

小麦作付ほ場における排水改良が土壌由来の温室効果ガス発生に及ぼす影響

(株)ズコーシャ ○塩飽宏輔・丹羽勝久・中村 恵
農研機構 北海道農業研究センター 西村誠一・小南靖弘
十勝総合振興局 小林幸司

1. はじめに

十勝地域は国内有数の大規模畑作地帯だが、農耕期間中の降水量が蒸発散量を上回ることにより多くの水分余剰が生じる特徴を持つ(日本土壌肥料学会北海道支部,1999)。さらに、多湿黒ボク土や灰色低地土等の排水不良土壌が農耕地の 35%以上を占めており(北海道立中央農業試験場,2008)、これらの土壌が分布する区域では湿害が作物生産上の問題となる。このことから、これまで排水不良土壌を対象として暗渠排水等の排水改良が実施されており、今後も排水改良による作物生産力の向上が必要とされている(Niwa *et al.*,2008)。

一方、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)は、20 世紀半ば以降の地球温暖化は人為的影響による可能性が極めて高いとしており、気候変動の抑制に向けて温室効果ガス排出量の抜本的、持続的な削減が必要であることを示した(環境省,2014)。また、世界的にみると、農業部門における温室効果ガス排出量は全体の約 14%を占めており(国際農林業協働協会,2015)、この部門においても気候変動の抑制に対して積極的に取り組む必要がある。

畑地土壌から発生する主要な温室効果ガスは二酸化炭素(CO₂)と一酸化二窒素(N₂O)である。その中でも関谷(2010)は、十勝地域の多湿黒ボク土では排水改良による土壌水分の低下を主たる原因として、土壌からの CO₂ 発生量が増加傾向にあることを示した。一方、Kusa *et al.*(2006)は土壌が高水分条件となった際に脱窒反応が促進され N₂O 発生量が増加することを報告したことから、排水改良は N₂O 発生量の減少につながる可能性がある。しかし、現状において排水改良が温室効果ガス発生に与える影響については研究事例が乏しく、その削減ポテンシャルは未知数と報告されている(秋山ら,2011)。

以上のことから、今後、農業基盤整備において作物生産と環境との両立を考える場合、排水改良が温室効果ガス発生に及ぼす影響を明らかにすることは重要な課題である。そこで本報告では、一筆内に排水良好な区域と排水不良な区域を持つほ場を対象とし、排水不良区域に対してカットソイラによる土層改良を施工し、施工前後の温室効果ガス発生状況を比較することにより、排水改良が温室効果ガス発生に及ぼす影響を検討した。

2. 調査方法

(1)調査ほ場の概要

1)試験区の設定

十勝地域池田町において、一筆内で局所的に排水不良を呈しているほ場を調査ほ場として選定し、排水良好区、排水不良区を設定した。なお、農家聞き取り調査から、調査ほ場の排水不良区域では 1990 年代に暗渠排水を整備しているが、近年は排水不良の影響が大きく、排水良好区域に比べて作物収量が 20 %ほど減収することが報告された。

2)作付の変遷

図- 1 に示すように、調査ほ場では平成 26 年秋の菜豆収穫残渣すき込み後、2 作連続で秋まき小麦を作付し、各小麦の収穫後には刈株と根をすき込んでいた。

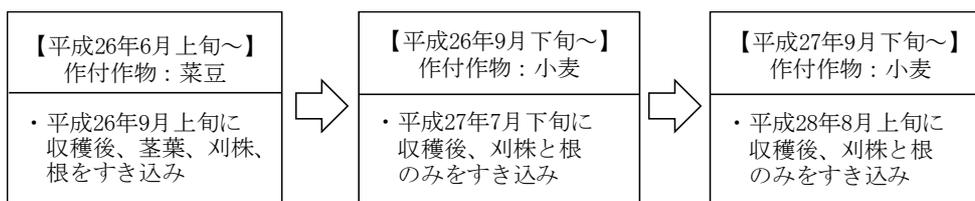


図-1 調査ほ場における作付作物の変遷

(2) 調査ほ場の土壌断面調査

排水良好区、不良区、ならびに排水不良区近傍の暗渠排水施工箇所において、土壌を1mまで掘削し、それぞれの土壌断面形態を観察した。

(3) カットソイラによる土層改良

図-1に示した平成26年9月播種の小麦収穫後、平成27年8月に排水不良区を対象としてカットソイラによる土層改良を行った(写真-1)。カットソイラとは、土壌を切断掘削して溝を作ると同時に、堆肥や収穫残渣をその溝に落とし込むことで心土に資材を埋設する工法であり、既存暗渠の疎水材と接続することにより補助暗渠としての効果を有する。



写真-1 排水不良区における
カットソイラの施工状況

(4) 温室効果ガス測定および土壌調査・分析

1) 対象作付と調査期間

調査期間は図-1に示した2作分の小麦作付期間であり、本報告では1作目の作付期間を「期間1」、2作目を「期間2」とした。なお、期間1は非積雪期のうち159日間、期間2は非積雪期のうち172日間を対象とし、1週間に1回程度の頻度で下記の調査を行った。

2) 温室効果ガスの測定

CO₂とN₂Oを対象として、クローズドチャンバー法によるフラックス(単位時間あたりに単位面積を通過するガス量)の測定を各試験区3反復で実施した。なお、CO₂では直径20cm、高さ29cmの円筒形、N₂Oでは縦30cm、横30cm、高さ32cmの直方形チャンバーを使用した。ガス採取後、CO₂は赤外線CO₂コントローラ(富士電機システムズ株式会社製ZFP9)、N₂Oはガスクロマトグラフ(株式会社島津製作所製GC-2014)を用いて濃度分析し、各ガスフラックスを算出した。

3) 土壌調査・分析

温室効果ガス測定と併せて、CO₂フラックス測定用チャンバーの近傍で、温度計を用いて深度0-5cmの地温を調査した。また、100ccコアを用いて深度0-20cmの不攪乱土壌を採取し、WFPS(土壌の総孔隙に占める液相の割合)を求めた。さらに、各試験区で深度0-15cmを対象に不攪乱土壌を採取し、ブレンナー法による硝酸態窒素の分析に供した。

3. 調査結果

(1) 調査ほ場の土壌断面形態

写真-2には各試験区の土壌断面写真を示す。なお、ここには排水不良区近傍で確認した暗渠排水直上の土壌断面も示している。両試験区とも下層に難透水層を有するが、特に排水不良区はほ場内の地形的下部に位置するため余剰水が浸潤、集積しやすい条件にあり、作土直下からは一時過湿の痕跡である斑紋が明瞭に確認された。また、暗渠排水直上では、疎水材埋戻し部分の直上(深度 40-55 cm)が土壌硬度 25 mm 程度まで堅密化しており、本ほ場に見られる排水不良は、土層の不良化による暗渠機能の低下が主因と考えられた。



写真-2 調査ほ場の土壌断面形態(左：排水良好区、中：排水不良区、右：暗渠排水直上)

(2) カットソイラによる土層改良結果

排水不良区における土層改良の実施後、施工箇所土壌硬度分布を確認した(図-2)。施工箇所の中心部(図中の幅 20~30 cm の部分)では、深度 55 cm までの土壌が硬度 10 mm 以下と膨軟になっており、写真-2 右に示した疎水材直上における土層の不良化が改善され、既存暗渠の機能回復が期待された。

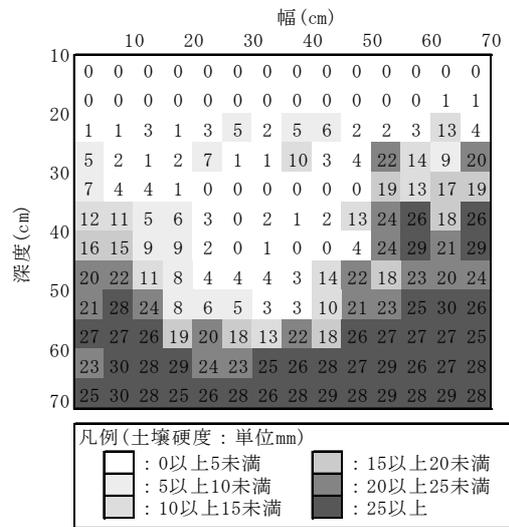


図-2 施工後の土壌断面における硬度分布

(3) 温室効果ガス測定および土壌調査・分析結果

1) CO₂ フラックス、地温、WFPS の推移

図-3には調査期間中における CO₂ フラックス、地温および WFPS の推移に加え、調査ほ場近傍のアメダスにおける降水量のデータを示す。

WFPS の数値は、いずれの試験区でも調査期間を通して大きな降雨が観測された際に上昇し、比較的少雨の期間が続くと低下する傾向にあった。また、その平均値については、期間 1 の排水良好区が 63.6 % であるのに対して不良区が 66.3 %、期間 2 では良好区の 60.4 % に対して不良区が 62.0 % という結果であった。このように、WFPS の平均値は排水不良区におけるカットソイラ施工の有無に関わらず、ほぼ同等の数値となっていた。これは、今回の調査が表層(0-20 cm)を対象にしていたためであり、カットソイラによる土層改良効果は、さらに下層で現れているものと推察された。

次に、排水良好区の CO_2 フラックスは、期間 1 および期間 2 のいずれにおいても 4 月から 6 月にかけて地温の上昇とともに大きくなっており、期間 1 では $9.8 \text{ mgC m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ から $172.3 \text{ mgC m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 、期間 2 では $4.1 \text{ mgC m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ から $356.9 \text{ mgC m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ まで増加した。一方で、地温の低下する 9 月～11 月にかけて、期間 1 の排水良好区では $85.1 \text{ mgC m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ から $44.2 \text{ mgC m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 、期間 2 では $91.4 \text{ mgC m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ から $23.3 \text{ mgC m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ まで減少した。排水不良区における CO_2 フラックスの挙動は、カットソイラ施工の有無に関わらず良好区と同様の傾向であった。

CO_2 フラックスの平均値は、期間 1 の排水良好区が $94.3 \text{ mgC m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ に対して不良区が $107.0 \text{ mgC m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 、期間 2 では良好区 $119.5 \text{ mgC m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ に対して $126.4 \text{ mgC m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ となっており、調査期間を通して試験区間差は不明瞭だった。

なお、期間 1 の 5 月下旬や 7 月上～中旬、または期間 2 の 7 月上～中旬など、WFPS が 30 %～50 % の条件では、地温が $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上と高い場合でも、 CO_2 フラックスの数値は上昇傾向を示さなかった。このほか、期間 1 のうち、消雪直後である 4 月上旬には、地温が $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 未満と低かったにもかかわらず、排水良好区で $156.6 \text{ mgC m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 、不良区で $178.0 \text{ mgC m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ と、 CO_2 フラックスの大きなピークが観測された(図- 3(c)黒矢印)。

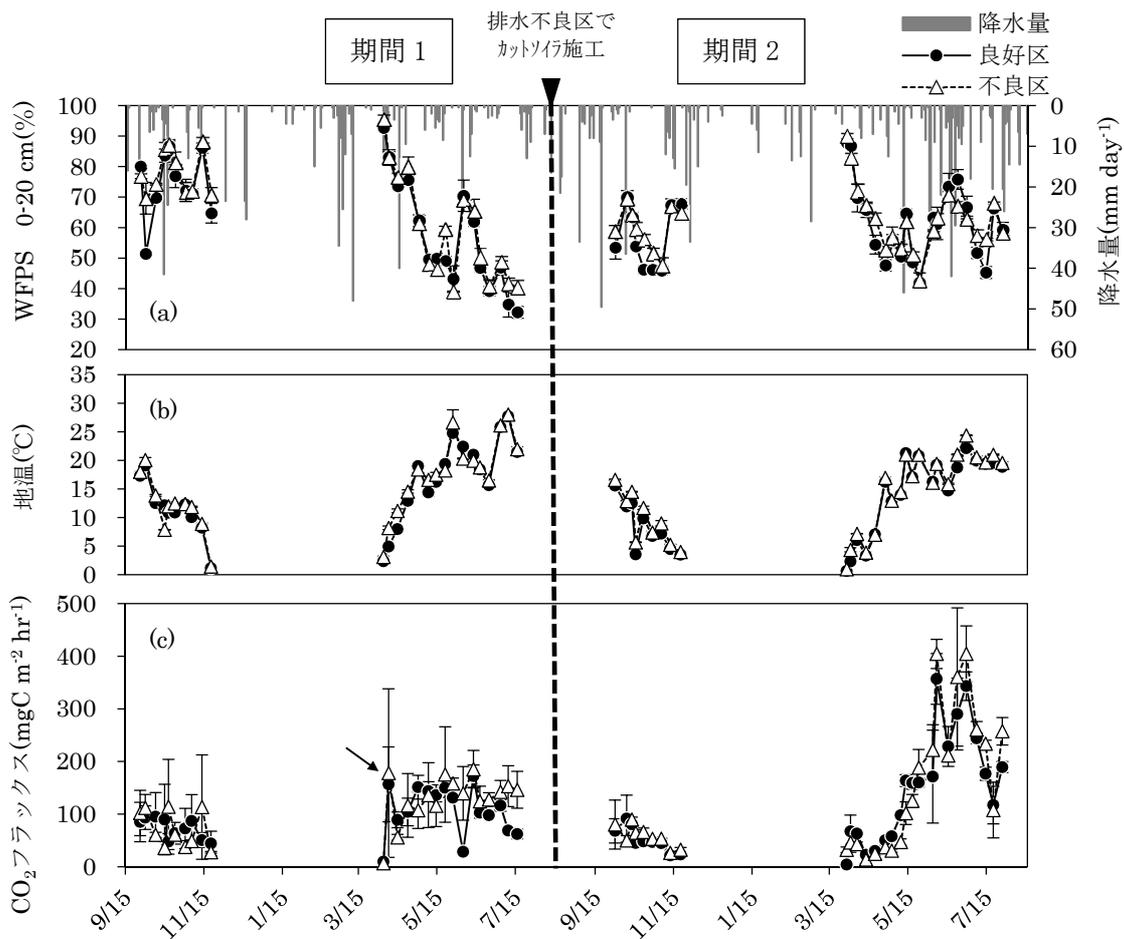


図- 3 WFPS(a)、地温(b)、 CO_2 フラックス(c)の推移
(図中のエラーバーは標準誤差、黒矢印は消雪直後に生じた CO_2 フラックスのピークをそれぞれ示す)

2) N₂O フラックス、WFPS および土壌無機態窒素の推移

図-4には調査期間中の N₂O フラックス、WFPS および硝酸態窒素濃度の推移、アメダスの降水量データ、ならびに施肥作業の実施日を示す。

上述の通り、WFPS は降雨に伴って上下し、調査期間中、その平均値には明瞭な試験区間差がなかった。硝酸態窒素濃度は、調査期間を通して施肥作業の後に高まっていた。

排水不良区における N₂O フラックスのピークは、期間1の10月下旬や4月中旬のように、硝酸態窒素が比較的高濃度であり、かつ降雨の影響で WFPS が上昇した直後に現れた(図-4(c)黒実線矢印)。排水良好区でも不良区と同様の傾向であったが、この時のピークの大きさは、10月下旬では排水良好区が 0.23 mgN m⁻² hr⁻¹ であったに対して不良区が 0.53 mgN m⁻² hr⁻¹、4月中旬では良好区 0.12 mgN m⁻² hr⁻¹、不良区 0.35 mgN m⁻² hr⁻¹ と、いずれも不良区が良好区を大きく上回った。

また、期間1の4月上旬や期間2の3月下旬など、消雪直後で WFPS が 90% 前後と高土壌水分条件にある時には、施肥前で硝酸態窒素濃度が低い場合にも両試験区でフラックスのピークが生じた(図-4(c)黒破線矢印)。この時のピークの大きさは、期間1の4月上旬では排水不良区が 0.32 mgN m⁻² hr⁻¹ と良好区の 0.07 mgN m⁻² hr⁻¹ より明らかに大きかったのに対して、期間2の3月下旬では良好区および不良区がそれぞれ 0.59 mgN m⁻² hr⁻¹、0.56 mgN m⁻² hr⁻¹ と同程度だった。

一方、期間1の5月中旬~6月中旬、もしくは期間2の10月中旬~11月上旬や4月中旬~5月上旬のように、硝酸態窒素が高濃度にある条件でも、WFPS が常時 70% を下回っている場合には、降雨後にもフラックスのピークは確認されなかった。

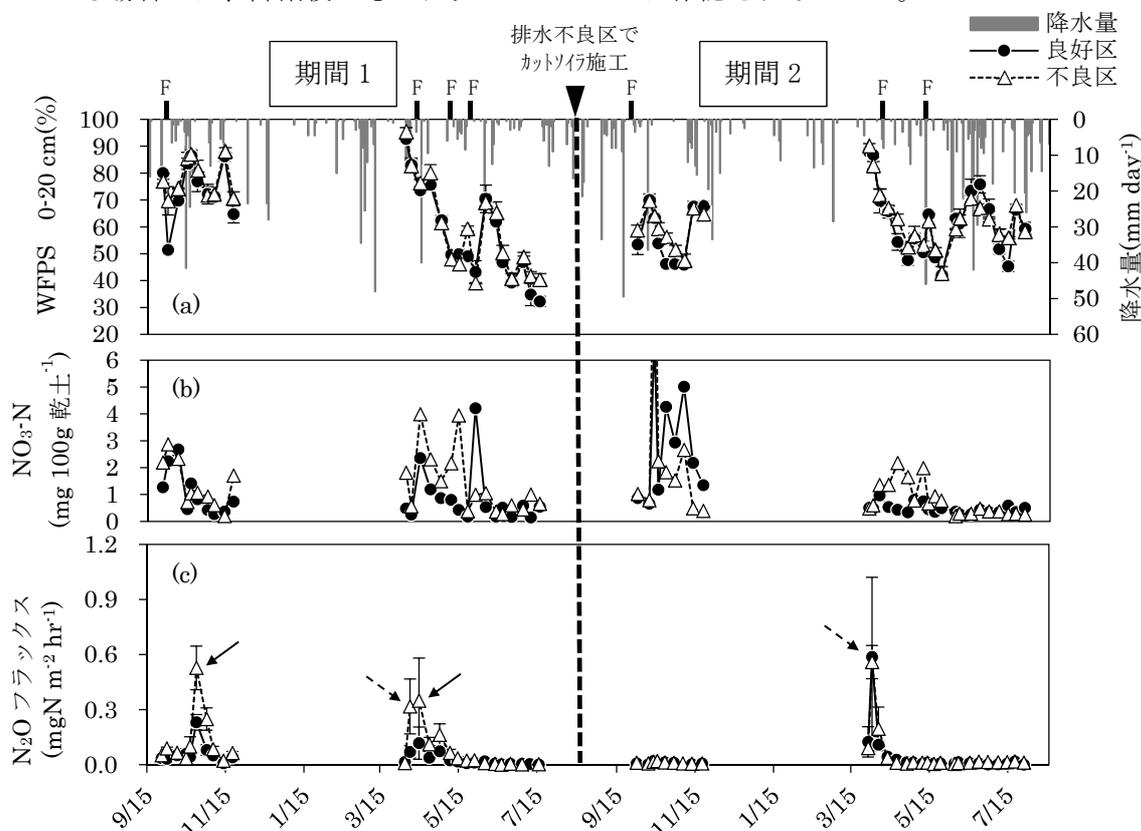


図-4 WFPS(a)、硝酸態窒素濃度(b)、N₂O フラックス(c)の推移

(図中の“F”は施肥作業の実施日、エラーバーは標準誤差、黒実線矢印は降雨後の N₂O フラックスのピーク、黒破線矢印は消雪直後の N₂O フラックスのピークをそれぞれ示す)

(4) 調査期間中の温室効果ガス発生量

図-5には期間1、期間2におけるCO₂発生量、N₂O発生量、ならびにそれらの合計量を示す。なお、温室効果ガスの合計量を積算する際、N₂O発生量は地球温暖化係数(CO₂を1とした場合のN₂Oの温室効果；298)を用いてCO₂相当量に換算した。

CO₂発生量は、期間1では排水良好区が3.78 tC ha⁻¹、不良区が4.25 tC ha⁻¹、期間2では良好区が5.24 tC ha⁻¹、不良区が5.55 tC ha⁻¹であった。このように、CO₂発生量については排水不良区に対する土層改良実施前後で、明瞭な試験区間差がなかった。

一方、N₂O発生量は、期間1では排水不良区が3.70 kgN ha⁻¹と良好区(1.58 kgN ha⁻¹)の2倍以上であったのに対して、期間2では排水良好区が1.17 kgN ha⁻¹、不良区が1.33 kgN ha⁻¹と同程度であった。

調査期間中の各温室効果ガス発生量を合計すると、期間1の排水良好区および不良区でそれぞれ14.59 tCO₂ ha⁻¹、17.30 tCO₂ ha⁻¹であり、期間2ではそれぞれ19.77 tCO₂ ha⁻¹、20.98 tCO₂ ha⁻¹となった。また、温室効果ガス発生量の合計に占めるN₂Oの割合を算出したところ、期間1の排水不良区が10.0%と良好区(5.1%)の2倍程度であったのに対して、期間2では3.0%となり良好区(2.8%)と同等の数値になった。

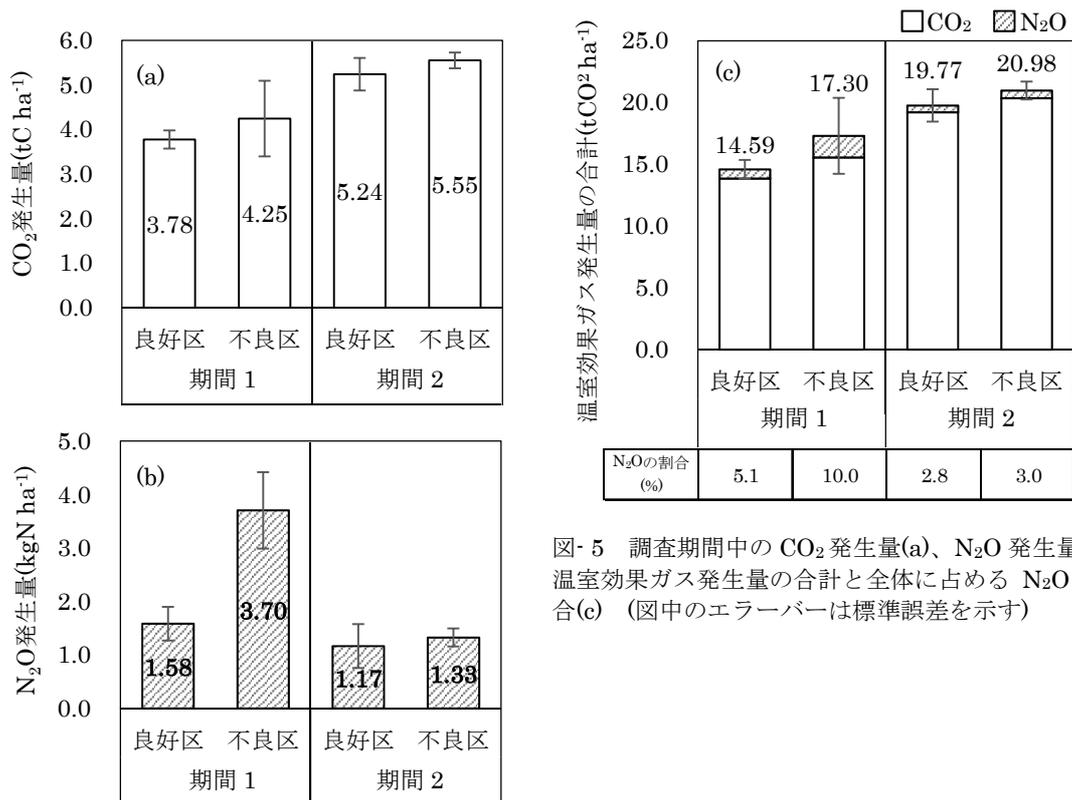


図-5 調査期間中のCO₂発生量(a)、N₂O発生量(b)、温室効果ガス発生量の合計と全体に占めるN₂Oの割合(c) (図中のエラーバーは標準誤差を示す)

4. 考察

先述の調査結果が示すように、CO₂発生は地温や土壌水分、N₂O発生は土壌水分や土壌中の硝酸態窒素濃度等に影響を受ける。このことから、これら温室効果ガスの発生量は、その年の気温や降水量等の気象条件、施肥管理の状況等により年次変動する。そのため、排水不良区におけるカットソイラ施工前後のガス発生量の単純な変化から、土層改良が温

室効果ガス発生に与える影響を評価することはできない。

そこで、排水良好区に対する不良区の各温室効果ガス発生量の比を期間 1 および 2 でそれぞれ算出し、その比の変化に基づき、気象や施肥管理条件の年次変動を棄却したうえで土層改良の影響を検討した。

図- 5 に示した各試験区の CO_2 および N_2O 発生量の積算値をもとに、排水良好区を 1 とした場合の不良区の各温室効果ガス発生量を期間 1、期間 2 のそれぞれで算出した(図- 6)。

その結果、 CO_2 発生量の比は期間 1、2 でそれぞれ 1.12、1.06 と大きく変化しなかったのに対して、 N_2O 発生量の比は、土層改良前の期間 1 では 2.34 であったのが改良後の期間 2 では 1.14 となり、明らかに低下していた。このことから、排水不良区で実施したカットソイラによる土層改良は、主に N_2O 発生量の削減に寄与したと考えられた。

以上のように、1 ほ場における成果ではあるが、カットソイラを用いた土層改良は温室効果ガス削減につながる可能性が示唆された。しかし、図- 3 に示すように、表層(0-20 cm)における WFPS の数値は、カットソイラ施工の有無に関わらず両試験区においてほぼ同等の数値で推移した。このことから、土層改良による N_2O 削減効果は、主に心土の排水改善によるものではないかと考えられた。

5. おわりに

上述のとおり、排水不良区的良好区に対する温室効果ガス発生量の比は、 CO_2 では排水不良区の土層改良前後において同等であったのに対して、 N_2O では改良前から改良後にかけて半減した。このように、今回の調査においては、カットソイラによる土層改良が N_2O 発生量の削減に貢献しており、排水性の改善は作物生産性の向上と同時に地球温暖化の緩和にも寄与する可能性が示唆された。

ただし、本報告における N_2O 発生は土壌からの直接排出のみに着目したものであり、排水性の改善が間接排出に与える影響については考慮していない。 N_2O の間接排出については、①排水中に過飽和で溶存している N_2O が地表水として大気に触れた段階で脱ガスとなる時(暗渠排水や河川への流出)、②排水が河川を流下する間、③排水が河口域にある時、のそれぞれで発生するものとされている(Sawamoto *et al.*,2005)。このうち、暗渠排水等の排水改良は①の段階に影響する可能性が考えられる。つまり、余剰水に含まれる N_2O が N_2 に還元される前に暗渠排水を通してほ場外へと排出されるため、①の段階の排出係数が排水改良前よりも大きくなることが予想される。

以上のことから、今後は N_2O 間接排出にも着目したうえで、排水改良が温室効果ガス発生に与える影響を検討していくことが重要と考えている。

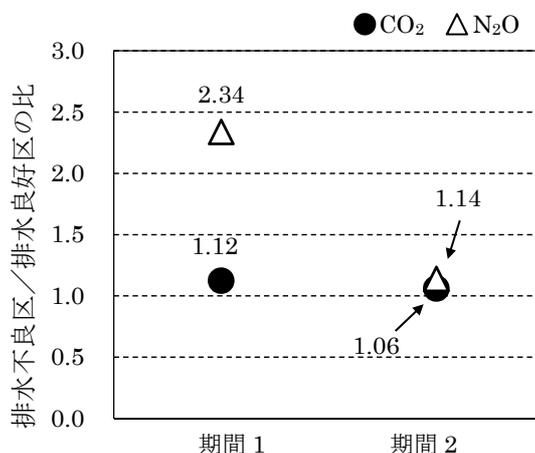


図-6 期間 1 および期間 2 における排水不良区と良好区の温室効果ガス発生量の比

参考文献

- 秋山博子・澤本卓治・八木一行(2011) : 窒素循環と土壌からの N₂O 発生, 化学と生物, **49**, 335-339.
- 北海道立中央農業試験場(2008) : 北海道土壌区一覧(改訂版), 北海道立農試資料, **37**, 159.
- 環境省(2014) : IPCC 第 5 次評価報告書の概要-第 1 次作業部会(自然科学的根拠)-.
- 国際農林業協働協会(2015) : 世界食糧農業白書 2014 年報告, 30.
- Kusa K, Hu R, Sawamoto T, Hatano R(2006) : Three years of nitrous oxide and nitric oxide emissions from silandic andosols cultivated with maize in Hokkaido, Japan. *Soil Sci. Plant Nutrition.*, **52**, 103-113.
- Niwa K, Yokobori J, Seino N, Kikuchi K, Hongo C(2008) : Effect of soil types on the time-course of changes in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) productivity in Tokachi district, Hokkaido, Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **54**, 928-937.
- Sawamoto T, Nakajima Y, Kasuya M, Tsuruta H and Yagi K (2005): Evaluation of emission factors for indirect N₂O emission due to nitrogen leaching in agro-ecosystems, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. **32**, L03403, doi:10.1029/2004GL021625.
- 関谷長昭(2010) : 畑作地帯における多湿黒ボク土の土壌有機物動態, 1-67 北海道大学大学院農学院 環境資源学専攻 地域環境学講座 土壌学分野 博士後期課程.