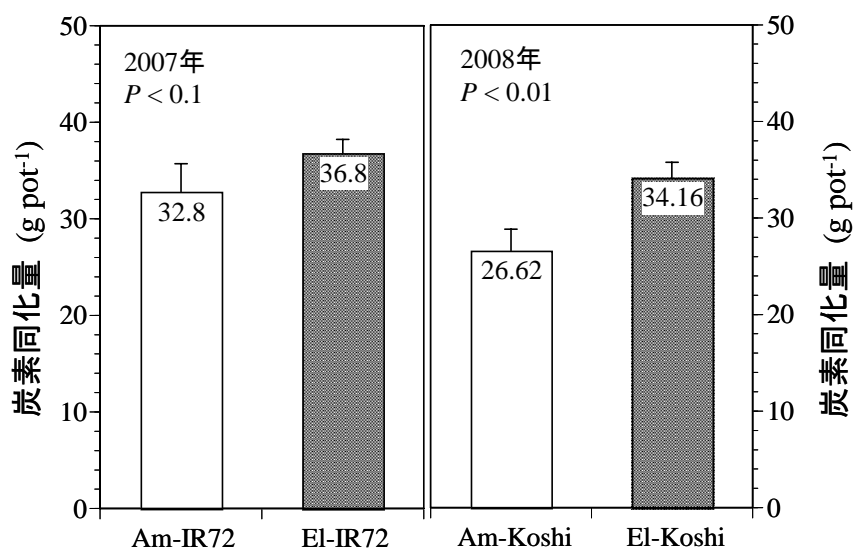


図15 半閉鎖型環境制御チャンバーにおけるイネ地上部炭素同化量。

表7. 2年間大気CO<sub>2</sub>濃度増加のイネ栽培実験における植物体と土壌の $\delta^{13}\text{C}$ 値およびそれらから推定した土壌炭素中に占める植物由来の炭素の割合。

| CO <sub>2</sub> 濃度 | $\delta^{13}\text{C}$ 値(‰)     |       |       | 土壌炭素に占めるイネ由来炭素の割合(%) |      |      | イネ由来の炭素量<br>g C m <sup>-2</sup> | CO <sub>2</sub> 濃度<br>上昇効果<br>(%) |     |
|--------------------|--------------------------------|-------|-------|----------------------|------|------|---------------------------------|-----------------------------------|-----|
|                    | 植物体                            | 土壌    |       | 上層                   | 下層   | 全体   |                                 |                                   |     |
|                    |                                | 上層    | 下層    |                      |      |      |                                 |                                   |     |
| 1年目                | 高CO <sub>2</sub> 区<br>(680ppm) | -36.6 | -17.9 | -16.4                | 10.5 | 3.3  | 5.7                             | 47                                | 6.1 |
|                    | 標準区<br>(380ppm)                | -32.3 | -17.4 | -16.1                | 10.3 | 2.9  | 5.4                             | 45                                | ns  |
| 2年目                | 高CO <sub>2</sub> 区<br>(680ppm) | -34.3 | -19.8 | -18.5                | 17.1 | 10.1 | 12.4                            | 103                               | 1.3 |
|                    | 標準区<br>(380ppm)                | -30.0 | -19.8 | -18.2                | 15.2 | 10.8 | 12.2                            | 101                               | ns  |

上層は0~5cm, 下層は5~15cm. 無植栽土壌の初年度と2年目の $\delta^{13}\text{C}$ 値はそれぞれ-15.7、-16.6‰であった。供試品種は初年度にIR72、2年度にコシヒカリであった。

植物起源の割合 = (収穫期土壌 $\delta^{13}\text{C}$  - 対照土壌 $\delta^{13}\text{C}$ ) / (植物体 $\delta^{13}\text{C}$  - 対照土壌 $\delta^{13}\text{C}$ )。

収穫後の土壌中の炭素含有量は、2 ヶ年とも外気 CO<sub>2</sub> 無植栽区(対照区)よりも有意に多かった。また、イネ生育期間中の土壌中の溶存 CO<sub>2</sub> と CH<sub>4</sub> 濃度も、イネ植栽区は無植栽区に比べて著しく高かった。栽培 2 年目の 2008 年には、イネ移植直後から無植栽区との違いが顕著であった。これは前年度土壌中に残したイネ根の分解から生成されたと考えられる。このように、イネ植栽に伴う土壌炭素の増加は顕著であった。

収穫時の  $\delta^{13}\text{C}$  値は、いずれの処理、年次も植物体<上層土壌<下層土壌の順で、高 CO<sub>2</sub> 処理は対照区に比べて、1 年目は 2 年目に比べて小さかった(表 7)。無植栽ポットとの比較から土壌炭素中に占める植物由来の炭素の割合を試算したところ、植物体由来の炭素は 1 期につき約 50g m<sup>-2</sup> ずつ蓄積したものと推定された。高 CO<sub>2</sub> 濃度処理は植物体のバイオマスを有意に増加させたが、土壌への炭素蓄積への影響は 2 期ともに検出できなかった。

## (6) 開放系大気CO<sub>2</sub>増加 (Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment: FACE) ・温暖化実験

### ① FACEと加温がCH<sub>4</sub>発生量に与えた影響

メタンフラックスは年次に依らず基本的には同様の発生パターンと発生強度を示した。すなわち、移植開始から幼穂形成期にかけて徐々に増加し、70日目前後の出穂期から穂揃い期にかけてピークに達し、その後減少する季節変動を示した(図16)。このフラックスの季節変動パターンに処理による違いは見受けられなかった。一方でフラックスの絶対値および積算CH<sub>4</sub>発生量は処理により大きく異なった。

FACEによるCH<sub>4</sub>フラックスの促進効果は、両年ともいずれの測定日においても、また生育期間中の積算フラックスとしても有意ではなかった(図16、表8)。FACE効果が見られなかった要因の一つとして、FACE区の土壌はもともと被還元性鉄量がAmb区より多くメタン生成が抑制される、という実験上の問題が考えられた。この問題を克服するため鉄還元量を共変量とする共分散分析を実施したところ、FACE効果は対照温度区で+22%、加温区で+29%程度と見積もられた(表9)。また依然として有意ではないもののFACE効果の有意水準は大きく上昇した( $P=0.66 \rightarrow P=0.14$ )(表9)。ただしこのFACEによる促進効果はメタ解析の平均値(+FACEの場合55%、表2)に比べて小さかった。これまでにも、水田からのCH<sub>4</sub>発生に及ぼすFACE効果は、年次などによって大きく変動することが知られている<sup>7, 15)</sup>。今回明らかになったように、鉄などCH<sub>4</sub>生成と競合する電子受容体のばらつきが見かけのFACE効果を大きく変動させている可能性がある。今後、こういった要素を念頭に置いて過去のFACEデータを再解析し、FACE効果が大きな変動性を示す要因を明らかにする必要がある。

一方、加温処理は両年ともCH<sub>4</sub>フラックスを大きく増加させた(図16、表8)。2007年度において加温区の地温は、対照区に比べて1.5から2℃、チャンバー内気温は最大で0.5℃ほど高く(図17)、この温度上昇に伴うCH<sub>4</sub>フラックスの増加は約50%で(図17)、Q<sub>10</sub>値(10℃の昇温に伴う反応速度の倍率)に換算すると7程度となった。2008年度のデータも同じ程度の加温効果を示した(表9)。2カ年まとめて解析したところ、生育期間を通じた積算フラックスは、加温によりFACE区で48%、Amb区で40%増加した(表9)。またFACEと加温の交互作用は認められなかった。

以上の結果より、今後確実視されている大気CO<sub>2</sub>濃度の上昇と地球温暖化の進行は、ともに水田からのCH<sub>4</sub>発生量を増加させること、特に+2℃の温度上昇によってCH<sub>4</sub>発生量はおおよそ40-50%も増加する可能性があることが示された。

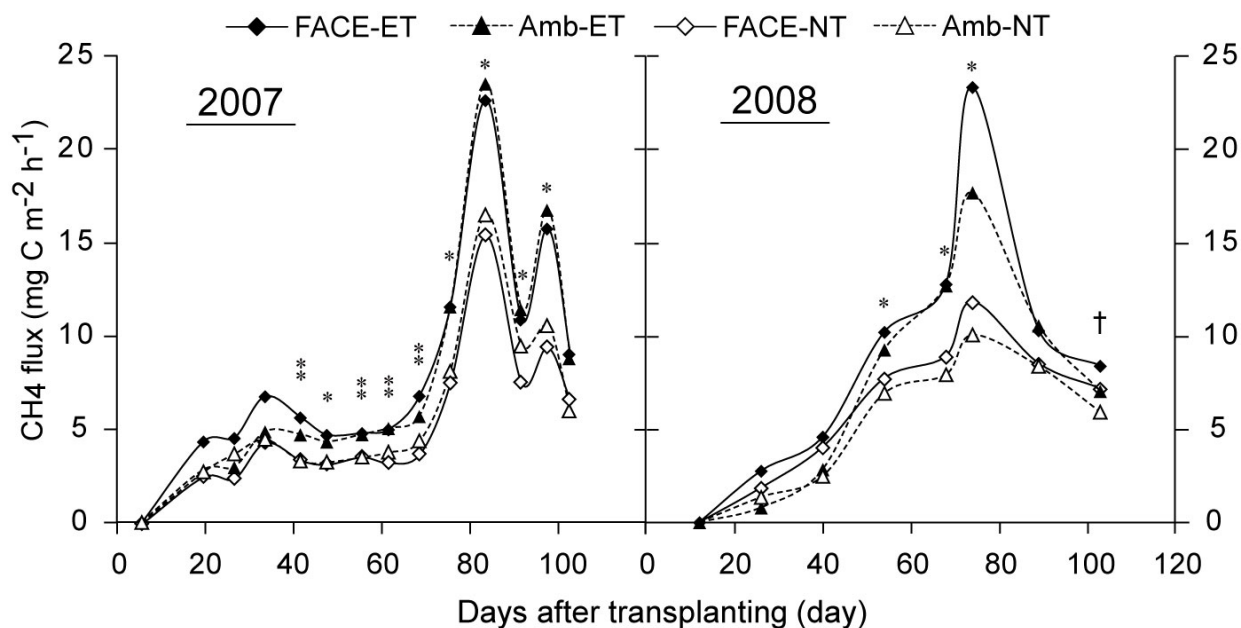


図16 メタンフラックスの移植日からの推移。FACE-ET: 高CO<sub>2</sub> (+200ppm) & 加温 (+2°C), FACE-NT: 高CO<sub>2</sub> & 対照温度, Amb-ET: 外気CO<sub>2</sub> & 加温, Amb-NT: 外気CO<sub>2</sub> & 対照温度。図中のシンボルはすべて加温による有意差を以下の水準で示す: †,  $P < 0.1$ ; \*,  $P < 0.05$ ; \*\*,  $P < 0.01$ 。FACE効果およびFACEと加温の交互作用は見られなかった。

表8 FACEおよび加温処理区における積算CH<sub>4</sub>発生量 (単位: gC m<sup>-2</sup>)。

|      | 2007年 |      |         | 2008年 |      |         |
|------|-------|------|---------|-------|------|---------|
|      | Amb   | FACE | FACE 効果 | Amb   | FACE | FACE 効果 |
| NT   | 13.1  | 12.1 | -7%     | 11.7  | 13.5 | +15%    |
| ET   | 17.4  | 18.4 | +6%     | 16.5  | 19.5 | +18%    |
| 加温効果 | +33%  | +52% |         | +41%  | +45% |         |

Amb: 外気CO<sub>2</sub>、FACE: 高CO<sub>2</sub> (+200ppm)、NT: 対照温度、ET: 加温 (+2°C)。FACE効果、交互作用は両年とも有意差無し。加温効果は両年とも5%水準で有意。

表9 FACEおよび加温処理区における積算CH<sub>4</sub>発生量 (単位: gC m<sup>-2</sup> season<sup>-1</sup>)。2カ年まとめ、鉄還元量を共変量 ( $P = 0.14$ ) として圃場間のばらつきを調整した値。

|                            | 外気 CO <sub>2</sub> 区 (Amb) | 高 CO <sub>2</sub> 区 (FACE) | FACE 効果: FACE/Amb ( $P = 0.19$ ) |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| 対照温度区 (NT)                 | 11.3                       | 13.8                       | +22%                             |
| 加温区 (ET)                   | 15.8                       | 20.4                       | +29%                             |
| 加温効果: ET/NT<br>$P < 0.001$ | +40%                       | +48%                       | 相互作用: 有意差無し                      |

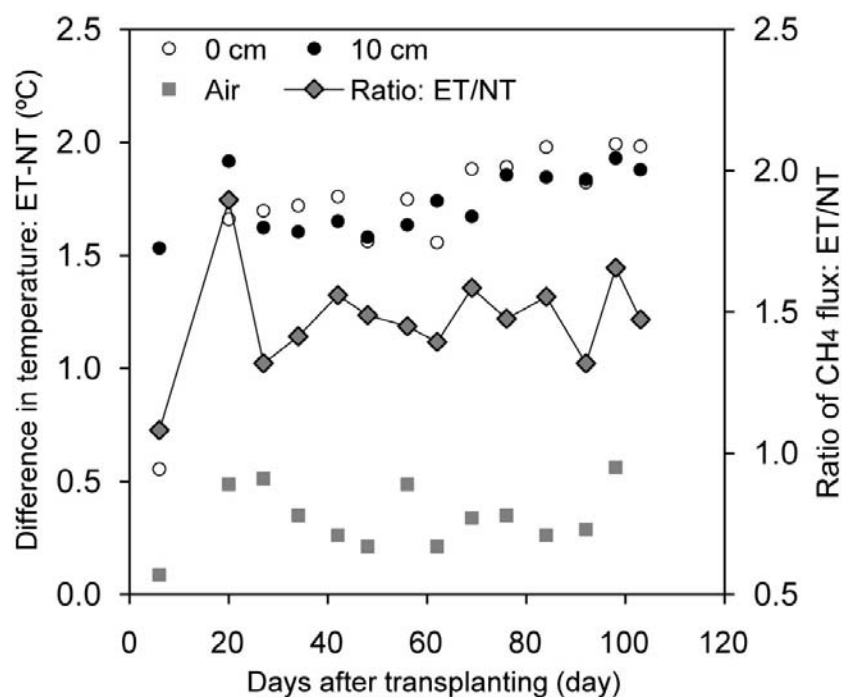


図17 加温区 (ET) と対照温度区 (NT) における地温 (0, 10cm) とチャンバー内気温 (Air) の差、およびCH<sub>4</sub>フラックスの比 (Ratio:ET/NT) (2007年度の結果)。x軸は移植後日数。フラックス測定を行った際のデータのみ表示。加温区と対照温度区のデータはFACE, Ambの平均値を用いて計算。

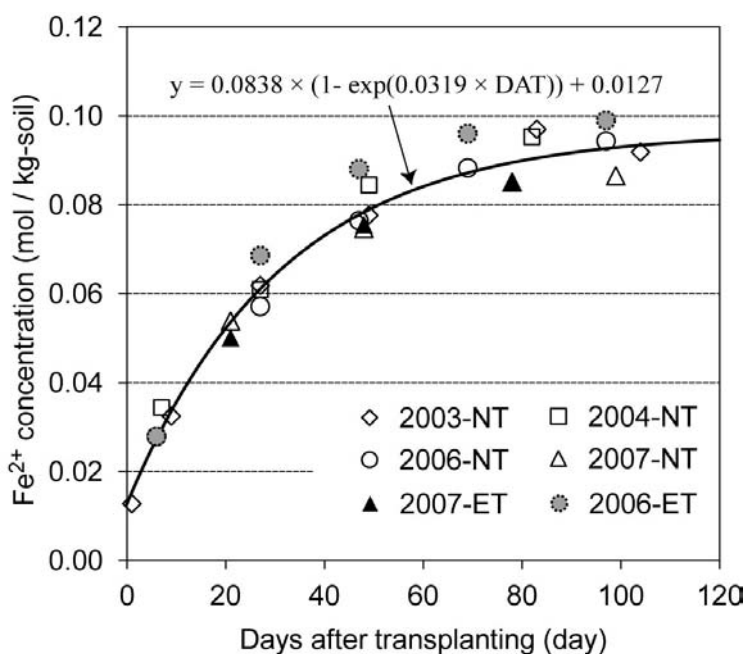


図18 異なる栽培年と温度処理 (NT:対照温度区、処理無し; ET:加温区、対象区+2°C) における土壌Fe<sup>2+</sup>濃度(y軸)と移植後日数(x軸)の関係。実線は対照温度区のデータを、温度依存性を考慮しない一次反応式モデルによる予測。

## ② 加温が土壤有機物分解と鉄の還元速度に与えた影響

土壤有機物分解の温度依存性は、 $Q_{10}$ に換算すると2.0-2.5程度であり、生化学的な温度依存性として妥当な値であった。また、鉄の還元は、加温区と対照温度区の間にも差はみられず(図18)、温度条件が異なる年次間の比較においても明瞭な違いは認められなかった。このことは、通常の温度でも鉄の還元に必要な電子は十分供給されており、 $Fe^{3+}$ の還元は温度以外の要因が律速していることを示唆する。

## ③ 電子供与体の生成・消費の化学量論的解析と $CH_4$ 生成に対する大きな加温効果の説明

以上の結果を基に、2007年度の加温実験を土壤中の電子供与体の生成・消費の観点から解析したのが図19である。対照温度区・加温区ともに、移植後6日目を除き、移植後69日目までは土壤有機物の分解による電子供与体の供給と、鉄還元と $CH_4$ 生成を併せた電子供与体の消費はよくバランスした。したがって、この時期には土壤有機物の分解が主要な電子供与体の生成プロセスであったと考えられた。

鉄が電子受容体として大きな割合を占めた段階では、 $CH_4$ 生成の大きな温度依存性は以下のように説明される。鉄還元温度依存性は認められなかったため(図18)、 $+2^{\circ}C$ の加温によって増加した電子供与体は、すべて $CH_4$ 生成に使われたと考えられる。一方、対照温度区で生成された電子供与体の多くは、鉄還元によって消費される。これらの複合的効果により、電子供与体の総量はさほど増えなくても、加温区での $CH_4$ 生成量は対照温度区と比べて大きく増加する。すなわち、1. 電子供与体の生成が $Q_{10}=2.5$ 程度の温度依存性を持つこと、2. 鉄が主要な電子受容体であること、3. 鉄還元速度の温度依存性が非常に小さいこと、の相乗的な効果によって、 $Q_{10}$ が7にも及ぶ $CH_4$ 生成の大きな温度依存性が生じたと考えられる。

一方、 $CH_4$ 生成が主要な電子受容体となった移植後76日目以降は、土壤有機物の分解だけでは $CH_4$ の生成に見合うだけの電子の供給ができないと推定された(図19)。したがってこの時期は、加温によって生育しているイネの枯死根や根からの滲出物が増加し、それらが $CH_4$ 生成の基質として使われたことが示唆された。イネ体バイオマスの調査結果によると、移植後75日目(出穂・開花期)から104日目(登熟中期)にかけて、根の乾物重は対照温度区と比べて加温区でより減少していた。加温によって促進された根の減少(FACE区で $15.0g m^{-2}$ 、Amb区で $10.6g m^{-2}$ )は加温による $CH_4$ 生成の増加量(FACE区で $2.7g C m^{-2}$ 、Amb区で $4.2g C m^{-2}$ )を説明しうるほど大きかった。2008年度も幼穂形成期までは、加温区の根量は対照温度区よりも大きかったが( $P < 0.1$ )、出穂以降は加温区で根量が減少していた(出穂期( $P < 0.1$ )、登熟中期( $P < 0.05$ ))。すなわち出穂期以降の大きな加温効果は、加温が根の枯死を早め、それが $CH_4$ の基質として供給されたことが原因の一つと推定された。

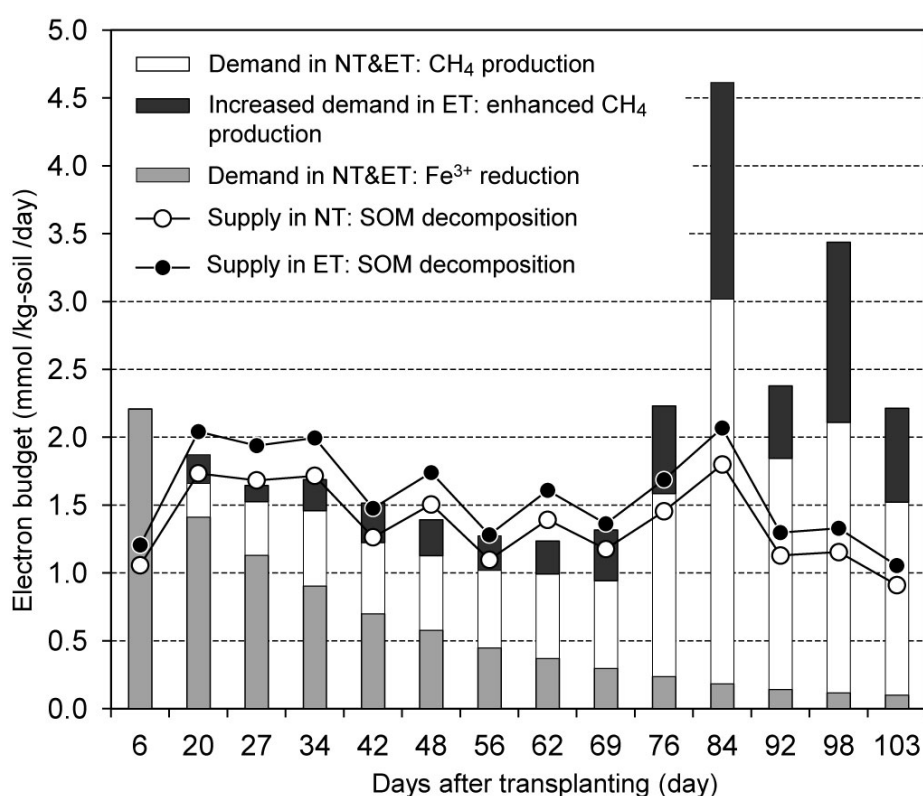


図19 有機物分解による電子供与体の供給 (○: NT, 対照温度区, ●: ET, 加温区) と、CH<sub>4</sub>生成および鉄還元に伴う電子供与体の消費。鉄の還元は温度依存性が認められなかったため、対照温度区と加温区で差はないものとした。CH<sub>4</sub>の生成に伴う電子供与体の消費は対照温度区 (白抜き部分) と加温によって増加した部分 (黒塗り部分) とに分けて示す。

表10 FACEによる水稻の地上部乾物重の増加率の観測値と予測値 (パラメータ校正後) の比較

| 雫石*            |    |    | 無錫             |         |    |    |
|----------------|----|----|----------------|---------|----|----|
| 登熟期の乾物重増加率 (%) |    |    | 登熟期の乾物重増加率 (%) |         |    |    |
| 年              | 観測 | 予測 | 年              | 処理      | 観測 | 予測 |
| 1998           | 11 | 18 | 2001           | 250N-HR | 8  | 17 |
| 1999           | 15 | 15 |                | 150N-HR | 22 | 20 |
| 2000           | 8  | 13 | 2002           | 250N-MR | 16 | 14 |
| 2003           | 16 | 11 |                | 150N-MR | 17 | 17 |
| 2004           | 5  | 11 | 2003           | 250N-MR | 12 | 15 |
| 2007           | 24 | 12 |                | 150N-MR | 22 | 16 |
| 2008           | 15 | 10 |                |         |    |    |
| 平均             | 13 | 13 |                |         | 16 | 16 |

\*加温区を除く。

#### (7) 温暖化・FACE 実験による DNDC モデルの検証

観測では、FACE処理によって登熟期の地上部乾物重が雫石で平均13%、無錫で平均16%増加し、



高CO<sub>2</sub>に対する水稻の応答に品種あるいは栽培条件による違いが現れた(表10)。この結果にしたがって、DNDC-Riceモデルのパラメータβを零石で0.20、無錫では0.33に校正した。ただし、年次や施肥処理毎に観察された乾物重増加率は、零石で5-24%、無錫で8-22%の範囲で変動した。これに対し、モデルによる予測では増加率の変動が小さく、零石と無錫でそれぞれ10-18%、15-20%の範囲にあった。

図20および21に、零石および無錫の水稻1作期間のCH<sub>4</sub>発生量について観測値と予測値の比較を示す。零石で観測されたCH<sub>4</sub>発生量は、年次とFACEあるいは加温処理によって58-222 kg C ha<sup>-1</sup>の範囲で変動した。また、無錫で観測されたCH<sub>4</sub>発生量は、年次とFACE処理および麦わらと窒素肥料の投入量によって46-401 kg C ha<sup>-1</sup>の範囲で変動した。DNDC-Riceモデルによる予測は観測値の傾向と概ね一致しており、予測値の平均二乗平方根誤差(RMSE)は零石で49 kg C ha<sup>-1</sup>、無錫で68 kg C ha<sup>-1</sup>だった。

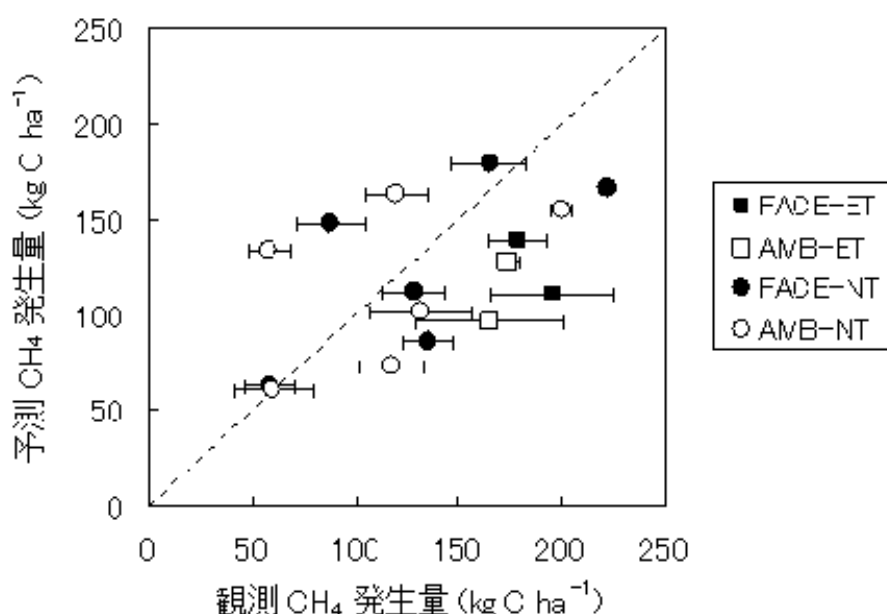


図20 零石FACE実験での水稻1作期中のメタン発生量の観測値とDNDC-Riceモデルによる予測値の比較。NT:常温区、ET:加温区。図中の横棒は観測値の標準誤差を示す。

FACE処理によるCH<sub>4</sub>発生量の増加率は、観測では年次や残渣投入量などによって大きく変動したが、平均では零石で18%、無錫で63%だった(図22)。これに対して、DNDC-Riceモデルで予測される増加率は観測値より低い傾向があり、平均では零石で10%、無錫で16%だった。この理由として、高CO<sub>2</sub>による水稻根の増加を過小評価していることが考えられた。すなわち、零石における観測では、幼穂形成期から登熟期まで根の乾物重はFACE処理によって20%以上増加した(表11)。無錫では、FACE処理によって水稻根の乾物重が生育期間を通して36-67%増加した<sup>13)</sup>。これに対して、DNDC-Riceで予測される根の乾物重増加率は零石で16%程度、無錫でも30%未満だった。水稻根は可溶性有機物の分泌や枯死によってCH<sub>4</sub>生成の基質を供給すると考えられ、DNDC-Riceもその過程をモデル化している。一方、DNDC-Riceでは水稻の光合成に対するCO<sub>2</sub>濃度の影響を比較的簡単なβファクターモデルで表現しており、生育ステージや器官による変化を考慮していない。そのために、高CO<sub>2</sub>環境での水稻根の増加を過小評価し、それがCH<sub>4</sub>発生量の予測に影響したと考

えられる。

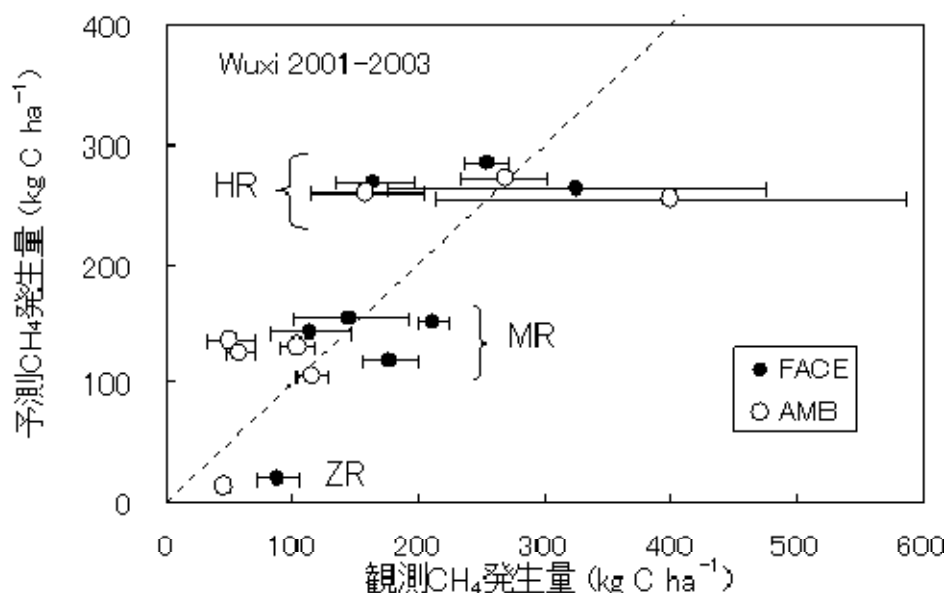


図21 無錫FACE実験での水稲1作期中のメタン発生量の観測値とDNDC-Riceモデルによる予測値の比較。図中の横棒は観測値の標準誤差を示す。

零石での2007年と2008年の観測では、加温処理とFACE処理はCH<sub>4</sub>発生量に対して相加的に作用し、加温処理によるCH<sub>4</sub>発生量増加率は33-41%、加温・FACE処理による増加率は37-67%となった。これに対して、DNDC-Riceモデルは加温の効果を過小評価する傾向があり、加温・FACE処理によるCH<sub>4</sub>発生量増加率を38-52%と予測した(図23)。DNDC-Riceは加温による水稲の乾物重増加を予測できなかったことから、これがCH<sub>4</sub>発生量増加率を過小評価した原因の一つと考えられる。

以上のように、現状のモデルは、施肥、有機物管理の違いによるCH<sub>4</sub>発生量の変動は概ね再現できたが、高CO<sub>2</sub>濃度と温暖化によるCH<sub>4</sub>発生の促進は過小評価した。その要因としては、温度、CO<sub>2</sub>に対する植物応答、とりわけ炭素の地上部から地下部への流れが十分にモデルで再現されていないことが挙げられる。

本研究で明らかになった観測と予測のギャップは、温暖化・CO<sub>2</sub>増加による水田からの気候システムへのフィードバック効果が、過小評価される可能性を示している。さらに、温暖化・CO<sub>2</sub>増加は50~100年の長期間にわたり進行する現象としてみられている。そのため、今回実験的に認められた短期的な影響が、長期間にわたり持続的に認められるかについての検討も必要である。本研究で十分に取り上げられなかった非耕作期間における温度、土壌水分、有機物分解は、いずれも土壌中の炭素蓄積および作付け期間中のCH<sub>4</sub>発生に甚大な影響を及ぼすことから、温暖化の長期的な影響評価には、包括的なモニタリングとモデリングが必要である。

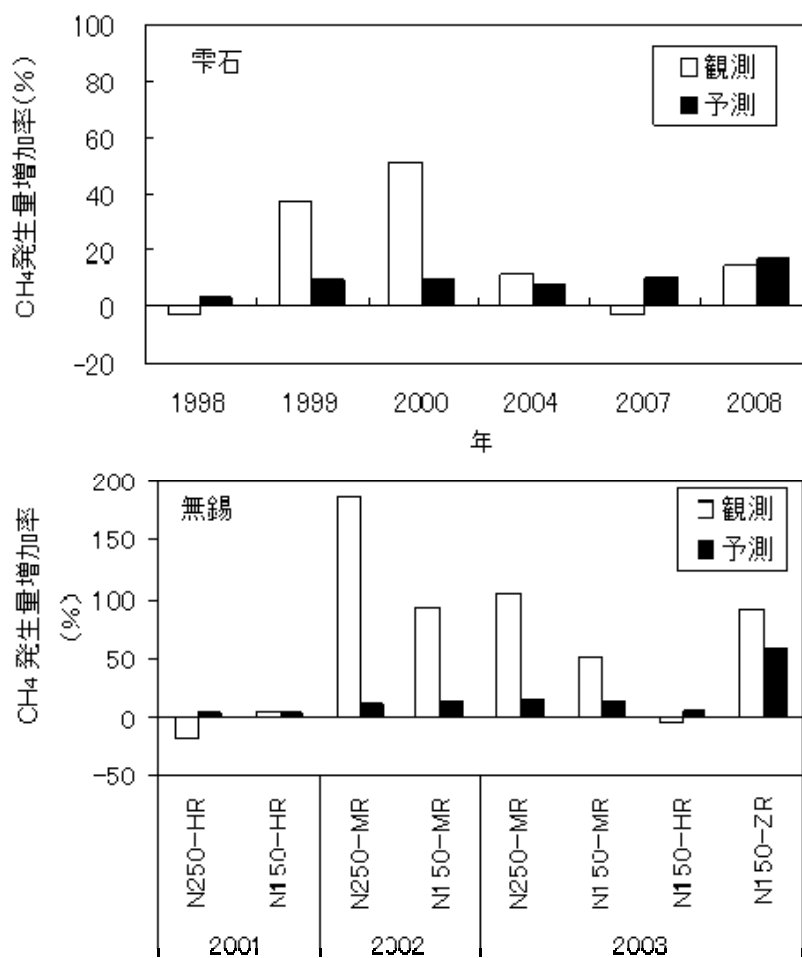


図22 FACE処理によるメタン発生量増加率の観測値と予測値の比較（雫石の加温処理区は除く）。

表11 雫石の各成育ステージにおけるバイオマスのFACEによる平均増加率の観測値と予測値

| ステージ  | 根重増加率 (%) |    | 地上部重増加率 (%) |    |
|-------|-----------|----|-------------|----|
|       | 観測        | 予測 | 観測          | 予測 |
| 幼穂形成期 | 22        | 16 | 31          | 14 |
| 出穂期   | 21        | 15 | 18          | 11 |
| 登熟期   | 25        | 15 | 13          | 13 |

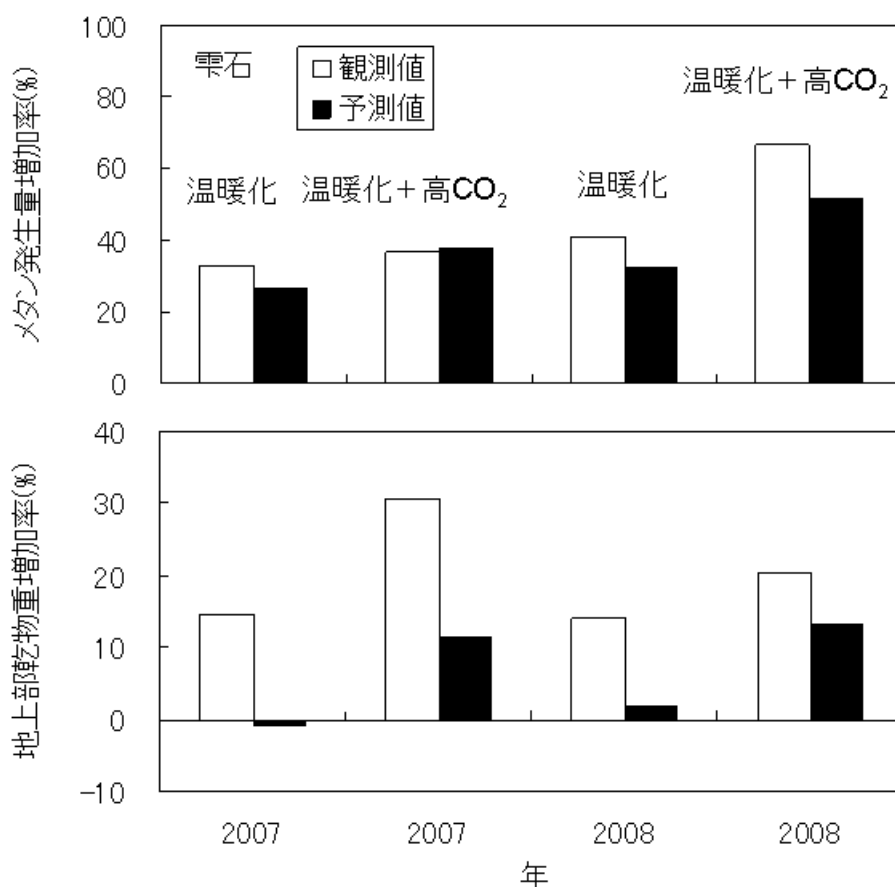


図 23 稗石での加温（温暖化）処理によるメタン発生量および地上部乾物重の増加率の観測値と予測値の比較。

## 5. 本研究により得られた成果

- (1) 水田土壌からのCH<sub>4</sub>放出に及ぼす高CO<sub>2</sub>環境の影響に関する既往の成果をメタ解析したところ、高CO<sub>2</sub>処理（200～300ppm濃度上昇区）による水田土壌からのCH<sub>4</sub>放出の促進率は、全21データセットを平均すると51%（95%信頼区間、45～57%）であった。個々の実験結果には大きな変動があったものの、ここで得られた値は、各地の高CO<sub>2</sub>濃度処理響を統計的手法で客観的に要約した値であり、高CO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>発生フィードバック要因を取り入れるための簡便な指標として有効と考えられる。
- (2) CH<sub>4</sub>放出速度とその高CO<sub>2</sub>濃度に対する応答が品種によって異なるかを、チャンバー実験で調査したところ、生育期間の積算CH<sub>4</sub>放出量は、品種間で2倍以上に及ぶ顕著な品種間差異が認められること、IR72, Dularなどのインディカ品種で大きく、コシヒカリで小さいこと、高CO<sub>2</sub>濃度によるCH<sub>4</sub>放出の増加率にも9-23%の有意な品種間差異が認められること、品種特性としては根重、根数の大きさがCH<sub>4</sub>放出と密接に関わっていることが示唆された。これらはいずれも、CH<sub>4</sub>放出予測モデルにおける品種特性の導入のために重要な知見である。
- (3) 半閉鎖型環境制御チャンバーを用いて、夜温とCO<sub>2</sub>濃度の組み合わせがCH<sub>4</sub>発生に及ぼす影響を調査した。その結果、昼夜温を32℃で一定にした区では、昼温32℃夜温22℃に設定した

区よりもCH<sub>4</sub>発生の高CO<sub>2</sub>による促進率が低い傾向にあった(図2)。また、終日一定温度とした高夜温区においても、CH<sub>4</sub>発生速度に日変化が認められたことなどから、CH<sub>4</sub>発生の時間変動を説明するためには、光合成などの植物生理による影響を無視できないことがわかった。

- (4) 雫石で世界に先駆けて実施した開放系水田における大気CO<sub>2</sub>増加・水温上昇実験では、CH<sub>4</sub>放出の促進が開放系水田条件で明らかになった。特にCH<sub>4</sub>放出に及ぼした温度上昇の影響は、Q<sub>10</sub>換算で7にもおよび、単純な化学過程の温度応答では説明できないことがわかった。そこで、加温が土壌中のCH<sub>4</sub>生成過程に与えた影響を、土壌中の電子供与体の供給・消費という化学量論的に解析したところ、生育前半には有機物分解の促進による電子供与体の増加が、生育後半には土壌有機物の分解促進に加えて、イネの枯死根や根からの滲出物の増加が、加温による著しいCH<sub>4</sub>放出増加をもたらしたものと推察された。
- (5) 水田用に改良した生物地球化学モデル、DNDC-Riceは、CH<sub>4</sub>放出を予測するために重要な土壌炭素分解速度、実際の水田条件の鉄の還元速度などのサブモデルレベルで高い再現性を示した。また、麦わら施用や有機物や施肥管理の違いが水田からのCH<sub>4</sub>放出に及ぼす影響についても概ね再現できることが、本研究で明らかになった。また、本モデルは、水管理条件がCH<sub>4</sub>発生に及ぼす影響についても検証を重ねており、主要な管理技術によるCH<sub>4</sub>発生抑制技術に有効に活用できる可能性が示唆されている。このことから、緩和技術の定量的評価に大きく貢献することが示された。
- (6) DNDC-Riceは、FACE・温暖化処理によるCH<sub>4</sub>発生の増加については、定性的には再現したもの、いずれの処理効果についても観測よりも小さく推定したことから、温暖化・高CO<sub>2</sub>環境においては、増加温度、CO<sub>2</sub>に対する植物応答、炭素の地上部から地下部(土壌)への流れ、土壌における炭素代謝が相互に関連してCH<sub>4</sub>発生を促進していることがわかった。

## 6. 引用文献

- 1) Allen LH Jr, Albrecht SL, Colon-Guasp W, Covell WSA, Baker JT, Pan D, Boote KJ. 2003. Methane emissions of rice increased by elevated carbon dioxide and temperature. *Journal Environmental Quality*, 32, 1978-1991
- 2) Cheng W, Yagi K, Akiyama H et al. 2007. An empirical model of soil chemical properties that regulate methane production in Japanese rice paddy soils. *Journal of Environmental Quality*, 36, 1920-1925.
- 3) Cheng W, Yagi K, Sakai H, Kobayashi K. 2006. Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission from rice soil: an experiment in controlled-environment chambers. *Biogeochemistry*, 77, 351-373.
- 4) Fumoto T, Kobayashi K, Li C, Yagi K, Hasegawa T. 2008. Revising a process-based biogeochemistry model (DNDC) to simulate methane emission from rice paddy fields under various residue management and fertilizer regimes. *Global Change Biology*, 14, 382-402.
- 5) Hasegawa T, Horie T. 1997. Modelling the effect of nitrogen on rice growth and development. In MJ Kropff et al. eds., *Application of Systems Approaches at the Field Level*. Kluwer Academic Publishers, UK, 243-257.

- 6) Hedges LV, Gurevitch J, Curtis PS. 1999. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology. *Ecology*, 80:1150-1156.
- 7) Inubushi K, Cheng W, Aonuma S, Hoque MM, Kobayashi K, Miura S, Kim, H-Y, Okada M. 2003. Effects of free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) on CH<sub>4</sub> emission from a rice paddy field. *Global Change Biology*, 9:1458-1464.
- 8) 久馬剛ら、1984. 新土壌学, 朝倉書店, pp 178
- 9) Li C. 2000. Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **58**, 259-276.
- 10) Long SP, Ainsworth EA, Rogers A, Ort DR. 2004. Rising atmospheric carbon dioxide: plants FACE the future. *Annu. Rev. Plant Biol.* 55:557-594.
- 11) Okada M, Liefferring M, Nakamura H et al. 2001. Free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) using pure CO<sub>2</sub> injection. *New Phytologist*, 150, 241- 250.
- 12) Rosenberg MS, Adams DC, Guerevitch J. 2000. MetaWin: Statistical software for meta-analysis Version 2. Sinauer Associate Inc. Sunderland, MA, USA pp.128.
- 13) Yang L, Wang Y, Kobayashi K et al., 2008, Seasonal changes in the effects of free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) on growth, morphology and physiology of rice root at three levels of nitrogen fertilization. *Global Change Biology*, 14, 1844-1853.
- 14) Yao H, Conrad R, Wassmann R, Neue HU. 1999. Effect of soil characteristics on sequential reduction and methane production in sixteen rice paddy soils from China, the Philippines and Italy. *Biogeochemistry*, 47, 269-295.
- 15) Zheng X, Zhou Z, Wang Y, et al. 2006. Nitrogen-regulated effects of free-air CO<sub>2</sub> enrichment on methane emissions from paddy rice fields. *Global Change Biology*, 12, 1717-1732.
- 16) Ziska LH, Moya TB, Wassmann R, Namuco OS, Lantin RS, Aduna JB, Abao Jr E, Bronson KF, Neue HU, Olzyk D. 1998. Long-term growth at elevated carbon dioxide stimulates methane emission in tropical paddy rice. *Global Change Biology*, 4, 657-665.

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表

- ① Cheng W, Yagi K, Sakai H, Kobayashi K. : *Biogeochemistry*, 77, 351-373 (2006)  
“Effects of elevated CO<sub>2</sub> concentrations on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission from rice soil: an experiment in controlled-environment chambers”
- ② Lou Y, Mizuno T, Kobayashi K, Okada M, Hasegawa T, Hoque Md M, Inubushi K. : *Soil Science and Plant Nutrition*, 52, 769-773 (2006)  
“CH<sub>4</sub> production potential in a paddy soil exposed to atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment”
- ③ Cheng, W., Yagi, K., Akiyama, H., Nishimura, S., Sudo, S., Fumoto, T., Hasegawa, T., Hartley, A.E. and Megonigal, J.P. : *Journal of Environmental Quality*, 36, 1920-1925 (2007)  
“An empirical model of soil chemical properties that regulate methane production in

Japanese rice paddy soils”

- ④ Fumoto T, Kobayashi K, Li C, Yagi K, Hasegawa T.: *Global Change Biology*, 14, 382-402 (2008)  
 “Revising a process-based biogeochemistry model (DNDC) to simulate methane emission from rice paddy fields under various residue management and fertilizer regimes”
- ⑤ Cheng, W., Sakai, H., Hartley, A.E., Yagi, K. and Hasegawa, T.: *Global Change Biology*, 14, 644-656 (2008)  
 “Increased night temperature reduces the stimulatory effect of elevated carbon dioxide concentration on methane emission from rice paddy soil”
- ⑥ Lou, Y., Inubushi, K., Mizuno, T., Hasegawa, T., Lin, Y., Sakai, H., Cheng, W., Kobayashi, K.: *Global Change Biology*, 14: 2678-2687 (2008)  
 “CH<sub>4</sub> emission with differences in atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment and rice cultivars in a Japanese paddy soil”
- ⑦ Cheng, W., Inubushi, K., Hoque, M.M., Sasaki, H., Kobayashi, K., Yagi, K., Okada, M. and Hasegawa, T.: *Geomicrobiology Journal*, 25, 396-403 (2008)  
 “Effect of elevated [CO<sub>2</sub>] on soil bubble and CH<sub>4</sub> emission from a rice paddy: A test by <sup>13</sup>C pulse-labeling under free-air CO<sub>2</sub> enrichment”
- ⑧ 程 為国、化学と生物、46、539-543 (2008)  
 “地球温暖化と水田からのメタン発生：大気中のCO<sub>2</sub>濃度上昇はどのように水田からのCH<sub>4</sub>発生に影響するか”
- ⑨ Cheng, W., Sakai, H., Yagi, K. and Hasegawa, T.: *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 51-58 (2009)  
 “Interactions of elevated [CO<sub>2</sub>] and night temperature on rice growth and yield”
- ⑩ Smakgahn K, Fumoto T, Yagi K: *Journal of Geophysical Research*, 2009 (in press)  
 “地球温暖化と水田からのメタン発生：大気中のCO<sub>2</sub>濃度上昇はどのように水田からのCH<sub>4</sub>発生に影響するか”

## (2) 口頭発表

- ① 麓多門、長谷川利拓：2006年度日本土壌肥料学会関東支部大会講演要旨集，p.24 (2006)  
 “有機物連用による水田土壌の炭素・窒素蓄積過程のシミュレーション”
- ② Inubushi K, Lou Y, Mizuno T, Hasegawa T, Kobayashi K: *The 2nd International Rice Congress*, Delhi, India, p.87 (2006)  
 “Effects of elevated CO<sub>2</sub> on dissolved organic carbon and CH<sub>4</sub> emission in rice paddy soils planted with tropical and temperate rice cultivars”
- ③ Cheng, W., Akiyama, H., Nishimura, S., Sudo, S., Yagi, K., Hartley, A. and Megonigal, J.P.: *18th World Congress of Soil Science*, Philadelphia, USA (2006)  
 “Parameterized soil chemical properties for evaluating methane production from rice paddies”

- ④ K. Smakgahn, T. Fumoto, K. Yagi: 日本土壤肥料学会講演要旨集52巻、p.192 (2006)  
“Methane Emissions from Rice Production with Revised DNDC Model: Validation and Sensitivity Analysis”
- ⑤ 程 為国、酒井英光、八木一行、長谷川利拓: 日本農業気象学会2007年春季大会 石垣 (2007)  
“二酸化炭素濃度と夜温上昇が水田土壌からのメタン発生に及ぼす影響”
- ⑥ 岡田益己、松波寿典、中村浩史、大川原佳伸: 日本農業気象学会2007年春季大会、石垣 (2007)  
“開放系水温上昇実験による水稲の温暖化影響評価の試み”
- ⑦ 麓多門、片柳薫子、八木一行: 日本土壤肥料学会、東京、講演要旨集53巻、p.189 (2007)  
“水田からのCH<sub>4</sub>発生量観測データによるDNDCモデルの検証”
- ⑧ K. Smakgahn、麓 多門、八木一行: 日本土壤肥料学会、東京、講演要旨集 53 巻、p. 190 (2007)  
“Modeling effects of field drainage on methane emission from rice fields”
- ⑨ 程 為国、酒井英光、八木一行、長谷川利拓: 日本作物学会第 224 回講演会、石川、日本作物学会紀要別 第 76 巻 別号 2、p.270-271、(2007 年)  
“生殖成長期における二酸化炭素濃度と夜温上昇がイネの生長および収量に及ぼす影響”
- ⑩ Cheng, W., Sakai, H., Yagi, K. and Hasegawa, T. International Symposium “Sustainable Bioproduction under Changing Global Environment” held by Chiba University, Kashiwa and Matsudo, Japan, Proceeding p.84-91 (2007)  
“Interactions of elevated [CO<sub>2</sub>] and night temperature in rice growth, yield and CH<sub>4</sub> emission from paddy soil during the reproductive growth period”
- ⑪ Cheng, W., Sakai, H., Yagi, K. and Hasegawa, T. : 18th International Symposium on Environmental Biogeochemistry (ISEB), Taupo, New Zealand, Abstract p.T-14 (2007)  
“Increased night temperature reduces the stimulatory effect of elevated [CO<sub>2</sub>] on CH<sub>4</sub> emission from rice paddy soil”
- ⑫ Cheng, W., Hasegawa, T., Yagi, K., Sakai, H., Lou, Y., Tokida, T., Matsushima, M., Adachi, N., Inubushi, K., Okada, M. and Kobayashi, K. : International Symposium on Agricultural Meteorology (ISAM2008), Shimonoseki, Yamaguchi, Japan. Abstract p.60 (2008)  
“Variable effect of elevated [CO<sub>2</sub>] on CH<sub>4</sub> emission from rice paddy: Difference due to rice cultivar, soil type, organic matter management and warming condition”
- ⑬ Tokida, T., Matsunami, T., Cheng, W., Okawara, Y., Nakamura, H., Okada, M., Fumoto, T., Lievens, F. and Hasegawa, T. : International Symposium on Agricultural Meteorology (ISAM2008), Shimonoseki, Yamaguchi, Japan. Abstract p.62 (2008)  
“Effects of soil warming and free-air CO<sub>2</sub> enrichment on CH<sub>4</sub> emission from a rice paddy field”
- ⑭ 程 為国、酒井英光、八木一行、長谷川利拓: 日本作物学会第225回講演会、日本作物学会紀要別 第77巻 別号1、p.320-321 (2008)  
“稲器官別の炭素と窒素分配に及ぼす二酸化炭素濃度と夜温上昇の影響”
- ⑮ 程 為国、八木一行、八木一行、長谷川利拓: 日本土壤肥料学会2008年大会、名古屋、講演要旨集 第54集、p.199 (2008)  
“水田における植物光合成炭素から土壌への分配は大気二酸化炭素濃度上昇に影響されな



い”

- ⑩ 常田 岳志, 程 為国, 長谷川 利弘, 松波 寿典, 安立 美奈子, 中村 浩史, 岡田 益己: 日本土壤肥料学会2008年大会、名古屋、講演要旨集 第54集、p. 199 (2008)  
 “大気CO<sub>2</sub>濃度増加と地温上昇が水田におけるメタンの土壌中賦存量と大気への発生に与える影響 ～FACE・温暖化実験圃場におけるポット試験の結果”
- ⑪ Tokida, T., Cheng, W., Fumoto, T., Matsunami, T., Okawara, Y., Nakamura, H., Adachi, M., Katayanagi, N., Matsushima, M., Eusufzai, M. K., Okada, M., Sameshima, R., and Hasegawa, T.: International Symposium on Agricultural Meteorology (ISAM2009), Koriyama, Fukushima, Japan. Abstract p. 65 (2009)  
 “Mechanisms of high temperature sensitivity of CH<sub>4</sub> emission from a rice paddy as revealed by an open-field soil-warming experiment”
- ⑫ Takeshi Tokida, Minaco Adachi, Weiguo Cheng, Yasuhiro Nakajima, Tamon Fumoto, Hirofumi Nakamura, Masumi Okada, Ryoji Sameshima, Toshihiro Hasegawa. International Symposium on Environmental Biogeochemistry, Germany (2009) (発表予定)  
 “Separation of sources of carbon metabolites (CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>) produced in a rice paddy soil using carbon-13 labeling during free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE).”

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

(5) 一般への公表・報道等

- ① 岩手日報 (2008年5月20日夕刊、FACE温暖化実験の概要などを紹介)
- ② 札幌テレビどさんこワイドニュース (2008年6月6日、FACE実験の概要について紹介)
- ③ 朝日新聞 (2008年9月21日朝日新聞九州版およびAsahi.com、FACE実験の概要について紹介)
- ④ 常陽新聞 (2009年3月14日、温室効果ガス：水田からのメタンの発生が温暖化で増加する)

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

なし