

B-51 温室効果ガスの人為的な排出源・吸収源に関する研究

(2) CH₄、N₂O の排出・吸収に関する研究

③ 熱帯の農耕地からの CH₄、N₂O 発生と肥培管理

研究代表者 国際農林水産業研究センター環境資源部 渡辺 武

平成10年度予算額 4,000千円

[要旨]

温室効果ガスの1つである亜酸化窒素（以下 N₂O）について、熱帯農耕地からの発生量の把握と、温帯の農耕地を含めた発生抑制技術の開発を目的として、研究を行った。

熱帯の農耕地からの発生量把握に関しては、以前よりタイにおいて現地研究者と共同研究を実施しており、今回もタイのコンケンとナコンサワンに試験圃場を設けて、N₂O フラックスを測定した。本研究では、1年間を通じた発生量を高い精度で推定するために、以前の研究でやり残された、雨季開始時から作物栽培を開始するまでの期間と、作物栽培期間中における畝間から発生を中心に、測定を行った。結果は、雨季開始時には大きなフラックスが発生することもあるが、全体としてみれば、その後の作物栽培期間中における窒素無施用土壌からのフラックスと大きな差がなかった。窒素肥料を施用しない畑地土壌からの、雨季を通じた平均フラックスは、コンケンで 12.2 μg N₂O-N m⁻² hr⁻¹、ナコンサワンで 8.6 μg N₂O-N m⁻² hr⁻¹であった。窒素肥料施用区の畝間からの発生量は、肥料が施用される畝からの発生量よりも少ないが、窒素肥料無施用区の畝からの発生量よりも多かった。本研究で得られたデータと、それ以前の研究成果を合わせることで、熱帯サバンナ気候帯の畑地土壌における通年での N₂O 発生量が推定できるようになった。

農耕地からの N₂O 発生抑制技術の開発については、肥効調節型肥料と硝化抑制剤入り肥料について、N₂O 発生抑制効果を尿素と比較して調べた。日本の代表的な畑土壌である黒ぼく土壌を 1/2000 アルフグネルポットに充填し、上記の肥料をそれぞれ施用して、スイートコーン栽培期間中の N₂O 発生量を比較した。N₂O 発生量は、尿素を施用した土壌からのものに対して、肥効調節型肥料では 45%であり、硝化抑制剤入り肥料では 18%であった。これらの肥料によって、畑地土壌からの N₂O 発生を抑制できることが示された。

[キーワード]

亜酸化窒素、 温室効果ガス、 畑地土壌、 熱帯地域、 肥効調節型肥料、 硝化抑制剤入り肥料

1. 序

亜酸化窒素（以下 N₂O）は、1992年の大気中濃度が 311ppbv であり、1980年から1990年の間に年平均 0.75ppbv(0.25%)の割合で上昇している¹⁾。N₂Oは、地球から宇宙へ放出される熱を吸収するので、この濃度上昇は地球温暖化に数%から10%の割合で寄与していると言われている。IPCCによると、地球で発生する N₂O のうち 40%前後が人為的発生源に由来し、その6割が耕作地土壌に由来すると推定されている²⁾。地球温暖化によると思われる様々な兆候が現れつつある今、N₂Oの発生量を把握し、抑制技術を開発する必要がある。特に、アジア地域におけるこのような研究は遅れているために、今後は

積極的に研究を進めていく必要がある。

2. 研究目的

本研究においては、熱帯農耕地より発生する N_2O について、その発生量の把握と、温帯の農耕地を含めた発生抑制技術の開発を目的としている。

発生量の把握については、平成 7～9 年度に行われた「地球温暖化抑制のための CH_4, N_2O の対策技術開発と評価に関する研究（地球環境研究総合推進費）」によって、タイの畑地土壌より発生する N_2O に関して、すでに作物栽培期間中および乾季における発生量は測定されている。そこで本研究では、今まで測定されていない雨季開始時における発生量を測定することと、作物栽培期間中における畝と畝間からの発生量比較を行った。発生抑制技術の開発に関しては、有機物管理による発生抑制を目指して、有機物施用が N_2O 発生に与える影響について調べた。これらの実験は、タイにおいて、今まで共同研究を実施してきたタイ人研究者らとともにを行った。

さらに、肥効調節型肥料および硝化抑制剤入り肥料を利用した、 N_2O 発生抑制技術の開発を目指した実験を行った。農耕地からの発生抑制技術については、日本においても確立されたとは言い難い状況にある。肥効調節型肥料と硝化抑制剤入り肥料は、価格面から途上国においてすぐに活用されることは困難であるので、当面は日本の農耕地における利用を念頭に置いて、これらの肥料による N_2O 発生抑制効果を調べる実験を行った。昨年度までの室内実験によって、硝化抑制剤の効果が示されたので、本研究では作物の存在する系（ポット実験）において実験を行った。

3. 研究方法

3. 1 タイの畑地土壌からの亜酸化窒素発生量測定

タイ東部のコンケンと、中央部のナコンサワンに試験圃場を設け（第 1 図参照）、雨季開始時における N_2O フラックスと、作物栽培期間中における畝と畝間からのフラックスを定期的に測定した。コンケンの土壌は酸性砂質土壌であり、ナコンサワンの土壌は塩基性の重粘な土壌である。

両試験サイトには $36m^2(6m \times 6m)$ の区画を 6 連で設けた。雨季開始時には、そこからの N_2O フラックスを、アクリル製チャンバー（底面積 $0.144m^2$ 、高さ $0.2m$ ）を用いて、クローズドチャンバー法²⁾により測定した。チャンバーを被せてから 0, 15, 30 分後に、ヘッドスペースの空気をプラスチック製シリンジで採取し、真空バイアル瓶に封入した（第 2 図参照）。これらを日本に輸送後、 N_2O 濃度を ECD 付きガスクロマトグラフで分析し、その濃度勾配よりフラックスを算出した。コンケンにおいては、5 月中旬～6 月下旬までの間に 10 回、ナコンサワンにおいては、4 月下旬から 5 月下旬までの間に 8 回測定を行った。

作物栽培期間中は、6 つの区画を尿素施用区と無施用区の 2 つに分けて、各 3 連で飼料用トウモロコシを栽培した。肥培管理については現地での慣行に従った。尿素施用区では、畝の部分に溝を掘り尿素を施用した。尿素施用区においては畝と畝間からの N_2O フラックスを、無施用区においては畝からの N_2O フラックスのみを上記の方法で測定した。ガスの採取はコンケンにおいては、7 月上旬から 10 月上旬までの間に 16 回、ナコンサワンにおいては、5 月下旬から 9 月上旬までの間に 15 回行った。

3. 2 有機物施用が亜酸化窒素発生に及ぼす影響の調査

コンケンの試験圃場に、 $36m^2(6m \times 6m)$ の区画を 6 連で設けて、C/N 比が大きく (C/N = 203)、腐熟化の

進んでいない有機物（バカス（サトウキビの搾りカス））を乾物重で 2kg/m^2 施用した。これを、バカスに加えて尿素を施用した試験区と施用しなかった試験区の2つに分けて、各3連で飼料用トウモロコシを栽培した。尿素施用区においては畝と畝間からの N_2O フラックスを、無施用区においては畝からのフラックスのみを上記の方法で測定した。測定頻度は畝と畝間とについての測定と同じである。

3. 3 肥効調節型肥料・硝化抑制剤入り肥料による亜酸化窒素発生抑制効果の検証

供試土壌は、国際農林水産業研究センター八幡台圃場（茨城県つくば市）の淡色黒ボク土を用いた。供試土壌の $\text{pH}(\text{KCl})$ は 5.5、炭素と窒素の含有率はそれぞれ 3.84%、0.27%であった。

肥効調節型肥料として用いた「LP70」は、ポリオレフィンの被膜に覆われた尿素であり、湛水土壌および通常の畑土壌中で地温が 25°C の時、皮膜を通して尿素的の 80%以上が 70 日間かけて放出される。硝化抑制剤入り肥料として用いた「くみあい AM 尿素化成高度 45」は、硝化抑制剤である 2 アミノ-4 クロルー 6 メチルピリミジンが 0.3~0.4%添加された複合肥料で、 $\text{N}\cdot\text{P}_2\text{O}_5\cdot\text{K}_2\text{O}$ をそれぞれ 15%含み、窒素については尿素と硫酸が 9.5:5.5 の比率で混合されている。

1/2000a ワグネルポットに生土を圃場と同じ密度である 0.81g cm^{-3} になるように 12.02kg ポット充填し、スイートコーンを1本立てで栽培した（第3図）。各ポットに尿素、肥効調節型肥料および硝化抑制剤入り肥料を、茨城県の野菜栽培基準に準じて、中心部直径 11cm の円を除いた深さ 5cm の面に、それぞれポットあたり窒素換算で 4.05g を層状に施用した。さらに、スイートコーンを播種し窒素肥料を施用しないポットと、肥効調節型肥料を施与してスイートコーンを播種しないポットを作成した。これらの5試験区を3連で行うため、合計15個のポットを作成した。これらを用いて、育苗温室にて N_2O フラックスをクローズドチャンバー法により、週に2~3回のペースで測定した。灌水は数日おきに行い、土壌水分を一定に保った。

チャンバーは、背の高いスイートコーンの成長後にもガスサンプリングが行えるよう、改良したものを使用した（第3図）。背の高いスイートコーンごと土壌表面を覆うチャンバーでは、ヘッドスペースの容量が大きくなりすぎて、 N_2O の濃度勾配に対する分析誤差が大きくなってしまふことが懸念された。そこで、中心部の管を作物が突き抜けるようにしたドーナツ状チャンバーを用いて、ガスサンプリングを行った。チャンバーはアクリル製で内径は 24cm、高さは 15cm であり、中心部のパイプの外径は 6cm である。

実験は 1998 年 6 月 26 日に開始し、9 月 12 日に最後の N_2O フラックスを測定した後、9 月 24 日にスイートコーン地上部を収穫して終了した。

4. 結果・考察

4. 1 タイの畑地土壌からの亜酸化窒素発生量測定

雨季開始時における N_2O フラックスは、コンケン、ナコンサワンの両試験サイトにおいて、その後の作物栽培期間中における、窒素肥料無施用区からの N_2O フラックスと有意な差は見られなかった（第4、5図参照）。雨季開始時には、その前に乾季に土壌中に集積した易分解性有機物を利用して、土壌微生物の活動が急速に活発になり、これに伴って N_2O フラックスも増大することが予想された。たしかに、雨季開始時に大きなフラックスが見られることもあったが、そのような現象は限定的であり、全体として比べれば、雨季開始時とその後の作物栽培期間中で、 N_2O フラックスに大きな差はなかった。両期間を合わせた雨季全体で、窒素肥料を施用しない畑土壌からの N_2O フラックスの平均値は、コンケンで 12.2μ

g N₂O-N m⁻² hr⁻¹、ナコンサワンで 8.6 μg N₂O-N m⁻² hr⁻¹であった。ただし、コンケンでは耕起直後のフラックスが特異的に大きかったので、これを除いて平均値を算出すると、8.7 μg N₂O-N m⁻² hr⁻¹となった。

作物栽培期間中の畝と畝間からの発生量については、どちらの試験サイトにおいても、似た傾向が得られた。すなわち、窒素肥料施用区の畝間からの発生量は、肥料が施用される畝からの発生量よりも少ないが、窒素肥料無施用区の畝からの発生量よりも多かった(第1表)。畝間は畝よりも低い位置にあるので、土壌が湿潤なうえに、畝の部分に施用された窒素肥料が畝間に移動することで畝よりも N₂O 発生量が大きいのという報告もある³⁾。畝と畝間からの N₂O 発生量の関係は、土壌の性質、畝の形および施肥後の降雨状況等によって大きく変化すると思われるので、それらの影響を明らかにするような詳細な研究が必要である。

本研究で得られたデータと、平成8~10年度に得られた研究成果を合わせることで、熱帯サバンナ気候帯における天水依存の畑地土壌からの N₂O 発生量が推定できる。熱帯サバンナ気候は、明瞭な雨季と乾季とがあり、熱帯では農耕地がもっとも広く分布する。多くの場合、農業は雨季から乾季の始めにかけて行われる。乾季においても、サトウキビやキャッサバのように作期の長い作物が栽培されることもあるが、そのような場合でも施肥は雨季に行われる。このような農耕地土壌からの N₂O 発生量を

- ① 窒素肥料が投入されたその年の雨季中に、投入された窒素肥料に由来して発生するもの
- ② ①を除いて雨季に発生するもの
- ③ 乾季に発生するもの

の3つに分けてそれぞれ推定することで、1年を通じた発生量を推定できる。

①については、作物栽培期間中の窒素肥料施用区と無施用区との差より、投入窒素に対する N₂O 放出比を求め、これに窒素肥料投入量を乗じることで推定される。平成8年度からの一連の研究において、ナコンサワンで1996,98年、コンケンで1997,98年、プラプフタバで1996年、チェンマイで1997年と合計6回測定が行われた。その結果を第1表に示す。

②については、雨季を通じた窒素無施用土壌からの平均 N₂O フラックスに、雨季の期間を乗じることで推定される。本研究で、雨季を通じた測定がナコンサワンとコンケンの2箇所で行われ、それ以前には作物栽培期間中の測定が、1996年にナコンサワンとプラプフタバで、1997年にコンケンとチェンマイで行われた。その結果を第2表に示す。

③については、乾季を通じた平均 N₂O フラックスに、乾季の期間を乗じることで推定される。平成8~10年度までの研究で、1996年にプラプフタバで、1997年にコンケンとチェンマイで測定が行われた。その結果を第3表に示す。3箇所で行われた測定のうち、直前の雨季の施肥による N₂O フラックスの増加が検出されたのは、コンケンのみであった。検出感度の改善なしには、乾季における、その前の雨季における施肥による、N₂O フラックスへの影響を調査することは困難であることが示された。

4. 2 有機物施用が亜酸化窒素発生に及ぼす影響の調査

有機物施用の N₂O 放出への影響を調べた実験における、圃場からの N₂O フラックスの経時変化を第6図に示す。バカスのみを施用して、尿素を施用しなかった試験区からの N₂O 発生量は、バカスと尿素の両方とも施用しなかった試験区からの発生量よりも少なかった。これに対して、バカスと尿素をともに施用した試験区からの N₂O 発生量は、尿素のみを施用した試験区からの発生量の3倍に達した。C/N比が大きく(C/N=203)腐熟の進んでいない有機物を施用した土壌に、窒素肥料を施用すると、N₂O の放出量が数倍に増加することが示された。

本実験では、C/N比が大きく(C/N=203)、腐熟の進んでいない有機物であるバカスのみを供試したが、農家がこのようなものを農地に施用することはほとんどない。今後は、農家が自分たちの農地に施用する、C/N比がより低下し腐熟の進んだ堆肥の施用が、 N_2O 発生に及ぼす影響についての調査が必要である。

4. 3 肥効調節型肥料・硝化抑制剤入り肥料による亜酸化窒素発生抑制効果の検証

スイートコーンの生育は、尿素区、肥効調節型肥料区および硝化抑制剤入り肥料区で外見上の違いはなかった。無窒素区では他よりも著しく生育が劣った。 N_2O フラックスの経日変化を第7図に示す。 N_2O フラックスは実験開始直後には小さかったが、その後増加を続け、尿素区では開始から25日後、肥効調節型肥料区では31日後にピークに達した。硝化抑制剤入り肥料区では、他と較べて緩やかに増加していき、開始から52日後にピークに達した。また、肥効調節型肥料を施用したポットからの N_2O フラックスを、作物のある場合と無い場合とで比較すると、以下ようになった。すなわち、実験開始から4週目の途中までは、両者はほぼ同様に推移していたが、それ以降は、作物のある方の N_2O フラックスが常に小さく推移した。

測定期間中に発生した N_2O の総量は、尿素区>肥効調節型肥料(作物無し)区>肥効調節型肥料(作物あり)区>硝化抑制剤入り肥料区>無窒素区の順に多く(第4表)、全ての試験区間に危険率1%水準の有意差があった。以上のように、本研究によって、肥効調節型肥料および硝化抑制剤入り肥料が、窒素肥料の施用に伴う土壌からの N_2O 発生を抑制しうることが示された。

5. 本研究より得られた成果

本研究により、熱帯の畑地土壌から発生する亜酸化窒素について、雨季開始時における発生量に関するデータと、作物栽培期間中における畝間からの発生量に関するデータが得られた。このデータと本研究以前に得られた作物栽培期間中および乾季それぞれの平均フラックス、窒素肥料に対する亜酸化窒素の放出比率についてのデータと合わせることで、より高い精度で通年の発生量推定を行える。

有機物施用の影響については、C/N比が大きく未熟な有機物を、窒素肥料と合わせて施用すると亜酸化窒素の放出量が増大することが判明した。しかしながら、腐熟の進んだ堆肥等を施用した場合については、実験を行わなかったために未解明である。今後、実験による解明が待たれる。

日本国内でポットを用いた実験によって、肥効調節型肥料および硝化抑制剤入り肥料が窒素肥料の施用に伴う土壌からの N_2O 発生を抑制しうることが示された。本実験では日本の畑土壌の代表的な土壌群に含まれる土壌として淡色黒ボク土を供試したが、今後は他の土壌についても N_2O の発生が低減することを確かめる必要がある。さらには、これらの肥料による N_2O 発生抑制のメカニズムを解明し、その効果を農地で最大限に発揮させる方法を開発していくことが必要である。

6. 参考文献

- 1) IPCC:CLIMATE CHANGE 1994, p13, Cambridge University Press (1995)
- 2) 土壌環境分析法編集委員会編：土壌環境分析法, p133~138, 博友社, 東京 (1997)
- 3) I. P. McTaggart and K. A. Smith, Nitrous oxide emissions from arable and grassland soils: Effect of crop type and nitrification inhibitors, Proceedings of the Transactions of the 9th Nitrogen Workshop, 523-526, Braunschweig, Germany, September 1996

[国際共同研究等の状況]

タイ国農業局(DOA)土壌科学部の Dr. P. Chairaj をコアパーソンとして、試験圃場を設置した2カ所の畑作物試験場に共同研究者を得て共同研究を行った。今後も、コンケン畑作試験場においてタイ人研究者が主体となり、本研究では未解明のまま残された腐熟の進んだ堆厩肥の施用の亜酸化窒素放出への影響を調査研究することになった。

[研究成果の発表状況]

(1) 口頭発表

渡辺 武、Prapai Chairaj、鶴田治雄：1999年度日本土壌肥料学会全国大会（札幌） 7月30日－8月1日, 1999

「タイの畑地土壌より発生する亜酸化窒素」 (予定)

(2) 論文発表

○渡辺 武、陽 捷行、石川隆之：日本土壌肥料科学雑誌、「肥効調節型肥料および硝酸化成抑制剤入り肥料による亜酸化窒素の発生抑制効果」 (投稿中)

第1表 タイの畑地土壌から作物栽培期間中(施肥後)に発生する亜酸化窒素

	土壌	測定年	測定 期間 (日)	窒素施用区 N ₂ O-N発生量 N ₂ O-Nmg/m ² (注1)	窒素無施用区 N ₂ O-N発生量 N ₂ O-Nmg/m ² (注1)	(+N--N)発生量	
						肥料-N (%)	
						A(注2)	B(注3)
コンケン	Oxic Paleustults	1997	106	28.9	10.9	0.12	0.24
"	"	1998	99	49.3 (29.6)	18.8	(0.28)	
チェンマイ	Typic Ochraqalfs	1997	56	11.6	4.4	0.08	0.15
ナコンサワン	Typic Calcicustalfs	1996	84	34.7	7.5	0.22	0.44
"	"	1998	75	21.6 (12.1)	10.9	(0.10)	
プラプフタバ	Oxic Paleustults	1996	87	32.0	8.2	0.19	0.37

注1: 窒素肥料を施用した畝からの発生量 カッコ内は畝間部からの発生量

注2: 肥料を入れない畝間部については窒素肥料施用区と無施肥区とでN₂O発生量に差がないと仮定した場合
カッコ内は無施肥区の畝間部からの発生量が畝からのものと仮定した場合

注3: 畝間部についても畝上と同程度にN₂O発生量に差があると仮定した場合

第2表 タイの畑地土壌(窒素無施用)から雨季に発生する亜酸化窒素

サイト	年	平均値*	95%信頼区間*
ナコンサワン**	1996	4.2	2.6 - 5.6
プラプフタバ**	1996	5.1	3.4 - 6.7
コンケン**	1997	5.3	3.6 - 6.9
チェンマイ**	1997	6.7	3.8 - 9.7
ナコンサワン***	1998	8.6	5.0 - 12.3
コンケン***	1998	12.2	4.1 - 20.3

*: 単位はN₂O-N μg m⁻² hr⁻¹

** : 作物栽培期間中のみ測定

*** : 雨季を通して測定

第3表 タイの畑地土壌から乾季に発生する亜酸化窒素

サイト	Plot	平均値*	95%信頼区間*
コンケン	+N	3.5 **	2.49 - 4.44
	-N	0.7 **	-1.66 - 3.02
チェンマイ	+N	1.9	0.63 - 3.21
	-N	2.6	1.30 - 3.92
プラプフタバ	+N	2.0	-0.12 - 4.10
	-N	2.5	0.61 - 4.47

*: 単位は $N_2O-N \mu g m^{-2} hr^{-1}$

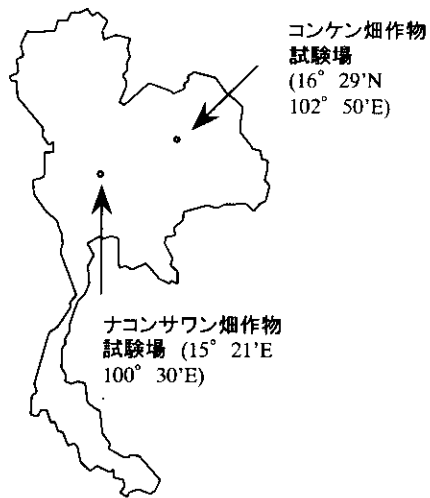
** : +N区と-N区と95%水準で有意差あり

第4表 実験期間中に発生した亜酸化窒素

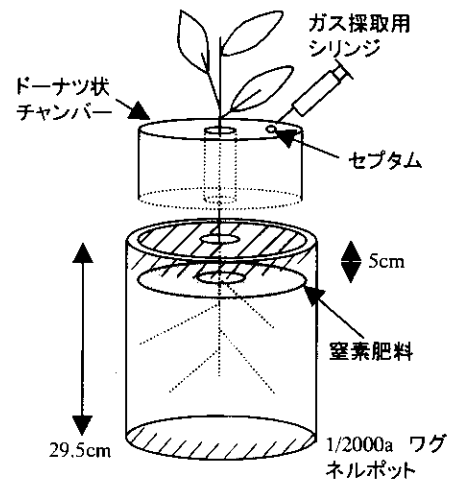
処 理 別	平均*	範囲*	投入窒素に 対する比**	尿素区に 対する比**
肥効調節型肥料(LP70)	2942	2823~3049	0.072	45
硝化抑制剤入り肥料(AM化成)	1219	1056~1345	0.029	18
尿素	6513	6030~6862	0.16	100
無窒素	27	7~48		
肥効調節型肥料(作物なし・LP70)	4536	4157~4954	0.11	70

*: $N_2O-N \mu g$

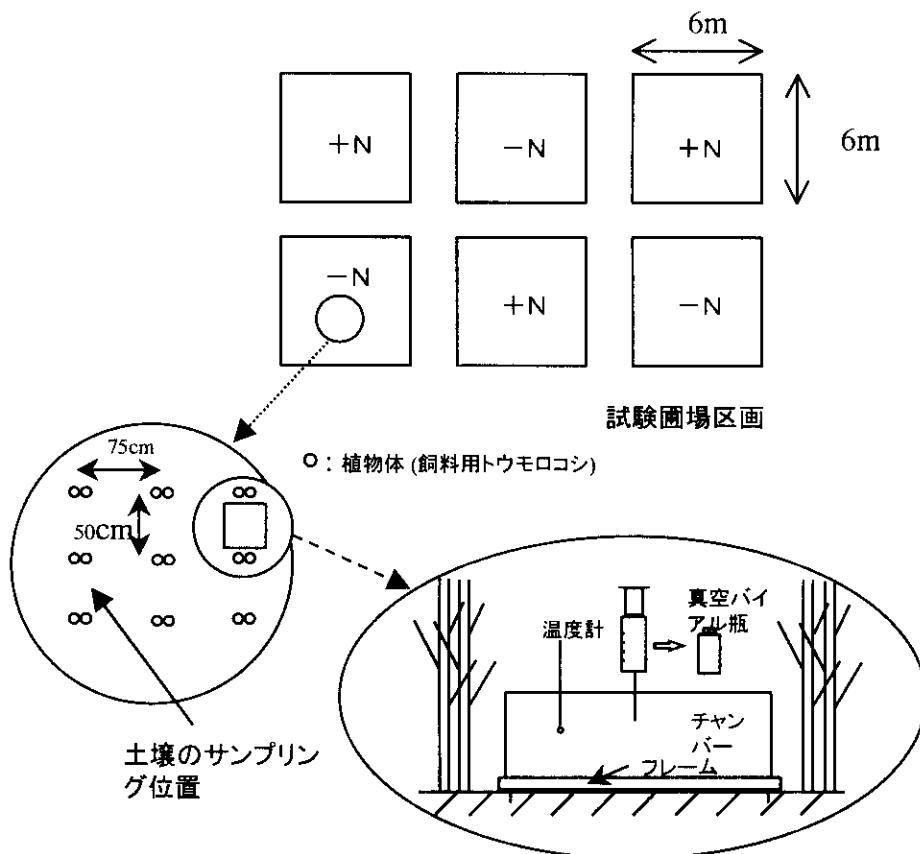
** : 平均値について無窒素区からの発生量を引いたうえでの値(%)



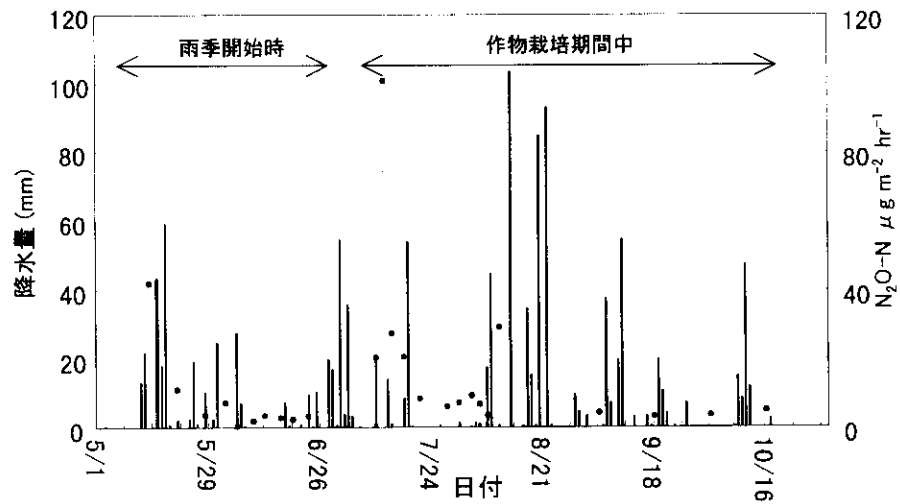
第1図 タイ国内に設けた2カ所の試験サイト



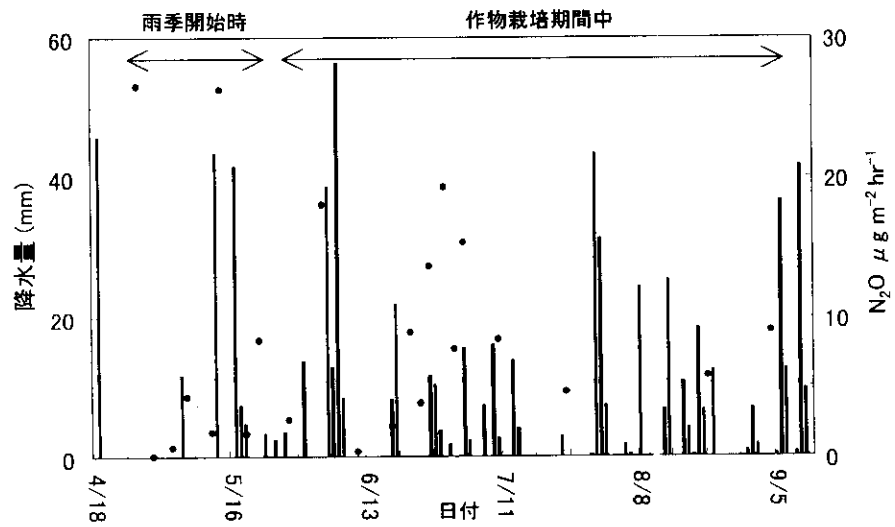
第3図 実験用ポットとガス採取用チャンバー



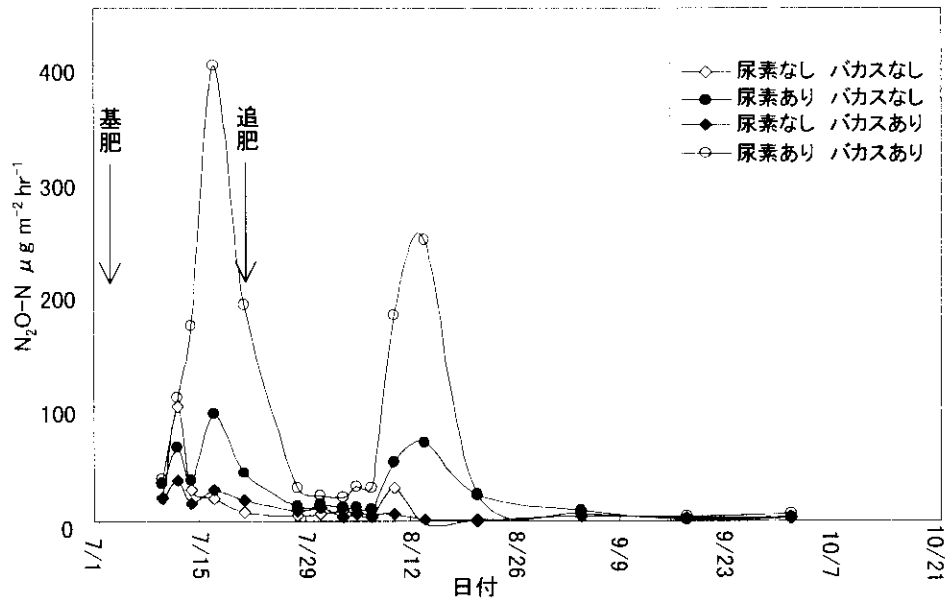
第2図 試験区の配置と大きさ、植栽密度、チャンパーの設置位置



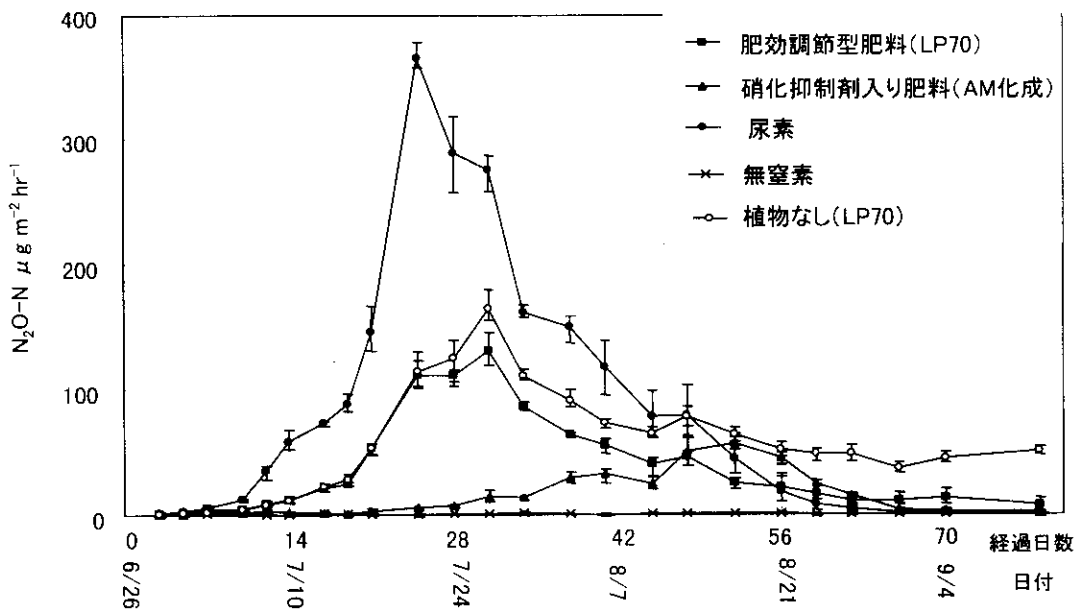
第4図 コンケンにおける、雨季開始時と作物栽培期間中における窒素無施用土壌からの亜酸化窒素フラックス(黒丸)と日降水量(棒グラフ)



第5図 ナコンサワンにおける、雨季開始時と作物栽培期間中における窒素無施用土壌からの亜酸化窒素フラックス(黒丸)と日降水量(棒グラフ)



第6図 亜酸化窒素フラックスに対する有機物施用の効果



第7図 肥効調節型肥料、硝化抑制剤入り肥料を施用したポット土壌からの亜酸化窒素フラックスの経日変化 (バーは3反復で測定した範囲)