

## 農地における温室効果ガス発生因子に関する研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2024-03-27 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 土井,俊弘 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10291/0002000350">http://hdl.handle.net/10291/0002000350</a>

明治大学大学院農学研究科

2023 年度

博士学位請求論文

(要約)

農地における

温室効果ガス発生因子に関する研究

(A study of greenhouse gas emission factors  
in agricultural land)

学位請求者 農学専攻

土井 俊弘

## 第一章 序章

近年、地球温暖化の原因物質である温室効果ガスの大気中濃度が増加しており、地球規模での気候変動が危惧されている。温室効果ガスの放出源の一つとして、水田や畑地といった農耕地土壌が挙げられる。IPCCの第5次評価報告書では、大気中の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)、メタン(CH<sub>4</sub>)および一酸化二窒素(N<sub>2</sub>O)などの温室効果ガス濃度は18世紀半ばから急激に増加し続けており、人間活動の影響が20世紀半ば以降の温暖化の支配的な原因であった可能性が極めて高いと評価されている。日本国内においては、CH<sub>4</sub>とN<sub>2</sub>Oは農用地からの発生割合が高いことが報告されている。2015年度の国内の総CH<sub>4</sub>放出量のうち44%が稲作由来である。

水田土壌中においてCO<sub>2</sub>やCH<sub>4</sub>とN<sub>2</sub>Oといった温室効果ガスは微生物呼吸によって土壌中で生成される。湛水により土壌が還元状態となって、酸化還元電位(Eh)が-200 mV以下でCH<sub>4</sub>還元菌によってCH<sub>4</sub>が生成される。一方で、土壌が酸化状態になると、CH<sub>4</sub>酸化菌によりCH<sub>4</sub>が分解される。N<sub>2</sub>Oにおいては、還元状態では脱窒によって、酸化状態においては硝化によって、それぞれの反応の中間生成物としてN<sub>2</sub>Oが生成される。水田においては、落水時にN<sub>2</sub>O放出量が大きくなることが報告されており、CH<sub>4</sub>およびN<sub>2</sub>O放出はトレードオフの関係にあると報告されている。

近年の先行研究では、土壌中におけるN<sub>2</sub>Oの生成機構を解明するために安定同位体比を用いた解析が用いられている。安定同位体とは同じ元素であるが質量の異なる原子である同位体のうち、安定して変化することのない元素のことである。試料物質中の安定同位体の存在量に対する基準物質中の安定同位体の存在量の比率を安定同位体比と呼ぶ。先行研究によって硝化と脱窒で生成されたN<sub>2</sub>Oは安定同位体比が異なることが報告されている。N<sub>2</sub>OはN-N-Oの順番で並ぶ非対称の直線分子であるため、N<sub>2</sub>Oの分子の中心( $\alpha$ )および末端( $\beta$ )の位置における<sup>15</sup>Nの窒素同位組成および分子内分布を分析することで、N<sub>2</sub>O生成経路を判別することができる(Toyoda and Yoshida, 1999)。この<sup>15</sup>Nの分子内分布をSP(site preference)と呼び、SPは(1)式で表される。

$$SP(\text{‰}) = \delta^{15}N^{\alpha} - \delta^{15}N^{\beta} \quad (1)$$

日本の農用地土壌のうち約19%を占めている黒ボク土(Andisol)における $\delta^{15}N$ とSPを用いたN<sub>2</sub>O生成経路の特定に関する研究はほとんど報告がない。黒ボク土は保肥力が小さくリン吸着能力が大きい特徴があり、多くは畑地として利用されるが、関東から東北地方では水田としての利用も多く見られる。水管理の違いによって黒ボク土中のN<sub>2</sub>O生成経路がどのように変化するかを明らかにすることは、農業分野におけるN<sub>2</sub>O排出を抑制するために重要である。

水田におけるCH<sub>4</sub>放出量の抑制には、中干しや湛水と落水を繰り返す間断灌漑を用いた水管理が有効であったことが報告されている。間断灌漑を取り入れたイネの栽培法の一つとして、SRI農法(System of Rice Intensification)が挙げられる。SRIとは、乳苗を25~40 cm以上の間隔で1株につき1本植えし、移植後早めに間断灌漑を行うことを基本原

則とした農法である。インディカ種を用いた SRI はマダガスカルやインドネシアをはじめ熱帯地方において大幅な増収をもたらしてきた。一方、日本では、コシヒカリを用いた日本での SRI の試験栽培によると、慣行農法と SRI の両者における収量差に顕著な違いは見られなかったものの、有効分げつ数および倒伏・病虫害の少なさが慣行農法と比較して優れていた。先行研究において、生育初期の気温の低さを是正するために、移植後 29 日までを湛水状態としてから間断灌漑を開始し、1 週間の中干しを取り入れた水管理（複合型水管理）でコシヒカリを稚苗移植・疎植・1 株 1 本植えて栽培した実験では、慣行農法と比較して高い収量を得られ、CH<sub>4</sub> および N<sub>2</sub>O を含んだ総合的な温室効果ガス放出量を抑制できたことが報告されている。しかし、複合型水管理を用いて、乳苗移植・疎植・1 株 1 本植えてジャポニカ種を栽培した研究はない。この組み合わせでジャポニカ種を栽培することは、日本での SRI の在り方を確立できる手がかりになると考えられる。

SRI を含めた間断灌漑や中干しおよび落水処理によって、水田土壌が非湛水条件下となると CH<sub>4</sub> 放出量が低減される一方で、N<sub>2</sub>O と CO<sub>2</sub> 放出量が増加されることが報告されている。中干しや間断灌漑ならびに落水処理によって水田土壌表面が露出した非湛水条件下においては、水稻体経由のガス移動だけでなく土壌表面-大気間を経由するガス移動もあわせて評価する必要がある。通常の大気圧条件下では、拡散移動がガス移動経路の大部分を占める。土壌中のガス拡散移動において、降雨による土壌中の体積含水率の増加や、乾燥密度が高い耕盤層が存在することで拡散移動量が低下することが報告されている。乾燥密度とガス放出量の関係について好氣的条件下の畑地や草地を対象として、ジャガイモ畑において乾燥密度の高い土壌で N<sub>2</sub>O 放出量が高く、CH<sub>4</sub> 吸収量が低下すること、畑地土壌の室内実験では乾燥した土壌に水分供給した後に、乾燥密度が低い条件で N<sub>2</sub>O 放出量が増加することがそれぞれ明らかとなっている。一方で水田土壌を対象として、乾燥密度条件の違いが N<sub>2</sub>O だけでなく非湛水条件下の水田土壌から放出される CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> および N<sub>2</sub>O ガス放出量とあわせて関係性を評価した研究例はほとんどない。

水田土壌などの粘質土で乾燥化が進行することにより、表層土壌に亀裂が生じることが報告されている。亀裂の発達に与える影響として予測されるものは、亀裂を經由した水・ガス移動や土壌中の微生物活性ならびに土壌中でのガス生成量の変化である。先行研究において亀裂壁面を經由して下層土壌への水・溶質移動が生じることが報告されている。このことから亀裂の発達は地下排水性を向上させ、保水能力の低下させることが予測される。土壌亀裂の発達がガス・水移動に与える影響を定量的に評価した研究例は少なく、水田土壌での亀裂を通して移動した炭素窒素成分の評価ならびに水田での物質循環のメカニズム解明の一助につながることを期待される。

このように水田土壌から大気へのガス交換においては、土壌中での微生物呼吸や土壌の物理的性質および水管理方法といった複数の要因があわさって土壌中のガス生成および大気-土壌間のガス移動量に効果をおよぼしていることが考えられた。そこで本研究では農地における温室効果ガス発生因子に関して要素ごとに分けて関係性を明らかにすることを目的とした。

本学位論文では、第 2 章では乾燥密度の違いが CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 放出量に与える効果を調査した。第 3 章では水分条件の違いが N<sub>2</sub>O 生成経路に与える効果を調査した。第 4 章では土壌亀裂の存在が CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 放出量に与える効果を調査した。第 5 章では間断灌漑条件の違いが CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 放出量および水稲収量に与える影響を調査した。

## 第 2 章 土壌乾燥密度で変化する CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 放出量

第 2 章では土壌の物理性の 1 つである乾燥密度とガス放出量の関係性について調べた。非湛水条件下の水田土壌において、乾燥密度条件の違いが土壌-大気間における 3 種の温室効果ガス (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) 交換に与える影響を明らかにすることを目的とした。供試土壌には、茨城県つくばみらい市内の水田から採取した灰色低地土を用いた。風乾後に 2.0 mm 篩を通過させた土壌試料を実験に用いた。2.0 mm 篩通過後の風乾土壌をアクリル製カラム (内径 8.5 cm, 高さ 30 cm) に設定した乾燥密度 ( $\rho_d = 0.89, 0.96$  および  $1.05 \text{ gcm}^{-3}$ ) でそれぞれ充填した。本実験ではカラム上部より、500 mL ビーカーとプラスチック製漏斗を用いて設定量の純水を給水強度が  $190 \text{ mm h}^{-1}$  となるように調整して、各カラム地表面に散布した。散布する水分量は深さ 0-13 cm までの間隙飽和度 (Water-filled pore space, WFPS) が 80 % となる量を設定した。純水散布後に地表面に湛水が見られなくなった状態を 0 時間 (0h) とし、測定を開始した。実験期間は 120 時間とし、0~24 時間までは 3 時間おき、24~120 時間までは 6 時間おきに地表面ガスフラックスの測定と土中ガスの採取を行った。カラム実験は 3 反復実施し、反復実験には新しい風乾土壌を用いた。カラムは室温を  $25^\circ\text{C}$  に設定した恒温室に設置して実験を行った。実験中に測定した恒温室内の室温は  $24\sim 26^\circ\text{C}$  の範囲内であった。測定項目は、地表面ガスフラックスと土中ガス濃度、体積含水率および地温であった。相対ガス拡散係数 ( $D_p/D_0$ ) を下記の方法により求めた。Fick の法則より、土壌ガス拡散係数  $D_p$  を求めた (宮崎ら, 2005)。

$$D_p = Q_{effl} \frac{\Delta x}{\Delta C} \quad (2)$$

ここで、 $Q_{effl}$  は地表面ガスフラックス (CO<sub>2</sub>:  $\text{mgC m}^{-2} \text{h}^{-1}$ , CH<sub>4</sub>:  $\mu\text{gC m}^{-2} \text{h}^{-1}$ , N<sub>2</sub>O:  $\mu\text{gN m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ),  $\Delta x$  は深さ 0 cm と 2 cm の距離 (m),  $\Delta C$  は深さ 0 cm と 2 cm の土中ガス濃度差 ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) である。大気中のガス拡散係数  $D_0$  の値は以下の松永ら (1998) の式を用いて算出した。

$$D_0 = AT^B \quad (3)$$

Table 1 Constants in Eq. (1)

	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
<i>A</i>	$5.75 \times 10^{-10}$	$7.04 \times 10^{-10}$	$5.34 \times 10^{-10}$
<i>B</i>	1.81	1.83	1.82

ここで、 $D_0$ は1 atm (101.3 kPa) における空気中のガス拡散係数 ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )、 $T$ はガス温度 (K) であり、 $A$ と $B$ はガス種によって異なる定数である(Table.1). 本研究では (2) と (3) 式を用いて、 $D_p/D_0$ を算出した.

$$\frac{D_p}{D_0} = \frac{1}{AT^B} \left( Q_{effl} \frac{\Delta x}{\Delta C} \right) \quad (4)$$

先行研究より WLR-Marshall model (Moldrup et al., 2000) と D-C GMP model (Deepagoda et al., 2011) を用いて、本研究で提案したモデル式 (4) の $D_p/D_0$ を比較および検証した.

$$\text{WLR - Marshall model : } \frac{D_p}{D_0} = \varepsilon^{\frac{3}{2}} \left( \frac{\varepsilon}{\phi} \right) \quad (5)$$

$$\text{D - C GMP model : } \frac{D_p}{D_0} = 0.1 \left\{ 2 \left( \frac{\varepsilon}{\phi} \right)^3 + 0.04 \left( \frac{\varepsilon}{\phi} \right) \right\} \quad (6)$$

ここで、 $\varepsilon$ は気相率 ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )、 $\phi$ は間隙率 ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) である.

積算ガスフラックスの結果より、高水分条件下では、乾燥密度が高い土壌で  $\text{CO}_2$  および  $\text{N}_2\text{O}$  ガス放出量が低下する傾向を得た. ただし乾燥密度間での統計的な有意差は得られなかった.  $\text{CH}_4$  ガスフラックスはすべての乾燥密度条件下で低い値を示した. ガスフラックス値より算出した $D_p/D_0$ の結果より、式 (4) で算出した $D_p/D_0$  は全体的に低い傾向を示した. 土壌中において、ガス生成とガス消費量を表す吸い込み項  $S$  と土中ガス濃度の時間変化を表す式は下記の式 (7) のように表せられる.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + S \quad (7)$$

$S > 0$  の際にガス生成が生じ、 $S < 0$  の際にガス分解が生じると考える. ここで吸い込み項  $S$  を考慮した土中ガス拡散係数  $D_p$  は式 (8) のように表せられる.

$$D_p = \frac{\partial^2 x}{\partial C^2} \left( \frac{\partial C}{\partial t} - S \right) \quad (8)$$

このとき式 (8) において土壌中でガスが分解された場合、 $S < 0$  となるため、 $D_p$  は  $S = 0$  の時よりも大きくなるので、分解が生じるにも関わらず分解を考慮していない場合、 $D_p$  を小さく見積もってしまう. 計算過程で土壌中におけるガス分解量を考慮していなかったため、算出した  $D_p/D_0$  を小さく見積もってしまったことが考えられた. ガス生成・消費量および  $\text{CO}_2$  や  $\text{N}_2\text{O}$  の基質となる物質の時間変動を明らかにすることとあわせて、乾燥密度条件の違いと相対ガス拡散係数の関係性について明らかにすることが今後必要である.

### 第3章 $\delta^{15}\text{N}$ を用いた黒ボク土水田土壌中での $\text{N}_2\text{O}$ 生成経路の特定

第3章では、 $\delta^{15}\text{N}$  同位体を用いて水分条件の違いが硝化・脱窒による一酸化二窒素 ( $\text{N}_2\text{O}$ )

の生成に与える影響について調べた。本研究では黒ボク土水田土壌を用いて、1)  $\text{N}_2\text{O}$  ガスフラックス、2) 土壌中の硝酸態窒素およびアンモニウム態窒素および 3) 窒素同位体比の変動から水管理の違いによる土壌水分の変化が  $\text{N}_2\text{O}$  生成経路に与える影響を明らかにすることを目的とした。

本研究は神奈川県川崎市多摩区の明治大学生田キャンパス構内の実験室で実施した。供試土壌は同キャンパス内南圃場で水田として利用されていたライシメータ区画より採取した淡色黒ボク土を用いた。淡色黒ボク土は採取後に風乾し、2 mm 篩通過したものを 3 個の 1/2000 アールワグネルポットに同一乾燥密度 ( $\rho_d = 0.65 \text{ g cm}^{-3}$ ) になるように一般的な火山灰起源土壌の水田表土に近似させて充填した。充填した土壌の含水比は  $0.11 \text{ Mg Mg}^{-1}$  であり、充填土壌量は  $8.0 \text{ kg}$  であった。実験は 2017 年 2 月 23 日から 2017 年 4 月 17 日にかけて以下の 3 条件で実施した。土壌水分条件は 1) 間断灌漑条件、2) 湛水条件および 3) 落水条件の 3 条件を設定した。本実験では各ポットの土壌表面に硫酸アンモニア（あかぎ園芸株式会社、窒素全量 21.0%）の施肥を行った。実験期間全体での硫酸アンモニアの施肥量は、1 ポット当たり合計  $2.1 \text{ g}$  ( $\text{N}_2$  施用量  $8.8 \text{ kg} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$  相当) であった。間断灌漑条件の実験開始時（2017 年 2 月 22 日）に  $1.0 \text{ g}$  ( $\text{N}_2$  施用量  $4.2 \text{ kg} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$  相当）、湛水条件の実験開始時（2017 年 4 月 5 日）に  $1.1 \text{ g}$  ( $\text{N}_2$  施用量  $4.6 \text{ kg} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$  相当）をそれぞれ土壌表面に散布した。実験では、地表面ガスフラックス、窒素安定同位体比、表層土壌中の  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$  濃度、体積含水率および地温を測定した。 $\text{N}_2\text{O}$  の  $\delta^{15}\text{N}$  値と SP 値は、 $\text{N}_2\text{O}$  安定同位体比分析計 ( $\text{N}_2\text{OIA-23e-EP Model 914 - 0060}$ , Los Gatos Research) を用いて、採取したガス試料を分析して測定した。

放出した  $\text{N}_2\text{O}$  の  $\delta^{15}\text{N}$  と SP 値と、表層土壌中に存在する  $\text{NH}_4^+$  濃度と  $\text{NO}_3^-$  濃度の時間変動の結果により、間断灌漑条件では、本実験条件では硝化と脱窒による生成量はわずかであった。実験開始から 72 時間後において  $\text{N}_2\text{O}$  フラックスの増加は、SP 値の増加と WFPS 値から、土壌中において硝化による  $\text{N}_2\text{O}$  生成が優勢であったためと考えられた。

湛水条件下では、湛水開始から 24 時間後にかけては、脱窒よりも硝化による  $\text{N}_2\text{O}$  生成量が高く、湛水開始から 24 から 144 時間後にかけて脱窒の  $\text{N}_2\text{O}$  生成量が硝化による  $\text{N}_2\text{O}$  生成量よりも高かったと考えられた。

落水条件下では、硝化による  $\text{N}_2\text{O}$  生成量が脱窒による  $\text{N}_2\text{O}$  生成量よりも高かったと考えられた。

$\delta^{15}\text{N}$  (‰) と SP (‰) に有意な負の線形関係があった。黒ボク土で線形回帰式の傾きが他の土壌に比較して大きいことは先行研究と同様であった。黒ボク土での線形回帰式の傾きが大きいのは、 $\text{N}_2\text{O}$  が生成された際に中心 ( $\alpha$ ) より末端 ( $\beta$ ) へ配置される確率がより高くなったためと考えられたが、なぜそうなるのかは不明であった。黒ボク土での事例が Toyoda et al. (2011) と本研究以外には見当たらないため、今後の更なるデータ収集と微生物群集解析が必要である。

## 第4章 土壌亀裂体積が温室効果ガス放出量に与える影響

第4章では、水田土壌での亀裂形成がガス放出量に与える影響について調べた。本研究では、水田土壌を用いて落水によって土壌表面に形成された亀裂が温室効果ガスフラックスとの関係性を明らかにすることを目的とした。本実験は、神奈川県川崎市多摩区内の明治大学生田キャンパス内南圃場にて水田利用されていたライシメータ区画にて実験をおこなった。供試土壌は灰色低地土であった。実験は2017年9月27日から10月22日にかけての2017年度試験と、2018年12月29日から2018年12月31日にかけての2018年度試験の2つの期間で実施した。どちらの期間も無植生状態で実験を開始した。

CO<sub>2</sub>とN<sub>2</sub>Oガスの積算ガスフラックスは、土壌亀裂の体積の増加とともに放出量も増加することが示唆された。CO<sub>2</sub>とN<sub>2</sub>Oガスフラックスの増加は亀裂体積の増加によってガス移動経路の増加と土壌中の微生物呼吸が促進されたためと推察された。亀裂の形成がガス生成量に与える効果については定量的な評価をすることは今回できなかった。

## 第5章 ライシメータ圃場での水管理の違いがガス生成に与える効果

第5章では、水稻栽培条件下における水管理の違いが温室効果ガス放出量に与える影響を調査した。試験区として、明治大学生田キャンパス南圃場にあるライシメータ（縦2m×横2m×高さ2m）の4区画を使用した。4区画のライシメータの土壌は、地表面から深さ35cmまでは淡色黒ボク土、深さ35~175cmまでが関東ロームであった。各ライシメータは厚さ10cmのコンクリートで区切られているため独立して灌漑および排水が可能な区画であった。本実験ではコシヒカリ（*Oryza sativa* L., cultivar Koshihikari）を用いた。本実験の水管理では、両品種共に中干し期間（移植後62~71日）を除いて常時湛水する湛水区と、湛水と間断灌漑を組み合わせた複合型水管理区（複合区）の2試験区を設けた。1つの試験区に対して2区画のライシメータを用いた。4区画のライシメータでは地下水位を深さ40cm、減水深を2~3cm d<sup>-1</sup>にそれぞれ設定した。ただし、降雨の流入で湛水深が10cmを超えた際は、減水深を5~10cm d<sup>-1</sup>に設定した。実験、地表面ガスフラックス、地温、酸化還元電位、体積含水率、植物体の茎数、草丈、SPAD値および収量構成要素を測定した。

実験結果より、CH<sub>4</sub>およびN<sub>2</sub>Oガスフラックスの変動はEhのみならず、地温、生育状況および施肥に大きく影響を受けることがわかった。温室効果ガスの正味放出量は複合区が湛水区と比較して大幅に小さくなった。

玄米収量は複合区が湛水区と比較して高くなる傾向であると推定された。本研究では、鳥害の影響により各区画で十分な籾数を得ることができなかったため、単位面積当りの玄米収量による比較は困難と判断し、その代替として、鳥害に影響されなかったm<sup>2</sup>当り穂数、登熟歩合および玄米重を乗じた値で比較および検討を行った。m<sup>2</sup>当り穂数×登熟歩合×玄米重が最大となったのは複合区のplot 1で3.35(本 g m<sup>-2</sup>)、最小値を示したのは複合区のplot 2において、1.92(本 g m<sup>-2</sup>)であった(Table 5.3)。また、各処理区のplot 1およびplot 2のm<sup>2</sup>当り穂数×登熟歩合×玄米重を平均すると、湛水区は2.51(本 g m<sup>-2</sup>)、複合区は2.64(本 g m<sup>-2</sup>)となり、玄米収量は複合区が湛水区と比較して高くなることと推定された。2~3日

の間隔で間断灌漑を行うと、根の活性が維持され、登熟が順調に行われることが報告されており、間断灌漑を実施したことが、複合区における収量の向上を促進させたと考えられた。これにより、複合区は温室効果の抑制および収量向上の両立が可能な水管理であったことがわかった。

## 第6章 結論

本学位請求論文の目的は農地における温室効果ガス発生因子に関して、土壌の物理性、土壌中での微生物呼吸および水管理方法といった要素ごとに分けて温室効果ガス放出量との関係性を明らかにすることである。第2章より第5章までの実験で得られた結果より、水田土壌において土壌の物理性および水管理の違いを含む土壌水分条件の違いが、大気-土壌間のガス交換においてガス生成経路とガス移動経路に効果をおよぼすことが考えられた。これらの要素が温室効果ガス放出量に与える効果を定量的に評価し、安定した作物収量と温室効果ガス放出量を低減した持続的な水管理方法を行うことが重要であると考えられた。本研究の成果は畑地や水田土壌において効率の良い持続的な水管理方法への重要な知見につながるものと考えられた。

## 引用文献

Deepagoda TKKC, Moldrup P, Schjønning P, Jonge LWD, Kawamoto K and Komatsu T. (2011) : Density-corrected models for gas diffusivity and air permeability in unsaturated soil. *Vadose Zone Journal*, 10(1): 226–238.

松永直樹・堀守雄・長島昭 (1998) : Taylor 法による気体の相互拡散係数の測定 (第5報, CO<sub>2</sub>-空気系, CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>系, CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>系, CH<sub>4</sub>-空気系, CH<sub>4</sub>-N<sub>2</sub>系, CH<sub>4</sub>-O<sub>2</sub>系, N<sub>2</sub>O-空気系, N<sub>2</sub>O-N<sub>2</sub>系および N<sub>2</sub>O-O<sub>2</sub>系の測定). 日本機械学会論文集 (B編), 64巻 621: 1433-1439.  
宮崎毅・長谷川周一・粕渕辰昭. 土壌物理学. 初版. 80-81. 朝倉書店. 東京. 2005.

Moldrup P, Olesen T, Gamst J, Schjønning P, Yamaguchi T, and Rolston DE. (2000) : Predicting the gas diffusion coefficient in Repacked soil water-induced linear reduction model. *Soil Science Society of America Journal*, 64: 1588-1594.

Toyoda S, Yano M, Nishimura S, Akiyama H, Hayakawa A, Koba K, Sudo S, Yagi K, Makabe A, Tobar Y, Ogawa NO, Ohkouchi N, Yamada, K and Yoshida N. (2011): Characterization and production and consumption processes of N<sub>2</sub>O emitted from temperate agricultural soils determined via isotope ratio analysis. *Global Biogeochemical Cycles*, 25:1-17

Toyoda S and Yoshida N. (1999): Determination of nitrogen isotopomers of nitrous oxide on a modified isotope ratio mass spectrometer. *Analytical Chemistry*, 71(20): 4711-4718