

(続紙 1)

京都大学	博士 (農 学)	氏名	Reza Ramdan Rivai
論文題目	Studies on the enhancement of <i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench as a biomass crop through sustainable nutrient management (養分管理によるバイオマス作物ソルガムの特性向上に関する研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>ソルガム [<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench] は食料、飼料、緑肥作物等の用途で古くから世界中で栽培されてきたイネ科作物であり、そのバイオマス生産性の高さから、近年エネルギー作物としても注目を集めている。ソルガムは環境ストレス耐性が高く、イネやコムギの栽培に適さない不良環境下でも一定の収量を得ることが期待できる。このためインドネシアでは、熱帯林の伐採跡地等に発生した未利用荒廃草原においてソルガムを栽培し、バイオマス燃料生産に用いることが検討されている。施肥量とソルガム収量の関係については既に多くの研究例がある一方、養分供給がソルガムバイオマスの性質に及ぼす影響に関する情報は乏しい。本論文では、下記4項目の研究を通じ、ソルガムバイオマスの利用特性を養分管理により向上させる可能性について検討した。主な内容は以下のとおりである。</p> <p>第1章では、ソルガムの窒素栄養診断に有用なバイオマーカーの探索を行なった。短期間に急速に生長するバイオマス作物の栽培において、良好な収量を得るためには窒素肥料の施用が事実上必須である。一方で過剰な施肥は硝酸塩の溶脱による環境の富栄養化や農地からの一酸化二窒素の発生等をもたらす環境負荷を増大させるので、施肥量は適切に制御されなければならない。このためソルガムの窒素充足度を正確に判断する栄養診断法の確立が求められる。本研究では、まず水耕栽培幼植物を用いた検討により、葉身クロロフィル含量を反映するsoil-plant analysis development (SPAD) 値および特定の遺伝子の発現量が、ソルガムの窒素栄養状態を迅速に反映する指標となることが明らかにされた。続いて野外環境で複数品種を登熟期まで栽培し、これらの指標と窒素栄養状態の相関について検討した。その結果、SPAD値はいずれの品種においても施肥窒素レベルと合致した変化を示し、計測値の日周変動も小さかったことから、実際の栽培環境でもソルガムの窒素栄養状態の有用な指標となり得ることが示された。</p> <p>第2章では、窒素欠乏がソルガムバイオマスの主要成分である細胞壁の性質に及ぼす影響について解析した。低窒素培地および対照培地でソルガム幼植物を水耕栽培し、それらの細胞壁の組成と構造を、化学分析、多次元核磁気共鳴スペクトル分析および免疫組織化学分析により比較した。その結果、低窒素培地で栽培したソルガム幼植物では対照に比べ二次細胞壁が肥厚し、アラビノキシラン、(1→3), (1→4)-β-D-グルカン等のヘミセルロース含量が増加していた。この変化は窒素欠乏条件下で相対的に余剰となった固定炭素が細胞壁多糖の形で貯蔵された結果と推定された。リグニンについては、低窒素条件でも含量は変化しなかったが、チオアシドリシスで生成す</p>			

るリグニン由来モノマーのシリングル／グアイアシル比が低下したことから、芳香核組成が変化すること、すなわちリグニンの構造に変化が生じることが示された。また遺伝子発現解析の結果、低窒素条件で細胞壁多糖およびリグニンの生合成や代謝に関連する遺伝子の発現量に変化することが見出された。以上より、窒素欠乏はソルガムの細胞壁組成に変化をもたらすことが明らかとなった。

第3章では、ケイ素の吸収量がソルガム細胞壁の性質に及ぼす影響について解析を行った。ケイ素は葉身にシリカとして蓄積し、植物体の強度を高めると考えられている。リグニンも植物体の強度維持に関与する。従ってケイ素の吸収量は細胞壁リグニン含量に影響する可能性がある。そこでソルガムをケイ素添加 (+Si) または無添加 (-Si) 培地で水耕栽培し、第2章と同様の手法で細胞壁の分析を行った。その結果、-Si処理は細胞壁ケイ素含量を低下させるとともに、リグニン含量およびシリングル／グアイアシル比を増加させることが明らかにされた。トランスクリプトーム解析から、これら変化の少なくとも一部は、リグニン合成に関連する転写調節因子や酵素の遺伝子発現変化によることが示唆された。葉鞘部の機械的強度、元素組成から推定される細胞壁の高位発熱量はいずれも-Si植物で+Si植物より高く、-Si植物でよりリグニン含量が高いことと整合していた。以上のように、ソルガムにおいてケイ素の吸収量は、細胞壁リグニン含量への影響を通じバイオマスの特性を変化させる要因であることが明らかとなった。

第4章では、栽培時のケイ素供給がソルガム地上部の硝酸態窒素含量に及ぼす影響について検討した。反芻動物は、硝酸態窒素含有量が高い飼料を与えられるとメトヘモグロビン血症などの中毒症状を発生する可能性がある。したがってソルガムを家畜飼料として利用するにあたっては、地上部における硝酸態窒素の蓄積を抑制することが重要である。本研究では、ケイ素添加培地で栽培したソルガムの地上部硝酸イオン含量は、ケイ素無添加培地で栽培したソルガムに比較して有意に低いことが見出された。その機構について検討した結果、ケイ素供給条件下では硝酸イオン吸収輸送体の発現が抑制されることが明らかとなった。培地へのケイ素添加はソルガムの生育、地上部ミネラル含量、細胞壁の酵素糖化性には影響せず、タンパク含量は増加させる傾向があった。以上の結果から、ソルガムを家畜飼料として利用する場合、栽培時に十分量のケイ素を供給することで、飼料としての品質を損なうことなく硝酸態窒素の蓄積を抑制し得ることが示唆された。

注) 論文内容の要旨と論文審査の結果の要旨は1頁を38字×36行で作成し、合わせて、3,000字を標準とすること。

論文内容の要旨を英語で記入する場合は、400～1,100 wordsで作成し
審査結果の要旨は日本語500～2,000字程度で作成すること。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

化石燃料の代替としてバイオマス燃料に対する関心と需要が高まる中で、ソルガムはその主要な原料作物のひとつとして注目されている。本論文では、まずソルガムバイオマスの安定的・持続的な生産に資する栄養診断法の開発を目的として、ソルガムの窒素欠乏状態を早期に検出するバイオマーカーの探索が行なわれた。また生産されるバイオマスの特性に対する養分供給の影響を解明するため、窒素およびケイ素の供給量が細胞壁の組成・構造等に及ぼす効果について解析が行われた。主要な成果として評価できる点は以下のとおりである。

1. SPAD値および特定の遺伝子の発現量が、ソルガムの窒素欠乏状態を迅速かつ鋭敏に反映することを見出した。特にSPAD値については実際の栽培環境でも有用な窒素栄養状態マーカーとなり得ることを実証した。
2. 窒素欠乏がソルガム細胞壁の多糖画分の組成を変化させることを見出し、窒素栄養状態はソルガムの生産量のみならず、得られるバイオマスの利用特性にも影響する要因であることを明らかにした。
3. ケイ素の供給制限がソルガム細胞壁のリグニン含量を増加させることを実証し、ケイ素吸収の人為的制御がソルガムバイオマスの利用特性改善の手段となる可能性を示した。
4. 十分量のケイ素を吸収したソルガムでは地上部の硝酸態窒素含量が低下することを見出し、ソルガムを家畜飼料として利用する際にはケイ素供給が有益な効果をもたらすことを明らかにした。

以上のように本論文は、栄養生理学の観点からソルガム生産における養分管理の手法、意義に関し多数の重要な知見を与えるものであり、植物栄養学、植物バイオマス科学および植物生理学の発展に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（農学）の学位論文として価値あるものと認める。

なお、令和 4 年 2 月 17 日、論文並びにそれに関連した分野にわたり試問した結果、博士（農学）の学位を授与される学力が十分あるものと認めた。

注) 論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。

ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降 (学位授与日から3ヶ月以内)