



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	凍結融解土壌の亜酸化窒素生成・排出機構にせまる
Author(s)	柳井, 洋介; 根本, 学; 岩田, 幸良 他
Citation	低温科学, 70, 145-151
Issue Date	2012-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/49061
Type	departmental bulletin paper
File Information	LTS70_020.pdf



凍結融解土壌の亜酸化窒素生成・排出機構にせまる

柳井 洋介^{1),2)}, 根本 学³⁾, 岩田 幸良¹⁾, 廣田 知良³⁾

2011 年 12 月 11 日受付, 2012 年 1 月 18 日受理

季節凍土では融雪期に短期集中的な亜酸化窒素 (N_2O) の排出が見られる。著者らはその現象を積雪操作実験で再現することに成功した。本稿では 2008 年 11 月から 2010 年 10 月にわたる野外観測の結果に基づいて、積雪深・土壌凍結深と N_2O の土壌中での蓄積・土壌から大気への N_2O の排出の関係を考察するとともに、未解決の課題を提示する。

Possible processes of N_2O production and emission on seasonally frozen soil

Yosuke Yanai^{1,2}, Manabu Nemoto³, Yukiyo Iwata¹, Tomoyoshi Hirota³

Seasonally frozen soil has substantially high N_2O emission under thawing conditions. We succeeded in *in situ* observation of the N_2O emissions in a snow-cover manipulation experiment. Here, we discuss relationships among snow-cover height, soil frost depth, N_2O concentration in soil and process of N_2O release from soil to the atmosphere. In addition, unsolved issues are presented.

キーワード：土壌凍結, 亜酸化窒素 (一酸化二窒素, N_2O), 積雪, 融雪, 野外観測
Soil freezing, nitrous oxide, snow-cover, snowmelt, field observation

1. はじめに

大気中の亜酸化窒素 (N_2O) 濃度は 1750 年には約 270 ppbv であったが、過去 40 年間で急激に濃度が上昇し、2006 年には 320 ppbv にまで達している (Ishijima et al., 2009)。 N_2O は温室効果ガスで二酸化炭素の約 10% に相当する 0.12 W m^{-2} の放射強制力を有すると同時に成層圏オゾン層の分解に関与する物質でもあり (Ravishankara et al., 2009)、主な発生源は陸域である。産業革命以降の大気中 N_2O 濃度の上昇は人間活動の活発化に大きく依存しており、特に農業生産の拡大に伴う窒素肥料の利用が主たる原因であると考えられている。増加する人口を支えるためには食糧生産を維持・増進していくことが要求されるが、そのことは同時に土壌から

の N_2O 排出量の増加を促すことにつながる。したがって、土壌における N_2O 生成・排出メカニズムの解明は、地球温暖化の進行と成層圏オゾン層の破壊といったリスクを低減させ、食糧生産を持続させる技術の確立に向けて必要不可欠である。

一般に土壌中において N_2O は微生物によって生成される。微生物による N_2O の生成には 2 つの異なる反応経路が知られている。ひとつは窒素肥料の有効成分であるアンモニアが硝酸イオンに酸化される反応 (硝酸化: $\text{NH}_3 \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$) で反応副生成物として生じる経路、もうひとつは、硝酸イオンが酸素 (O_2) の代わりに呼吸媒体として利用される反応 (脱窒: $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$) で反応中間物として生じる経路である。前者は酸素 (O_2) が十分に存在する条件で、後者は O_2 濃度が低下した条件で生じる、いずれも微生物の呼吸反応である (Zumft, 1997)。これら微生物反応は温度に伴って高くなることが容易に想像されるが、土壌からの N_2O 排出量が最も多いのは必ずしも夏季ではないとする報告が 1970 年代後半からなされていた。それは、晩冬から初春にかけて年間最大放出速度が観測される、という事実である (Duxbury et al., 1982)。ただし、その原因として土壌の凍結融解との関連が指摘され、これは人為影響によるものではなく自然起源であるとの見解から、当時は重要視されなかった。

1) 農研機構北海道農業研究センター芽室研究拠点; 責任著者 柳井洋介

2) 現: 農研機構野菜茶業研究所つくば野菜研究拠点

3) 農研機構北海道農業研究センター

¹ NARO Hokkaido Agriculture Research Center. Kasai, Hokkaido, Japan.
E-mail: yosuke@affrc.go.jp

² Present address: NARO Institute of Vegetable and Tea Science. Tsukuba, Ibaraki, Japan.

³ NARO Hokkaido Agriculture Research Center. Sapporo, Hokkaido, Japan.

ところが1990年代以降, 土壌の凍結融解と関連した N_2O の排出は「施肥窒素が残留した結果として生じている」とする認識が示され (Flessa et al., 1995), 農業活動の環境影響評価の一環として観測事例が急増した. その中で最も典型的なのは, 年間排出量の70%相当量の N_2O が凍結融解期に集中したとする Röver et al. (1998) の観測結果である. しかし, 当時の研究では土壌の凍結融解がもたらす N_2O 排出を気象要因や土壌養分動態とで記述・整理することを試みている段階であり, 凍結融解のこういった側面が微生物に影響を及ぼし, 多量の N_2O の生成と排出を引き起こすのかは明らかになっていなかった. また, N_2O 排出量の削減技術には, ①窒素肥料の使用量を減らすことと②硝酸化を抑制する資材 (石灰窒素やジシアングリアミド) を散布すること以外は考えられていなかった.

土壌の凍結融解がもたらす顕著な N_2O 排出は十勝地方においても起こっている (Koga et al., 2004). 日本を代表する大規模畑作地帯である北海道十勝地方は, 小雪・厳寒であるため土壌凍結地帯である. これまで, 土壌凍結は「作物生育期間を短くする」「作物の越冬を困難にする」「融雪水が地表面に滞留するために, 土壌浸食や越冬作物への湿害を引き起こす」などといった農業における‘負’の要素と考えられていた. ところが, 1986年以降, 十勝地方では土壌の凍結深が浅くなりつつあるが (Hirota et al., 2006), このことが生産を好転させたかというそうでもなく, バレイショの生産現場では「野良イモの発生」すなわち越冬イモの雑草化という新たな問題が生じた (Hirota et al., 2011). そのため, 現在では十勝の農業に土壌凍結は必要不可欠であるという認識が生まれている. すなわち, 土壌凍結がもたらす顕著な N_2O 排出の抑制は総 N_2O 排出量の削減に貢献することが期待されるが, そのために土壌凍結を抑制することは地元の農業生産に不利益をもたらす可能性がある.

土壌凍結地帯における N_2O 排出量を正確に推定し, 地元の農業生産に悪影響を及ぼすことなく N_2O 排出量を削減するためには, 土壌中での生成・蓄積プロセスの理解が不可欠である. そのためには土壌から大気へ排出されるに際し N_2O がいつ・どれくらい土壌中に存在しているかを知ることが重要と考えられる. しかし, 既存の土壌ガスを採取し濃度を観測する方法では, 土壌に挿入したパイプが熱を伝えることでパイプ周囲の地温が変化してしまうこと, 土壌気相の吸引に伴い大気空気を土壌中に引き込むこと, 土壌水を採取してしまうこと, これらの要因の他にも同一圃場内で採取するとき大きなバラツキに直面するなど, 方法・解釈のいずれにも問題があった. そこで筆者らは既往の研究 (Kammann et al., 2001; Syväsalto et al., 2004) に倣い, ガス透過性を有するシリコンチューブを拡散チャンバーとして土壌中に長く水平に埋設することで凍結融解条件にある土壌からガ

スを平均的に採取し N_2O 濃度のモニタリングを実施することとした. また, シリコンチューブで作成したプローブにセンサーを搭載し, N_2O 生成反応の主たる支配要因である土壌ガス中 O_2 濃度の自動連続計測を行った. これらのモニタリングをクロズドチャンバー法による N_2O の土壌から大気への排出速度の計測と並行して, 積雪深・土壌凍結深の異なる試験区で実施した. 本報では, 凍結融解時の土壌中での N_2O 生成反応は雪水管理で制御できる可能性を提示し, あわせて今後ありうる研究の展望について記す.

2. 観測成果の概要

北海道農業研究センター芽室研究拠点では, 2004年10月から微気象連続観測システムが稼動しており, 隣接した区画で除雪により積雪深が自然条件と異なる状況を創出し (除雪区), 土壌凍結の深さ・状態を温度および液体の水の量から評価し比較することができる (Iwata et al., 2010). 本研究では, そのシステムの周辺に, 広く一般になされている土壌から大気への N_2O 排出速度の測定地点を構え, 併せて土壌ガス中の N_2O 濃度を評価する観測区を設けた (図1). また, 土壌凍結が発達しなければ消雪後に N_2O 排出が生じないことを検証する目的で, 厳冬期の積雪深と土壌凍結深は自然状態の対照区と同等であるが, 融雪材 (木炭) 散布により消雪日が早く訪れるように処理した試験区 (融雪区) を2008年9月に新設した (図2). この3試験区 (対照区・除雪区・融雪区) を多雪地帯に立地する北海道農業研究センター本所 (札幌) にも2008年9月に設置し, 多雪地帯と土壌凍結地帯における比較観測とした.

2008年11月から観測を始め, 2009年10月までの観測結果は既に *Soil Biology and Biochemistry* 誌に掲載されている (Yanai et al., 2011). その概要を表1に示す. 年間 N_2O 排出量に占める11月から4月の寒冷な半年間の排出量の割合が高かったのは, 最大土壌凍結深が15 cm以上であった札幌除雪区, 芽室対照区および除雪区で50%を超えた. 換言すると, 融雪材 (木炭) の散布により消雪日を早めることはできたが, 融雪区では土壌凍結深が浅かったため, 消雪・融凍後の N_2O 排出はほとんど見られなかった. 芽室除雪区では2回の除雪作業で積雪深が下げられ土壌凍結深が最も発達し, 2月に41 cmの年最大土壌凍結深が観測された. 土壌ガス中 N_2O 濃度も芽室除雪区で最も高濃度となり, O_2 濃度は最も低い値が観測された. 札幌除雪区では7回除雪作業を行ったが, 気温が芽室ほど低くなかったため土壌凍結深は最大でも19 cmであった. ただし, 芽室除雪区ほどではなかったものの土壌ガス中 N_2O 濃度の上昇や O_2 濃度の低下は札幌除雪区でも見られた.

また, 凍結融解期の土壌からの N_2O 排出速度を詳細

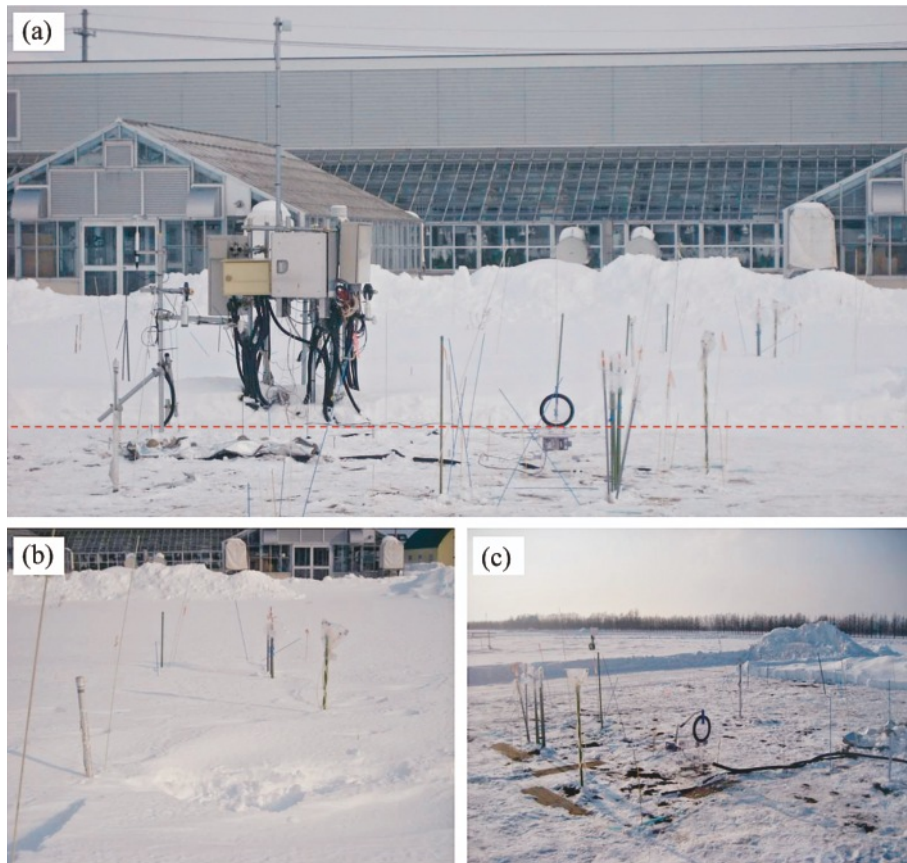


図1：観測を行った試験区（約10 m 四方）の配置．(a)中の赤点線より奥が対照区(b)，手前が除雪区(c)．

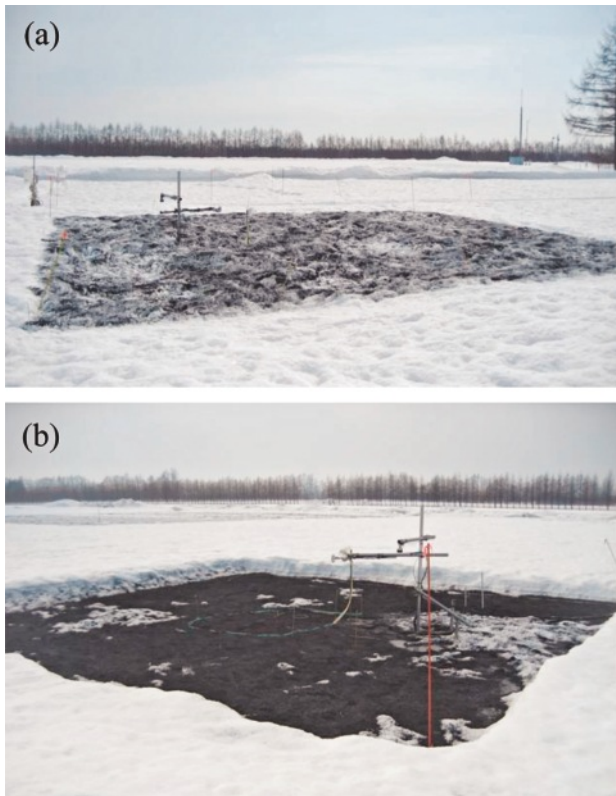
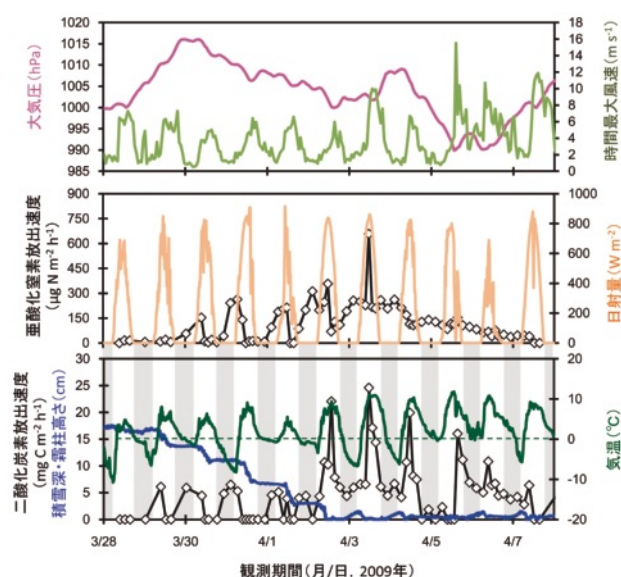


図2：融雪材散布試験区（2009年3月）．(a)散布直後，(b)散布10日後．

に観測するために、自動開閉チャンバー（北海道大学低温科学研究所，札幌市）と自動ガス採取装置（グリーンブルー株式会社，横浜市）を組み合わせ現場でのガスサンプリングを自動連続化させ、芽室除雪区で運用した（未発表）．最も高頻度の時では日中に2時間間隔（9時，11時，13時，15時）と夜間に4時間間隔（18時，22時，2時，6時）の1日8回の観測を行った．このような人力では捉えきれないような高頻度のサンプリングにより，①消雪前には湛水が凍結している夜間から早朝にかけて「ガス漏れ」のような排出が N_2O と CO_2 に共通に見られ，②その後は CO_2 排出速度が気温の低い夜間に下がり気温の高い日中に上がるといった明瞭な日変動を示したのに対して N_2O 排出速度にはそのような日変動は見られず，昼夜を問わず1週間以上にわたって減衰しつつ排出が継続していく様子が観察された（図3）．4月3日の11時にスパイク様の N_2O 排出速度の変化が見られるが，このとき大気圧の急激な低下は特に観測されなかった．このことから，メタンで知られるような溶存ガスの気泡化と浮力による大気への移動（Tokida et al., 2005）は起きていないと考えられる．一方で，瞬間最大風速が時間を経るごとに高くなる時ではあったことから， CO_2 で知られる風がもたらす土壌ガスの移流（Ohkubo et al., 2011）を捉えた可能性，もしくは土壌水分の選択流により発生する土壌孔隙内の圧力

表1: 2008年11月から2009年10月の観測結果: Yanai et al. (2011) の要約

	札幌			芽室		
	対照区 S-CO	除雪区 S-SR	融雪区 S-SM	対照区 M-CO	除雪区 M-SR	融雪区 M-SM
2008年12月から2009年2月の平均気温 年間 N_2O 排出量に占める	0	-2.5 75	3	58	-6.3 85	20
11月から4月の排出量の寄与 (%)						
最大積雪深 (cm)	83	48	86	72	36	69
最大土壌凍結深 (cm)	3	19	3	17	41	12
消雪日	3月30日	3月19日	3月25日	4月3日	3月24日	3月18日
融雪期最高土壌ガス N_2O 濃度 (ppm)						
10 cm 深	0.46	12.0	0.42	5.7	45.9	0.8
20 cm 深	0.64	13.5	0.73	5.2	69.0	0.4
30 cm 深	0.97	15.5	0.80	6.1	53.8	0.5
40 cm 深	0.97	13.4	0.96	5.3	35.4	0.4
融雪期最低土壌ガス O_2 濃度 (%)						
10 cm 深	19.6	17.2	19.4	19.3	12.2	20.0
30 cm 深	19.9	17.6	19.5	19.5	18.7	19.6

図3: 芽室除雪区における土壌からのガス放出速度の日周期の観測。日付の付されているところが0:00に相当する。影は夜間(日射量が0 W m^{-2})を示す。試験区内反復はなし。

分布の変化のような局所的かつ不均一な現象によりガスの移動が生じた可能性が考えられた。

3. 凍結融解土壌において短期集中的な N_2O 排出が生じる要因

凍結融解時に土壌中で見られた高濃度の N_2O は化学反応ではなく微生物反応で、主に脱窒反応を経て生成されているようであることは同位体比の解析で別途明らかにしている (Yamazaki et al., 2011)。本稿では、どのようにして N_2O の生成条件が成立しているか、そして生成された N_2O がどのようにして大気へ排出されているかに着目して議論を行う。

まず、土壌は積雪によって保温されていて気温から想像されるほど冷えないことは、土壌凍結深の年々減少だ

けでなく N_2O の土壌中での生成にも関与している可能性がわかった (図4)。除雪によって土壌凍結の発達が促進されるのは、積雪深を20 cmより浅くすることで雪の断熱作用を弱め、大気の冷熱が土壌へ伝わりやすくなるためである。つまり、積雪があることで気温がある程度上昇し消雪するまで、土壌は気温から想像されるほど冷えることなく「暖かい」状況に維持される。研究開始時には、土壌が凍結すると土壌中に液体の水が少なくなり浸透圧が高まって微生物の細胞死が誘発されやすくなることが (Jefferies et al., 2010), N_2O 生成に関与する微生物(脱窒菌)への有機物の供給となる重要な過程であると考えていた (柳井ほか, 2007)。しかし、このようにして生じる基質の増加と共に土壌が冷え過ぎないことも必要であり、それ以上に融雪期に大気から土壌への O_2 拡散速度が土壌中での微生物による O_2 消費速度より遅くなり土壌ガス中 O_2 濃度が下がることが N_2O 生成反応(脱窒)を引き起こす要因として最も決定的であると気付いた。なぜなら、 O_2 濃度が低下しなければ、いかに土壌中に有機物と硝酸イオンがあっても脱窒反応は起こらないためである。この、大気から土壌へ O_2 供給を抑制する「壁」の実態について、これまで、土壌凍結層か積雪層であるとして議論が展開されて

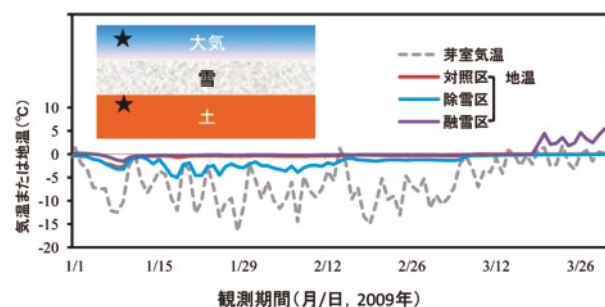


図4: 気温および積雪操作試験区の5 cm 深地温の日平均値の推移。

きた．筆者は室内実験で雪を考慮することなく土壌の凍結融解のみで N_2O 生成を再現することができていたため、「壁」は土壌凍結層であると考えていた．しかし、観測を通じて、融解が進行しつつある凍結層と積雪層の間にある湛水が「壁」の実態であると考えに至った．水中でのガスの拡散係数は空気中のガス拡散係数より 10000 倍も小さく (Campbell, 1987), 地表面を覆うように存在していれば拡散障壁として機能しても不思議なことではない．特に土壌凍結が 20 cm 以上発達した場合には融雪水の浸透障害が生じることが指摘されており (Iwata et al., 2008; Iwata et al., 2010), 氷で土壌の孔隙が塞がれると同時に融雪水・融解水が土壌中に浸透できず地表面がシールされる状況が、まさに「壁」の出現に相当する．地表面に雪がなければそれは水たまりとして見ることはできるが、融雪が進行している状況では、地表面湛水は雪に邪魔されてしまうため認識することができない．このことが「壁」の実態に対する理解の遅れを招いたと想像される．

数値に示しにくいことであるが観測を行った現場の様子を土壌ガス濃度の推移と併せて示す (図 5)．図 2 の下段は芽室融雪区の消雪日の様子であるが、土壌は湿ってはいるものの地表面に湛水は見られなかった．それに対し、芽室除雪区では消雪と共に大きな水たまりが見え (図 5 の①②)、夜間・日中の気温変化に伴って凍結と融

解を繰り返した (図 5 の③④⑤)．図 5 の①は 2009 年 3 月 20 日のもので、10 cm 深の O_2 濃度は 17% ほどで大気レベルより下がっていた．これは 3 月 4 日と 15 日の降雨後から徐々にみられてきた傾向である．その後、湛水がひくに伴って 10 cm 深の O_2 濃度は徐々に上昇し N_2O 濃度の上昇も頭打ちとなり、湛水が完全にひいてから約 2 日後の 4 月 2 日の手動観測で、年最大排出速度 (約 $1500 \mu\text{g N}_2\text{O-N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) が観測された (図 5 の⑥⑦⑧; Yanai et al., 2011)．土壌ガス中 N_2O 濃度の低下と土壌ガス中 O_2 濃度の上昇は大気が土壌中へ侵入したことを示している．最大 N_2O 排出速度を観測して 6 日が経過して O_2 濃度は大気レベルに戻ったが N_2O 濃度は減衰しつつも大気レベルよりはまだ高いレベルにあり、地表面からの N_2O 排出は続いていた (図 5 の⑨)．このようにして、 O_2 濃度が低下して脱窒による N_2O の生成が進行していたであろう時期は融雪期後半にある一方、 O_2 濃度が大気レベルへと戻っていて N_2O 生成は起きていてもかなり弱いだろう時期に地表面からの N_2O 排出が顕著に見られた．すなわち、土壌中での N_2O 生成と土壌から大気への N_2O の排出は、凍結融解条件では時系列として一致しないことが明らかとなった．

詳細は省略するが、2010 年は芽室除雪区で最大凍結深が約 50 cm にも及んだにもかかわらず、地表面からの N_2O 排出量や土壌ガス中 N_2O 濃度の上昇・ O_2 濃度



図 5：2009 年融雪期の除雪区の様子．① 3 月 20 日午後 1 時、10 cm 深 O_2 濃度低下中 (大気レベルの約 21% から約 17%) ② 3 月 28 日午後 4 時、 O_2 濃度低下中 (約 12%, 深夜にピーク) ③ 3 月 29 日午前 9 時、10 cm 深 N_2O 濃度最大値 (46 ppm) でこれ以後低下の一途、10 cm 深 O_2 濃度上昇中 (約 14%) ④ 3 月 29 日午後 1 時、10 cm 深 O_2 濃度上昇中 (約 15%) ⑤ 3 月 31 日午前 9 時、10 cm 深 O_2 濃度上昇中 (約 18%) ⑥ 3 月 31 日午後 3 時、10 cm 深 O_2 濃度上昇中 (約 19%) ⑦ 4 月 1 日午前 9 時 ⑧ 4 月 2 日午前 9 時 (同日 11 時の観測が最大 N_2O 放出速度)、10 cm 深 O_2 濃度ほぼ大気レベル ⑨ 4 月 8 日午前 9 時

の低下は2009年と比べるとわずかであった(柳井ほか, 2010)。このことの原因として, 2010年は除雪後にほとんど降雪がなくほぼ無雪の状態では融雪期を迎えたことが関係しているのではないかと考えている。すなわち, 湛水を形成するにあたり融雪水の供給がわずかであったことが土壌中への O_2 の拡散制限とならず, また同時に, 積雪による保温効果がなかったために土壌が冷えて微生物による O_2 消費があまり起らなかったことが, 土壌ガス中 O_2 濃度の低下を助け, 顕著な N_2O 生成に至らなかったのではないかと考えられる。つまり, 土壌凍結層と積雪層のそれぞれの単独の効果により拡散障壁が形成されるのではなく, 凍結による水の浸透抑制効果と積雪層による水の供給があってはじめて拡散障壁となり, これに加え, 積雪層による保温効果により微生物による O_2 消費活性の維持が成立することで, O_2 濃度の低下が起り脱窒反応が誘発され N_2O が大量に生成される, というプロセスが考えられる。このような観測により得られた手応えを要約したのが図6である。単純すぎるかもしれないが, 土壌凍結深か積雪深か, という旧来の二元論的な議論では土壌における N_2O 生成の実態を十分に説明できないことをこの図は表している。

4. 残された課題と今後の展望

図6に示した N_2O 生成に関与する要因のうち, 最も知見が不足しているのは氷点近傍で N_2O を顕著に生成する微生物の実体とその代謝特性である。これまでに, 凍結融解土壌で N_2O 排出が顕著になることと関連して土壌微生物群集構造の解析がなされたことはいくつかあったが(Koponen et al., 2006; Sharma et al., 2006), 土壌から菌を分離して氷点下でその活性を試験した研究はない。土壌が凍結融解の繰り返しに曝されても土壌微生物バイオマスや生菌数が半分にも減らないことからすると(柳井ほか, 2003; Yanai et al., 2004)凍結融解条件下で細胞死に追いやられる微生物が大多数というわけでは必ずしもなさそうなことは推察され, また脱窒能の劇的な低下も見られなかったことから脱窒菌群集の多くも致死的な影響を受けていないことも推察されるが(Yanai et al., 2007), 生残した微生物のうち N_2O 生成活性を有している菌の割合や, 凍結融解条件下で O_2 の消費に関与する微生物と N_2O 生成に関与する微生物とが別々に存在するのか, など生態学的な現象は全く不明である。

主たる N_2O 生成反応が脱窒であるならば, 営農管理として化学肥料の適正な使用が徹底され積雪前に土壌中に硝酸イオンが残留しなければ土壌凍結がいくら発達して融雪水の浸透障害が起ころうとも融解期に N_2O 生成は生じず, 大気への N_2O 排出も生じないだろう。逆に言うと, 遅効性の堆肥など有機性資材が投入されている

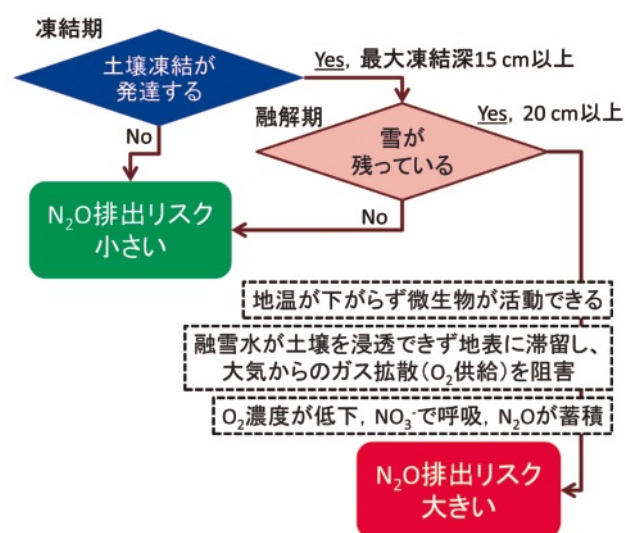


図6: 寒冷地で晩冬から初春にかけてみられる N_2O 排出が生じるメカニズム

ような圃場では凍結融解条件で無機化が生じ, 硝酸イオンの生成と脱窒による N_2O の生成が順を追って進行する可能性も否定できない。凍結融解期に土壌中が真に閉鎖された空間となり, 有機物も存在するのであれば, N_2O の消費反応(N_2 生成)も起こるだろう。また, 野良イモの防除のために土壌凍結を発達させたとしても, 融雪期にさらに除雪を行うことで, 土壌の融解とともに進行する N_2O の大量生成とその後の地表面からの排出を抑制できる可能性を図6は示唆している。図6に示したモードは筆者らが2年間の観測結果で迫った凍結融解条件下で N_2O 排出が顕著に起こる条件の半定量的な理解の集約に過ぎない。本研究における観測で示唆されたのは, 凍結融解条件下で O_2 濃度が低下したときに脱窒が起き, その結果として土壌中に N_2O が蓄積し, 湛水の土壌中への流入に際し N_2O が土壌から大気へ追い出されている, という時系列・プロセスである。本稿および図6が, N_2O 排出量が定量的に問題となりうる地域・圃場を絞り込むなど更なる観測を行うための条件整理に資すること, および温暖化緩和策・適応策の開発と併せて寒冷地の土壌微生物の生態解明が進展することを期待している。

謝辞

本研究の実施にあたり, 北海道農業研究センターの柴田和洋氏, 猿渡孝博氏, 高倉朋宏氏, 阿倍勝繁氏, 平尾隆幸氏, 小川英明氏, 高杉美恵子女史, 矢ヶ崎富美女史, 江村智子女史, 伊藤由美女史, 加藤勇嗣氏, 柳谷修自氏, 渋谷和男氏, 齋藤真一氏, 山崎真氏には野外での観測機器の設置や管理および室内での分析において助力いただいた。東京農工大学の楊宗興博士には酸素濃度の測定で機器を拝借し, 農業環境技術研究所の常田岳志博士には土壌ガス採取法について研究初期から助言を賜っ

た。本研究は、筆者が日本学術振興会特別研究員 PD (20-4158) として北海道農業研究センター芽室研究拠点に在籍していた期間に実施したもので、北海道大学の長谷川周一博士、北海道農業研究センター寒地温暖化研究チームの永田修博士、古賀伸久博士、大久保晋治朗博士らとの共同研究（環境省地球環境総合研究推進費 A-087: T. H.）の成果である。記して謝意を表す。

引用文献

- Campbell, G. S. (1987) パソコンで学ぶ土の物理学 — 自然環境管理の基礎 (中野政詩, 東山勇 訳). 鹿島出版会, 東京
- Duxbury, J. M., Bouldin, D. R., Terry, R. E., and Tate, R. L. III (1982) Emissions of nitrous oxide from soils. *Nature*, **298**, 462-464.
- Flessa, H., Dörsch, P., and Beese, F. (1995) Seasonal variation of nitrous oxide and methane fluxes in differently managed arable soils in southern Germany. *J. Geophys. Res.*, **100**, 23115-23124.
- Hirota, T., Usuki, K., Hayashi, M., Nemoto, M., Iwata, Y., Yanai, Y., Yazaki, T., and Inoue, S. (2011) Soil frost control: Agricultural adaptation to climate variability in a cold region of Japan. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change*, **16**, 791-802.
- Hirota, T., Iwata, Y., Hayashi, M., Suzuki, S., Hamasaki, T., Sameshima, R., and Takayabu, I. (2006) Decreasing soil-frost depth and its relation to climate change in Tokachi, Hokkaido, Japan. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **84**, 821-833.
- Isihijima, K., Nakazawa, T., and Aoki, S. (2009) Variations of atmospheric nitrous oxide concentration in the northern and western Pacific. *Tellus* **61B**, 408-415.
- Iwata, Y., Hayashi, M., and Hirota, T. (2008) Comparison of snowmelt infiltration under different soil-freezing conditions influenced by snow cover. *Vadose Zone J.*, **7**, 79-86.
- Iwata, Y., Hayashi, M., Suzuki, S., Hirota, T., and Hasegawa, S. (2010) Effects of snowcover on soil freezing, water movement and snowmelt infiltration: A paired plot experiment. *Water Resour. Res.*, **46**, W09504.
- Jefferies, R. L., Walker, N. A., Edwards, K. A., and Dainty, J. (2010) Is the decline of soil microbial biomass in late winter coupled to changes in the physical state of cold soils? *Soil Biol. Biochem.*, **42**, 129-135.
- Kammann, C., Grünhage, L., and Jäger, H.-J. (2001) A new sampling technique to monitor concentrations of CH₄, N₂O and CO₂ in air at well defined depths in soils with varied water potential. *Eur. J. Soil Sci.*, **52**, 297-303.
- Koga, N., Tsuruta, H., Sawamoto, T., Nishimura, S., and Yagi, K. (2004) N₂O emission and CH₄ uptake in arable fields managed under conventional and reduced tillage cropping systems in northern Japan. *Global Biogeochem. Cycles*, **18**, GB4025.
- Koponen, H. T., Jaakkola, T., Keinänen-Toivola, M. M., Kaipainen, S., Tuomainen, J., Servomaa, K., and Martikainen, P. J. (2006) Microbial communities, biomass, and activities in soils as affected by freeze-thaw cycles. *Soil Biol. Biochem.*, **38**, 1861-1871.
- Ohkubo, S., Yanai, Y., Nagata, O., Iwata, Y., and Hirota, T. (2011) Influences of snow cover and soil-frost on ground surface flux and soil gas concentration of CO₂ in an agricultural land in northern Japan. *J. Agric. Meteorol.*, **67**, 151-162.
- Ravishankara, A. R., Daniel, J. S., and Portmann, R. W. (2009) Nitrous oxide (N₂O): the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century. *Science*, **326**, 123-125.
- Röver, M., Heinemeyer, O., and Kaiser, E.-A. (1998) Microbial induced nitrous oxide emissions from an arable soil during winter. *Soil Biol. Biochem.*, **30**, 1859-1865.
- Sharma, S., Szele, Z., Schilling, R., Munch, J. C., and Schlöter, M. (2006) Influence of freeze-thaw stress on the structure and function of microbial communities and denitrifying populations in soil. *Appl. Environ. Microbiol.*, **72**, 2148-2154.
- Syväsalo, E., Regina, K., Pihlatie, M., and Esala, M. (2004) Emissions of nitrous oxide from boreal agricultural clay and loamy sand soils. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, **69**, 155-165.
- Tokida, T., Miyazaki, T. and Mizoguchi, M. (2005) Ebullition of methane from peat with falling atmospheric pressure. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L13823
- Yamazaki, T., Hattori, S., Yanai, Y., Toyoda, S., and Yoshida, N. (2011) Isotopomer analysis of nitrous oxide produced in a seasonally frozen soil. Japan Geoscience Union Meeting 2011, MIS023-P05.
- Yanai, Y., Hirota, T., Iwata, Y., Nemoto, M., Nagata, O., and Koga, N. (2011) Accumulation of nitrous oxide and depletion of oxygen in seasonally frozen soils in northern Japan — Snow cover manipulation experiments. *Soil Biol. Biochem.*, **43**, 1779-1786.
- 柳井洋介, 廣田知良, 岩田幸良, 根本学, 永田修, 大久保晋治郎, 古賀伸久 (2010) 積雪・土壌凍結地帯における土壌中での亜酸化窒素生成動態の観測. 日本土壌肥料学会講演要旨集, 56, 180.
- 柳井洋介, 豊田剛己, 岡崎正規 (2003) 土壌の凍結融解反復処理が土壌微生物群集に及ぼす影響の調査事例. 土と微生物, **57**, 13-20.
- Yanai, Y., Toyota, K., and Okazaki, M. (2004) Effects of successive soil freeze-thaw cycles on soil microbial biomass and organic matter decomposition potential of soils. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **50**, 821-829.
- Yanai, Y., Toyota, K., and Okazaki, M. (2007) Response of denitrifying communities to successive soil freeze-thaw cycles. *Biol. Fertil. Soils*, **44**, 113-119.
- 柳井洋介, 豊田剛己, 岡崎正規 (2007) 土壌の凍結融解をめぐる土壌微生物学研究の進展 — 凍結融解土壌における亜酸化窒素発生の機構解明と関連して. 土と微生物, **61**, 135-146.
- Zumft, W. G. (1997) Cell biology and molecular basis of denitrification. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.*, **61**, 533-616.