

放牧草地土壌の脱窒能力とその分布特性について

Potential Denitrification Rates and Its Spatial Variability in Grassland Soil

羽田 守夫*、L.Lijklema**、J.J.M.de Klein**
Morio Haneda*

ABSTRACT : On the grassland soil, much fertilizer and droppings are spread and finally these are changed to N_2 gas through the process of nitrification and denitrification. For denitrification, there are still many unsolved problems including the production rate of N_2O gas. So, it is important to estimate the potential denitrification rate of grassland soil from the viewpoint of environmental problems. In this study, we try to estimate the potential denitrification rate of grassland soil. At the same time, we measure some properties of the soil, such as ignition loss and available nitrogen and also try to estimate the spatial variability of these properties including denitrification rate. Finally, we consider the most suitable sampling distance on estimation of the denitrification rate of the grassland soil, when taking the spatial variability of these properties into accounts.

KEYWORDS : Denitrification Rate, Grassland Soil, Spatial Variability, Variograms, Sampling Distance.

1 はじめに

放牧草地に散布された肥料や家畜のし尿などの窒素成分は、植物の成長などに利用される一方、余剰成分は土壌中の微生物の働きによる硝化や脱窒作用の結果、最終的に窒素ガスとして大気中に放散されている。しかし、この過程で一部亜酸化窒素ガスが生産されて大気中に放出され、これは炭酸ガス以上の温暖化促進ガスとして地球の温室効果上注目されている。現在、そのメカニズムや生成速度の正確な評価を行うため様々な調査検討が行われているが^{1) ~ 3)}、現象の複雑さや測定自体の困難さもあり、より正確な測定法の確立が期待されている。

わが国の農業は水田を中心としているので、酪農中心の空間的に広い放牧草地を持つ西欧諸国とは異なった面があるが、土壌中の窒素成分の変化と地下水への溶解、およびその環境への影響の評価という面では共通した課題もある。特に、土壌自体がどの程度の硝化、脱窒能力を持ち、それらが空間的にどのように分布しているか^{4)、5)}、およびこれらが土壌のどのような性質と関係が深いかを検討することは、土壌の現地での正確な能力測定上基本的に重要と考えられる。

本研究は、このような観点から特に土壌の脱窒現象を対象とし、実際の放牧草地土壌を用いて実験的にその能力を求め、同時に他の様々な土壌の性質との関係の検討を行ったものである。そして、土壌の持つ脱窒能力を空間的に正確に把握する上での基礎的な知見を得ることを目的とした。

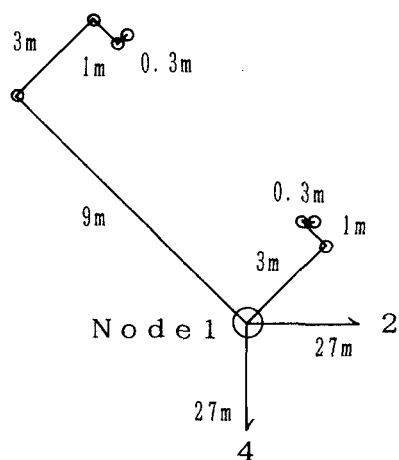
* : 秋田工業高等専門学校、Akita National College of Technology.

** : Wageningen Agricultural University, The Netherlands.

2 調査及び測定方法

2. 1 サンプルング方法とバリオグラム

放牧草地土壌は、Droevendaal にある実際に使用されている大学付属農場の、表面下20cmまでの表層土壌を用いた。土壌の諸性質の空間的分布を調査するためのサンプルングは、以下に示す Nested or Hierarchical Methodに基づいて行った。これは、一辺が27mの正方形格子の節点上に9個の基準採取地点をまず設ける。この基準地点から、更に任意方向に一定距離(9m)離れた9地点を次の採取地点とし、またこの地点と基準地点との双方から更に任意方向に一定距離離れた18地点を三層目の採取地点として選択する。そしてこれを更に二回繰り返して、四層目および五層目までの採取地点をそれぞれ18地点ずつ取り、合計72地点を階層的に選択する方法である。採取地点の距離については一層毎に前の距離の1/3とし、方向については乱数を用いて、八方向から計算機でランダムに選択した。図-1に、一例として基準地点1のサンプルング案を示した。



前述のように、本研究では異なった距離を持つ五階層のサンプルングを行ったが、これは土壌の諸性質のばらつきがどの程度の距離で収まるかを判断するためである。この基準として、二地点間の濃度の分散に基づくバリオグラム (Variograms) を求め、判断の目安とした。これは以下のように定義される。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2m(h)} \sum_{i=1}^m \{z(x_i) - z(x_i+h)\}^2 \quad (1)$$

ここに、 $m(h)$: 測定ペアの数、 $z(x_i)$: x_i 点における濃度、 $z(x_i+h)$: x_i 点から hm 離れた点の濃度、 $\gamma(h)$: 距離 h に関する分散 (semivariance)

2. 2 土壌の脱窒速度および諸性質の測定

土壌の脱窒速度の測定は、次のように行った。一定量の土壌を密栓付きびんに入れ、定量の水を加える。嫌気の状態を保つために窒素ガスで十分に脱気した後、一定濃度の硝酸性窒素溶液を加え、更に脱気を行う。その後、びんのふたをセプタムで閉じ、20℃の恒温室中でゆっくり振とうさせながら約二週間に渡って溶液中の硝酸性窒素、アンモニア性窒素の濃度変化を観察した。同時に硝酸を加えないびんも用意し、コントロールとした。採水は、セプタムを通してニードルを用いて混合液を一定量取り、窒素の分析は遠心分離後、ろ過して分離した上澄み液について自動分析計で行った。なお、嫌気の状態の確認は、びん中の気体の成分を実験前後にそれぞれガスクロで分析することにより行った。

土壌の諸性質としては、水分量、有機物量および利用可能窒素量の測定を行った。利用可能窒素量は、一定量の土壌に一定濃度の塩化カリウム溶液を加え、数時間激しく攪拌、振とうした後の上澄みろ過液について、アンモニア性および硝酸性窒素濃度をそれぞれ測定することにより求めた。

3 結果と考察

3. 1 土壌の脱窒速度

脱窒速度の測定実験に入る前に、好気的および嫌気の状態で土壌そのものから窒素成分がどの程度溶出するかの検討を行った。その結果、本研究で採用した実験条件では、アンモニア性窒素はやや増加するものの硝酸性窒素にはほとんど濃度変化はなく、土壌に初期に与える硝酸性窒素溶液の濃度に比べて影響はほとん

ど無視できる程度のものであることが確認された。また、アンモニア性窒素や亜硝酸性窒素の濃度変化も小さく、これらも無視出来るほどであった。

土壌の脱窒作用によって、びん中の硝酸性窒素濃度が時間的にどのように減少するかを、基準地点8の回りのいくつかの土壌について図-2に示した。これによると、時間的にほぼ一定の速度で減少するものや、急速に減少したのち一定になるものなど土壌による違いが認められた。一般的に、最大速度はスタート直後または2日後などの比較的早い時期から観測される例が多く、開始からほぼ一週間までの間に見られた。このように、最大速度はこの期間の最大勾配から、平均速度は全期間の勾配からそれぞれ求められた。土壌の脱窒速度は、測定に長期間かかることや、一度に測定できる数に限りがあることなどから、全72サンプルの内19サンプル（約26%）を任意に選んで測定を行った。その結果、最大脱窒速度は、3.68 ~ 17.1 mgN/Kg soil/day の間に分布し、地点毎の変化もかなり大きく、最大値と最小値の比率は約4.6 倍もの大きな範囲を示すこととなった。また全体の平均は8.57mgN/Kg soil/day であったが、8mgN台の値は全体の3割程度を占めるだけであった。一方、平均速度は地点毎のばらつきも大きい、平均すると最大速度の約62%の値を示した。

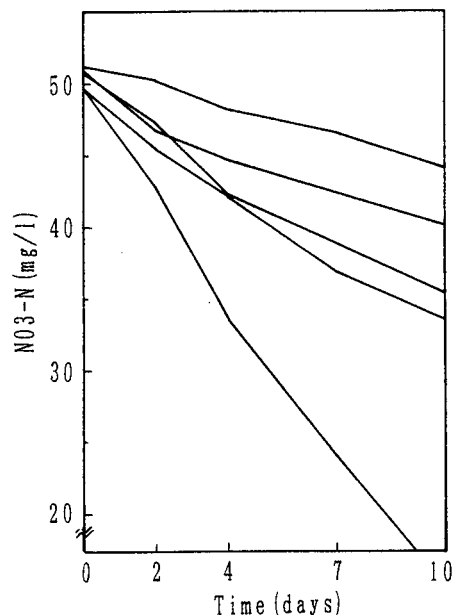


図-2 脱窒速度の測定例

3. 2 土壌の諸性質

(1) 水分量と有機物量

図-3に、水分量と有機物量の地点毎の変化を示した。水分量は、湿潤土壌中の水分の割合（%）として示してある。この農場の水分量は比較的小さく、最小8.53%から最大12.7%の間に分布し、平均値は10.2%であった。水分量9%以上11%未満が最も多く、全体の83%を占め、水分量11%以上は少なく全体の1割強であった。このように、水分量については特に突出したような値は無く、空間的に見て比較的緩やかな変化を示していると言える。全体として北から南にかけて少しづつ上昇しているのが認められる。

有機物量は、土壌を燃焼させた時の損失量（I L）の割合（%）として示した。これによると、土壌の有機物量は最小3.30%から最大5.82%の間に分布し、平均値は3.85%であった。全体の7割弱は4%未満の有機物量であり、5%を越すものは一例だけで、しかも水分量の最大値を示したのと同じ資料であった。また、水分量と同様に南の一帯で北の部分よりも有機物量が高くなっているのが見られる。このように、有機物量の空間的分布は、水分量よりも濃度変化が大きく、一様性よりも異質性に近いのが認められ、これは土壌中での物質の拡散の難易に関係していると考えられる。

(2) 利用可能窒素量

土壌から利用可能な窒素量として測定した、アンモニア性窒素と硝酸性窒素の地点毎の変化を、図-4にそれぞれ示した。これによると、両窒素共に濃

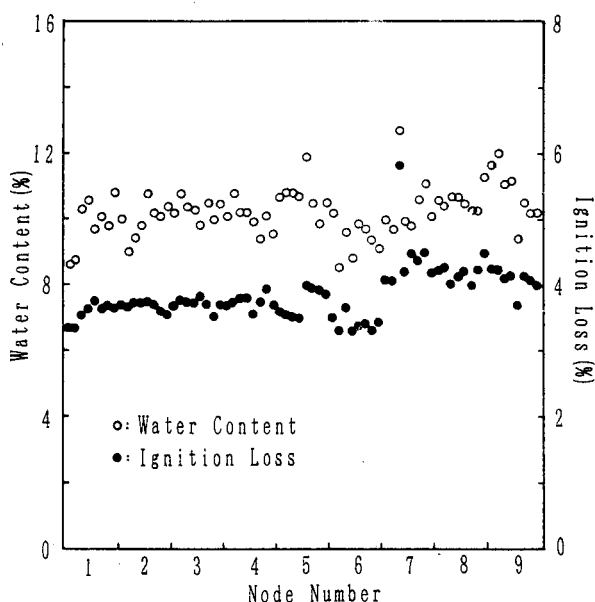


図-3 水分量と有機物量の地点毎の変化

度変化が大きく、極端に大きな値を示す地点が何カ所か存在するのが認められる。最大値と最小値は、アンモニア性窒素で5.21と0.464 mg/l、硝酸性窒素で22.8および0.706 mg/lであり、その比率はそれぞれ11.2倍と32.3倍であった。平均値は、アンモニアで0.784 mg/l、硝酸で5.43mg/lとなり、約1：7の比率であった。硝酸性窒素の方が一般に高い濃度を示し、アンモニア性窒素の方が高濃度だったのは一地点のみであった。全体として特に高濃度の方にすそ野の長い分布を示しているのが特徴で、最頻値はアンモニアと硝酸でそれぞれ0.5 mg/l台および3 mg/l台であった。

これらは、放牧草地への肥料の散布や家畜のし尿の放散が、空間的に均一に行われているわけではないことを示し、またそれらの物質の土壌中での拡散の困難さも併せて示している。放牧草地土壌には、このような、周囲よりも極端に高濃度のいわゆる hot spotが存在し、これが土壌含有物質の空間的な異質性を特徴付けていると考えられる。

（3）土壌性質の空間的分布

本研究では空間的に均一にサンプリングを行った訳ではないので、等濃度線図を描くのに適しているわけではないが、前述の土壌の異質性を空間的に検討するために、測定した濃度データを基に含有物質の等濃度線図を描いてみた。この一例を硝酸性窒素濃度について図-5に示した。これはあくまで一例であり、サンプリング点以外の地点に関しては情報もなく恣意的に描いたに過ぎないが、この図から次のことが言えよう。まず、北東部から南西部にかけてゆるやかな濃度勾配が見られること、南西部には、基準地点4、7および8地点の周囲にピーク濃度が15mg/lを越える高濃度地点が三地点存在すること、これ以外にも基準地点2を除き、ピーク濃度は10mg/l以下であるが中程度の高濃度地点が4～5地点存在することなどである。これらは、約70m四方の範囲の濃度分布ではあるが、高濃度のspotが予想以上に散在し、土壌の異質性を検討する上でこれらの性質を無視できないことが認められる。

他の性質に関しても、例えばアンモニア性窒素については硝酸よりも全体の濃度勾配は小さく、高濃度地点の数も少ないが、ピーク濃度は相対的に高さが増していることなどの特徴がみられた。一方、土壌の水分量については、北から南にかけて緩やかな濃度勾配が見られるが窒素ほどではなく、高濃度地点も基準地点7のみにやや高いピークが見られるだけで大きな変化は認められなかった。有機物質量についても、基準地点7のみにやや高濃度のspotが見られるなどほぼ水分量と同じような傾向で、水分量よりも全体の濃度勾配がやや大きいことだけの違いであった。

3. 3 脱窒速度と土壌の性質との関係

脱窒速度は19サンプルについて測定を行ったが、この速度と同じ土壌の他の性質との関係について検討を

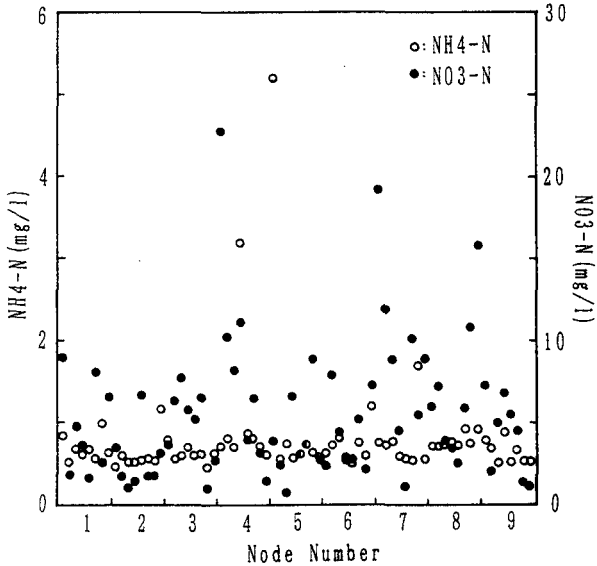


図-4 利用可能窒素量の地点毎の変化

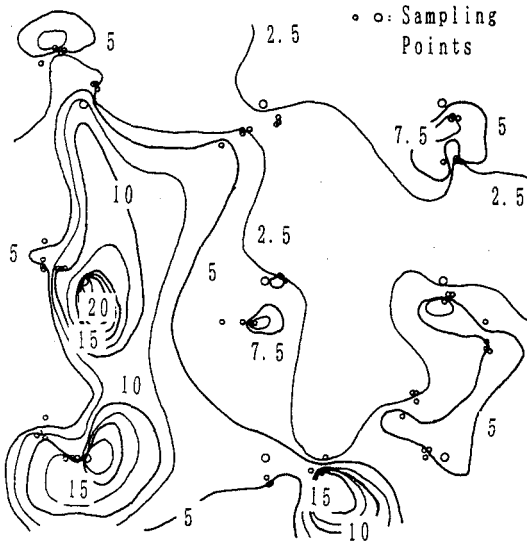


図-5 硝酸性窒素の等濃度線の例

行った。しかし、水分量、有機物量および利用可能窒素量（アンモニア性窒素、硝酸性窒素）の何れに関しても、脱窒速度との直接的な関係は明瞭には認められなかった。これは、脱窒現象がこれらの初期の、単独の性質との直接的な関連から生ずるのではなく、複合されたまたは他の諸性質とも関連した量に関係していることを示唆していると考えられる。本研究では土壌の微生物活性等については測定していないが、これらを直接測定することも今後重要と思われる。

3. 4 濃度の分散とバリオグラム

(1) 各距離成分の分散値

土壌の脱窒速度や亜酸化窒素生産速度などを空間的に正確に評価するためには、土壌の異質性 (heterogeneity) を評価する必要がある。そこでここでは、その第一歩として、異質性を評価するために必要な、土壌の最小サンプリング間隔について、様々な土壌性質や脱窒速度の資料を用い、二地点間の濃度の分散量を基に検討を行った。これは、式 (1) の分散値 (semivariance) $\gamma(h)$ が、地点間距離 h が増すと共にどのように変化するかに基づいており、基本的に自己相関と類似した概念である。

本研究で採用したサンプリング距離 h は、0.3、1、3、9 および 27m の 5 段階である。土壌の諸性質の各々につき、各距離について $\gamma(h)$ を計算し、これを比較して示したのが図-6 である。これによると、まず水分量は、 $\gamma(3)$ 成分がやや小さいが他の成分はほぼ同じ分散値を持っているのが特徴で、これは大きさ 1m 程度以下の濃度変化の小さい spot の存在と、面全体に緩い濃度勾配が存在していることを示していると考えられる。有機物量についても水分量と良く類似した特徴を持っており、面全体の濃度勾配が水分量よりも大きいのが特徴と言えよう。次に硝酸性窒素は、 $\gamma(9)$ に特に大きな分散値を持つのが特徴で、これは大きさ 9m 程度の濃度勾配の大きな高濃度地点が存在することを意味していると思われる。アンモニア性窒素は、 $\gamma(27)$ が最も大きな分散値を示し、これは距離の増大と共にばらつきが大きくなることを意味し、高濃度の濃度勾配の存在とその spot の大きさがもっと大きい可能性があることを示している。

一方、脱窒速度の $\gamma(h)$ はどうであろうか。これはデータ数も少ないのでこの点を考慮しなければならないが、図に示されるように 1m と 3m の成分が大きく、それ以上ではかなり減少している。この意味するところは、面全体としての速度分布の勾配はそう大きくはないが、3m 以下の大きさのかなり勾配の大きな高速度を持つ地点、hot spot の存在が示唆されていると考えられる。

(2) バリオグラム

バリオグラムは、各距離成分の分散値の累積値が、全体の分散の中でどのような割合を示すかを図示したもので、この図から求める分散値を達成するために必要なサンプリング距離を推定することが可能となる。本研究の最大サンプリング距離は 27m であるが、広大な放牧草地を考えるとこの距離も必ずしも十分な距離とは言えないことも考

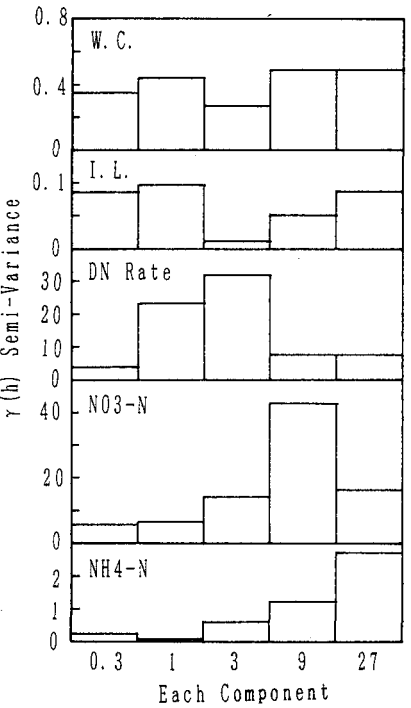


図-6 各距離成分の分散

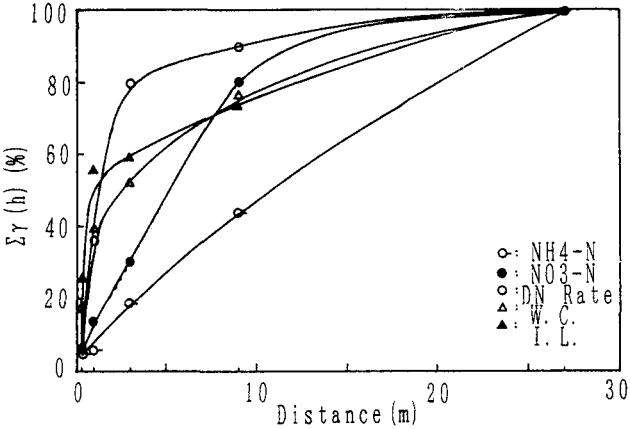


図-7 バリオグラム

慮されなければならない。

このバリオグラムを図-7に示した。これによると、土壌の諸性質によって特徴的な図になっていることがわかる。すなわち、水分量と有機物量および硝酸性窒素と脱窒速度がそれぞれ類似しており、アンモニア性窒素は両者とは異なっている。この図は、例えば全体の80%の分散を得るためには、アンモニア性窒素は約20m、水分量と有機物量は11~12m、硝酸性窒素は約9mそして脱窒速度は約3mのそれぞれの間隔でサンプリングを行う必要があることを示している。必要なサンプリング距離が大きくなればそれだけ土壌の性質の空間的な濃度勾配が大きいことを意味し、小さければそれだけ小範囲での濃度変動が大きい、すなわちいわゆるhot spotが存在する可能性が大きいことをそれぞれ示していると考えられる。前述のように、硝酸性窒素と脱窒速度は良く似た傾向を示しているが、異なるのはhot spotの大きさであり、脱窒速度の方がかなり小さい結果であった。このことは、脱窒速度のデータ多数の少なさは十分考慮される必要があるが、土壌の脱窒特性を空間的に検討する上で、かなりきめ細かにサンプリングを行う必要があることを示している。

4 まとめ

放牧草地土壌の脱窒能力とその空間的な分布特性を評価するために、二、三の室内実験を行った。本研究から得られた主な結論は次の通りである。

- 1) Droevendaal付属農場における放牧草地土壌の脱窒能力は、4~17 mgN/Kg soil/dayであった。
- 2) 本研究では、土壌の脱窒速度と土壌の諸性質の間には明確な関係は認められなかった。
- 3) 土壌の水分量や利用可能窒素量などの諸性質には、濃度勾配や高濃度地点などが空間的に存在し、この大きさやピーク濃度などはその性質によって異なる。
- 4) 土壌の脱窒活性の空間的分布のスケールは数メートル程度で、放牧草地の脱窒速度の空間的な定量化には、3m程度の間隔で土壌のサンプリングを行う必要がある。
- 5) より正確な評価には、試料数を増やした検討や土壌カラムによる現地測定などが必要である。

謝辞

本研究を行うに当たり、討論に参加し、有益な御助言を頂いた、Wageningen Agricultural University 大学院生 Ms. H. Kielich, Mr. M. Grum および Mr. M. W. Blind の諸君、並びに当学科のスタッフの皆様 に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) L.A.M.de Klein, Denitrification, pp.1-65, 1994
- 2) Ryden J.C. & K.P.Dawson, Evaluation of the Acetylene-inhibition Technique for the Measurement of Denitrification in Grassland Soils, J.Sci.Food Agric. Vol.33, pp.1197-1206, 1982
- 3) Koops J.G. & O.Oenema, Nitrogen Losses from Grassland on Peat Soil through Denitrification, Grassland and Society, pp.418-422, 1994
- 4) Webster R. & B.Boag, Geostatistical analysis of cyst nematodes in soil, J.of Soil Science, Vol.43, pp.583-595, 1992
- 5) Gates C.E. & C.J.Shieve, The Analysis of Variance of the S-Stage Hierarchical Classification, Biometrics, Vol.18, pp.529-542, 1962