

第六章 総合考察

研究の発端

化学肥料の多投や農薬の使用による環境負荷が懸念される中、将来に渡る持続的な食糧生産を維持するため、環境にやさしい有機農業が見直されつつある。有機農業では、有機質肥料の肥効発現が作物の収量や品質に大きな影響を与えるが、その効果は、個々の経験による部分が大きく、安定した肥効が得られないことも多い。有機農業による農産物生産を普及・拡大するためには、科学的根拠に基づいた施肥技術を提示し、より効果的に肥料の効果を引き出すことにより、農業者が有機農業に、より取り組み易くする必要があると考えられる。

作物栽培において生育を最も大きく左右する養分は窒素であるが、従来、有機質肥料の窒素肥効を予測する試みは、リービッヒの無機栄養説に基づき、土壤微生物の分解により完全に無機化した NH_4^+ 、 NO_3^- を測定することが行われている。その一方で、土壤中生成した無機態窒素量と作物の生育が比例していない事例 (Matsumoto 1999) や、ツンドラ地帯の森林や牧草がアミノ酸を積極的に吸収・利用している報告 (Chapin et al. 1993, Nasholm et al. 1998) もあり、無機化された窒素のみを評価する従来の方法で有機質肥料を施用した土壤をはたして適切に評価できているのかについて疑問をもった。

有機質肥料は土壤に施用された後、微生物の分解によりタンパク質、ペプチド、アミノ酸を経て最終的に無機態窒素となる。したがって、有機質肥料を使用する有機栽培圃場では、化学肥料を施用する慣行栽培より、その分解過程で生成する低分子の有機態窒素が多く存在している。しかし、実際の有機栽培作物や今後普及が期待できる作物について、有機態窒素の生育への影響、吸収特性、吸収後の代謝に関する研究はこれまでほとんど行われていなかった。

そこで本研究では、植物別の有機質肥料の効果解明に向け、タンパク質の構築単位であり有機態窒素の無機化過程で必ず生成されるアミノ酸の植物による直接利用について解析を行い、植物へのアミノ酸直接吸収と、吸収したアミノ酸の植物体内での利用の経路を特定し、また無機態窒素を吸収した場合との相違点などについて検討した。

植物生育に有機態窒素はどれくらい影響を与えるか？

有機栽培がよく行われる植物について、数種類の有機質肥料を施用した栽培試験を行った結果、有機質肥料の効果は植物の種類により大きく異なり、イネ、コムギ、チンゲンサイは有機質肥料の施用効果が高く、キュウリ、トマト、ピーマンでは低いという

結果が得られた。Matsumoto ら(1999)によると、陸稲、チンゲンサイ、ソルガム、ニンジンには有機質肥料施用の効果が高いとしており、本試験に用いた有機質肥料でも、イネ、チンゲンサイはその施用効果が高い結果となった。

地上部同様、特に根系の発達について、植物や有機質肥料の種類で大きく異なり、特にイネとコムギでは有機質肥料を施用すると根系も非常によく発達するという結果が得られた。本試験は、ポット試験であったが、実際の有機実践農家の経験や、福島県農業総合センターで実際に有機栽培したイネの根(図6-1)の生育がよかった事例ともがっちしており、有機物や有機質肥料を施用すると根系が旺盛に発達することが実証できた。

この試験において、土壌の無機態窒素量と植物の窒素吸収量を比較した結果、キュウリでは無機態窒素量と窒素吸収量に高い相関がみられたが、イネ、チンゲンサイでは相関はなく、特に、有機質肥料施用区では無機態窒素施用区より生育期間を通しての土壌の無機態窒素量が少ないにもかかわらず、イネの窒素含有量は多く、イネは無機態窒素のみではなく、有機態窒素も吸収して生育していることが示唆された。

次に有機態窒素の無機化過程で必ず生成されるアミノ酸を単一窒素源として無菌栽培を行った。その結果、アミノ酸の種類によってはアミノ酸単独であっても作物は生育可能であり、アミノ酸の種類によっては向き態の窒素と同等もしくはそれ以上の生育を示すことが明らかになった。特にイネ、チンゲンサイではアミノ酸の種類で生育に対して正負の大きな影響が見られ、また、グルタミンやアスパラギンでは特に種子根や側根の生長促進が見られ、細胞分裂が活発な根端において主に吸収、蓄積していることが明らかになった。酸素の供給が制限される還元状態や低温では、微生物活性が下がり、有機物の完全分解が起こらず、アミノ酸や有機酸といった低分子の有機物が蓄積しやすいことが従来指摘されている。イネは還元状態で生育してきた植物であり、チンゲンサイやコムギは冬作物であることから、そのような環境に適応していく過程において有機態窒素をより有効に利用する形質を獲得してきたであろうことが示唆される。

アミノ酸の種類が植物生育に与える影響の違いについて

アミノ酸の生育への影響は種類によって一様ではなかった。一部のアミノ酸が無機態窒素と同等の生育を示す一方で、アミノ酸によっては強い生育阻害を引き起こすなど、生育に対して正負の大きな影響が見られた。無機態窒素以上の生育を示したのはグルタミンで、無機態窒素とほぼ同等の生育がアラニン、アルギニン、アスパラギン酸、アスパラギン、グルタミン酸、グリシン、プロリンで得られた。逆に強い生育阻害はトリプトファン、ロイシン、バリン、チロシン、メチオニン、システイン、イソロイシン、リジン、フェニルアラニンであった。

生育が良好であったグルタミン、アラニン、阻害したバリンについて、吸収や代謝の実験を行った結果、予測されるアミノ酸を吸収した後の代謝の概要は図 6-2 のように考えられた。吸収されたグルタミンは、アンモニアイオンの窒素同化とほぼ同様に GS-GOGAT 経路に取り込まれ、グルタミン酸、アスパラギン酸へアミノ基が転移し、他のアミノ酸合成の窒素源として使用されたと考えられ、アラニンを吸収したイネ幼植物では、吸収されたアラニンはグルタミンにアミノ基を転移させ、その後はグルタミンと同様な代謝経路となっていると考えられた。一方、バリンは、代謝して生成される遊離アミノ酸がロイシンのみであり、他のアミノ酸等へは代謝が進まないため体内で蓄積してしまい、生育を阻害したものと推測された。

以上の結果から、植物はいずれの種類のアミノ酸も吸収するが、吸収後の代謝過程により、植物生育にどのような影響を与えるかが決まると推察される。

有機態窒素の特徴とは

植物にとっての有機態窒素を利用するとなぜ生育が無機態窒素よりも促進されたりするのか？特に根系の発達は明らかに促進されている。その要因を明らかにするため、安定同位体標識のアミノ酸によるトレーサー実験を行った。グルタミン態窒素はアンモニアイオンと比較すると、地下部での存在率が高く、90%近くが遊離アミノ酸として存在せず、タンパク質合成等に利用されていたと思われる。グルタミン態窒素は、窒素同化の最初の段階において地上部からの光合成産物を必要とせず、地上部からの同化産物の供給に制限されることなくタンパク質や核酸などに比較的早く変換できることが示唆された。また、グルタミン態炭素は、24 時間後には半分以上が植物体から失われており、窒素をアミノ基転移により利用した後は、TCA サイクル等を経由し、二酸化炭素として放出されることが示唆された。

吸収したアミノ酸の炭素部分の呼吸により得られるエネルギーは、試算の結果、植物全体の生長に必要なエネルギーの 4.1~9.4%に相当することが明らかになった。無機態窒素は吸収後、グルタミンに変換されるのに、以下のように



地上部の同化産物(TCA 回路)からの 2-オキシグルタル酸や ATP および NADH (もしくは Fd_{red}) が必要である。それに対し、アミノ酸を吸収した場合これらの同化産物及びエネルギーを必要とせず、さらには炭素部分の呼吸によりエネルギーが供給される。

同化産物などの節約のみならず、エネルギー源としても使われることは植物の生育促進において非常に大きく、このような効果により地下部の生育が促進されたと考えられる。

以上のように、グルタミンは地上部からの同化産物を使用せずに速やかに窒素をタンパク質合成へ使用することが可能であり、さらに、炭素部分の呼吸によりエネルギーを得ることができるため、特に地下部において、取り込んだ窒素を根系発達に効率よく利用できていると結論づけられた。

有機農業で栽培した植物は根系の発達がよいことや、冷害時でも安定して収量が得られることが経験則的に知られている。この要因として、これまで、有機質肥料による土壌物理性の改良や、微生物相の多様化による生物性の改善(新田 1986)、有機酸の溶出(麻生 1971)などが指摘されているが、それに加え本研究の結果により、有機質肥料から分解されるアミノ酸が、窒素源としてのみならず、光合成産物(炭素源)の一部を代替することにより植物栄養面から根系発達を促している可能性を示すことができた。現場レベルでの吸収実験が必要であるが、有機質肥料の効果の解明につながる成果であると考えられる。

有機農業におけるアミノ酸の寄与について

本結果より、植物によってはいくつかのアミノ酸を窒素源としての生育が可能であり、無機態窒素以上の生育も可能であることが示された。本試験の結果から、有機態窒素の価値、および有機質肥料の効果的な利用に対する課題を考える。

水田土壌での遊離アミノ酸態窒素はアンモニア態窒素に対しておおよそ 1/5 から 1/100 であるが、土壌 100 g 当たり窒素として 0.1 ~ 1 mg (70 μmol ~ 700 $\mu\text{mol}/\text{kg}$ soil) で存在している。土壌中では多くの種類のアミノ酸が低濃度で混在しており、主要なアミノ酸は、アラニン、グリシン、セリン、グルタミン酸、アスパラギン酸、 α -アミノ酪酸が多いことが示されている(加藤 1970、佐藤 1984)。

しかし、アミノ酸を土壌に施肥し、その施用効率の低さから植物のアミノ酸吸収に関して否定的な報告もある(D. L. Jones et al. 2005、山室ら 1999)。これらの報告は、アミノ酸をそのまま施用したという実験であり、アミノ酸を直接一度に施用しても微生物の分解を受けて無機化してしまうことで、投入量に対し、施用効率は当然低くなる。

その一方で、アンモニア態窒素が著しく低下する時期でも土壌中のアミノ酸量は、低濃度であるが一定のレベル(70 ~ 140 $\mu\text{mol}/\text{kg}$ soil)を保っている報告(高橋 1979)や、堆肥の施用で土壌中のアミノ酸含量が、化学肥料区の 1.2 ~ 1.6 倍に増加する報告(佐藤 1984)もある。また、加藤(1970)は、水田土壌の透水液中の遊離アミノ酸濃度は 56 μM であり、圃場でのアミノ態窒素の値をもとに含水比 70%として換算すると 70 ~ 600 μM となると報告している。したがって、水田土壌中の標準的な各アミノ酸濃度は 1 ~ 50 μM と考えられ、4章で行った放射性同位体アミノ酸を用いたトレーサー実験の結果から、植物はアミノ酸を吸収していることが予想される。

また、土壤微生物のアミノ酸に対する K_m 値 7.2 ~ 233 μM (D. Lipson et al. 2001) と比較しても、本研究で得られたイネの K_m 値は 54 ~ 200 μM であり、土壤微生物を競合しながらも吸収できることが可能であるとみなされた。

有機質肥料を積極的に施用する有機農業では、土壤中のアミノ酸量も有意に増加し、従来の研究からはその濃度も持続的に維持されると考えられ、窒素の供給源の一翼を担っていることが強く示唆される。

本研究により、土壤のアミノ酸濃度を高める堆肥や有機質肥料を施用する有機農業の施肥管理技術の確立には、窒素の無機化量だけでなく、分解過程で生成するアミノ酸がより一層重要な要因になることが明らかとなった。

今後、有機質肥料の施用においては、

- ・ 無機態窒素に加え、アミノ態窒素のモニタリング
- ・ 有機質肥料の分解により供給される有効アミノ酸率や阻害アミノ酸率などの指標の導入
- ・ 有機質肥料に効果のある作物の体系的な分類

が重要であることが示され、これらをより詳細に検討することで効率的な有機質肥料の種類やその施用法を示していくことにより、確実に効果のある有機農業の実践が可能になると考えられる。



慣行栽培

有機栽培

図 6-1 福島県農業総合センターで栽培された慣行栽培と有機栽培のイネの根

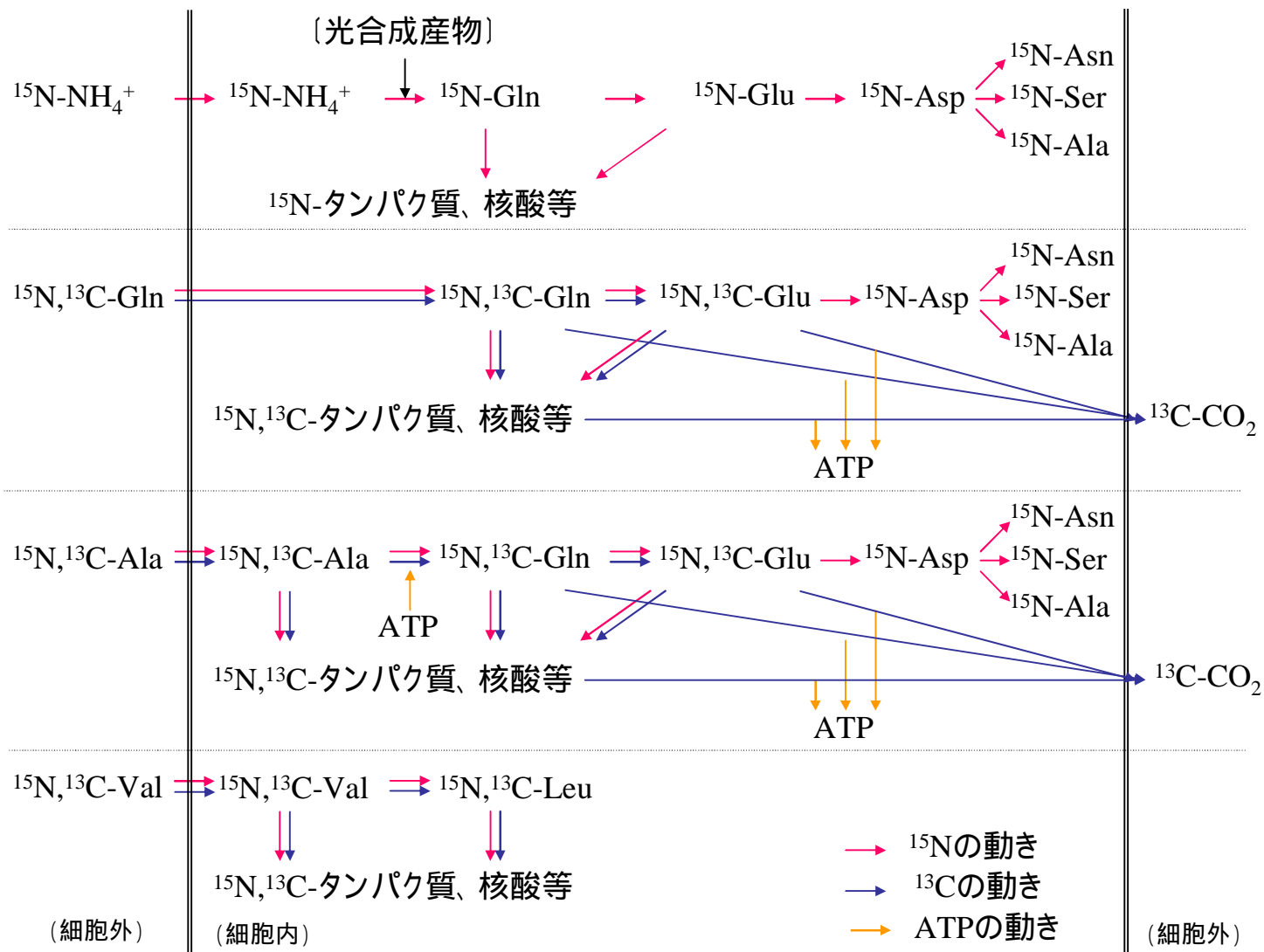


図 6-2 吸収されたアミノ酸の代謝の概要