

第 1 章 緒 言

第 1 節 背景と目的

1. 背 景

1) 網走地方の畑輪作と有機物管理の実態

網走管内は斜網、北見、東紋、西紋の4地区に区分される(図1-1)。管内の農業経営形態区分をみると、

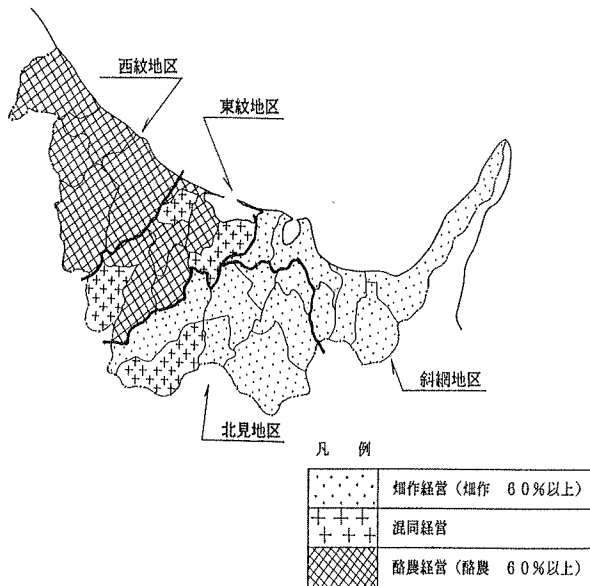


図1-1 網走支庁管内における農業経営形態区分図

斜網地区は大部分が畑作専業で経営規模も大きい。北見地区は、畑作が主体であるが、タマネギを中心とする野菜作と稲作も含まれ、経営規模は比較的小さい。一方、東紋、西紋地区は酪農が主体となっている。斜網地区を中心とする畑作専業地帯の作付方式は、バレイショ-秋播コムギ-テンサイの3年輪作が基幹となっている。しかし、秋播コムギの前作が早掘バレイショや二条オオムギなどに限定されるため、秋播コムギ、テンサイの連作やテンサイ-バレイショの2年輪作なども少なくない。一部ではマメ類を導入した4年輪作も行われているが、大部分は根菜類を中心とした短期輪作である。このような中で、各作物とも土壌病害の多発が問題となっている。

一方、有機物管理の実態をみると、麦稈、テンサイ茎葉、バレイショ茎葉、マメ殻などの収穫残査物は多くが直接圃場にすき込まれている。ただし、酪農地帯およびその近隣では、麦稈と堆肥との交換で、牛糞堆肥を施用するが多い。一方、堆肥の確保が困難な地区では、その代替として緑肥作物を導入している。緑肥作物はムギ類の間作や後作に導入され、越冬前に麦稈といっしょ

にすき込まれる。近年は、地力の維持・増進だけでなく土壌病害虫対策や景観などの観点からも作付けが増加する傾向にある。また、農畜産廃棄物であるデンプン排水や家畜糞尿スラリーなども一部の地域で多量施用されている。さらに、林産廃棄物の有効利用を図る観点からパーク堆肥が製造されており、畑地に対しても積極的に投入されている。いずれの有機物においても、大部分はムギ類収穫後-テンサイ作付け前に重点施用されている。

このような畑輪作と有機物管理の中で、有機物と化学肥料の不適切な施用に伴う窒素やカリ過剰が大きな問題となっている。とくに、窒素については、根菜類の場合テンサイの糖分低下やバレイショのデンプン価低下などの主要な要因となっており、また、ムギ類においては倒伏による減収や子実タンパク含有率の上昇に伴う品質低下が問題となっている。このため、過剰な窒素施肥や有機物施用は農家収益の低下をもたらすことになり、さらに硝酸の地下水汚染や温室効果ガスである亜酸化窒素ガスの発生などの環境負荷も懸念されている。

2) 網走地方の気象および土壌の特性

網走管内の年間降水量は700~800mm程度であり、畑地からの流出量は、横井²⁷⁾の試算によると年間500mm以下で、国内では最も少ない地帯である(図1-2)。特

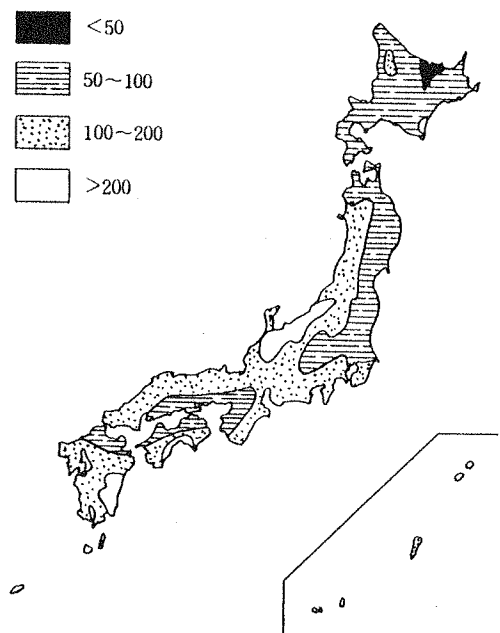


図1-2 流出水量(横井)

に、農耕期間（5月～9月）は降水量が少なく（表1-1）、蒸発散量が降水量を上まわるとされている¹⁹⁶⁾。一方、冬期間は土壤凍結が進むため（図1-3）、畑地

表1-1 網走管内の気象

地点	平均気温 (°C)		降水量 (mm)		日照時間	
	5月～9月	年間	5月～9月	年間	5月～9月	年間
網走市	14.7	6.1	374	745	845	1,774
北見市	15.6	5.5	383	718	721	1,645
紋別市	14.5	6.0	433	774	733	1,543

注) 1979～1990年（日本気象協会北海道本部、1992）

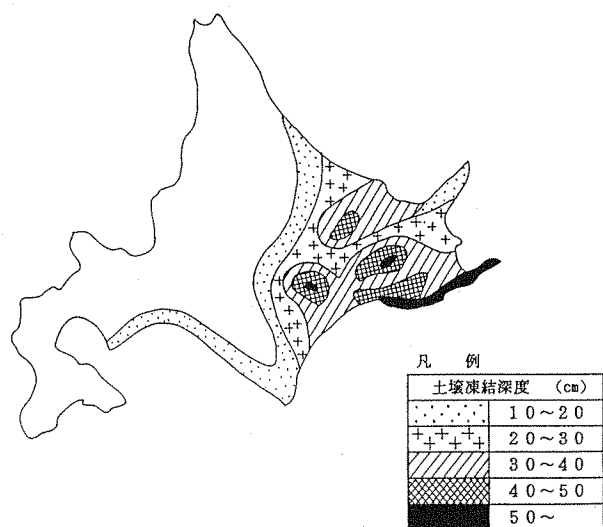


図1-3 北海道における土壤の最大凍結深度分布図（1995.菊地）

からの水の流出は10月以降土壤凍結開始時までの間と春先の融雪時が中心となる。しかし、融雪水の流出は、土壤凍結が残っている場合には表面流去水が多くなるため²⁶⁶⁾、地下浸透量は比較的少ないものと推察される。したがって、過剰な窒素は下層土に集積しやすく、このような残存窒素の評価は土壤窒素診断の観点からきわめて重要とみなされる。一方、流出水量が少ないことは、浸透水の硝酸濃度が高まりやすいことを意味する。土壤浸透水の硝酸態窒素濃度をWHO基準の 10mg L^{-1} 以下にするための硝酸態窒素の残存許容量を道立農試⁸⁴⁾が試算した結果、網走管内の多くは年間 40kg ha^{-1} 以下であり、道内では最も許容量の少ない地帯となっている。このことは、環境負荷を軽減する観点からも窒素管理が重要であることを示すものである。

網走管内の土壤は、図1-4に示すように、斜網地区を中心とする畑作専業地帯では火山性土が最も多い。火山性土は、淡色黒ボク土から多腐植質黒ボク土まで多岐にわたっている。したがって、腐植含量が大きく相違し、有機物管理の多様性と相まって、窒素肥沃度の変動は大きい。一方、多くの火山性土は有効土層が厚く、下層土の保水性は大きい²⁴⁰⁾。さらに、アロフェン含量も高い^{154,191)}ため、アニオン吸着能が大きく^{84,115)}、硝酸はこれらの土層中に残存しやすいものと思われる。非火山性土については、沖積土と泥炭土が低地に分布しており、河川流域の沖積土は中粗粒質土が多く、特に浅礫地帯では窒素の流亡が懸念される。さらに、浅礫地帯では干ばつが生じやすいため、窒素肥沃度の極端に低い軽石流

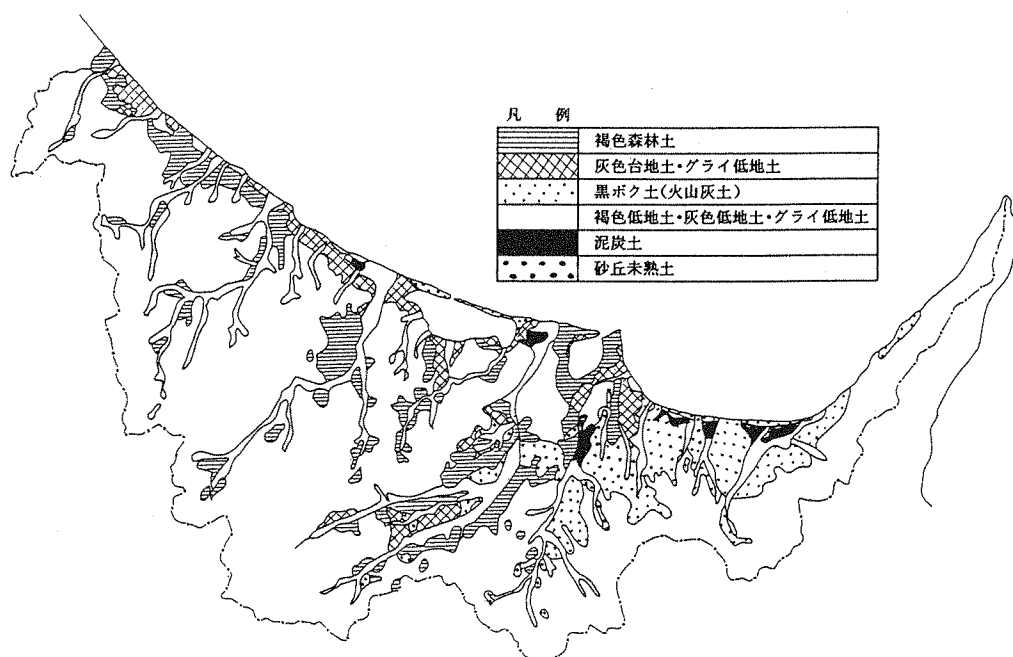


図1-4 網走支庁管内の土壤図

堆積物の客土や畑地灌漑などが実施されている。また、泥炭土は窒素地力が著しく高く、窒素過剰による作物の品質低下が問題となる。一方、台地では、起伏のある褐色森林土が多いが、これらの傾斜地では層厚調整が行われ、下層土の混入による窒素肥沃度の低下などが問題となっている。このように、網走管内の畑土壌は窒素肥沃度の変動が大きいことから、土壌窒素診断に基づく適正な窒素施肥が必要である。

2. 研究の目的

窒素は作物生産にとって最も重要な元素の一つであるが、過剰な供給は収量・品質の低下や環境負荷の増大など各種の弊害をもたらす。したがって、低コストで高品質生産をめざし、かつ、環境保全を重視した持続型農業を推進するためには、地域の有機物資源を有効利用しつつ、施肥窒素量の適正化を図ることが必要である。このような窒素施肥管理を行うためには、有機物や土壌の可給態窒素の評価が不可欠となる。

以上のことを踏まえて、本研究では有機物および土壌中の可給態窒素を評価し、それに基づく適正な窒素施肥量を設定するために、以下の事項について検討した。

1) 緑肥および収穫残渣物の窒素評価

畑輪作に導入されている各種緑肥作物と主要な作物残渣であるが、そのまますき込むと窒素飢餓を起こす危険の大きい麦稈を取り上げ、これらの分解特性と分解過程における窒素の有機化・無機化を明らかにする。さらに、後作物による緑肥窒素の利用率を検討し、窒素の減肥基準を策定する。

2) バーク堆肥の窒素評価

難分解性有機物であるバーク堆肥の化学成分と窒素の有機化・無機化の関係を明らかにし、窒素飢餓を回避するための腐熟度指標を設定する。同時に、樹種や腐熟度の異なるバーク堆肥の窒素肥効と窒素減肥の必要性を検討する。

3) 土壌窒素の評価

土壌の可給態窒素評価法として簡易で精度の高い化学的測定法の確立、春先における残存無機態窒素評価の必要性和その変動要因、さらには作期中の窒素無機化量を予測するための反応速度論に基づく土壌窒素の無機化特性について検討する。

4) 土壌窒素診断に基づくテンサイの最適窒素施肥量

テンサイの最適窒素吸収量および施肥窒素利用率の実態を明らかにし、これらの値と土壌の可給態窒素の化学的測定法を用いて最適窒素施肥量の予測式を設定する。

第2節 既往の研究

1. 有機物窒素の評価

畑地に施用される有機物は収穫残渣物や緑肥などの植物残渣、家畜糞尿およびこれらを原料とする堆きゅう肥など多種多様であるが、ここでは主として植物残渣に含まれる窒素の無機化特性と後作物による窒素利用率および窒素の減肥対応に関する事項を述べる。

1) 有機物窒素の無機化

土壌中における有機物窒素の分解または無機化は、有機物中のC/N比やリグニンなどの化学成分組成、有機物の形状や施用位置および土壌の種類や地温、水分などの環境条件によって変動することが明らかにされている^{173,264)}。

(1) 化学成分による窒素の有機化・無機化予測

C/N比は、多くの有機物において土壌中での窒素の有機化・無機化と密接な関係を示すことから可給態窒素の指標として有効であり、また、堆肥類については腐熟度指標として使用されている。植物残渣については、C/N比20以下の場合窒素無機化が速やかに進み、また、C/N比30以上では窒素の有機化が比較的長期間継続することが確認されている。このため、窒素の有機化・無機化の限界値となるC/N比について、Alexander⁶⁾やAllison・Klein⁹⁾は25~30程度とみなしている。しかし、この限界値は、実験条件によってかなりの変動が認められ、広瀬⁸¹⁾のびん培養法(30℃、10週間)では20、Janzen・Kucey⁹⁷⁾の洗浄培養法(21℃)では2週目24、12週目36~41であった。また、ポット試験による窒素吸収量から得られた値をみると、Iritani・Arnold⁹⁴⁾の報告では28℃、4週間目で20、Franzluebberら⁵⁰⁾の報告では28℃(平均)、10週間目で39であった。Vigil・Kissel²⁵⁰⁾は、洗浄培養法やポット試験による窒素(¹⁵N)吸収量等の各種データを取りまとめてC/N比40を限界値とした。一方、圃場でリターバックを用いて調査した結果をみると、Kuoら¹²⁸⁾は、春圃場に埋設してから4週間後における限界値は26程度(N1.79%)と報告している。また、麦稈分解中に窒素無機化が始まるときのC/N比は、Christensen³³⁾は28~35、Andrenら¹⁰⁾は40程度と報告している。

国内では、ガラス繊維ろ紙法を用いて、植物残渣や堆きゅう肥などの各種有機物の分解過程を調査した事例が数多く報告されている。前田・志賀¹⁴²⁾は、各種有機物の分解過程を水田条件で調査した結果、C/N比30以下の有機物で窒素の分解を認めている。また、道内の畑土壌で調査した事例をみると、速見⁶⁸⁾は30~35以下、渡辺

ら²⁵⁴⁾は36~44以下で窒素の分解を認めている。一方、各種堆肥の有機化・無機化の限界値については、水積した稲わら堆肥や収穫残渣物混合の家畜糞堆肥、都市ごみコンポストなどは植物残渣の場合とほぼ同じとされている。これに基づいて、井の子⁹³⁾や原田ら^{61,62)}は、窒素飢餓を生じさせないための腐熟度目標値をC/N比20以下に設定した。ただし、木質物については比較的高いC/N比でも窒素有機化が生じないことから、パーク堆肥ではC/N比35以下を品質基準として設定されている¹¹⁰⁾。

以上のことから、窒素有機化・無機化の限界値となるC/N比はおおむね20~40程度であり、実験条件や有機物の種類による変動が比較的大きいことを認めた。この中で、分解期間が短く、かつ易分解性の有機物を供試した条件では比較的低いC/N比が限界値となっており、一方、分解期間が長期にわたる場合や難分解性の有機物については比較的高いC/N比が限界値となっているようである。

次に、C/N比と窒素無機化率の関係をみると、熊田¹²⁶⁾は、未分解の植物残渣の場合と腐朽物の場合とでは同一ではないことを指摘している。Fauci・Dick⁴⁵⁾は、C/N比が同程度のマメ科緑肥と牛糞きゅう肥を比較し、窒素無機化率はリグニン含量の高い牛糞きゅう肥が著しく低いことを報告している。また、未分解の植物残渣の中にもリグニン含量やポリフェノール含量の高いものが含まれているが、このような有機物はC/N比が低い場合でも窒素無機化率はさほど高くないことが明らかにされている^{26,48,177,181,213,246,250)}。この要因として、Haynes⁷¹⁾は、リグニンは土壤中でフェノールに分解され、これらの化合物や当初から含まれているポリフェノールが植物タンパクやアミノ酸と結合し、難分解性の腐植ポリマーを生成するためと指摘している。このようなことから、Vigilら²⁵⁰⁾はリグニン/N比、Oglesby・Fownes¹⁷⁷⁾はポリフェノール/N比、Foxら⁴⁸⁾およびConstantinides・Fownes³⁵⁾は(ポリフェノール+リグニン)/N比をそれぞれ窒素無機化率の指標として提示した。さらに、Janssen⁹⁶⁾は、リグニンとポリフェノールを分解の難易の指標とし、分解の難易度とC/N比により窒素無機化率が予測できることを報告している。

(2) 有機物の形状と乾燥の影響

植物残渣窒素の無機化は試料の物理的形状や乾燥の影響を受けることが明らかにされている。Van Schreven²⁴⁷⁾は、C/N比13~46の植物残渣を用いて粉砕物と細断物の窒素無機化率を比較し、いずれの有機物も粉砕物が細断物よりも低いことを認めている。また、その差はC/N比の高いものほど顕著であると報告している。粉砕に

伴う窒素無機化率の低下は、稲わら、麦稈、おがくずの高C/N比の有機物を用いた前田・鬼鞍¹⁴¹⁾の報告、C/N比19のマメ科緑肥を用いたJensen¹⁰²⁾の報告およびC/N比86の麦稈とC/N比21のマメ科緑肥を用いたPer Ambus・Jensen¹⁸³⁾の報告でも確認されている。この要因は、いずれの報告でも有機物のサイズが細粒になるほど土壌窒素の有機化が大きくなるためとされている。一方、¹⁵N標識法によりgrossの窒素無機化率をみると、細粒化に伴ってC/N比の低いものは低下し、C/N比の高いものは増加することが報告されている^{102,183)}。

次に、乾燥処理の影響をみると、Van Schreven²⁴⁷⁾は105℃の加熱乾燥で窒素無機化率の低下を認めている。これは、熱乾処理により水溶性有機画分のC/N比が高まるためとされている。また、Moorheadら¹⁵³⁾はC/N比11~13のホテイアオイを用いて70℃乾燥と凍結乾燥を比較し、70℃乾燥の場合はリグニン含量が高まり、窒素無機化率は低下するとしている。さらに、Kumavasingheら¹²⁷⁾は緑肥アゾラの水稲による窒素利用率を調査し、50~60℃乾燥物は新鮮物よりも低い値となることを認めた。Van Soest²⁴⁸⁾は、青刈り飼料を50℃以上で乾燥するとリグニン含量が増加するとしている。

以上の結果は、植物残渣試料の粉砕や50~60℃以上の熱乾燥処理は、窒素無機化を過小評価する可能性が大きいことを示すものである。

(3) 土壌の窒素肥沃度の影響

有機物の分解は、一般に窒素肥沃度の高い土壌で速やかに進む⁶⁹⁾。このため、¹⁵N標識有機物を用いて調査した事例をみると、窒素無機化率はいずれも窒素肥沃度の高い土壌で高まる傾向を示している。すなわち、C/N比17のマメ科緑肥を用いたJanzen・Radder⁹⁸⁾の報告では、無機態窒素含量の多い土壌が少ない土壌よりも高い窒素無機化率を示した。また、C/N比16~18の作物残渣を用いたAzamら¹⁵⁾の報告では、無機態窒素および無機化可能窒素の多い土壌で高い窒素無機化率を示した。同様な傾向は、作物の窒素利用率でも認められ、C/N比16のマメ科緑肥を用いたYaacob・Blair²⁶³⁾の報告では土壌間で14~55%の変動幅を示し、また、C/N比16~17(N 2.6%)のマメ科緑肥を用いたMüller¹⁵⁹⁾の報告では11~20%、C/N比15のマメ科緑肥を用いたLadd¹²⁹⁾の報告では11~17%の変動幅を示した。これらはいずれも窒素肥沃度の高い土壌ほど高い値を示している。さらに、西宗¹⁶⁹⁾は、十勝地方の主要土壌を用いて各種作物残渣の窒素利用率を比較した結果、窒素利用率は沖積土>湿性火山性土>乾性火山性土の順で、その差は窒素肥沃度を反映したものとしている。

一方、差引き法により窒素無機化率を比較した Jingguo・Bakken¹⁰³⁾ の報告をみると、C/N比12のクロバの場合には土壌間差が認められず、また、C/N比の高い麦稈の場合には可給態窒素量の少ない土壌（作付け区）が多い土壌（無作付け区）よりも高い無機化率を示した。この要因については、窒素が不足すると炭素化合物の分解が抑制されて窒素有機化量は少なくなり、その結果としてnetの窒素無機化量が多くなったためとされている。Blackmer・Green¹⁸⁾ は、トウモロコシ残渣の窒素無機化が施肥窒素（¹⁵N）により促進されることを認めたが、同時に施肥窒素もトウモロコシ残渣により有機化されることを認めた。そして、このときの無機化窒素量と有機化窒素量とはほぼ同じであることから、施肥¹⁵Nと有機物¹⁴Nとの間には交換反応が生じたものと推察している。

以上の結果は、窒素肥沃度の高い土壌では施用有機物の分解が促進されるため、¹⁵N標識法の場合にはnetの窒素無機化率が增大するが、その一方で土壌や施肥窒素の有機化量も増加するため、差引き法でのnet窒素無機化率は必ずしも高まらないことを示すものである。

(4) ¹⁵N標識法と差引き法との比較

¹⁵N標識法を用いてC/N比の高い有機物の窒素無機化率を調査した事例をみると、イネ残渣（N0.4～0.8%）を30℃、30日間培養したYoneyama・Yoshida²⁷³⁾ の報告では、畑条件で7～8%、湛水条件で19～20%、C/N比41～47のコムギ、ソルガム残渣を洗浄培養したSmith・Sharpley²¹⁸⁾ の報告では、2週目で6%、27週目で25～28%であった。また、C/N比80程度の麦稈を用いたWatkins・Barracough²⁵⁵⁾ の報告では20℃、12日間の培養条件で12%、C/N比86の麦稈を用いたPer Ambus・Jensen¹⁸³⁾ の報告では15℃、60日間の培養条件で9～10%であった。前述のように、有機化・無機化の限界値を上まわる高いC/N比の有機物は、差引き法ではマイナスの窒素無機化率となるが、¹⁵N標識法ではすべてプラスの窒素無機化率を示し、後作物の窒素利用率でも5～12%と高い値を示している^{169,185,253)}。したがって、このような有機物の窒素無機化率は、いずれも¹⁵N標識法＞差引き法となる。

一方、C/N比の低い有機物の場合には、窒素無機化率は逆に¹⁵N標識法＜差引き法の傾向を示す^{48,50,98)}。同様なことは、後作物による有機物窒素の利用率でも認められている^{249,261,262)}。このことは、有機物施用により土壌窒素の無機化が促進されることを示唆するものである。そこで、¹⁵N標識作物残渣を用いて土壌窒素の無機化に及ぼす影響を調査した事例をみると、Yaacob・Blair²⁶³⁾

は、C/N比16～28程度の場合いずれも無機化促進を示すが、その程度はC/N比の低いものほど大きいことを認めている。また、Azamら¹⁵⁾ は、C/N比10～16程度の場合には無機化量が増加し、C/N比18以上の場合には無機化量の減少を認めている。これらの結果は、¹⁵N標識法と差引き法との差がC/N比の低下にしたがって一層大きくなることを示すものである。

Jenkinsonら¹⁰⁰⁾ は、窒素添加による土壌窒素の無機化促進効果(priming effect)をANI(Added Nitrogen Interaction)と定義し、¹⁵N標識窒素を用いたときに生じるpool substitution（添加¹⁵Nがnativeの¹⁴Nと交換）を見かけのANIとした。そして、真のANIの場合には差引き法による値が誤りであるが、みかけのANIが生じた場合には¹⁵N標識法による値が誤りであることを指摘した。無機態窒素(¹⁵N)を施用した場合、作物による窒素利用率は¹⁵N標識法＜差引き法の傾向を示すが、その主たる要因はみかけのANIによるものとされている^{66,100,187)}。

このことから、C/N比が低く、窒素無機化の速い有機物を施用した場合には、無機態窒素施用の場合と同様にみかけのANIが生じる可能性が大きく、¹⁵N標識法による有機物窒素の無機化率または利用率は過小評価されるものと推察される。一方、C/N比の高い有機物の場合には、¹⁵N標識法の値は、grossの窒素無機化率を反映したものと思われるが、有機物分解に伴う有機化窒素量を考慮しないため過大評価されることになる。Janzen・Radder⁹⁸⁾ は、無機態窒素の多い土壌で緑肥窒素(¹⁵N)の無機化率が高まるのはpool substitutionにより説明できるとしている。さらに、Raoら¹⁸⁷⁾ は、¹⁵N標識法による窒素利用率がみかけのANIに左右されることを認め、窒素肥沃度の異なる土壌間の比較にはANIを考慮する必要性を指摘した。このことは、有機物窒素と土壌または施肥由来の無機態窒素との間にpool substitutionが生じることを示唆するものであり、C/N比の高い有機物の¹⁵N標識法による窒素無機化率が過大評価される要因の一つといえる。

2) 有機物窒素の利用率

有機物窒素の利用率の算出法には¹⁵N標識法、差引き法、回帰式法などがあるが^{187,243,265)}、植物残渣の場合には、国内、国外をとわず既往の報告はほとんどが¹⁵N標識法によるものである。

(1) すき込み初年目の¹⁵N利用率

アメリカでは、冬期間のカバークロップとしてマメ科などの各種緑肥作物が導入されており、後作トウモロコシの慣行栽培または不耕起栽培における緑肥窒素の利用率が検討されている。この中で、Varcoら²⁴⁹⁾ はC/N比

11~12程度のヘアリーベッチで32% (慣行) と20% (不耕起)、Harrisら⁶⁴⁾はC/N比15のアカクローバで15% (慣行)、Ranellsら¹⁸⁶⁾はC/N比16のクリムソンクローバで21%、C/N比38のライムギで4% (いずれも不耕起)の値を得ている。また緑肥以外の作物残渣の窒素利用率については、Abshahiら¹⁾はC/N比15のテンサイ (後作冬コムギ) で27%、Wagger²⁵³⁾はC/N比25~38のソルガムで10~26%、C/N比93~117のコムギで9~12%と報告している。なお、コムギの窒素利用率については、イギリスでPowelsonら⁸³⁾が同様の値を得ている。

寒冷地のカナダでは、秋すき込み緑肥の窒素利用率を春播コムギを作付けして調査し、Bremner・van Kessel²¹⁾はC/N比10の緑肥 (lentil) で19%、Stevenson・van Kessel²²⁸⁾はC/N比19~23の緑肥 (pea) で10~12%の値を得ている。また、南フィンランドでは、Müller・Sundman¹⁵⁸⁾がマメ科、イネ科を含む各種緑肥の窒素利用率を春播オオムギを用いて検討し、C/N比14~17の緑肥を秋すき込んだ場合には17~25%、C/N比15~27の緑肥を春すき込んだ場合には6~15%の値を得ている。デンマークでは、Jensenら¹⁰¹⁾がC/N比17のマメ科緑肥を秋すき込んだ結果、秋播コムギを作付けした場合には14%、春播コムギを作付けした場合には6%の窒素利用率を得ている。

半乾燥地の南オーストラリアでは、Laddら^{130,131,132)}がマメ科牧草を春にすき込み、5~8カ月後にコムギを作付けして窒素利用率を調査した結果、マメ科牧草のC/N比が15の場合には11~17%、C/N比11の場合には17~28%の値を得ている。イスラエルでは、Seligman²⁰⁷⁾がC/N比50~75程度のトウモロコシをすき込み、コムギを作付けして窒素利用率を調査した結果1~5%の値を得ている。

日本では、西宗¹⁶⁹⁾が十勝地方の畑土壌において各種作物残渣の窒素利用率を調査し、テンサイ (N2.5~3.2%、後作トウモロコシ) で15~30%、バレイショ (N2.0~2.4%、同コムギ) で8~16%、アズキ (N1.2~1.6%、同バレイショ) で4~7%、トウモロコシ (N0.8~1.3%、同アズキ) で4~8%、秋播コムギ (N0.5~0.9%、同テンサイ) で5~11%の値を得ている。

これらの報告から、有機物窒素の利用率は、気象と土壌および作付けや耕起条件などの影響を受けるものの、多くの場合有機物のC/N比とは密接な関係を示すことがうかがわれる。この中で、C/N比の比較的低い (10~25程度) 植物残渣についてはおおむね10~30%の範囲にあり、一方、C/N比の高い植物残渣については5~

10%程度の値となっている。なお、差引き法による窒素利用率をみると、Hestermanら⁷⁵⁾はアメリカのマメ科緑肥トウモロコシ作付方式の中でアルファルファの窒素利用率を43%程度と報告している。この値は¹⁵N標識法と比較して明らかに高い。¹⁵N標識法による窒素利用率については、前述のようにみかけのANIを考慮する必要がある。

(2) 2年目以降の残効

¹⁵N標識法を用いた2年目 (または2作目) の窒素利用率は、C/N比の比較的低い植物残渣の場合にはいずれも初年目より著しく低く、Varco²⁴⁹⁾は3% (慣行栽培) および7% (不耕起栽培)、Jensen¹⁰¹⁾は2~3%、Ladd¹³⁰⁾は3~5%、Wivstad²⁶¹⁾は1~5%、西宗¹⁶⁹⁾は2~8%と報告している。また、C/N比の高い植物残渣については、初年目とおおむね同程度であり、Seligman²⁰⁷⁾は3~7%、西宗¹⁶⁹⁾は4~7%と報告している。これらの結果から、2年目以降の残効にはC/N比の異なる有機物間で大きな変動はないものと推察される。したがって、これらの窒素評価は、土壌窒素の評価で対応可能と考えられる。

(3) 有機物施用に伴う窒素の減肥対応

イギリスでは、各種緑肥作物を導入した跡地でのテンサイに対する窒素施肥量が検討されている。Hull・Webb⁸⁹⁾は、ルーサン跡地の窒素適量は50kg ha⁻¹程度でオオムギ、コムギ跡地と比較すると100kg ha⁻¹程度の減肥が可能としている。Draycott・Last⁴¹⁾は、ミヤコグサ (trefoil) をオオムギの間作に緑肥として導入したときの窒素適量を検討し、63kg ha⁻¹の減肥が可能であることを認めたが、この減肥量はミヤコグサに施用した窒素量と同じであった。同様に、Lastら¹³⁴⁾は、ミヤコグサ、ライグラスを間作緑肥として導入した場合50kg ha⁻¹程度の窒素減肥が可能としている。

アメリカやカナダでは、マメ科緑肥を導入した跡地でのトウモロコシに対する窒素施肥量が検討されている。Hestermanら⁷⁴⁾は、無窒素条件でトウモロコシを栽培した場合、トウモロコシの収量はアルファルファすき込み地が休閑地やダイズ、トウモロコシ跡地よりも高く、アルファルファの窒素含有量に応じた窒素減肥が可能であることを認めた。Brulson・Christie²⁶⁾は、緑肥すき込み地でのトウモロコシ収量を調査した結果、アカクローバおよびアルファルファは90~125kg ha⁻¹の窒素肥料的効果があることを認めている。Sarrantonio・Scott¹⁹⁷⁾は、ヘアリーベッチを導入したときの窒素適量を検討し、不耕起栽培では17~40kg ha⁻¹、慣行栽培では52kg ha⁻¹の窒素減肥が可能としている。Deckerら³⁹⁾は、冬期間のカバー

クロップとしてヘアリーベッチなどのマメ科緑肥とコムギを導入し、不耕起条件での後作トウモロコシの収量を調査した結果、カバークロップを導入しない場合と比較してマメ科緑肥の場合は $10\sim 75\text{kg ha}^{-1}$ の窒素減肥が可能となり、一方コムギの場合は $15\sim 30\text{kg ha}^{-1}$ の増肥を必要とすることを認めた。Douら⁴⁰⁾は、アカクローバおよびヘアリーベッチを導入し、後作トウモロコシの窒素吸収量を調査した結果、慣行栽培では休閑地の $\text{N}200\text{kg ha}^{-1}$ 施肥区と同程度、不耕起栽培ではこれよりも少ない窒素吸収量を示すことを認めた。なお、Hargrove⁶³⁾は、クローバ2種類、ベッチ2種類の緑肥を導入し、不耕起栽培での後作ソルガムの子実収量を休閑地と比較した結果、これらマメ科緑肥は平均 78kg ha^{-1} 相当量の肥料代替効果があることを認めた。

収穫残査物であるテンサイ茎葉をすき込んだ場合の窒素肥料的効果については、Abshahiら¹⁾は後作コムギに対して乾物 1Mg 当たり 15kg の窒素施肥に相当するとしている。また、赤城ら²⁰⁵⁾は、現物で 4Mg すき込んだ場合、バレイショの窒素吸収量は尿素 $\text{N}5\text{kg}$ 施用と同程度の値を示すことを認めている。なお、Moraghan・Smith¹⁵⁷⁾は、米ミネソタ州において窒素含有率の比較的高いテンサイ茎葉を秋すき込みすると春先に硝酸が集積し、地下水汚染が懸念されることを指摘している。

2. 土壌窒素の評価

土壌の可給態窒素は、作付け時に有効土層中に残存する無機態窒素と作期中に無機化する易分解性有機態窒素からなる。国内の畑土壌では、窒素施肥に際して残存無機態窒素を考慮した事例は極めて少なく、研究対象も培養法や化学的抽出法による易分解性有機態窒素の評価が中心であった。国外においても当初は易分解性有機態窒素の評価が中心であったが、1970年代以降になると西ヨーロッパやアメリカでは残存無機態窒素が無視できなくなり、窒素施肥対応は残存無機態窒素単独または残存無機態窒素と易分解性有機態窒素の両方を評価する方式が採用されるようになった。なお、これらの研究推移および各種評価法の役割と限界についてはすでにStanford²²⁶⁾、Keeney¹¹⁴⁾、Geypens・Vandendriessche⁵³⁾などが報告している。

1) 無機態窒素による施肥対応

土壌の残存無機態窒素は、気象・土壌条件および作付方式と施肥・有機物管理などの相違により大きく変動する。無機態窒素による施肥対応が可能な条件としては、Batey¹⁶⁾やWehrmann・Scharpf²⁵⁶⁾が指摘するように、①土壌中の無機態窒素の変動が大きい、②生育期間の硝酸リ

ーチングが少ないことが必要である。このため、降水量は中庸で、保水性が高く、有効土層の深い土壌が適しており、また、作物については深根性で、根張りの速やかなものが適応するとされている。一方、Hergert⁷³⁾は、アメリカにおいて残存硝酸態窒素を調査した結果、硝酸態窒素による窒素診断は乾燥地帯では成功するが、湿潤地帯では困難と結論づけた。しかし、Bundyら²⁷⁾によると、排水良好な湿潤地帯でも春先における残存無機態窒素の評価は必要としている。

無機態窒素に基づく窒素施肥指針は、西ヨーロッパにおいてはWehrmann・Scharpf²⁵⁶⁾およびNeeteson¹⁶²⁾がテンサイ、バレイショ、Shepherd²⁰⁹⁾が冬コムギについて報告している。また、アメリカにおいては、Gilesら⁵⁶⁾、Winter²⁶⁰⁾、Moragan¹⁵⁶⁾がテンサイ、Magdoffら¹⁴³⁾、Foxら⁴⁷⁾、Bundyら²⁷⁾がトウモロコシについて報告している。北海道内においては、下野²¹¹⁾が秋コムギに対する窒素診断に起生期の残存無機態窒素が有効であることを認めている。

無機態窒素は、通常の場合作付け前に $60\sim 120\text{cm}$ の深さまでの土層を採取して、調査する。同一圃場内での変動が大きい場合には必要サンプリング点数が多くなるため、春先短期間で無機態窒素を分析し、施肥量を設定することは困難となる。したがって、秋または初冬の分析値を基に、気象、土壌などから春先の無機態窒素を予測することが望まれる。このような中で、Whitmoreら²⁵⁹⁾はテンサイの窒素施肥を目的として、またAddiscott・Whitmore³⁾は冬コムギの窒素診断のためにそれぞれイギリスにおいて無機態窒素予測のためのシミュレーションモデルを作成した。なお、無機態窒素の変動予測は、硝酸態窒素のリーチングを含むため、環境負荷軽減の観点からも研究が進められている^{20,138,190)}。

2) 易分解性有機態窒素の評価

土壌タイプや腐植含量が異なる場合および多様な有機物管理が行われている場合には、作期中に無機化する窒素量の変動が大きいので、無機態窒素の評価だけでは不十分であり^{209,244,256)}、易分解性有機態窒素の評価が不可欠となる。有機態窒素の評価は、これまで生物的方法と化学的方法が検討されてきた。生物的方法は、各種の培養条件で無機化した窒素を測定するもので、精度は比較的高いが、時間の制約や労力などのため診断技術として活用するのは困難とされている。このため、実用面では生物的方法に代替できる簡易で迅速な化学的方法が求められ、国内、国外を問わず長期にわたり多くの研究が実施されてきた。

(1) 生物的評価法

好氣的または嫌氣的条件での各種の培養法が検討されており^{23,112,220)}、いずれの場合も培養中に無機化する窒素と作物の窒素吸収量との間には高い相関が認められている。日本では、30℃、4週間の好気培養法(畑地)または湛水培養法(水田)が窒素地力の指標として用いられている¹⁷⁴⁾。また、Keeney・Bremner¹¹²⁾は、畑土壌の窒素評価法として40℃、1週間の湛水培養法を確立したが、この方法は、道内においては水田土壌の窒素診断に活用されている⁸⁵⁾。

一方、短期間の培養は土壌の乾燥や粉碎の程度など前処理の影響を強く受けるため、窒素地力の指標としてはより長期の培養が必要とされる。このような観点から、Stanford・Smith²²⁰⁾は洗浄培養法を確立し、さらに、窒素無機化速度が一次反応式に従うとの仮説に基づいて可分解性窒素量(N_0)を算出し、これを地力窒素の指標とした。しかし、下野・大崎²¹⁰⁾が網走地方の畑土壌で調査した結果では、 N_0 と作物の窒素吸収量との間には有意な相関が認められなかった。

(2) 化学的評価法

易分解性有機態窒素を抽出するため、各種の抽出液とその濃度および抽出温度、時間などが検討されてきた。また、抽出窒素については、ケルダール法による全窒素の測定だけでなく、アルカリ留出窒素のように一部の窒素だけを測定する方法も検討されてきた。このような中で、Stanford²²⁰⁾は、可給態窒素の化学的指標を追究する場合比較的穏和な抽出物に的をのぼるべきであり、また抽出窒素中の一部フラクションは全抽出窒素よりも望ましい指標となる可能性を指摘している。このような観点から、培養窒素または作物の窒素吸収量と比較的高い相関が認められている数種の評価法について述べる。

熱水抽出法は、ホットプレート上で1時間煮沸するLivens¹³⁷⁾、Keeney・Bremner^{112,113)}らの方法、および100℃で2時間抽出する赤塚・坂柳⁹⁾の方法があり、いずれも培養窒素または作物吸収窒素との有意な相関が認められている。この中で、Livensは抽出物の測定は全窒素よりもアルカリ留出窒素(NH_4-N)のほうが高い相関を示すことを報告している。一方、Keeney・Bremnerは熱水処理後に硫酸カリを添加し、硝酸以外の全窒素を測定することを提案している。また、赤塚・坂柳の方法は抽出液の全窒素をケルダール法で測定するもので、これまで道内の畑土壌に適用できる化学的評価法とみなされてきた^{153,203)}。

オートクレーブ法は高压滅菌器を使用し高压・高温下で抽出する方法で、大気圧のもとで加温する熱水抽出法

とは区別される。Stanford・Demar²¹⁹⁾は、0.01M $CaCl_2$ で121℃、16時間抽出し、抽出物中のアルカリ留出窒素を測定した。この方法で得られた窒素量は短期間の培養窒素や長期間の洗浄培養から得られた可分解性窒素量(N_0)と高い相関が認められている^{216,223)}。また、杉原・金野²³²⁾は、汚泥窒素の肥効をみるのに1M KClを用い121℃で抽出する方法を提示した。

塩化カリ抽出法は、2M KClで80℃、20時間抽出するOien・Selmer-Olsen¹⁷⁸⁾の方法、2M KClで100℃、4時間抽出するGianello・Bremner^{54,55)}の方法、1M KClで100℃、1時間抽出するWhitehead²⁵⁸⁾の方法などが報告されている。この中で、Oien・Selmer-OlsenおよびGianello・Bremnerの方法は抽出過程で無機化した窒素(NH_4-N)のみを測定するものであり、一方、Whiteheadの方法は抽出過程で無機化した窒素(NH_4-N)と当初の無機態窒素(NH_4-N+NO_3-N)を同時測定するものである。これらの方法は、ケルダール分解が省略されるため、熱水抽出法と比較するとより簡便な方法とみなされる。このため、国外では可給態窒素の指標としての有用性を確認するため各種の検討が行われている^{29,57,87,95,151,215,231)}。

リン酸緩衝液抽出法は、1/15MのpH 7リン酸緩衝液を用い、室温で2時間振とう抽出し、ケルダール法で全窒素を測定する樋口^{79,80)}の方法、また簡便法として同じ緩衝液で1時間振とうし、ろ液の吸光度(420nm)を測定する小川ら¹⁷⁵⁾の方法などが報告されている。樋口⁸⁰⁾によると、有機物連用土壌の潜在的窒素無機化能はリン酸緩衝液による抽出有機態窒素または無機態窒素を含む抽出窒素によりほぼ評価できるとされている。本法は畑土壌、水田土壌に適用できるとされており¹⁷⁶⁾、培養窒素との関係でみると畑土壌では黒ボク土においてよく対応しており⁷⁹⁾、また、水田土壌では多湿黒ボク土を除く各土壌と高い相関が認められている²⁷⁰⁾。

化学的抽出法については、この他にも0.01M $NaHCO_3$ で抽出し、抽出物の全窒素を測定するMacLean¹⁴⁰⁾の方法、同じく0.01M $NaHCO_3$ で抽出し、抽出液の吸光度(260nm)を測定するFox・Piekielek⁴⁶⁾の方法、水酸化バリウムで抽出し、ろ液のグルコース当量を測定するJenkinson⁹⁹⁾の方法、酸性過マンガン酸カリで抽出し NH_4-N を測定するStanford・Smith²²⁵⁾の方法などが報告されているが、広範な土壌での有用性については明らかにされていない。

3) 窒素無機化予測

土壌窒素の無機化は、地温、水分などの影響を強く受けるため、圃場における窒素診断では、易分解性窒素量の多少だけでは不十分なことが多い。このため、地温、

水分等のデータを活用して無機化量の経時的変化を予測する各種の検討が国内および国外で行われている。

Stanford・Smith²²⁰⁾ は、前述のように土壌窒素の無機化過程が一次反応式に適合することを見だし、単純型モデルに基づいて可分解性窒素量 (N_0) と無機化速度定数 (k) を求める方法を確立した。これら2つのパラメーターの変動要因については、土壌タイプやサンプリング時期および耕起、作付け、施肥、有機物管理などの影響が明らかにされている^{19,43,49,60,88,220)}。一方、無機化モデルの検討も並行して行われ、湿潤土を供試した場合にはゼロ次反応式に適合することが報告されている^{2,17,227)}。一次反応式の中では、単純型モデルよりも2コンポーネントモデル(単純並行型)に適合する事例が認められており^{19,38,136)}、また、培養条件や土壌の相違により一次反応式よりもparabolicモデルに適合する事例も報告されている^{25,144)}。さらに、これらの無機化モデルとArrhenius式等を用いて、地温または地温・水分から窒素無機化量を予測する方法が検討されている^{42,139,217,221,222)}。

金野・杉原¹²⁴⁾ は、生物活性と温度との関係においてArrhenius式を適用し、この中で Q_{10} を温度係数として用いているのは不十分であり、見かけの活性化エネルギー(E_a)が特性値として最適であることを認めた。このような観点から、杉原ら²³³⁾ は、温度別窒素無機化曲線を一次反応式およびArrhenius式にあてはめ、可分解性窒素量(N_0)、25℃における無機化速度定数(k)、みかけの活性化エネルギー(E_a)の3つのパラメーターを無機化特性値とした。また、一次反応式に基づく無機化モデルについては、単純型、単純並行型、有機化・無機化並行型のモデルを設定し、かつ、赤池⁴⁾の情報量基準(AIC法)による最適モデルの判定法を確立した。このような方法を用いて、水田土壌においては、無機化特性値の検討および地温データに基づく圃場での窒素無機化予測などについて各種の検討が進められている^{11,12,52,116,245,268,269)}。一方、畑土壌については、斉藤^{192,193)}、Nira・Nishimune¹⁶⁵⁾ が報告しているが、今後さらに各種土壌での検討が必要とされている。

3. テンサイに対する最適窒素施肥量の設定

一般に、作物に対する最適窒素施肥量は次の式から求められる。最適窒素施肥量 = (最適窒素吸収量 - 土壌由来の窒素吸収量) / 施肥窒素利用率 (%) × 100。したがって、最適窒素施肥量の予測に際しては、土壌窒素の評価だけでなく、最適窒素吸収量や施肥窒素利用率の的確な把握も窒素診断の精度を高めるうえで重要な要素となる。

1) 最適窒素吸収量

テンサイの糖分収量(糖量)は窒素吸収量と密接な関係が認められている。西宗¹⁶⁹⁾は、窒素吸収量が150kg ha⁻¹までは糖量は直線的に増加するが、それ以上になると頭打ちの傾向となり、さらに250kg ha⁻¹を超えると低下する可能性を指摘している。最大糖量が得られるときの窒素吸収量は、イギリスでは200~220kg ha⁻¹程度¹⁴⁾、ドイツでは平均225kg ha⁻¹⁵¹⁾と報告されている。また、道内では、早坂・井村⁷⁰⁾は9月上旬の窒素吸収量で190~240kg ha⁻¹と報告している。これらを踏まえて、増田¹⁴⁷⁾は、地域性や年次、場所、肥沃度、施肥量等の相違にかかわらず、最大の糖量を得るための最小の窒素吸収量は200~220kg ha⁻¹程度と結論づけている。このように、最適窒素吸収量の変動が比較的小さいことは、土壌窒素診断の目標値設定が容易となることを示すものである。

2) 施肥窒素利用率

道内のテンサイはほとんどが紙筒移植栽培であり、かつ施肥法は作条直下施肥のため窒素利用率は一般に高い¹⁷²⁾。しかし、地域や年次による窒素利用率の変動は比較的大きいようである。井村・早坂⁹¹⁾は、日甜糖区内で差引き法により調査した結果をとりまとめ、平均値で芽室地区93%、美幌地区84%、士別地区63%と報告している。また、西宗¹⁶⁹⁾は、十勝地方の主要土壌で3年間¹⁵N標識法で調査した結果、窒素利用率は63~86%の範囲であり、気象条件による変動が比較的大きいことを認めている。

3) 土壌窒素評価と最適窒素施肥量

アメリカでは、テキサスやコロラドなどの乾燥地帯において下層土に多量の硝酸態窒素が集積し、テンサイの窒素吸収量と土層中の硝酸態窒素量とは密接な関係にあることが明らかにされている。Gilesら⁵⁶⁾は、0~60cm土層中の硝酸態窒素が130kg ha⁻¹を超えると施肥効果は判然としなくなることを認め、施肥対応に必要な土層深は最低でも60cmは必要としている。また、Winter²⁰⁰⁾の報告では120cm、Reuss・Rao¹⁸⁸⁾やMoraghan¹⁵⁶⁾の報告では150cmまでの土層中の硝酸態窒素評価を必要としている。一方、気象や土壌の異なるアイダホにおいては、残存無機態窒素と作期中に無機化する窒素の両方の評価が必要とされている。Carterら^{30,31)}は、0~40cm土層中における播種前の硝酸態窒素(N_i)と30℃、3週間培養中に無機化する窒素(N_u)を可給態窒素とし、次の式からテンサイの窒素施肥量(N_f)を設定した。 $N_f = [Y(5.5 \pm 0.5) - (1.2N_i + 0.95N_u)] / 0.65$ すなわち、目標根重(Y)と根重1Mg当たりの窒素吸収量(5.5 ± 0.5 kg)

の積を目標窒素吸収量とし、土壌からの窒素供給量は $1.2N_i + 0.95N_n$ 、施肥窒素利用率は65%として算出した。また、Stanfordら²²⁴⁾は、生育期間の窒素無機化量(N_n)を0~45cm土層中の可分解性窒素量(N_o)と月平均の温度、土壌水分から推定し、これと根圏の硝酸態窒素(N_i)の含量から次の式で可給態窒素量(N_t)を算出した。 $N_t = 0.73(N_i + N_n) + 5.3$

ヨーロッパでは、越冬後における土層中の無機態窒素量(N_{min})から最適施肥量(N_{op})を設定する方式が採用されている。オランダでは、Neeteson・Smilde¹⁶¹⁾が次の式を設定した。 $N_{op} = 220 - 1.7N_{min}$ このときの無機態窒素は0~60cm土層中の含量とし、緑肥すき込み地の場合には20~30kg ha⁻¹減肥するとされている。ドイツでは、Wehrmann・Scharpf²⁵⁶⁾が次の式を設定した。 $N_{op} = 200 - N_{min}$ このときの無機態窒素は0~90cm土層中の含量とし、有機物の施用により窒素肥沃度の高まった土壌では40kg ha⁻¹減肥するとされている。イギリスでは春先の無機態窒素測定は困難とされているため、秋に無機態窒素を測定し、地温、降水量、蒸発量などの気象データと土壌の水分特性に関するデータを用いて春先の無機態窒素量を予測する方式が検討されている²⁵⁹⁾。一方、南ドイツやオーストリアなどでは、Nemethら^{163,164)}によって確

立された電気限外ろ過法(EUF法)が導入されている。この方法は、電気透析と限外ろ過の組み合わせにより無機態窒素と低分子の有機態窒素を抽出するもので、いわば無機態窒素と易分解性有機態窒素の同時評価を行うものである。土壌サンプルは、6~7月に作土(0~30cm)から採取することが勧められている。EUF法に基づく測定値は、翌年のテンサイ収量および品質との間には有意な相関が認められることから、各地の製糖工場で採用されている。しかし、夏期間の作土中の無機態窒素量は翌春の土層中の無機態窒素量と有意な相関がないため、土壌窒素評価法としては否定的な見解も少なくない⁵³⁾。

道内では、易分解性有機態窒素を評価する熱水抽出法がテンサイ畑の土壌窒素診断に有効とされている^{90,169,235)}。一方、秦泉寺ら²¹²⁾は、熱水抽出窒素よりも土層0~40cmにおける培養硝酸態窒素が最適窒素施肥量と相関が高いことを報告している。この方法は、当初の無機態窒素と培養中(28℃、4週間)に無機化する窒素を同時に評価したものである。

これらの報告は、テンサイは深根性作物であるため土層中の無機態窒素評価が必要であり、同時に、生育期間が長いいため作期中に無機化する窒素評価も必要であることを示すものである。

第 2 章 緑肥および収穫残渣物の窒素評価

北海道の畑作専業地帯では、機械化と規模拡大の進展に伴って収穫残渣物の多くは堆肥化せず、そのまま新鮮有機物としてすき込まれている。しかし、地力維持に必要とされる有機物は収穫残渣物だけでは不十分であり、これに加えて堆肥10Mg ha⁻¹程度の連用が必要とされている⁵²⁾。このため、近年は堆肥不足を補う有機物資材として緑肥作物の導入が積極的に進められている。

緑肥作物は種類が多く、また栽培条件や生育ステージによって化学成分やすき込み量が異なるため、後作物や土壌に及ぼす影響は多様である。網走管内では、バレイショ・秋播コムギ・テンサイの輪作体系の中で、緑肥作物のほとんどが秋播コムギの間作、後作に導入されている¹¹⁸⁾。緑肥作物の種類をみると、イネ科（エンバク）が最も多く、次いでアブラナ科（レパナ、現在はシロカラシに移行）、マメ科（アカクロバ）の順で、イネ科、アブラナ科は後作緑肥、マメ科は間作緑肥として導入されている。

緑肥は、一般にC/N比が低く、分解は速やかであるとされている。しかし、それらの化学成分は作物の種類や栽培条件によって大きく変動するため、窒素の肥効は画一的ではない。また、緑肥の多くは麦稈とともにすき込まれるため、麦稈と緑肥との組み合わせの中での窒素評価も必要となる。一方、緑肥すき込み地の後作物はテンサイが大部分を占めている。テンサイの収量・品質は窒素吸収量に左右され、窒素過剰の場合には糖分など品質面の低下が顕著となるため、緑肥窒素の評価に基づいた施肥対応が重要となる。

このような観点から、本章では、C/N比や有機成分組成の異なる各種の緑肥作物と主要な収穫残渣である麦稈を供試して、①土壌中での分解特性、②窒素無機化率の変動要因、③後作物による緑肥窒素の利用率、④緑肥

すき込みが後作テンサイの最適窒素施肥量に及ぼす影響などについて検討した。

第 1 節 麦稈および緑肥の分解特性

1. はじめに

北海道の畑輪作体系の中で、麦稈および緑肥は重要な有機物資源であり、地力の維持、増進の観点からそれらの有効利用が求められている。しかし、麦稈はC/N比が高いため、直接畑地にすき込むと後作物に対して窒素飢餓が生じる危険が大きい。一方、緑肥は土壌中での分解過程において、窒素を中心とした養分供給、団粒の増加と安定化、微生物相の多様化と活性の増大など多様な効果を示し⁸⁾、また、麦稈との併用の際には麦稈の分解を促進し、窒素飢餓の発現を抑制するとされている^{24,201)}。

そこで、本節では、有機物資材としての麦稈および緑肥の有効利用を進める観点から、秋すき込み後の分解過程を圃場埋設条件で調査し、炭素、窒素の分解および化学成分の変化などを検討した。さらに、麦稈と緑肥の併用が麦稈の分解と窒素の有機化・無機化に及ぼす影響を調査し、麦稈と併用する緑肥の望ましいC/N比とすき込み量について検討した。

2. 実験方法

1) 麦稈および緑肥の圃場での分解過程

(1) 供試材料

麦稈は秋播コムギの収穫残渣を用い、緑肥はエンバク（茎葉）、レパナ（茎葉）、アカクロバ（茎葉、根）を供試した。エンバク、レパナは後作緑肥として8月上旬および下旬、アカクロバは間作緑肥として5月上旬にそれぞれ播種し、10月下旬に収穫した。これらの化学成分は表2-1に示すとおりである。

表2-1 供試緑肥および麦稈の化学成分

化学成分	エンバク			レパナ			アカクロバ		麦 稈	
	A*	B**	C*	A*	B**	C**	茎葉	根	A	B
T-C	430	440	430	421	420	406	455	453	435	418
T-N	16.0	27.1	16.2	17.6	33.9	38.6	35.0	25.0	7.8	6.5
C/N比	26.9	16.2	26.5	23.9	12.4	10.5	13.0	18.1	55.8	64.3
糖・デンプン	112	170	119	120	129	96	69	149	34	14
ヘミセルロース	167	119	147	98	86	53	115	209	232	192
セルロース	236	139	158	200	88	75	177	143	384	295
リグニン	77	63	62	59	53	55	99	43	122	127
フェノール	13	16	12	13	21	19	14	9	11	10

注) 成分含量: g kg⁻¹ DW、*播種期: 8月上旬、**同: 8月下旬

(2) 圃場における分解過程の調査

本実験では、有機物の乾物重や炭素、窒素の分解推移を調査するのにガラス繊維ろ紙法、各種化学成分の変化を調査するのにリターバック法を用いた。

ガラス繊維ろ紙法：前田・鬼鞍¹⁴⁾の方法に準じて、2mmのふるいを通した生土を供試し、乾土30g相当量の土壤に風乾し、2mm以下に粉碎した試料を5g（緑肥・麦稈混合物の場合はそれぞれ2.5g）ずつ混和した。これをガラス繊維ろ紙筒に入れ、北見農試圃場の地表7～10cmの深さに埋設した。試料を添加しない土壤についても同様に埋設し、対照区とした。土壤は、①淡色黒ボク土（南網走）、②多腐植質黒ボク土（訓子府）、③灰色台地土（常呂）の3種類を供試し、埋設周辺の土壤はろ紙内と同じものに入れ替えた。土性は、①SL、②L、③CL、pHは、①6.1、②5.2、③5.9、4週間培養の可給態N (mg kg⁻¹) は、①33、②60、③65、可給態P₂O₅ (mg kg⁻¹) は、①70、②128、③202であった。1983年11月8日に設置し、翌春から経時的に2反復で採取し、内容物の乾物重、全炭素、全窒素を測定した。処理区と対照区との差から、添加量に対する残存率(%)を求め、[100-残存率]を分解率とした。

リターバック法：北見農試圃場に無底ポットを設置し、5mmのふるいを通した淡色黒ボク土を充填した。麦稈は10cmに切断した風乾試料、緑肥は5～10cmに切断した生試料を供試し、それぞれサラン網に包んで土層5cm、25cmの深さに埋設した。1985年10月31日に設置し、翌年春から経時的に2反復で採取し、0.5mmのふるいに残存したものについて乾物重、化学成分を調査した。

2) 麦稈の分解に及ぼす各種緑肥の影響

(1) 供試材料

麦稈は春播コムギの収穫残渣(C/N比：55.8、炭水化合物：650mg kg⁻¹、リグニン：122mg kg⁻¹)、緑肥はガラス繊維ろ紙法の場合と同じアカクロバ（茎葉）、エンバク、レバナを供試した。

(2) 炭素、窒素の無機化率

風乾し、粉碎した麦稈、緑肥および麦稈・緑肥混合物(1:1)を多腐植質黒ボク土に乾物重比で2%相当量添加し、土壤水分を最大容水量の60%に調整して28℃の温度条件で培養した。生成した炭酸ガスおよび無機態窒素を経時的に測定し、以下の方法で炭素および窒素無機化率を算出した。

炭素無機化率(%) = (資材添加区のCO₂態炭素 - 対照区のCO₂態炭素) / 添加資材中の全炭素 × 100

窒素無機化率(%) = (資材添加区の無機態窒素 - 対照区の無機態窒素) / 添加資材中の全窒素 × 100

3) 化学成分の分析法

全炭素はCNコーダ法、全窒素はケルダール法で測定した。有機成分については、まずオートクレーブを用いて熱水抽出(105℃、1時間)を行った。残渣は95%エタノールで洗浄し、風乾後0.7N塩酸を加えて2.5時間煮沸した。風乾した残渣に72%硫酸を加え、20℃で4時間放置後蒸留水を加えて0.78N硫酸とし、4時間煮沸した。熱水可溶物、0.7N塩酸可溶物および72%硫酸可溶物中の還元糖はSomogyi法により定量し、それぞれ糖+デンプン、ヘミセルロース、セルロースとした。また、これらの合計量から井ノ子⁹³⁾の方法にしたがって還元糖割合を算出した。リグニンは72%硫酸不溶物から粗灰分と窒素化合物(全窒素×6.25)を差し引いて求めた。フェノールはSivapalanら²¹³⁾の方法に準じて熱水抽出中の全フェノールをFolin-Denis法で測定した。

3. 結 果

1) 麦稈および緑肥の圃場での分解過程

(1) 乾物重および炭素、窒素残存率の推移

麦稈、緑肥の乾物残存率の推移を図2-1に示した。ガラス繊維ろ紙法では3種類の土壤の平均値でみると、翌年春(埋設後6カ月目)は麦稈で72%、緑肥で32～51%、翌年秋(同1年目)は麦稈で41%、緑肥で20～32%の値を示した。また、リターバック法では、6ヶ月間で麦稈76%、緑肥26～50%、1年間で麦稈43%、緑肥4～18%の値を示した。このことから、緑肥の場合は秋から翌春までの間に大半が分解され、この期間の分解率は麦稈の

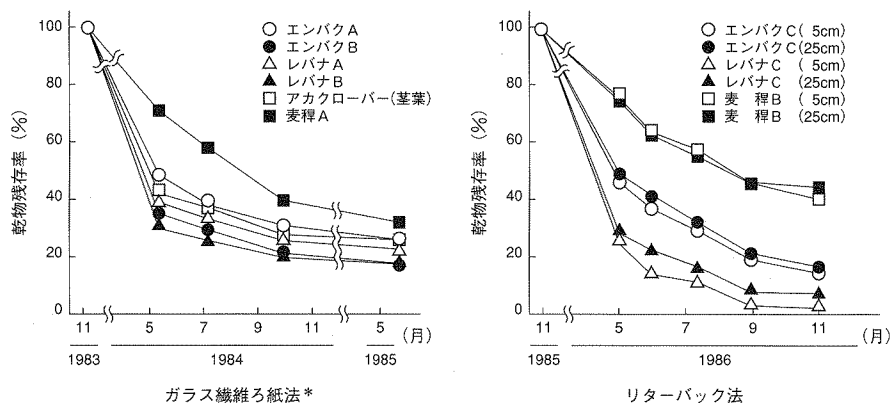


図2-1 麦稈および緑肥の乾物残存率の推移
* 3種類の土壤の平均値

表 2-2 緑肥および麦稈の炭素・窒素残存率の経時的变化（ガラス繊維ろ紙法）

項 目	調査時期 (年・月・日)	エンバク		レバナ		アカクローバ		麦 稈	アカクローバ +麦稈A
		A	B	A	B	茎葉	根		
炭素残存率 (%)	1984・5・11	47	35	39	32	42	36	61	48
	7・5	32	25	30	22	35	27	49	39
	9・25	26	21	24	18	29	23	35	37
	1985・5・24	23	19	22	17	26	19	31	35
窒素残存率 (%)	1984・5・11	81	62	78	48	64	66	115	79
	7・5	77	50	65	42	54	50	130	77
	9・25	59	35	49	28	42	35	121	69
	1985・5・24	56	33	47	27	37	31	112	65

注) 3種類の土壌の平均値

2～3倍も大きいことを認めた。なお、両測定法の残存率を比較すると、緑肥の場合6ヶ月以上経過したものはリターバック法がガラス繊維ろ紙法よりも低い値を示した。その要因は、分解が進むと試料の崩壊が顕著となり、回収率が低下するためとみなされた。

そこで、ガラス繊維ろ紙法を用いて測定した炭素、窒素の残存率の推移を表2-2に示した。炭素残存率は、翌年春で麦稈61%、緑肥29～47%、翌年秋で麦稈35%、緑肥18～26%、翌々年春で麦稈31%、緑肥17～26%であった。これらの値は、乾物残存率と比較すると緑肥で2～6%、麦稈で6～12%低かった。一方、窒素残存率は、翌年春で麦稈115%、緑肥48～81%、翌年秋で麦稈121%、緑肥28～59%、翌々年春で麦稈112%、緑肥27～56%であった。これらの値はいずれも乾物残存率より高く、特に麦稈の場合は長期にわたり100%を上まわる残存率を示した。なお、これらの残存率を土壌間で比較すると、

緑肥の炭素、窒素残存率は、淡色黒ボク土を基準にした場合多腐植質黒ボク土で10%程度、灰色台地土で15～20%程度低い値を示した。すなわち、分解速度は、灰色台地土が最も大きく、次いで多腐植質黒ボク土、淡色黒ボク土の順であった。同様な傾向は麦稈の窒素残存率でも認めた。

次に、埋設後6カ月間の窒素の分解が有機態窒素の無機化を伴ったものであるか否かを確認するため、ガラス繊維ろ紙内土壌の無機態窒素の集積状況を調査した（表2-3）。その結果、C/N比27以上の緑肥および麦稈については無処理区との差がほとんど認められず、C/N比24以下の緑肥の場合のみ増加する傾向を示した。このことから、秋すき込みの場合、翌春の比較的早い時期から窒素無機化が進むのは、C/N比25以下の緑肥に限定されるものと推察された。

表 2-3 ガラス繊維ろ紙内土壌の無機態窒素

項 目	無施用区	エンバク		レバナ		アカクローバ		麦 稈
		A	B	A	B	茎葉	根	
NH ₄ -N	7	27	512	85	539	506	501	14
NO ₃ -N	10	11	9	22	24	21	19	10
合 計	17	38	521	107	563	527	520	24
N無機化率 (%)	-	0.9	12.2	3.4	11.3	9.1	11.5	0.8

注) 無機態窒素：mg kg⁻¹DW、多腐植質黒ボク土、1984年5月11日調査

N無機化率：（有機物施用区の無機態窒素－無施用区の無機態窒素）／有機物のN含有量×100

表2-4 緑肥および麦稈の分解過程における化学成分変化（リターバック法）

供試有機物	調査時期 (年・月・日)	T-C	T-N	C/N比	糖・デ ンプン	ヘミセル ロース	セルロ ース	リグニン	フェノ ール	還元糖 割合
エンバク C	1985・10・31*	430	16.2	26.5	119	147	158	62	12	44
	1986・5・1	434	15.8	27.5	31	193	238	160	12	47
	5・30	427	16.6	25.7	25	176	204	168	10	42
	7・10	419	21.1	19.9	22	175	134	194	10	35
	9・1	409	20.5	20.0	17	150	139	200	8	33
	11・1	381	19.6	19.4	13	118	105	217	9	28
レバナ C	1985・10・31*	406	38.6	10.5	96	53	75	55	19	25
	1986・5・1	235	21.7	10.8	16	42	64	70	2	24
	5・30	234	21.6	10.8	17	52	51	81	2	23
	7・10	228	21.4	10.7	14	56	58	100	2	25
	9・1	251	21.3	11.8	13	68	67	111	2	26
	11・1	244	20.3	12.0	5	64	53	100	3	22
麦 稈 B	1985・10・31*	418	6.5	64.3	14	192	295	127	10	53
	1986・5・1	417	5.6	74.5	11	190	293	166	6	52
	5・30	420	6.8	61.8	15	190	268	193	5	49
	7・10	414	8.8	47.0	12	175	219	214	5	44
	9・1	415	9.0	46.1	11	150	196	206	5	39
	11・1	390	9.5	41.1	12	118	160	222	6	35

注) 成分含量: g kg⁻¹ DW、*埋設開始時

(2) 分解に伴う有機成分の変化

リターバック法を用いて調査した麦稈、緑肥の有機成分の経時的変化を表2-4に示した。C/N比をみると、埋設時のC/N比が64.3の麦稈は、6ヶ月目以降低下傾向を示し、1年後には41まで低下した。同26.5のエンバクは6ヶ月目から8ヶ月目にかけて低下し、8ヶ月目以降は20程度で推移した。一方、同10.5のレバナには大きな変動が認められなかった。糖・デンプン含量は、埋設時に96~119mg kg⁻¹の緑肥の場合最初の6ヶ月間で激減し、20~30mg kg⁻¹以下となった。ヘミセルロース、セルロース含量は、麦稈の場合6ヶ月目以降減少し、1年後には当初の192、295mg kg⁻¹が134、160mg kg⁻¹まで低下した。また、エンバクの場合は、埋設当初増加傾向がみられたが、6ヶ月目以降は減少し、1年後には当初の147、158mg kg⁻¹が118、105mg kg⁻¹まで低下した。リグニン含量は、麦稈、緑肥とも埋設後著しく高まり、1年後には当初の1.7~3.5倍となった。フェノール含量は埋設後低下し、6ヶ月目以降はいずれも10mg kg⁻¹以下で推移した。

このような有機成分の推移を反映して、還元糖割合は、麦稈の場合当初の53%から1年後には35%まで低下した。また、エンバクの場合は当初の44%から8ヶ月目に35%、1年後に28%まで低下した。一方、当初から25%と低か

ったレバナの場合は、ほとんど変動が認められなかった。

次に、麦稈、エンバクに含まれる有機成分の残存率の経時的変化を図2-2に示した。6ヶ月目の残存率は糖・デンプンで12%（エンバク）、ヘミセルロース65~75%、セルロース72~73%、リグニン100~110%であり、また、1年後の残存率はヘミセルロース15~31%、セルロース11~23%、リグニン56~78%であった。このこと

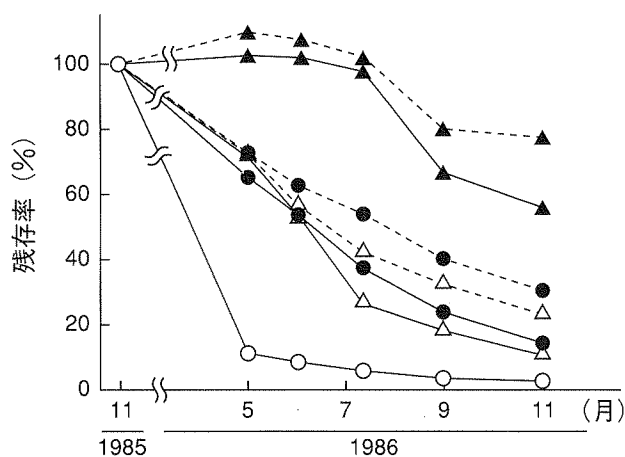


図2-2 各種有機成分の残存率の推移
注) 実線: エンバクC 破線: 麦稈B
○, 糖・デンプン; △, セルロース
●, ヘミセルロース; ▲, リグニン

から、有機成分の分解は糖・デンプンが最も急激であり、リグニンが最も緩慢であった。なお、各成分の残存率はいずれも麦稈がエンバクよりも高かった。

2) 麦稈の分解に及ぼす各種緑肥の影響

麦稈、緑肥および麦稈・緑肥混合物の炭素無機化率を図2-3に示した。4週間培養後の炭素無機化率は、麦

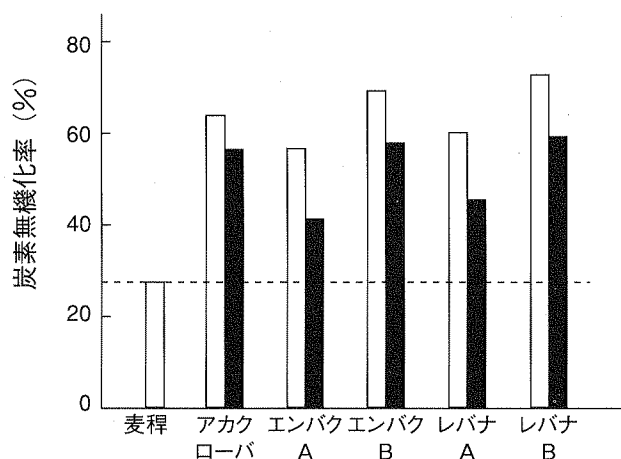


図2-3 麦稈、緑肥および麦稈・緑肥混合物の炭素無機化率（培養4週間目）
□, 麦稈・緑肥単独；■, 麦稈・緑肥混合物

稈28%、緑肥57~74%であった。一方、麦稈・緑肥混合物の炭素無機化率は42~59%で、いずれも麦稈より高く、緑肥より低かったが、これらとの差は緑肥の種類により相違した。すなわち、アカクローバ、エンバクB、レバナBのようにC/N比の低い緑肥の場合は、麦稈よりも緑肥に近い値を示した。

そこで、麦稈分解に及ぼす各種緑肥の影響を明らかにするため、緑肥混合条件での麦稈の炭素無機化率を算出し、これと麦稈単独区の炭素無機化率とを比較した（表2-5）。その結果、緑肥混合区の炭素無機化率は、ア

表2-5 麦稈の炭素無機化率（28℃、4週間）

処理内容	炭素無機化率(%)	同左比
麦稈単独	28.0	100
アカクローバ混合	50.5	180
エンバクA混合	26.1	93
エンバクB混合	46.3	165
レバナA混合	31.0	111
レバナB混合	45.8	163

注) 混合条件での麦稈の炭素無機化率 = (麦稈・緑肥混合区のC O₂ 炭素 - 緑肥単独区のC O₂ 炭素) / 麦稈の全炭素 × 100

カクローバで80%、エンバクBで65%、レバナBで63%の増加が認められた。その一方で、C/N比の高いエンバクA、レバナAの場合はほとんど増加がみられず、Broadbent²⁴⁾が指摘したような緑肥のプライミング効果は判然としなかった。

次に、麦稈、緑肥および麦稈・緑肥混合物の窒素無機化率の推移を図2-4に示した。緑肥単独の場合、C/N比の低いアカクローバ、エンバクB、レバナBは培養

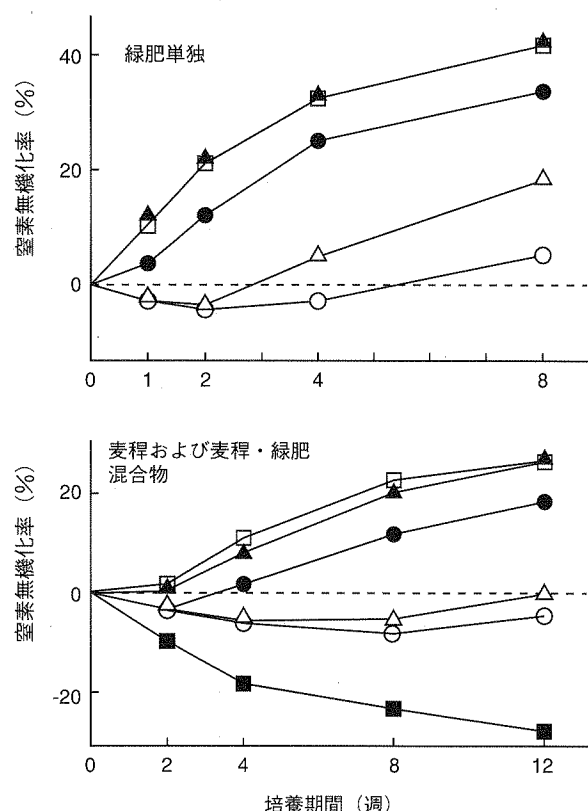


図2-4 麦稈、緑肥および麦稈・緑肥混合物の窒素無機化率の経時的変化
○, エンバクA；●, エンバクB；△, レバナA；▲, レバナB；□, アカクローバ；■, 麦稈

1週間目から無機化を示したが、C/N比の高いエンバクA、レバナAは最初の2~4週間有機化を示し、その後無機化に転じた。一方、麦稈・緑肥混合物の場合はいずれも麦稈単独より高い無機化率であったが、緑肥単独と比較すると有機化から無機化に転じるまでの期間が長く要し、とくにエンバクA、レバナAの場合には12週間経過しても無機化は認められなかった。このことから、麦稈と併用した際に期待される緑肥の窒素飢餓防止効果は、C/N比の低いものに限定されることを認めた。

4. 考 察

1) 麦稈、緑肥の圃場での分解推移

麦稈の分解推移をリターバック法でみると、秋埋設から翌春までの6ヶ月間で24%、1年間で57%の分解率を示した。同じ方法で調査した事例と比較すると、英国⁶⁵⁾、デンマーク^{33,34)}の50%および75~80%、米国アイダホ²¹⁴⁾の35~40および65~80%より低く、スウェーデン²⁵⁷⁾の10%以下および50%より高かった。このような分解率の差は気象や土壌条件などの相違と考えられ、とりわけ最初の6ヶ月間は土壌凍結の影響が大きかったものと思われる。本試験地では、12月上旬から3月下旬まで土壌凍結が認められることから、分解が実質的に進んだのは4月以降と推測された。しかし、緑肥については、翌春までの6ヶ月間で50~70%も分解され、低温下でも分解が著しく速く進むことを認めた。

一方、炭素、窒素の分解程度を土壌間で比較すると、おおむね灰色台地土>多腐植質黒ボク土>淡色黒ボク土の順であった。これは、pHと窒素、リン酸肥沃度の影響が大きかったものと考えられた。すなわち、灰色台地土、多腐植質黒ボク土が淡色黒ボク土よりも優ったのは窒素、リン酸肥沃度が高かったためであり、また、灰色台地土が多腐植質黒ボク土よりも優ったのはpHとリン酸肥沃度が高かったためと推察される。なお、pHと窒素肥沃度の影響については速水⁶⁸⁾の報告と一致するものであった。

2) 炭素、窒素の分解と有機成分組成との関係

麦稈、緑肥に含まれる有機成分の分解速度は糖・デンプン>ヘミセルロース、セルロース>リグニンの順である。したがって、糖・デンプン含量が多く、リグニン含量の少ない緑肥は当然にも分解が速い。植物残渣の分解の難易を示す指標として、高橋・河合²³⁶⁾は水溶性炭素を、前田・志賀¹⁴²⁾はリグニン含量をあげている。また、Hermanら⁷²⁾は $[(C/N比) \cdot (リグニン\%)] / (炭水化物\%)^{1/2}$ を分解指標として提示した。そこで、埋設時の化学成分と埋設後6ヶ月目の炭素残存率との関係を見ると、炭素残存率はC/N比と有意な正の相関を示し、また、Hermanらの分解指標とはC/N比単独の場合よりもさらに高い正の相関を示した(図2-5)。このことは、C/N比の低いものほど、またC/N比が同程度の場合には炭水化物含有率が高く、リグニン含有率の低いものほど分解は速やかに進むことを示すものである。

一方、埋設後6ヶ月目の窒素残存率の場合はC/N比と高い正の相関を示した(図2-6)。すなわち、窒素の分解はC/N比の小さいものほど大きく、また、窒素の分解率がマイナスからプラスに転換するときのC/N

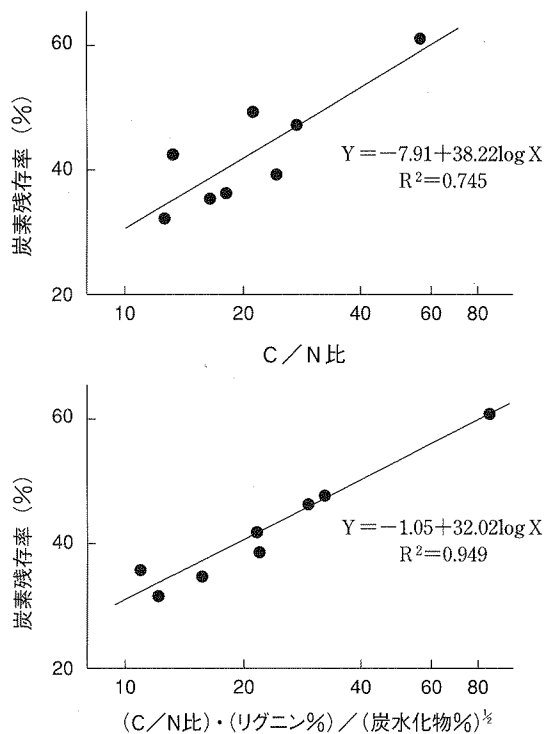


図2-5 C/N比およびHermanらの分解指標と炭素残存率との関係

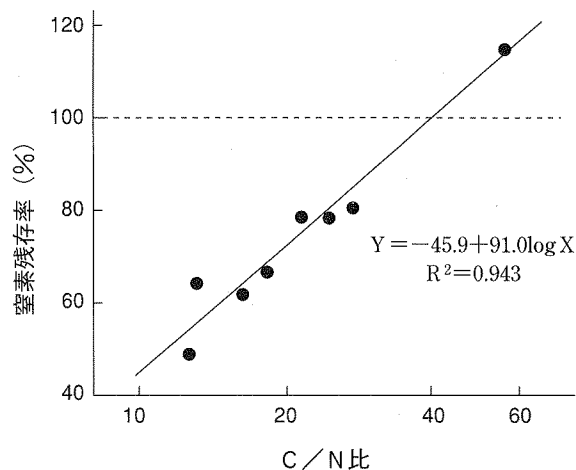


図2-6 C/N比と炭素残存率との関係

比は40程度を示した。このような窒素分解の限界値となるC/N比は、速水⁶⁸⁾の報告では30~35、渡辺ら²⁵⁴⁾の報告では36~44であり、さらに水田土壌で調査した前田・志賀¹⁴²⁾の報告では30~60であった。本試験の結果は、これらの値とおおむね一致するものである。

しかし、窒素の無機化が認められるC/N比は25以下であり(表2-3)、これよりもC/N比が大きい場合には見かけ上窒素の分解は進んでも無機化は伴わないものと判断された。一般に、植物残渣中の窒素は水溶性画分が高く²³⁶⁾、また水溶性の有機態窒素は降水により土壌中で溶脱されやすい²³⁷⁾。本試験では、試料の埋設位

置が7～10cmと地表面に比較的近かったため、窒素の無機化が進む前に融雪水などの溶脱を受け、それが残存率低下の要因になったものと推察される。

3) 有機成分の分解と腐熟度

麦稈や緑肥などの新鮮有機物は、その分解過程で作物に各種の生育障害を及ぼす懸念がある。したがって、分解過程における有機成分の消長とそれに基づいた腐熟度を考慮する必要がある。緑肥の場合には、分解の初期に糖・デンプンをえさとする *Pythium* 属菌が急激に増加し、発芽、初期生育に対する障害が懸念されている²⁰⁾。しかし、翌春までに糖・デンプンの大部分が分解されるため、問題はない。また、各種のフェノール性酸が後作物に悪影響を及ぼす可能性も指摘されている⁵⁹⁾が、リターバック法による調査結果では、翌春までの間に溶脱または分解により大半が消失することを認めた。したがって、秋すき込みの場合には生育障害の危険はほとんどないものと推察された。

一方、麦稈のようにC/N比の大きい植物残渣は、後作物に窒素飢餓を引き起こす危険が大きい。リターバック法の調査結果では、埋設後1年経過した麦稈のC/N比は41、還元糖割合は35%であった。この値は、稲わらや都市ごみのような繊維質資材を対象に設定された腐熟度の基準値（C/N比20以下、還元糖割合35%以下）⁹³⁾を満たすものではない。すなわち、麦稈を単独ですき込んだ場合には、1年後においても窒素飢餓を引き起こす危険が解消されていないことを示している。このような生育障害を回避するためには、窒素源として緑肥などを添加して麦稈自体の分解を促進させることが望まれる。

4) 麦稈の分解に及ぼす緑肥の影響

麦稈と緑肥を1:1混合した条件で、麦稈の分解促進に効果を示した緑肥はC/N比の低いものであった。しかし、渡辺ら²⁵⁴⁾の報告では、緑肥の混合比率を1:4に引き下げると、C/N比12のクローバでも麦稈の分解促進効果は判然としなくなることを認めている。これらは、麦稈分解に及ぼす緑肥の効果が緑肥の種類とそのすき込み量によって相違することを示すものである。一方、緑肥が麦稈の分解を促進する要因について、沢田ら²⁰¹⁾は窒素の補給効果と易分解性の基質が加わったことによる微生物群の増殖効果によるものと指摘している。このことは、緑肥のC/N比および有機成分組成が麦稈の分解と密接に関係することを示唆している。

そこで、麦稈、緑肥および麦稈・緑肥混合物の化学成分と炭素無機化率との関係を見ると、炭素無機化率はC/N比およびHermanらの分解指標と密接な関係が認められた（図2-7）。この場合の相関係数は、ガラス繊

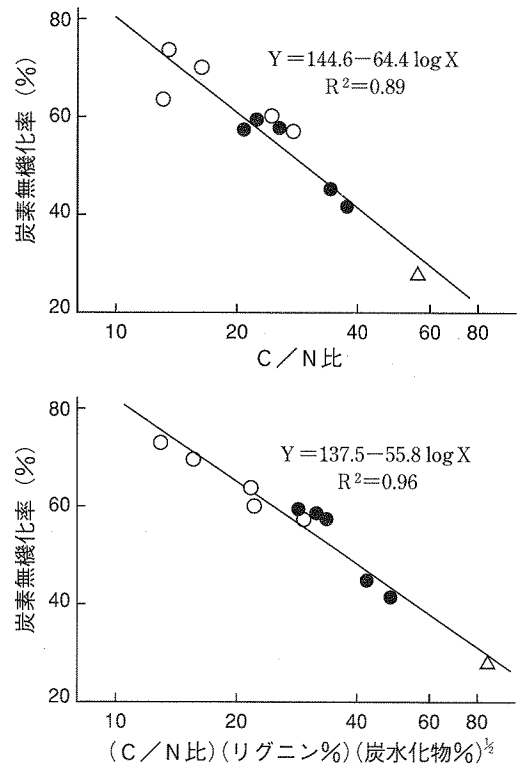


図2-7 C/N比およびHermanらの分解指標と炭素無機化率との関係

△, 麦稈; ○, 緑肥; ●, 麦稈・緑肥混合物

維ろ紙法での炭素残存率（図2-5）の場合と同様に、C/N比よりもHermanらの分解指標のほうが高い傾向であった。このことから、麦稈分解に及ぼす緑肥の効果は、麦稈・緑肥混合物のC/N比または分解指標の低下によるものであり、したがって、C/N比や分解指標の低い緑肥ほど、また、麦稈に対する緑肥の量的比率が高いほど分解促進効果は大きくなるものとみなされた。

5) 麦稈と併用する緑肥のC/N比の目安

C/N比と窒素無機化率との関係を見ると、麦稈、緑肥の単独、混合いずれの場合においても窒素無機化率はC/N比の低下に伴って等しく増加した（図2-8）。

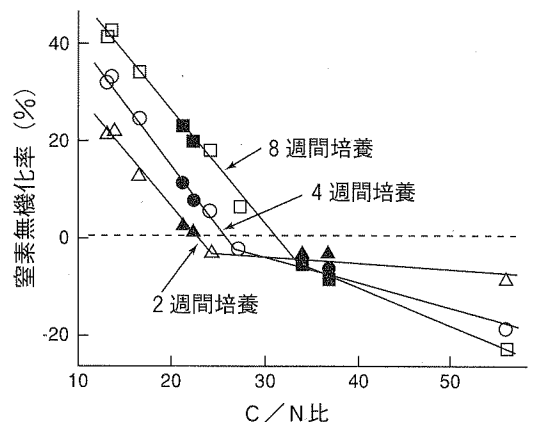


図2-8 C/N比と炭素無機化率との関係

△○□, 麦稈・緑肥単独; ▲●■, 麦稈・緑肥混合物

また、このときの窒素有機化・無機化の限界値となるC/N比はおおむね20～30の範囲であり、ガラス繊維ろ紙法の結果(表2-3)とも符合するものであった。有機化・無機化の限界値となるC/N比については、Alexander⁶⁾の報告とほぼ一致するものであったが、Iritani・Arnold⁹⁴⁾および広瀬⁸¹⁾は約20、Vigil・Kissel²⁵⁰⁾は40程度と報告している。この差異は、本実験の結果からも明らかなように、主として温度や期間など培養条件の相違によるものと思われる。一方、圃場条件では気象、土壌およびすき込み時期などの影響が考えられる。網走管内の畑土壌では、C/N比30以下の麦稈・緑肥混合物を秋にすき込んだ場合後作物に対して窒素減肥の必要性を認めた¹¹⁷⁾。また、十勝地方の火山性土では、松代・佐藤¹⁵⁰⁾は、麦稈のC/N比を秋すき込み時に30以下に調整すれば、翌春の窒素飢餓は防止されたとした。このことから、北海道のような寒冷地では、麦稈・緑肥混合物のC/N比を30以下とすることが必要と判断された。

以上のことを踏まえて、麦稈と併用する緑肥のC/N比の目安を麦稈の種類および麦稈・緑肥の混合比率別に整理したのが表2-6である。すなわち、緑肥の望ましいC/N比は、麦稈自体のC/N比によって多少変動するが、全体としてみれば、麦稈との重量比が1:1の場合は20以下、2:1の場合は15以下、4:1の場合は10以下が妥当と判断された。

表2-6 麦稈と併用する緑肥のC/N比の目安

麦稈の種類 (C/N比)	麦稈:緑肥(乾物重比)		
	1:1	2:1	4:1
春播コムギ(60)	20.0以下	15.0以下	10.0以下
秋播コムギ(100)	17.5以下	12.5以下	8.0以下

5. まとめ

1) 麦稈および緑肥の分解過程

秋埋設後の分解過程をガラス繊維ろ紙法とリターバック法で調査した結果、麦稈の乾物残存率は6ヶ月後で72～76%、1年後で41～43%であった。一方、緑肥は最初の6ヶ月間で大半が分解され、この期間の分解率は麦稈の2～3倍も大きかった。

埋設時の化学成分と炭素、窒素の分解との関係をみると、炭素分解率はC/N比の低いものほど、また炭水化物含量が高く、リグニン含量の低いものほど大きかった。一方、窒素分解率はC/N比の小さいものほど大きくなり、埋設後6ヶ月目ではC/N比が約40以下の場合分解率はプラスとなり、またC/N比が25以下の場合無機化が進むことを認めた。

有機成分の分解率は、糖・デンプン>ヘミセルロース、セルロース>リグニンの順に大きく、緑肥中の糖・デンプンは最初の6ヶ月間で大部分が分解された。麦稈の場合には、埋設1年後のC/N比および還元糖割合がそれぞれ41および35%であり、引き続き窒素飢餓を引き起こす可能性を認めた。

2) 麦稈の分解に及ぼす各種緑肥の影響

緑肥による麦稈の分解促進は、C/N比の低い緑肥ほど効果的であり、またC/N比が同程度の場合には、炭水化物含量が高く、リグニン含量の低いものほど効果的であった。麦稈のすき込みに伴う窒素飢餓を防止するためには、麦稈・緑肥混合物のC/N比を30以下にすることが必要であり、これを踏まえて、麦稈と併用する緑肥のC/N比の目安を麦稈の種類および麦稈・緑肥の混合比率別に整理した。

第2節 緑肥窒素の無機化率の変動要因

1. はじめに

緑肥や収穫残渣物などのすき込みが後作物の生育、収量に及ぼす影響は、分解過程における窒素有機化・無機化に大きく左右される^{118,119)}。また、窒素の無機化は、有機物のC/N比やリグニンなどの化学成分組成、有機物の形状や施用位置および土壌の種類や地温、水分などの環境条件によって大きく変動する^{173,264)}。この中で、C/N比は、多くの有機物において窒素評価に最も有効な指標とされている。しかし、リグニンやポリフェノールの高い熱帯性のマメ科植物や木本類などは、C/N比では評価できないことも報告されている^{26,35,48,177,181,213,246,250)}。

一方、緑肥や収穫残渣物は、通常は新鮮、かつ粗大な有機物として直接圃場にすき込まれる。しかし、このような有機物の分解や窒素の無機化特性を調査する場合には、乾燥し、細断または粉碎した試料を通常用いている。このため、緑肥のように水分含量の高い有機物については試料の乾燥程度や物理的形状の影響を考慮することが必要と考えられる。

そこで、本節では、有機成分組成が相違する各種の緑肥を供試し、これらの化学成分と窒素無機化率との関係および乾燥、粉碎など試料の前処理が炭素および窒素の無機化に及ぼす影響について検討した。

2. 実験方法

1) 緑肥の化学成分と窒素無機化率との関係

(1) 供試材料とその化学成分

緑肥作物はアカクロバ、エンバク、レバナの3種類

表 2-7 緑肥作物の種類と化学成分

緑肥作物の種類	T-C	T-N	C/N比	炭水化物	リグニン	フェノール
アカクローバ A	431	26.1	16.5	405	59	21
B	433	29.1	14.9	403	134	11
C	436	30.9	14.1	381	136	11
D	432	30.8	14.0	351	73	26
E	441	33.6	13.1	355	123	15
F	448	37.6	11.9	326	131	15
エンバク A	426	16.5	25.8	487	65	13
B	425	20.8	20.4	447	65	17
C	426	25.4	16.8	431	62	15
D	427	29.0	14.7	424	76	14
E	421	34.2	12.3	419	77	15
F	421	39.6	10.6	400	76	13
レバナ A	393	16.5	23.8	418	59	17
B	396	23.3	17.0	332	91	20
C	407	29.7	13.7	301	85	23
D	399	35.9	11.1	271	94	18
E	401	41.4	9.7	248	90	18
F	394	44.6	8.8	250	91	18

注) 成分含量: g kg⁻¹ DW

で、アカクローバは5月上旬、エンバク、レバナは8月上旬～下旬に播種し、10月下旬に収穫した。各作物とも、栽培条件（土壌、施肥など）および生育ステージなどによりC/N比の相違する茎葉部を6点ずつ供試した。供試緑肥の化学成分は表2-7に示すとおりである。C/N比はアカクローバで12～17、エンバクで11～26、レバナで9～24の範囲であった。C/N比が高まると、各作物とも炭水化物が多くなる傾向を示したが、リグニンは判然としなかった。リグニン含量の変動幅はアカクローバで大きく、エンバク、レバナでは小さかった。特に、アカクローバの場合は、C/N比が同程度でもリグニン含量には大きな差異が認められた。フェノール含量は、各作物ともリグニンと比較すると著しく低く、かつ、その変動幅も小さかった。

(2) 緑肥窒素の無機化率測定

約60℃で乾燥し、2mm以下に粉碎した緑肥を北見農試の多腐植質黒ボク土（pH: 5.2、T-C: 66g kg⁻¹、T-N: 4.9g kg⁻¹、土性: L）に乾物重比で20g kg⁻¹相当量添加し、土壌水分を最大容水量の60%に調整して25℃の温度条件で培養した。1、2、8週間後の無機態窒素を測定し、差引き法により無機化した窒素の全窒素に対する比を窒素無機化率とした。

2) 緑肥の乾燥、粉碎処理が炭素の分解と窒素無機化に及ぼす影響

(1) 供試材料とその調整法

緑肥作物はアカクローバ、エンバク、レバナの3種類で、アカクローバは5月上旬、エンバク、レバナは8月5日（A）および8月30日（B）に播種し、いずれも10

表 2-8 供試緑肥の水分含量と化学成分

供試緑肥	水分含量 (%)	化 学 成 分 (g kg ⁻¹ DW)				
		T-C	T-N	C/N比	炭水化物	リグニン
アカクローバ	67.3	446	38.8	11.5	361	99
エンバク A	63.9	429	17.1	25.1	515	79
" B	76.7	437	27.8	15.7	428	50
レバナ A	78.8	420	18.8	22.3	418	59
" B	83.1	411	32.4	12.7	303	59

月下旬に収穫した。以上5種類の供試材料の性状は表2-8に示すとおりである。

供試材料の調整法は、乾燥条件と物理的形狀を組み合わせる次の4処理とした。①：生試料を5mmに切断したもの（生・細断区）、②：①を50℃で2日間通風乾燥したもの（風乾・細断区）、③：2mm以下になるまで粉碎したもの（風乾・粉碎区）、④：①を100℃で1昼夜乾燥し、2mm以下になるまで粉碎したもの（熱乾・粉碎区）。

(2) 炭素および窒素の無機化率測定

各試料を北見農試の多腐植質黒ボク土に乾物重比で100g kg⁻¹相当量添加し、土壤水分を最大容水量の60%に調整して28℃の温度条件で4週間培養した。生成した炭酸ガスおよび無機態窒素を測定し、それぞれ差引き法により炭酸ガスとして放出した炭素の全炭素に対する比を炭素無機化率、無機化した窒素の全窒素に対する比を窒素無機化率とした。

3. 結果および考察

1) 緑肥の化学成分と窒素無機化率との関係

緑肥のC/N比と窒素無機化率との関係を図2-9に示した。1週目の窒素無機化率は、各緑肥ともC/N比と密接な関係が認められ、C/N比が同じであれば窒素無機化率も同程度であった。この時期は大部分の緑肥で有機化傾向を示し、エンバク、レバナについては有機化・無機化の限界値となるC/N比は10~12程度であった。しかし2週目になると、アカクロバ（B, C, E, F）の窒素無機化率は、C/N比が同程度の他の緑肥と比較して明らかに低い傾向を示した。エンバク、レバナおよびアカクロバ（A, D）の場合は、C/N比が同じであれば窒素無機化率は同程度であり、また有機化・無機化の限界値となるC/N比はいずれも15程度であった。これに対して、アカクロバ（B, C, E, F）の場合には13~15と低いC/N比であるにもかかわらず窒素の無機化は認められず、有機化が持続するようであった。さらに、8週目になるとこれらアカクロバの4点と他の緑肥との差は一層明瞭となった。また、エンバクとレバナとの間にもC/N比が15~20を超えるような場合には差が認められ、このときの窒素無機化率はレバナがエンバクよりも高い傾向を示した。以上の結果は、緑肥作物の窒素肥効を予測する場合、特にアカクロバに関してはC/N比のみでは不十分であることを示すものである。したがって、C/N比以外の化学成分を考慮することが必要と思われる。

これまで、国外ではマメ科の緑肥作物や収穫残渣物の一部にポリフェノール含量やリグニン含量の高いものが確認されており、このような植物体は窒素含有率の高い

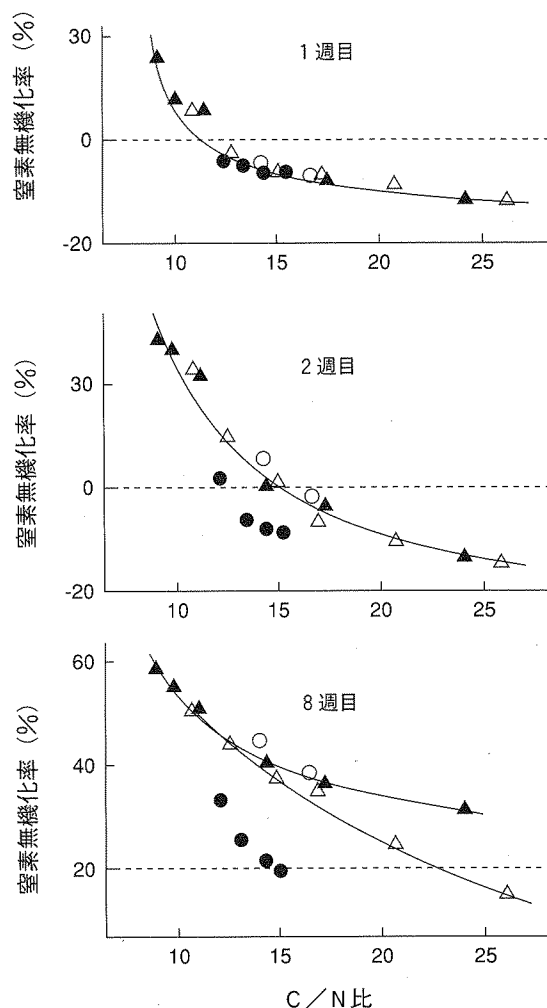


図2-9 緑肥のC/N比と窒素無機化率との関係
○,アカクロバ(A,D); ●,アカクロバ(B,C,E,F);
△,エンバク(A~F); ▲,レバナ(A~F)

ものでも窒素無機化率は低いことが明らかにされている^{26,35,48,177,181,213,246,250}。リグニンやポリフェノールが窒素無機化率を低下させる要因として、Haynes⁷¹⁾は、リグニンが土壤中でフェノールに分解され、これらの化合物や当初から含まれているポリフェノールが植物タンパクやアミノ酸と結合し、難分解性の腐植ポリマーを生成するためと指摘している。このようなことから、Vigilら²⁵⁰⁾はリグニン/N比、Oglesby・Fownes¹⁷⁷⁾はポリフェノール/N比、Foxら⁴⁸⁾およびConstantinides・Fownes³⁵⁾は(ポリフェノール+リグニン)/N比が窒素無機化率の指標として提示している。さらに、Janssen⁹⁶⁾は、リグニンとポリフェノールを分解の難易の指標とし、分解の難易度とC/N比により窒素無機化率が予測できることを報告している。

本実験では、供試緑肥のポリフェノール含量は11~23g kg⁻¹と低レベルで、緑肥間の差も僅かであった。このため、ポリフェノール含量の相違が緑肥窒素の無機化

に及ぼす影響は小さかったものと推察される。一方、リグニン含量の場合は緑肥間の変動が大きく、とくにアカクローバは $59 \sim 136 \text{ g kg}^{-1}$ と変動幅が大きかったことから、窒素無機化に大きな影響を及ぼしたものと考えた。すなわち、リグニン含量の高いアカクローバの4点(B, C, E, F)については、窒素の有機化が長期にわたって継続したため、netの窒素無機化率は低く推移したものと判断された。

このようなことから、まずリグニン/N比と窒素無機化率との関係をみたところ、エンバク、レバナについてはかえってばらつきが大きくなり、C/N比のような明瞭な関係は認められなかった。これは、窒素無機化に及ぼすリグニンの影響を過大に評価した結果と思われる。そこで次に、 $(\text{リグニン})^{1/2}/\text{N}$ 比と窒素無機化率との関係をみたところ、それらのばらつきは小さくなり、図2-10に示すように、アカクローバを含む各緑肥作物とも密接な関係が認められた。このことから、リグニン含量の変動の大きい緑肥作物の場合には、窒素無機化の指標として $(\text{リグニン})^{1/2}/\text{N}$ 比がC/N比よりも優っているものと判断された。ただし、 $(\text{リグニン})^{1/2}/\text{N}$ 比からみた窒素無機化率は、レバナがエンバクやアカクローバよりも高かった。これについては、リグニンの質的な相違によるものか、またはリグニン以外の要因によるのか検討が必要と思われる。

なお、アカクローバでみられたリグニンの影響は、本実験のように乾燥、粉碎した試料を多量施用した条件で大きくなるものと思われる。しかし、圃場試験の結果でも、リグニン含量の高いアカクローバは、同じC/N比のアルファルファよりも窒素肥効の小さいことが報告されている²⁰⁾。このことから、アカクローバを緑肥として利用する際には、生育ステージや栽培条件の相違によるリグニン含量の変動を把握することが重要と思われる。

表2-9 緑肥試料の調整が炭素・窒素無機化率に及ぼす影響

供試緑肥	炭素無機化率 (%)				窒素無機化率 (%)			
	生 細断	風乾 細断	風乾 粉碎	熱乾 粉碎	生 細断	風乾 細断	風乾 粉碎	熱乾 粉碎
アカクローバ	66.6	63.0	61.6	60.2	33.9	34.2	24.3	24.0
エンバク A	56.6	61.7	50.5	39.2	7.5	6.4	2.0	-0.1
" B	63.6	69.3	66.0	55.5	29.4	28.8	17.4	4.0
レバナ A	68.7	71.1	60.8	56.4	14.8	17.5	5.4	0.2
" B	83.4	76.5	73.0	66.2	37.4	40.0	20.3	15.8
平均	67.8	68.3	62.4	55.5	24.6	25.4	13.9	8.8
	(100)	(101)	(92)	(82)	(100)	(103)	(57)	(36)

注) 28℃、4週間培養

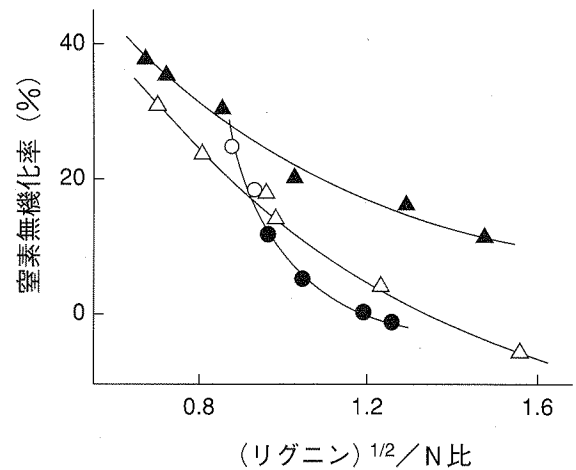


図2-10 緑肥の $(\text{リグニン})^{1/2}/\text{N}$ 比と窒素無機化率との関係

○, アカクローバ(A, D); ●, アカクローバ(B, C, E, F);
△, エンバク (A~F); ▲, レバナ(A~F)

2) 緑肥の乾燥、粉碎処理が炭素・窒素無機化率に及ぼす影響

緑肥試料の各種調整法が炭素、窒素無機化率に及ぼす影響を表2-9に示した。処理の影響は緑肥の種類によって若干相違したが、平均値でみると、炭素、窒素とも無機化率は生・細断区<風乾・細断区>風乾・粉碎区>熱乾・粉碎区の傾向であった。したがって、乾燥処理については、生と風乾との差異がほとんど認められず、熱乾処理を行った場合のみ無機化率の低下が認められた。また、物理的形状については、細断物が粉碎物よりも高い無機化率を示した。

そこで、次に各種調整法が緑肥のC/N比と窒素無機化率の関係に及ぼす影響を検討した(図2-11)。その

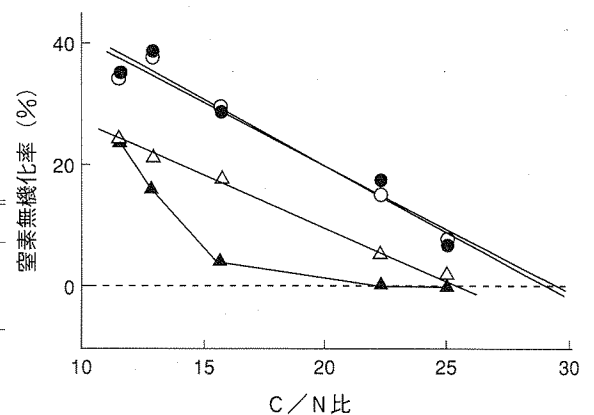


図2-11 緑肥のC/N比と窒素無機化率との関係

○, 生・細断; ●, 風乾・細断;
△, 風乾・粉碎; ▲, 熱乾・粉碎

結果、熱乾・粉碎区を除く各処理区はC/N比の低下に伴ってほぼ直線的に無機化率が増加したが、有機化・無機化の限界値となるC/N比は粉碎の有無によって相違した。すなわち、生・細断区および風乾・細断区のC/N比は29程度、風乾・粉碎区のC/N比は25程度で、粉碎処理によって低い方向にシフトする傾向を示した。また、熱乾・粉碎区の場合は、C/N比15以上の緑肥ではほとんど無機化が認められなかった。したがって、各緑肥とも窒素の無機化量は、熱乾または粉碎処理した場合には過小評価されるものと判断された。

熱乾処理による炭素、窒素無機化率の低下を緑肥間で比較すると、アカクロバで小さく、エンバクで大きかった。アカクロバはエンバクよりもリグニン含量が高く、炭水化物含量が低いことから、易分解性有機成分の多い緑肥ほど熱乾処理の影響が大きいものと推察された。また、各処理区の炭素無機化率を時期別に比較すると、いずれの処理間差も培養後1～2週の短期間で生じ、そ

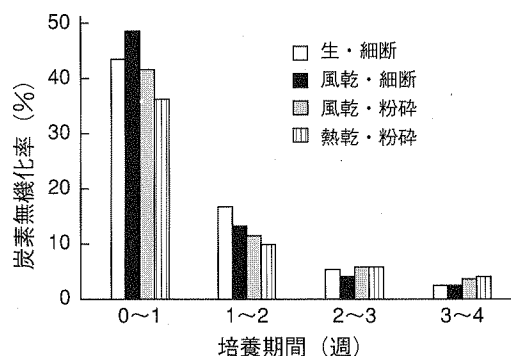


図2-12 炭素無機化率の時期別比較
(5種類の緑肥の平均値)

れ以降はほとんど差が認められなかった(図2-12)。したがって、熱乾処理による無機化率の低下は、易分解性有機成分の減少＝難分解性有機成分の増加によるものと推察された。Moorheadら¹⁵⁵⁾は、ホテアオイを用いて70℃乾燥と凍結乾燥とを比較し、70℃乾燥の場合はリグニン含量が高まり、炭素、窒素無機化率は低下することを認めている。これは、当初からリグニン含量の高い緑肥の窒素無機化率が低いこととも符合するものである。なお、Van Soest²⁴⁸⁾は、青刈り飼料を50℃以上で乾燥するとリグニン含量が増加するとしているが、Dala¹³⁷⁾は60℃乾燥条件では分解特性に影響を及ぼすほどの炭素化合物の大きな変化はないとしている。以上のことは、植物残渣の乾燥調整に際しては、処理温度が問題となることを示すものである。本実験の結果では、50℃乾燥で炭素、窒素無機化率の低下が認められないことから、試料の乾燥温度としては50～60℃が上限とみなされた。

一方、物理的形状の影響については、とくに粉碎に伴う窒素無機化率の低下が顕著であった。Van Schreven²⁴⁷⁾は、C/N比13～46の緑肥・作物残渣を用いて粉碎物と細断物の窒素無機化率を比較し、いずれの有機物も粉碎物が細断物よりも低く、また、その差はC/N比の高いものほど顕著であると報告している。粉碎に伴う窒素無機化率の低下は、稲わら、麦稈、おがくずの高C/N比の有機物を用いた前田・鬼鞍¹⁴¹⁾の報告、C/N比19のマメ科緑肥を用いたJensen¹⁰²⁾の報告およびC/N比86の麦稈、C/N比21のマメ科緑肥を用いたPer Ambus・Jensen¹⁸³⁾の報告でも確認されている。この要因については、有機物のサイズが細粒になるほど土壌窒素の有機化が大きくなるためとされている。

以上のことは、モデル実験による緑肥窒素の無機化時期あるいは無機化量の予測が、試料の乾燥方法および物理的形状の相違によってかなり変動することを示すものであり、とくに高温乾燥や粉碎処理を行った場合の窒素評価に留意する必要性を認めた。

4. まとめ

1) 緑肥の化学成分と窒素無機化率との関係

エンバク、レバナは、C/N比の変動幅が大きく、また、リグニン含量はいずれも低い傾向であった。このため、窒素無機化率はおおむねC/N比に対応した。一方、アカクロバは、C/N比よりもリグニン含量の変動が大きく、中には100g kg⁻¹を超えるリグニン含量も認められた。このような場合、窒素無機化率は、C/N比との関係が判然とせず、(リグニン)^{1/2}/N比と密接な関係を示した。このことから、リグニン含量の高い緑肥を含む場合には、(リグニン)^{1/2}/N比が窒素指標として有効とみなされた。

2) 緑肥の乾燥、粉碎処理が炭素・窒素無機化率に及ぼす影響

緑肥試料の高温乾燥や粉碎処理は炭素、窒素無機化率を低下させ、かつ窒素の有機化・無機化の限界値となるC/N比は低い方向にシフトした。このような窒素無機化量の過小評価を避けるためには、50℃以下で風乾し、かつ粉碎物(2mm以下)よりも細断物(5mm程度)を用いることが必要とみなされた。

第3節 後作物による緑肥窒素の利用率

1. はじめに

緑肥の有効利用を図るためには、後作物による緑肥窒素の吸収利用状況を把握し、適切な窒素施肥管理を行う

ことが必要である。そこで、本節では、コムギ収穫跡地に各種緑肥作物を栽培し、C/N比の異なる緑肥を秋にすき込み、翌年春に作物を栽培して窒素吸収量を調査し、差引き法で得られた窒素利用率に基づいて後作物に対する窒素の減肥基準を策定した。

なお、窒素利用率の測定法には、 ^{15}N 標識法、差引き法および回帰式法などがある^{187,243,265)}が、収穫残渣についての既往の報告をみると大部分が ^{15}N 標識法を用いている。そこで、ポット試験により ^{15}N 標識法と差引き法の窒素利用率の相違についても併せて検討した。

2. 試験方法

1) 圃場試験

(1) 緑肥の導入と後作物の栽培法

試験 I

土壌は、第1節と同じく①淡色黒ボク土（南網走）、②多腐植質黒ボク土（訓子府）、③灰色台地土（常呂）の3種類を用いた。これらの土壌を北見農試梓試験圃に充填し、pHの低い多腐植質黒ボク土には炭カル 400g m^{-2} 、また各土壌にリン酸 $60\sim 70\text{g m}^{-2}$ を過石で施用した。最初に、緑肥の前作として春播コムギを栽培した（1983年5月6日～8月24日）。緑肥作物はアカクロバ、エンバク、レバナを供試し、アカクロバは間作緑肥として春播コムギの播種直後、エンバク、レバナは後

表2-10 供試緑肥の乾物重、N含有量およびC/N比

区分	緑肥作物	乾物重 (Mg ha^{-1})	N含有量 (kg ha^{-1})	C/N比
試験 I	アカクロバ	7.29	216	13.8
	エンバク A	7.04	116	25.1
	" B	3.47	72	17.6
	レバナ A	7.28	136	21.6
	" B	2.30	70	12.6
試験 II	エンバク C	7.97	68	49.7
	" D	8.08	85	40.2
	" E	8.46	107	34.0
	" F	8.38	121	29.4
	" G	8.48	158	23.1

注) 試験 I は3土壌、試験 II は2土壌の平均値

表2-11 緑肥すき込み地の後作物とその栽培条件

区分	年次	供試作物	作付回数	栽培期間 (月・日)	N施肥量 (kg ha^{-1})
試験 I	1984	春播コムギ	2	5・15～9・26	50+25
	1985	エンバク	2	5・17～10・21	40+25
	1986	春播コムギ	1	5・21～8・11	80
試験 II	1987	エンバク	3	5・21～10・1	50+50+50
	1988	エンバク	3	5・12～10・11	50+25+50

作緑肥として春播コムギの収穫直後に播種し、同年秋（11月2日）25cmの深さまですき込んだ。すき込み緑肥の乾物重、N含有量およびC/N比は表2-10に示すとおりである。この中の、エンバクA、レバナAは無窒素で栽培したものを搬出し、替わりに外部から搬入したものである。また、エンバクB、レバナBは播種時に窒素 8g m^{-2} 施肥して栽培したものである。いずれの緑肥も10cm程度に細断したものをすき込み、後作物は、表2-11に示すように春播コムギとエンバクを3ヶ年で5回栽培した。試験規模は1区 1m^2 、2反復で実施した。

試験 II

試験 I と同じ淡色黒ボク土、多腐植質黒ボク土の2土壌を供試し、麦稈を乾物重で 350g m^{-2} 相当量すき込んだ後、エンバクを緑肥として栽培した（1986年8月19日～10月31日）。栽培後、エンバクの茎葉はすべて搬出し、替わりにC/N比の異なる5種類のエンバク（表2-10）を試験 I と同じ方法ですき込んだ。後作物は、表2-11に示すように2ヶ年で6回栽培し、収穫物のN吸収量を調査した。試験規模は1区 1m^2 、2反復で実施した。

なお、試験 I、IIとも各年の1作目に共通肥料として、 P_2O_5 : 9g m^{-2} 、 K_2O : 6g m^{-2} 程度を施用した。

(2) 窒素利用率の算出

後作物の窒素吸収量から、以下のように差引き法で求めた。

$$\text{窒素利用率(\%)} = (\text{緑肥区のN吸収量} - \text{無処理区のN吸収量}) / \text{緑肥のN含有量} \times 100$$

2) ポット試験

(1) 供試緑肥

緑肥は、 ^{15}N 標識硫酸または無標識硫酸を施用して栽

表2-12 供試緑肥のC/N比と ^{15}N atom %

供試緑肥	T-C (g kg^{-1})	T-N (g kg^{-1})	C/N 比	^{15}N (% excess)
エンバク(無標識)	413	23.5	17.6	—
" (^{15}N 標識)	414	23.9	17.3	24.54
レバナ(無標識)	388	24.4	15.9	—
" (^{15}N 標識)	384	24.9	15.4	24.73

培したエンバクおよびレバナの茎葉部を用いた。各緑肥の化学成分をみると（表2-12）、 ^{15}N 標識緑肥と無標識緑肥の化学成分の相違はほとんど認められず、C/N比はエンバクで17.3～17.6、レバナで15.4～15.9であった。なお、供試試料は、凍結乾燥し、コーヒーマルで粉碎したものをを用いた。

(2) 後作物の栽培法

ノイパウアーポットに土壌450g（乾土重）を充填し、

緑肥を4.5 g (乾物重) 混和した。土壌は淡色黒ボク土、多腐植質黒ボク土の2種類を供試し、土壌水分を最大含水量の50～60%とした。作物はイタリアンライグラスを供試し、日平均20℃の温度条件で栽培し、播種後6週間目に茎葉部を、さらに12週間目には茎葉部と根を収穫した。

窒素施肥は無窒素区と窒素施肥区を設定し、窒素施肥量はポット当たり基肥90mg+追肥45mgとした。基肥窒素については¹⁵N標識硫安 (29.50 atom %) と無標識硫安を使用し、¹⁵N標識硫安と無標識緑肥、無標識硫安と¹⁵N標識緑肥を組み合わせた。なお、追肥窒素はすべて無標識硫安を用いた。

(3) 窒素利用率の測定

各収穫物の全窒素およびその¹⁵N atom %を分析し、緑肥、硫安および土壌由来の窒素に区分した。緑肥または硫安由来の窒素は、全窒素吸収量×(吸収窒素の¹⁵N excess %/緑肥または硫安の¹⁵N excess %) から算出した。窒素利用率は、緑肥または硫安として施用した窒素に対する全収穫物中の緑肥または硫安由来窒素の比率 (%) とした。差引き法については、緑肥、硫安とも無施用区を設定し、施用区と無施用区との窒素吸収量の差から定法により求めた。全窒素の定量はケルダール法、¹⁵N atom %は発光分光分析法^{13,107,272)}で測定した。

表 2-13 緑肥窒素の利用率 (%)

区 分	供試緑肥	1 年 目				2 年 目				3年目 平 均
		淡 色	多腐植	灰 色	平均	淡 色	多腐植	灰 色	平均	
		黒ボク土	黒ボク土	台 地 土		黒ボク土	黒ボク土	台 地 土		
試験Ⅰ	アカクローバA	31	24	28	28(28)	11	17	23	17(14)	3.5
	エンバクA	5	11	16	11(8)	11	18	7	12(15)	3.5
	〃B	23	28	29	27(26)	28	32	27	29(30)	5.2
	レバナA	26	21	33	27(24)	7	12	18	12(10)	0.4
	〃B	40	39	51	43(40)	17	19	28	21(18)	1.7
	平 均	25	25	31		15	20	21		
試験Ⅱ	エンバクC	-10	-11		(-11)	0	10		(8)	
	〃D	- 6	- 2		(- 4)	12	14		(13)	
	〃E	3	1		(2)	16	15		(16)	
	〃F	10	8		(9)	11	12		(12)	
	〃G	14	12		(13)	9	10		(10)	
	平 均	2	2			10	13			

注) () は淡色黒ボク土と多腐植質黒ボク土の平均

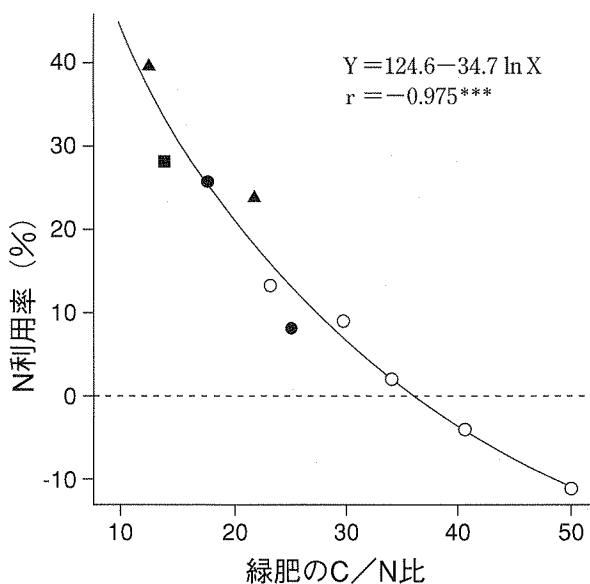


図 2-13 緑肥の C/N 比と窒素利用率との関係
 ■, アカクローバ; ●, えん麦 (試験 I)
 ▲, レバナ; ○, えん麦 (試験 II)

3. 結 果

1) 圃場試験

後作物による緑肥窒素の利用率を表 2-13に示した。各土壌の平均値でみると、窒素利用率は初年目 11～43%、2年目 8～29%、2ヶ年合計で 3～64%の範囲を示し、緑肥間で変動幅の大きいことが認められた。また3年目になると、試験 I の結果では窒素利用率は 0～5%まで低下し、緑肥間の相違も判然としなくなった。これらの窒素利用率を土壌間で比較すると、すべての緑肥が同じ傾向を示すものではなかったが、平均値でみると初年目は灰色台地土がやや高く、2年目は淡色黒ボク土がやや低い傾向であった。したがって、2ヶ年合計では灰色台地土>多腐植質黒ボク土>淡色黒ボク土の順であった。

次に、これらの窒素利用率をすき込み時の C/N 比との関係でみると、初年目の窒素利用率は、図 2-13に示

すように、緑肥のすき込み量や年次の相違にもかかわらずC/N比の低いものほど高い傾向を示した。しかし、2年目以降においては、このような傾向は判然としなかった。初年目において、窒素利用率がマイナスからプラスに転じるときのC/N比は30～40の範囲であった。この値は初年目1作目（6月末～7月上旬収穫）の窒素利用率の場合でもほぼ同じであった。このことは、秋すき込み時のC/N比が30以下であれば翌春から窒素肥効が期待できることを示すものである。なお、緑肥作物の種類別にみると、アカクロバの窒素利用率は、レバナ、エンバクと比較してC/N比が同程度の場合でもやや低い傾向を認めた。

2) ポット試験

^{15}N 標識法、差引き法で調査した緑肥窒素の利用率を表2-14に示した。差引き法による窒素利用率は、エンバクで3～16%、レバナで16～25%であり、C/N比のより低いレバナがエンバクよりも高かった。また、いずれの緑肥も窒素施肥の影響は判然としなかったが、土壌間では多腐植質黒ボク土が淡色黒ボク土よりも著しく高かった。一方、 ^{15}N 標識法による窒素利用率は、窒素無施用の場合エンバクで8～19%、レバナで15～24%、また、窒素施用の場合エンバクで20～27%、レバナで24～32%であり、窒素施肥に伴い ^{15}N 利用率は著しく高まった。 ^{15}N 標識法と差引き法を比較すると、窒素施用条件での緑肥窒素の利用率はいずれの緑肥も ^{15}N 標識法が差引き法を上まわったが、無施用条件では、エンバクで ^{15}N 標識法>差引き法、レバナで差引き法> ^{15}N 標識法と緑肥間で異なる傾向を示した。

以上のように、緑肥の ^{15}N 利用率は窒素施肥により高まることから、次に、緑肥施用が施肥窒素の利用率に及ぼす影響を検討した（表2-15）。その結果、施肥窒素利用率は、差引き法の場合その影響は判然としなかったが、 ^{15}N 標識法では無施用区>レバナ区>エンバク区の順であり、緑肥施用に伴う施肥 ^{15}N 利用率の低下が顕著であった。

同時に、緑肥や施肥窒素の施用が土壌由来の窒素吸収量に及ぼす影響についても ^{15}N 標識法で検討した（表2-16）。その結果、窒素吸収量は両土壌ともエンバク施用で減少し、レバナ施用で増加する傾向を示した。さらに、 ^{15}N 標識硫安を施用した場合にはN吸収量の著しい増加を認めた。

4. 考 察

1) 緑肥のC/N比と窒素利用率との関係

秋すき込み緑肥の初年目における窒素利用率はC/N

表2-14 緑肥窒素の利用率（ポット試験）

土 壤	緑 肥	施肥窒素 (硫安)	窒素利用率 (%)		
			^{15}N 標識法	差引き法	差
淡 色 黒ボク土	エンバク	無施用	8.3	4.2	+4.1
		施 用	20.2	3.4	+16.8
	レバナ	無施用	15.0	17.2	-2.2
		施 用	24.0	16.0	+8.0
多腐植質 黒ボク土	エンバク	無施用	18.8	16.2	+2.6
		施 用	26.6	13.6	+13.0
	レバナ	無施用	24.1	24.6	-0.5
		施 用	32.4	25.0	+7.4

表2-15 緑肥施用が施肥窒素の利用率に及ぼす影響

土 壤	緑 肥	窒素利用率 (%)	
		^{15}N 標識法	差引き法
淡 色 黒ボク土	無施用	77.1	82.7
	エンバク	55.1	81.1
	レバナ	63.3	81.5
多腐植質 黒ボク土	無施用	77.2	89.2
	エンバク	68.6	87.0
	レバナ	70.7	88.4

表2-16 緑肥施用が土壌由来の窒素吸収量に及ぼす影響

土 壤	処理内容	N吸収量 ($\text{mg kg}^{-1} \text{DW}$)
淡 色 黒ボク土	無処理	37
	エンバク	25 (-9)
	レバナ	40 (+6)
	窒素施肥	51 (+17)
多腐植質 黒ボク土	無処理	72
	エンバク	66 (-6)
	レバナ	73 (+1)
	窒素施肥	108 (+36)

() は無処理区との差

比と密接な関係が認められた。すなわち、緑肥のC/N比と窒素利用率との回帰式により、窒素利用率はC/N比10～15で30～45%、同15～20で20～30%、同20～25で10～20%程度とみなされた。一方、ポット試験の窒素利用率（差引き法）は、C/N比15.4～17.6で3～25%であり、これと比較すると、圃場試験の値はかなり高いものであった。また、窒素利用率がマイナスからプラスに転じるときのC/N比は30～40の範囲であり、培養実験で得られた有機化・無機化の限界値であるC/N比20～30と比較すると明らかに高かった。これらの差異は、第

2節で述べたように、供試緑肥の物理的形狀の影響が大きかったものと考えられる。すなわち、圃場試験の場合は生の細断物をすき込むため、ポット試験や培養実験に供試する粉碎物と比較して窒素有機化の程度が小さかったためと推察される。

一方、緑肥窒素の利用率は、C/N比が同程度でも緑肥作物の種類や土壌によって異なることを認めた。すなわち、アカクロバはエンバク、レバナよりもやや低い傾向であったが、同様なことはアルファルファとの比較でも確認されている²⁶⁾。その要因は、前節で述べたようにC/N比が低いにもかかわらずリグニン含量が高いためである。また、土壌別では、火山性土が非火山性土よりも低い傾向であった。同様な傾向は十勝地方における西宗¹⁶⁹⁾の報告でも認めている。火山性土における窒素肥沃度の差異については、とくにポット試験で顕著な影響を認めたが、圃場試験の結果ではC/N比の比較的高いエンバクの場合でもさほど大きな影響は認められなかった。

2) 窒素利用率における¹⁵N標識法と差引き法との比較

各種植物残渣の窒素利用率を¹⁵N標識法で調査した事例をみると、十勝地方¹⁶⁹⁾ではC/N比14~18程度のテンサイ残渣で15~30%、C/N比20~22程度のバレイショ残渣で8~16%であった。アメリカ^{1,64,186,249,253)}では、C/N比11~16のマメ科緑肥で15~32%、同15のテンサイ残渣で27%、同25~38のイネ科残渣で4~26%、同93~117のコムギで9~12%であった。カナダ^{21,228)}では、C/N比10の緑肥で19%、同19~23のマメ科緑肥で10~12%であった。フィンランド¹⁵⁸⁾では、C/N比14~17の緑肥で17~25%、同15~27の緑肥で6~15%であった。デンマーク¹⁰¹⁾では、C/N比17のマメ科緑肥で6~14%であった。オーストラリア^{130,131,132)}では、C/N比11のマメ科牧草で17~28%、同15のマメ科牧草で11~17%であった。イスラエル²⁰⁷⁾では、C/N比50~75程度のトウモロコシ残渣で1~5%であった。

以上の結果から、植物残渣窒素の利用率は、気象、土壌および作付方式や耕起法などの影響を受けるものの、いずれの場合もすき込み時のC/N比とは密接な関係を示すものと判断した。この中で、C/N比が10~25程度と比較的低い緑肥や作物残渣についてはおおむね10~30%程度とみなされた。これに対して、差引き法による本試験の結果は10~45%と高い値となっている。一般に、C/N比の低い植物残渣の場合には、窒素無機化率は¹⁵N標識法よりも差引き法で高い値を示すとされている^{48,50,98)}。このことは、有機物施用による土壌窒素の無機化促進を示すものである。そこで、¹⁵N標識作物残渣

が土壌窒素の無機化に及ぼす影響を検討した事例をみると、Yaacob・Blair²⁶³⁾は、C/N比16~28程度の場合いづれも無機化促進を示すが、その程度はC/N比の低いもののほど大きいことを認めている。また、Azamら¹⁵⁾は、C/N比10~16程度の場合には無機化量が増加し、C/N比18以上の場合には無機化量の減少を認めている。ポット試験の結果(表2-16)は、これに符合したものと判断される。以上のことは、¹⁵N標識法による窒素評価は、C/N比の低いもののほど過小評価される可能性が大きいことを示すものである。

ところで、Jenkinsonら¹⁰⁰⁾は、窒素添加による土壌窒素の無機化促進効果をANI (Added Nitrogen Interaction) と定義し、同時に、¹⁵N標識窒素を用いたときに生じるpool substitution(添加¹⁵NがnativeのNと交換)を見かけのANIとし、真のANIが存在する場合には差引き法による値は誤りであり、みかけのANIが存在する場合には¹⁵N標識法による値は誤りであることを指摘した。無機態窒素(¹⁵N)を施肥した場合、通常はみかけのANIが生じ、窒素利用率は差引き法よりも¹⁵N標識法のほうが低い値を示す^{66,100,187)}。また、緑肥窒素(¹⁵N)の無機化率が無機態窒素の多い土壌で高いのは、pool substitutionで説明できるとされている⁹⁸⁾。ポット試験では、¹⁵N標識緑肥の窒素利用率が窒素施肥により著しく高まり、同時に¹⁵N施肥窒素利用率が緑肥施用により著しく低下することを認めたが、これはまさしくpool substitutionによるものと思われる。このことから、C/N比が低く、窒素無機化の著しく速い有機物を施用した場合には、みかけのANIが生じ、窒素利用率は過小評価される可能性が大きいものと推察された。

一方、麦稈のようにC/N比の高い作物残渣の窒素利用率をみると、¹⁵N標識法ではおおむね5~10%程度を示しており、これらの値は、差引き法と比較すると著しく高いものである。前述のように、有機化・無機化の限界値を上まわる高いC/N比の植物残渣は、差引き法ではマイナスの窒素無機化率となるが、¹⁵N標識法ではいづれもプラスとなるため、後作物の窒素利用率についても当然高い値を示す。いづれにせよ、¹⁵N標識法による値はgrossの窒素無機化を反映した結果と思われるが、その一方で有機物分解に伴う有機化窒素量を考慮しないため、C/N比の高い有機物の場合には一般に過大評価されることになる。

3) 後作物に対する窒素の減肥基準

緑肥の窒素利用率は、図2-13に示すように、おおむねC/N比によって決定されるので、C/N比とそのすき込み量がわかれば窒素減肥量を求めることができる。

表2-17 緑肥のC/N比に対応した後作物の窒素減肥量

麦 稈 (Mg ha ⁻¹)	緑 肥 の C/N比	緑肥の乾物重 (Mg ha ⁻¹)			
		0.2	0.4	0.6	0.8
—	10	55	110	160	—
	15	25	50	75	95
	20	10	25	35	45
	(0)	5	10	15	20
搬 出	10	35	80	130	—
	15	15	35	60	85
	(2)	0	15	25	35
全量す	10	10	50	90	—
き込み	15	0	15	35	—
(8)	20	0	0	10	—

注) 麦稈のC/N比は60とした。

そこで、これらのC/N比に対応する窒素利用率を回帰式から求め、施肥窒素の利用率を70～75%としたときの緑肥のC/N比と乾物重に対応した施肥窒素の減肥量を算出した(表2-17)。

一方、畑作地帯の緑肥は大部分がムギ類跡地に導入されるため、通常はコンバイン収穫後に2 Mg ha⁻¹程度の麦稈が残存し、また全量すき込みの場合には8 Mg ha⁻¹程度の麦稈がすき込まれる。このため、後作への窒素施肥は緑肥だけでなく麦稈のすき込み量も考慮する必要がある。緑肥・麦稈混合物のC/N比と窒素無機化率の関係は、第1節で述べたように、緑肥または麦稈単独の場合と同じ回帰式で示すことができる。このことから、緑肥+麦稈のC/N比をもとにした窒素減肥量の目安も併せて示した。これらの値は、生育期間が長く、かつ生育後期まで窒素吸収を必要とする作物を対象にした最大減肥可能量であり、生育期間の短い作物に対してはこれよりも少ない減肥量とみなされる。なお、イギリス^{41,89,134)}やアメリカ・カナダ^{26,39,63,74,197)}では、C/N比の比較的低いマメ科緑肥をすき込んだときの窒素減肥可能量は50～100 kg ha⁻¹程度とされており、本試験の結果

とおおむね一致する。

2年目以降の窒素施肥については、緑肥のC/N比と窒素利用率との関係が判然としないので、このような方法で予測することは不可能である。したがって、土壌窒素の評価に基づいた施肥対応が必要である。

5. まとめ

緑肥窒素の利用率は、緑肥作物の種類とその栽培条件によって大きく変動した。秋すき込み緑肥の初年目の窒素利用率はすき込み時のC/N比と密接な関係を示し、その回帰式から推定される利用率は、C/N比10～15で30～45%、同15～20で20～30%、同20～25で10～20%程度であった。また、窒素利用率がマイナスからプラスに転じるときのC/N比は30～40程度であった。これらの結果に基づいて、緑肥のC/N比と緑肥または緑肥+麦稈のすき込み量から、後作物に対する施肥窒素の減肥量を設定した。

なお、¹⁵N標識法と差引き法を比較すると、¹⁵N標識法による窒素利用率はC/N比の低い緑肥ほど過小評価され、また、C/N比の高い緑肥、収穫残渣については分解過程での窒素の有機化を考慮しないので過大評価されることを認めた。

第4節 緑肥すき込み地におけるテンサイの窒素施肥対応

1. はじめに

網走管内の畑輪作では、緑肥すき込み地の後作物は大部分がテンサイである。そこで、各種緑肥のすき込み地におけるテンサイの最適窒素施肥量を窒素用量試験から導出し、前節で策定した緑肥のC/N比とすき込み量に基づく窒素減肥基準がテンサイに適用できるか否か検討した。

表2-18 供試圃場の土壌条件

試 験 地	土 性	pH (H ₂ O)	T-C (g kg ⁻¹)	T-N (g kg ⁻¹)	Truog P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	C E C cmol(+)kg ⁻¹	交換性塩基 (mg kg ⁻¹)		
							CaO	MgO	K ₂ O
訓子府	壤土	5.4	83.6	5.8	270	39	4,500	380	270
小清水	壤土	5.8	31.3	2.2	140	16	1,260	160	270
南網走	砂壤土	6.4	27.3	2.2	130	19	2,540	310	730
美幌	壤土	5.8	33.3	2.7	80	20	1,800	270	980
女満別	壤土	5.9	33.3	3.3	330	21	2,390	330	940
津別	埴壤土	5.8	25.2	2.5	340	22	2,640	340	960

表2-19 緑肥作物の導入条件

試 験 地	年 次	前 作 物	麦稈処理	緑肥作物	播 種 (月/日)	すき込み (月/日)
訓 子 府	1985~1987	春播コムギ	全量すき込み	レバナ	8/19~25	10/29~30
小 清 水	1985	春播コムギ	全量すき込み	レバナ	8/22	10/30
南 網 走	1983~1984	二条オオムギ	搬 出	エンバク・レバナ	8/27~29	10/30~31
美 幌	1986	秋播コムギ	搬 出	エンバク・レバナ	8/22	11/ 5
女 満 別	1986	秋播コムギ	搬 出	エンバク・レバナ	8/22	11/ 6
津 別	1986	秋播コムギ	搬 出	エンバク・レバナ	8/24	10/ 5

2. 試験方法

1) 試験地の土壌条件

表層多腐植質黒ボク土（訓子府）、表層腐植質黒ボク土（小清水、美幌、女満別）、淡色黒ボク土（南網走）、褐色低地土（津別）の6試験地で実施した。土壌の理化学性は表2-18に示すとおりである。

2) 緑肥作物の導入条件

各試験地ともムギ類の収穫跡地に緑肥としてエンバク、レバナを導入した（表2-19）。緑肥作物に対する施肥は、窒素（硫酸）を60~70kg ha⁻¹（エンバク）、70~90kg ha⁻¹（レバナ）施用した。前作残渣物の麦稈は緑肥作物の播種直前にロータリ耕で土層15cm程度まで混和し、また、緑肥はプラウ耕で25~30cmの深さまですき込んだ。なお、麦稈のすき込み量（乾物重）は全量すき込みの場合6Mg ha⁻¹、搬出の場合2Mg ha⁻¹程度であった。

3) テンサイの栽培条件

供試品種は、津別のみ「モノエース」で、他試験地はいずれも「ハイラーベ」を用いた。移植期は緑肥すき込み翌年の4月30日~5月9日、収穫期は10月12~21日で、

ha当たりの栽植本数は津別72,500（畦幅60cm）、小清水63,300（同66cm）、他試験地69,400（同60cm）であった。窒素施肥量は0~250kg ha⁻¹の範囲で4~6段階の用量試験を実施した。共通肥料としては、P₂O₅ 250~300kg ha⁻¹（過石1:よりりん1）、K₂O 160~200kg ha⁻¹（硫酸）、FTE40kg ha⁻¹を施用した。

本試験は、緑肥導入の有無およびその種類を主試験区、各窒素用量を副試験区とする分割区法3反復で実施し、1区面積は17~24m²とした。

4) 調査方法

収量調査は1区36株抜き取り、根重、茎葉重、根中糖分を測定した。作物体の窒素分析はケルダール法で測定した。

最適窒素施肥量は窒素施肥量と糖量との間の二次回帰式を用いて、最大糖量が得られるときの窒素施肥量とした。同様に、窒素吸収量と糖量との関係から最大糖量が得られるときの窒素吸収量を最適窒素吸収量とした。

表2-20 すき込み時における緑肥の性状と窒素減肥可能量

試 験 地	緑肥作物	緑肥の性状			窒素減肥可能量*	
		乾物重 (Mg ha ⁻¹)	N含有量 (kg ha ⁻¹)	C/N比	① (kg ha ⁻¹)	② (kg ha ⁻¹)
訓 子 府	レ バ ナ	4.66	96	19.5	26	0
小 清 水	レ バ ナ	4.34	104	16.6	35	0
南 網 走	エンバク	4.03	74	23.7	14	0
	レ バ ナ	3.72	92	18.1	28	25
美 幌	エンバク	6.43	100	27.5	12	0
	レ バ ナ	6.39	131	19.9	34	31
女 満 別	エンバク	6.43	163	16.5	56	52
	レ バ ナ	6.07	158	15.5	58	56
津 別	エンバク	2.78	76	14.7	30	24
	レ バ ナ	2.38	70	12.5	32	23

*①は緑肥のC/N比と乾物量、②は緑肥+麦稈のC/N比と乾物量から算出。

訓子府は3ヶ年、南網走は2ヶ年の平均値

3. 結果および考察

1) 緑肥作物の生育状況と窒素減肥可能量

すき込み時における緑肥の乾物重、窒素含有量およびC/N比を表2-20に示した。作物別にみると、エンバクはレバナよりも乾物重が大きく、C/N比は高い傾向であった。試験地間の比較では、女満別は乾物重、窒素含有量とも多く、C/N比は低かった。津別は乾物重、窒素含有量が最も少なく、C/N比は低かったが、これはすき込み時期が他試験地よりも1ヶ月早かったためと思われる。C/N比は、津別のエンバク、レバナおよび女満別のレバナが16以下と低く、一方、美幌、南網走のエンバクは20以上と高かった。

前節の窒素減肥基準に基づいて、緑肥のC/N比とすき込み量から求めた窒素減肥可能量は、12～58kg ha⁻¹の範囲であった。さらに、麦稈・緑肥のC/N比とすき込み量から求めた窒素減肥可能量は0～56kg ha⁻¹の範囲であり、いずれの場合も女満別のレバナ、エンバクで大きい値を示した。

2) テンサイの最適窒素施肥量

窒素施肥量と糖量との関係を見ると(図2-14)、糖量は窒素施肥によって増加するが、施肥量が一定レベルに達すると最大となり、さらにそれを超えると漸減する傾向を示した。このような窒素施肥量と収量との関係を

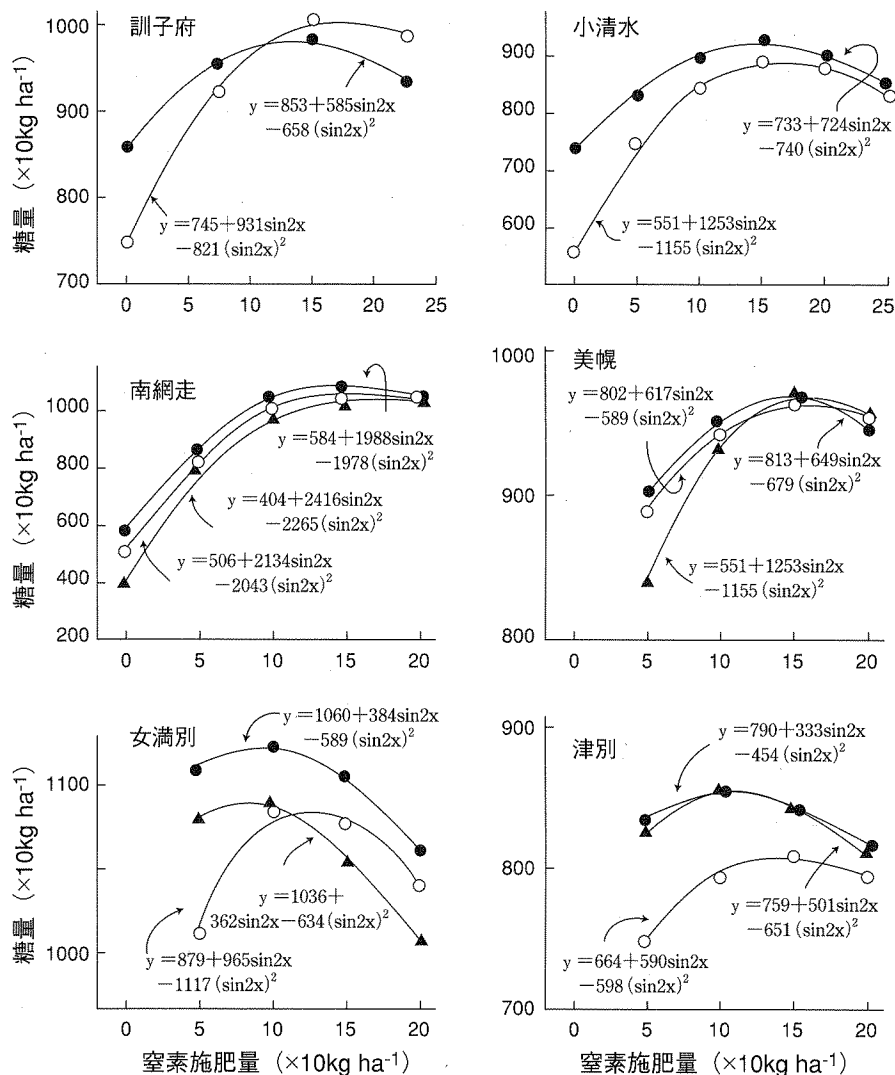


図2-14 テンサイの窒素施肥量と糖量との関係

○, 無処理区; ▲, エンバク; ●, レバナ

示す肥効曲線は、二次関数または平方根関数が一般に用いられている⁴⁴⁾が、本試験の結果では、高橋ら²³⁸⁾が窒素吸収量と修正糖量との関係を示すのに用いた次の二次式モデルが良く適合した。

$$Y = a(\sin 2X)^2 + b(\sin 2X) + c$$

この二次式モデルを用いて得られた最適窒素施肥量は、無処理区で128～173kg ha⁻¹、エンバク区で85～161kg ha⁻¹、レバナ区で93～151kg ha⁻¹の範囲であった(表2-21)。そこで、無処理区と緑肥区との最適窒素施肥量の差から窒素減肥量を求めると、エンバクは-4～43kg ha⁻¹、レバナは6～41kg ha⁻¹であり、また、北海道施肥標準⁸²⁾と緑肥区の最適窒素施肥量の差から窒素減肥量を求めると、エンバクは-1～75kg ha⁻¹、レバナは9～67kg ha⁻¹であった。

ところで、緑肥のすき込みがテンサイ糖量に及ぼす影響をみると、図2-14から明らかなように、緑肥効果はおおむね次の3タイプに区分された。

表2-21 テンサイの最適窒素施肥量に基づく窒素減肥量

試験地	最適窒素施肥量 (kg ha ⁻¹)			窒素減肥量 (kg ha ⁻¹)*			
	無処理	エンバク	レバナ	エンバク区		レバナ区	
				①	②	①	②
訓子府	173	-	132	-	-	41	28
小清水	164	-	147	-	-	17	13
南網走	157	161	151	-4	-1	6	9
美幌	158	159	143	-1	1	15	17
女満別	128	85	93	43	75	35	67
津別	148	113	108	35	37	40	42

*①は最適窒素施肥量における無処理区との差、②は北海道施肥標準と緑肥区の最適窒素施肥量との差。

- ①少窒素施肥条件および最適窒素施肥条件とも無処理区より高収量を示す
 ②少窒素施肥条件では無処理区よりも高収量を示し、最適窒素施肥条件では同程度の収量を示す
 ③少窒素施肥条件では無処理区よりも低収量を示し、最適窒素施肥条件では同程度の収量を示す

これらの3タイプと緑肥のC/N比との間には密接な関係が認められ、①はC/N比16以下、②は同16~20、③は同20以上の緑肥が該当した。したがって、テンサイに対する緑肥効果はC/N比の低いものほど大きかった。同様な傾向は後作バレイショでも確認されている¹¹⁸⁾。

3) 窒素減肥可能量の予測値と実測値の比較

緑肥または緑肥・麦稈のC/N比とすき込み量から推定した窒素減肥可能量がテンサイに適用できるか否か明らかにするため、これらの予測値とテンサイの最適窒素施肥量から求めた窒素減肥必要量(実測値)とを比較した。ここでは、緑肥のC/N比を前述のように3区分し、C/N比別に予測値と実測値を比較した(表2-22)。その結果、緑肥のC/N比とすき込み量から推定した予測値は、最適窒素施肥量の差から求めた実測値と比較して3~13kg ha⁻¹多かった。この要因は、緑肥施用によって最適窒素吸収量が多い方向にシフトするため(表2-23)、緑肥すき込みに伴う窒素吸収量の増加分をす

べて減肥する必要がなかったためと考えられる。また、実測値との差はC/N比が高い場合に大きくなる傾向であったが、これはC/N比の高いものほど緑肥からの窒素供給が遅れるためと推察された。窒素の供給時期は、テンサイの糖収量を高める観点からは早いほど望ましいとされている^{32,146)}。したがって、C/N比20以上の緑肥については、収量レベルを維持する観点からの窒素減肥はほとんど必要ないものと判断される。

一方、麦稈・緑肥のC/N比とすき込み量から推定した窒素減肥可能量(予測値)は、C/N比20以上の緑肥の場合にはいずれもゼロであり、北海道施肥標準から最適窒素施肥量を差し引いた実測値と一致した。しかし、C/N比20以下の緑肥の場合には実測値と比較して6~15kg ha⁻¹少なかった。とくに、C/N比16以下の緑肥の場合にその差が大きかったが、その要因については、非マメ科緑肥のC/N比が低い土壌では当初から土壌の可給態窒素量が多いためと推察される。ちなみに、窒素施肥量と窒素吸収量との回帰式から無処理区土壌の窒素供給量を推定すると、女満別が140kg ha⁻¹と最も多く、次いで津別の125kg ha⁻¹であった。このような土壌では無処理区の最適窒素施肥量も施肥標準より少なくなるので、緑肥窒素評価だけの窒素減肥では十分でないことを示唆している。

表2-22 テンサイの窒素減肥可能量の予測値と実測値の比較

緑肥のC/N比	窒素減肥可能量 (kg ha ⁻¹)					
	予測値①	実測値①	(差)	予測値②	実測値②	(差)
16以下(n=3)	40	37	(+ 3)	34	49	(-15)
16~20(n=5)	36	24	(+12)	33	28	(- 6)
20以上(n=2)	13	0	(+13)	0	0	(0)

注) 予測値①: 緑肥C/N比とすき込み量から算出

実測値①: 無施用区の最適窒素施肥量-緑肥区の最適窒素施肥量

予測値②: 緑肥・麦稈のC/N比とすき込み量から算出

実測値②: 北海道施肥標準量-緑肥区の最適窒素施肥量

表2-23 テンサイの最大糖量および最適窒素吸収量

試験地	最大糖量 (Mg ha ⁻¹)			最適窒素吸収量 (kg ha ⁻¹)		
	無処理	エンバク	レバナ	無処理	エンバク	レバナ
訓子府	10.09	-	9.84(98)	218	-	216(99)
小清水	8.91	-	9.10(102)	231	-	252(109)
南網走	10.63	10.48(99)	10.83(102)	207	211(102)	219(106)
美幌	9.64	9.75(101)	9.68(100)	202	219(108)	225(111)
女満別	10.87	10.88(100)	11.22(103)	259	266(103)	292(113)
津別	8.10	8.55(106)	8.51(105)	251	273(109)	255(102)

注) 最適窒素吸収量は最大糖量が得られるときの窒素吸収量。

() は無処理区を100とする指数。

以上のことから、緑肥または麦稈・緑肥のC/N比とすき込み量から推定した窒素減肥可能量は、C/N比によって多少の相違が認められるものの、その差は15kg ha⁻¹以内であり、現地圃場にも適用可能と判断された。

4. まとめ

緑肥または緑肥・麦稈のC/N比とすき込み量から求めた窒素減肥量の予測値がテンサイに適用できるか否か

明らかにするため、テンサイの最適窒素施肥量から得られた窒素減肥必要量（実測値）と比較した。その結果、窒素減肥可能量の予測値と実測値との差は15kg ha⁻¹以内であり、C/N比20以上の緑肥を除くと実用上問題はないものと判断された。なお、C/N比20以上の緑肥については、窒素の供給時期が遅れるため基肥窒素を減肥する必要性は認められなかった。