

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H02307

研究課題名（和文）量産型NDIRガス分析機器の開発と熱帯・亜熱帯地域におけるN₂O排出係数の決定研究課題名（英文）Development of mass-produced NDIR gas analyzer and determination of N₂O emission coefficient in tropical and subtropical regions

研究代表者

酒井 一人（SAKAI, KAZUHITO）

琉球大学・農学部・教授

研究者番号：10253949

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：農業セクターからの温室効果ガス排出量を推定することは、農業分野における脱炭素に関して重要な課題である。この点に関して本研究では次のような成果を得た(1)ガス透過性チューブを用いて土壌ガス濃度を測定し、その測定値を用いて土壌ガス拡散を数値解析で解くことにより土壌表面からのガスフラックスを求める手法を開発した。(2)緩効性肥料を利用することにより温室効果ガス排出係数が小さくなることを室内実験により確認した。(3)作物モデルであるApsimXの窒素収支に関するパラメータの感度分析を行った。(4)サトウキビガスの貯留中にメタンが発生する条件について室内実験により明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

パリ協定のもと先進国だけでなく発展途上国においても温室効果ガス削減は重要な課題であり、農業セクターにおける温室効果ガス削減は世界的に注目されている。農地からのCH₄やN₂O排出は気候や土壌などの地域特性の影響が大きいため、各地でのモニタリングが必要である。本研究で完成した量産型NDIR土壌ガス測定システムは、これまでの測定機器より低コストで製作可能であり、発展途上国を含む多くの地域での利用が期待できる。また、沖縄土壌における緩効性肥料の利用によるN₂O排出量削減の可能性を確認できたことは、今後のサトウキビ農業におけるカーボンクレジットの設定に繋がるのが期待できる。

研究成果の概要（英文）：Estimating greenhouse gas emissions in the agricultural sector is an important issue regarding decarbonization in the agricultural sector. Then, we have obtained the following results in this study: (1) We developed a method to estimate the gas flux from the soil surface by measuring the soil gas concentration using a gas-permeable tube and solving the soil gas diffusion through numerical analysis using the measured values, (2) It was confirmed that the greenhouse gas emission coefficient was reduced by using controlled-release fertilizer in laboratory experiments (3) We confirmed important parameters related to nitrogen balance in ApsimX by the global sensitivity analysis using emulators. (4) We have clarified that the conditions in which methane is generated during storage of sugarcane bagasse by the laboratory experiments.

研究分野：農業環境水文学

キーワード：N₂O NDIR 温室効果ガス排出係数 サトウキビ 緩効性肥料 メタン ガスセル

1. 研究開始当初の背景

(1) 社会的背景=なぜ、途上国の農地での温室効果ガス測定が必要なのか？

2020年からSDGsの「行動の10年」が世界規模で本格的に始まるはずであった。特に、温室効果ガス(Green House Gases: GHGs)排出削減に関しては、パリ協定とともに「脱炭素社会」の実現に様々な分野での活動が期待されている。持続的発展への取り組みの一つとして再生可能エネルギー開発を中心とした「グリーンニューディール」が注目されている。この課題に対して農業分野でのバイオマスエネルギー源としては、産廃として扱われるサトウキビバガスや稲藁を有効利用することが求められている。特に、農業生産力のある途上国ではバイオマスエネルギー利用が期待されている。従来は、畑地における N_2O 排出量は施肥量にIPCCにより示された排出係数を乗じることにより求める。しかし、その排出係数は営農、土壌、気候条件により大きく変わるために地域で校正が必要と考えられる。例えば、農業環境研究所¹⁾は日本における畑地からの N_2O 排出ではIPCCデフォルト値の1/8程度であったと報告している。さらに、IPCCのデフォルト値はこれまでの温・冷帯での研究結果に基づいているので、途上国の多くが属する熱帯・亜熱帯地域では土壌や気候の条件が温・冷帯と大きく異なるために、熱帯・亜熱帯での排出係数は未知のままである。従って、熱帯・亜熱帯における観測に基づいたGHG排出係数の特定が不可欠である。

(2) 学術的背景=多点連続観測に基づいた適用性の高いモデル開発が求められている!...

上記のように、特に熱帯・亜熱帯でのGHGsインベントリー作成のために排出係数を定めることが重要となる。バイオマスエネルギー利用では、農地からのGHGs排出だけでなくバイオマス生産量の推定も重要となる。従って、本研究ではバイオマス生産量を推定するためのモデルとしてAPSIM Next Generation(Apsim X)を用いる。Apsim Xでは、ユーザーが独自のC#スクリプトを追加できるメリットがあるので、モデルの本体のプログラム(メインエンジン)を変更することなく、本申請研究から得られる知見を反映したモデルの構築が可能である。本申請研究で実施する多地点における連続観測に基づいた熱帯・亜熱帯地域へ適用可能なモデルの構築は、これまでに組み込まれた形跡がない。

2. 研究の目的

(1) 土壌ガス測定による土壌表面からのガスフラックス測定

フィールドレベルでのガス測定は、機器のコスト、電力および維持管理などのランニングコストに関して費用がかかる。これらのことから N_2O 排出のモニタリングは、特に発展途上国では低くなっている。NDIR技術は、対象ガスを決定すればそれに対応した波長のフィルターを用いることにより比較的安価にガス濃度測定が可能である。さらに土壌表面よりもガス濃度が高い土壌ガスを使用して測定を行う場合は、それほど高精度でない機器を利用することが可能である。そこで本研究は次のことを目的として実施した。(1)ガス透過性の高いシリコンチューブセルを使用して土壌 N_2O ガス濃度を測定する安価なNDIRガス測定装置の開発(2)開発した機器を利用して N_2O ガス濃度を測定し、その土壌ガス測定結果が N_2O フラックスを予測するシミュレーション手法の開発

(2) 回転式マルチガスセルの開発

シリコン拡散セルのガス透過性の特徴から、サンプリングセル内のガスが土壌ガス濃度と平衡するまでに数時間を要する。そのため、シリコン拡散セルを直列に接続した装置で連続的に測定する必要があり、ガスセルを換気して1台の装置で異なるガスサンプリングセルを切り替えて多地点を測定することはできない。特に、農地では、複数の地点におけるガス濃度の測定が必要である。そこで本研究では、温室効果複数地点で測定できる低コストである回転式マルチガスセル装置を開発し、その有効性について検討した。

(3) 緩効性肥料利用による N_2O 排出量削減効果の検討

これまで沖縄県のサトウキビ栽培において緩効性肥料を利用するメリットとして施肥コストに対する増収効果や地下水水質保全についての評価はされてきた。しかし、 N_2O を主とする温室効果ガス削減効果については明確にされていない。そこで本研究では、沖縄県の島尻マージを用いて無施肥、硫化アンモニウム混合、緩効性肥料混合の3条件での N_2O 排出量を測定するカルム実験を行い、排出係数などの N_2O 排出特性について検討した。

(4) APSIMの窒素収支に関するエミュレータを用いたパラメータ感度分析

サトウキビ栽培における様々な施肥体系により窒素による環境負荷をどのように変わるかについては圃場栽培試験により検討することが理想であるが、栽培期間の長いサトウキビ栽培では多くのケースについて栽培実験を行うことは現実的でない。この課題に対して、作物モデルによるシミュレーションを用いて施肥条件の影響を検討することは有効である。しかし、地域特有の品種改良が進んでいるサトウキビではモデルのデフォルトのパラメータをそのまま使えば限らない。そのため地域等固有品種のパラメータの同定が必要となるが、すべてのパラメータを決定することは難しく重要なパラメータを明らかにしておくことが重要である。そこで、本研究ではApsimXモデルを用いた硝酸態窒素収支に影響するパラメータの感度分析を行った。

(5) サトウキビバガスの保存時のメタン発生に関する研究

サトウキビの搾りかすであるバガスは、製糖工場で発電燃料として使われており、重要なバイオマス燃料となっている。しかし、保管中に自然発火による火災が生じ、想定していたエネルギーを得ることができない問題が起こっている。その火災において、メタン発酵により発生するメタンガスが火災被害を助長しているのではないかと懸念されている。そこで、本研究では、温度および水分条件を変えたバガスからのメタン発生量を測定し、どのような条件でメタン発生量が変化するかについて検討した。

3. 研究の方法

(1) 土壌ガス測定による土壌表面からのガスフラックス測定

琉球大学フィールドセンターで採取した島尻マージを 2mm 篩にかけ、硫化アンモニウムを加え十分に混合した後、土壌カラムに充填した。充填時に土壌ガス測定用のシリコンチューブを埋設した。土壌カラムの底に穴を開け、そこから加水および排水を行った。シリコンチューブを開発した N₂O 分析装置に接続し、土壌ガス中の N₂O 濃度を測定した。また、土壌表面からの N₂O フラックスを測定するために土壌カラムの上部空間の N₂O 濃度変化を FTIR により 1 分間隔で 30 分測定し次の 30 分は換気することを繰り返した。また、土壌水分を 30 分間隔で測定した。

次に、最終的なシミュレーションで拡散方程式を解く必要があったため、シリコン膜の拡散係数を測定した。シリコンチューブを密閉チャンバー内に配置し、チャンバー内に濃度のがかった N₂O ガスを充填しシリコンチューブ内の濃度変化を測定した。そして、その結果からシリコンチューブのガス拡散係数を推定した。

最後に、次の手順で土壌表面からのガスフラックスを推定した。測定ガス濃度が土壌ガス濃度の遅延・拡散の結果であるので、土壌ガス濃度を測定ガス濃度から推定し拡散方程式を解き、シリコンチューブ内のガス濃度の計算を行う。そして、計算結果と測定ガス濃度の差が小さくなるような土壌ガス濃度の推定結果を土壌ガス濃度時系列とした。そして、推定した土壌ガス N₂O 濃度時系列を境界条件とするガス拡散計算を行い土壌表面からのガスフラックスを推定した。ガス拡散計算においては、土壌水分とガス拡散係数との関係を 6 つのモデルで推定しどのモデルが有効であるかについて検討した。

(2) 回転式マルチガスセルの開発

4 本の直線型ガスセルを円状に配置し、円盤をサーボモーターで回すことによりガス濃度を測定するガスセルを変更するシステムを構築する。そして、その有用性を確認するために、単一ガスセルを用いて濃度が既知である 2 点(N₂O = 0ppm と N₂O = 200ppm)の濃度を測定するとし、切り替え時間を変えた際の測定値の反応について比較した。

(3) 緩効性肥料利用による N₂O 排出量削減効果の検討

琉球大学農場内の島尻マージを乾燥密度 1.04g・cm⁻³ になるようにプラスチック円筒容器に充填した。無施肥条件を対照区、窒素含有量 1g 相当の硫酸アンモニウムを混合した条件を硫酸アンモニウム区、同量の窒素含有量の緩効性肥料を混合した条件を緩効性肥料区とした。緩効性肥料はジェイカムアグリ社製 LP コート 40 を用いた。FT-IR と長光路ガスセルを用いたクローズドチャンパー法によるガス測定システムを構築し赤外線吸収測定(N₂O 吸収波数 2237cm⁻¹、参考波数 2500cm⁻¹)による N₂O 濃度測定を行った。各条件の測定は 90 分サイクルで、20 分測定(1 分毎にスペクトル取得)し、70 分は乾燥空気を流して換気した。測定時間前の 10 分でシステム全体を換気し、前の測定ガスを排出した。チャンパー内土壌には、上部からスプレーで 25mm の灌水を週に一回行った。

実験 A は 2021 年 12 月から 2022 年 2 月、(加温、土壌温度範囲 21–29.6°C)、実験 B は 2022 年 4 月から 6 月(常温、土壌温度範囲 22–27°C)に実施した。測定したスペクトル強度を検量線を用いて N₂O 濃度に換算し、観測時間 20 分の最後の 7 分での傾きを計算し N₂O 濃度変化率(ppm・N₂O・min⁻¹)を求めた。その N₂O 濃度変化率を理想気体の状態方程式を用いて N₂O 質量変化率に変換した。

(4) APSIM NextGeneration の窒素収支に関するエミュレーターを用いたパラメータ感度分析

まず、本研究では、ApsimX のサトウキビに関する 26 パラメータと土壌に関する 8 パラメータをランダムに 500 セット設定し、シミュレーションを行った。その計算においてランダムに設定しない計算条件は、国際農林水産科学研究センター(石垣市)のライシメータ圃場実験において行ったサトウキビ栽培実験の際に測定したデータを用いた。土壌は、島尻マージで現地土壌をサンプリングして取得したデータを用いた。サトウキビの春植え(2019 年 4 月 16 日植え付け、2020 年 3 月 16 日収穫)で、施肥条件は、裸地(BL)、無窒素、尿素(最初の施肥: 植栽後 30 日に 100kg/ha、2 回目の施肥: 植栽後 90 日(DAP)に 100kg/ha)とした。

上で計算した 500 の計算結果のうち、ランダム抽出した 300 を用いて Treed Gaussian Process 回帰を用いてエミュレーターを構築し、残りの 200 で構築したエミュレーターが感度分析に利用可能であるかについて検証した。そして、そのエミュレーターを用いてパラメータ感度分析を行った。

(5) サトウキビバガスの保存時のメタン発生に関する研究

材料: 東北タイ、コンケン近郊の複数の製糖工場で発生したバガスを実験室に持ち帰り、実験に用いた。2mm 篩にかけたバガスに水を加え、約 40 度に加温した状態で数日養生した。その後、

風乾したものを試料とした。3つの容器に風乾バガス 10g に水 200g を加えた試料(質量含水比 2000%)を入れ、それぞれの温度を高温(Ex-1)、中温(Ex-2)、室温(Ex-3)に設定し実験を行った。

FTIR の検量線作成：窒素で満たした循環システムに、メタンを $0 \mu\text{l} \sim 200 \mu\text{l}$ の範囲で $10 \mu\text{l}$ ずつ注入し、各ガス濃度での赤外線(3.3mm)透過率を測定した。そして、修正ランベルト・ベールの法則に基づき、以下の式を使い検量線を作成した。

$$ABS = SPAN(1 - e^{-bx^c})$$

ここで、ABS：吸光度、SPAN、b、c：係数、x：ガス濃度(ppm)である。

水蒸気補正式作成：FTIR では、メタンの赤外吸収波長における水蒸気の影響を把握する必要がある。そこで、水蒸気にだけ吸収される赤外線(IR1 3.05 mm)の吸光度とメタンの最大吸収赤外線(IR2 3.3mm)の吸光度から、水蒸気補正式を作成した。

クローズドチャンバー法を用いた赤外線スペクトル測定：電磁弁を使って 40 分間隔で測定する容器を変え、各条件の測定は 1 日で 12 回行った。また、換気用の電磁弁を使って、40 分のうち、初めの 10 分は換気を行い、30 分間で測定を行った。FTIR のスペクトル測定間隔は 2 分とした。測定時間 24 時間 10 分で測定を中断し、容器質量測定、温度データ回収、pH と ORP 測定を行い、実験を再開した。

解析方法：作成した検量線を用いてメタンの濃度を求め、その結果をもとに各実験条件での観測 6 分間の濃度変化 (= フラックス [ppm min^{-1}]) を求めた。そして、時間と濃度の相関係数が 0.9 以上であり、測定終了時間に近いフラックス値をその測定時間のフラックスとした。

4. 研究成果

(1) 土壌ガス測定による土壌表面からのガスフラックス測定

シリコンチューブの拡散係数を、拡散方程式を解くことにより推定した結果、推定されたシリコンチューブのガス拡散係数は、 $1.1 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ であった。この値は、土壌ガスフラックス計算に用いる。

シリコンチューブでのガス拡散を土壌ガス N_2O 濃度を仮定しシミュレーションを繰り返し計算結果が測定ガス濃度変化と同じようになるような土壌ガス N_2O 濃度を試行錯誤により求めた結果、測定ガス濃度の遅延と拡散を考慮し、前時間へのシフトとピーク値拡大を行うことによりある程度妥当な結果を得ることができた。

次に土壌ガス N_2O 濃度推定結果を土壌側(下側)境界条件、 N_2O 濃度=0 を大気側(上側)境界条件としてガスフラックスの計算を行った。

ここで用いたモデルは既往の研究として報告されたものであるが、どのモデルを採用するかによって計算結果が大きく変わることが認められた。また、下の式のモデルを採用することによって実測値に対して良い結果を得ることができていることが認められた。このことより、本手法を用いて正確なガスフラックス計算を行うためにはガス拡散係数のモデル化が重要であることが認められた。

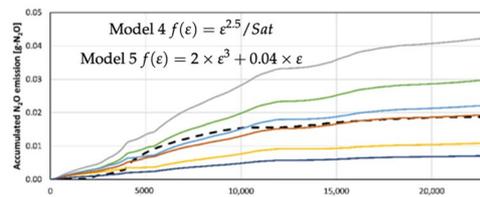


Fig.4.1-3 ガスフラックス累積値の計算結果

(2) 回転式マルチガスセルの開発

Fig.4.2-1 に作製した回転式マルチガスセルの様子を示す。

単一ガスセルの場合、ガスセル切り替え後にシステム内のガス濃度が均一になるのに時間がかかるために切り替え間隔が短い場合には正確なガス濃度を測定できていないことが認められる。一方、回転式マルチガスセルでは、切り替え後ガスが入り替わる過程が必要でないため、即時にガス濃度を観測できていることがわかる。このことは、拡散平衡に時間を要するシリコンチューブを用いた土壌ガス濃度測定ではさらに有効であると言える。

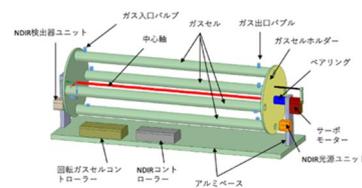


Fig.4.2-1 NDIRを組み込んだ回転式マルチガスセルの概略

(3) 緩効性肥料利用による N_2O 排出量削減効果の検討

Fig.4.3-1 より実験 B の方が実験 A より飽和度が高く、土壌温度が若干低い傾向となっていたことがわかる。CRF の 80% 溶解日数を積算温度から推定すると実験 A で 39 日、実験 B で 41 日となり、大きな差はなかった。

Fig.4.3-2 より、どちらの実験においても N_2O 排出量は多い方から硫安区(AS)、緩効性肥料区(CRF)、無施肥区(CON)であった。総 N_2O 排出量からガス排出係数($\text{N}_2\text{O-N}$ 排出量/投入 N 量)を計算すると、実験 A において AS=3.9%、CRF=0.4%、実験 B において AS=4.0%、CRF=1.9%であった。

硝化過程の方が脱窒過程より NO の発生量が多くなる。Fig.4.3-3 から実験 A において NO の発生量が多

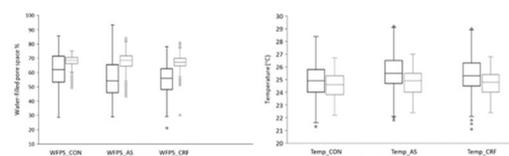


Fig.4.3-1 実験期間中の飽和度(左)および土壌温度(右)のボックスプロット

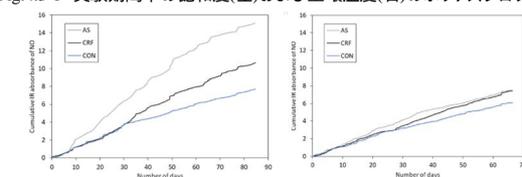


Fig.4.3-2 実験 A(左)および実験 B(右)での積算 N_2O 排出量の経時変化

くなっており、Fig. 4.3-3 の土壌水分変化からも実験 A では硝化が主経路出会ったと考えられた。また、飽和度 70% 以上で硝化より脱窒が優位となることが知られている。Fig.4.4-2 より実験 B において、飽和度 70% 以上の期間が長かったことが見受けられることから、実験 B では脱窒が主な N₂O 発生経路であったと考えられた。

(4) APSIM の窒素収支に関するパラメータ感度分析

BL 条件と Urea 条件では、構築したエミュレータにより検証データの再現性も高いことを確認した。N-Free(無施肥)条件では、計算値の小さい範囲と大きい範囲で明らかに傾向が違ってくるのが認められた。

その原因について検討した結果、無施肥条件ではサトウキビ成長に初期残存窒素が用いられるため成長量が大きくなるパラメータセットでは成長に伴い窒素ストレスを受けることがわかった。そこで、日射利用効率(RUE)で場合分けして改めてエミュレータを構築し再現性を確認した。その結果、再現性の高いエミュレータを構築できた。

次に、構築したエミュレータを用いてパラメータの感度分析を行った。裸地条件(BL)では、2 層目の土壌水分移動に関するパラメータの感度が大きいことがわかった。サトウキビが存在する条件では、サトウキビの成長量が窒素吸収量となることから日射利用効率(RUE)の感度が高い結果となった。また、サトウキビが窒素ストレスを受ける可能性のある N-Free(RUE 1.8~2.5)では、土壌水分移動に係るパラメータの感度が大きいことが認められ、裸地条件と施肥条件の中間に位置するような条件であることが認められた。

これらのことより、サトウキビのモデル化においては適切な日射利用効率の値を用いることが重要であることがわかった。

(5) サトウキビバガスの保存時のメタン発生に関する研究

検量線作成結果：本研究で用いた検量線 Eq(1)は、検量線作成に用いた濃度範囲の外では精度が落ちることが確認されている。実験でのメタン濃度の範囲が不明であったので高濃度(0~85ppm)と低濃度(0~20ppm)の 2 つの濃度範囲での検量線作成を行った。高濃度では、SPAN=0.686、b=0.013、c=0.9490 (R²=0.9995)、低濃度では、SPAN=55.28、b=0.0002、c=0.943 (R²=0.9992) という結果となり、どちらも精度の高い検量線を作成した。

水蒸気補正式作成結果：水蒸気補正式として最小二乗法により次式を得た。

$$AB_2 = 0.2453AB_1 - 0.0003 \quad (R^2 = 0.997)$$

ここで、AB₁:IR1 の水蒸気による吸光度、AB₂:IR2 の水蒸気による吸光度である。

メタンガスフラックス測定結果：

Fig.4.5-1 にメタンガスフラックスの時系列を示す。縦線は測定中断時間である。Fig.4.5-2 に各容器の温度範囲を示す。pH はメタン発酵に最適な 7~8 であった。実験開始直後は Ex-1 のフラックス

が高く、その後、Ex-2 のフラックスも上昇し、Ex-1 と同等になった。Ex-3 は 5 日目までは室温(約 20°C)に変動がなく、平均フラックスが 0.04ppm/min であったが、5 日目以降気温が上昇してしまい、平均フラックスが 0.11ppm/min(5~12 日目の平均温度：21°C)になった。このことより温度帯により、メタンガス発生の違いがあることがわかった。メタン生成菌は中温域(30~37°C)と高温域(50~55°C)で活動が活発化することが知られており、本研究でも同様の結果となった。また Ex-1 の温度が Ex-2 よりも高く、メタン生成菌の増殖速度が大きいため、実験開始直後は Ex-1 の方が高かったと考えられる。加えて、実験中断時にふたを開けて質量等を確認するため、必然的に容器の温度が低下する時間がある。その結果、発酵活性が悪くなるため、実験再開直後はフラックスが減少しているが、数時間後にはフラックスが前回の実験時の値に戻っている。このことから、温度条件でメタンガスフラックスは一定値をとると考えられた。Ex-1 と Ex-2 では、乾燥バガス 10g 当たりの最大ガスフラックスは 0.45ppm/min であった。8700 分経過後、680% 辺りで Ex-1 のフラックスが減少、また、14500 分経過後、600% 辺りで Ex-2 のフラックスが急に減少した。これは蒸発により質量含水比が減少し、メタン発酵活性が落ちる水分状態になったためであると考えた。

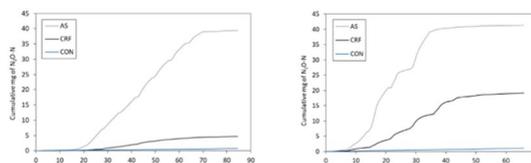


Fig.4.3-3 実験 A(左)および実験 B(右)での NO 吸収波長の積算吸光度の経時変化

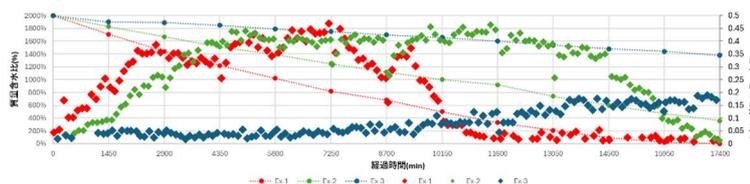


Fig. 4.5-1 質量含水比およびメタンガスフラックスの経時変化

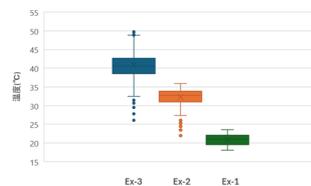


Fig.4.5-2 各実験条件での温度範囲

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Bandara K. M. T. S., Sakai Kazuhito, Nakandakari Tamotsu, Yuge Kozue	4. 巻 12
2. 論文標題 A Gas Diffusion Analysis Method for Simulating Surface Nitrous Oxide Emissions in Soil Gas Concentrations Measurement	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Agriculture	6. 最初と最後の頁 1098 ~ 1098
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/agriculture12081098	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Rathnappriya R. H. K., Sakai Kazuhito, Okamoto Ken, Kimura Sho, Haraguchi Tomokazu, Nakandakari Tamotsu, Setouchi Hideki, Bandara W. B. M. A. C.	4. 巻 12
2. 論文標題 Global Sensitivity Analysis of Key Parameters in the APSIMX-Sugarcane Model to Evaluate Nitrate Balance via Treed Gaussian Process	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Agronomy	6. 最初と最後の頁 1979 ~ 1979
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/agronomy12081979	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Rathnappriya R. H. K., Sakai Kazuhito, Okamoto Ken, Kimura Sho, Haraguchi Tomokazu, Nakandakari Tamotsu, Setouchi Hideki, Bandara W. B. M. A. C.	4. 巻 12
2. 論文標題 Examination of the Effectiveness of Controlled Release Fertilizer to Balance Sugarcane Yield and Reduce Nitrate Leaching to Groundwater	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Agronomy	6. 最初と最後の頁 695 ~ 695
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/agronomy12030695	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Bandara W. B. M. A. C., Sakai Kazuhito, Nakandakari Tamotsu, Kapetch Preecha, Anan Mitsumasa, Nakamura Shinya, Setouchi Hideki, Rathnappriya R. H. K.	4. 巻 11
2. 論文標題 Global Optimization of Cultivar Trait Parameters in the Simulation of Sugarcane Phenology Using Gaussian Process Emulation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Agronomy	6. 最初と最後の頁 1379 ~ 1379
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/agronomy11071379	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Thusitha Bandara, Kazuhito SAKAI
2. 発表標題 Estimation of Nitrous Oxide Surface Emissions by Gas Diffusion Analysis of the Measured Soil Gas Concentrations.
3. 学会等名 22nd World Congress of Soil Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Anushka Bandara, Sakai Kazuhito, Mitsumasa Anan, Shinya Nakamura
2. 発表標題 Examination of N ₂ O Emissions from Nitrogen Fertilizer Applied Red, Yellow Soil in Okinawa, Japan: A Comparison Between Controlled-Release and Conventional Fertilizers.
3. 学会等名 8th Asia Conference on Environment and Sustainable Development (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Anushka Bandara, Sakai Kazuhito, Mitsumasa Anan, Shinya Nakamura
2. 発表標題 Examination of Nitrogen Fertilizers for Nitrous Oxide Emission: A Comparison Between Controlled-Release Fertilizer and Ammonium Sulphate
3. 学会等名 World Congress of Soil Science 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Rathnappriya, R.H.K.; Sakai, K.; Kimura, S.; Haraguchi
2. 発表標題 Graywater Footprint Assessment of Sugarcane Farming: Evaluation of Urea and Controlled-Release Fertilizer for Groundwater Contamination Due to Nitrate Leaching.
3. 学会等名 8th Asia Conference on Environment and Sustainable Development (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Rathnappriya, R.H.K.; Sakai, K.; Kimura, S.; Haraguchi, T
2. 発表標題 Global Sensitivity Analysis of Key Parameters in APSIM Next Generation Sugarcane Model for Nitrate Leaching Via Treed Gaussian Process.
3. 学会等名 22nd World Congress of Soil Science 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	甲斐 貴光 (KAI TAKAMITSU) (00806226)	明治大学・農場・特任准教授 (32682)	
研究分担者	登尾 浩助 (NOBORIO KOUSUKE) (60311544)	明治大学・農学部・専任教授 (32682)	
研究分担者	仲村渠 将 (NAKANDAKARI TAMOTSU) (70537555)	琉球大学・農学部・准教授 (18001)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
タイ	コンケン大学		