

# 乳と乳製品製造過程における乳タンパク質カゼインの挙動

谷本 守正

(山梨大学大学院総合研究部)

ヨーグルトやナチュラルチーズに代表されるように、牛乳が固まることを利活用した食品は古来昔から人々の食卓に上ってきた。固液分離による水分活性のコントロールと微生物との共生により保存性のある多様な食品として発展した。凝固のキーワードとしては、①酸による凝固②酵素、レンネットによる凝固である。その凝固の本体は乳タンパク質カゼインの凝集による高次構造の変化として捉えることができる。乳は哺乳動物、その種にとって、子どもが生育するために存在するモノで、唯一、食されるために存在する物質である。栄養学的に成長するのに必要な栄養素 - タンパク質、脂質、糖質、ミネラル、ビタミン - が、種によって組成は異なるが、すべて含まれている。乳タンパク質カゼインの存在はミネラル（カルシウム、リン）の供給体としての役割も持つ。カゼインについて、その一次構造は既に明らかになっているが、その高次構造は今なお議論が残るところである。

**カゼインとは**；牛乳を脱脂し、20°C、pH 4.6 に調整した時、沈殿してくる画分をカゼイン、上清をホエイという。カゼインには  $\alpha_{s1}$  - カゼイン、 $\alpha_{s2}$  - カゼイン、 $\beta$  - カゼイン、 $\kappa$  - カゼインの 4 種類が知られている。 $\kappa$  - カゼイン以外は Ca 感受性が高い。 $\kappa$  - カゼインは糖鎖を持ち、水との親和性が高い。乳中においてカゼインミセルとして高次構造をとっており、その表面に  $\kappa$  - カゼインは存在していると考えられる。

**カゼインミセルとは**；カゼインミセルは、カゼインが会合した直径 30nm~600nm の球状コロイド粒子であり、水中に安定的に存在している。このカゼインミセル中にリン酸カルシウムが包み込まれている。カゼインミセルの構造として代表的なモデルは「サブミセルモデル」と「ナノクラスターモデル」である。「サブミセルモデル」では、カゼインは直径約 20nm の会合体を形成し(サブミセル)、サブミセル間をリン酸カルシウムのナノクラスターが架橋し、ミセルを形成している。一方「ナノクラスターモデル」では、リン酸カルシウムのナノクラスターにカゼインが結合し、それがさらに会合しミセルを形成する。現時点では結論は出ていないが、海外では「ナノクラスターモデル」を支持する研究者が多い。どちらにしても、乳中ではカゼインミセルの表面はマイナスに帯電している。また、親水性の高い  $\kappa$  - カゼインのカゼインマクロペプチド (CMP) 部分が表面に出ており、リン酸カルシウムは内包されているということは共通している。

**乳製品製造（凝集・凝固）過程では**；乳中では、通常、「カゼインミセル」として安定な状態で存在しているが、種々環境下において、不安定化し凝集する。そして、カード、ゲル状物質が生成する。これがヨーグルトやチーズの素である。温度変化や pH 変化、酵素処理、濃縮などの環境要因で、カゼインミセルの安定な存在状態から、ダイナミックな変化が起き、凝集・ゲル化する。安定化と不安定化に関わる力、カゼインミセルの構造と包み込まれているリン酸カルシウムの存在状態が鍵となる。さらには、不安定化の中で、カゼインミセルがクラスターを形成し、それが集合状態（網目）を成し、いわゆるマトリックスが出来上がる。このマトリックスの定量的な解析も今後の課題である。ナチュラルチーズ、ヨーグルト（酸カード）、濃縮ゲル、酸性下における加熱ゲルなどの事例を通して御紹介したい。