

東北地域における土壌窒素無機化パターンのモデル化とその活用技術の現状(1)

| | |
|-------|------------|
| 誌名 | 農業技術 |
| ISSN | 03888479 |
| 巻/号 | 43巻4号 |
| 掲載ページ | p. 161-164 |
| 発行年月 | 1988年4月 |

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



東北地域における土壌窒素無機化パターンの モデル化とその活用技術の現状 (1)

東北地域土壌窒素無機化パターン研究グループ

1. はじめに

最近の情報機器の進歩によりアメダス等の気象情報もリアルタイムで容易に利用できるようになった。農業試験研究分野でも、これらの情報機器を活用した農業情報システムの構築に関する研究が各地で進められている。東北地方では、たび重なる冷害の経験から、様々な気象条件下における作物の生育を診断・予測し、それに対して適切な肥培管理指針を与えるシステムの構築が強く望まれている。作物はその吸収する窒素の多くを土壌から無機化する窒素（土壌窒素）に依存しており、その無機化過程は温度・水分等の環境要因によって支配されている。そのため、上記のシステムを完成させるためには、作物地上部の生育の診断・予測のみならず、土壌窒素の有効化過程（作物による利用を含める）を的確に推定・予測することが必要である。

吉野・出井¹⁾は、水田土壌における土壌窒素の無機化過程について温度との関係を検討し、窒素の無機化量は有効積算温度を変数とする指数関数で近似できること、そして、この方法によって窒素の無機化量を地温から推定できることを報告した。この有効積算温度による推定方法は、千葉県などで栄養診断による追肥決定システムの一部として用いられ、一定の成果²⁾をあげている。しかし、この推定式は経験に基づくものであり、その応用範囲は限られたものに留まっている。また、東北地方では羽生らの積算有効温度示数の概念に基づいた土壌窒素供給力の評価法³⁾についても検討が加えられているが⁴⁾、この方法は水稻の吸収量を通して土壌窒素を評価しているために、土壌窒素そのものの無機化過程を推定するためには適切な方法とは言い難い。

さて、金野、杉原ら^{5,6)}は畑土壌の窒素無機化過程を反応速度論的に解析する手法を開発し、無機化過程を3種類の特性値（パラメータ）によって表せること、また、

これらのパラメータと地温を用いることによって容易に土壌窒素無機化量を推定し得ることを報告した。安藤・庄子⁷⁾は、この解析法に基づいて圃場埋設法（後述）による水田土壌の窒素無機化過程を解析し、速度論的手法が水田土壌についても有効なことを明らかにした。この解析法においては、温度による無機化反応速度の違いを活性化エネルギー（後述）によって表すので、有効積算温度の方法よりもより広い範囲で、窒素無機化量の推定が可能になった。また、各パラメータの意味も明らかであるので、パラメータの値によって種々の土壌の窒素無機化特性を容易に知ることが出来る。このように速度論的解析手法は土壌窒素の無機化過程の特性表示や、無機化量を推定・予測するための極めて有力な方法になり得ると考えられる。

ところで、最近のパーソナル・コンピュータの普及は複雑な計算を伴う速度論的解析を容易なものにし、プログラム⁸⁾も開発された。そこで、東北地域土壌肥料研究会では、昭和60年度の重点検討課題として「土壌窒素有効化パターンの予測法」を取り上げ、これまで東北地域で得られた成果の整理を行った。さらにそれに基づき、昭和61年度より速度論的手法による土壌窒素有効化パターン予測法について東北各県農試および東北農試の土壌肥料関係研究室で連絡試験を開始した。連絡試験開始2年を経て、多くの事実が明らかにされたが、他方では方法論を含め実用化のために解決を要する種々の問題が存在することも明らかになってきた。ここでは、昭和62年度日本土壌肥料学会東北支部大会における上記の課題に関連する講演内容を中心に、これまでの成果と問題点を整理し、今後の研究の展望を探る。なお、便宜的に上記の研究グループを構成したが、執筆の分担は(2)の末尾に注記する。

2. 反応速度モデル

(1) 土壌窒素無機化速度と温度の関係のモデル化

はじめに、土壌中の有機態窒素の分解速度と温度との関係を示す方法について簡単に説明する。

アレニウスの法則は(1)式で示される。

Touhoku Soilnitrogen Mineralization Research Group: Estimation of Soil Nitrogen Mineralization Based on Mineralization Parameter and Application to Agricultural Technique. 農業技術 43 (4), 1988.

$$k = A \cdot \exp(-Ea/RT) \dots\dots\dots(1)$$

k : 速度定数

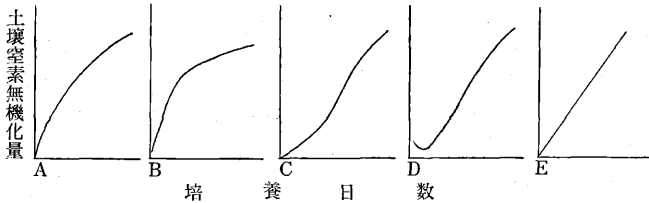
A : 定数

Ea : 見かけの活性化エネルギー (cal/mol)

R : 気体定数 (1.987cal/deg/mol)

T : 絶対温度 (deg)

上記の法則で用いられる活性化エネルギー Ea については化学反応速度論⁹⁾あるいは酵素反応速度論¹⁰⁾において、その概念が科学的に明確にされている。このアレニウスの法則に従って、温度の異なった条件下での土壌窒素の無機化過程をシミュレートする試みが Stanford^{11,12)}、金野ら⁵⁾、杉原ら⁶⁾により行われた。特に金野らは活性化エネルギーを用いて、圃場のように温度が変化する条件での培養日数を標準温度における培養日数(温度変換日数)に換算する方法を考案した。このことにより、圃場における土壌窒素無機化過程への反応速度論的



第1図 土壌窒素無機化のいくつかのパターン

方法の適用が可能となった。

$$ts = ta \cdot \exp[Ea(Ta - Ts)/R \cdot Ta \cdot Ts] = ta \cdot m \dots(2)$$

ts : 標準温度 Ts における培養日数 (日)

ta : 任意の温度 Ta における培養日数 (日)

m : 変換係数

(2) 土壌窒素無機化の各種モデル

土壌に適当な水分を与え培養すると、第1図-Aに示すような窒素無機化曲線が得られる。土壌中の有機物の分解は微生物によるものと考えられ、その律速反応は酵素反応であると考えられる。酵素反応において基質濃度に対して酵素濃度が低ければ反応速度が基質濃度に依存しない0次反応となり、酵素濃度が十分高ければ反応速度が基質濃度に比例する1次反応となる。0次反応であるとする無機化は直線的に増加するはずであるが、少数の例外を除き無機化量は第1図-Aの通り頭打ちとなることから、土壌窒素の無機化は1次反応であると考えられる。この反応速度は式(3)で表される。

$$\frac{dN}{dt} = -k \cdot (N_0 - N) \dots\dots\dots(3)$$

有機態窒素 \xrightarrow{k} 無機態窒素
($N_0 - N$) $\quad N$

N_0 : 反応前の有機態窒素量 (mg/100g 乾土)

N : 生成した無機態窒素量 (mg/100g 乾土)

t : 時間 (日), k : 速度定数 (1/日)

(3) 式を積分すると(4)式となり、第1図-Aの曲線を回復することができる。

$$N = N_0 \cdot [1 - \exp(-k \cdot t)] \dots\dots\dots(4)$$

しかし、各種の土壌を用いた培養実験の結果、第1図-BからEに示すように単純な1次反応式では当てはまらない事例が報告された。これらの事例を説明するために、杉原⁶⁾、金野⁵⁾、斎藤¹³⁾及び安藤¹⁴⁾らによって、土壌窒素の無機化が原則的には1次反応であることを前提とした以下のモデルが提案された。

①単純型: $N = N_0 \cdot [1 - \exp(-k \cdot t) + C]$ (第1図-A)

②単純並行型: $N = Nq \cdot [1 - \exp(-kq \cdot t)] + Ns \cdot [1 - \exp(-ks \cdot t)] + C$ (第1図-B)

③有機・無機並行型: $N = Nm \cdot [1 - \exp(-km \cdot t)] - Ni \cdot [1 - \exp(-ki \cdot t)] + C$ (第1図-C, D)

④逐次反応型: $N = N_0 \cdot \{k_2 \cdot (1 - \exp(-k_1 \cdot t)) - k_1 \cdot (1 - \exp(k_2 \cdot t))\} / (k_2 - k_1)$ (第1図-C)

⑤0次反応型: $N = k \cdot t$ (第1図-E)

単純型とは土壌窒素の無機化が1次反応式で表現できる事例である。単純並行型とは無機化の速い物質と遅い物質があり、それぞれが独立して1次反応で無機化が進行すると考えられる事例であり、第1図-Bの通り、無機化の速い画分の減少に伴い後半無機化速度が遅くなる。有機・無機並行型とは有機化と無機化が同時に起こると考えられる事例で、反応の初期にラグタイムあるいは無機態窒素量の減少が見られる。0次反応型は多湿黒ボク土の生土を供試した場合に培養期間が不十分であるとみられ、ほぼ直線的に反応が進行する。

3. パラメータの値とパラメータによる無機化過程の変化

(1) 水田土壌のパラメータの値

現在、東北6県に分布する土壌についてモデルとパラ

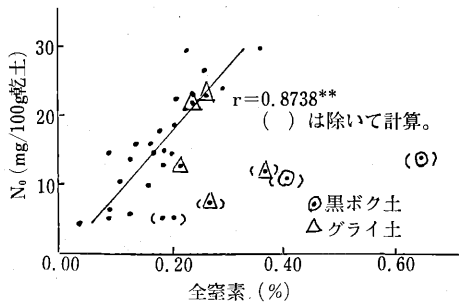
第1表 パラメータ間の相関係数と平均値

| | N_0 | $k(25^\circ\text{C})$ | Ea | パラメータの値 | | | |
|-----------------------|--------|-----------------------|---------|-----------------|-------|--------|---------|
| | | | | 平均値 | 最大値 | 最小値 | 標準偏差 |
| N_0 | | -0.323 | -0.246 | 15.9(mg/100g乾土) | 29.6 | 5.3 | 6.9 |
| $k(25^\circ\text{C})$ | -0.323 | | 0.489** | 0.00649(1/日) | 0.015 | 0.0026 | 0.00306 |
| Ea | -0.246 | 0.489** | | 19350(cal/mol) | 30080 | 11100 | 3885 |

注) $n=33$, 室内灌水培養法による。

メータの決定が進んでいる。ここでは、水田土壌を中心に東北及び北陸¹³⁾、九州地域¹⁴⁾の解析例も含めて全体の傾向を述べる。

灰色低地土、グライ土では単純型に該当する例が多い。室内培養法のデータをこのモデルにあてはめて求められたパラメータの平均値及びパラメータ間の相関係数を第1表に示した。 N_0 は5から30までと範囲が大きい。速度定数(25°C)は0.003-0.015と幅があるが、多くは0.006前後である。また、活性化エネルギーは、20,000前後の土壌が多く、ばらつきは小さい。次に、パラメータ間には、 E_a と k に正の相関がみられたが、2,3のデータの削除で有意でなくなる程度のもので、今回のデータからはパラメータ間の明瞭な関係は見いだせなかった。



第2図 土壌全窒素と N_0 の関係

次に、 N_0 と土壌の全窒素の関係を畑土壌のデータも含めて第2図に示した。黒ボク土と塩基交換容量の大きい細粒グライ土を除くと高い相関がみられた。

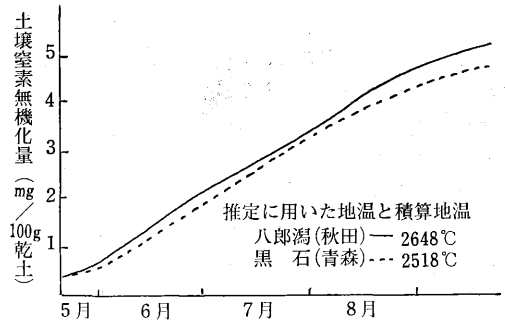
最適モデルとパラメータを用いた土壌の類型化、パラメータに及ぼす土壌管理の影響の解明は今後の研究に期待される。

(2) 地温、パラメータによる無機化過程の変化

次に、地温、パラメータの違いが無機化パターンを第2表 温度別 18°C 変換日数と活性化エネルギーの関係

| 温度 °C | 活性化エネルギー (E_a) | | | | | | |
|----------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1000 | 5000 | 10000 | 15000 | 20000 | 25000 | 30000 |
| 5 | 0.850 | 0.443 | 0.196 | 0.087 | 0.039 | 0.017 | 0.008 |
| 10 | 0.952 | 0.783 | 0.613 | 0.480 | 0.376 | 0.295 | 0.231 |
| 15 | 0.982 | 0.914 | 0.835 | 0.763 | 0.697 | 0.637 | 0.582 |
| 18 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 20 | 1.012 | 1.006 | 1.125 | 1.194 | 1.266 | 1.343 | 1.425 |
| 25 | 1.004 | 1.225 | 1.501 | 1.839 | 2.254 | 2.761 | 3.383 |
| 30 | 1.071 | 1.408 | 1.984 | 2.794 | 3.935 | 5.542 | 7.805 |

のように変化させるかの理解を得るために簡単な例を示す。まず、ある地温の1日を、標準温度(ここでは18°C)における日数へ換算すると、活性化エネルギーが大きいほど、18°Cより高い地温で長くなり、低い地温で短くなる。従って、活性化エネルギーが大きい土壌は地温の影響



第3図 2地点の地温の違いが八郎潟土壌の窒素無機化量に及ぼす影響

を大きく受けることになる(第2表)。同じ速度定数を持つ土壌でも E_a が大きい方が地温が上がった後半多くの窒素が無機化する。

次に、地温の違いが無機化量に及ぼす影響の大きさを理解するために、昭和61年の八郎潟(秋田)と黒石(青森)の地温を用いて計算した八郎潟水田土壌の無機化量を示す(第3図)。八郎潟の地温では前半と後半に0.5mg/100g土壌(概算0.5kg/10a)程度、無機化量が多くなる。栽培期間の積算地温には130°Cの違いがあるが、余り大きな影響ではない。今後、冷害年や灌がい水温が低い年の地温データの蓄積とともに各地の無機化量の年間変動の幅についても明らかにされよう。

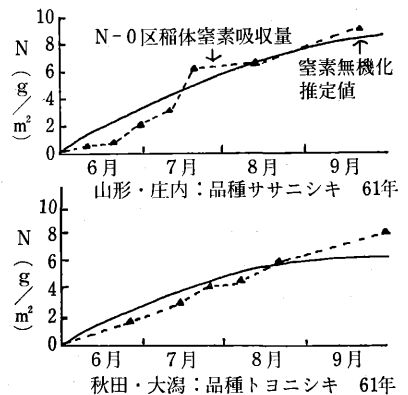
4. 作物の窒素吸収経過と無機化予測値との適合性

(1) 水田土壌における窒素無機化過程と水稻の窒素吸収

1) 無機化モデルによる予測値と水稻窒素吸収量との適合性

水稻の総窒素吸収量の約70%は土壌由来窒素で占められる。近年の重窒素を利用した研究により、東北地方の水

田でも、生育初期から土壌窒素が盛んに放出され¹⁶⁾、とくに、施肥窒素が消失する6月下旬以降の水稻の窒素栄養は、土壌窒素吸収量の多少によ



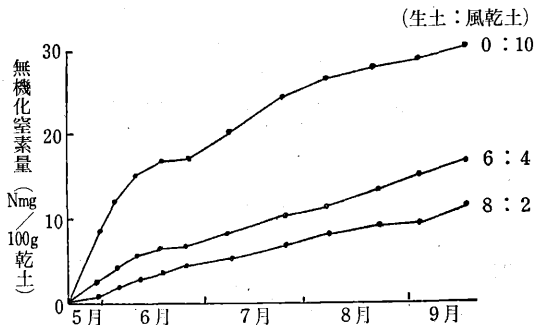
第4図 窒素無機化推定値と水稻土壌吸収量の推移

り大きく影響されることが明らかにされている¹⁷⁾。したがって、水田の土壤窒素の無機化量をあらかじめ予測できれば、それに基づいた適切な肥培管理が可能となる。速度論的方法で求めた土壤窒素無機化の特性値と地温データとを用いて予測した土壤窒素無機化量と、実際の水稻による土壤窒素吸収量との適合性について東北地域で検討された事例について報告する。

土壤(生土)の窒素無機化パターンを単純型モデル及び窒素有機化を考慮した負の項をもつ単純並行型モデルにより推定した値と、水稻による土壤窒素吸収量の実測値との適合性について、山形農試と秋田農試大湯支場の検討結果を第4図に示した。それによれば、推定値と実測値とはほぼ一致している。特に、土壤窒素の吸収量が増加する7月以降の推定は、適期の追肥量を判定する場合に有効に利用できると思われる。このことは、福岡農試においても同様に認められている¹⁸⁾。しかし、土壤のタイプによっては、推定値と実測値がよく一致しない場合もある。例えば、黒ボク土壤の生土では初期の土壤窒素無機化量が小さく、推定値は実測値より下回る。また、下層土が肥沃な輪換水田では生育後半の実測値が作土の推定値を大きく上回ることが認められた。

2) 乾土効果の評価とモデルへの取り込みの必要性

これまで、乾土効果については多くの知見が得られている。すなわち、乾土効果は有機質土壤や火山灰土壤で高



第5図 土壤水分条件と無機化窒素量の推移
(山形:黒ボク土壤, 62年)

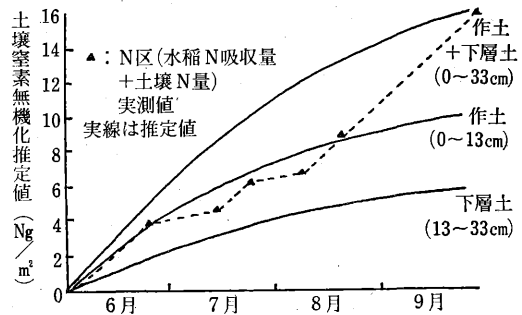
く、土壤がpF4以上に乾燥すると顕著になることが知られている。

山形農試では土壤タイプ別に生土を用いて無機化モデルへのあてはめを行った結果、黒ボク土壤の生土では初期の窒素無機化量が小さいことがあげられ、乾土効果を加味したモデルを設定している。すなわち、あらかじめ4段階の水分条件(生土, 生土8+風乾土2, 生土6+風乾土4, 風乾土)に調整した各土壤の培養によりパラメーターを求め、その年の圃場の乾燥程度に応じて選択

できるようにした(第5図)。また、北陸農試¹⁴⁾においても、土壤窒素供給型の予測モデルを、乾土効果を加味した速分解性画分の無機化予測モデルと緩分解性画分の無機化量を予測する地温依存無機化予測モデルに分けて作成する試みが行われている。

しかし、圃場における実際場面では、乾土効果が顕著に現れるほどには、土壤の乾燥が進みにくいとの報告がある。さらに、耕起時期、耕起砕土の方法によっては極く表層の土壤のみ乾燥履歴を受けることも考えられる。このため、上記のような乾土効果を組み入れたモデルに基づく推定値と実測値との適合性を、慣行の耕起方法、時期及び土壤の種類の違いと関連させてさらに検討する必要がある。

3) 下層土からの窒素吸収と無機化モデルによる推定方法 八郎潟干拓地で試験した結果では、田輪換体系における輪換水田での水稻の窒素吸収量は、連作水田と比較して生育後期に多くなり、それは主に下層土からの土壤由来窒素であった。そこで輪換水田の作土と下層土のパラメーター値および各層の地温から土層毎の土壤窒素無機化量を推定し、水稻根の伸長域を考慮して推定値を求める方法を検討した。その結果、輪換水田における水稻の窒素吸収量は、幼穂形成期以降、作土の無機化推定値を上回り、下層土(第2層)の無機化推定値を合計した値とほぼ一致した(第6図)。これは、輪換水田の水



第6図 土壤窒素無機化量の推定(輪換水田, 61年)

稲根域が、グライ層の低下により下層土へも拡大され、さらに根の活力も高まることによるものと思われる。これまで、八郎潟干拓地の輪換水田においては倒伏を避けるために、少肥で安全を狙った栽培をしてきた。今後、上記のような手法で土壤窒素無機化量を的確に予測できるようになれば、それに基づいた合理的な施肥により、安定多収栽培も可能になると考えられる。