

秋季の作物残渣のすき込みが畑地からの亜酸化窒素 (N_2O) 発生に及ぼす影響^{*1}

大橋 優二^{*2} 佐藤 龍夫^{*3}

秋季にスイートコーン茎葉をすき込んだ畑地から発生する亜酸化窒素（以下、 N_2O と略記）のすき込み後1ヶ月間におけるフラックスと積算発生量は、それぞれ $0.003\sim 0.235\text{mgNm}^{-2}\text{hr}^{-1}$, 39.6mgNm^{-2} で、無すき込みの同 $0.001\sim 0.026\text{mgNm}^{-2}\text{hr}^{-1}$, 8.3mgNm^{-2} より著しく増加した。しかも、 N_2O の発生は作物残渣（キャベツ外葉、スイートコーン茎葉、麦稈）のC/N比等の影響を受けるとともに、残渣のすき込み位置が深くなるほど高まる傾向であった。また、圃場でキャベツ収穫後の茎葉残渣を処理する場合、残渣との土壌接触が少ない表面散布での N_2O 発生は、通常の土壌混和に比べて少なかった。以上のように、畑地からの N_2O の発生は、作物残渣すき込みで著しく増加するが、その程度は残渣のすき込み深・種類および処理方法で明らかに異なることが示された。

緒 言

亜酸化窒素（以下、 N_2O と略記）は地球温暖化をもたらす温室効果ガスの一つで、その大気中の濃度は工業化以前（1750年）の270ppbから現在の319ppb（2005年）と、およそ18%増加した⁹⁾。このガスは、温室効果の強さを示す指標である地球温暖化指数が、二酸化炭素(CO_2)の310倍⁹⁾と著しく高い特徴がある。一方、 N_2O の総排出量の44%は人間活動に起因（人為起源）し、さらに人為起源の排出量のうち75%は農耕地や家畜・肥育場等の農業分野が占める¹⁰⁾。特に農耕地からの排出は多いが、土壌中での N_2O は主として土壌微生物の硝化および脱窒作用の両過程から生成される¹⁵⁾。

これらの微生物反応は、土壌水分や地温などの環境条件に加え、窒素源あるいはエネルギー源である肥料や有機物等の影響を受ける。すなわち、一般的に実施されている施肥や有機物施用等の営農技術が、微生物活動を介して N_2O 発生に大きく関与しているため、農業分野にお

ける N_2O 排出削減の取り組みは重要である。

現在、世界の多くの国で温暖化防止に係る取り組みがなされている中、2005年には N_2O を含む6種の温室効果ガス排出量の削減目標を設定した「京都議定書」¹⁰⁾が発効した。これを受けて、我が国では温室効果ガスの総排出量を2008年以後の5年間で6%（1990年対比）削減するとの国際約束を達成するため、「京都議定書目標達成計画（2005年4月）」¹⁰⁾を策定し、この計画に基づき、それぞれの温室効果ガスごとの排出削減等に関する各種の対策・施策が推進されている。このような施策の一環として、「温室効果ガス排出量の算定・報告・公表制度（2006年4月）」¹¹⁾が導入された。本制度の中における農耕地関連の排出量では、大規模農場などのような一定の要件を満たす事業所との限定はあるものの、肥料窒素の施用や農作物残渣のすき込み等に伴って発生する N_2O を農水省に報告することが義務付けされている。

北海道ではすでに農耕地からの N_2O の発生実態や N_2O 発生と施肥との関連を明らかにした多くの研究^{7, 12, 14, 16)}があるが、その中で露地野菜畑では N_2O フラックスが施肥後の数週間と収穫期前後である秋季の2時期に高まる傾向が認められた。とりわけ、7月以降秋季の N_2O 発生量については全発生量の80%以上を占める場合もある¹⁶⁾ことから、この時期の N_2O 発生を抑制することは極めて重要である。秋季の N_2O 発生の要因としては、脱窒作用に影響する土壌水分の増加や土壌残存窒素の関与とともに、収穫期前後の作物残渣や作物根の存在が挙げられる。

^{*1} 本報の一部は、1998年および1999年度日本土壌肥料学会北海道支部大会で発表した。

^{*2} 北海道立中央農業試験場（現：北海道原子力環境センター、045-0123 岩内郡共和町）
E-mail:seika@agri.pref.hokkaido.jp（編集委員会事務局）

^{*3} 同上（現：北海道植物防疫協会、060-0001 札幌市中央区北1条西7丁目）

特に、上述した「温室効果ガス排出量の算定・報告・公表制度」でも報告が義務付けられていることから分かるように、作物残渣には各種形態の窒素および炭素源が含まれることから、畑地にすき込まれると N_2O 発生に大きな影響を及ぼすことが予想される。しかしながら、これまで残渣すき込みと N_2O 発生量の関係を詳細に検討した報告は見当たらない。

本試験では、畑地からの N_2O 発生を低減する営農技術の開発に資するため、秋季における作物残渣のすき込みや残渣の種類等と N_2O 発生量との関係を、主に屋外に設置したコンクリートの無底枠を用いて検討した。

試験方法

1. 土壌からの N_2O フラックスおよび土壌空気中の N_2O 濃度の測定

供試圃場は中央農業試験場内の細粒褐色低地土で、土性はL、全炭素含量は 14gkg^{-1} 、全窒素含量は 0.6gkg^{-1} で、その他の化学性は表1の通りである。

土壌からの N_2O フラックスの測定はチャンバー法で行った。すなわち、土壌表面にチャンバー（市販クーラーボックス製、底面積 $44\text{cm} \times 22\text{cm}$ 、高さ 26cm ）を設置した後、直ちに地上高 10cm の大気1Lを、次いで設置10分後にチャンバー内の空気1Lを、それぞれテドラーバックに採取した。大気と設置10分後のチャンバー内の空気に含まれる N_2O 濃度をECD付きガスクロマトグラフ（島津GC-14A、カラム：PorapakQ）により定量した。両者の濃度差から N_2O フラックスを算出する方法およびガスクロマトグラフの分析条件は八木ら²⁰⁾の方法に準じ、キャリアガスは5%メタン-アルゴンバランスを用いた。また、試験期間中の N_2O 発生量は、フラックスの推移曲線を積分（台形の面積を積算）して求めた。

土壌空気の採取とその N_2O 濃度の測定は、以下のように行った。塩化ビニール管（長さ1m、内径13mm）内部の空間を維持しつつ、塩化ビニール管先端を所定の土壌深度位置まで埋め込んだ。次に、地上部側の塩化ビニール管先端に三方コック付きシリコン栓を挿入して蓋をした。土壌空気の採取時には、この三方コックにテドラーバックと50ml容テルモシリンジを取り付けた。直ちに、

塩化ビニール管内の空気をシリンジ内に吸引し、三方コックの開閉によりテドラーバック内へ移動させた。採取した空気は窒素ガスで適宜希釈し、上記と同様な方法で採取空気中の N_2O 濃度を定量した。

以上のチャンバーや土壌からの空気採取、およびその中の N_2O 濃度の測定は全て2連で行った。

2. 土壌からの N_2O 発生に対する作物残渣の影響

(1)作物残渣のすき込み（試験1）

作物残渣のすき込みが N_2O 発生に及ぼす影響を、 0.5m^2 コンクリート無底枠を用いて検討した。窒素施肥として露地野菜の一般的な施肥量に相当する 20gNm^{-2} の硝酸カリウムを枠全面に散布し、 $0 \sim 10\text{cm}$ 層の土壌と混和した。作物残渣としてスイートコーン茎葉（雌穂を除いたもので 5cm 以下に細断済み）を1枠当たり $1,640\text{g}$ （ 1m^2 当り株数を4株とし、1株の平均重量 820g ）散布し、 $0 \sim 10\text{cm}$ 層の土壌と混和した。供試したスイートコーン茎葉は乾物当たりのT-Cが37.5%、T-Nが1.1%、C/N比が34.1である。処理は残渣区と無残渣区の2処理とし、いずれも作物は無作付けで、また枠全面を被覆して雨よけ処理を行った（2反復）。試験は1998年8月27日から9月28日まで実施し、その間の N_2O フラックスおよび土壌の硝酸態窒素含量（ $0 \sim 10\text{cm}$ 土層）を経時的に測定した。

(2)残渣のすき込み深（試験2）

試験規模、窒素施肥量・混和層およびスイートコーン茎葉の散布量・化学性は上記(1)と同様であるが、土壌にすき込む残渣の深さを変えて、 N_2O フラックスを観測した。すなわち、スイートコーン茎葉のすき込み処理として、①表層 $0 \sim 5\text{cm}$ 程度の土層に茎葉を散布、土壌と混和する処理（表層区と略記）、②深さ 15cm に 5cm 程度の厚さで茎葉を埋設した区（同 15cm 区）、③ 15cm 区と同様に深さ 30cm に茎葉を埋設した区（同 30cm 区）の計3処理を設定した。なお、 15cm 区と 30cm 区では、まず所定の深度まで土壌を除去し、厚さ 5cm で茎葉を層状に散布した後、できるだけ茎葉の 5cm 厚が維持されるようにしながら、土壌を再び戻してすき込み深を設定した（2反復）。

各区とも作付けと雨よけ処理は行わず、1998年9月4日から10月22日まで N_2O フラックス、土壌空気中の N_2O 濃度（土壌深度 25cm から採取）および土壌の硝酸態窒素

表1 供試土壌の化学性

pH (H_2O)	EC (mSm^{-1})	無機態窒素 ^{*1} (mgkg^{-1})	Truog P_2O_5 ^{*1} (mgkg^{-1})	交換性塩基(mgkg^{-1}) ^{*1}		
				CaO	MgO	K ₂ O
6.54	5.0	12	365	2021	984	197

^{*1} 乾土当たり

表2 供試残渣の化学性

残渣の種類	乾物率 (%)	T-C ^{*1}	T-N ^{*1}	C/N 比
キャベツ外葉	7.4	25.5	2.9	8.9
スイートコーン茎葉	16.4	39.4	1.0	41.0
麦稈	87.4	36.3	0.4	88.5

^{*1} 乾物当たり

含量 (0~10cm土層) を経時的に観測した。

(3) 作物残渣の種類 (試験3)

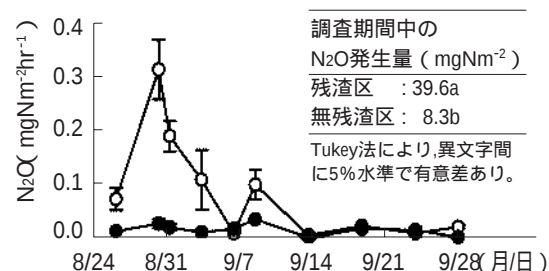
すき込む作物残渣の種類がN₂O発生に及ぼす影響を明らかにするため、化学性の異なる作物残渣を用いてすき込み試験を行った。供試作物はスイートコーン茎葉、キャベツ外葉および麦稈で、いずれも茎葉部分を約2cm以下に細断したものを用いた。供試残渣の主な化学性を表2に示した。各残渣のC/N比は、麦稈(88.5) > スイートコーン茎葉(41.0) > キャベツ外葉(8.9)であった。

1999年8月27日、1m²コンクリート無底枠に、(1)と同じ方法で20gNm⁻²の硝酸カリウムを枠全面に散布し、0~10cm層の土壌と混和した。次に、各残渣を枠全面に散布し、0~10cm層の土壌と混和した(2反復)。各残渣のすき込み量は1m²当たりスイートコーン茎葉3,280g(圃場栽培での茎葉量に相当)、キャベツ外葉2,510g、麦稈1,540gである。スイートコーン茎葉から投入される全窒素量は5.4gNm⁻²であるが、キャベツ外葉と麦稈のすき込み量は窒素として5.4gNm⁻²に相当する。また、残渣無すき込み区(硝酸カリウムは20gNm⁻²施用)も設けた。いずれの区も作物は無作付けで雨よけ処理はせず、8月27日から10月14日までN₂Oフラックスを経時的に測定した。

(4) 残渣処理法 (試験4)

キャベツ「アーリーボール」を収穫した後の圃場を用いて、茎葉残渣の処理法がN₂O発生に及ぼす影響を検討した。供試した茎葉残渣は外葉で、乾物当たりのT-Cは25.5%、T-Nは2.9%、C/N比は8.9である。試験規模は1区24m²(6m×4m)とし、栽植密度は3.33株m⁻²である。残渣処理法として、表面散布区と土壌混和区を1999年8月11日に設定した。表面散布区では外葉残渣をチョッパーで細断後、土壌表面へ均一に散布した。一方、土壌混和区では表面散布処理を行った後、さらにロータリーで外葉残渣を土壌と約15cmの深さまで混和した(反復なし)。両区の外葉残渣からの窒素投入量は、全窒素に換算して1m²当たり6.5gNである。8月11日から9月30日まで、N₂Oフラックスおよび土壌空気中のN₂O濃度(土壌深度10cmから採取)を経時的に測定した。

試験結果

1. 作物残渣のすき込みとN₂O発生との関係 (試験1, 2)図1 スイートコーン茎葉のすき込みとN₂Oフラックスとの関係 (試験1)

○— 残渣区 ●— 無残渣区
垂線は範囲 (n=2) を示す。

試験1においてスイートコーン茎葉をすき込んだ残渣区のN₂Oフラックスは、すき込み直後(8月27日)から高まり、4日目(8月31日)には最大0.235mgNm⁻²hr⁻¹を示した(図1)。その後、N₂Oフラックスは急減し、すき込み後18日目(9月14日)以降は無残渣区と同等であった。一方、無残渣区のN₂Oフラックスは全期間にわたって0.020mgNm⁻²hr⁻¹前後と低く推移した。調査期間中のN₂O発生量は残渣区(39.6mgNm⁻²) > 無残渣区(8.3mgNm⁻²)で、残渣区が5%水準で有意に高かった。なお、処理当日(8月27日)における土壌の硝酸態窒素含量(乾土中)は、残渣区が643mgkg⁻¹、無残渣区が568mgkg⁻¹、同じく測定終了時(9月28日)ではそれぞれ539mgkg⁻¹、563mgkg⁻¹であった。

図2には、試験2で実施した残渣すき込み深が異なる各処理区のN₂Oフラックス、土壌空気中のN₂O濃度(土壌深度25cm)および測定期間中の降水量の推移を示した。N₂Oフラックスは30cm区が0.005~0.140mgNm⁻²hr⁻¹、15cm区が0.001~0.066mgNm⁻²hr⁻¹、表層区が0.001~0.027mgNm⁻²hr⁻¹の範囲で推移した。また、N₂Oフラックスおよび土壌空気中のN₂O濃度は、9月中旬(9月16日)の70mmに達する激しい降雨を境に大きな変化が観測された。

すなわち、降水量が1mm以下であったすき込み処理後5日目(9月9日)までは、N₂Oフラックスは3処理区で大差がなかった。しかし、その後の9月中旬から下旬にかけて約70mmあるいは50mmの降水に対応して、30cm区や15cm区のN₂Oフラックスは顕著に高まった。特に、この期間の30cm区のN₂Oフラックスは0.140mgNm⁻²hr⁻¹まで急増し、かつ同区では試験終了まで表層区、15cm区より高く推移した。これに対して、表層区と15cm区は、9月19日を除くと、いずれの時期も差が小さかった。

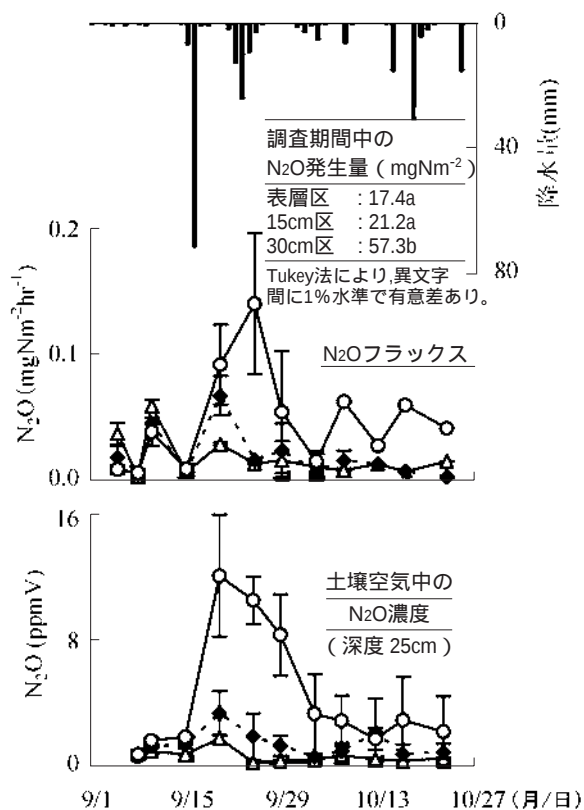


図2 スイートコーン茎葉のすき込み深とN₂Oフラックスおよび土壌空气中的N₂O濃度との関係(試験2)

—△— 表層区 —◆— 15cm区 —○— 30cm区
垂線は範囲 (n=2) を示す。

土壌空气中的 N₂O 濃度は, 各処理区とも N₂O フラックスと類似した傾向であった。

測定期間中の N₂O 発生量は30cm区 (57.3mgNm⁻²) > 15cm区 (21.2mgNm⁻²) ≥ 表層区 (17.4mgNm⁻²) であった。N₂O フラックスと同様に, 残渣のすき込み深が30cmになると N₂O 発生量は顕著に増加し, 30cm区は15cm区および表層区より1%水準で有意に高かった。土壌の硝酸態窒素含量 (0~10cm) は各処理区とも9月16日の多量の降雨を境に約500mgkg⁻¹から約10mgkg⁻¹へと著しく低下したが, いずれの測定時期でも, 30cm区の9月4日を除くと, 処理間で大きな差は見られなかった(表3)。

2. 作物残渣の種類と処理法が N₂O 発生に及ぼす影響 (試験3, 4)

試験3において各作物残渣をすき込んだ区の N₂O フラックスは, スイートコーン茎葉区が0.004~1.103mgNm⁻²hr⁻¹, キャベツ外葉区が0.020~0.469mgNm⁻²hr⁻¹, 麦稈区が0.007~0.465mgNm⁻²hr⁻¹であった(図3)。また, 9月上旬に2つのピークが降雨と対応して観測され, この期間は一般にスイートコーン茎葉区>キャベツ外葉

表3 スイートコーン茎葉の各すき込み深における土壌の硝酸態窒素含有量^{*1}の推移(試験2)

処理区	9/4	9/14	9/19	10/3 (月/日)
表層	784	498	13	7
15cm	754	580	9	8
30cm	907	502	10	8

^{*1}単位: mgkg, 乾土(採取深度0~10cm)
平均値 (n=2)

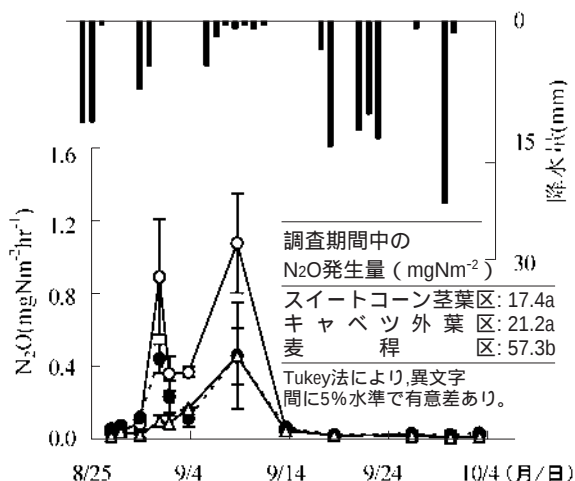


図3 残渣の種類とN₂Oフラックスとの関係(試験3)

—○— スイートコーン茎葉 —●— キャベツ外葉
—△— 麦稈
垂線は範囲 (n=2) を示す。

区≥麦稈区の順で推移した。しかし, 3処理区ともその後は0近くまで急減し, 多雨時でもピークは出現しなかった。

調査期間中の N₂O 発生量は, スイートコーン茎葉区 (231.6mgNm⁻²) > キャベツ外葉区 (121.8mgNm⁻²) > 麦稈区 (93.3mgNm⁻²) の順で, スイートコーン茎葉区はキャベツ外葉区および麦稈区より5%水準で有意に高かった。各区には全窒素として54gNm⁻²が共通にすき込まれているため, 投入窒素1g当たりからの N₂O 発生量も, スイートコーン茎葉が37.3mgNと多く, 次いでキャベツ外葉が16.5mgN, 麦稈が11.7mgNであった。なお, これらの値は各残渣区から無残渣区の N₂O 発生量 28.2mgNm⁻²を差引いて算出した。

さらに, 無残渣区の N₂O 発生量を差引いた各残渣の乾物1kg当たりの N₂O 発生量は, キャベツ外葉区 (480.2mgNkg⁻¹) > スイートコーン茎葉区 (374.0mgNkg⁻¹) > 麦稈区 (47.0mgNkg⁻¹) で, キャベツ外葉区と麦稈区との間には5%水準で有意差が認められた。この乾物1kg当たりで算出した N₂O 発生量は, 各残渣の C/N 比と直線的な対応関係が示された(図4)。なお, 各残渣の

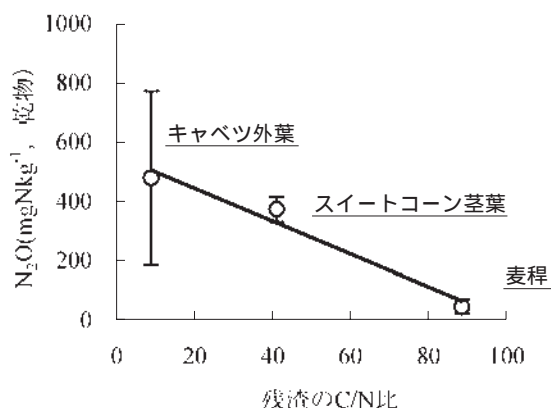


図4 残渣のC/N比と残渣の乾物1kg当たりから発生した N_2O との関係(試験3)

垂線は範囲 ($n=2$) を示す。

乾物 1 kg 当りに含まれる全窒素量は、C/N 比の低いキャベツ外葉が29g, スイートコーン茎葉10g, 麦稈 4 g である。

試験4のキャベツ外葉の処理法比較試験での N_2O フラックスは、土壌混和区が $0.001 \sim 0.765 \text{ mgNm}^{-2} \text{ hr}^{-1}$, 表面散布区が $0.004 \sim 0.282 \text{ mgNm}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ の範囲であった(図5)。土壌混和区では、残渣処理当日から4日目にかけて N_2O フラックスの大きなピークが認められ、表面散布

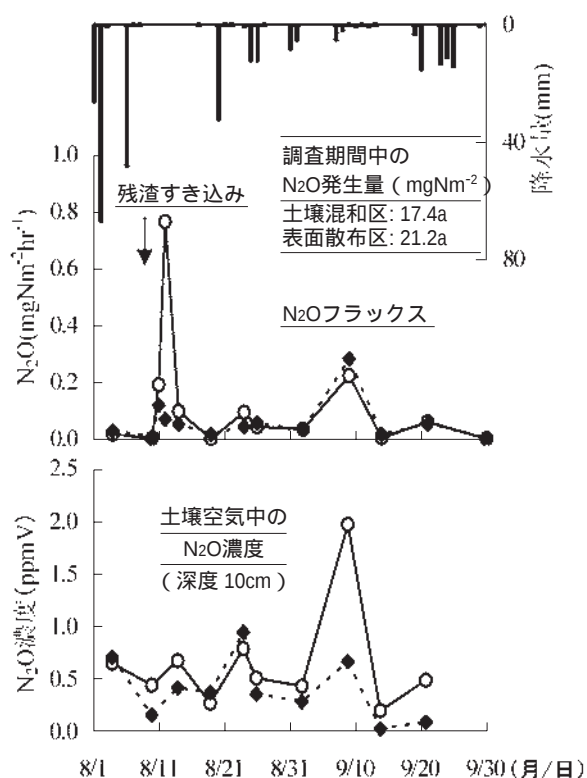


図5 キャベツ外葉残渣のすき込み方法の違いが N_2O フラックスおよび土壌空气中的 N_2O 濃度に及ぼす影響(試験4)

—○— 土壌混和区 —●— 表面散布区

区に比べて約3～9倍高まったが、その後は急減した。両区のフラックスは、このピーク時を除いて測定終了時まで同程度に推移し、9月9日にはともに小さなピークが出現した。調査期間中の N_2O 発生量は、土壌混和区(100.0 mgNm^{-2}) > 表面散布区(77.7 mgNm^{-2})であった。一方、土壌空气中的 N_2O 濃度(土壌深度10cm)は、土壌混和区が表面散布区に比べて高く推移する傾向を示し、9月9日には両区ともピークが認められた。また、残渣処理直前の土壌(乾土)の無機態窒素含量は、表面散布区が 13 mgkg^{-1} , 土壌混和区が 24 mgkg^{-1} で両区とも極めて僅かであった。測定終了時においても無機態窒素および熱水抽出性窒素含量は非常に低く、処理間で大きな差は見られなかった(表4)。

表4 キャベツ外葉残渣処理後^{*1}の土壌窒素含量(試験2)

処理区	無機態窒素	熱水抽出性窒素
	(mgkg ⁻¹ , 乾土)	
表面散布	5	22
土壌混和	7	25

^{*1}測定日: 1999年9月30日

考 察

北海道三笠市のたまねぎ畑では、4月下旬の施肥直後よりも8月以降の収穫期前後に N_2O フラックスが高まることが報告¹⁶⁾されている。この要因として、8月以降の多量な降雨と硝酸態窒素の土壌粒団内への拡散に起因した脱窒作用が N_2O フラックスの上昇をもたらしたと指摘されている。脱窒作用は酸素の供給が不十分で、有機物が多い土壌環境下で起こりやすいため、畑地では降雨により土壌が嫌氣的条件になったり、易分解性の有機物や作物残渣が投入されると脱窒作用が促進⁴⁾される。また、脱窒作用における N_2O から N_2 への変換率は、土壌中の硝酸態窒素濃度が高いと低下¹⁹⁾する。これらの知見は、多肥栽培で土壌中に硝酸態窒素が多く存在する露地野菜畑では、降雨後の嫌氣的条件や有機物施用後において脱窒作用が活発化し、 N_2O 発生量が著しく増大することを示唆する。本研究の一連の試験は、このような条件を想定して、秋季での露地野菜畑からの N_2O 発生量を、特に残渣のすき込み条件との関連に注目して把握しようと試みたものである。

多量の硝酸態窒素を施用した土壌へスイートコーン茎葉をすき込むと(試験1), N_2O フラックスと発生量は、それぞれ $0.003 \sim 0.235 \text{ mgNm}^{-2} \text{ hr}^{-1}$, 39.6 mgNm^{-2} と、無残渣区の同 $0.001 \sim 0.026 \text{ mgNm}^{-2} \text{ hr}^{-1}$, 8.3 mgNm^{-2} に比べて顕著に増加した(図1)。茎葉のすき込みに伴い、植物の主要な構成成分であるセルロースやリグニンは

じめ、糖類、アミノ酸、硝酸など多くの炭素および窒素化合物が投入される。とりわけ、水溶性炭素は脱窒能を活性化させること³⁾が知られており、作物残渣に含まれる各種の炭素化合物が脱窒作用に由来する N_2O 発生量の増加に大きく寄与したものと推察される。もちろん、このような N_2O フラックスや発生量と残渣すき込みとの関係は、すき込み深、残渣の種類あるいは処理方法の影響も受けるので、次にこれらの点について述べる。

作物残渣のすき込み深と N_2O 発生量の関係を見ると、図2から分かるように、 N_2O フラックスや発生量および土壌空気中の N_2O 濃度は多量の降雨が観測された9月16日以後、特に30cm区で急激に増加した。この時期の土壌(0~10cm土層)の硝酸態窒素含量は降雨を境に著しく低下(表3)しており、土壌上層に施用した硝酸態窒素が多量の降雨により下方へ移動したものと考えられる。すなわち、残渣がより深い位置に存在した30cm区では、酸素濃度が他の2区よりも低い環境下で硝酸態窒素と残渣が併存したことにより、脱窒作用が促進された可能性がある。このことが、30cm区の N_2O 発生が他区に比べて顕著に高まった理由の一つと推察される。

通常、露地野菜畑では耕起深が0~20cmと浅いのに対して、深さ30cm程度の心土は土壌養分や脱窒菌数が低く、脱窒作用が起こりにくい環境と考えられる。しかしながら、カラム浸透試験での土壌脱窒能の測定結果¹³⁾によると、作土層から硝酸態窒素が降下浸透してくれば心土においても脱窒作用が高まる。したがって、心土と言えども(本試験ではすき込み深30cm)、高濃度の硝酸態窒素と嫌気条件が揃い、そこに有機物がすき込まれたため、脱窒作用が促進し、 N_2O 発生量は高まったと理解される。

一方、有機物としての投入窒素が $5.4gNm^{-2}$ と同じにもかかわらず、すき込む作物残渣の種類によって N_2O フラックスや発生量が異なり、C/N比が41.0のスイートコーン茎葉区で特に高かった。ただし、供試した各残渣の乾物1kg当たりから発生した N_2O は、C/N比の低い残渣ほど増加する傾向を示し、キャベツ外葉区で最も多かった(図4)。このようにキャベツ外葉区で多くなった要因として、本試験の条件では、残渣からの投入窒素1g当たりの N_2O 発生量と乾物1kg中に含まれる全窒素量の差によるものと考えられる。すなわち、残渣窒素1g当たりからの N_2O 発生量は、C/N比の低いキャベツ外葉が $16.5mgN$ とスイートコーン茎葉の $37.3mgN$ より少なかったが、キャベツ外葉の乾物1kg当たりの N_2O 発生量は $480mgN$ とスイートコーン茎葉の $374mgN$ より高く計算された。この乾物1kg当たりの N_2O 発生量がキャベツ外葉で多かったのは、キャベツ外葉に含まれる窒素濃度が2.9%とスイートコーン茎葉の1.0%より高い

ためと推察される。

また、乾物1kg当たりからの N_2O 発生量がC/N比の低い残渣で多いことは、キャベツ外葉のような窒素含有率が高く、分解の早いものほど残渣窒素1g当たりの N_2O 発生量も多いと考えた方が妥当かも知れないことを示唆している。事実、Aulakhら¹⁾は小麦やキャベツなどC/N比の異なる4種類の作物残渣を土壌に添加すると、C/N比が低い残渣ほど脱窒能が促進されると指摘している。さらに、魚粕や牛糞堆肥などの有機物施用と N_2O 発生についても同様な傾向が報告²⁾されている。C/N比が低い作物残渣が畑地に施用されると、①残渣の分解により各種の炭素、窒素化合物の放出が顕著となり、 N_2O 発生に関与する微生物活性が高まることおよび脱窒の窒素供給源である無機態窒素が増えること、②土壌中での急激な残渣分解は酸素分圧の急速な低下を招き、脱窒作用に有利な嫌気的環境がもたらされること等の理由により、 N_2O 発生量が高まることが推測される。本試験で得られた作物残渣種類の N_2O 発生量の違いには、このような要因が関与していた可能性がある。

ただし、上述したように、残渣窒素1g当たりの N_2O 発生量は、C/N比の低いキャベツ外葉で多くはなかった。この理由については明らかではないが、多分、炭素や窒素の組成の相違およびC/N比等が複雑に関与しているであろう。さらに、本試験では残渣からの N_2O 発生量を単純に無残渣区との差引きで求めていること、また N_2O 発生量は残渣と硝酸態窒素が併存した条件で顕著に高まること(図1)を考慮すると、高濃度の硝酸態窒素が併存する条件では、残渣のC/N比の違いが N_2O 発生量の差に十分反映できたとは言い難いことも指摘される。

いずれにしても、本試験では作物残渣の種類が N_2O 発生に大きな影響を及ぼしていたことが明らかとなったものの、実際の発生量はC/N比のみでは必ずしも統一的に理解することが困難であった。そのため、今後は土壌に残存する硝酸態窒素の多寡も含めて、残渣の種類やC/N比と N_2O 発生量との関係を詳細に検討する必要がある。

圃場におけるキャベツ外葉残渣の処理法を検討した試験において、表面散布区の N_2O フラックスは、処理後の約2週間まで土壌混和区に比較して明らかに低く推移した(図5)。土壌表面に置かれた作物残渣の分解率は、土壌中に埋設された場合より劣ることが指摘^{5) 6)}されている。このことから、表面散布区のキャベツ外葉は土壌混和区に比べて土壌との接触面積が少なく分解も劣り、加えて残渣表面の乾湿の差が大きいことから、 N_2O 発生に関与する微生物数およびその活性も低かったことが推察される。また、表面散布区では残渣が大気と接触

することが多いので、脱窒作用に有利となる嫌気的条件下にほとんどならなかったことも考えられる。綿実油粕やキャベツを用いた試験でも、本試験と同様に、畝表面への作条施用（覆土せず）あるいは表面散布が土壌混和処理より N_2O 発生量が少ないことが報告^{1, 17)} されている。このように、C/N 比が低いキャベツ収穫後の外葉残渣を表面散布すると、 N_2O 発生量は土壌混和に比べて抑制されることが認められた。

以上から、作物残渣をすき込むと土壌からの N_2O フラックスや発生量は著しく増大するが、残渣のすき込み深、種類、処理方法により、 N_2O の発生は大きく異なることが明らかである。今後は、これらの知見を実用的な生産技術にどう結びつけるかが重要な課題となる。

なお、土壌診断に基づく適正な窒素施肥管理で土壌中の硝酸態窒素を可能な限り低く維持することは N_2O の窒素供給源を減らすことにつながり、また圃場の排水性の向上を図ることは好気条件を保つことになる。いずれの技術も N_2O 発生に抑制的に働くことは見逃せない点である。すなわち、これらの営農上の基本技術は、 N_2O の発生を削減する視点からみても有効であることを指摘しておきたい。

引用文献

- 1) Aulakh, M. S., Doran, J. W., Walters, D. T., Mosier, A.R. and Francis, D.D. "Crop residue type and placement effects on denitrification and mineralization" *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, 1020-1025 (1991) .
- 2) 秋山博子, 鶴田治雄. "有機物を施用した畑土壌からの N_2O および NO の発生(2)". 農業環境技術研究所資源・生態管理科研究集録 16. 41-48 (2000) .
- 3) Burford, J. R. and Bremner, J. M. "Relationships between the denitrification capacities of soils and total, water-soluble and readily decomposable soil organic matter" *Soil Biol. Biochem.* 7, 389-394 (1975) .
- 4) Beauchamp, E. G., Trevors, J. T. and Paul, J. W. "Carbon sources for bacterial denitrification". *Adv. Soil Sci.* 10, 113-142 (1989) .
- 5) Douglas, C. L., Allmaras, R. R., Rasmussen, P. E., Ramig, R. E. and Roager, N.C. "Wheat straw composition and placement effects on decomposition in dryland agriculture of the pacific northwest" *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 833-837 (1980).
- 6) Franzluebbers, A.J., Arshad, M.A. and Ripmeester, J. A. "Alterations in canola residue composition during decomposition" *Soil Biol. Biochem.* 28, 1289-1295 (1996) .
- 7) 林 哲央, 日笠裕治, 坂本宣崇. "北海道の施設栽培土壌における亜酸化窒素の発生実態と抑制対策". *日本土壌肥科学雑誌*. 75, 575-582 (2004) .
- 8) IPCC (気候変動に関する政府間パネル). "IPCC 地球温暖化第三次レポート". 中央法規, 2001, p.36-40.
- 9) IPCC (気候変動に関する政府間パネル). "第4次評価報告書第1作業部会報告書政策決定者向け要約". 気象庁, 2007, p.2-3.
- 10) 金島正治. "地球温暖化防止技術読本". オーム社, 2007, p.5-17.
- 11) 環境省, 経済産業省. "温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル Ver.2.1". 2007.
- 12) 大橋優二, 木曾誠二, 林 哲央, 後藤英次. "農耕地からの温室効果ガス発生実態と対策技術". *北農*. 62, 319-322 (1995) .
- 13) 小川吉雄, 加藤英孝, 陽 捷行. "地下水面直上部における降下浸透水中の硝酸態窒素の消長と土壌の脱窒能". *日本土壌肥科学雑誌*. 71, 494-501 (2000) .
- 14) 大橋優二. "化学肥料及び有機物施用が亜酸化窒素発生に及ぼす影響". *北農*. 67, 232-236 (2000) .
- 15) Sahrawat, K.L. and Keeney, D.R. "Nitrous oxide emission from soils". *Adv. Soil Sci.* 4, 103-148 (1986) .
- 16) 澤本卓治, 波多野隆介. "北海道の土壌構造が発達した灰色低地土タマネギ畑からの N_2O フラックス". *日本土壌肥科学雑誌*. 71, 659-665 (2000) .
- 17) 辰巳 眞. "畑地から発生する亜酸化窒素ガス (N_2O) の抑制". 大阪府立農林技術センター研究報告 34, 31-32 (1998) .
- 18) 鶴田治雄. "地球温暖化ガスの土壌生態系との関わり 3. 人間活動による窒素化合物の排出と亜酸化窒素の発生". *日本土壌肥科学雑誌*. 71, 554-564 (2000) .
- 19) Weier, K. L., Doran, J. W., Power, J.F. and Walters, D.T. "Denitrification and the dinitrogen/nitrous oxide ratio as affected by soil water, available carbon, and nitrate". *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57, 66-72 (1993) .
- 20) 八木一行, 鶴田治雄, 陽 捷行. " CH_4 ・ N_2O フラックス測定マニュアル". 農業環境技術研究所資源・生態管理科研究収録 7, 143-158 (1991) .

Influence of Crop Residue Incorporated in the Autumn on Nitrous Oxide Emission from the Field

Yuji OHASHI^{*1} and Tatsuo SATO^{*2}

Summary

The influences of some crop residue incorporated in the autumn on nitrous oxide (N_2O) emissions from the field were investigated.

The amounts of cumulative N_2O emissions (N_2O emissions) from the fields incorporated stem and leaf of corn were more than those from the fields no-incorporated. N_2O emissions and N_2O concentration in the soil air increased with depth of placement which stem and leaf of corn was incorporated.

The residues of three crops (C/N ratio : cabbage 8.9, corn 41.0, and wheat 88.5) were incorporated into the field. N_2O emissions from each field were 121.8, 231.6 and 93.3 mgNm^{-2} in cabbage, corn and wheat, respectively. In addition, a linear correlation was found between the C/N ratio and the N_2O emissions per dry weight kilogram of each residue. After the cabbages were harvested from the field, the residues chopped were left on the surface (ST), or mixed with soil by rotary (MT). The N_2O emissions from ST was lower than those from MT.

These results show that crop residue incorporation into the field causes to increase N_2O emissions. In addition, it is demonstrated that N_2O emissions from the field are greatly affected by the factors such as the depth of incorporation, the kinds of crop residue and the method of application.

^{*1} Hokkaido Central Agricultural Experiment Station

(Present; Hokkaido Nuclear Energy Environmental Research Center, Kyowa, Hokkaido, 045-0123 Japan)

E-mail: seika@agri.pref.hokkaido.jp (Edit Committee of Publication in Hokkaido Pref. Agri. Exp. Stn.)

^{*2} ibid. (Present; Hokkaido Plant Protection Association, Sapporo, Hokkaido, 060-0001 Japan)