

地球一括計上

課題名	高CO ₂ 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		
担当研究機関	独立行政法人農業環境技術研究所 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		
研究期間	平成18-20年度	合計予算額 (当初予算額 ベース)	59,804千円 (うち20年度 18,331千円)
研究体制	高CO ₂ 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、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)		
研究概要	<p>1. 序 (研究背景等)</p> <p>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 (CO₂) に次いで温暖化の寄与率が大きいメタン (CH₄) 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 CH₄ 発生を促進する。また、今後も確実視される大気 CO₂ 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 CH₄ 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。</p> <p>産業革命以降、急激な増加を示した大気中の CH₄ 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 CO₂ 濃度・温暖化環境が、水田からの CH₄ 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。CO₂ 濃度の上昇と温暖化による CH₄ 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 CO₂ 濃度・温暖化環境における CH₄ 発生量の予測や起源の特定に貢献する。</p> <p>水田からの CH₄ 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、温度や二酸化炭素濃度は、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、CH₄ 発生に少なからず影響する。温暖化・高 CO₂ 環境による CH₄ 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、CH₄ 発生量の予測だけではなく、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。</p> <p>これらの影響を実験的手法で網羅することは困難であるが、(1) 過去に収集された土壌培養、栽培、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生物地球化学モデル DNDC-Rice (水田用 DeNitrification DeComposition) 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。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>本研究は、今後予想される高CO₂濃度・温暖化環境が水田からのCH₄発生を助長する機構を解明し、その影響が土壌、品種や栽培管理などによってどの程度変動するかを評価することを通じて、高CO₂・温暖化環境における水田からのCH₄発生量の予測と抑制技術の評価に資する。この目的を達成するため、以下の項目についての研究を実施した。</p> <p>(1) CH₄発生に及ぼす高CO₂影響の定量的レビュー (メタ解析)</p> <p>(2) チャンバー実験によるCH₄発生量に関するイネ品種とCO₂濃度増加の相互作用の評価</p> <p>(3) チャンバー実験によるCO₂濃度と夜温上昇が水田土壌からのCH₄発生に及ぼす影響</p> <p>(4) 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CO₂濃度の影響</p> <p>(5) 開放系大気CO₂増加 (Free-Air CO₂ Enrichment: FACE) ・水温上昇実験による実証的影響評価</p> <p>(6) DNDC-Riceモデル検証と利用した実験結果のモデル解析</p>		

3. 研究の内容・成果

(1) CH₄発生に及ぼす高CO₂影響の定量的レビュー（メタ解析）

水田土壌からのCH₄発生に及ぼす高CO₂環境の影響を定量的に評価するために、様々な実験条件で調査した既存のデータ（21セット）についてメタ解析を行った（図1）。その結果、高CO₂処理（200～300ppm濃度上昇区）によるCH₄発生の促進率は、平均で51%（95%信頼区間、45～57%）、高温や多窒素条件は高CO₂条件でのCH₄発生を高めること、有機物を多施用した場合にはCO₂濃度上昇の影響が認められなくなることがわかった。また、様々な条件で得られたCH₄発生の高CO₂応答は、一般的な作物成長の高CO₂応答よりも顕著に大きかった。CO₂濃度処理方法間の比較では、開放系大気増加（FACE）処理によるCH₄増加率が41%であったのに対し、チャンバー実験では83%と高かった。ただし、チャンバー実験のうち高温処理区を除いた平均CH₄発生増加率は48%で、FACE実験との差は7%程度であった。個々の実験結果には大きな変動があったものの、ここで示した平均値は、各地の高CO₂濃度処理影響を統計的手法で客観的に要約した値であり、本研究の重要な成果の1つである。

(2) チャンバー実験によるCH₄発生量に関するイネ品種とCO₂濃度増加の相互作用の評価

CH₄発生速度とその高CO₂濃度に対する応答が品種によって異なるかを、半閉鎖型環境制御チャンバーおよびCO₂制御型温度勾配チャンバーを用いて調査した。その結果、作付け期間中の積算CH₄発生量には、品種間で2倍以上に及ぶ顕著な品種間差異が認められ、IR72, Dularなどのインディカ品種で大きく、コシヒカリで小さかった。また、これまでの報告と同様に、高CO₂濃度はCH₄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、その違いは主として植物生育の環境応答の違いに起因すること、品種特性としては、根重、根数の大きさがCH₄発生と密接に関わっていることが示唆された。これらは、将来環境において、作物生産を低下させることなく、CH₄発生を抑制するための品種育成に参考になる知見である。

(3) チャンバー実験によるCO₂濃度と夜温上昇が水田土壌からのCH₄発生に及ぼす影響

これまでCO₂濃度の上昇と高温の組み合わせがCH₄発生に及ぼす影響を評価した研究は、いずれも昼夜ともに温度を上昇させたものであった。しかし、過去100年の温度趨勢からすると、最低気温の増加率が大きく、日較差は小さくなる傾向にあった。今後の気温の日較差の動向は不確実であるが、高CO₂環境下で夜温が上昇した場合のCH₄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。そこで、半閉鎖型環境制御チャンバーを用いて、夜温とCO₂濃度の組み合わせがCH₄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CH₄発生の高CO₂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、CH₄発生速度に日変化が認められたことなどから、CH₄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。

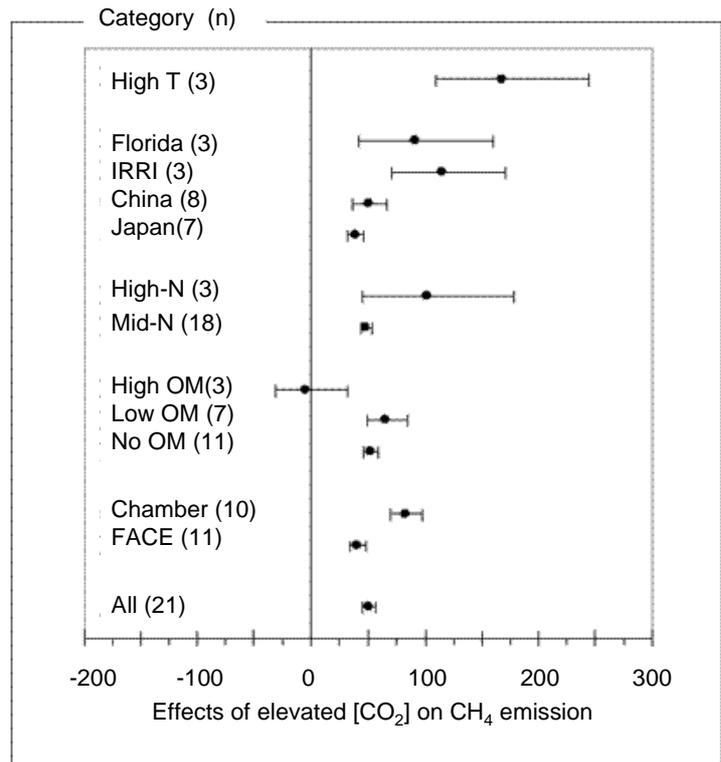


図1. 大気CO₂濃度の上昇が水田からのCH₄発生量に及ぼす影響のメタ解析結果（6論文21データセットの解析結果）。値は高CO₂濃度処理（外気+200～300ppm）による平均増加率±95%信頼区間。ただし、IRRIはフィリピンにある国際イネ研究所、Nは窒素処理を、OMは有機物施用処理、Chamberはチャンバーでの高CO₂実験、FACEは圃場における開放系CO₂増加実験（日本雫石と中国江蘇省無錫）。

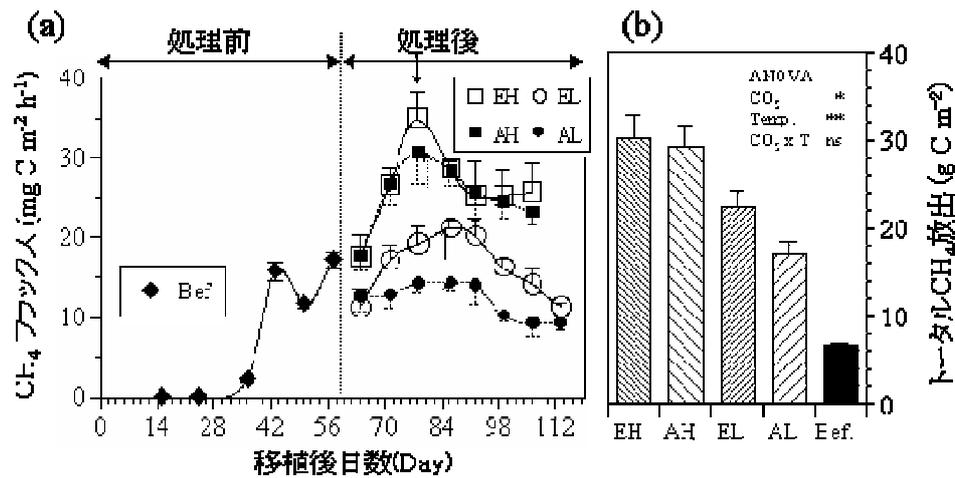


図 2 生育期間中における CH_4 フラックスの推移 (a) およびトータル CH_4 発生量。棒は標準偏差 ($n=3$)。Bef: 処理前; EH: 高 CO_2 高夜温; AH: 標準 CO_2 高夜温; EL: 高 CO_2 低夜温; AL: 標準 CO_2 低夜温。

(4) 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_2 濃度の影響

高 CO_2 濃度条件が水田からの CH_4 発生に及ぼす影響の解明には、 CO_2 濃度上昇に伴ってイネから土壌への炭素供給がどの程度変化するかが重要であるが、植物体から土壌への炭素フローに関する情報は極めて少ない。そこで、半閉鎖系環境制御チャンバーにおいて、2水準の CO_2 濃度 (380と680ppm) 条件でイネを2作期ポット栽培した。用いた土壌は C_4 作物 (サトウキビ) 畑の土壌である。栽培期間中の土壌 $\delta^{13}\text{C}$ の変化から植物体由来で土壌に蓄積した炭素量を推定した。無植栽ポットとの比較から、植物体由来の炭素は1作期につき約 50g m^{-2} ずつ蓄積したものと推定された。ただし、高 CO_2 濃度処理は植物体のバイオマスを有意に増加させたものの、 CO_2 濃度処理間で植物由来の土壌炭素蓄積量の違いは認められなかった。

(5) 開放系大気 CO_2 増加・水温上昇実験による実証的影響評価

温暖化、 CO_2 濃度の上昇が開放系水田からの CH_4 発生に及ぼす影響を実験的に解明するために、岩手県雫石町の農家水田において、FACE実験区 (差し渡し12mの八角形) 内に水温を上昇させる区画 ($5.5 \times 2.7\text{m}$) を設け、200ppmの CO_2 濃度の上昇と 2°C の水温上昇が、水田からの CH_4 発生に及ぼす影響を2ヵ年調査した。生育期間を通じた積算の CH_4 発生量は、2ヵ年平均で水温上昇によって40-48%、FACEによって22-29%増加することがわかった (表1)。特に、温度依存性は Q_{10} (温度が 10°C 上昇したときに反応速度が何倍になるかを表す指数) 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。

生育期間を通じた積算 CH_4 発生量は、植物体バイオマスと正の相関関係にあったが、同様のバイオマスでも CH_4 フラックスは加温区が無加温区よりも大きかった (図3)。すなわち、 CH_4 フラックスに及ぼす処理や年次の影響は、植物体のバイオマスの違いを反映した部分と、土壌プロセスの温度依存性を

表 1 FACE および加温処理区における 1 作季あたりの積算 CH_4 放出量 (gC m^{-2})。ただし、反復 (水田筆) ごとの土壌特性 (鉄還元量) の違いを考慮して、鉄還元量を共変量 ($P=0.14$) とした共分散分析による 2 ヵ年平均の処理の影響。

処理区	外気 CO_2 区 (Amb)	高 CO_2 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 $P < 0.001$	40%	48%	相互作用: 有意差無し

反映した部分からなると考えられ、高CO₂濃度・温暖化環境におけるCH₄発生を予測する上で有用な知見が得られた。

(6) DNDC-Riceモデルの検証とモデル解析

水田用に改良したDNDCモデル (DNDC-Rice) が、様々な土壌タイプに適用できるかを、過去に実施された土壌培養実験における炭素分解速度のデータから検討した。検証には日本の代表的な水田土壌10種類を対象に行った16週間の土壌培養実験結果を用いた。DNDCモデルは、培養期間のうち風乾処理の影響と考えられる急激な有機物分解は再現できなかったものの、その影響が少ない培養後半の分解速度については、高い精度で予測した (RMSE = 0.61 mg C kg⁻¹ d⁻¹) ことから、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やCH₄生成の予測に利用できると考えられた。

DNDC-Rice モデルを用いて、日本、中国のFACE実験結果を解析した。中国FACEでは、麦わら還元量、窒素施肥水準が副区として設けられていた。無錫で観測された積算CH₄発生量は、これらの管理技術の影響もあり46-401 kg C ha⁻¹の範囲で大きく変動した。DNDC-Riceモデルは、これらの栽培管理の違いによる著しいCH₄発生量の変動を概ね再現することができた (図4)。しかしながら、FACE (CO₂濃度上昇) 処理によるCH₄発生の増加率については、実測値自体にも大きな年次間差異はあるものの、モデル予測値は日本および中国ともに実測値よりも小さかった (図5)。また、零石における水温上昇区についても、40~48%に及ぶCH₄発生量への影響を、十分に反映できなかった。モデルは、CO₂濃度上昇による光合成・成長の促進、温度上昇による土壌炭素分解速度の増加といった、CO₂、温度応答に関わる基本的プロセスは取り入れたものであるが、メタ解析やFACE・温暖化実験で観測されたような大きなCH₄発生の応答には十分に再現できなかったことから、現状のモデルを将来予測に用いた場合、CH₄発生に及ぼす気候変化の影響を過小評価する可能性がある。

4. 考察

本研究では、これまで散在していたCH₄発生のCO₂、温度応答に関する情報を要約した上で、主要なプロセスのメカニズムの解明を通じて予測における問題点を明確にすることができた。CH₄の主要な発生源である自然湿地からのCH₄発生量も大気CO₂増加によって増加することが確認されており、水田や湿地におけるCH₄発生が地球規模での気候変動を予測する上で重要な要素であることが示された。

温度がCH₄発生と密接に関わることは古くから知られているが、零石で世界に先駆けて実施した開放系水田の水温上昇実験では、CH₄発生の温度依存性がQ₁₀換算で7に相当するような極めて大きいもので、単純な化学過程の温度応答だけ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CH₄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CH₄発生増加をもたらしたものと推察された。

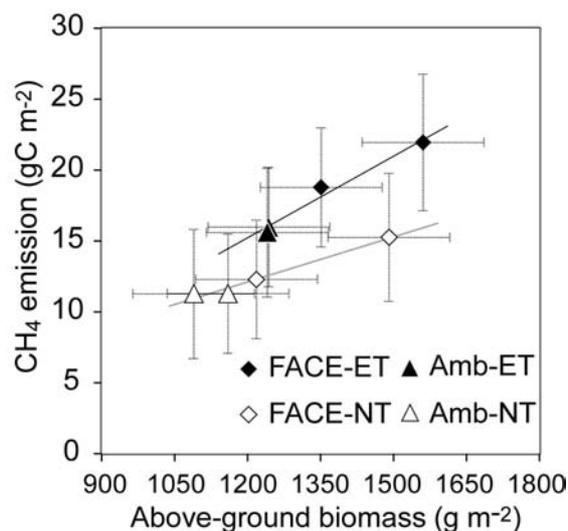


図3 2007、2008年の零石FACE・水温上昇実験における登熟中期(落水直前)のバイオマスと積算CH₄フラックスとの関係。ただし、NT、ETは無加温区と水温上昇(+2℃)区、Amb、FACEは外気CO₂濃度区とCO₂増加(+200ppm区)。

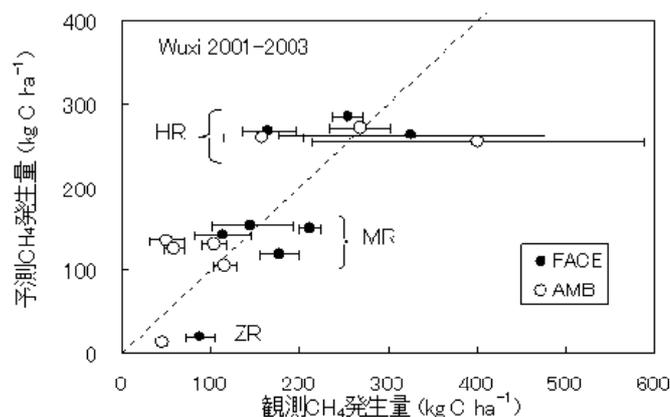


図4 中国(無錫)FACE実験での水稲1作期中のメタン発生量の観測値とDNDC-Riceモデルによる予測値の比較。図中の横棒は観測値の標準誤差を示す。ただし、HRは麦わら還元量多、MRは麦わら還元量中、ZRは無還元区。窒素施肥2水準の結果。

生育後半の夜温の影響を調査したチャンバー実験からも、興味深い応答が得られた。夜温上昇は CH_4 発生を促進したが、昼夜を同一温度（ 32°C ）とした高夜温区においても、 CH_4 フラックスには時間変動が認められ、夜間におけるフラックスは昼間のそれよりも小さかった。さらに、夜間の呼吸速度が高い測定日の CH_4 発生量が大きかった。また、品種間比較でも、乾物重、根重、根数などが多い品種で CH_4 発生が多かったことから、植物の光合成・呼吸といった炭素代謝が、 CH_4 発生の変動に強く影響しているものと推察された。実際、多くの実験で CH_4 フラックスと植物体の乾物重との間には正の相関関係が認められた。ただし、FACE・温暖化実験では、 CH_4 フラックスと乾物重との関係（図3参照）は、水温条件によって明らかに異なった。すなわち、 CH_4 発生の予測には、植物の環境応答、植物が土壌に及ぼす影響、土壌の炭素代謝の温度依存性のすべてにおいて定量的理解を得る必要である。

C_4 土壌を利用したチャンバーにおけるポット実験では、イネ由来の土壌炭素蓄積を検知することができたが、高 CO_2 による光合成、乾物生産の促進が土壌炭素蓄積に及ぼす影響については検出できなかった。高 CO_2 は植物体の光合成を促進し、植物体の炭素獲得を通じて土壌への炭素供給を増加させた可能性は強いが、土壌に蓄積されことなく、気体として再び大気中に放出されたのかもしれない。本研究でその全貌を把握するには至らなかったが、植物から土壌への炭素の流れは、 CH_4 発生だけでなく、水田の炭素収支に大きく影響することから、長期的・包括的観測が望まれる。

水田用に改良した生物地球化学モデル、DNDC-Riceは、 CH_4 放出を予測するために重要な土壌炭素分解速度（土壌培養実験）、湛水後の鉄の還元状態の変化（圃場条件）について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_4 放出に及ぼす影響についても概ね再現できることがわかった。また、本モデルは、水管理条件が CH_4 発生に及ぼす影響についてもすでに検証が重ねられており、主要な管理技術による CH_4 発生抑制技術の定量的評価に大きく貢献することが期待できる。

しかしながら、DNDC-Riceは、FACE・温暖化処理による CH_4 発生の増加については、定性的には再現したものの、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。たとえば、FACE処理による CH_4 発生量の増加率は、観測では零石が平均18%、無錫が63%であったのに対して、DNDC-Riceモデルで予測される増加率は観測値より低く、平均では零石で10%、無錫で16%であった。この理由として、高 CO_2 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。また、加温効果については、DNDC-Riceが加温による水稻の乾物重増加を予測できなかったことに加えて、根の枯死の増加に伴う土壌への有機物供給の増加を十分に反映できていなかったことが過小評価の要因と考えられた。

以上のような観測とモデル推定のギャップは、現状の予測技術では、温暖化・ CO_2 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唆するものである。温度、 CO_2

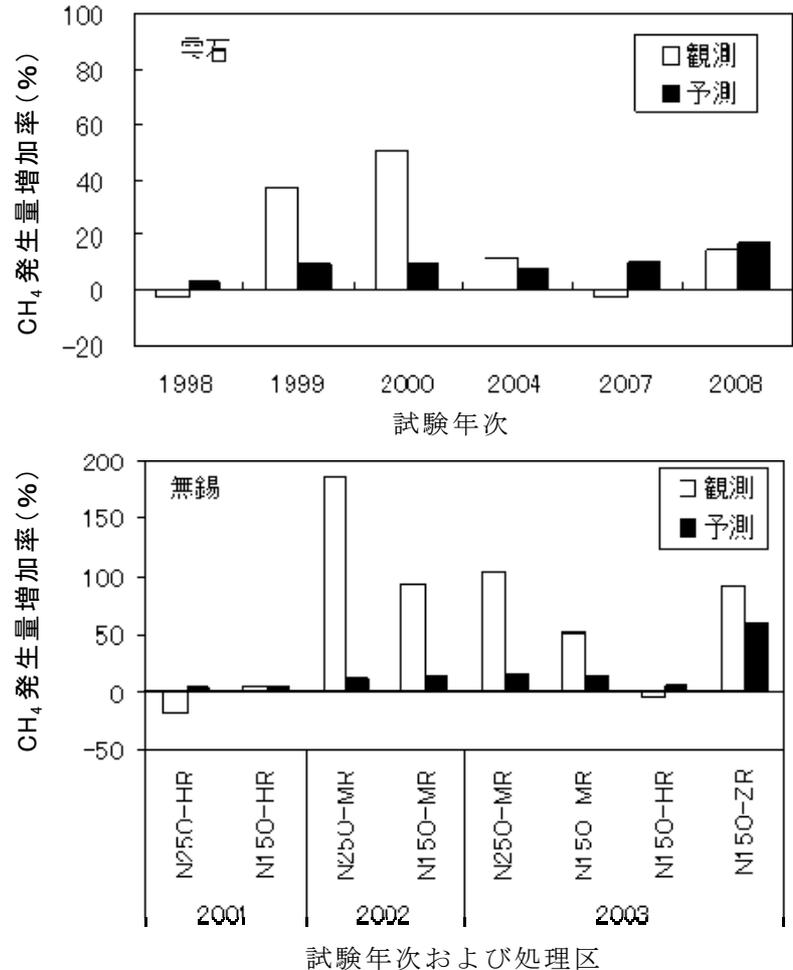


図5 日本（零石）と中国（無錫）のFACE処理による CH_4 放出量の増加率の観測値と予測値の比較（零石の加温処理区は除く）。無錫のNに続く数値は窒素施肥量（kg/ha）。HRは麦わら還元多、MRは同中、ZRは無還元区。

に対する植物応答と炭素の地上部から地下部（土壌）への流れに関する理解が温暖化予測において重要な鍵となることが明らかになった。ただし、温暖化・CO₂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CH₄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。本研究の成果は、将来環境における水田の炭素収支の包括的理解に向けた基盤的知見・手法として役立つものと期待される。