OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

| | |
|---|---|
| Title | 加熱処理による大麦由来 Lipid transfer protein 1 および Lipid transfer protein 1b の物性変化および翻訳後修飾の包括的解析とビールの泡沫品質に与える影響の解明 |
| Author(s) | 水口, 潤哉 |
| Citation | 大阪大学, 2026, 博士論文 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://doi.org/10.18910/105402 |
| rights | |
| Note | |

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

# 論　文　内　容　の　要　旨

| 氏　名　（　水口　潤哉　） | |
|---|---|
| 論文題名 | 加熱処理による大麦由来Lipid transfer protein 1およびLipid transfer protein 1bの物性変化および翻訳後修飾の包括的解析とビールの泡沫品質に与える影響の解明 |

論文内容の要旨

**第一章　序論**　ビールは世界で最も消費されているアルコール飲料であり、高い品質が求められる。一般的な醸造工程は、製麦、糖化、煮沸、発酵といった一連の工程で構成され、各工程の厳密な管理が製品の品質を左右する。ビールの泡沫は、視覚的な効果にとどまらず、風味の向上、独特の口当たり、そして酸化防止のバリア機能を持つ極めて重要な品質因子である。麦芽由来のタンパク質がビールの泡立ちおよび泡持ち（泡沫安定性）などの泡沫特性に寄与していることが知られている。タンパク質は、泡の気液界面に吸着し、粘弾性のある膜を作ることで、泡を安定化させる。泡沫形成に寄与する大麦由来タンパク質の中でも、高い熱安定性を有するLipid transfer protein 1 (LTP1)と、LTP1にオキシリピンが結合したLTP1bの重要性が指摘されている。これまでの先行研究では、LTP1/ LTP1b の界面活性、表面疎水性、流体力学的半径およびグリケーション、オキシリピンの解離などの、物性および翻訳後修飾に加熱処理が与える影響が個別に報告されてきた。しかし、実際の醸造過程では複数の特性変化が同時に生じるため、泡沫特性との関係を包括的に解析する必要がある。そこで本研究では、煮沸処理前後のLTP1/LTP1bの物性変化および翻訳後修飾を分析し、泡沫特性との関連性を解明した。

**第二章　加熱処理によるLTP1/LTP1bの物性および翻訳後修飾と泡沫特性の変化**　本章では、ビール泡沫に関わるLTP1とそのオキシリピン結合型であるLTP1bについて、煮沸による物性変化および翻訳後修飾を包括的に評価し、泡沫特性に関与する特性変化と修飾を特定した。まず、一番麦汁から、グリケーションレベルが同程度のLTP1 およびLTP1bを多段階のクロマトグラフィーによって精製した。精製後のタンパク質溶液を比較したところ、加熱前はLTP1bがLTP1よりも優れた起泡性と泡沫安定性を示したが、加熱処理後はLTP1b溶液の起泡性および泡沫安定性が低下した。この泡沫特性の低下要因を特定するため、RP-HPLC-MSおよびSEC-MALSを用いて、加熱処理に伴う翻訳後修飾、表面疎水性、流体力学的半径、分子量の変化を詳細に分析した。その結果、加熱処理がオキシリピンの解離、糖の解離、脱アミド化、さらにはLTP1会合体の濃度増加を引き起こすことが明らかになった。さらに、グリケーションレベルの異なる溶液を用いた比較実験から、糖の解離は泡沫特性に影響しないことを確認した。このことから、加熱による泡沫特性の低下は、主にLTP1bからのオキシリピンの解離と、それに伴うLTP1会合体濃度の増加が原因であることが示唆される。したがって、醸造工程での加熱条件を精密に制御し、オキシリピンの解離と会合体の形成を抑制することで、ビールの泡沫特性を向上させることができると考えられる。

**第三章　ビールの高品質な泡沫を実現するための新たな戦略の探索**　第三章では、第二章で得られた知見を応用し、複雑系であるビール中でLTP1/LTP1bが泡沫安定性に寄与するかを評価するとともに、醸造工程におけるLTP1/LTP1bの変化を分析した。まず、市販ビールのLTP1b含有量と泡沫安定性との相関を調べたところ、麦汁製造で過度な加熱処理を受けていないビール製品はLTP1b濃度が低く、この低濃度領域においては、明確な正の相関が認められた。また、煮沸前の一番麦汁から精製したLTP1bをビールに添加すると、LTP1を添加した場合と比較して泡沫安定性が顕著に向上した。これらの結果から、LTP1bの質（加熱による変化）および量がビールの泡沫安定性を高める上で重要であると示唆された。また、LTP1bと他の大麦タンパク質を同時に添加した場合は、総タンパク質の濃度の増加に伴い、精製LTP1bの吸着は抑制される傾向が見られた。次に、醸造工程におけるLTP1bからのオキシリピン解離や疎水性会合体の変化を分析したところ、精製LTP1bの実験結果と同様に、煮沸工程でLTP1bの量が減少した。さらに原料に着目し、LTP1b生成に関わる酵素であるLipoxygenase（LOX）活性が異なる大麦品種間でLTP1bの含有量を分析したところ、LOX活性の高い大麦でLTP1b含有量も高いことが確認された。このことから、LOX活性が高い大麦を原料とすることがビールの泡沫特性向上に寄与する可能性が示唆される。

**第四章　総括と今後の展望**　第二章および第三章の研究を通じ、LTP1bがビールの泡沫特性に大きな影響を与えることが明らかになった。しかしながら、LTP1bは醸造工程、特に煮沸の段階で減少する。したがって、ビールの泡沫品質を向上させるためには、大麦の選定から醸造工程に至るまで、LTP1bの含有量を戦略的に管理することが不可欠である。本研究の成果は、高品質なビールを安定的に提供するための具体的な指針として醸造業界へ貢献すると期待される。

様式７

# 論文審査の結果の要旨及び担当者

| 氏　名 | （　水口　潤哉　） |
|---|---|

| | 職名 | 氏名 |
|---|---|---|
| 論文審査担当者 | | |
| 主査 | 教授 | 内山　進 |
| 副査 | 教授 | 福崎　英一郎 |
| 副査 | 教授 | 本田　孝祐 |
| 副査 | 准教授 | 鳥巣　哲生 |

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、ビール醸造において主要な泡沫機能性タンパク質であるLipid transfer protein 1（LTP1）およびそのオキシリピン結合型であるLTP1bについて、その品質管理技術の高度化を目的とし、精密な質量分析および物理化学的解析を基盤とした泡沫安定性評価法の確立とその有用性を論じたものである。ビールの泡沫は、官能評価における重要な指標であるとともに、風味の保持や酸化防止という実用的な機能を有する。しかし、醸造工程、特に過酷な加熱を伴う煮沸工程において、これらのタンパク質が受ける構造変化や修飾が、最終的な泡沫品質にどのように相関するかという点については、複雑な反応系ゆえに包括的な理解が不十分である。

著者は、これまで個別に論じられてきたLTP1の諸特性に対し、多段階クロマトグラフィーにより単離・精製したLTP1/LTP1bを、RP-HPLC-MS（逆相クロマトグラフィー質量分析）およびSEC-MALS（サイズ排除クロマトグラフィー多角度光散乱検出）を相補的に活用することで、単一の分析では困難であった、加熱処理による翻訳後修飾と分子サイズの変化を包括的に分析している。その結果、加熱処理が脱アミド化や糖の解離を誘発する一方で、泡沫特性の低下に寄与するのは、LTP1bからのオキシリピンの解離、およびそれに付随して生じるLTP1会合体の形成であることを実証している。これは、従来、経験則や定性的な評価に頼っている煮沸工程の熱履歴管理を、タンパク質という分子レベルの物性変化に基づいて最適化できることを示唆していることから、画期的な成果である。

さらに、著者はこれらの基礎的知見を実際の醸造体系へと応用し、実用的な品質向上戦略を提示している。市販ビールを用いた解析において、LTP1bの含有量と泡沫安定性の間に正の相関を見出すとともに、精製LTP1bの添加試験を通じて、LTP1bの含有量のみならず、加熱履歴に依存するLTP1bの物性が重要であることを実証している。また、原料大麦に着目し、リポキシゲナーゼ（LOX）活性と最終的なLTP1b含有量の相関性を明らかにしたことは、育種や原料選定の段階から泡沫品質を設計できる可能性を示唆している。

以上のように、本論文はビールの泡沫品質を決定づける主要因子であるタンパク質LTP1およびその修飾体LTP1b に着目し、醸造プロセス、特に煮沸工程における加熱が、これら分子の化学的修飾および物理化学的特性に及ぼす影響を包括的に解明したものである。さらに、実際のビール系においても、LTP1bの含有量と泡沫安定性に正の相関があることを見出し、原料大麦のLOX活性が最終製品の品質に直結することを示唆している。これは、単なるタンパク質科学の知見にとどまらず、原料選定から醸造条件の最適化に至るまでの具体的な指針を提示するものである。総じて、醸造学における実用的価値も極めて高く、ビールの品質向上の実現へむけて大きく前進していくことが期待される。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。