

チーズ熟成における各種カゼイン分解機構の体系的整理

1. 乳中タンパク質の構成

牛乳中タンパク質の約80%はカゼイン（casein）、約20%は乳清タンパク質（whey proteins）である。カゼインは単一タンパク質ではなく、以下の主要成分からなる混合体である。

- ・ α s1-カゼイン
- ・ α s2-カゼイン
- ・ β -カゼイン
- ・ κ -カゼイン

これらはカゼインミセル（casein micelle）を形成し、チーズの構造骨格を担う。

2. α -カゼイン（主に α s1-casein）の分解

2.1 レンネットとの関係

レンネット（キモシン）は主に κ -カゼインを特異的に切断し、 α -カゼインは初期凝固ではほとんど分解されない。したがって、熟成中の α -カゼイン分解は主に乳酸菌由来酵素に依存する。

2.2 主な分解酵素：CEP（Cell Envelope Proteinase）

α -カゼイン分解の中心は、乳酸菌表層に存在する細胞壁結合型セリンプロテアーゼ（CEP）である。

酵素名	由来	特徴	α s1分解力
PrtH	Lb. helveticus	超強力CEP	★★★★★
PrtP	Lactococcus	典型的CEP	★★★★★
PrtS	Streptococcus thermophilus	特殊CEP	★★★★★
PrtR	Lb. rhamnosus / casei	中～強	★★★

特に重要な酵素はPrtH（L. helveticus）で

- ・ 細胞膜結合型セリンプロテアーゼ
- ・ α s1-caseinを広範囲に切断
- ・ ペプチド生成効率が極めて高い

2.3 α -カゼイン分解の組織学的影響

α s1-caseinはミセル骨格形成に寄与するため、分解が進行すると：

- ・ マトリクス剛性低下
- ・ 弾性減少
- ・ 組織の脆弱化
- ・ 加熱時溶融性増大する

2.4 実用的観点

Lactobacillus helveticus が「溶ける菌」と呼ばれる理由

- ・ 強力な α 分解
- ・ 苦味ペプチド生成が比較的少ない
- ・ 溶融性向上と食感改善を両立

スイス系や長期熟成型チーズに広く用いられる理由はここにある。

3. β -カゼインの分解

3.1 構造的特徴

β -カゼインは親水性が高く、ミセル表層に位置し、

- ・ 水分保持
- ・ 粘性形成
- ・ しっとり感

に寄与する。

3.2 分解酵素群

β -カゼイン分解は2段階で進行する：

(1) CEPによる初期切断

- ・ PrtH
- ・ PrtP

(2) 細胞内ペプチダーゼ群（Pep系）による分解

酵素	作用
PepO	オリゴペプチダーゼ
PepN	アミノペプチダーゼ
PepX	X-prolyl dipeptidyl peptidase
PepE / PepF	エンドペプチダーゼ

β -カゼインの完全分解はPep系の強さに依存する。

3.3 β 分解に強い菌種

菌種	分解特性
Lactobacillus helveticus	PrtH + Pep群が非常に強力
Lb. casei / paracasei	PepO / PepN 活性が高い
Lb. rhamnosus	caseiと類似
Streptococcus thermophilus(PrtS+)	中～強
Lactococcus (Prt+)	中程度
casei / rhamnosus は β 分解に特化した後熟型菌	

3.4 組織への影響

β 分解が進むと

- ・ 粘性低下
- ・ しっとり感消失
- ・ ほろほろ化
- ・ 溶解性向上

4. κ -カゼインおよびpara- κ -caseinの分解

4.1 初期切断

レンネットは κ -カゼインのPhe105–Met106結合を切断する。生成されるpara- κ -caseinはカード骨格の結合点となる。

4.2 熟成中の分解

熟成過程では

- ・ CEP
- ・ PepO / PepE / PepF

がpara- κ -caseinをさらに分解する。

4.3 κ 分解の機能的意味

κ -カゼインは「接着点」であるため、分解が進むと：

- ・ カード結合緩和
- ・ 溶融促進
- ・ クリーミー化
- ・ スプーン状組織形成

これはウォッシュリンドやラクレットで観察される現象である。

5. 3種カゼインの機能的役割比較

カゼイン	構造的役割	分解効果
α s1	骨格形成	剛性低下・崩壊
β	粘性・保水	ほろほろ化
κ	接着・架橋	溶融・クリーム化

6. 食感と分解レベルの対応

食感	α	β	κ
ゴム状	×	×	×
ねっとり	△	×	×
ほろり	○	△	△
ほろほろ	○	○	○
溶融	○	○	◎
スプーン状	◎	◎	◎

7. 総合的理解

チーズの最終テクスチャーはどのカゼインを、どの酵素系で、どの速度で分解するかで決定される。

特に

- ・ α 分解 → 骨格崩壊
- ・ β 分解 → 粘性消失
- ・ κ 分解 → 接着崩壊

のバランスが質感を規定する。

チーズ別にみた3種のカゼイン分解菌の配合比率について

3種のカゼインの役割として、 α カゼインは骨格を作り、 β カゼインは粘りを出し、 κ カゼインはカゼインの接着をになっている。各チーズの特徴はどのカゼインをどれだけ分解するかで決まります。つまりどの菌を何%入れるかで決まります。

基準（スターター全量=100 とする）

菌	主に壊す	役 割
Lactococcus (Prt+)	$\alpha \cdot \kappa$	基本熟成・土台
Lb. helveticus	$\alpha \cdot \beta \cdot \kappa$	全部 溶け・崩れの主役
Lb. casei / rhamnosus	$\beta \cdot \kappa$	後半ほろほろ化
S. thermophilus (PrtS+)	$\alpha \cdot \kappa$	補助的に溶け促進

テクスチャ設計配合表（スターター比率）

① ねっとりゴーダ（弾力・保水重視）

β と κ を壊さない設計

菌	配 合
Lactococcus Prt+	95%
Lb. helveticus	0%
casei	0%
Leuconostoc	5%

何ヶ月経っても「ねっとり」

② しっとりしたほろりゴーダ（アルパイン寄り）

α だけ少し壊す

菌	配 合
Lactococcus Prt+	80%
Lb. helveticus	15%
casei	0%
Leuconostoc	5%

3ヶ月後からほろり感

③ ほろほろ崩れるチェダー

$\alpha \cdot \beta \cdot \kappa$ 全部壊す黄金比

菌	配 合
Lactococcus Prt+	55%
Lb. helveticus	25%
Lb. casei	20%

崩れるチェダー

④ とろけるラクレット

κ を強く壊す設計

菌	配 合
Lactococcus Prt+	50%
Lb. helveticus	40%
S. thermophilus PrtS+	10%

加熱で一気に流れる

⑤ モンドール・ウォッシュ系（スプーン化）

κ分解を最大化

菌	配 合
Lactococcus Prt+	40%
Lb. helveticus	40%
Lb. casei	15%
Geo/表面菌	5%

30日でクリーム化開始

⑥ コンテ / グリュイエール（アルパイン）

α主体、βはゆっくり

菌	配合
S. thermophilus	45%
Lb. helveticus	35%
Lactococcus	20%

溶けるが崩れすぎない理想質感

食感とカゼイン分解の対応

食感	α	β	κ
ゴムっぽい	×	×	×
ねっとり	△	×	×
ほろり	○	△	△
ほろほろ	○	○	○
溶ける	○	○	◎
スプーン	◎	◎	◎