

# 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。

- $\alpha$ s1-カゼイン
- $\alpha$ s2-カゼイン
- $\beta$ -カゼイン
- $\kappa$ -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. $\alpha$ -カゼイン (主に $\alpha$ 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  $\kappa$ -カゼインを特異的に切断し、 $\alpha$ -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  $\alpha$ -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)

$\alpha$ -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	$\alpha$ 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
- $\alpha$ 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 $\alpha$ -カゼイン分解の組織学的影響

$\alpha$ 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
- 弹性減少
- 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  $\alpha$  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. $\beta$ -カゼインの分解

#### 3.1 構造的特徴

$\beta$ -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
- ・ しつとり感

に寄与する。

#### 3.2 分解酵素群

$\beta$ -カゼイン分解は2段階で進行する：

##### (1) CEPによる初期切斷

- ・ 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

$\beta$ -カゼインの完全分解はPep系の強さに依存する。

#### 3.3 $\beta$ 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 $\beta$ 分解に特化した後熟型菌

#### 3.4 組織への影響

$\beta$  分解が進むと

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

### 4. $\kappa$ -カゼインおよびpara- $\kappa$ -caseinの分解

#### 4.1 初期切斷

レンネットは  $\kappa$ -カゼインのPhe105–Met106結合を切斷する。生成されるpara- $\kappa$ -caseinはカーボン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- $\kappa$ -caseinをさらに分解する。

## 4.3 $\kappa$ 分解の機能的意味

$\kappa$ -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
$\alpha$ s1	骨格形成	剛性低下・崩壊
$\beta$	粘性・保水	ほろほろ化
$\kappa$	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	$\alpha$	$\beta$	$\kappa$
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

- $\alpha$  分解 → 骨格崩壊
- $\beta$  分解 → 粘性消失
- $\kappa$  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、 $\alpha$ カゼインは骨格を作り、 $\beta$ カゼインは粘りを出し、 $\kappa$ カゼインはカゼインの接着をなっている。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)

$\beta$  と  $\kappa$  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)

$\alpha$ 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

$\kappa$ 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)

$\kappa$ 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)

$\alpha$ 主体、 $\beta$ 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	$\alpha$	$\beta$	$\kappa$
ゴムっぽい	$\times$	$\times$	$\times$
ねっとり	$\triangle$	$\times$	$\times$
ほろり	$\circ$	$\triangle$	$\triangle$
ほろほろ	$\circ$	$\circ$	$\circ$
溶ける	$\circ$	$\circ$	$\circlearrowright$
スプーン	$\circlearrowright$	$\circlearrowright$	$\circlearrowright$