

学位論文題名

Changes in the saccharides and
nitrogenous compounds during malting in
barley grains of different nitrogen status

(異なる窒素条件から得た大麦穀粒を用いた麦芽製造工程における
糖および窒素化合物の変化)

学位論文内容の要旨

大麦穀粒を加工して製造される麦芽は、ビール原料のみならず、食品原料および飲料原料として幅広く利用されている。麦芽製造工程は浸麦工程、発芽工程および焙燥工程の、大きく3つのステップより構成されている。浸麦工程で水分を43-48%程度まで供給した後、4日間-6日間の発芽工程において、多糖類やタンパク質の分解を促進させ、発酵で酵母の栄養源となる各種低分子化合物を生成する。発芽させた大麦穀粒は焙燥工程にて、水分を5%前後まで乾燥を進めて貯蔵性を高めると同時に、麦芽特有の色および香気成分を付与する。

ビール醸造に使用される麦芽の品質は、酵母の発酵に影響を及ぼす糖の組成および含有率、可溶性窒素(SN: Soluble Nitrogen)の含有率に加えて、色や香気成分、砕け易さといった加工特性も含めて総合的に評価される。また、ビール中の香気成分の一つとして知られているジメチルフルフィド(DMS)は、野菜の茹で汁様の臭いと表現されることがあり、しばしば不快な香気成分として捉えられる。DMSは主としてS-メチルメチオニン(SMM)より生成されるため、発芽過程でのSMM生成に影響を及ぼす因子を明らかにした上で、その含有率を調節することが求められる。

上記麦芽製造工程に影響を及ぼす因子として、大麦穀粒中の窒素含有率が挙げられ、それは通常1.5-2.2%の範囲にある。例えば、窒素含有率が高い大麦穀粒においては、発芽における高分子化合物の分解が進みづらく、一方で窒素含有率が低い大麦穀粒においてはその分解が進みやすいものと考えられており、窒素含有率は加工者にとって重要なパラメーターの一つとなることから、加工にあたってはその特性を十分に把握しておく必要がある。

大麦穀粒の窒素含有率は栽培環境により大きな影響を受けるが、その中でも植物体に供給される窒素栄養は重要であり、施肥管理により調節し得る因子である。窒素含有率の影響についての報告は過去にもあるものの、厳密な栄養管理の下で実施された試験は少なく、またその際の糖やアミノ酸の挙動について詳細に報告したものはない。大麦穀粒の窒素含有率が麦芽品質、ひいてはビール品質に及ぼす影響を明らかにするために、1) 圃場施肥試験を通じた麦芽品質調査、および2) ポット試験を通じた麦芽製造工程における糖、アミノ酸、S-メチルメチオニンの調査、を実施した。主な結果は以下の通りである。

1) 圃場施肥試験を通じた麦芽品質調査

窒素肥料の施与量および時期を変更して栽培した結果、施与量の増加および施与時期の遅延により、得られた大麦穀粒中の窒素含有率が有意に高められた。

その大麦穀粒を用いて製造された麦芽において、穀粒中の窒素含有率が高まると麦芽のSNも高くなっており、タンパクの分解には大きな影響を及ぼさなかった一方で、大麦種子中の細胞壁構成成分であるβ-グルカンが麦芽中にも多く残存しており、その分解を抑制することが確認された。タンパク質の分解産物であるアミノ酸の中で、SMMの前駆体となるメチオニン (Met) 含有率は麦芽において差が認められなかったが、窒素施与を最も少なく設定した試験区においてSMM含有率が高くなっていた。

2) ポット試験を通じた麦芽製造工程における糖、アミノ酸、SMMの調査

窒素および硫黄の施与水準をそれぞれ設けて、ポット栽培を実施し、それより得られた大麦穀粒を用いて、麦芽製造工程において糖、アミノ酸、SMMおよび、その生成に関与する酵素活性について、経時的に調査を実施した。

窒素施与量の増加により、圃場試験にける結果よりも明確に、穀粒中の窒素および硫黄含有率が増加したが、硫黄施与量の増加については、両成分の含有率への影響は認められなかった。

大麦種子中の主要多糖であるデンプンおよびβ-グルカンについて、前者は穀粒中の窒素含有率の増加に伴って減少していた。一方、後者は穀粒中の窒素含有率と同調し、その含有率が増加していた。デンプン分解に関与するα-アミラーゼの活性は窒素含有率による影響は認められなかったが、β-アミラーゼについては窒素含有率の増加により、その活性の増加が認められた。デンプンの分解産物である発酵性糖（グルコース、フルクトース、スクロース、マルトースおよびマルトトリオース）の含有率は、窒素含有率による影響をほとんど受けなかったことから、β-アミラーゼ活性の影響は、麦芽製造工程以降のビール製造工程での糖分解により大きな影響を及ぼすものと推察された。β-グルカン分解に関わるβ-グルカナナーゼの活性は、発芽工程の後期に、窒素含有率が高い大麦でやや高くなる結果となったが、残存するβ-グルカン含有率も高くなることから、本酵素活性がβ-グルカン分解の律速とはならないものと考えられた。

タンパク質分解と、それに対応するアミノ酸生成は穀粒中のプロテアーゼにより進行する。発芽工程初期においては、窒素含有率が高い場合に、全アミノ酸含有率も高くなっていた。しかしながら、発芽の進行に伴い、特に低窒素の条件でプロテアーゼ活性の上昇が著しく、最終的に穀粒中の全アミノ酸含量は窒素含有率による差が認められなかった。酵母の栄養確保という観点においては、窒素含有率の高い穀粒が望ましいが、その含有率によって分解の程度が異なることには留意しなければならない。

SMMは発芽工程中にMetより生成され、焙燥工程において一部、熱による分解を受ける。窒素含有率が高い穀粒では、発芽工程におけるSMM生成量も多く、最終的な麦芽においても含有率が高くなっていた。本結果により、窒素施与量を増加して、穀粒中の窒素含有率が高まるとSMM含有率も同調して高くなることが明らかとなった。一方で、圃場試験では逆の結果となったこと、製造工程において穀粒へMetを添加した場合にSMM含有率が高くなることから、SMM含有率に影響を及ぼす因子としては窒素栄養だけではなく他の栄養素を含む栽培環境の影響も少なくないと考えられた。

本研究により、大麦栽培における窒素施与による大麦穀粒の窒素含有率への影響、さらには麦芽製造工程における種子中の貯蔵物質の分解と、引き続き生成した各種糖、アミノ酸、SMMの変化

を明らかにすることができた。この知見は、実際に産業規模で麦芽を製造する場合においても有用なものとなる。特に SMM 含有率については高窒素条件で高まること、前駆体の Met の影響を考えた場合には硫黄施与による影響も考えられることから、適切なバランスで各栄養素を供給することで、ビールに望まれる SMM 含有率を実現できる可能性が示唆された。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 大 崎 満
副 査 教 授 波 多 野 隆 介
副 査 教 授 信 濃 卓 郎
副 査 助 教 渡 部 敏 裕

学 位 論 文 題 名

Changes in the saccharides and nitrogenous compounds during malting in barley grains of different nitrogen status

(異なる窒素条件から得た大麦穀粒を用いた麦芽製造工程における糖および窒素化合物の変化)

本論文は英文 67 頁、図 9、表 14、4 章からなり、参考論文 1 編が付されている。

大麦穀粒を加工して製造される麦芽は、ビール原料のみならず、食品原料および飲料原料として幅広く利用されている。麦芽製造工程は浸麦工程、発芽工程および焙燥工程の、大きく 3 つのステップより構成されている。浸麦工程で水分を 43-48%程度まで供給した後、4 日間-6 日間の発芽工程において、多糖類やタンパク質の分解を促進させ、発酵で酵母の栄養源となる各種低分子化合物を生成する。発芽させた大麦穀粒は焙燥工程にて、水分を 5%前後まで乾燥を進めて貯蔵性を高めると同時に、麦芽特有の色および香気成分を付与する。

ビール醸造に使用される麦芽の品質は、酵母の発酵に影響を及ぼす糖の組成および含有率、可溶性窒素 (SN: Soluble Nitrogen) の含有率に加えて、色や香気成分、砕け易さといった加工特性も含めて総合的に評価される。また、ビール中の香気成分の一つとして知られているジメチルフルフィド (DMS) は、野菜の茹で汁様の臭いと表現されることがあり、しばしば不快な香気成分として捉えられる。DMS は主として S-メチルメチオニン (SMM) より生成されるため、発芽過程での SMM 生成に影響を及ぼす因子を明らかにした上で、その含有率を調節することが求められる。

上記麦芽製造工程に影響を及ぼす因子として、大麦穀粒中の窒素含有率が挙げられ、それは通常 1.5-2.2%の範囲にある。例えば、窒素含有率が高い大麦穀粒においては、発芽における高分子化合物の分解が進みづらく、一方で窒素含有率が低い大麦穀粒においてはその分解が進みやすいものと考えられており、窒素含有率は加工者にとって重要なパラメーターの一つとなることから、加工にあたってはその特性を十分に把握しておく必要がある。

大麦穀粒の窒素含有率は栽培環境により大きな影響を受けるが、その中でも植物体に供給される窒素栄養は重要であり、施肥管理により調節し得る因子である。大麦穀粒の窒素含有率が麦芽品質、ひいてはビール品質に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、1) 圃場施肥試

験を通じた麦芽品質調査、および2) ポット試験を通じた麦芽製造工程における糖、アミノ酸、S-メチルメチオニンの調査、を実施した。

1) 圃場施肥試験を通じた麦芽品質調査

窒素肥料の施与量および時期を変更して栽培した結果、施与量の増加および施与時期の遅延により、得られた大麦穀粒中の窒素含有率が有意に高められた。

その大麦穀粒を用いて製造された麦芽において、穀粒中の窒素含有率が高まると麦芽のSNも高くなっており、タンパクの分解割合には大きな影響を及ぼさなかった一方で、大麦種子中の細胞壁構成成分である β -グルカンが麦芽中にも多く残存しており、その分解を抑制することが確認された。タンパク質の分解産物であるアミノ酸の中で、SMMの前駆体となるメチオニン (Met) 含有率は麦芽において差が認められなかったが、窒素施与を最も少なく設定した試験区においてSMM含有率が高くなっていた。

2) ポット試験を通じた麦芽製造工程における糖、アミノ酸、SMMの調査

窒素および硫黄の施与水準をそれぞれ設けて、ポット栽培を実施し、それより得られた大麦穀粒を用いて、麦芽製造工程において糖、アミノ酸、SMM および、その生成に関与する酵素活性について、経時的に調査を実施した。

窒素施与量の増加により、圃場試験にける結果よりも明確に、穀粒中の窒素および硫黄含有率が増加したが、硫黄施与量の増加については、両成分の含有率への影響は認められなかった。大麦種子中の主要多糖であるデンプンおよび β -グルカンについて、前者は穀粒中の窒素含有率の増加に伴って減少していた。一方、後者は穀粒中の窒素含有率と同調し、その含有率が増加していた。デンプン分解に関与する α -アミラーゼの活性は窒素含有率による影響は認められなかったが、 β -アミラーゼについては窒素含有率の増加により、その活性の増加が認められた。デンプンの分解産物である発酵性糖 (グルコース、フルクトース、スクロース、マルトースおよびマルトトリオース) の含有率は、窒素含有率による影響をほとんど受けなかったことから、 β -アミラーゼ活性の影響は、麦芽製造工程以降のビール製造工程での糖分解により大きな影響を及ぼすものと推察された。 β -グルカン分解に関わる β -グルカナーゼの活性は、発芽工程の後期に、窒素含有率が高い大麦でやや高くなる結果となったが、残存する β -グルカン含有率も高くなることから、本酵素活性が β -グルカン分解の律速とはならないものと考えられた。

タンパク質分解と、それに対応するアミノ酸生成は穀粒中のプロテアーゼにより進行する。発芽工程初期においては、窒素含有率が高い場合に、全アミノ酸含有率も高くなっていた。しかしながら、発芽の進行に伴い、特に低窒素の条件でプロテアーゼ活性の上昇が著しく、最終的に穀粒中の全アミノ酸含量は窒素含有率による差が認められなかった。酵母の栄養確保という観点においては、窒素含有率の高い穀粒が望ましいが、その含有率によって分解の程度が異なることには留意が必要となる。

SMMは発芽工程中にMetより生成され、焙燥工程において一部、熱による分解を受ける。窒素含有率が高い穀粒では、発芽工程におけるSMM生成量も多く、最終的な麦芽においても含有率が高くなっていた。本結果により、窒素施与量を増加して、穀粒中の窒素含有率が高まるとSMM含有率も同調して高くなることを証明した。一方で、圃場試験では逆の結果となったこと、製造工程において穀粒へMetを添加した場合にSMM含有率が高くなることから、SMM含有率に影響を及ぼす因子としては窒素栄養だけではなく他の栄養素を含む栽培環境が影響しうる可能性が示唆された。

以上、本研究は、大麦栽培における窒素施与による大麦穀粒の窒素含有率への影響、さらには麦芽製造工程における種子中の貯蔵物質の分解と、引き続き生成した各種糖、アミノ酸、SMMの変化を明らかにした。本知見により、産業規模での麦芽を製造における品質管理に資するも

のである。特に SMM 含有率については高窒素条件で高まること、前駆体の Met の影響を考えた場合には硫黄施与による影響も考えられることから、適切なバランスで各栄養素を供給することで、ビールに望まれる SMM 含有率を実現できることが期待される。
よって審査員一同は、七森理仁が博士（農学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認めた。