

B-5 熱帯アジアの土地利用変化が陸域生態系からの温室効果ガスの発生・吸収量に及ぼす影響の評価に関する研究

(5) アジアの農耕地から発生する窒素酸化物の制御技術

エコフロンティア フェロー

中国科学院沈陽応用生態研究所

侯 愛新

中国安徽省農業科学院

程 為国

独立行政法人 農業環境技術研究所

地球環境部 温室効果ガスチーム

鶴田治雄・秋山博子・須藤重人

化学環境部 栄養塩類研究グループ

中島泰弘

平成 11~13 年度合計予算額 6, 000 千円

(平成 13 年度予算額 2, 000 千円)

〔要旨〕 亜酸化窒素(N_2O)は主要な温室効果ガスの一つであり、一酸化窒素(NO)は対流層オゾンの生成と酸性雨に関与している。農耕地への窒素肥料の投入は、これらのガスを大気中に放出するので、今後窒素肥料使用量の増大が予測されるアジア地域で、それらのガスの発生量を減少させる技術の開発が強く要求されている。(1) そこで、肥料として通常肥料と被覆肥料を、また施肥方法として全面全層施肥法と溝状に局所的に施肥する方法を検討対象として、それらの方法が収量および N_2O と NO の放出量に及ぼす影響を明らかにするため、黒ボク土壌の畑圃場で調査を実施した。つくばの農業環境技術研究所の畑圃場(投入窒素量は 25 gN m^{-2})で、1999 年 9 月から 2000 年 3 月までと 2000 年 9 月から 12 月までの 2 回にわたり、ハクサイを栽培し密閉チャンバー法を用いて亜酸化窒素(N_2O)と一酸化窒素(NO)のフラックスを測定した。処理区は、尿素全面全層施肥区、尿素溝状施肥区、被覆尿素溝状施肥区であり(対照として無施肥区を設定)、2000 年秋の調査ではさらに、尿素溝 20% 減量施肥区と被覆尿素溝 20% 減量を設定した。これらの調査から、尿素肥料(25 gN m^{-2})の全面全層施肥に対して被覆尿素を溝状にその 20% だけ減量して局所施肥すれば、収穫量を減少させずに N_2O 総発生量を約 20% 削減できることが明らかになった。また NO 発生量は、溝状に施肥すれば、土壌中での吸収により全面全層施肥に比べて 50% 以上も削減された。さらに、作物の収穫物残さが N_2O の大きな発生源になっていることが明らかになった。(2) アジアの農耕地土壌におけるこれらのガス発生ポテンシャルを解明するために、中国の農耕地土壌の硝化と脱窒能を、室内実験で求めた。中国の畑地と水田から 12 種類の農耕地土壌を採取して、同一実験条件で各土壌の硝化活性および脱窒活性を比較した。その結果、硝化速度は土壌 pH によって大きな影響を受けることが判った。添加されたアンモニウム肥料は、C/N 比の高い婁土の土壌試料を除いて、アルカリ土壌($\text{pH} \geq 8$)では、最初の 1 週間に硝化され、また同時に N_2O および NO を大量に放出した。それにくらべて、酸性土壌($\text{pH} < 5.0$)では硝化速度は遅かった。酸性水田の赤土を除いて、全ての土壌試料の脱窒活性は、硝化活性と比較すると低かった。硝化実験における N_2O の初期 1 週間内の総放出量は、 NO および CO_2 の初期 1 週間内の総放出量と強い相関がみられたが、2-3 週間内の総放出量との間には相関はみられなかった。脱窒実験からの N_2O 放出量も、 CO_2 放出量と強い相関がみられた。

キーワード：被覆肥料、局所施肥、中国農地土壌、硝化・脱窒、作物残さ

1. はじめに

亜酸化窒素 (N_2O) および一酸化窒素 (NO) は、地球の窒素循環における重要な微量ガスである。 N_2O の大気中濃度の増加は、地球温暖化だけでなく、成層圏オゾン層の破壊の直接的な原因となる。 NO は、温室効果ガスである対流圏オゾンの生成、他の光化学オキシダント、酸性雨の原因となる。これらのガスの主要な発生源の一つは土壌であり、微生物の硝化および脱硝プロセスの副産物あるいは中間生成物で N_2O および NO が生成される。生物圏から大気への N_2O 放出量の 70% は土壌から放出されており、また地球上の年間 NO 発生量の 41% は農地から発生している。土壌からの N_2O および NO の放出は、農地の栽培管理および土壌条件、すなわち NH_4^+ および NO_3^- 濃度、含水量、温度、pH、エアレーション、タイプなどに依存する。化学窒素 (N) 肥料は、農耕土壌からの N_2O および NO 放出の最大供給源であると考えられている¹⁾。しかし、1990年代の最近の10年間に、窒素肥料使用量は毎年6~7%の割合で増加した²⁾。そして、世界の人口増加に伴い、ますます増加する需要を満たすのに必要な食料生産を確保するために、21世紀でも窒素肥料使用量が増加し続けるだろうと予想されている。そこで、食料生産の増加に伴う地球環境の悪化を防ぐために、窒素施肥技術の改良は解決すべき緊急の課題である。また、これらのガスの発生要因の一つに土壌タイプがあるが、アジアの農耕地土壌は多種多様であり、ガス削減技術は、各地域の主な土壌タイプの硝化や脱窒ポテンシャルを明らかにしたうえで、それぞれの土壌に適用可能な方法を開発する必要がある。しかし、アジアではこれらの研究はほとんど行われていない。そこで、本研究課題では、ガスの発生削減技術の開発とともに、アジアの農耕地土壌のガス発生ポテンシャルを解明する研究を行った。

2. 研究目的

(1) 尿素および被覆尿素肥料の溝施肥が白菜圃場における N_2O および NO の放出量に及ぼす影響

日本において畑圃場からの N_2O と NO の発生量の削減技術の開発に関する研究は、最近始まったばかりである。緩効性窒素肥料は、主に水稻栽培で水稻による栄養分の捕集効率を増大させて投入窒素量を減少させる目的で開発されてきたので、農地でのガス発生量の削減も期待されている。黒ボク土の畑圃場での調査によれば、 N_2O 発生量は、緩効性肥料の一つである硝化抑制剤入りの尿素系肥料の投入により、硝化抑制剤の含まれていない通常の尿素系肥料よりも約20%削減され、収穫量も減少しなかった³⁾。他の緩効性肥料である被覆尿素肥料を使用した場合は、通常の納所肥料を使用した場合と比較して、約25%削減した調査例もあるが、一方、同程度かわずかに増加した例も報告されている³⁻⁴⁾。これらの調査では、施肥方法はすべて全面全層施肥であった。しかし、緩効性窒素肥料は、種子あるいは作物の根にちかいところに局所施肥の方が全面全層施肥より有効であり、また、実際の圃場では測条あるいは溝状に施肥されている例が多い。そこで、本研究では、畑地からの N_2O と NO 発生量の削減技術の開発の一環として、緩効性窒素肥料を局所施肥する方法の有効性を検討した。

なお、1998年度はその予備調査として、ハクサイ畑で緩効性肥料ではない通常の化学肥料と発酵豚糞とを全面全層施肥および溝状施肥して N_2O と NO の発生量を測定した⁵⁾。その結果、 N_2O 発生量は、化学窒素肥料区では溝状施肥のほうが全面全層施肥より少なかったが、発酵豚糞区では、逆に発酵豚糞区のほうが多かった。

(2) 中国の農耕地土壌の N_2O および NO 発生ポテンシャル

アジアには広大な農地があり、また、アジアの窒素肥料の使用量は世界の使用量全体の約半分を

占めている。そしてアジアの中で中国は広大な農地と種々の土壌タイプが存在するので、中国の農耕地土壌における N_2O 放出を評価することは非常に重要であり、本研究課題の一つとした。中国における土壌のデータベースは、長期間の研究により整備されている。中国の農耕地土壌における窒素の動態を把握するためには、硝化・脱窒実験による中国の土壌からの N_2O および NO の放出や、土壌特性との対応関係を調べるための室内培養実験が有効である。硝化・脱窒過程による土壌からの N_2O および NO の放出は、降水、温度、施肥、灌漑などの土壌環境や農耕地管理に左右されるだけでなく、pH、有機物含有量、粒子サイズなどの土壌特性によっても決定される。硝化および脱窒に関する環境要因と土壌特性についての研究は、これまでに多く報告⁶⁾されているが、室内実験で異なった土壌を同時に比較した研究は、ほとんどない。

3. 研究方法

(1) 尿素および被覆尿素肥料の溝施肥が白菜圃場における N_2O および NO の放出量に及ぼす影響

①調査場所

実験はつくばの農業環境技術研究所内の畑圃場で行った。土壌タイプは黒ボク土であり、火山性の土壌で pH は 5.6 (もともとは酸性) であり、多くの有機物質を含んでおり、日本の畑地の 46.5% を占めている。

②調査期間

第1回は1999年9月～2000年3月に、第2回は2000年9月～2000年12月に調査を実施した。

③窒素肥料処理区

畑圃場調査では、表1に示すように、次の4つあるいは6つの処理区を設定した。被覆尿素のタイプはLP-30 (CHISSO-ASAHI Co. Ltd) で、25°Cの水中で全N含量の80%を放出するには、施肥後30日を要する。処理は、1999年は2連で、2000年は乱塊法で3反復行った。

表1 畑圃場調査での処理区の概要

処理区	略称	施肥量 gN m ⁻²	調査年	
			1999	2000
無窒素施肥	CK	0	○	○
尿素全面全層施肥	U-BC	25	○	○
尿素溝施肥	U-B	25	○	○
尿素溝施肥 (Bより20%窒素減量)	U-BL	20	×	○
被覆尿素溝施肥	U-CB	25	○	○
被覆尿素溝施肥(CBより20%窒素減量)	U-CBL	20	×	○

④栽培管理

ア 1999年――全面全層施肥を行う区では、肥料を一様に地表に散布した後、機械によって深さ15cmまでの表層土壌を耕した。溝状局所施肥を行う区には、前もって深さ12cmの溝を掘っておき、隣接する2つの溝の距離は60cmとした。これらの溝に施肥した後、土壌をかぶせて埋めた。施肥は1999年9月7日に行い、翌日に2週間前に播種しておいたハクサイの苗を、これらの区画に植え替えた。苗は60cmの間隔を置いた2本の列上に、40cmの間隔をおいて植えられた。畑の管理は地元

の慣習に沿って行い、栽培期間中には人工的な灌漑を行わなかった。ただし、植えつけ日とその翌日は、土壤が乾燥していたためにそれぞれ水撒きを2回行った。11月17日に収穫し、ハクサイの根と最も外側の数葉は11月22日に畑にすきこんだ。土壤中のアンモニア態窒素、硝酸態窒素を毎週1回測定した。また、収穫物の地上部分をサンプリングし、その生重と乾物重を測った。さらに、土壤水分と土壤温度の経時変化も測定した。なお、ガスフラックスの測定は、残さのすき込み後も継続し、2000年3月まで実施した。

イ 2000年――肥料は土壤表面に均等に全面全層施肥し、その後、回転耕耘機で約15cmの深さの作土層土壤に混ぜた。窒素肥料施肥の溝状処理区では、地表から8cmの深さの溝を掘った。次に、肥料を溝の長さ方向に沿って均等に施し、土壤で覆った。窒素施肥および移植は、2000年9月14日に行った。圃場管理は地域基準に従って実施した。野菜は、合計81日の栽培期を経て、2000年12月4日に収穫し、ハクサイの根と最も外側の数葉は畑にすきこんだ。土壤中のアンモニア態窒素、硝酸態窒素および可溶性窒素も毎週1回ずつ測定した。また、植物の地上部分をサンプリングし、その生重と乾物重を測った。さらに、土壤水分と土壤温度の経時変化も測定した。

⑤ガス採取と分析

ガスフラックスはクロードチャンバー法で、原則として週に2-3回測定し、 N_2O はECD検出器付きガスクロマトグラフで、 NO は化学発光法測定器で分析した。なお1999年には、土壤中のガス濃度を週に1回、実験の最初に前もって土壤中に設置しておいたテフロンチューブ(内径3mm)から試料空気として採取し、 N_2O と NO を分析した。

(2) 中国農耕地土壤の硝化および脱窒能の測定

①土壤採取

12種類の土壤を、中国の7つの省の8地点(北緯 $26^{\circ}\sim 47^{\circ}$ 、東経 $85^{\circ}\sim 126^{\circ}$ の範囲)から採取した(表7参照)。3種類の土壤は水田から採取し、その他は畑地から採取した。全ての土壤を風乾し、ふるいにかけて後、分析のために使用した。

②土壤分析と前培養

土壤の容積重、pH、ECは、土壤標準分析法⁷⁾に従って分析した(3反復)。全炭素(T-C)および全窒素(T-N)は、反復なしでCN-900アナライザー(Sumika Chemical Analysis Service)で分析した。可溶性有機炭素(SOC)、バイオマスC、 NH_4^+-N および NO_3^--N は、全ての土壤サンプルを4週間、40%WFPS(水分飽和度; water filled pore space)で前培養した後の、湿潤土壤を用いて分析した。SOCおよびバイオマスCは、クロロホルム薫蒸抽出法で分析した。土壤中の NH_4^+ および NO_3^- は、10%KCl溶液で30分間抽出した。 NH_4^+-N および NO_3^--N の濃度は、TRAACS 2000連続フロー・アナライザー(BRAN+LUEBBE)を用いて、比色法で測定した。

③硝化活性実験

硝化活性実験は、AlefとNannipieri⁸⁾の方法に若干の修正を加えて行った。すなわち、4週間、40%WFPSで前培養した各土壤サンプル10g(乾土重)を、12個の100mlプラスチック瓶と3個のガラス瓶に入れた。次に、 $(NH_4)_2SO_4$ 溶液と純水をミニピペットで各瓶に加え、60%WFPSで200ppm $(NH_4)_2SO_4-N$ になるように、土壤サンプルを調整した。その後、通気性を維持するために、全ての瓶を針で穴を開けたアルミホイルで覆い、 $25^{\circ}C$ で培養した。培養中に水分が減少したときは、3~4日

ごとにミニピペットを用いて水分を補給した。各土壌サンプルの12個の瓶は、培養後3、7、14、21日に培養器から抽出して、前述したように10%KCl溶液で NH_4^+ および NO_3^- -N濃度の変化を測定した。各土壌サンプルの3個のガラス瓶は、培養後2、4、7、11、16日後の N_2O 、 NO 、 CO_2 ガス放出量を測定するために用いた。 N_2O と CO_2 の放出量は、ガラス瓶をブチルゴム栓で24時間蓋をした後、測定した。 NO 放出量は10分後に測定した。

④脱窒活性実験

脱窒活性実験は、アセチレン阻害法⁸⁾を若干修正して用いた。すなわち、4週間、40%WFPSでの前培養の後、各土壌サンプル10g(乾土重)を、3個の80mlガラス瓶に入れた。次に、 KNO_3 溶液と純水を各瓶にミニピペットで加え、80%WFPSで200ppm KNO_3 -Nになるように、土壌サンプルを調整した。全ての瓶はブチルゴム栓で蓋をした。瓶のヘッドスペース空気の10%を、シリンジを用いて純粋なアセチレンガスと交換した。その後、瓶を 25°C で2日および10日間培養した後、瓶のヘッドスペースの N_2O および CO_2 の濃度を測定した。

4. 結果と考察

(1) 尿素および被覆尿素肥料の溝施肥が白菜圃場における N_2O および NO の放出量に及ぼす影響

①1999年の結果

ア N_2O の発生

窒素肥料施肥後の N_2O フラックスの推移を図1に示した。対照区(CK、無窒素区)からの N_2O の発生は、最初の5週間は非常に小さかったが、その後、ハクサイの外側の葉が腐り始めたこと

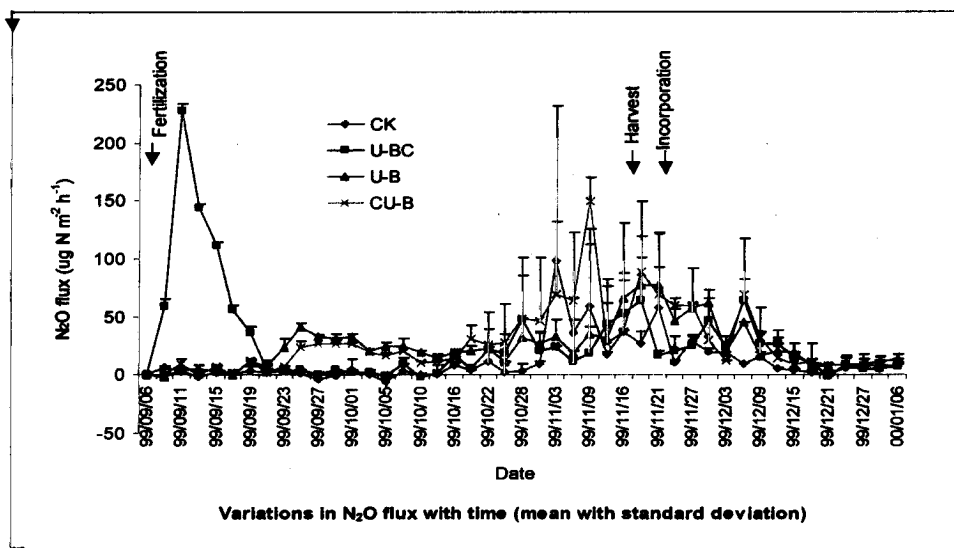


図1 1999年の調査期間中における4処理区からの N_2O フラックスの経日変化が観察された場合、あるいは収穫後に作物残渣が土壌にすきこまれた後に、大きくなった。これから、発生した N_2O は主に作物の有機物の分解から生じたと推測された。

U-BC区からの N_2O フラックスは、窒素肥料の施肥の直後から増加し、施肥の4日後に最高 $227.2\mu\text{g N}_2\text{O-N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ に達したが、およそ2週間後には、無施肥の対照区から発生するフラックスのレベルまで急速に減少した。ピーク期間中の平均気温は、硝化作用と脱窒素作用の両方に適した温度の 29.3°C であった。対応する土壌水分が、脱窒作用のプロセスが一般に抑制される50%WFPS以下に限定さ

れていたことから、この U-BC 区における大きな N_2O 発生のパークは、尿素肥料の施肥によって生じる NH_4^+ の硝化 (nitrification) であることは明らかである。U-B 区と CU-B 区の両方における N_2O 発生は、U-BC 区より遅れて 2 週間後におこり、その後の発生量は少なかったが U-BC 区よりも長い間続いた。U-BC 区と U-B 区での N_2O 発生のパターンは、土壤ガス中の N_2O 濃度の経日変化と一致した (図 2)。溝状局所施肥区の場合に見受けられた N_2O 発生が遅れは、肥料中の NH_4^+ が埋められた場所から回りの土壤の中に拡散していくのに時間がかかること、およびバクテリアが高濃度の窒素に適合して変化するのに時間がかかるという仮説によって、部分的に説明できると思われる。また、2 週間後に明らかな N_2O 発生が起こったこと、そのフラックスが CU-B 区において U-B 区よりもわずかに遅かったことは、被覆尿素肥料から窒素が徐々に放出されていくためと思われる。なお、この実験で用いられた POCF Type 30 尿素肥料は、25°C で最低 30 日の間に 80% の窒素を放出するように作られている。

対照区と同様すべての窒素肥料施用区において、実験期間の後半に大きな N_2O の発生が測定された。しかし、フラックスの時間変化はそれぞれ大きく異なっており、また 2 連の処理区の間でも大きな差があった。このような特徴は、主に栽培環境、天候、土壤水分などが複雑に絡み合って影響した結果と推測される。また、この期間中 CU-B 区では他の処理区と比較して大きなフラックスが測定されたが (図 1)、これはおそらく被覆尿素肥料の窒素が土壤に長期間存在したことと関係があると推測される。

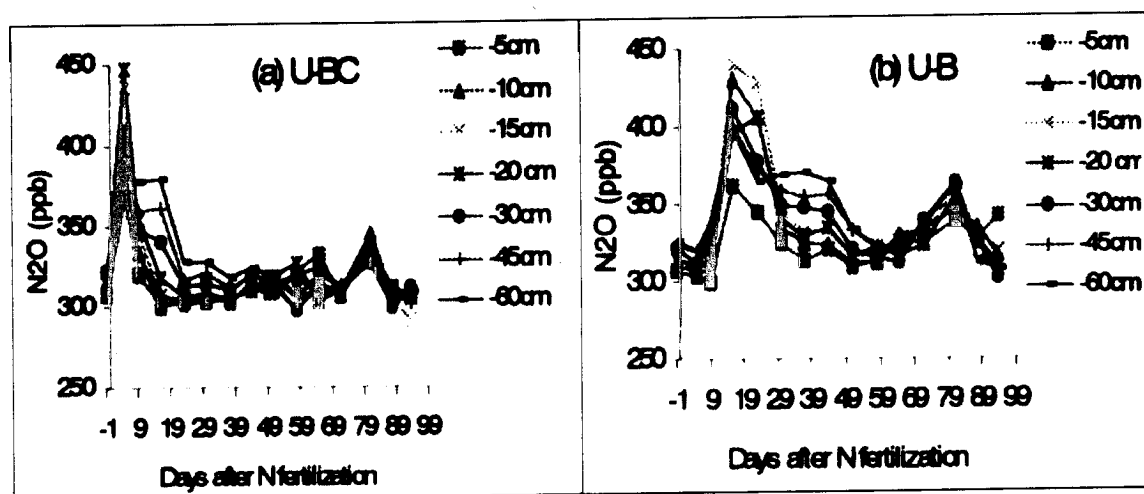


図 2 U-BC と U-B 処理区における土壤ガス中の深さ別 N_2O 濃度の経日変化

イ NO の発生

施肥後の NO フラックスの変化を図 3 に示す。最初の 2 週間、U-BC 区からの発生は、U-B 区、CU-B 区より非常に大きかった。その後の調査期間中には、どの処理区でもほとんど発生は見られず、後半に時々わずかなフラックスが測定されたのみであった。これらから、溝状局所施肥が NO 発生を大きく減少させることは明らかとなり、この結果は Sharma ら⁵⁾の結果と同じであった。溝状局所施肥による NO フラックスの大きな減少は、全面全層施肥に比べて NO 生成の減少よりも土壤による NO の

消失が増加したことによると推測される。NO 消失には脱窒作用以外に土壌への吸着が考えられるが、どのようなプロセスが関与しているかほとんど判明しておらず、土壌環境要因による NO 消失の制御についてはさらに不明である⁹⁾。Skiba ら¹⁰⁾は、室内実験で土を入れた小さな円筒を用いて、全 NO 生成量の 13%だけが土壌の表面から発生することを明らかにし、土壌からの NO フラックスがガス拡散係数と脱窒菌による NO 消失率に大きく影響されると報告している。本研究では、U-B 区での土壌ガスの測定 (図 4) によって、10 cm および 15 cm の深さにある非常に高濃度の NO は、深さ 5cm で NO 濃度が検出限界以下であったので、大気への NO 放出にはほとんど関与していないことが示された。一方で、U-BC 区の深さ 5cm の土壌ガス中には高濃度の NO が存在していたので、深さ 10cm より浅い部分の土壌ガスに含まれる大量の NO は、土壌表面からの NO 発生に関連がある (図 4)。一方、図 3 と図 4 によれば、作物残さによって N₂O が発生した期間、NO フラックスも土壌中の NO 生成も見られなかった。これから、作物残さによる NO 発生への寄与は、化学窒素肥料と比較して非常に小さいことがわかり、化学窒素肥料と作物残とで、N₂O と NO 発生 の寄割合が大きく異なることが、初めて明らかになった。

なお、実験期間中に U-BC 区において計算した NO/N₂O フラックスの比率は、大きな NO 発生が起きているときに、37-50% (WFPS) の範囲にある土壌水分量に対応して、4.4 から 10.8 へと変化した。

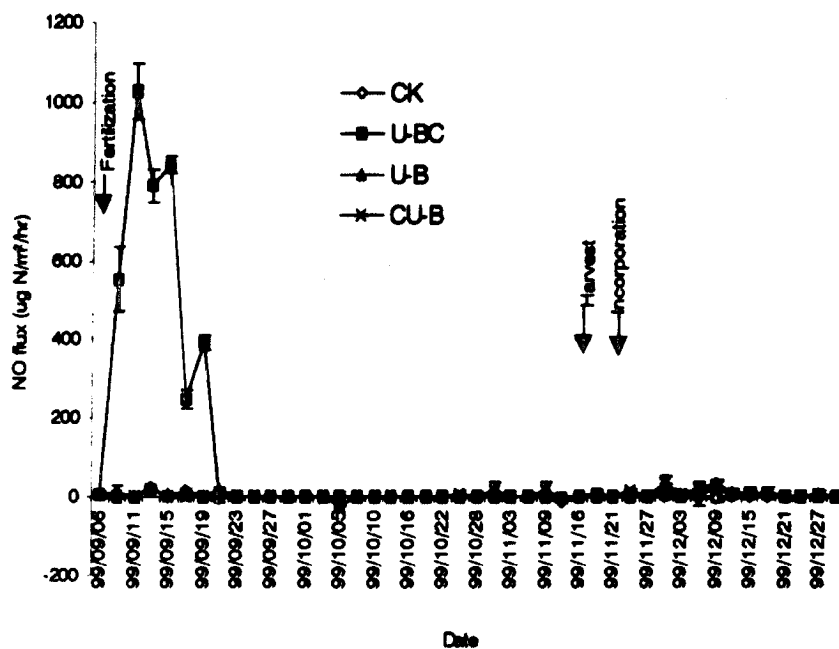


図 3 1999 年の調査期間中における 4 処理区からの NO フラックスの経日変化

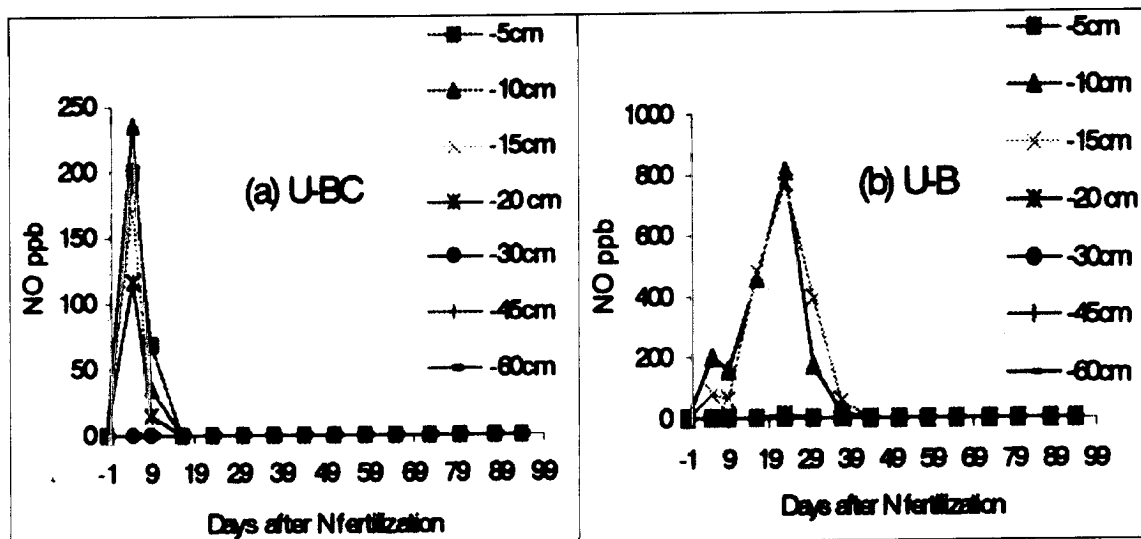


図4 U-BC と U-B 処理区における土壌ガス中の深さ別 NO 濃度の経日変化

ウ 調査期間別の N_2O と NO の発生量

以上の結果から、調査期間中のガス発生パターンを、全面全層施肥区(U-BC 区)をもとに次の4期間に大別し、各期間中の N_2O と NO の発生量を表2と表3に示した。

- I. 施肥後から N_2O と NO フラックスのピーク時期
- II. その後から再度発生するまでの無フラックス時期
- III. その後の2回目の長期間の N_2O 発生時期
- IV. その後の無フラックス時期

I 期と II 期の発生は、投入した化学窒素肥料によるものであるが、III 期の発生は、おもに作物残さによると推測される。しかし、土壌中の無機態窒素の測定結果によれば、CU-B 区では土壌中に無機態窒素がまだ存在していたので、両方の発生源から生成されたと考えられた。そこで、III 期においては、U-BC 区からの発生量をすべて作物残さによるものとして、その量を U-B 区と CU-B 区の発生量から差し引いた値を化学窒素肥料によるものと仮定すると、U-BC、U-B、CU-B 区からの化学窒素肥料による発生量は、それぞれ、33.4、27.0、41.2 $mgNm^{-2}$ であった。これから、 N_2O 発生量は、全面全層施肥に比べて、通常の尿素肥料の溝施肥は削減効果がみられたが、被覆尿素の溝施肥は、逆に発生量が多くなり削減効果はなかった。しかし、処理区の間では、後述するように、収量が異なりすぎこんだ作物残さ量も異なり、その影響も考慮すべきなので、この計算はあくまで定性的あることに注意する必要がある。なお、全期間における、無窒素区からの発生量を差し引いた各処理区からの発生量は表2に示したが、投入した化学窒素肥料に対する N_2O 発生量の割合は、0.13-0.20%であり、これまでの測定結果³⁻⁴⁾とほぼ一致していた。

一方、全測定期間中の NO の発生量は、表3に示すように、全面全層施肥では最大であり、 N_2O 発生量よりも多く、これまでの測定結果³⁻⁴⁾と一致した。しかし、他の2つの溝施肥区での NO 発生量は、全面全層施肥区の10%以下と非常に小さかった。これらから、 N_2O と NO を合計した窒素発生量は、溝施肥のほうが全面全層施肥の約75%も削減された。

なお、作物残さからの N_2O 発生量は、今回の測定では化学窒素肥料からの発生量とほぼ同量と推定され、今後さらに多くの測定を圃場で行うことが必要である。

表2 調査期間別の N₂O 発生量 (mgN m⁻²) と投入窒素量に対する発生割合

処理区 (投入窒素量 N: gm ⁻²)	99/09/06 -09/21 (I)	99/09/22 -10/15 (II)	99/10/16 -12/15 (III)	99/12/16 -00/03/17 (IV)	全期間 (N に対する発 生割合*:%)	99/09/06 -10/15 (I+II)	99/10/16 -00/03/17 (III+IV)
CK	0.92	0.62	34.96	1.61	38.11	1.54	36.57
U-BC (25)	31.43	1.97	42.96	1.98	78.34(0.16)	33.40	44.94
U-B (25)	1.53	14.70	53.79	0.83	70.85(0.13)	16.23	54.62
CU-B (25)	1.64	10.69	71.93	4.21	88.47(0.20)	12.33	76.14

* 各窒素施肥区の発生量から無窒素区(CK)の発生量を差し引いて計算した。

表3 調査期間別の NO 発生量 (mgN m⁻²) と投入窒素量に対する発生割合

処理区 (投入窒素量 N: gm ⁻²)	99/09/06 -09/21 (I)	99/09/22 -10/15 (II)	99/10/16 -12/15 (III)	99/12/16 -00/03/17 (IV)	全期間 (N に対する発 生割合*:%)	99/09/06 -10/15 (I+II)	99/10/16 -00/03/17 (III+IV)
CK	2.51	0	-1.76	0	0.75	2.51	-1.76
U-BC	191.69	0	3.10	0.06	194.85(0.78)	191.69	3.16
U-B	2.67	-0.94	6.61	0.15	8.49(0.03)	1.73	6.76
CU-B	1.21	0	10.11	0.10	11.42(0.04)	1.21	10.21

* 各窒素施肥区の発生量から無窒素区(CK)の発生量を差し引いて計算した。

エ 尿素肥料の種類と施肥位置による収穫量に対する効果

各処理区でのハクサイの収穫量を表4に示す。全面全層施肥に比較して、同量の尿素肥料、被覆尿素肥料を溝状局所施肥した場合に、それぞれ22.8%、10.2%収穫量が増加した。一方、この2つの溝状局所施肥の間では、尿素肥料に比べ被覆尿素肥料を用いた場合に10.3%も収穫が減った。この減収は、被覆尿素肥料では窒素の土壌への放出が徐々に行われること、および溝状局所施肥では施肥位置が土壌中の深い位置(約12cm)であったことの両方によって、ハクサイが窒素を必要とする大切な成長期間に必要な窒素を十分には供給できなかったためと考えられる。圃場での観察によれば、CU-B区ではU-BC区やU-B区に比較して最初の1ヶ月以上の間明らかに植物の成長が遅かった。

表4 各処理区におけるハクサイの収穫量

処理区	CK	U-BC	U-B	CU-B
収量(生重: kg/株)	2.65	3.24	3.98	3.57
U-BC区に対する増加率(%)			22.8	10.2

②2000年の結果

ア 土壌温度およびWFPSの変化

白菜の栽培期間中の土壌温度と土壌水分と降水量で計算したWFPSを、図5に示した。日平均温度は、移植時の約27℃から、収穫時には約7℃に低下した。移植後初期の20日間は、土壌温度は20℃を超え、この期間の被覆尿素(LP30)は、白菜の成長に最適かつ十分な窒素を放出したと推測される。WFPSは、栽培期間中に度々降った雨で約50~60%を保った。2000年9月14日~12月4日の合計降水量は299.5mmで、1999年より多く、とくに調査期間の前半は非常に多かった。

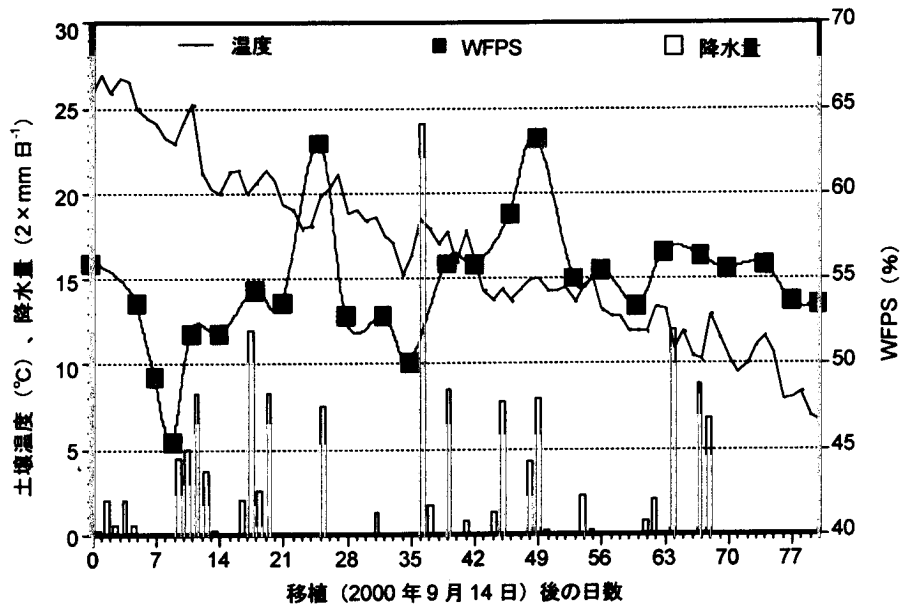


図5 白菜移植後の圃場における土壌温度 (5cm)、降水量、土壌 (0~5cm) のWFPSの変化

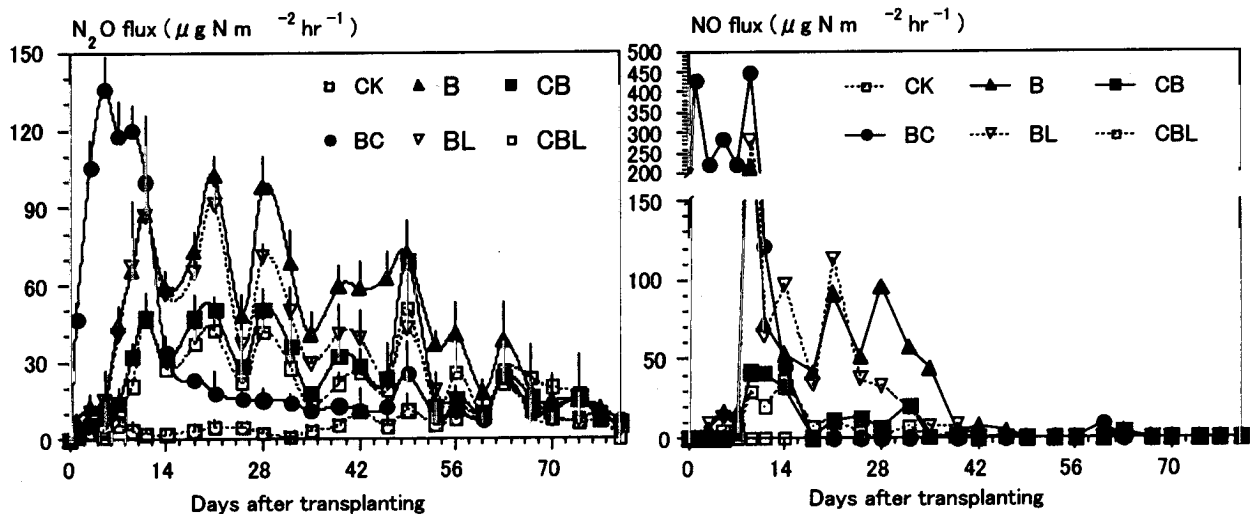


図6 施肥後および白菜移植後の6つの処理区におけるN₂OとNOフラックスの経日変化(単位: $\mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$)

イ N₂OおよびNOの放出

無窒素肥料処理区 (CK) からのN₂Oフラックスは、図6に示すように、全ての処理区中で最小であった。全ての窒素肥料処理区のうち、BCの初期10日間のN₂Oフラックスは最大であったが、その後 $30\mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 以下まで急激に減少し、CK区と同様な傾向を示した。2つの尿素溝処理区 (BおよびBL) では、N₂Oフラックスは、施肥してから1週間後に急激に増加し、移植から約50日後まではかなりの変化を伴いながらも、他の処理区よりも大きいフラックスを保ち続けた。20%減量尿素溝施肥区 (BL) からのN₂Oフラックスは、基準溝施肥区 (B) よりも少なかった。

表5 2000年秋の調査期間中の白菜圃場からのN₂OおよびNOの合計放出量(mgNm⁻²)と投入窒素量に対する発生割合

処理区	N ₂ O 発生量 (発生割合*)		NO 発生量 (発生割合*)	
CK	11.2±2.6a**	----	ND	
BC 25	56.0±1.4b	0.18%	100.7±29.8b	0.40%
B 25	85.3±4.4c	0.30	50.3±27.9c	0.20
BL 20	65.8±3.8b	0.27	39.8±26.6c	0.20
CB 25	50.8±1.7d	0.16	10.7± 3.7d	0.04
CBL 20	45.1±3.2d	0.17	6.9± 6.3d	0.03

* 発生割合は各窒素施肥区の発生量から無窒素区(CK)の発生量を差し引いて計算した。

**各値は平均値±SD (n=3) を表している。同じ英字に続く各列の値の差は、統計的に有意ではなかった (p < 0.05)。なお、NDは検出限界以下を意味する。

しかし、最初の2週間では、これら2つの処理区の間には違いがなかった。2つの被覆尿素溝処理区(CBおよびCBL)からのN₂Oフラックスは、溝尿素処理区(BおよびBL)と同様のパターンを示したが、施肥後2~6週間の期間中の、BおよびBLからのN₂Oフラックスの半分であった。白菜栽培期間中のCK、BC、B、BL、CB、CBLからの合計N₂O放出量は、それぞれ11.2、56.0、85.3、65.8、50.8、45.1mgNm⁻²であり(表5)、通常尿素的な溝施肥(B)からのN₂O発生量は、投入窒素量が同じの全面全層施肥(BC)より1.5倍と非常に多かった。

一方NOフラックスは、無窒素処理区(CK)では栽培期間中常に検出限界以下と小さかった(図5)。施肥および白菜移植後、BC区では最初の10日間に、NOフラックスが非常に大きくなり、栽培期間中のNOフラックスの最大値を示した。全ての溝施肥区では、NO放出の大部分は、施肥2~6週間後に発生した。CK、BC、B、BL、CB、CBLの3反復処理区からの栽培期間中の合計NO放出量の平均は、それぞれ限界以下、100.7、50.3、39.8、10.7、6.9mgNm⁻²であり(表5)、溝施肥からのNO発生量は、全面全層施肥の50%以下と大きく減少したことがわかった。

土壌中のNH₄⁺-NおよびNO₃⁻-N濃度の変化と比較すると、N₂O放出の変化は、土壌中のNH₄⁺-Nの変化と密接に関連していたので、N₂OおよびNOは、主に硝化で生成されていることがわかる。

なお、2000年の調査では、白菜の収穫後にその残さを1999年と同様にすきこんだが、ガスの発生はほとんど見られなかった。この原因は、2000年の調査時期は1999年より遅かったため気温や地温が低くなり、分解が進まなかったためと推測された。

ウ 地上部分の乾燥植物バイオマス量と収量の変化

収穫時の地上部分の乾燥バイオマスおよび作物収量(生重)の変化を、表6に示した。移植28日後の早期栽培期間中の白菜の苗の成長は、2つの被覆尿素溝処理区(CBおよびCBL)およびBCにおいては、2つの尿素溝処理区(BおよびBL)よりも良かった。これは施肥の位置が浅かったためと推測された。しかし、中期から後期の栽培期間においては、全ての窒素処理区において、地上部分の平均乾燥バイオマス量は、BC、B、BL処理よりもCBおよびCBLの方が多かった(ただし、統計的な有意差はなかった)。CBにおける収穫時の野菜の生重は、BCよりも多く統計的に有意であった。また野菜の収穫量は、BCと比べて2つの20%減量窒素肥料処理区(BLおよびCBL)でも、減少しなかった。

表6 移植28、54、80日後に計測した株の地上部分における乾燥バイオマス量および収穫時の作物収量

処理	移植後の地上部の乾燥バイオマス量 (g/株)			収量 (生重) (kg/株) *
	28日	54日	80日	
CK	26.35 ±2.72 a**	59.00 ±5.89 a	107.11 ±20.28 a	2.52 ±0.08 a
BC	37.31 ±0.41 bc	91.23 ±5.70 b	155.03 ±9.61 b	3.09 ±0.06 b
B	29.97 ±4.11 a	95.50 ±7.93 b	154.80 ±22.66 b	3.24 ±0.02 bc
BL	31.38 ±4.26 ab	102.40 ±5.47 b	162.67 ±5.51 b	3.13 ±0.16 bc
CB	39.12 ±1.18 c	109.91 ±17.26 b	171.62 ±14.75 b	3.41 ±0.04 c
CBL	40.66 ±3.12 c	105.32 ±21.12 b	154.67 ±13.92 b	3.24 ±0.16 bc

* 各処理区の15苗の平均

** 各値は、平均値±SD (n=3) を表している。同じ英字に続く各列の値の差は、統計的に有意ではない。

③総合考察

(1) 1999年と2000年とで、溝施肥区からの発生量が全面全層施肥にくらべて大きく異なった原因の一つは、2000年のほうが降水量が多く土壌水分量が異なったためと推測される。特に、施肥直後の半月間、1999年はほとんど雨が降らなかったのに対して、2000年では図5に示すように降水量が多くなり、 N_2O の発生が増加した。他に考えられる原因は、溝施肥での深さの違いであり、1999年は深さ12cmだったのに対して、2000年はそれより浅く8cmであった。これらの違いにより、尿素的投入窒素量が等しい場合の溝施肥区からの N_2O 発生量は全面全層施肥にくらべて、1999年は少なく、2000年は多くなったと推測される。なお、施肥位置の深さの違いが土壌表面からのガスフラックスに及ぼす影響は、 N_2O は少なく NO では非常に大きくなるという数値計算¹¹⁾があるので、土壌水分量の影響がより大きい可能性がある。

(2) 被覆尿素的の溝施肥でも、投入窒素量が全面全層施肥と等しければ、 N_2O 発生量は減少しなかったが、2000年に実施した20%だけ減量した被覆尿素的の溝施肥では、収穫量は減少せずに、 N_2O 発生量は約25%減少した(ただし、投入窒素量に対する発生割合は等しかった)。

(3) 2年間の調査ともに、 NO 発生量は、溝施肥のほうが全面全層施肥よりも大きく減少した。これは、土壌中では N_2O の消失よりも NO の消失が非常に大きいためである。

(4) 2000年の調査結果では、ハクサイの収穫量は、全面全層施肥に対して20%減量の溝施肥でも、減少しなかった。 N_2O 発生と収穫量との関係についての研究は非常に少ないが、作物の窒素肥料の吸収率は改良できること、また窒素の全損失量は、表層に一樣に施肥するのではなく深く施肥したり、溝状にまたは巣状に施肥することによって、削減可能である、という報告がある¹²⁻¹⁴⁾。今後は、施肥方法、ガス発生量、収穫量を総合的に検討し、最良のガス削減技術を開発することが大きな研究課題である。

(2) 中国農耕地土壌の硝化および脱窒能の測定

①中国の農耕地土壌の特性

中国の7省の8地点から採取した12種類の土壌には、著しい土壌特性の違いがあった(表7)。平均容積重は、変動係数(C.V.)7.8%の $1.09Mg\ m^{-3}$ で、変動は小さかった。平均土壌pH(水抽出)は、C.V.22.4%の6.42であった。No.1、2、7、10のpHは、ほぼ8に等しいか、または8

表7 中国の12種類の農耕地土壌の採取場所および特性

番号	土壌タイプ	採取場所	容積重 Mgm ⁻³	全C (%)	全N (%)	C/N	可溶性有機炭素 (μg Cg ⁻¹)	バイオマスC (μg Cg ⁻¹)	NH ₄ -N (μg Ng ⁻¹)	NO ₃ -N (μg Ng ⁻¹)	pH	EC Uscm ⁻¹
1	黒色土	黒龍江 (p)*	0.91	3.53	0.289	12.20	63.5	1286	1.2	56.6	7.94	577.7
2	灰色砂漠土	新疆	1.18	1.81	0.129	14.01	73.4	1002	0.4	28.7	8.09	493.3
3	プロゼム	瀋陽 (p)	1.05	1.10	0.095	11.52	21.8	1004	0.1	28.6	6.86	344.0
4	プロゼム	瀋陽	1.04	1.00	0.096	10.41	28.0	923	0.2	66.8	5.58	649.3
5	赤色土	桃源	1.08	0.89	0.097	9.21	94.5	848	2.0	36.5	4.71	177.8
6	赤色土	桃源 (p)	1.08	1.43	0.150	9.53	96.3	1355	54.5	20.4	4.78	157.2
7	黄褐色土	石家荘	1.22	0.94	0.084	11.16	68.3	747	0.9	20.2	8.05	341.0
8	赤色土	江西	1.21	0.77	0.074	10.39	64.7	506	2.1	14.6	5.07	126.4
9	黒色土	黒龍江	1.03	2.38	0.185	12.92	30.4	549	3.0	32.8	5.98	320.0
10	婁土	陝西	1.09	0.82	0.028	28.74	64.8	362	0.8	26.4	8.40	377.3
11	地表グライ土	昌図 (A)	1.08	1.28	0.130	9.82	42.6	336	1.5	54.2	6.73	415.0
12	プロゼム	昌図 (B)	1.14	0.80	0.091	8.82	41.3	242	1.7	32.2	4.87	352.0
LSD (0.05)			0.04	n. d [§]	n. d.	n. d.	5.8	64	2.5	1.0	0.22	21.0
平均値 [#]			1.09	1.40	0.121	12.39	57.5	763	5.7	34.8	6.42	360.9
C. V. (%) [#]			7.8	59.1	54.8	43.4	43.1	48.4	269.6	46.2	22.4	44.5

*: (p)は水田土壌、その他は畑地からの土壌サンプルを示している。

§: n. d. は、反復なしのため検出しなかったことを示している。

#: 平均値およびC. V. (変動係数) は、12種類の土壌の平均値から得たものである。

を超え、アルカリ土壌に属していた。NH₄⁺-Nの濃度は、(4週間の前培養期間中に、硝化されてNO₃⁻にはならなかった) No. 6の土壌中に含まれた大量のNH₄⁺のために、全てのパラメータ中で最大であった。全炭素のC/VおよびN、C/N、可溶性C、バイオマスC、ECは、40~60%であった。No. 10の土壌のC/N比28.74は、全土壌サンプル中最大で、Nの無機化や硝化に直接影響を与える可能性がある(次節参照)。

②硝化活性

通常、肥料添加直後には、土壌からN₂OとNOの大量の放出がある。3週間の培養硝化活性実験で、初期1週間のN₂OとNOの積算放出量を初期放出、第2-3週間内のN₂OとNOの積算放出量を後期放出であると定義した。初期放出とは、肥料添加直ちに、大量のガスが放出されることを指す。200ppm(NH₄)₂SO₄-Nの溶液を全ての土壌サンプルに加えた後、NH₄⁺とNO₃⁻の濃度変化は、アルカリ土壌において非常に速かった(図7)。NH₄⁺はNo. 1、2、7の土壌(pH≥8)では、1週間以内に完全にNO₃⁻へと硝化され、同時にN₂OとNOが大量に放出された(図7および表8)。婁土土壌(No. 10、pH=8.40、C/N=28.74)では、NH₄⁺は第1週目にいち早く減少したが、NO₃⁻は最初の3日間では増加しなかった。

これは、高いC/N比のために、Nの有機化が硝化より先に行われたことを示唆している。このため、婁土土壤 (pH=8.40) からのN₂OとNOの初期放出は、非常に少なかった。ほぼ中性の土壤 (No. 3 pH=6.86; No. 11 pH=6.73) では、添加NH₄⁺は減少し、3週間の培養後に低濃度レベルに到達する傾向があった。硝化活性は、酸性土壤 (No. 5、6、8、12)、特に酸性水田土壤 (No. 6) では、非常に小さかった。なおNo. 5、6、8の土壤は赤色土で、中国南部では代表的な土壤である。

N₂O、NO、CO₂の初期放出量および後期放出量 (表8) を比べると、初期放出量のC.V.は後期放出量のC.V.よりも大きかった。このことは、異なった土壤へのNH₄⁺添加に対して異なった反応があることを示している。NOの平均初期放出量は7.6であり、N₂Oの平均後期放出量の17.0倍であった (表8)。これは、NO放出によるNの減少が無視できないことを意味している。同様の結論が日本の農地³⁻⁴⁾で、また黒ボク土壤の室内培養実験¹⁵⁻¹⁶⁾で、報告されている。

表8 硝化活性および脱窒活性実験による中国の農耕地土壤からのN₂O、NO、CO₂の積算放出量

番号	土壤タイプ	硝化						脱窒			
		N ₂ O		NO		CO ₂		N ₂ O		CO ₂	
		1st w*	2, 3rd w*	1st w	2, 3rd w	1st w	2, 3rd w	2 days	10 days	2 days	10 days
(μg Nkg ⁻¹)	(μg Nkg ⁻¹)	(μg Nkg ⁻¹)	((μg Nkg ⁻¹)	(mg Ckg ⁻¹)	(mg Ckg ⁻¹)	(μg Nkg ⁻¹)	((μg Nkg ⁻¹)	(mg Ckg ⁻¹)	(mg Ckg ⁻¹)		
1	黒色土	258.7	23.4	2899.8	57.9	19.0	9.9	0.57	2.33	2.9	12.1
2	灰色砂漠土	491.8	3.3	1706.0	43.5	85.1	19.5	0.47	3.60	5.5	31.8
3	プロゼム	16.4	11.6	472.2	353.0	22.3	36.3	0.80	1.65	6.0	29.4
4	プロゼム	9.8	7.5	235.1	175.5	17.0	32.2	0.97	3.52	5.6	27.4
5	赤色土	10.1	7.9	206.5	170.1	27.4	41.4	0.79	4.59	6.3	31.5
6	赤色土	6.3	9.1	134.8	136.1	49.8	72.9	3.76	21.43	13.6	78.8
7	黄褐色土	406.0	4.1	1427.6	47.1	91.2	20.9	1.23	3.40	4.9	28.7
8	赤色土	15.6	10.1	867.9	451.6	21.9	32.3	0.68	4.27	7.0	29.5
9	黒色土	20.2	12.5	1135.6	457.7	16.6	31.4	0.69	3.97	6.2	36.4
10	婁土	17.6	22.5	170.3	199.8	2.6	9.0	0.41	0.48	0.9	1.2
11	地表グライ土	70.1	18.6	679.0	176.2	36.4	66.1	0.91	3.57	8.6	52.3
12	プロゼム	7.6	6.3	143.2	64.7	20.4	33.7	0.72	5.00	5.6	32.1
LSD (0.05)		17.9	2.3	268.4	29.4	7.7	3.7	0.95	3.27	1.7	6.7
平均値*		110.8	11.4	839.8	194.4	34.1	33.8	1.00	4.82	6.1	32.6
C.V. (%) #		156.9	59.0	100.2	76.8	81.2	57.8	89.7	111.8	49.9	58.6

*: 1st wは、最初の1週間の積算放出量、2, 3rd wは、第2週と第3週の間積算放出量を示している。#: 平均値およびC.V. (変動係数) は、12種類の土壤の平均値から得たものである。

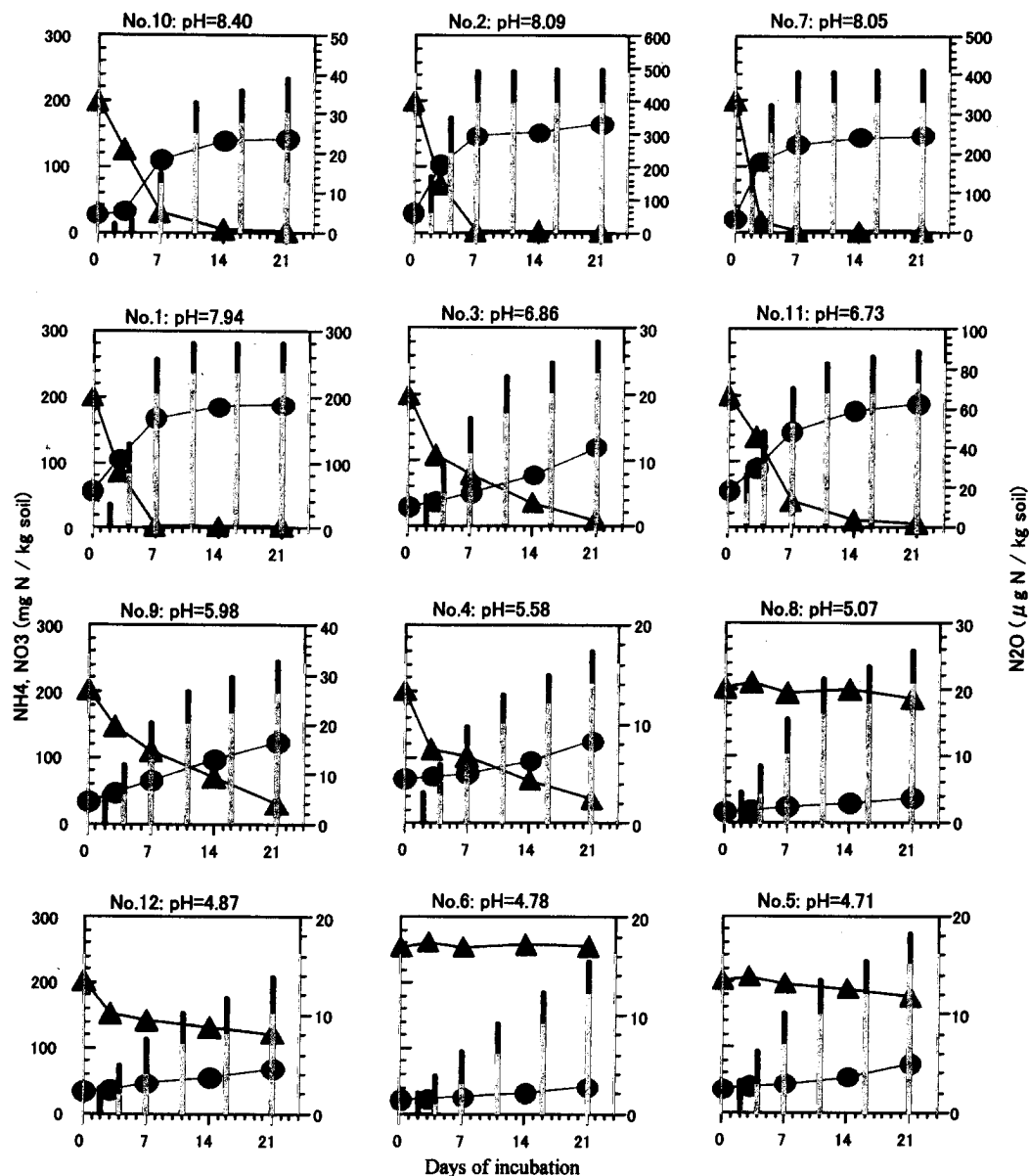


図7 200 ppm $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4\text{-N}$ を添加した中国の12種類の農耕地土壌における21日間の培養期間中の $\text{NH}_4\text{-N}$ (—▲—)、 $\text{NO}_3\text{-N}$ (—●—) 濃度、積算 N_2O 放出量 (|) の経日変化。左側のY軸は、同じ目盛りによる NH_4 と NO_3 濃度を示している。右側のY軸は、異なった目盛りによる N_2O 積算放出量を示している。

③脱窒活性

脱窒は、窒素サイクルの最終段階で、ここで固定されたNは、 N_2 の大気プールに戻る。これは嫌気性プロセスで、土壌水分が脱窒速度を決定する重要な因子である。本研究では、中国の12種類の農耕地土壌における脱窒活性を比較するため、80%WFPSの土壌水分条件で実験を行った。その理由は、農地での最大圃場容水量が、降雨後は約80%WFPSを維持していくためである^{3,17)}。培養2日後および10日後の、異なった土壌からの N_2O の生成量を、図8に示した。これらの値は、

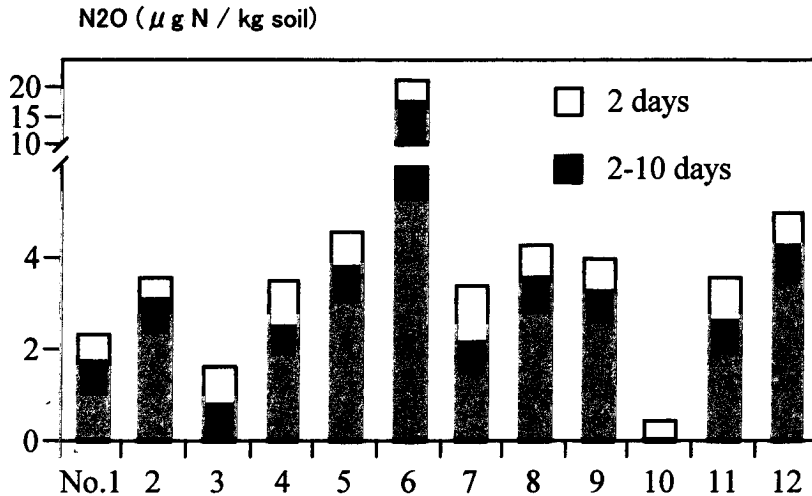


図8 10%アセチレン阻害法による、80%WFPS水分条件で200 ppm KNO₃-N添加土壌からの脱窒活性(N₂O生成)。X軸は土壌No.を示している(詳細は表7を参照)。

脱窒活性を比較する全ての土壌サンプルにおいて、小さかった(No. 6の土壌を除く)。脱窒活性の少なさは、本実験で同時に行った「アセチレン阻害法で、KNO₃添加なしで培養した同じ土壌からの結論」、または「大気条件下で、KNO₃を添加した同じ土壌からの結論」と一致する(データは、ここに提示していない)。しかし、N₂O放出量は、脱窒実験におけるCO₂放出量と正の相関があった(表8)。2日間および10日間のN₂OおよびCO₂放出量を比較すると、これら2つのガスの初期放出量は非常に少なかった(図8)。酸性水田土壌の赤色土(No. 6)は、最大の脱窒活性および最小の硝化活性を示した(前節参照)。この硝化と脱窒の相反する結果は、酸性水田赤色土へNH₄⁺として選択される還元型N肥料が、農耕地生態系からのN₂OおよびNO放出の減少に、効果的であることを示している可能性がある。

④硝化活性および脱窒活性実験によるガス放出と土壌特性の相関関係

硝化および脱窒実験によるガス放出と土壌特性の相関関係を解析した(相関表は省略)。土壌特性、容積重は、全炭素および全窒素(P<0.05)との間に負の相関がみられた。C/N比はpH(P<0.05)と、またECは、NO₃濃度(P<0.01)と、正の相関があった。硝化実験では、N₂Oの初期放出量も、NOおよびCO₂(P<0.05)の初期放出量と強い相関があった。土壌pHも、N₂OおよびNOの初期放出量とのみ相関があったが、後期放出量とは相関はなかった。硝化実験によるN₂O、NOガス放出量と脱窒実験によるN₂Oガス放出量との間には、強い相関は全くなかった。硝化および脱窒活性は、前節で考察した赤色土の酸性水田土壌を除いて、独立していることを示している可能性がある。

脱窒実験によるN₂OとCO₂放出量との間には、2日間培養と10日間培養の両期間中、正の相関があった(P<0.01)。脱窒活性が盛んでNH₄⁺濃度が高い赤色土(No.6)のために、脱窒活性は土壌中の初期NH₄⁺濃度と正の相関があった(P<0.01)。しかし、脱窒活性によるN₂O放出量と、SOC、バイオマスC、pH、TNなどその他の土壌特性との間には、何ら強い相関はなかった。

5. 本研究により得られた成果

(1) 窒素肥料を投入した畑地から発生する N_2O と NO を削減する技術として、本研究では、施肥方法の改善と緩効性窒素肥料の使用を検討した。そこで、通常肥料と緩効性窒素肥料の一つである被覆窒素肥料を、また施肥方法として全面全層施肥法と溝状に局所的に施肥する方法を対象として、それらの方法が栽培作物の収量および N_2O と NO の放出量に及ぼす影響を明らかにするため、つくばの農業環境技術研究所の畑圃場（黒ボク土壌、投入窒素量は 25 gN m^{-2} およびその 20% 減の 20 gN m^{-2} ）で、1999 年 9 月から 2000 年 3 月までと 2000 年 9 月から 12 月までの 2 回にわたり、ハクサイを栽培して、 N_2O と NO のフラックスを測定した。これらの調査結果によれば、通常の尿素肥料 (25 gN m^{-2}) の全面全層施肥に対して、被覆尿素を溝状にその 20% だけ減量して局所施肥すれば、収穫量を減少させずに N_2O 総発生量を約 20% 削減できることが明らかになった。また NO 発生量は、溝状に局所施肥すれば、土壌中での吸収により全面全層施肥に比べて 50% 以上も削減された。さらに、作物の収穫物残さが N_2O の大きな発生源になっていることが明らかになった。

(2) アジアの農耕地土壌における N_2O と NO の発生ポテンシャルを明らかにするために、中国の畑地と水田から 12 種類の農耕地土壌を採取して、同一実験条件で各土壌の硝化活性および脱窒活性を比較した。その結果、硝化速度は土壌 pH によって大きな影響を受けることが判った。各種土壌試料に添加されたアンモニウム肥料は、アルカリ土壌 ($\text{pH} \geq 8$) では (C/N 比の高い農土 (陝西省) の土壌試料を除く)、最初の 1 週間に硝化され、また同時に N_2O および NO を大量に放出した。それにくらべて、酸性土壌 ($\text{pH} < 5.0$) では硝化速度は遅かった。すべての土壌試料 (酸性水田の赤土を除く) の脱窒活性は、硝化活性と比較すると低かった。硝化実験における N_2O の初期 1 週間内の総放出量は、 NO および CO_2 の初期 1 週間内の総放出量と強い相関がみられたが、2-3 週間内の総放出量との間には相関はみられなかった。脱窒実験からの N_2O 放出量も、 CO_2 放出量と強い相関がみられた。

引用文献

- 1) Mosier, A. and Kroeze, C. 2000: Potential impact on the global atmospheric N_2O budget of the increased nitrogen input required to meet future global food demands. *Chemosphere- Global Change Science*, **2**, 465-473
- 2) FAO. 1998: FAO production yearbook. FAO (Food and Agriculture Organization)
- 3) Akiyama, H., Tsuruta, H. and Watanabe, T. 2000: N_2O and NO emissions from soils after the application of different chemical fertilizers. *Chemosphere- Global Change Science*, **2**, 313-320
- 4) 鶴田治雄：窒素肥料を投入した畑地からの亜酸化窒素(N_2O)と一酸化窒素(NO)の発生とその発生抑制技術、農業環境技術研究所年報 (平成 11 年度)、43-51 (2001)
- 5) Sharma, C., H. Tsuruta, H. Akiyama, M. Uwasawa and K. Furue: Development of techniques for the reduction of nitrous oxide emissions from nitrogen fertilized upland soils (2), in Annual Report of Eco-Frontier Fellowship (EFF) in 1997, Environment Agency, Japan, 149-161 (1998).
- 6) Granli, T. and Bockman, O.C. 1994: Nitrous oxide from agriculture. *Norwegian Journal of Agricultural Sciences*, Supplement No. 12, 1-128
- 7) JSSSPN (Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition). 1986: Soil Normal Analysis Methods, Hakuyusha Press, Tokyo (in Japanese)

- 8) Alef, K. and Nannipieri, P. 1995: *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. p. 234-238, Academic Press, Great Britain
- 9) Conrad R. 1996. Metabolism of nitric oxide in soil and soil microorganisms and regulation of flux into the atmosphere. In: *NATO ASI Series, vol. 139, Microbiology of Atmospheric Trace Gases* (Ed. J. Colin Murrell & Donovan P. Kelly), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 167-203.
- 10) Skiba U., Fowler D. & Smigh K.A. 1997. Nitric oxide emissions from agricultural soils in temperate and tropical climates: sources, controls and mitigation options. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 48: 139-153.
- 11) Hosen, Y., H. Tsuruta and K. Minami: Effects of the depth of NO and N₂O production in soil on their emission rates to the atmosphere: Analysis by a simulation model, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 57, 83-98 (2000).
- 12) Moraghan, J.T., Rego, T.J., Buresh, R.J., Vlek, L.P.G., Burford, J.R., Singh, S. & Sahrawat, K.L. 1984. Labeled nitrogen fertilizer research with urea in the semi-arid tropics. *Plant Soil* 80:21-33.
- 13) Youngdahl LJ, Lupin MS & Craswell ET (1986) New developments in nitrogen fertilizers for rice. *Fert. Res.* 9:149-160
- 14) Malhi SS & Nyborgm (1991) Recovery of N-15-labeled urea-influence of zero tillage, and time and method of application. *Fertilizer Research* 28 (3): 263-269
- 15) Hou A., H. Akiyama, Y. Nakajima, S. Sudo and H. Tsuruta: Effects of urea form and soil moisture on N₂O and NO emissions from Japanese Andosols, *Chemosphere-Global Change Science*, 2, 321-327 (2000)
- 16) McTaggart, I. and H. Tsuruta: The influence of controlled-release fertilisers and the form of applied fertiliser nitrogen on nitrous oxide emissions from a Japanese andosol under arable cultivation, *Nutrient Cycling in Agroecosystems* (in press)
- 17) Cheng, W., Nakajima, Y., Sudo, S., Akiyama, H. and Tsuruta, H.: N₂O and NO emissions from Chinese cabbage field as influenced by band application of urea or controlled-release urea fertilizers, *Nutrient Cycling in Agroecosystems* (in press)

[国際共同研究等の状況]

IGBP の IGAC (国際地球大気化学研究計画) の一環として実施中であり、中国科学院応用生態研究所の陳 冠雄教授との共同研究である。

[研究成果の発表状況]

(1) 発表(学術雑誌)

- ① Hou A., H. Akiyama, Y. Nakajima, S. Sudo and H. Tsuruta: *Chemosphere-Global Change Science*, 2, 321-327 (2000)
“Effects of urea form and soil moisture on N₂O and NO emissions from Japanese Andosols”
- ② 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).
- ③ 鶴田治雄：「窒素揮散と施肥管理」、*環境保全と新しい施肥技術* (安田 環・越野正義共編)、養

賢堂、316-333 (2001)

- ④ A.X. Hou and H. Tsuruta: Nutrient Cycling in Agroecosystems
“Nitrous oxide and nitric oxide fluxes from an upland field in Japan: urea type, placement, and crop residues” (in press)
- ⑤ Cheng, W., Nakajima, Y., Sudo, S., Akiyama, H. and Tsuruta, H.: Nutrient Cycling in Agroecosystems.
“N₂O and NO emissions from Chinese cabbage field as influenced by band application of urea or controlled-release urea fertilizers” (in press)

(2) 口頭発表

- ① Hou, A and Tsuruta, H: 日本土壤肥料学会 (2000)
“Comparison of NO and N₂O emissions between banding and surface broadcasting urea fertilized fields”
- ② 程 為国・中島泰弘・須藤重人・秋山博子・鶴田治雄：日本土壤肥料学会高知大会(2001)
「尿素および被覆尿素肥料の溝状施肥が白菜圃場における N₂O および NO の放出量に及ぼす影響」
- ③ 程 為国・鶴田治雄：日本土壤肥料学会関東支部会(2001)
「白菜圃場における溝状局部施肥の窒素養分の利用率および N₂O フラックスの空間変化」
- ④ 程 為国・鶴田治雄：日本土壤肥料学会名古屋大会(2002)
「ハクサイ残渣を添加した黒ボク土からの N₂O と CO₂ などのガスの放出に及ぼす土壌水分の影響」
- ⑤ 程 為国・鶴田治雄・陳 冠雄：日本土壤微生物学会(2002)
「中国農耕地土壌における硝化および脱窒能」

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

鶴田治雄：農林水産大臣賞受賞「農耕地における温室効果ガスの排出削減技術の確立および技術指導」(平成 13 年 4 月 7 日)

(5) 一般への公表・報道等

平成 13 年 12 月の環境省地球環境推進費の公開シンポジウムで、一部を発表した。

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

今後、報道機関や IPCC への報告などを通じ、成果の広報・普及に努める。