

## 学位論文題名

## 鉄・ラクトフェリンの加工特性に関する研究

## 学位論文内容の要旨

本研究では、加工食品における鉄分の強化に利用できる新規な素材として、牛乳のホエイに含まれる Lf を用い、重炭酸イオンの存在下で Lf 1 分子あたり約 70 分子以上の鉄を可溶化した「鉄・ラクトフェリン (FeLf)」と呼ばれる複合体について検討を行った。FeLf の大量調製において重要な知見である鉄の可溶化に関する諸性質の解明、本タンパク質素材を加工食品への応用する際に重要な課題となる加熱殺菌における安定性の評価と、多糖類の添加による FeLf の熱安定性向上に関する諸知見を通じた殺菌技術の確立、さらには粉乳をモデルとした加工食品における FeLf の安定性、ならびに鉄による脂質の酸化を FeLf が低減する働きについて検証した。

第二章において、FeLf の複合体構造を形成する上で鍵となるプロセスである、炭酸水素イオンの存在下での Lf による鉄の可溶化について、Lf の加熱処理による影響を調べ、その諸性質を明らかにすることを目的に検討を行った。Lf の加熱変性に伴い、ジスルフィド結合を介した高分子の凝集物が形成されると Lf による鉄の可溶化が妨げられることが示唆された。トランスフェリン、 $\alpha$ -ラクトアルブミン、および  $\beta$ -ラクトグロブリンには鉄 (III) イオンを可溶化する作用はなく、鉄 (III) イオンを可溶化する働きは未変性の Lf に固有の性質であることが明らかになった。

次に第三章では、食品での利用を想定したモデル系を用いて FeLf の熱安定性を調べるため、幅広い pH 領域および塩濃度の水溶液中に FeLf または Lf を溶解し、それらの 80 °C、3 分間加熱時における安定性を比較した。その結果、FeLf は熱安定性を示す pH 領域ならびに電気伝導度の範囲が広く、Lf より高い熱安定性を持つことが明らかになった。また、中性 pH 領域における代表的な殺菌条件として、pH 7.0、2.0 mS/cm の電気伝導度で 30 分間加熱した場合、FeLf は外観、可溶性鉄ならびに可溶性 Lf 濃度のいずれにおいても変化がなく安定であることが明らかになった。同様の条件では Lf の耐熱性は FeLf より低く、中性 pH において鉄を安定的に可溶化できる鉄素材としても FeLf が有用であることが示唆された。

続いて第四章において、FeLf の熱安定性が比較的低い pH 6.5 において、0.01% (w/w) の FeLf 水溶液に大豆多糖類を添加することで、120 °C、4 分間の加熱に対しても FeLf が十分な熱安定性を付与できることを明らかにした。SSPS の添加によって、ゼータ電位がプラスからマイナスに変化し、それに伴い熱安定性が向上したことから、Lf と SSPS の相互作用が、表面電荷の変化を引き起こし、それによって FeLf 水溶液の耐熱性が向上したものと推察された。

第五章では一般的な食品成分が共存する条件下での FeLf の安定性を調べるため、粉乳に FeLf を添加し、その製造工程における FeLf の安定性を調べた。FeLf を配合した粉乳において、抗 Lf 抗体に対する反応性は 120 °C、5 秒間の加熱殺菌により失われたが、FeLf として配合した鉄は、可溶性の高分子画分より検出され、FeLf として鉄を安定に保持した状態で粉乳に配合できることが明らかになった。未変性の Lf が鉄に結合して FeLf を形成すると、その後は熱に対する安定性を有し続け、鉄を保持し得ることから、その加工適性の高さが示唆された。

さらに、第六章において、魚油を添加した粉乳に FeLf を添加し、鉄によって引き起こされる油脂の酸化と、それに伴う劣化臭の生成に FeLf がどのような影響を与えるか調べた。FeLf および硫酸鉄 (II) を配合した粉乳を調製し、37 °C にて 5 か月間保存した。官能評価の結果では、硫酸鉄 (II) 配合品に比べ、FeLf 配合品では鉄味および酸化臭が抑制されており、香気成分分析の結果では、酸化により生成する酸化臭や鉄味に関係する香気成分の生成が、FeLf の添加により硫酸鉄 (II) に比べ低く抑えられることが明らかになった。FeLf の安定した鉄保持能が酸化風味や鉄味に関与する香気成分の生成抑制に関与すると考えられ、FeLf は単一の食品中に鉄と魚油を同時に強化する場合において特に有用な素材であると考えられた。

以上に述べたように、乳由来のタンパク質であるラクトフェリンより調製された鉄・ラクトフェリンは、安全性が高く、優れた生体利用性を示すといった鉄素材としての栄養機能性ばかりでなく、風味や熱安定性の劣化防止といった加工適性の点においても非常に優れた鉄素材であることが明らかになった。したがって、本研究は、機能性食品の分野において、大きく社会に貢献するものであると考えられる。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 松 井 博 和  
副 査 教 授 玖 村 朗 人  
副 査 准教授 森 春 英

## 学位論文題名

### 鉄・ラクトフェリンの加工特性に関する研究

本論文は、図 15、表 13、引用論文 122 を含み、7 章からなる総ページ 92 の和文論文である。別に参考論文 3 編が添えられている。本研究では、牛乳に含まれるラクトフェリン(Lf)を用い調製する「鉄・ラクトフェリン(FeLf)」食品に応用するため、FeLf の食品加工における諸性質を調べた。

FeLf は、炭酸水素イオンの存在下で Lf が鉄を可溶化し形成されるが、Lf の加熱変性に伴い凝集物を形成し、鉄の可溶化は妨げられた。Lf と近縁のタンパク質であるトランスフェリンは鉄を可溶化せず、FeLf の形成は、未変性の Lf による働きであることが明らかになった。FeLf の大量調製において、未変性の Lf の純度が重要な指標になり得ることを示唆している。

水溶液において、FeLf は Lf より広い pH 領域ならびに電気伝導度の範囲で高い熱安定性を示し、大豆多糖類の添加により、FeLf のゼータ電位は変化し、FeLf の熱安定性はさらに向上した。FeLf は液状食品における加熱殺菌に対し、十分な熱安定性を有する食品素材であることを示唆している。

FeLf を添加した粉乳を調製し、食品製造および保存における FeLf の安定性と風味劣化への影響を調べた。硫酸鉄(II)配合品に比べ、FeLf 配合品は鉄味および酸化臭が低減し、酸化臭や鉄味に関する香気成分の生成が低く抑えられた。FeLf の安定した鉄保持能が鉄素材の添加による風味劣化の抑制に寄与すると考えられ、FeLf は風味への影響が少ない鉄素材であることが示唆された。

本研究により、FeLf は風味の劣化や熱安定性といった食品加工の観点において優れた機能性を有する鉄素材であることが明らかになった。したがって、本研究は、機能性食品の分野において、大きく社会に貢献するものであると考えられる。よって審査員一同は、上野宏が博士(農学)の学位を受けるに十分な資格を有すると認めた。