

| | | |
|---------|---|----------------|
| 称号及び氏名 | 博士（応用生命科学） | 樽井 新 |
| 学位授与の日付 | 平成28年3月31日 | |
| 論文名 | Effect of fixed nitrogen of hairy vetch on the growth and nitrogen uptake of intercropped and subsequent gramineous crops （ヘアリーベッチの固定窒素が間作および後作イネ科作物の生育と窒素吸収に及ぼす影響） | |
| 論文審査委員 | 主査 | 大木 理 |
| | 副査 | 青木 考 |
| | 副査 | 横井 修司 |
| | 副査 | 大門 弘幸（龍谷大学農学部） |

論文要旨

緑肥作物は、土壌への有機物供給、土壌流出の軽減、後作物への窒素供給効果を持ち、化学肥料の施用に過度に依存しない低投入型の作物生産が推奨される中で、その利用の必要性が再認識されてきている。緑肥作物の多くはイネ科あるいはマメ科に属する作物であり、イネ科緑肥作物はC/N比が高く、土壌の硝酸態窒素の溶脱防止、土壌への有機物供給の効果が認められている。一方、マメ科緑肥作物はC/N比が低く、後作物への固定窒素の供給効果が期待される。両者を間作して得る緑肥としての利用（間作緑肥）は、持続的農業に取り組みはじめたアメリカやブラジルで再評価されはじめ、いくつかの作付体系への利用が報告されてきた。しかし、間作条件下における両作物間の窒素やリンの養分動態や後作物への養分供給効果を圃場試験において詳細に定量化した報告は少ない。また、イネ科作物とマメ科作物の間作において、窒素固定が旺盛な時期にマメ科の地上部を刈取ると、地下部に蓄積されている易分解性窒素が炭素ソースの消失とともに放出される可能性があるものの、その窒素供給効果の検証や実際栽培への応用についての知見は少ない。

そこで本研究では、先ず第1章において、土壌への有機物の補完に用いられる緑肥用エンバクと被覆作物として利用され始めているヘアリーベッチを間作した際の両作物の養分吸収の様態を明らかにし、ヘアリーベッチの地上部を早期に刈取ることによってエンバクの難分解性の改善と養分供給量の増加を図ることを試みた。さらに後作に養分吸収能力の高い飼

料用トウモロコシを栽培することで、間作緑肥の効果を主として窒素吸収の点から評価することを試みた。次に第2章において、生育途中のヘアリーベッチの地上部刈取りによって生じる固定窒素の間作エンバクへの移行に着目し、重窒素希釈法を用いてその移行について定量的に評価した。さらに第3章において、このような地上部刈取りの窒素移行効果について、実際の作物生産への導入の可能性を検証するために、子実タンパク質含有率の向上を目的に開花期に窒素追肥が必要なパン用コムギにおける追肥の代替技術として、ヘアリーベッチ刈取りの可能性を検討した。最後に第4章において、間作緑肥を低投入型の土地利用型作物生産へ導入した際の優位性と今後の課題について論議した。

第1章 エンバクとヘアリーベッチの間作における養分動態とトウモロコシへの緑肥効果

2009年12月4日に、エンバク‘エンダックス’とヘアリーベッチ‘まめっこ’を本学実験圃場に播種した。エンバク単作区、ヘアリーベッチ単作区、間作区、間作刈取区（ヘアリーベッチを生育盛期に刈取る）を4区3反復乱塊法で配置した。両作物を6条で（間作区では両作物を各3条交互に）点播した。間作刈取区のヘアリーベッチの刈取りは開花直前の4月10日に行い、刈取った地上部は圃場外に持ち出した。5月13日に両作物を収穫し、一部を採取して乾物重と養分吸収量を調査した。なお、各構成作物に対する間作の効果は、間作における養分吸収量を単作区の値を基準として算出した相対収量（RY）（0.5以上で間作の効果があること示す）で評価した。刈取った地上部は細断して速やかにすき込み、20日間の腐熟期間を設け、6月2日に後作物としてトウモロコシ‘ゴールドデントKD850’を播種した。9月22日に収穫して、乾物重と養分吸収量を調査した。また、すき込み直後から土壤溶液を採取し、無機態窒素含有率の経時的变化を調査した。さらに、リターバック法を用いて圃場条件下の緑肥の分解過程を量的に評価することを試みた。

ヘアリーベッチの刈取り後7日目の間作刈取区のエンバクの茎数は、他の区に比べて著しく増加した。また収穫時における間作刈取区のエンバクのRYは乾物重で0.79、全窒素含有量で1.04、全リン含有量で0.99と、いずれも0.5以上の高い値を示し、刈取り直後からヘアリーベッチの地下部からエンバクへ窒素が移行して生育を促進したことが示唆された。有機物の分解特性の指標となるC/N比は36.6と単作区の48.3に比べて低く、鋤き込み後のリターバック試験においても、間作刈取区のエンバク中の窒素、炭素成分はエンバク単作区に比べて早く減少し、ヘアリーベッチの地上部刈取りによる窒素供給によって難分解性であるエンバクが分解されやすくなる可能性が示唆された。しかし、間作刈取区の後作トウモロコシの養分吸収量は、ヘアリーベッチ単作区や間作区と比較して低く、養分供給量の増大量は限定的であることが示唆された。

緑肥作物の乾物重、全窒素含有量と全リン含有量は間作区で最も高く、間作によって後作への有機物供給量と養分供給量が増大することが示唆された。すき込み後に経時的に採取した土壤溶液の無機態窒素含有率は、エンバクのみを鋤き込んだエンバク単作区と間作刈取区に比べてヘアリーベッチ単作区と間作区ではすき込み直後から高く推移した。後作トウモロコシの生育初期の葉色値は、ヘアリーベッチ単作区と間作区では他の区に比べて5~10程度高い傾向がみられた。また、収穫時の単位面積当たりの乾物重、全窒素含有量

および全リン含有量は、ヘアリーベッチ単作区と間作区で高く、後作物の養分吸収量からも間作緑肥の養分供給能力は高いことが示された。

第2章 ヘアリーベッチから間作エンバクへの窒素移行量の評価

2010年11月29日にエンバクとヘアリーベッチを上記と同様に播種した。上記の処理区に加えて、ヘアリーベッチの地上部刈取りによるエンバクへの固定窒素の移行を詳細に検証するために、間作刈取区の対照区としてエンバク刈取区（エンバク単作区においてその半数を刈取る区）を設けた。簡易積算日射量測定フィルムを用いて、群落内の積算日射量を、草冠部日射量を基準とした相対値で表し、間作区における両作物間での光競合の様態を明らかにした。ヘアリーベッチからの窒素移行量を定量するために、重窒素で標識した硫酸アンモニウム（10.0 atom%）を試験区内のマイクロプロットに 3 g N m^{-2} 施用し、重窒素希釈法を用いて間作およびヘアリーベッチの刈取りによるエンバクへの窒素移行量を評価した。

第1章の試験結果と同様にヘアリーベッチの刈取り後にエンバクの茎数が著しく増加した。収穫時における間作刈取区のエンバクのRYは、単位面積当たりの乾物重で0.69、全窒素含有量で0.83といずれも0.5以上の高い値を示した。間作区に比べて間作刈取区では群落内の中間部と地表面の相対積算日射量が高く推移し、刈取りによって両作物間の光競合が著しく軽減され、窒素移行に加えて、刈取りによる光競合の消去もエンバクの生育促進の一因であることが示された。重窒素分析の結果から、間作区で 0.8 g m^{-2} の窒素が、さらに間作刈取区では 2.7 g m^{-2} の窒素がそれぞれエンバクに移行したことが試算された。なお、エンバク刈取区のRYは、乾物重、全窒素含有量ともに約0.5で、重窒素濃度は単作区と同程度であり、非マメ科作物のエンバクの地下部からの窒素移行は認められないことが示され、このことからヘアリーベッチの固定窒素の移行によりエンバクの生育が促進されたことが明確となった。

第3章 パン用コムギの窒素追肥の代替としてのヘアリーベッチ地上部刈取りの効果

2013年11月23日にパン用コムギ‘ミナミノカオリ’とヘアリーベッチを本学実験圃場内にある水田転換畑に各プロット6条で播種し、間作刈取区では6条のうち中央の2条をヘアリーベッチとした。処理区として、慣行栽培を想定した無機窒素追肥区、有機栽培における慣行栽培を想定した有機窒素追肥区、間作刈取区、無施肥区の4区を設け3反復乱塊法で配置した。コムギの開花期にあたる2014年4月26日に、無機窒素追肥区では硫酸アンモニウムを 4 g N m^{-2} 、有機窒素追肥区では、市販の認定有機質肥料Gを可給態窒素で 4 g N m^{-2} 相当量をそれぞれ施用し、間作刈取区ではヘアリーベッチの茎葉部を地際から刈取り地表面に敷設した。さらにヘアリーベッチの茎葉部の一部を用いてリターバックを作成し、地上部からの窒素放出量を推定した。6月4日にコムギを刈取り、乾物重、養分吸収量、子実収量、収量構成要素、子実のタンパク質含有率を調査した。

無機窒素追肥区の葉色値と茎数は他の処理区に比べて明らかに高かった。有機窒素追肥区と間作刈取区では葉色値の著しい増加は認められなかったものの、無施肥区と比べて開花期以降の葉色値の減少程度が緩やかであった。間作刈取区では収穫時においても、ヘアリーベッチに近い内側に位置する条のコムギの止葉の葉色は、遠い外側の条に比べて明ら

かに濃く、両条間でヘアリーベッチからの窒素供給量の差異が生じることが推察された。子実タンパク質含有率は、無施肥区に比べて両追肥区および間作刈取区で高く、特に間作刈取区のヘアリーベッチに近い側の条では最も高い値を示した。間作刈取区のRY（本実験では0.67以上で間作の効果があること示す）は、地上部乾物重、全窒素含有量、子実収量においてそれぞれ0.83, 0.93, 0.77といずれも0.67以上の値であった。リターバック実験の結果から、ヘアリーベッチの茎葉部に含まれる窒素の64.8%相当の4.9 g m²の窒素がコムギ収穫時まで放出されたことが示唆された。間作刈取区のコムギ収穫残渣のC/N比は、ヘアリーベッチの残渣もあわせると37.4と他の処理区に比べて明らかに低く、ヘアリーベッチとの間作は、麦稈の鋤き込みによりしばしば見られる後作物の窒素飢餓も緩和できる可能性が示唆された。

第4章 総合考察

本研究では、ヘアリーベッチとイネ科作物を間作すると、両作物の地上部の養分吸収量がそれぞれの単作区に比べて増大し、間作によって緑肥作物の養分供給能が向上することが示された。その要因として、両作物の光に対する地上部の相互作用による生育促進や土壌養分の効率的利用が考えられた。間作緑肥のすき込み後のトウモロコシの養分吸収量は高く窒素施肥量削減の可能性が示唆された。ヘアリーベッチの生育旺盛な時期の地上部刈取りによる窒素供給によって、間作したエンバクの茎数と窒素吸収量は増加し、10 aあたり約2.7 kgの窒素が移行したことが示され、エンバクとヘアリーベッチの間作体系においても窒素施肥量の削減の可能性を量的に示すことができた。また、パン用コムギとの間作試験においては、ヘアリーベッチの近傍に位置するコムギに限られたものの、子実のタンパク質含有率は明らかに高くなり、硬質系コムギにおいて必須な開花期における窒素追肥の代替技術として応用できる可能性が示され、無機化学肥料の使用が制限される有機栽培におけるパン用コムギの生産への応用が期待された。

審査結果の要旨

緑肥作物は土壌への有機物供給、土壌流出の軽減、後作物への養分供給などの効果を持ち、化学肥料の施用に過度に依存しない低投入型作物生産が推奨される中で必要性が再認識されている。緑肥作物には一般にイネ科あるいはマメ科の作物が利用されるが、イネ科作物はC/N比が高く、土壌の硝酸態窒素の溶脱防止、有機物供給の効果が認められ、一方、マメ科作物はC/N比が低く、根粒菌との共生窒素固定による窒素の供給効果が期待される。この両者を間作して得る緑肥（間作緑肥）は、大規模な持続的農業に取り組むアメリカやブラジルで導入されているが、間作作物間の養分動態や後作物への養分供給効果を圃場試験において定量化した報告は少ない。また、間作において窒素固定が旺盛な時期にマメ科の地上部を刈取ると炭素ソースの消失とともに地下部に蓄積された易分解性窒素が放出さ

れる可能性があるものの、イネ科への窒素供給効果の検証はなされておらず、実際栽培への応用のための知見の集積が必要である。

そこで本研究では、まず有機物の補完に用いられる緑肥用エンバクと被覆作物として利用され始めているヘアリーベッチを間作した際の両作物の養分吸収の様態を明らかにし、ヘアリーベッチの地上部を刈取ることによるエンバクの難分解性の改善と養分供給量の増加の可能性を検証した。また、トウモロコシを後作として栽培し、間作緑肥の効果を養分吸収の点から評価した。その結果、ヘアリーベッチの刈取り後7日目には間作しているエンバクの茎数が増加し、収穫時のエンバクの相対収量 (RY) は乾物重で**0.79**、全窒素含有量で**1.04**、全リン含有量で**0.99**と、いずれも間作効果が認められるとされる**0.5**以上の高い値を示し、窒素が刈取り直後からヘアリーベッチからエンバクへ移行することが示された。間作エンバクのC/N比は**36.6**と低く、分解程度を評価するリターバック試験においても間作刈取区の緑肥中の窒素、炭素成分はエンバク単作区に比べて早く減少し、ヘアリーベッチの地上部刈取りによりエンバクが緑肥として分解されやすくなることが示された。また、後作トウモロコシの全窒素含有量からも、間作緑肥の養分供給能力が著しく高いことが示された。

次に、生育途中のヘアリーベッチの地上部刈取りによって生じる固定窒素の間作エンバクへの移行に着目し、重窒素希釈法を用いてその移行を量的に評価した。ヘアリーベッチの刈取り直後からエンバクの茎数が増加し、RYは**0.5**以上の高い値を示し、明確な間作効果が認められた。窒素移行量には土壤中での拡散と条間**25 cm**で間作した両作物根系の接触が制限要因となる可能性があるが、重窒素分析の結果から間作区で**0.8 g m⁻²**の窒素が、さらに間作刈取区では**2.7 g m⁻²**の窒素がそれぞれエンバクに移行することが示された。なお、間作刈取区では群落内の中間部と地表面の相対積算日射量が高く推移し、刈取りによって両作物間の光競合が軽減されることも生育促進の一因であることが示された。

さらに、地上部刈取りによる窒素移行効果の実際の作物生産への導入可能性を検証するために、子実タンパク質含有率向上のために開花期に窒素追肥が必要なパン用コムギにおける追肥の代替技術としてのヘアリーベッチ刈取りの効果を検証した。その結果、間作刈取区ではヘアリーベッチに近い内側に位置する条のコムギの止葉の葉色は外側の条に比べて明らかに濃く、収穫時の子実タンパク質含有率も高い値を示した。リターバック試験から、ヘアリーベッチに含まれる窒素の**64.8%**相当の**4.9 g m⁻²**の窒素がコムギ収穫時まで放出されることが示され、パン用コムギにおける追肥代替技術として利用できる可能性が示された。無機化学肥料の使用が制限される有機栽培パン用コムギ生産への応用が期待される。

以上のように、本研究では、ヘアリーベッチとエンバクあるいはコムギを間作すると、緑肥作物の養分供給能が向上することが実証された。要因としてはヘアリーベッチから間作イネ科作物への窒素の移行が生育盛期のヘアリーベッチの刈取りにより増強されることがあげられ、圃場試験における量的評価により**10 a**あたり**3 kg**程度の窒素が移行する可能性が示された。本研究で緑肥資源の生産を目的に間作される両科作物間の養分動態を明らかにした点は資源循環型農作物生産を進める上の基盤として重要であり、実際のコムギ生産への応用が期待される点からも評価される。これらの研究成果は、環境調和型作物生産

技術を展開するための基盤的知見として重要であり、作物栽培学に大きく貢献するものである。したがって、最終試験の成績と併せて博士（応用生命科学）の学位を授与することを適当と認める。