

山形県庄内地域における水田土壌の地力窒素無機化
特性の解明と水稲収量および品質に及ぼす
地力窒素の影響に関する研究

1995

岩手大学大学院
連合農学研究科

藤井 弘志

1

山形県庄内地域における水田土壌の地力窒素無機化特性の解明と
水稲収量および品質に及ぼす地力窒素の影響に関する研究

1995

藤井弘志

謝 辞

本論文を作成するにあたって、懇切な御指導と御校閲の労をとられた岩手大学農学部教授井上克弘博士、山形大学農学部教授安藤豊博士に衷心より感謝の意を表します。

また、本研究の実施にあたり、山形県立農業試験場元化学部長佐藤俊夫博士、同主任専門研究員荒垣憲一博士（現山形県園芸特産課主幹）には、適切な御指導と数々の便宜、有益な御助言を賜った。

本研究は、山形県立農業試験場化学部の各位の御協力を得ておこなわれた。特に、中西政則研究員（現砂丘地農業試験場）、佐藤之信研究員（現藤島農業改良普及センター）には絶大な御協力をいただいた。

以上の方々に、記して、心から感謝申し上げます。

目 次

第1章 緒論	1
第2章 沖積水田土壌の地力窒素の無機化モデルの策定	10
1. はじめに	10
2. 実験材料および実験方法	10
3. 実験結果	14
1)水田土壌の地力窒素の無機化モデル	14
2)各土壌における地力窒素の無機化特性	19
4. 考察	21
5. 要約	30
第3章 庄内地域におけるグライ土壌作土の無機化特性	32
1. はじめに	32
2. 実験材料および実験方法	33
3. 実験結果	35
1)庄内地域における沖積水田土壌の地力窒素の無機化特性値	35
2)推定式による地力窒素無機化量と水稻の地力窒素吸収量との関係	35
3)推定式による地力窒素無機化の特徴	38
4)地力窒素無機化の年次変動と活性化エネルギーの関係	43
4. 考察	47
5. 要約	51
第4章 庄内地域におけるグライ土壌下層土の無機化特性	53
1. はじめに	53
2. 実験材料および実験方法	53
3. 実験結果	56
1)下層土の地力窒素無機化特性値	56
2)下層土の地力窒素無機化の特徴	59

4. 考察	63
5. 要約	67
第5章 速度論的解析による無機化特性値の簡易分析法	69
1. はじめに	69
2. 実験材料および実験方法	69
3. 実験結果	71
1)可分解性有機態窒素量の簡易分析法	71
2)活性化エネルギーの簡易分析法	73
4. 考察	80
5. 要約	84
第6章 庄内地域のグライ水田土壌の可分解性有機態窒素と水稻の収量 構成要素の関係	87
1. はじめに	87
2. 実験材料および実験方法	88
3. 実験結果	92
1)可分解性有機態窒素量と収量・収量構成要素の関係	92
2)庄内地域における可分解性有機態窒素量の分布図	99
4. 考察	108
5. 要約	113
第7章 総合考察	117
第8章 摘要	123
引用文献	126

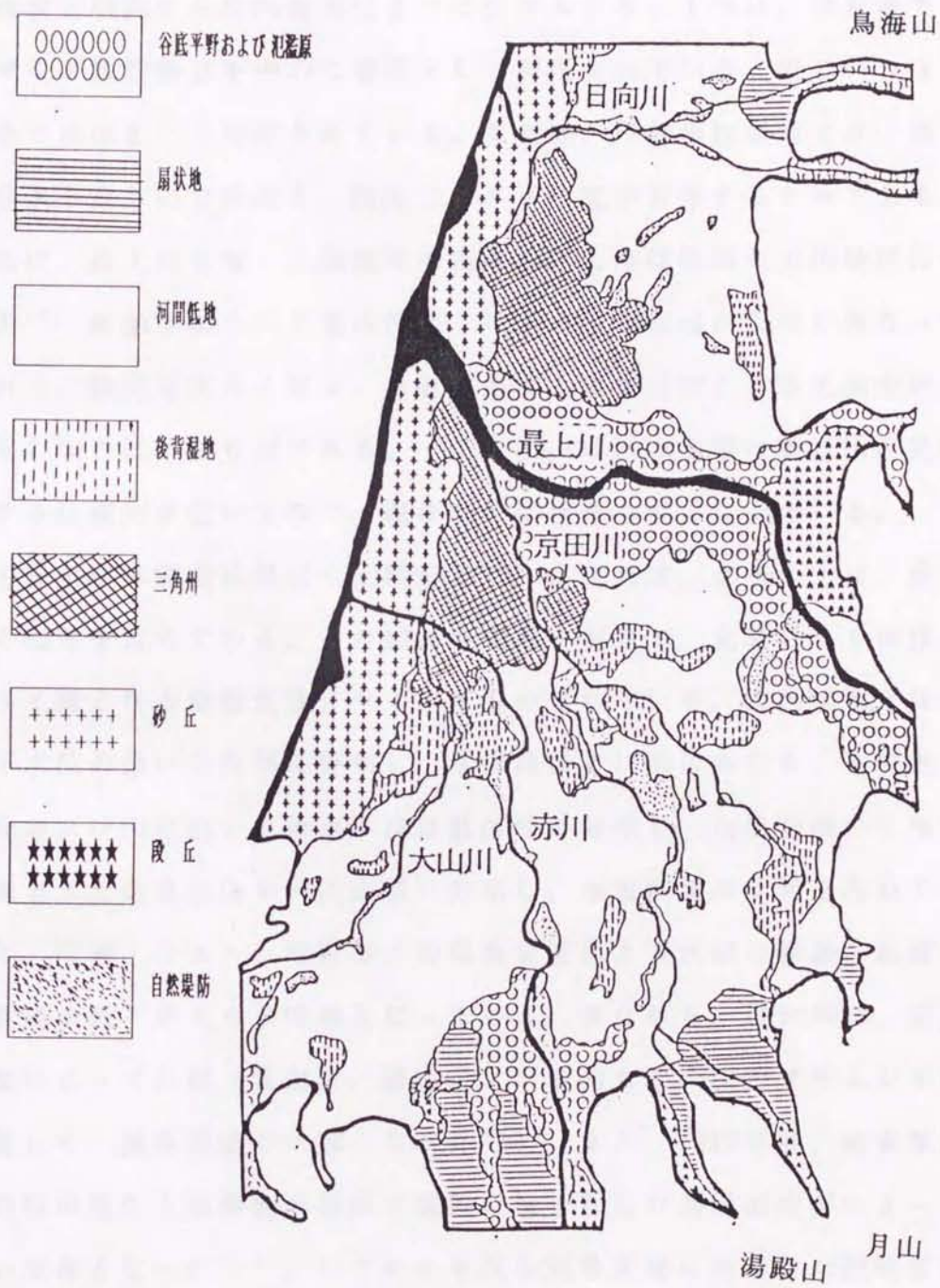
第1章 緒論

山形県庄内地域は、戦前から良質米の産地として全国に知られ、現在も庄内平野の北部地域は全国の最優良産地の一つとして位置づけられている¹³¹⁾。

耕地面積に占める水田面積の割合は、全国では53.4%、東北地域では68.9%、山形県では77.2%であるのに対して庄内地域では86.9%と極めて高い¹¹⁸⁾。一方、農業粗生産額に対する米の生産額の占める割合¹¹⁸⁾は、全国では27.4%、東北地域では45.0%、山形県では49.9%であるが、庄内地域では66.7%と、庄内地域の農業に占める稲作の比重は、山形県や東北地域の平均よりもかなり高い状況にある。さらに、農家一戸当たりの農業粗生産額¹¹⁸⁾も全国では294万円、東北地域では320万円、山形県では365万円であるのに対して、庄内では450万円と高い。このことは、庄内地域における農業の重要性、とりわけ稲作に対する依存度が高く、地域経済の発展および農家経営の安定には、稲作技術の発展および水稲収量増・食味向上が不可欠であることを示している。

しかし、山形県の農業者の現状を見ると農家総数に占める専業農家はわずか7.7%であるのに対して、2種兼業農家は年々増加し、1992年では69.3%を占めている。これに対して新規就農者は年々減少し、1992年には70人と今後の農業の振興を考えた場合、大きな不安材料となっている。庄内地域も農家数の減少が起こっているが、農業専従者に占める60才未満の専従者割合および後継予定者の確保状況は、庄内地域がそれぞれ32.2%および9.4%で、山形県の中で最も高くなっている¹¹⁹⁾。

庄内地域は、第1図に示すように西部が日本海に接し、東部・北部には出羽丘陵が分布し、庄内平野の中央を東から西に最上川が横断している。最上川以南には朝日・月山を水源とする赤川が北流し、以北には出羽丘陵を水源とする日光、月光川などが西に流れ、ともに日本海に注いでいる。河川の流域には平野が広がり、西部の海岸沿いには日本海より吹きつける季節風により形成された砂丘が分布している。平野は、三角州性低地と扇状地から形成されている。河川沿いには自然堤防がみられ、とくに最上川沿いでその面積が広い。南東部



第1図 庄内地域の地形図

には月山，北部には鳥海山などの火山があり，その山麓には泥流による広大な台地を形成している。

土地利用状況から庄内地域は2つに分けられる。1つは，砂丘地でメロン・イチゴなど施設園芸を中心に畑地として利用されている。他の一つは，三角州性低地で水田として利用されている。これは，三角州性低地では，地下水位が高く排水不良なので泥炭土，黒泥土，グライ土が分布するためである。三角州性低地は，最上川を境に北部地域の飽海地区と南部地域の田川地区に分けられ，第1表⁶⁵⁾に示すように土壌の性質，水稻の生育状況が大きく異なっている。すなわち，飽海地区の土壌は，鳥海山系安山岩を母材とする生産力の高い土壌で，稲の生育は秋勝り型である。一方，田川地区の土壌は朝日山系花崗岩を母材とする生産力が低い土壌で，稲の生育は秋落ち型となっている。

地力保全基本調査に基づく土壌分類⁹⁸⁾によれば，グライ土は，庄内地域の水田の62%を占めている。その42%が強粘～粘質で，全層もしくは作土直下からグライ層となる細粒質強グライ土で占められている。灰色低地土は自然堤防や地下水位の低い三角州に分布し，水田面積の17%にあたる。その他，泥炭土は砂丘および山麓沿いの排水不良な低湿地に分布し，水田面積の7%を，また多湿黒ボク土は鳥海山や月山山麓に分布し，水田面積の7%を占めている。

近年，冷害・フェーン現象などの気象災害による水稻の収量・品質の変動および食味の低下が大きな問題となっている。すなわち，1992年は，登熟期間中の高温によって白粒（乳白粒，腹白粒）が多発して，庄内ササニシキの品質低下が著しく，価格低迷の一因となった¹¹⁵⁾。また，1993年は，障害型冷害による不稔粒の発生と出穂期の遅延と登熟の低下などの遅延型冷害によって作柄は著しい不作となった¹¹⁶⁾。いずれの年次も気象変動に対応した肥培管理の実施により被害の軽減が可能であったことが指摘されている^{115)・116)}。両年の水稻の品質低下等の要因は次のように考えられる。1992年の場合，下層土の地力窒素の発現量の小さい地域で，登熟不良による白粒発生がみられ，一等米比率が低下する傾向を示し，収量・品質の向上に対する下層土の重要性が認められた。一方，1993年の場合，地力の高い地帯で地力窒素の発現が遅延したために，施

第1表 土壤区分と主な特徴

項目	田川土壤	飽海土壤
地区	庄内の南部地域	庄内の北部地域
母岩	花こう岩	安山岩
土壤の性質	<ul style="list-style-type: none"> ・ CECが20meq/100gであり、飽海に比べて低い ・ 土壤養分も飽海に比べて少ない ・ 水もちがわるい 	<ul style="list-style-type: none"> ・ CECが30meq/100gと高く肥料成分を保持しやすい ・ 土壤養分に富む ・ 排水がやや不良
水稻の生育の特徴	<p>(秋落ち型)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 初期生育がよい(茎数がでやすい) ・ 生育後期に凋落しやすい 	<p>(秋まさり型)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 初期生育は遅れぎみ ・ 生育後期旺盛型

肥量の多かった水田では、稲体の窒素濃度が高まり、不稔を助長したり、遅発分けつの発生や出穂期の遅延により品質（整粒歩合の低下）の低下、食味（タンパク質含有率の増加）の低下が起こった^{115, 116)}。

一方、消費者ニーズの高まりによる良食味への動きとともに、良食味品種の作付による産地間競争が激しくなってきた結果、食味が直接的に価格に反映している。産米の食味ランキングによれば、庄内産のササニシキはA'ランクであり、Aランクに位置づけられている山形内陸・宮城・岩手産ササニシキに比べて価格も低く、農家の所得減に直結している。

水稻を巡る情勢は次のような課題があり、非常に厳しい状況にある。①農業従事者の高齢化や兼業化、農業後継者の不足による労働力の面の課題、②近年における種々の気象変動に対応した収量・品質の確保、消費者ニーズである産米の食味向上などの生産面の課題である。その中で水稻の生産面の抱えている問題点の解決方法としては、①育種的方法と②栽培的方法がある。

育種の目標は時代とともに変化し、現在は良食味を中心に目標が置かれ、毎年のように良食味品種が創出されている。東北・北海道の場合、耐冷性の強い品種、いもち病など病害に対して耐病性の強い品種であることも併せて育種の目標となっている。しかし、品種だけでは、その良食味・収量性の特徴を引き出せない。気象条件に対応した適切な肥培管理がなされ、はじめて、品種の特徴が引き出されてくる。すなわち、栽培的方法による水稻生産の抱えている問題点の解決が重要となる。この点については、山形県をはじめ東北各地で栽培管理^{33, 125, 129)}や施肥に関する研究として、緩効性肥料を利用した効率的な施肥法^{62, 91, 106)}、側条施肥^{63, 122)}や深耕時の施肥法^{18, 72, 96, 113)}が検討されている。

一方、品種によっては、玄米生産能率（成熟期に吸収した窒素1kgに対する玄米生産量）、もみ生産能率（穂揃期に吸収した窒素1kgに対するもみ数）が大きく異なり、生産能率の限界を越えて窒素を吸収させれば、直接的に整粒歩合を下げることによる品質低下を引き起こすことが知られている。さらに、米の食味については、玄米中のタンパク質含有率が関与し、タンパク質含有率が

高いと食味を低下させること、生育後半の窒素施肥が玄米中のタンパク質含有率を高めることも明らかとなっている^{24, 25)}。このように、水稻の収量・品質食味には、水稻の生育、時期別の窒素吸収量が大きく関与している。特に、時期別に適正な量の窒素を吸収することが、安定的な収量および高品質の米を生産する必要条件である。このため、時期別の生育診断^{31, 88, 93, 130)} および葉色による栄養診断^{30, 49, 94, 101)} が現場で実施され、それに応じて追肥を含めた栽培管理がなされている。

しかし、収量・品質および食味に及ぼす追肥窒素の影響は、水稻の生育状態だけでなく、地力窒素の無機化量によっても異なる。この理由としては、水稻の吸収する窒素の大半を地力窒素に依存しているために⁷⁸⁾、時期別の地力窒素の供給量を正確に把握できないと、水稻の窒素吸収のきめ細かな制御ができないことによる。しかしながら、現場における地力窒素無機化の情報は、限られた地点の地力窒素無機化に関する情報を地域全体にあてはめて判断しているのが現状である。稲作技術の一層の発展には、地力窒素の供給量を簡易に把握する手法の開発・普及並びに地力窒素の供給を土壌側の面からだけでなく、水稻の生育・収量に及ぼす影響について解析することが必要である。このためには、今後の地力窒素の動態に関する情報は、試験場単位の点の解析から地域全体の面への拡大をはかること、作土ばかりでなく生育後半の地力窒素供給に大きな役割を担っている下層土を含めた立体的な地力窒素の把握がなされなければならない。これまでも、地力窒素の無機化^{3, 12, 21, 22, 27, 28, 60, 61, 70, 97, 126)} および地力窒素の水稻による吸収など^{64, 74, 75, 76, 89, 90, 107, 108, 109, 110)} 数多くの研究が行われてきた。その中で、乾土効果⁶⁾、地温上昇効果、土壌反応変換効果、根系効果、粗大新鮮有機物添加効果、機械的処理効果^{21, 22)} などによって地力窒素の無機化が促進されることが明らかにされている。この中で、湛水前の土壌乾燥（乾土効果）⁶⁾ と稲作期間中の地温（地温上昇効果）が地力窒素発現の主要な要因であることが明らかにされている^{21, 22)}。さらに無機態窒素の給源としての易分解性有機物についても微生物の基質ととらえ、その形態⁴⁶⁾ や存在様式^{47, 127)} が解明されてきている。また、易分解性有機物

が分解されて無機化する窒素量は、微生物によって放出される土壤酵素の活性あるいは微生物の栄養源となる易分解性有機物量に左右されていることも明らかにされている¹²⁸⁾。いずれも、地力窒素の無機化の様式などについての研究が多く、いつの時期にいくら無機化するという水稻の栄養診断に利用できる情報にはなっていない。

一方、地力窒素の水稻による吸収については、施肥窒素の吸収を重窒素を用いて^{3, 78, 90)}、全窒素吸収量から施肥窒素の吸収量を差し引いて地力窒素の吸収量を推定している。これによれば、水稻の吸収する窒素の約70%が地力窒素であり⁷⁸⁾、水稻栽培における地力窒素の重要性が明らかになっている。

水稻の生育・収量は、各時期に吸収した窒素(施肥・地力)の量によって大きく左右される。生育初期の窒素不足は、莖数の不足、もみ数の不足に結びつき低収となる。一方、生育中期の窒素過剰はもみ数過剰、下位節間を伸ばし倒伏を助長する。さらに、食味の向上については、生育中後期の窒素吸収が直接的に影響を与えることが報告されている^{24, 25)}。これらのことから、施肥窒素の動態だけでなく、地力窒素の無機化量を把握することで水稻の窒素の吸収を調節することが可能になり、稲作の課題である①気象変動に対応した肥培管理の推進②食味の向上を可能にすると考えられる。水稻の吸収する地力窒素のうち9~30%が下層土に由来し^{73, 74)}、下層土から無機化した窒素も水稻の生育にとって重要であることが指摘されている^{33, 50, 51, 73, 74, 75)}。したがって下層土の地力窒素の無機化過程を検討することは、水稻の生育・収量を考える上で重要と思われる。しかし、下層土の無機化過程を検討した例は少なく、下層土の定量的な評価には至っていない。

地力窒素の無機化量の評価法としては、重窒素法^{45, 52, 56, 57, 105)}および有効積算温度¹²⁶⁾による方法が利用されてきた。重窒素法は作物が肥料から吸収する窒素、土壤から吸収する窒素あるいは有機物から吸収する窒素を調べる方法として有効であり、広く使用されてきた。しかし、重窒素法は直接、地力窒素の無機化量を解析していない点や多大の経費と労力を要し、試験規模も小面積にせざるを得ない点、また、サンプリング回数も限定される欠点を持っている

る。一方、吉野・出井は水田土壌における地力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、この方法によって地力窒素の無機化量を地温から推定できることを報告した¹²⁶⁾。しかし、この方法の有効積算温度を算出する際に用いられる生成ゼロ点の意味づけが不明確であり、推定の精度が悪いなどの欠点を持っていることが指摘されている³⁶⁾。一方、Stanfordら⁸²⁾、金野・杉原ら³⁸⁾、杉原ら^{85・86)}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種類の特性値によって表せること、また、これらの特性値と地温を用いることによって容易に地力窒素の無機化量を推定し得ることを報告した。安藤・庄子²⁾は、この解析法に基づいて圃場埋設法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によって表すので、有効積算温度の方法よりも広範囲で窒素無機化量の推定が可能になる。また、各特性値の意味も明らかであるので、特性値の値によって種々の土壌の無機化特性を容易に知ることができる。このように速度論的解析手法は地力窒素の無機化過程の特性表示や無機化量を推定・予測するため極めて有効な方法になり得ると考えられる。

そこで、本論文では、稲作栽培管理上の大きな課題である種々の気象条件における収量・品質の安定と消費者ニーズとしての食味の向上に必要なきめ細かな肥培管理を可能にする地力窒素の無機化を把握するため、庄内地域の水田土壌を取りあげて、速度論的解析を利用して作土および下層土の地力窒素の無機化特性を明らかにした。さらに、地力窒素の供給と水稻の生育・収量との関係を解析して生育診断予測に利用可能な立体的な地力窒素発現地図の作成を行った。

第2章では、山形県内の各種水田土壌（グライ土壌、黒ボク土壌、褐色低地土）を用いて、速度論的解析による土壌窒素の無機化モデルを明らかにする⁴⁾。

第3章では、第2章で明らかにした無機化モデルを用いて山形県の庄内地域における沖積土壌の作土の無機化特性値および地力窒素の供給量と水稻による

地力窒素吸収量の関係を明らかにする¹⁵⁾。

第4章では、第3章と同様な方法で、庄内地域における沖積土壌の下層土の無機化特性値および下層土を含めた地力窒素の供給量と水稲による地力窒素の吸収量の関係を明らかにする⁵⁾。

第5章では、地力窒素の無機化の情報を点から面に拡大して普及を図るため速度論的解析で求めた無機化特性値を簡便に求める方法を明らかにする¹⁶⁾。さらに、無機化特性値の土壌学的な意義についても考察する。

第6章では、第5章で示した簡易分析法で求めた作土および下層土の無機化特性値と水稲の収量および収量構成要素の関係を明らかにする。併せて、作土および下層土を含めた地力窒素発現地図を作成して収量分布図との関係を論ずる¹⁷⁾。

第2章 沖積水田土壌の地力窒素の無機化モデルの策定

1. はじめに

水稲が吸収する窒素は、その起源から施肥（化学肥料）由来、施用有機物由来、そして地力（土壌）由来に大別される。このうち、地力窒素は水稲の吸収する窒素の大半を占めることから、水稲による地力窒素の吸収経過を明らかにすることは、水稲の生育・収量にとって重要な課題である。

そのため、以前から水田土壌の地力窒素の無機化に関する研究が数多くなされてきた^{21, 22, 27, 28, 39, 40, 64, 73, 79, 80, 111, 112}。それらのなかで、地力窒素の無機化過程と水稲の窒素吸収の関係については、吉野・出井¹²⁶の報告が見られる。それによれば、地力窒素の無機化過程は、有効積算地温（ $D - 15^{\circ}\text{C}$ 、ただしDは地温）と密接に関係し、有効積算地温で示された地力窒素の無機化過程と水稲の地力窒素吸収量とはよく対応した。

一方、金野・杉原³⁸、杉原ら^{85, 86}は、畑土壌の地力窒素の無機化を検討し、有効積算温度で用いる生成ゼロ点は生理的ゼロ点とは異なること、また温度範囲の明記が必要であることを指摘し、速度論的解析の有効性を明らかにするとともに畑土壌の地力窒素の無機化モデルを提唱した。しかしながら、速度論的解析を使用した地力窒素発現に関する研究は、大部分が畑土壌を扱った研究である^{10, 11, 66, 67, 68, 81, 82, 83, 84}。

これに対して、水田土壌の地力窒素無機化モデルに関する研究例は少ない^{2, 121}。水田土壌の無機化モデルを明らかにすることによって、水田土壌と畑土壌の地力窒素無機化の特徴の違いも明らかになると考えられる。そこで、本章では水田土壌中での窒素の挙動を明らかにするために、水田土壌の地力窒素の無機化過程を速度論的に解析を行った。そして、培養実験での沖積土壌の地力窒素由来のアンモニア態窒素の挙動のモデルについて研究した。

2. 実験材料および実験方法

1) 供試水田土壌

供試水田土壌は、沖積土壌として山形県立農業試験場の本場、庄内支場およ

び置賜分場，対照として火山灰土壌である最北支場の作土を使用した。各土壌の土壌統群名および化学性を第2表に示した。

本場の土壌（以下，本場土壌とする）は，細粒灰色低地土で，有機物含量，CEC，リン酸吸収係数の低い土壌である。本場のほ場は，1982年度に新規に造成されたほ場である。庄内支場の土壌（以下，庄内土壌とする）および置賜分場の土壌（以下，置賜土壌とする）は，細粒強グライ土で，有機物含量，CECは，本場土壌，最北支場の土壌（以下，最北土壌とする）の中間的な値を示している。最北土壌は，多湿黒ボク土で，有機物含量，リン酸吸収係数が高い。

これらの水田土壌は，湿潤土を孔径5 mmの篩を通し，実験に供試した。

2) 培養方法

1985年度の培養実験は，耕起前に採取した供試土壌の湿潤土（乾土30g相当）をビニール袋に入れ，脱塩水を添加して，袋内の空気をなるべく少なくして密閉した。移植した水田の株間の地表下5 cmに金網を置き，上記ビニール袋を金網上にならべて埋設した。ビニール袋の埋設時期，すなわち培養開始時期は，5月16日，5月23日，6月6日および7月5日の4回である。なお，培養中は水田を常時湛水とした。

1986年度は，庄内土壌だけを用い，1985年度とほぼ同様に培養を行った，重窒素でラベルした硫安（30.3atom%）を，100g乾土当たり窒素として5mg添加した。培養開始は，6月12日，6月18日，および6月27日の3回である。なお，培養温度の測定は，温度測定用のセンサーを培養実験と同様に土壌をつめたビニール袋に入れて行った。

一定温度培養実験は吉野・出井¹²⁶⁾の方法に準じ，30℃で行った。培養はすべて2連で行った。

3) 分析方法

約1週間ごとにサンプルを採取した。全アンモニア態窒素は，常法により，1M KClで抽出後，水蒸気蒸留法で定量した。アンモニア態窒素中の重窒素の定量は発光分光分析法⁴⁴⁾で行った。

熱水抽出炭素は，以下の方法で定量した。湿潤土（乾土10g相当）を200ml

第2表 供試土壤の化学性

	pH	T-C%	T-N%	C/N比	CEC*	リン酸吸収係数**	土 境 型
本場土壤	5.7	1.17	0.145	8.1	15.9	610	細粒灰色低地土***
庄内土壤	6.1	2.29	0.316	7.2	19.2	850	細粒強グライ土
置賜土壤	6.3	3.78	0.328	11.5	23.4	950	細粒強グライ土
最北土壤	6.2	7.89	0.540	14.6	33.0	1630	多湿黒ボク土

* meq/100 g 土壤, ** P₂O₅ mg/100 g 土壤, *** 昭和57年に造成.

三角フラスコに入れ、脱塩水100mlを加える。三角フラスコに簡易冷却管をつけて、沸騰水中で1～4時間加熱する。その後、直ちに冷却し、ろ過する。ろ液をアンスロンで発色させ、グルコースを標準物質として、炭素の定量⁹⁵⁾を行った。

4) 解析方法

① 地力窒素の無機化速度と地温の関係

杉原ら⁸⁵⁾は、畑土壌の地力窒素の無機化速度と地温の関係は、反応を酵素反応と想定し、アレニウスの式に従うものとした。さらに、水田土壌の地力窒素の無機化速度も下記のようなアレニウスの式に従うものとする。

$$K = \exp[E a \times (T - A) / \{ R \times (T + 273) \times (A + 273) \}]$$

ここで、K：無機化速度定数 (1/day)，Ea：活性化エネルギー (cal/mol)，R：気体定数 (cal/day/mol)，T：地温 (deg)，A：基準温度 (deg) である。

基準温度は、水田地温 (5cm) が11～24℃の温度範囲にあるので、18℃とした。Kは、EaとTで表され、Eaによって各地温の18℃変換係数が決まる。

② 1日当たりの18℃変換日数

地温の日変化をSin曲線と仮定し、最高地温、最低地温より、その日の地温変化を得る。この地温変化により、1時間ごとの地温を求め、前述のKをかけて積算する。その積算値を24で除した値を、1日当たり18℃変換日数 (t) とした。

③ 地力窒素無機化と時間 (t) の関係

Stanford and Smith⁸²⁾、杉原ら^{85, 86)}は、畑土壌の地力窒素無機化と時間の関係は、ミハエル・メンテンの式に従うとした。水田土壌でも同様の反応を考え、杉原らのモデルのうち、単純型と単純並行型のモデルを使用した。

単純型および単純並行型のモデルは、次式で示される。

$$N = A (1 - \exp(-k_a \cdot t)) + C$$

$$N = A (1 - \exp(-k_a \cdot t)) + B (1 - \exp(-k_b \cdot t)) + C$$

ここで、t：18℃変換日数(day)，N：tにおける地力窒素無機化量(mgN/乾

土100g), A , B および C : 定数(mgN/乾土100g), k_a , k_b : A および B の無機化速度定数(1/day) である。

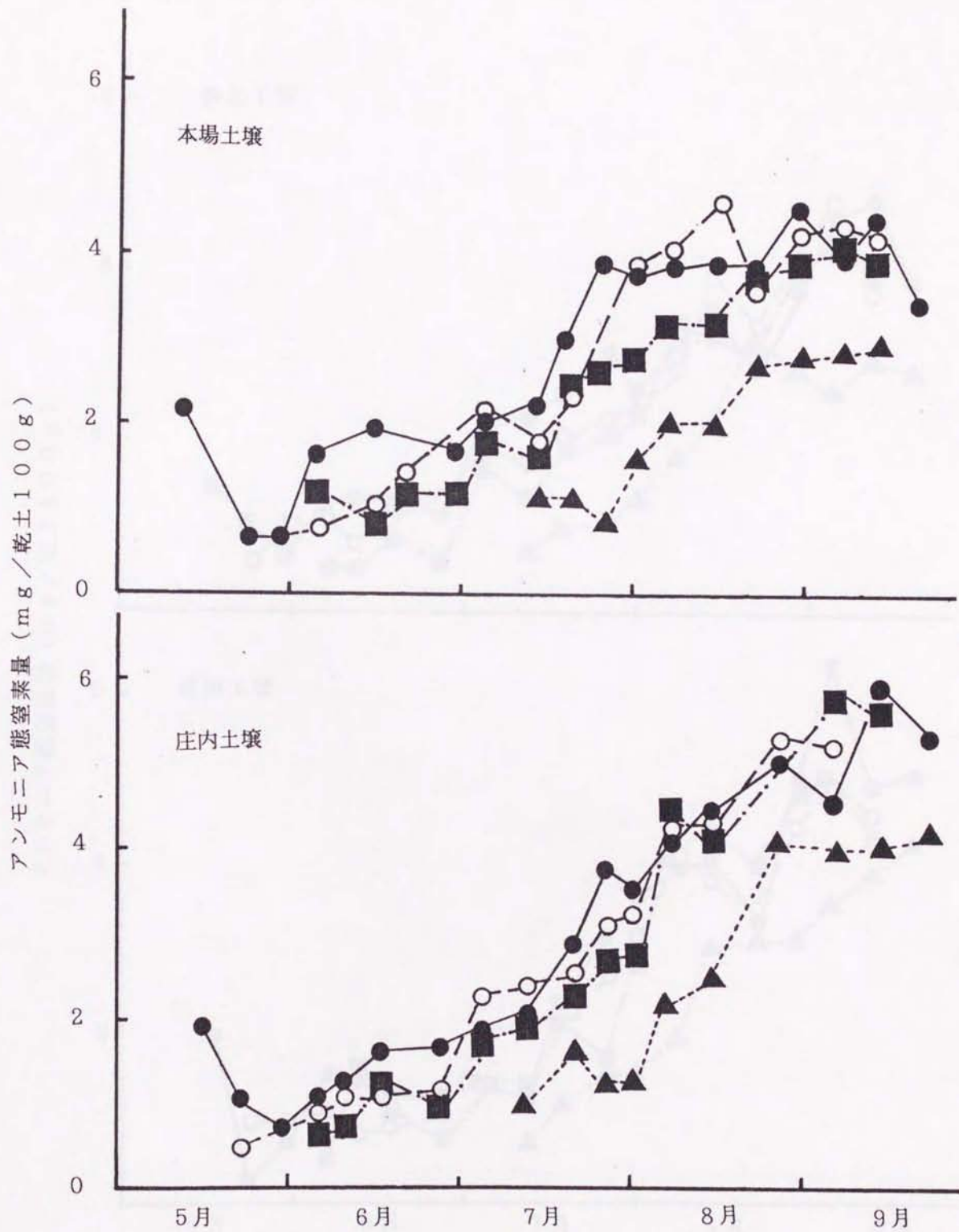
実際には, t を決定する E_a が未知数であり, かつ無機化と時間の関係は非線形モデルであるので, E_a , $k_a \cdot k_b$ の初期値を最初に決める。 A , B , C はこの初期値によって最小自乗法で計算される。そして, 測定値から分散を求めてから, k_b , k_a , E_a を順次変化させ, 分散の最も小さい E_a , k_a , k_b を最適とする計算を行った。このモデルをあてはめるために, 金野のプログラム³⁶⁾ を, FORTRAN に変えて使用した。

3. 実験結果

1) 水田土壌の地力窒素無機化モデル

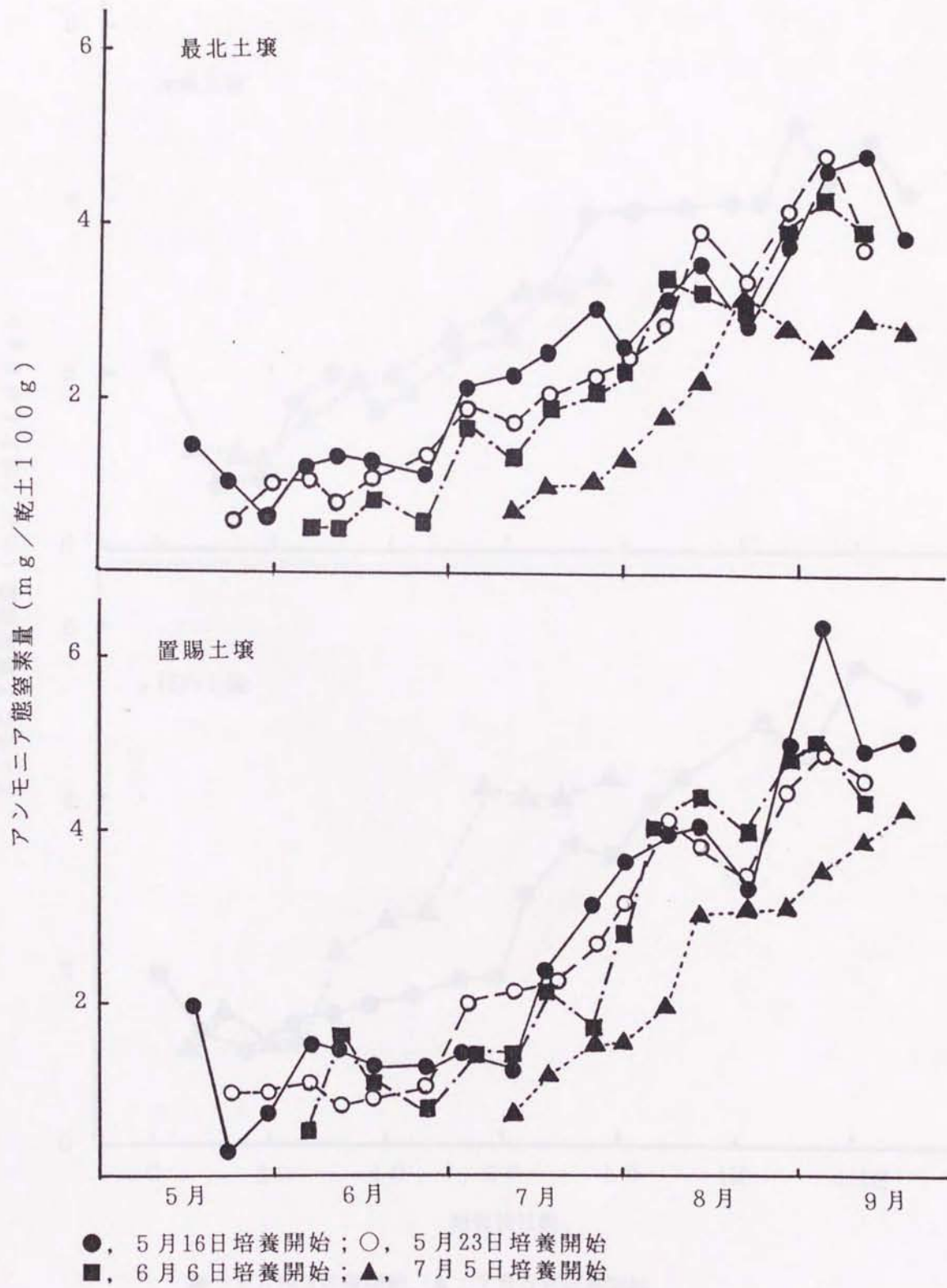
第2図に, 本場土壌および庄内土壌の無機態窒素量と暦日の関係を示した。これによれば, 両土壌とも, 6月上旬までに培養を開始した土壌は, 6月中の無機態窒素量が少なく, 7月以降に無機態窒素量が漸増した。7月上旬に培養を開始した土壌では, 約1カ月間, 無機態窒素量が少なく, その後漸増した。置賜土壌および最北土壌でも同様な傾向がみられた(第3図)。

第4図には, 本場土壌および庄内土壌の無機態窒素量と培養後日数の関係を培養開始日が最初(5月16日)と最後(7月5日)のシリーズの結果について示した。すなわち, 第2図の各曲線を培養後日数で統一するために平行移動したものである。この図より, 本場土壌では培養後日数と無機態窒素量の関係は, 培養開始時期と無関係であったのに対し, 庄内土壌では, 培養開始時期が遅くなると, 培養後日数が短くても, 無機態窒素量が多い傾向が見られた。置賜土壌, 最北土壌でも庄内土壌と同様の傾向であった(第5図)。培養開始時期が遅いことは, 地温が上昇することを意味している。たとえば, 1985年度の山形農試の水田の5cm平均地温は, 5月上旬で17.3℃, 7月上旬で22.2℃であった。このことは, 本場土壌では, 地温と無機態窒素量の関係が, 他土壌よりも低いことを示している。すなわち, 本場土壌では, 地力窒素の無機化は地温よりも培養日数に支配されることを示し, 本場土壌の地力窒素無機化の活性化エネルギーが低いことが予想される。

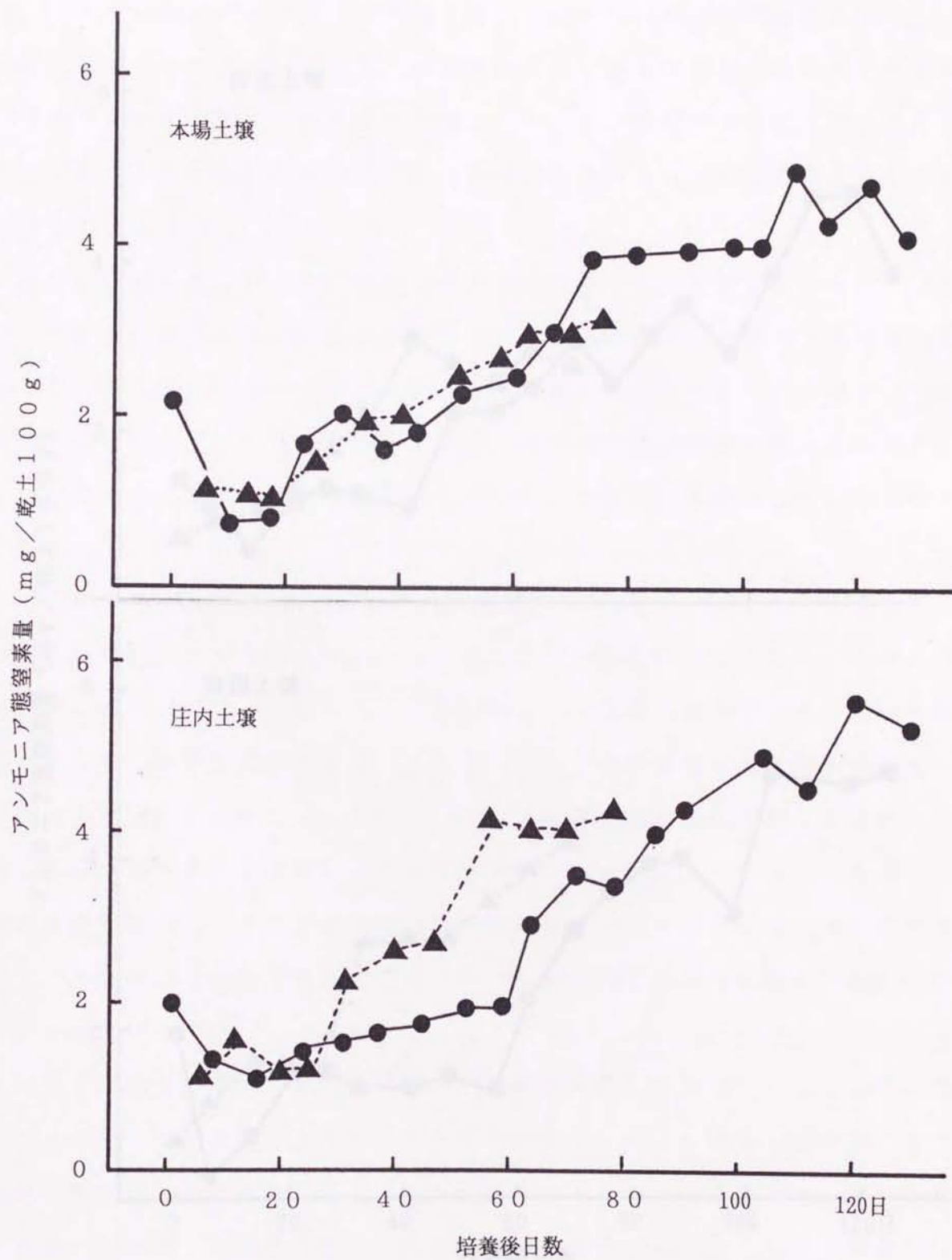


● : 5月16日培養開始、○ : 5月23日培養開始
 ■ : 6月6日培養開始、▲ : 7月5日培養開始

第2図 アンモニア態窒素量と暦日の関係(本場、庄内土壌)

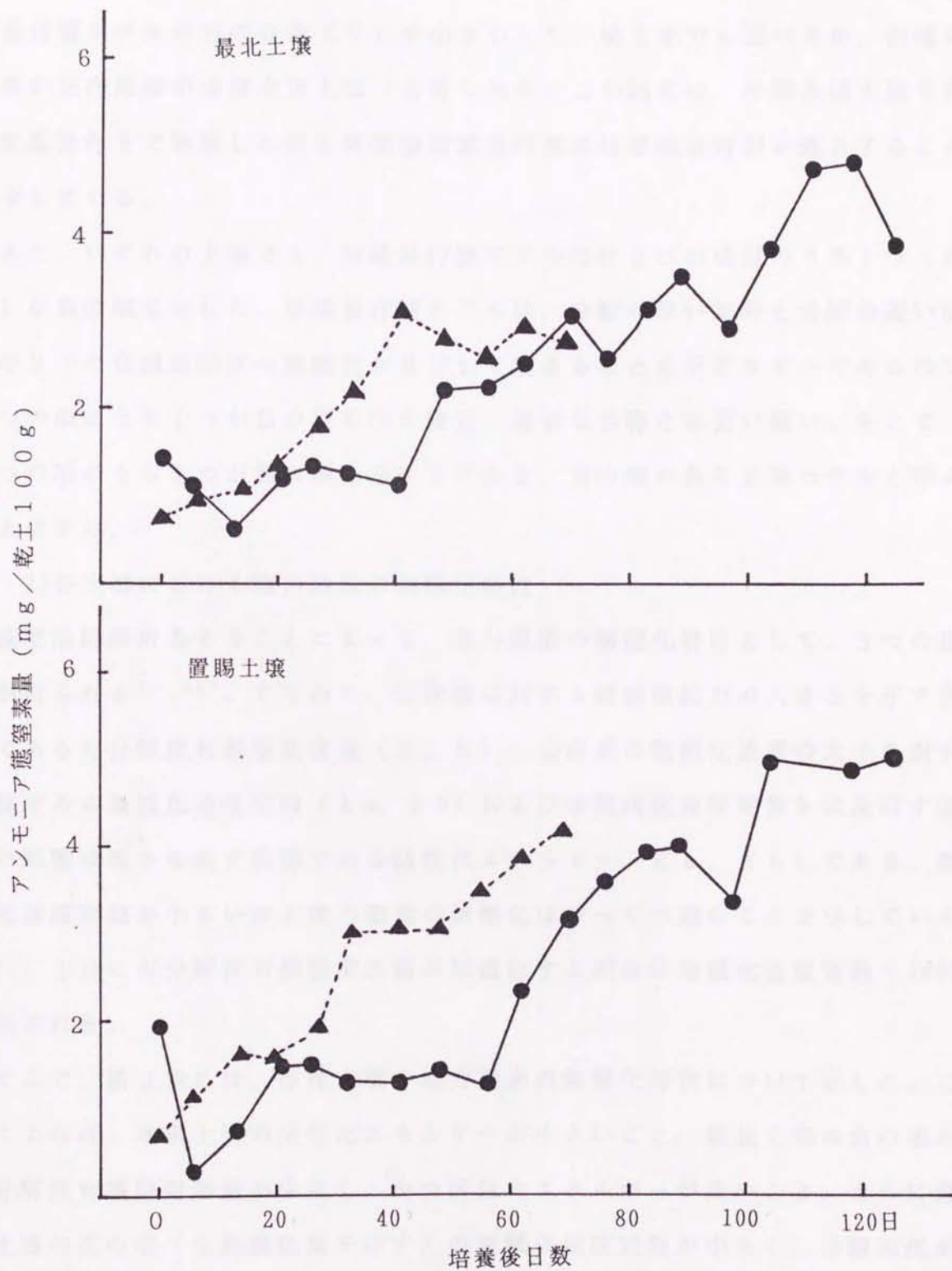


第3図 アンモニア態窒素量と暦日の関係 (最北、置賜土壤)



● : 5月16日培養開始、▲ : 7月5日培養開始

第4図 アンモニア態窒素量と培養日数の関係 (本場、庄内土壌)



●, 5月16日培養開始; ▲, 7月15日培養開始

第5図 アンモニア態窒素量と培養日数の関係(最北、置賜土壤)

第3表には、各土壌の無機態窒素量と18℃変換日数の関係を、単純型と単純並行型モデルにあてはめた結果を示した。これによれば、いずれの土壌でも単純並行型モデルの方の分散（V）が小さかった。第3章でも述べるが、同様の結果が庄内地域の沖積水田土壌でも得られた。この結果は、沖積水田土壌を自然変温条件下で培養した時の無機態窒素量の推移は単純並行型が適合することを示している。

また、いずれの土壌でも、単純並行型モデルでは2つの項目のうち1つ（B項）が負の値を示した。単純並行型モデルは、分解の早い部分と分解の遅い部分の2つの有機態窒素の無機化が並行して起きることを示すモデルであるので、2つの項のうち1つが負の項を示す場合、適切な名称とは言い難い。そこで、2つの項のうち1つが負の項を示すモデルを、負の項のある2項モデルと呼ぶことにする。

2)各土壌における地力窒素の無機化特性

速度論的解析をすることによって、地力窒素の無機化特性として、3つの指標が得られる^{85・86}。すなわち、①作物に対する窒素供給力の大きさを示す指標である可分解性有機態窒素量（A，B），②窒素の無機化速度の大小を表す指標である無機化速度定数（ k_a ， k_b ）および③無機化速度定数 k に及ぼす温度の影響の強さを表す指標である活性化エネルギー（ E_a ， E_b ）である。無機化速度定数が小さいほど地力窒素の無機化はゆっくり進むことを示している。また、1日に可分解性有機態窒素量が無機化する割合は無機化速度定数×100%で示される。

そこで、第3表には、各種土壌の地力窒素の無機化特性について示した。これによれば、本場土壌の活性化エネルギーが小さいこと、最北土壌の負の項の可分解性有機態窒素量が少なく、かつ活性化エネルギーが高いこと、さらに最北土壌の正の項（全無機化量を示す）の無機化速度定数が小さく、分解速度が遅いことが注目される。

さらに、土壌型別にみると、細粒強グライ土壌である庄内土壌および置賜土壌とも、各無機化特性値はほぼ同様な傾向が認められた。一方、多湿黒ボク土

第3表 地力窒素無機化の特性値

単純型モデル					単純並行型モデル (負の項ある2項モデル)							
$E a$	k_a	A	C	V	$E a_a$	$E a_b$	k_a	k_b	A	B	C	V
(cal/mol)	(1/d)	(mg/100g)	(mg/100g)	(mg/100g)	(cal/mol)	(cal/mol)	(1/d)	(1/d)	(mg/100g)	(mg/100g)	(mg/100g)	(mg/100g)
本郷土壌 7000	0.0033	10.02	0.67	14.15	1000	2000	0.024	0.05	10.09	-6.49	1.28	11.20
庄内土壌 20000	0.0016	11.61	0.64	11.57	19000	24000	0.01	0.02	11.45	-5.78	0.99	10.61
置賜土壌 26000	0.0017	9.44	0.64	17.67	23000	18000	0.008	0.02	11.09	-5.72	1.00	11.25
最上土壌 39000	0.0009	12.25	0.66	12.29	17000	53000	0.004	0.02	7.66	-0.79	0.83	7.59

$E a, E a_a, E a_b$: 活性化エネルギー

k_a, k_b : AおよびBの無機化速度定数

A, B: 可分解性有機態窒素量, C: 定数

V: 分散

壤である最北土壤は細粒強グライ土壤および灰色低地土に比べて、無機化速度定数が小さく、しかも活性化エネルギーが大きい傾向が認められた。次に、得られた無機化特性値に、実際の地温を入れて地力窒素無機化の特徴について検討した。第4表には、負の項および全無機化量が5月15日に無機化を始めた場合の50%および90%無機化される暦日を示した。暦日の計算に当たっては、1985年度のそれぞれの本支場の5cm平均地温を使用した。なお、置賜分場については、1984年度の5cm平均地温を使用した。

負の項についてみると、50%無機化されるのは、いずれの土壤でも6月中旬頃である。そして、90%無機化されるのは、本場土壤が最も速く6月下旬、他は7月下旬ないし8月上旬である。一方、全無機化量が50%無機化されるのは、本場土壤が6月中旬、庄内土壤および置賜土壤が7月上旬・中旬、最北土壤は最も遅く9月以降である。また、全無機化量が90%無機化するのは、本場土壤が8月中旬であり、他の土壤は稲作期間終了後となる。土壤型別にみると、多湿黒ボク土壤が他の土壤に比べて無機化が遅れる傾向であった。

4. 考察

地力窒素の無機化過程を把握するには、無機化の基本的な特性値と無機化モデルを明らかにすることが必要である。速度論的解析を用いた無機化モデルに関する研究は、畑土壤が中心で、Stanford and Smith⁸²⁾は、土壤の長期間洗浄培養を行い、窒素の無機化が一次反応に従うことを示した。さらに、杉原ら^{85, 86)}は、土壤の無機化が原則的には一次反応であることを前提として次のような4つの無機化モデルを提案している。①単純型モデル：有機態窒素Aから無機態窒素を生成する最も単純な不可逆一次反応モデル、②単純並行型モデル：分解の速い有機態窒素Aと分解の遅い有機態窒素Bとが独立して別々に無機化する不可逆一次反応モデル、③有機・無機並行型モデル：窒素の無機化と有機化とが独立して同時に進行する不可逆一次反応モデル、④逐次反応モデル：無機化過程に中間過程を含み、中間生成物を経てから無機化するモデル。一方、速度論的解析による水田土壤の無機化モデルについては、検討した事例が少なく^{2, 121)}、無機化モデルの設定にまでは至っていない。

第4表 地力窒素の無機化が50%、90%おきる暦日

	負の項		全無機化部分	
	50%	90%	50%	90%
本場土壌	5/28	6/29	6/12	8/15
庄内土壌	6/12	7/25	7/7	9月以降
置賜土壌	6/15	8/3	7/19	9月以降
最北土壌	6/10	7/24	9月以降	

* 5月15日無機化開始として。

第2章で検討した各種土壌の無機態窒素量と18℃変換日数の関係を単純型モデルと単純並行型モデルにあてはめた結果によれば、いずれの土壌でも無機化モデルとしては単純並行型モデルへの適合性が高かった。また、いずれの土壌でも2つの項のうち1つの項が負の値を示した。

負の項のある2項モデルとしては、①負の項が有機化（ないし脱窒作用）を示す有機・無機並行モデルと、②無機化過程中に中間過程が含まれ中間生成物を経てから無機化する逐次反応モデルの2つがすでに提唱されている⁸³⁾。

有機・無機並行モデルは、(1)式で示され、1つの項が負の値を示すモデルである。

$$N = N_1(1 - \exp(k_1 \cdot t_1)) - N_2(1 - \exp(k_2 \cdot t_2)) \quad (1)$$

t_1, t_2 : N_1 および N_2 の18℃変換日数(day), N : t_1, t_2 における地力窒素無機化量, N_1, N_2 : 定数(Nmg/乾土100g), k_1, k_2 : N_1 および N_2 の無機化速度定数
一方、逐次反応モデルは、(2)式で示される。

$$N = N_0(k_2/(k_2 - k_1))(1 - \exp(k_1 \cdot t_1)) - N_0(k_1/(k_2 - k_1))(1 - \exp(k_2 \cdot t_2)) \quad (2)$$

N_0 : 可分解性有機態窒素量, 他は(1)式と同様である。ここで、 $N_1 = N_0(k_2/(k_2 - k_1))$, $N_2 = N_0(k_1/(k_2 - k_1))$ とおくと(1)式と同様になる。しかし、有機・無機並行型モデルでは、可分解性有機態窒素量は、正の項の定数となるが、逐次反応型モデルでは、 N_0 となる。

逐次反応型モデルは、未風乾畑土壌にあてはまり、中間生成物の生成速度はきわめて速い結果が得られている。一方、有機・無機並行型モデルは、易分解性炭素を多く含む有機汚泥にあてはめられ、培養直後の有機化速度が、無機化速度を上回るモデルである⁸⁵⁾。そこで、湿潤畑土壌と湿潤水田土壌の熱水抽出による炭素と窒素量によれば(第5表)、抽出時間によらず、水田土壌の抽出炭素量は、畑土壌の約2倍の値を示していたが、窒素量は両土壌間で大差が認められなかった。その結果、C/N比も水田土壌の値が、畑土壌の値の約2~3倍の高い値を示した。

また、負の項のある2項モデルにおいて、負の項の解釈が、有機化・脱窒の場合、無機態窒素を培養前に添加しておけば、有機化が観察されるはずである。

第5表 熱水抽出による炭素量および窒素量 (mg/乾土100g)

	1時間抽出			4時間抽出		
	C	N	C/N	C	N	C/N
本場土壌	—	4.5	—	—	5.7	—
庄内土壌	13.7	4.2	2.2	21.2	10.6	2.0
置賜土壌	16.8	6.8	2.5	24.0	9.7	2.4
最北土壌	13.2	6.9	1.9	18.8	11.7	1.6
平均	14.6	6.6	2.2	21.3	10.7	2.0
畑土壌1	3.3	7.8	0.4	6.7	9.4	0.7
2	6.6	5.9	1.1	9.8	7.0	1.4
3	6.6	9.1	0.7	9.8	11.3	0.9
4	6.5	8.0	0.8	9.3	8.7	1.1
5	5.1	8.1	0.6	13.7	11.3	1.2
6	7.9	10.6	0.8	10.8	12.5	0.9
平均	6.0	8.3	0.7	10.0	10.0	1.0

一方、逐次反応であれば、無機態窒素を添加しても無機態窒素の減少は観察されないはずである。この点を解析するために、庄内土壌を用い、添加アンモニア態窒素のアンモニアとしての推移を第6図に示した。これによれば、添加窒素のアンモニアとしての残存量は、培養開始後10~20日間減少し、その後一定となる。この結果は、本培養実験条件下では、培養初期に添加アンモニア態窒素の有機化・脱窒が起きていることを示している。そして、添加アンモニア態窒素と同様に、無機化されたアンモニア態窒素も有機化・脱窒作用を受けていることが予想される。

ところで、無機態窒素の有機化は、地力窒素の無機化に比べて、温度変化による影響が少ないとされている^{2, 8, 9, 41)}。温度変化による影響が少ないことは、活性化エネルギーが低いことを意味している。したがって、負の項が有機化の特性値を示すと考えると、負の項の活性化エネルギーは、正の項の活性化エネルギーより小さくなるはずである。しかし、本実験からは、負の項と正の項の活性化エネルギーは、ほぼ同じか、負の項の方が高い結果が得られた。第3章でも述べるが、庄内地域のグライ土壌の解析結果でも、負の項と正の項の活性化エネルギーからみると、負の項の温度変化による影響が正の項より少ないという傾向はみられなかった。負の項を有機化の特性値とみると、従来の報告^{2, 8, 9, 41)}とは異なる結果である。従来の報告^{2, 8, 9, 41)}では、有機化の温度による影響の検討は、窒素を添加しておこなわれている。したがって、存在する窒素量は有機化の制限要因とはなっていないと考えられる。他方、本実験では、窒素無添加で培養したので、本実験で求められた有機化の特性値は、有機化独自の特性値とみるより無機態窒素の制限された条件下での特性値であると思われる。すなわち、無機化してくる窒素量が有機化の制限となるものと見られる。

また、脱窒速度は、硝酸態窒素濃度が低い条件では、硝酸態窒素濃度に支配される^{6, 9)}。本実験では、硝酸態窒素がほとんど存在しないので、負の項は脱窒によるものと考え、負の項は硝酸態窒素の生成速度を示すことになる。しかしながら、培養初期は、アンモニア態窒素の存在量も少なく、アンモニア

態窒素の生成速度，すなわち，地力窒素の無機化速度が脱窒速度の制限要因であると考えられる。

これらのことより，負の項は有機化・脱窒の特性値とみるよりも，水田土壤の地力窒素無機化の一つの指標とみたほうが妥当と思われる。通常の栽培条件下では，基肥窒素を施用している。したがって，負の項で無機化してくる窒素は全てが有機化・脱窒作用を受けるわけではなく，水稻の生育に直接影響を与えているものと見られる。

この負の項は，杉原ら^{85, 86)}および安藤・庄子²⁾の単純並行型モデルの分解の速い部分に相当するとみられるが，この問題については，今後の検討課題といえる。また，杉原ら⁸⁵⁾および安藤・庄子²⁾の単純並行型モデルの分解の遅い部分に相当する部分は，本解析では得られず，全無機化量として示される。

以上のことより，湿潤水田土壤の培養によって測定されるアンモニア態窒素の推移を示すモデルとしては，負の項をもつ2項モデル（有機・無機並行型）が妥当と思われる。

なお，山本・久保田¹²¹⁾の報告（基準温度25℃，温度3段階，定温条件）でも，負の項をもつ単純並行型モデルが得られている。

次に，各種土壤型の基本的な無機化特性を解析することは，土壤型別の無機化パターンの特徴を知るうえで極めて重要である。これまで，湿潤土壤において土壤型別の無機化特性について比較検討した事例は，畑土壤であるだけで，水田土壤を扱った研究は少ない^{2, 42, 121)}。

まず本場土壤の活性化エネルギーについて考察する。活性化エネルギーは，基質，すなわち可分解性有機物が同一であれば，温度と地力窒素の無機化に関与する微生物の関係を示すものである。しかし，基質が異なるときは，活性化エネルギーは基質の性質を示す1つの指標といえる。一方，湿潤土壤の風乾処理は，地力窒素の無機化に大きな影響を与えるが，無機態窒素の有機化にはあまり大きな影響を与えないことが報告されている²⁾。したがって，風乾土壤と湿潤土壤の培養窒素量を比較すれば，地力窒素の無機化に関係する土壤有機物の性質の1つが示されることになる。そこで，供試4土壤の風乾土壤と湿潤土

壤を4週間30℃で培養を行い、培養後の無機態窒素量を測定した(第6表)。これによれば、本場土壤は、風乾土壤と湿潤土壤にあまり大きな違いが見られない。一方、他の3土壤は、湿潤土壤に対して風乾土壤では、4~5倍の無機態窒素量となっている。このことは、本場土壤の有機物が風乾処理によって、あまり大きな変質を受けなかったことを示すものである。そして、本場土壤中の有機物のうち地力窒素の無機化に関与する部分が環境要因により変質しにくいものと考えられる。このことが、本場土壤の活性化エネルギーが他の土壤より低い原因の1つと思われる。

次に、最北土壤についてみると、すでに述べたごとく、最北土壤は多湿黒ボク土壤である。安藤・庄子²⁾が行った岩手県の黒ボク水田土壤(風乾土)の地力窒素の無機化特性をみると、単純型モデルがあてはまり、分解の速い部分が見られない。そして、沖積土壤と比べると活性化エネルギーが高く、かつ分解速度が遅い特徴が見られる。最北土壤でも負の項の可分解性有機物量が少なく、活性化エネルギーが高かった。また、全無機化量を示す項の分解速度が遅かった。これらの土壤型による無機化特性値の違いは、沖積土壤と黒ボク土壤の母材の違いと有機物の集積条件(有機物の質)の違いによると考えられる。すなわち、黒ボク土壤は、活性アルミナが多いため、有機物は活性化アルミニウムと結合して、難分解性のAl-腐植複合体を形成している。

一方、細粒強グライ土壤である庄内土壤、置賜土壤の場合、各無機化特性値は、ほぼ同様な値を示した。第6表は、同じ土壤タイプであれば類似した無機化特性値を示すことを示唆している。

また、無機化速度定数と土壤の理化学性の関係を検討した報告がいくつかあるが、Stanford and Smith⁸²⁾は、無機化速度定数が土壤の有機炭素含量と負の相関を示すことを指摘している。一方、Campbellら¹⁰⁾は40℃における無機化速度定数は有機炭素含量と正の相関関係があることを報告している。

実験に供試した4土壤の場合も、無機化速度定数(Y)とリン酸吸収係数(x_1)($Y=0.028-0.0000163x_1$; $r=-0.803^{**}$)および炭素含量(X_2)($Y=0.021-0.0024x_2$; $r=-0.803^{**}$)とそれぞれ負の相関が認められた。この点について、斎藤⁶⁶⁾

第6表 湿潤土および風乾土の窒素無機化量*

	本場土壤	庄内土壤	置賜土壤	最北土壤
風乾土	5.50	28.08	22.55	21.55
湿潤土	4.22	5.17	6.59	5.83
差	1.28	22.91	17.96	15.72

*30℃, 4週間培養(mg/乾土100g)

は黒ボク土壌においてリン酸資材の施用により無機化速度定数が増加することを認め、黒ボク土壌における窒素無機化がリン酸の可給度によって促進されることを指摘している。

次に、無機化特性値に実際の地温を入れ地力窒素無機化の特徴を検討した。東北地方では、水田土壌中の無機態窒素は6月下旬ないし7月上旬には消失する。6月30日時点の地力窒素の無機化量のうち、負の項の占める割合は、最北土壌を除き、80~90%である。このことは、水稻生育初期の地力窒素の吸収量の大部分が負の項に由来することを示している。

田中ら⁹⁰⁾によれば、1980年度の庄内支場、置賜分場および最北支場の土壌中の無機態窒素に占める地力由来窒素の割合は、6月10日には、置賜分場>庄内支場>最北支場である。そして、6月20日には、庄内支場>置賜分場>最北支場である。また、同年度の水稻の吸収した窒素のうち、地力窒素の占める割合は、6月20日が置賜分場>庄内支場>最北支場であり、6月30日には、庄内支場>置賜分場>最北支場である。本研究によって得られた負の項の地力窒素の無機化量は、1985年度の6月10日は置賜分場>庄内支場>最北支場であり、6月20日には庄内支場>置賜分場>最北支場であった。年次が異なるので、直接比較することはできないが、水稻生育初期の地力窒素吸収の予測にあたっては、沖積土壌では負の項の無機化の特性値が使用できる可能性を示すものである。

一方、7月以降の水稻の吸収する地力窒素は、負の項から無機化した窒素を含めた全無機化窒素である。したがって、7月以降の水稻の吸収する地力窒素の予測にあたっては、全無機化量の無機化(正の項)の特性値を使用すればよいことになる。

5. 要約

沖積水田土壌の地力窒素の無機化過程を窒素無添加・自然変温条件下で速度論的解析を行い、無機化モデルを明らかにした。得られた結果は以下の通りである。

①地力窒素の無機化過程は、負の項をもつ2項モデルで良くあてはまった。負

の項は、沖積水田土壤中に存在する易分解性炭素によって無機態窒素の有機化脱窒作用が起きるために出現したものと解釈した。また、有機化・脱窒は、地力窒素の無機化に支配され、負の項は、水田の地力窒素の無機化の1つの指標であると考えた。一方、正の項は、全無機化量を示す特性とみられた。

②多湿黒ボク土壌は、負の項をもつ2項モデルでは、負の項の可分解性有機態窒素量が沖積水田土壌と比べて低い値であった。また、活性化エネルギーが高い傾向を示した。

③3つの沖積土壌のうち、本場土壌の活性化エネルギーは、他の沖積土壌に比べて著しく低かった。これは本場土壌が新規造成圃場であり、その土壌有機物が、風化処理によっても変質しにくいことと関係しているものと考えられる。

④沖積水田土壌での水稲生育初期の地力窒素吸収量の80~90%は、負の項から無機化した窒素に由来している。このことは、水稲生育初期の地力窒素吸収量の予測にあたっては、負の項の無機化特性値が使用できることを示している。