



肉のかたさを 科学的に考えてみよう！

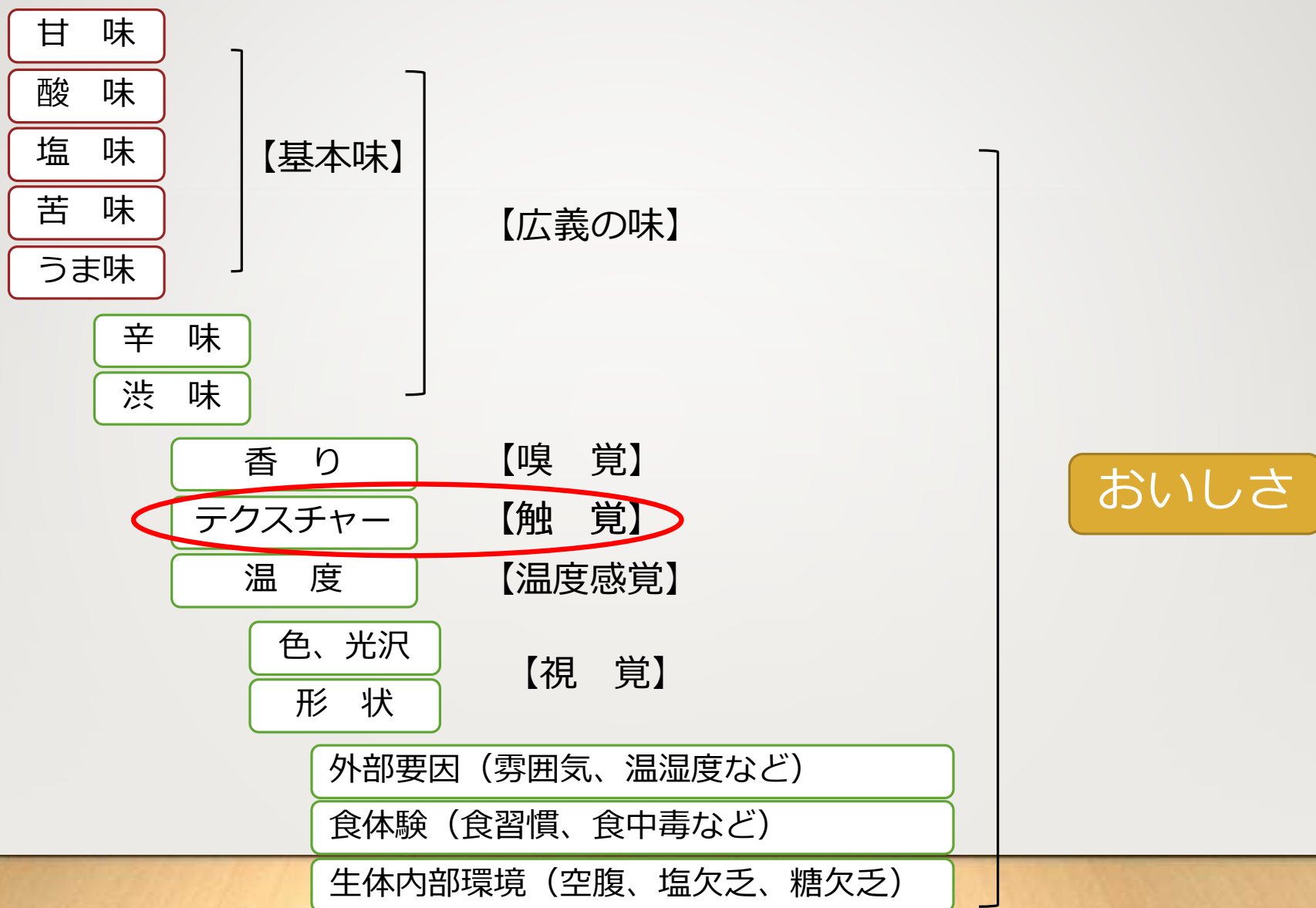
北海道大学

北方生物圏フィールド科学センター／農学研究院

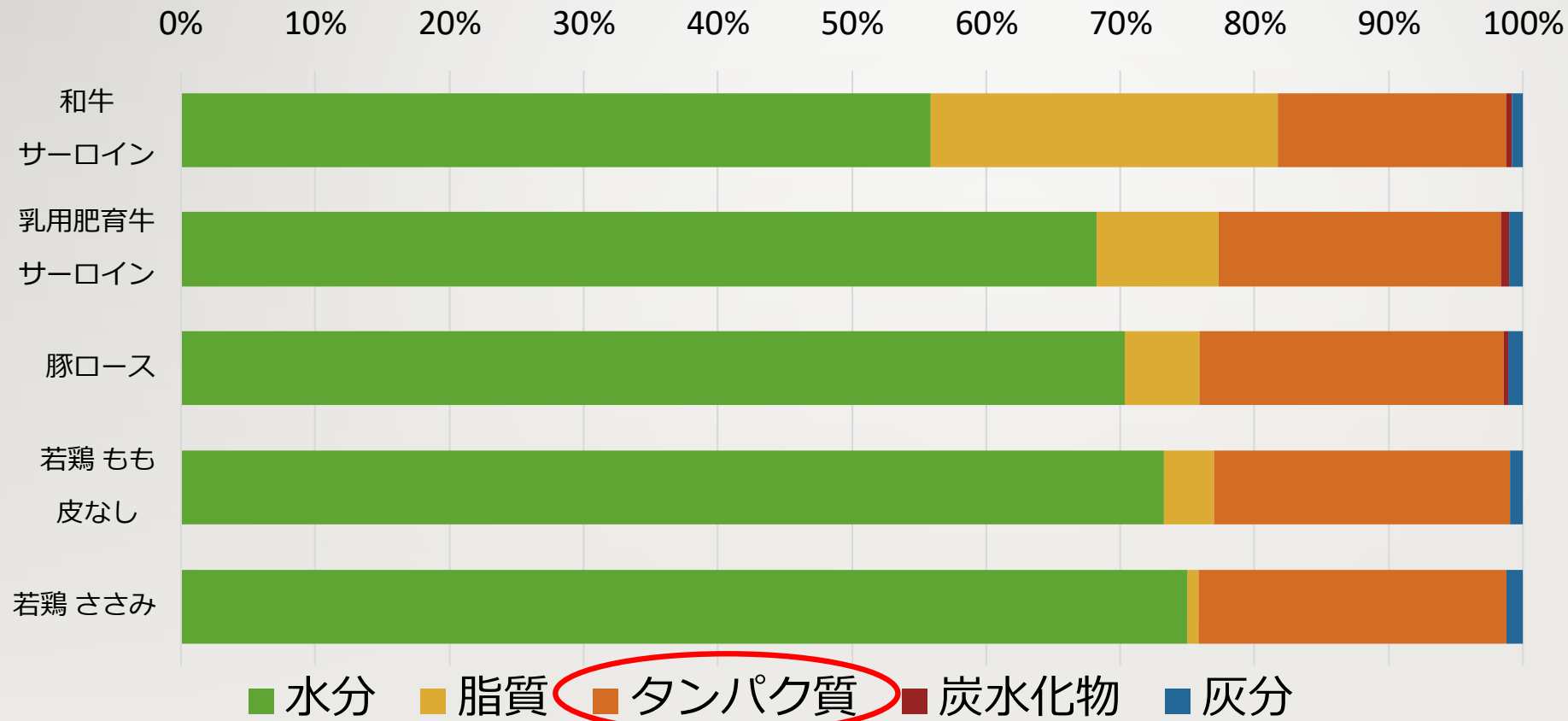
若松 純一



食べ物のおいしさを決定する要因



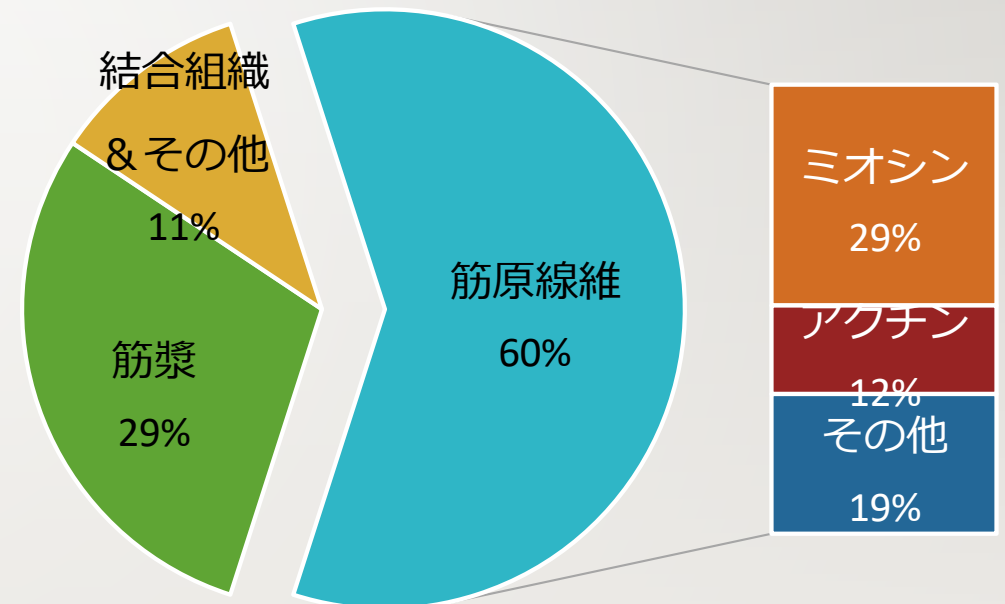
食肉の栄養組成（赤肉部分）



筋肉（食肉）を構成する構成タンパク質

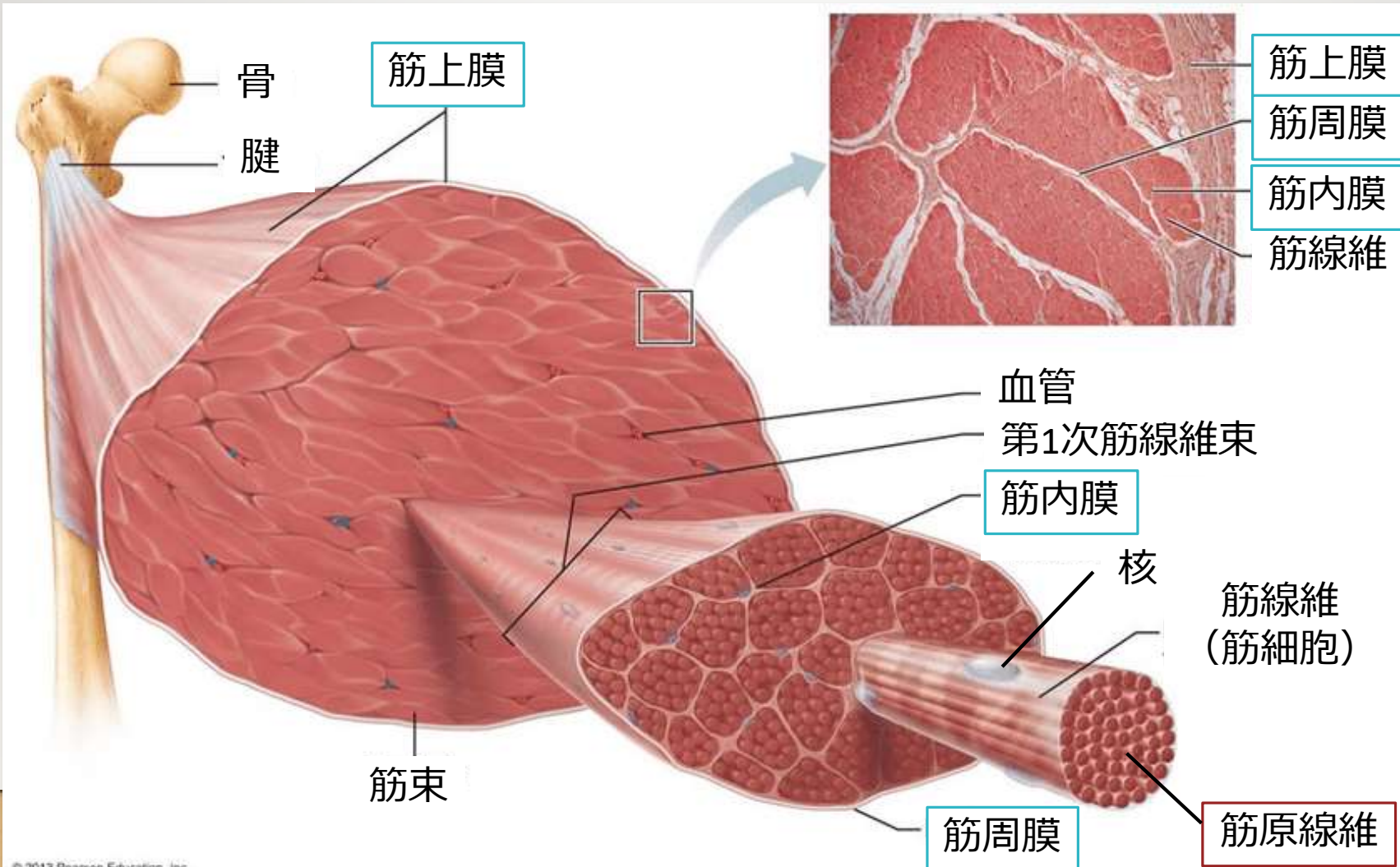
- 筋原線維タンパク質
 - 筋収縮に関与しているタンパク質
 - ミオシン、アクチンなど
- 筋漿（筋形質）タンパク質
 - 筋細胞内に溶けているタンパク質
 - ミオグロビンなど
- 結合組織タンパク質
 - 結合組織（筋内膜、筋周膜、腱など）を構成しているタンパク質
 - コラーゲン、各種プロテオグリカンなど
- その他
 - 血管や神経、脂肪細胞などを構成しているタンパク質

食肉タンパク質の構成割合



Lawrie (1998)より作図

骨格筋（食肉）の構造



結合組織構造に
起因するかたさ

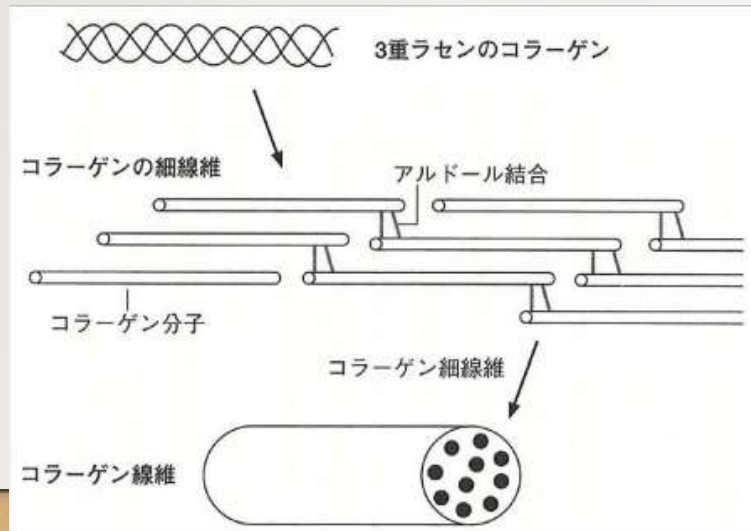
Background toughness

Actomyosin toughness

筋原線維構造に
起因するかたさ

Background toughness に起因する結合組織

- 結合組織は構造の支持に関与
 - 筋線維（筋細胞）を取り囲む筋内膜
 - 筋線維束を取り囲む筋周膜
- 主にI型コラーゲンで構成

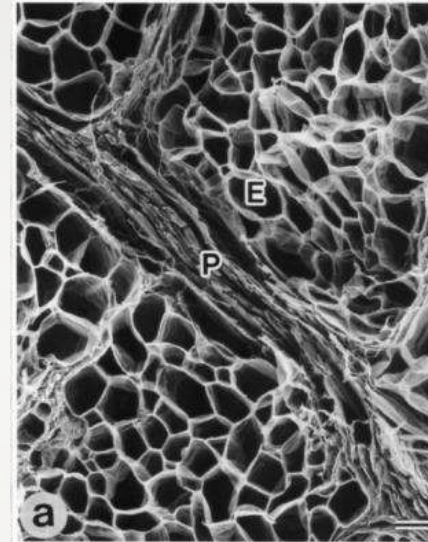


コラーゲン分子

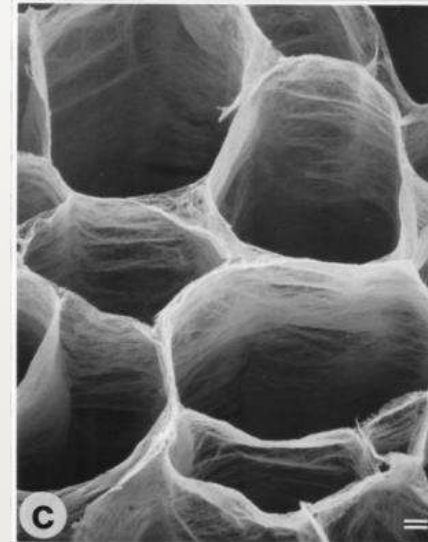
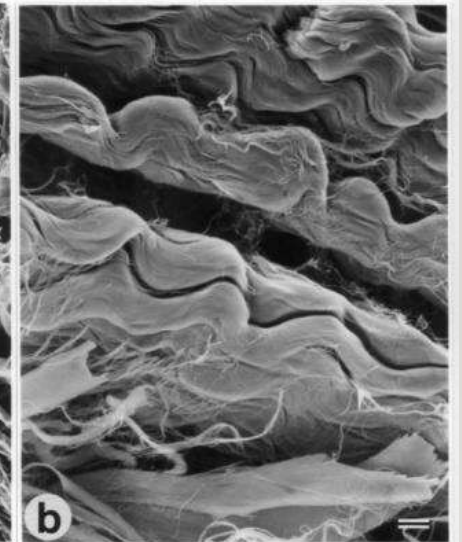
コラーゲン細線維

コラーゲン線維

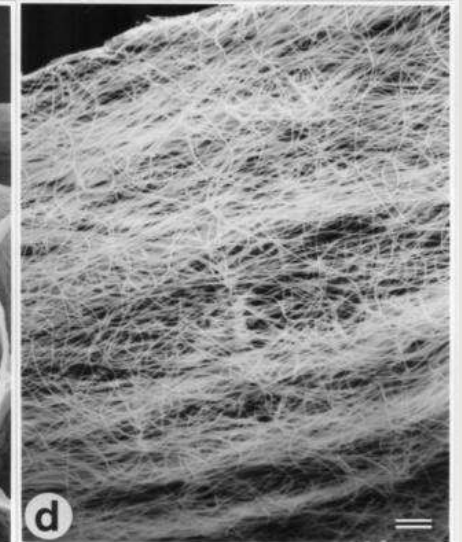
筋周膜(P)と筋内膜(E)



筋周膜



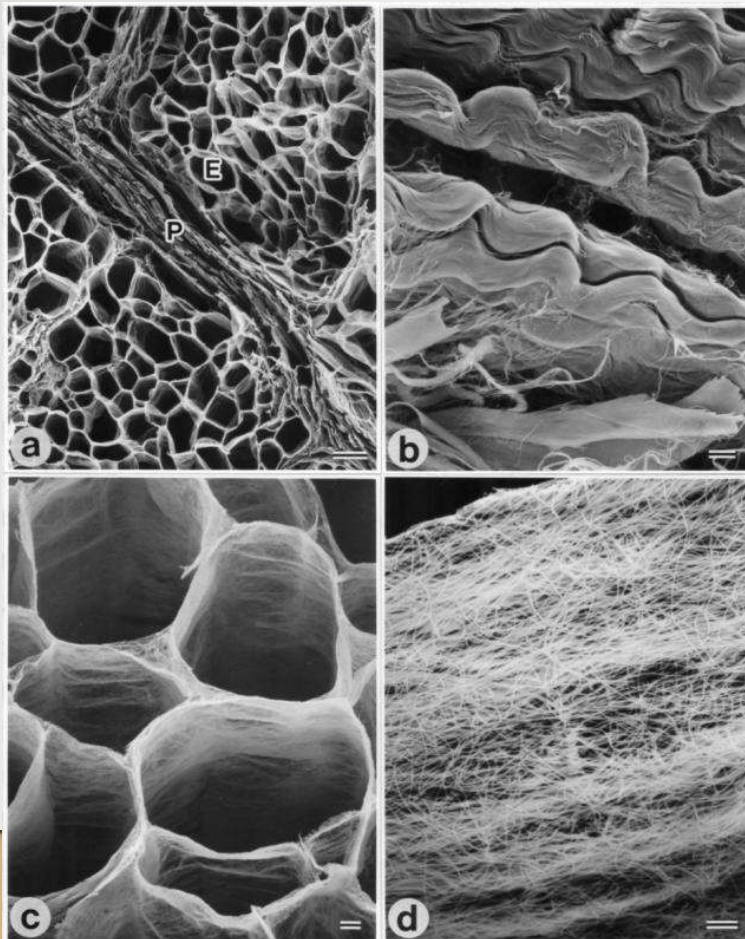
筋内膜



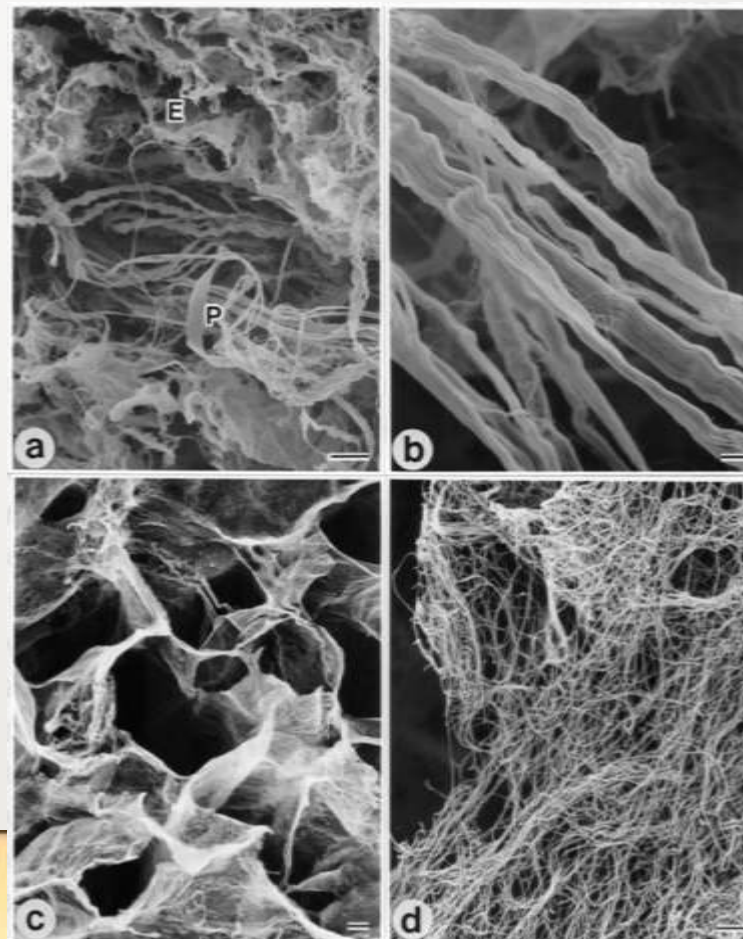
筋内膜（拡大）

熟成に伴う結合組織の状態変化（牛）

と畜直後



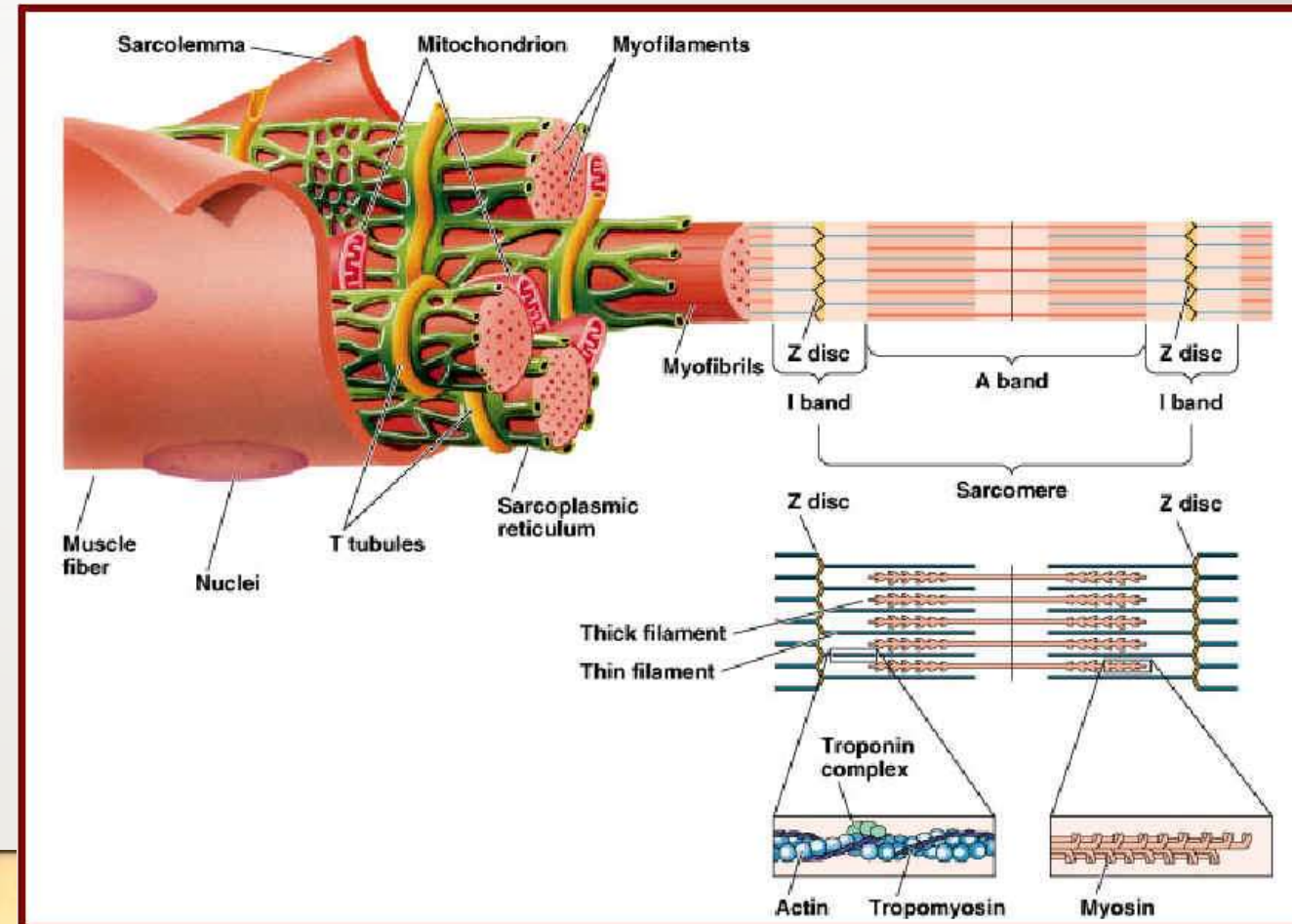
28日熟成後



- 結合組織の構造が脆くなる
- しかし、コラーゲンは分解されていない
- コラーゲン線維同士をつなぐ成分が分解

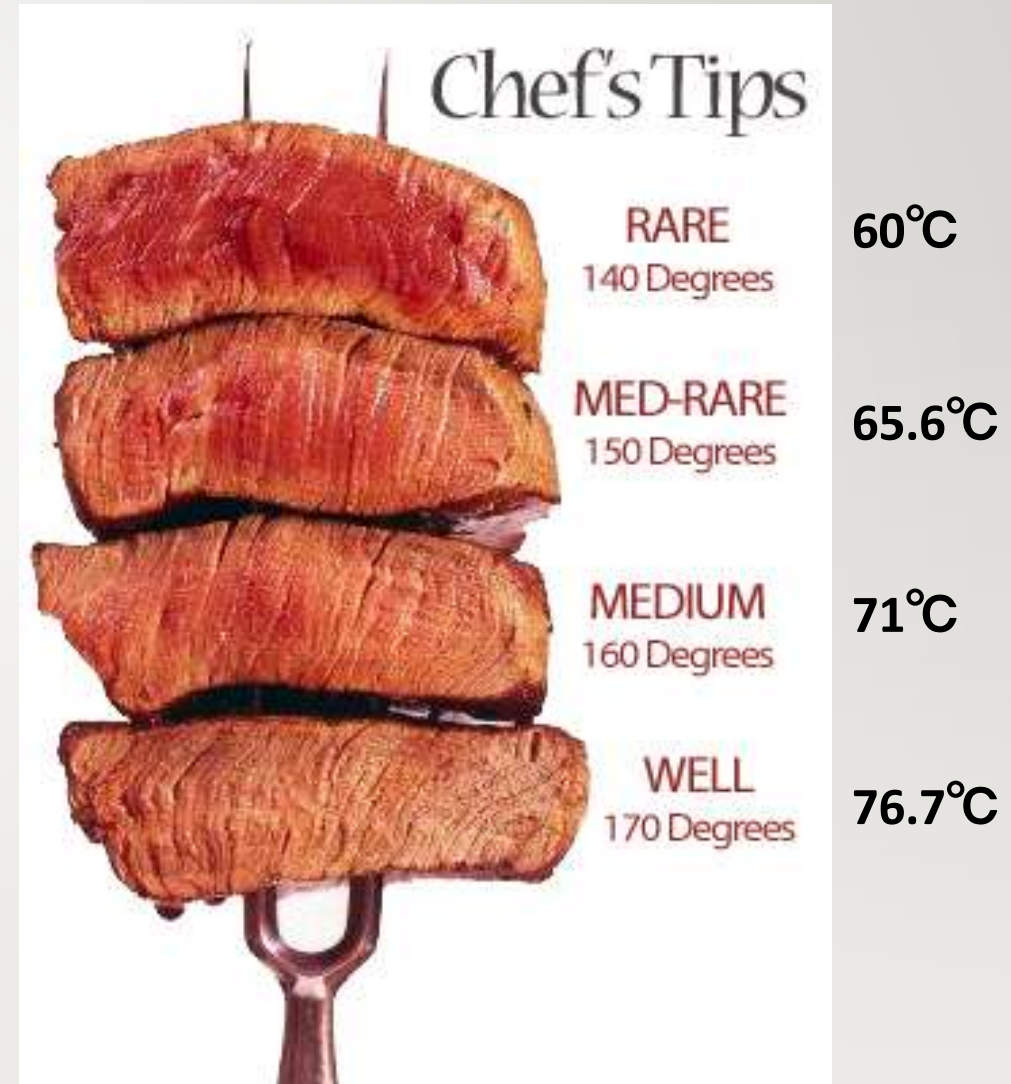
Actomyosin toughness に起因する筋原線維構造

- 筋収縮・弛緩に必要な様々なタンパク質で構成
- 死後硬直後の熟成によって、タンパク質が部分的に分解



加熱が肉質に及ぼす影響

なぜ、加熱条件によって肉質は変わるのか？



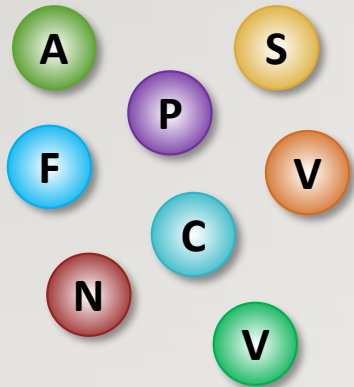
タンパク質とは

- 20種類のアミノ酸が鎖状に連結してできた高分子化合物
- 生物の構造や様々な生理機能に関与
 - 構造タンパク質、収縮タンパク質、貯蔵タンパク質、運搬タンパク質、ホルモンタンパク質、受容体タンパク質、防御タンパク質、酵素タンパク質 などなど
- 水に溶けるもの、水に溶けないもの、ある条件下で溶けるもの
- 球状のもの、繊維状のもの
- アミノ酸のみで構成される単純タンパク質、アミノ酸以外も含む複合タンパク質

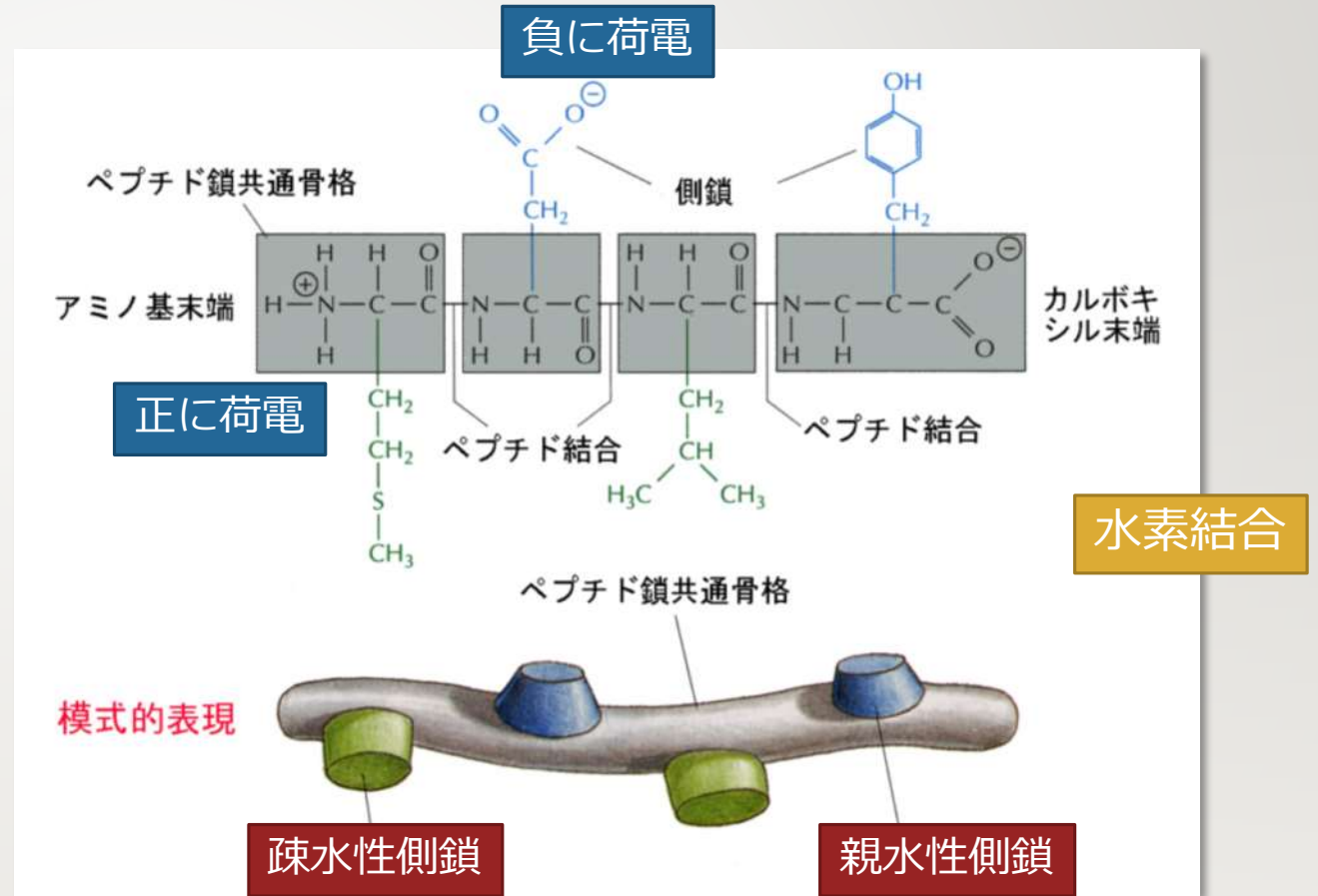
タンパク質の構造

アミノ酸

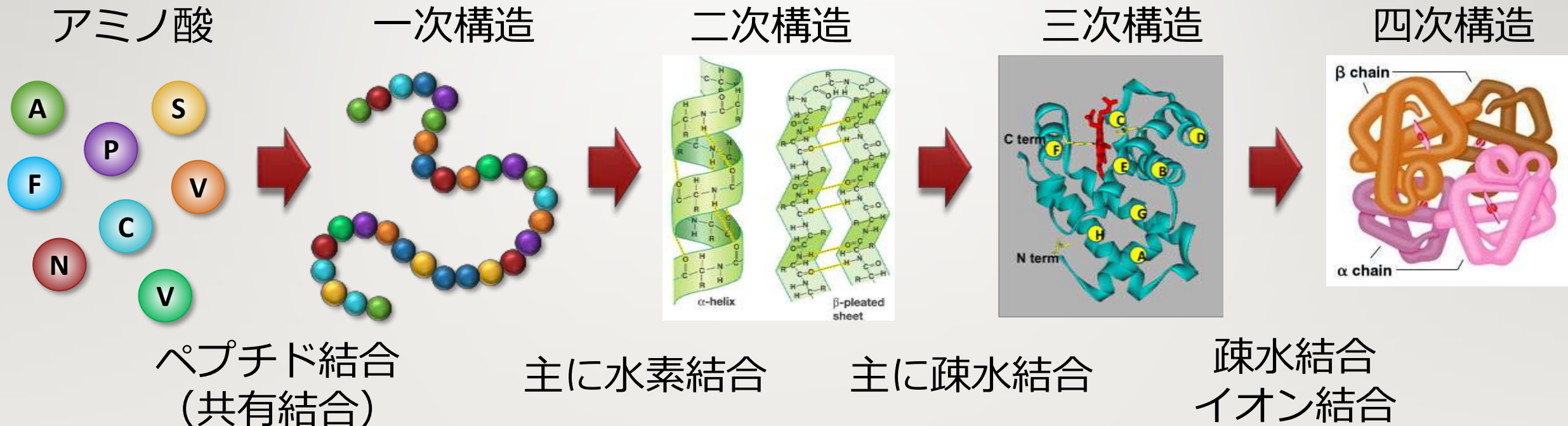
一次構造



あずましくない

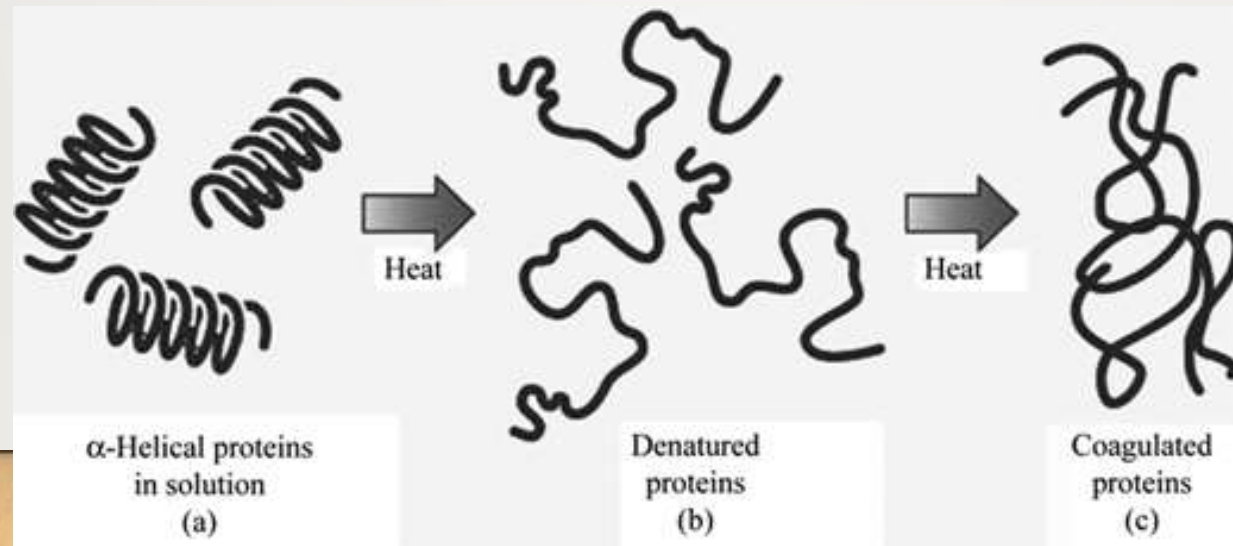


タンパク質の構造と化学結合



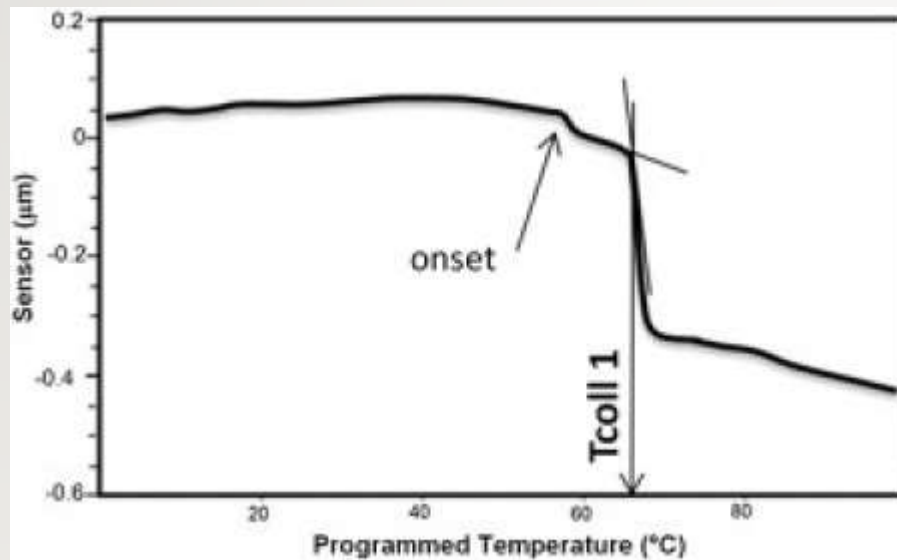
加熱に伴うタンパク質の変化

- タンパク質は加熱すると凝固し、元に状態に戻らなくなる（熱変性）
- 一般には、二次～四次構造が壊れてタンパク質の内部が表面に出て、元と異なる部分や近隣のタンパク質とくっつく（凝集・凝固）
- 熱安定性はタンパク質によって異なる

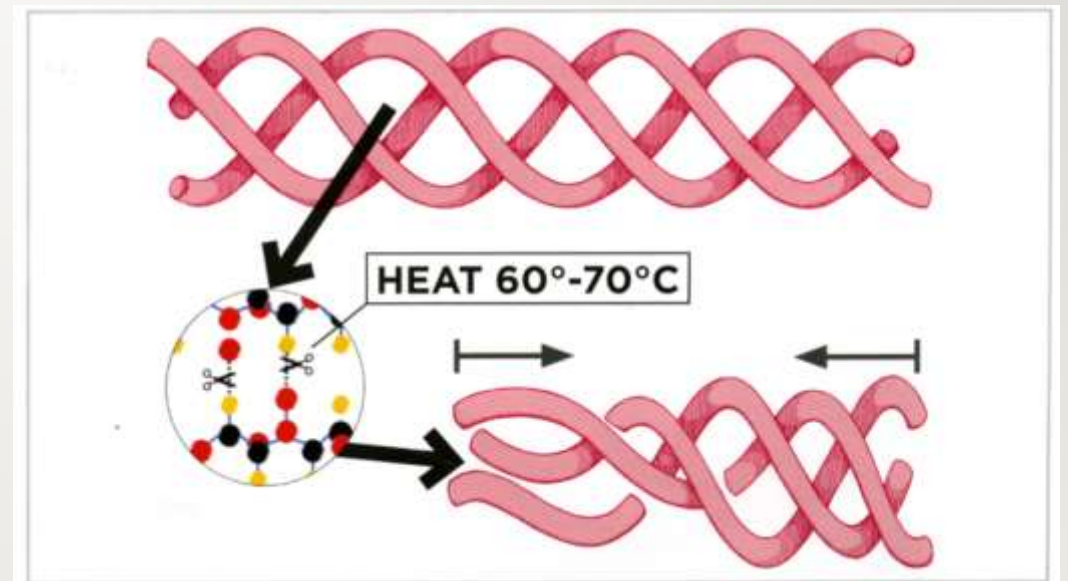


コラーゲンの2段階熱変性

- 加熱すると、65°C程度からコラーゲン線維は収縮し始め、1/3～1/4になる（第1段階）
- その後、徐々にゼラチン化する（第2段階）



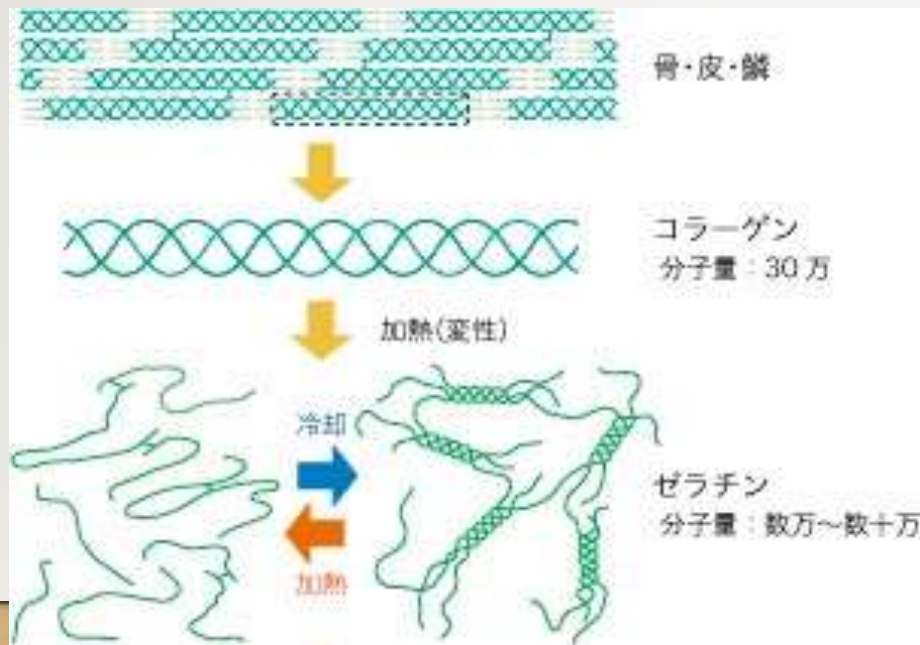
Bozec & Odlyha Biophys. J. 2011;101:228–36.



<https://www.markjewellmd.com/the-value-of-ultherapy/>

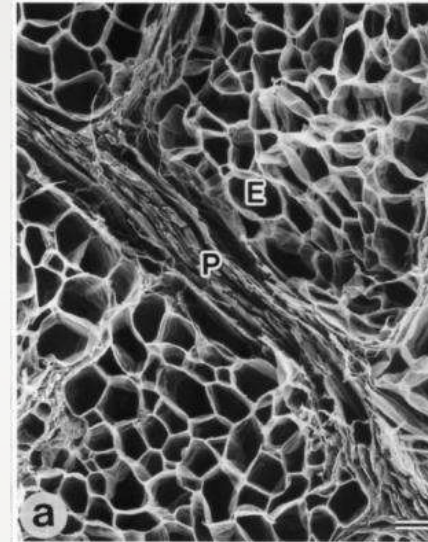
コラーゲンの2段階熱変性

- 65°C付近からコラーゲン線維は熱収縮
- 70～80°Cで徐々にゼラチン化する

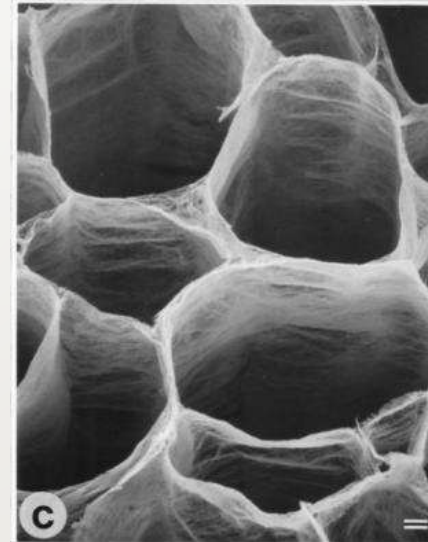
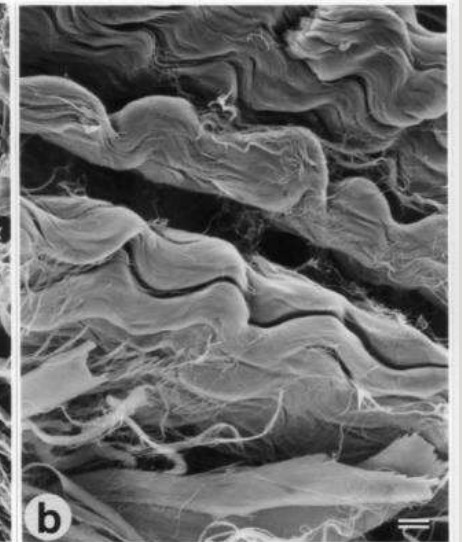


<http://nitta-gelatin.co.jp/company/business.html>

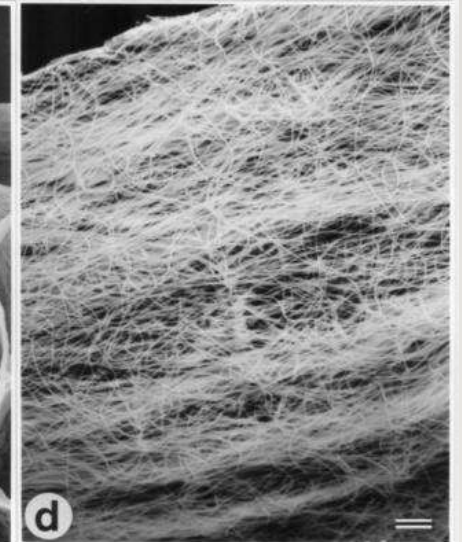
筋周膜(P)と筋内膜(E)



筋周膜

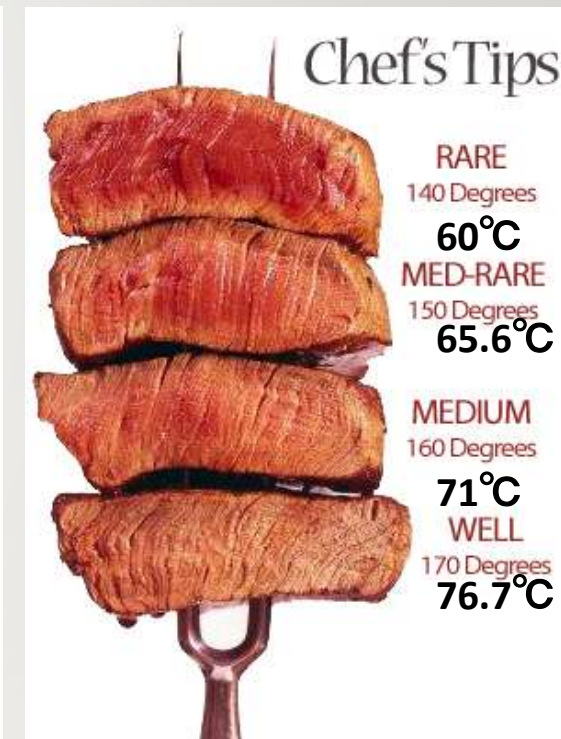
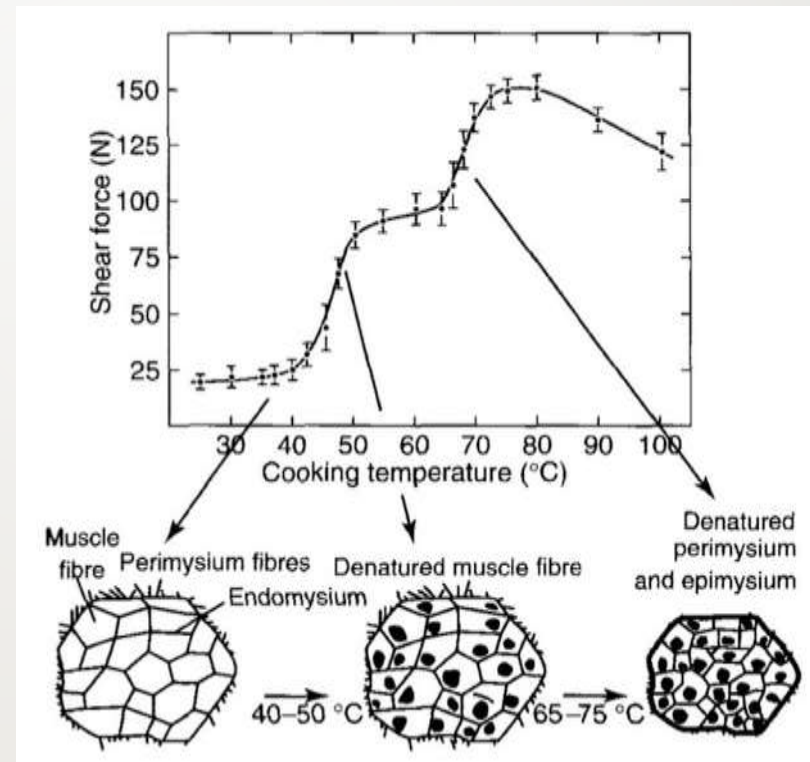
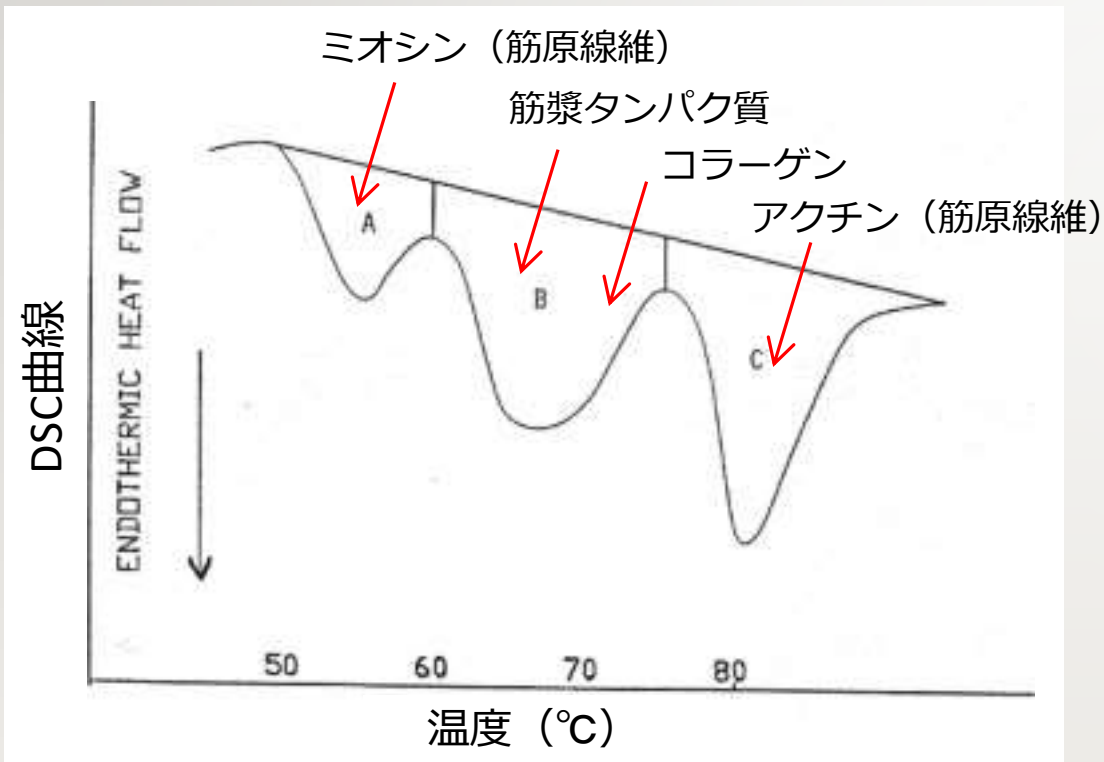


筋内膜



筋内膜 (拡大)

食肉タンパク質の熱変性と食肉のかたさとの関係



食肉のコラーゲンをかたくしないためには、

- 70℃以上に加熱しない
 - 収縮したコラーゲンは密になるので、よりかたくなる
 - 筋内膜のランダムな網目構造が収縮すると筋線維を圧迫して、クッキングロス（加熱損失）を増やす
 - ドリップには旨味成分が含まれているので、かたくなるだけでなく旨味も低下
- 長時間加熱してゼラチン化させる
 - 筋線維束を囲む筋周膜は崩壊しやすい
 - 筋線維束は数mm程度の直径であり、容易に飲み込める



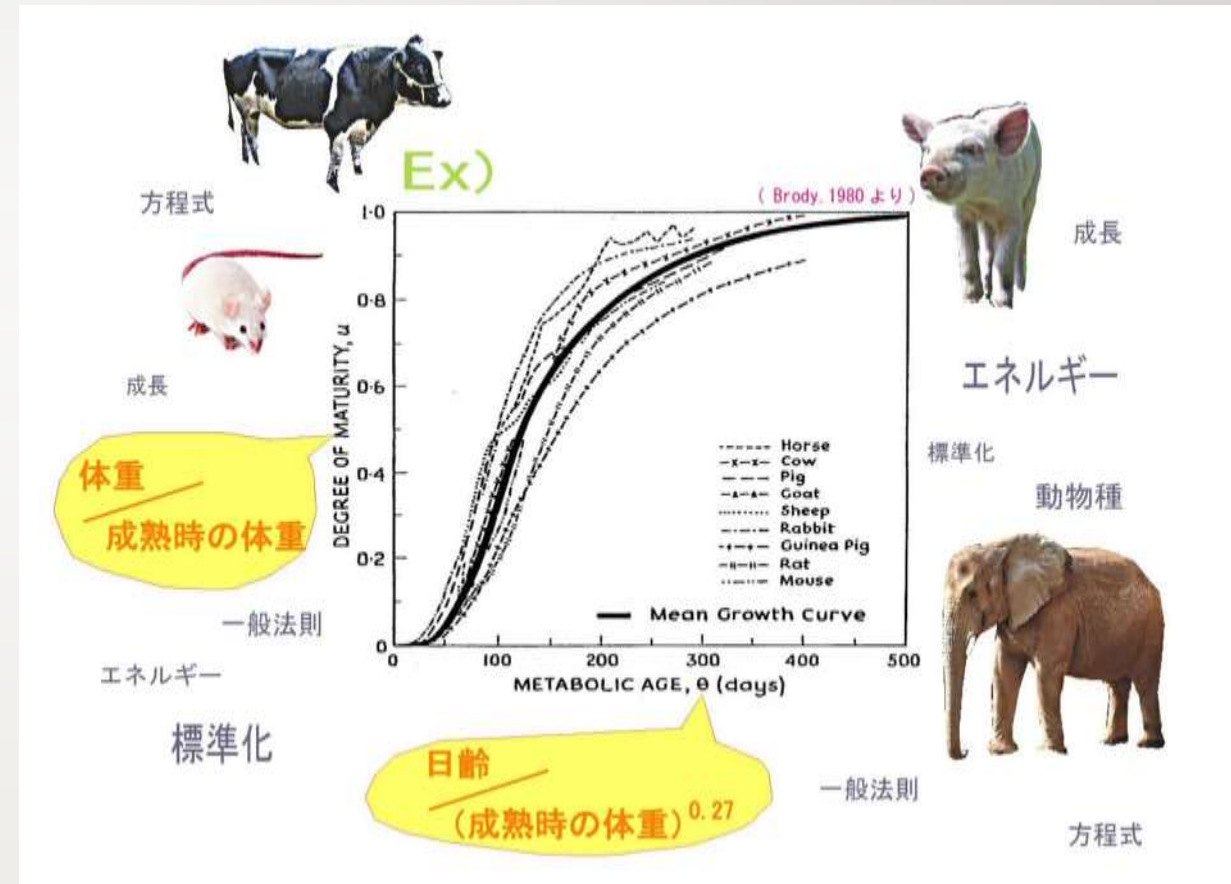
肉のかたさに及ぼす間接的要因

肉質に及ぼす各種影響

- 年齢
- 性別・去勢
- 品種・遺伝
- 部位
- 運動
- pH
- ストレス
- と畜時の取扱い

年齢の影響

- 成体では出荷していない
 - 出荷体重
 - 豚 110 kg (250-350 kg)
 - 乳用種 700-800 kg (1,100 kg♂)
 - 和牛 650-700 kg (700 kg♂)
 - 理由
 - 経済性 (飼料効率の低下)
 - 第二次性徴による肉質低下防止



<http://www.animprod.kais.kyoto-u.ac.jp/theme/generalization.html>

加齢に伴い、

色は濃くなる

水分が多い

水分：74.8% >> 68.2%
(うちもも 日本食品標準成分表)



ヴィール



一般的な牛肉

	ミオグロビン量
ヴィール	2 mg/g
子牛	4 mg/g
若牛	8 mg/g
老齢牛	18 mg/g



ブル (非去勢雄牛)

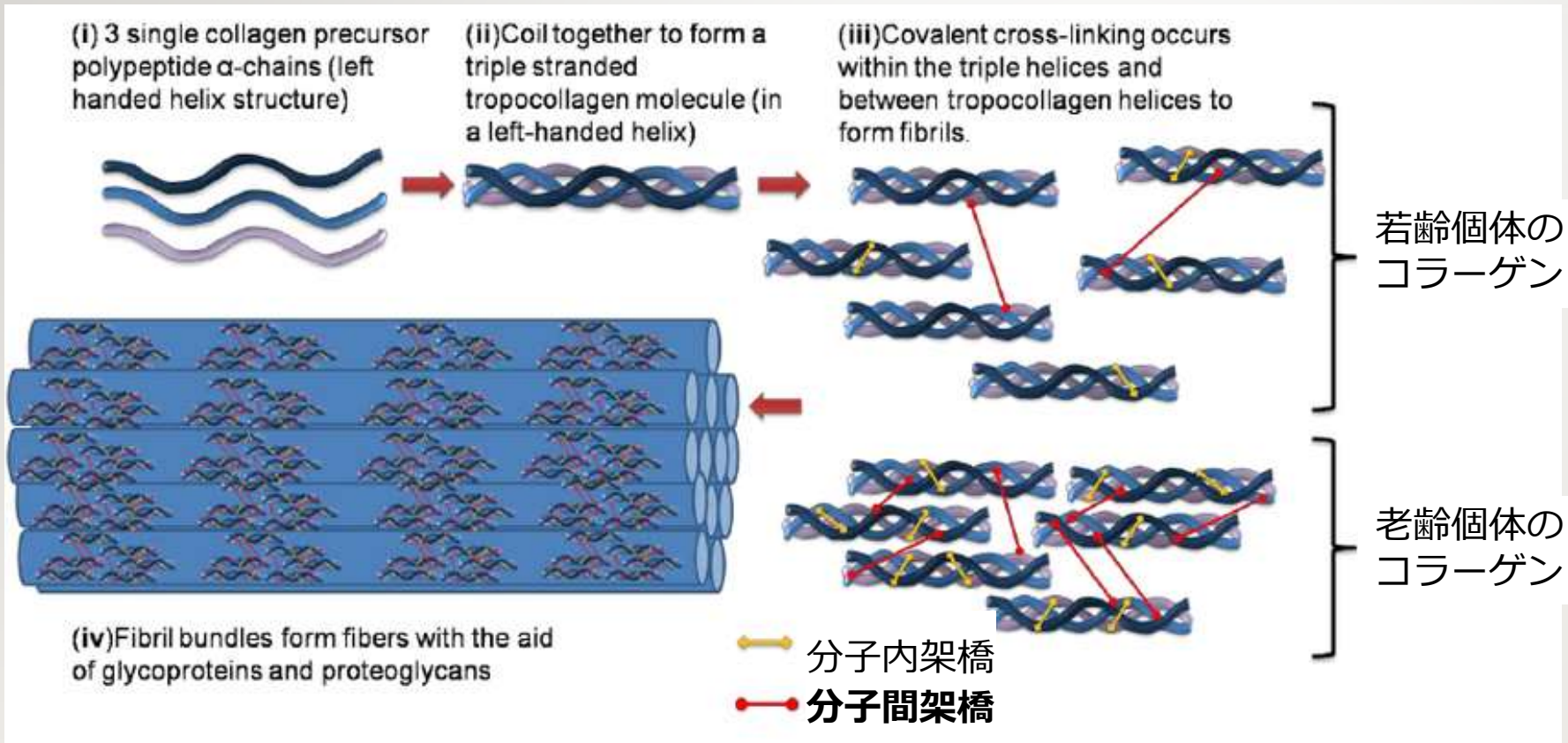
かたくなる

風味は強くなる

コラーゲン量
と分子間結合
が増加

水分減少 &
性成熟

加齢に伴うコラーゲンの堅牢化

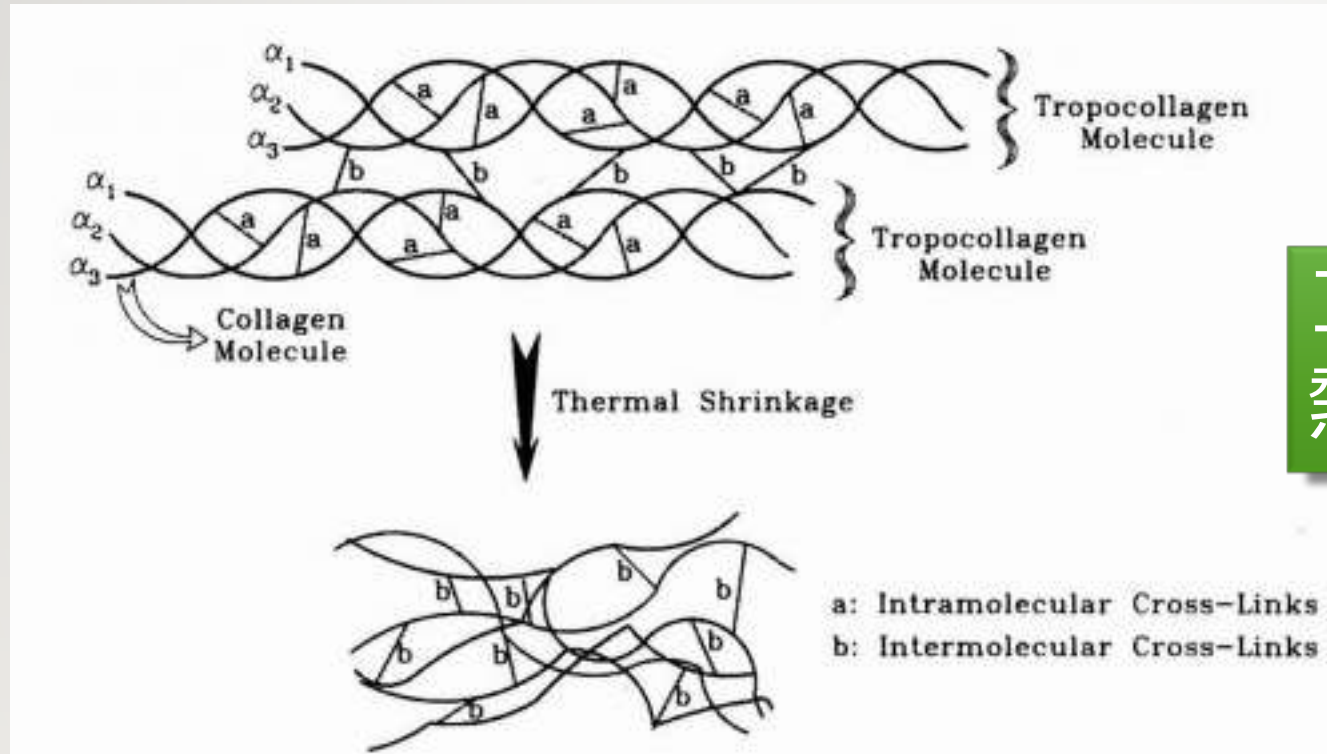


加齢に伴いコラーゲン分解酵素に対する抵抗性が高まる

月齢	可溶性タンパク質 ($\mu\text{g/ml}$)	HyPro ($\mu\text{g/ml}$)
1.5	230.7	28.8
13-16	122.7	11.3

Groll et al., 1964

加齢に伴うコラーゲンの堅牢化



コラーゲン分子間架橋は
熱や物理化学的に強固

Actomyosin toughness 筋原線維タンパク質は影響するのか？

- 体内のタンパク質は、分解と合成を繰り返して常に入れ替わっている（ターンオーバーという）
- ターンオーバーの速度はタンパク質や組織によって異なる
- 筋原線維内の収縮タンパク質は、
コラーゲンのように分子間架橋をすると収縮できなくなる
- → 加齢に伴う肉のかたさには影響しないと考えられている

性別（オス・メス・去勢）

**早期に去勢して
第二次性徴前に出荷**

- **オスの肉はかたくて臭い？**

- オスは男性ホルモンの作用により、筋肉がつきやすく、大きくなる
 - 体重が重く、筋力が強い

強靱な結合組織が必要 → かたい

- オス動物が性成熟すると、アンドロステノン（雄フェロモン）とスカトールが脂肪に蓄積して不快臭を発生（牡臭）
 - アンドロステノンは精巣で産生され、精巣ステロイドが肝臓でのスカトールの分解を抑制

オスでは不快臭成分が肉に蓄積 → 臭い

品種・遺伝・部位・運動・pHを「筋線維型」から考えてみよう!?

- 筋線維型って？

赤色筋

遅筋

長距離型

中間筋

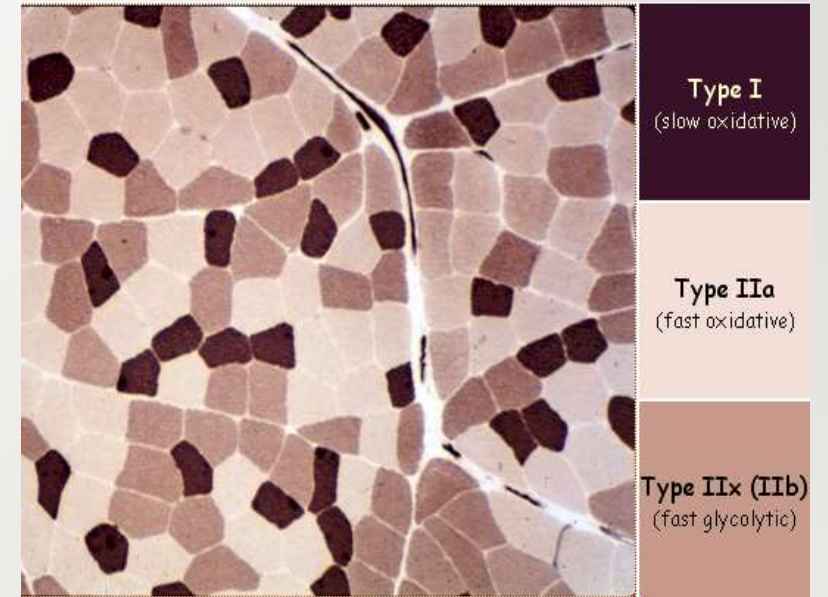
中間筋

白色筋

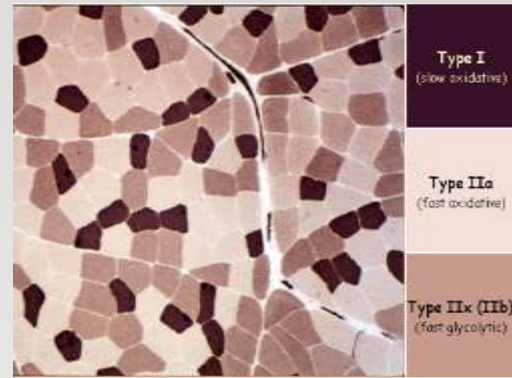
速筋

短距離型

筋線維型染色像



各筋線維型の特徴



• 赤色筋（遅筋、I型）

- ミオグロビンが多くて赤い
- 強く速い力が出せない
- 疲労しにくい
- 主に脂肪がエネルギー源
- グリコーゲンが少ない
- 筋線維の直径は小さい

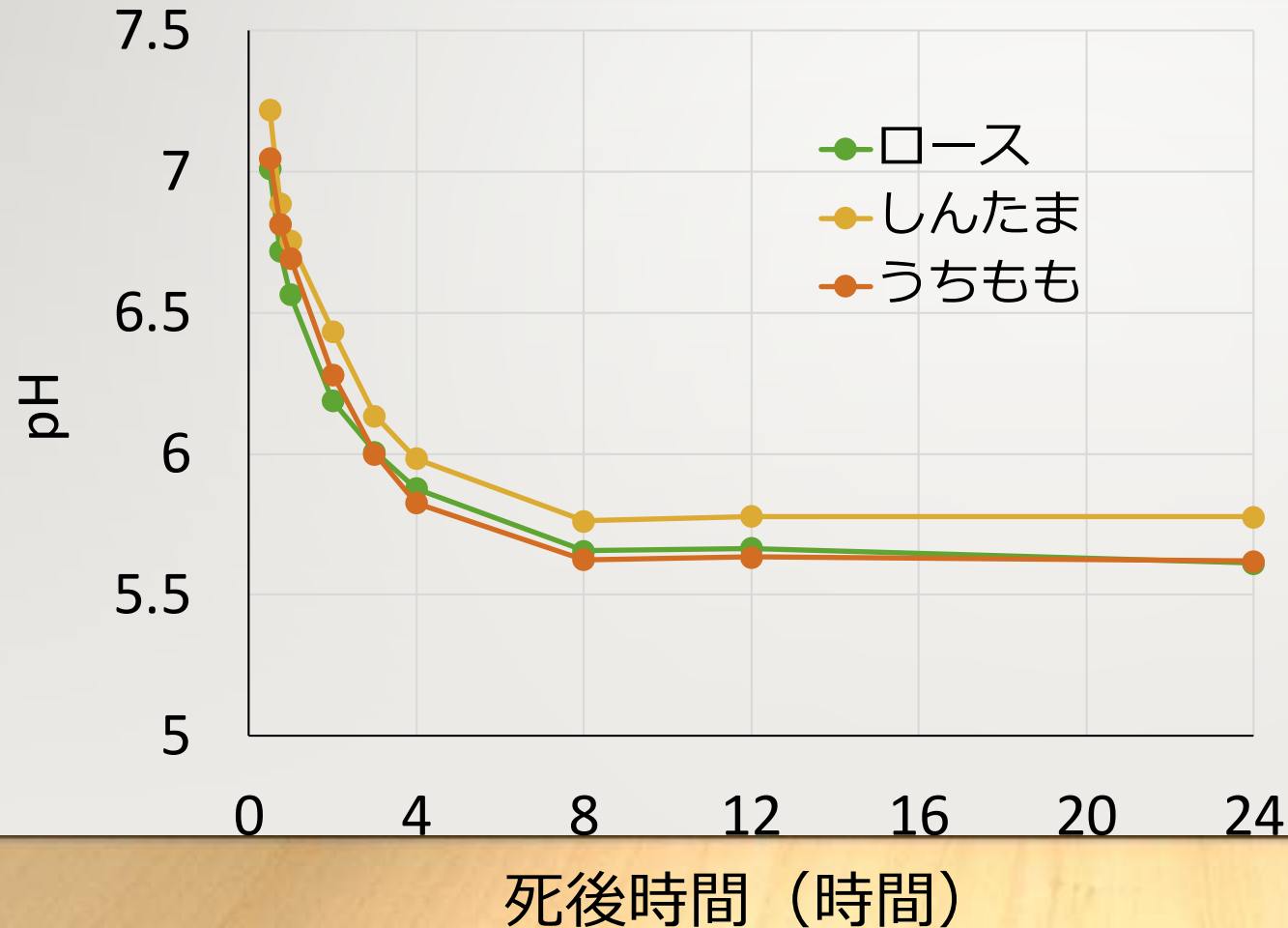


• 白色筋（速筋、IIb型）

- ミオグロビンが少なくて淡い
- 強く速い力を出せる
- 疲労しやすい
- 主に糖がエネルギー源
- グリコーゲンが多い
- 筋線維の直径は大きい



枝肉のpH推移（エゾシカ）



- 食肉のpHは5.5～6.0（弱酸性）
- 残存グリコーゲン（糖）から死後に酸が作られ、pHが低下

- グリコーゲン量
 - 多い白色筋 pH低い
 - 少ない赤色筋 pH高い

肉のpHは何に影響するのか？

食肉の保水性

ドリップロス

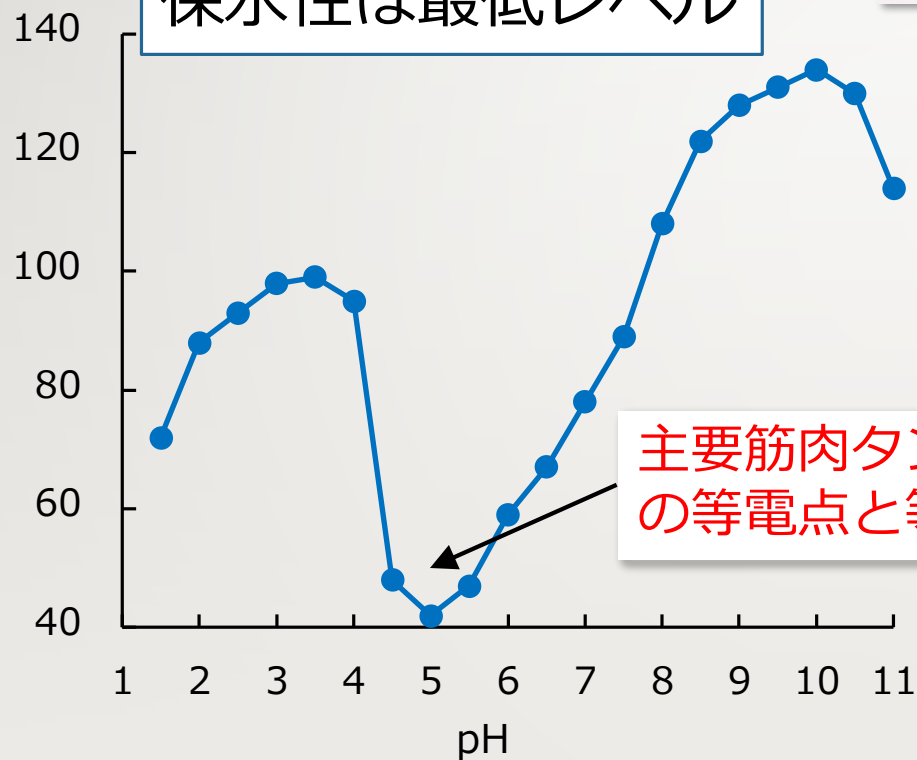


クッキングロス



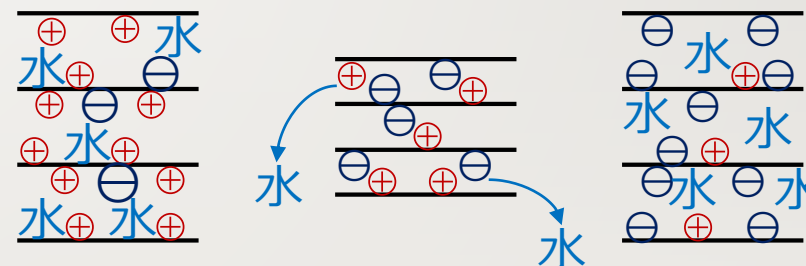
肉のpH 5付近では、
保水性は最低レベル

筋肉タンパク質に対する結合水の割合(%)



主要筋肉タンパク質
の等電点と等しい

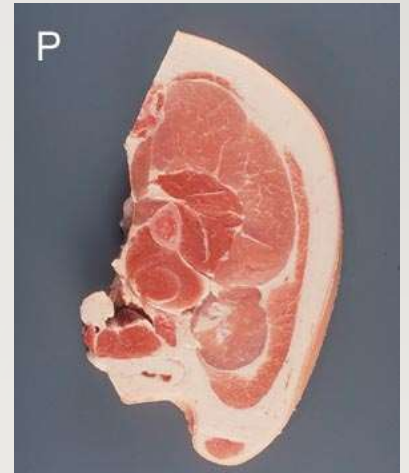
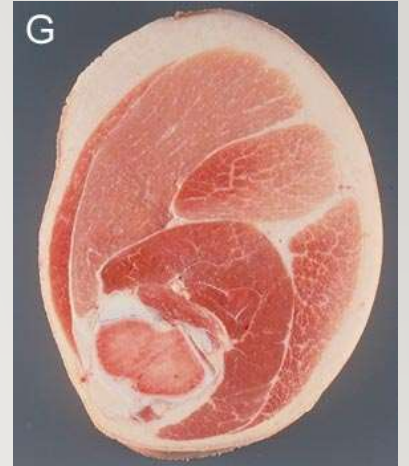
低 ← pH → 高
等電点



部位による肉質の影響

- 骨に近い筋肉
 - 姿勢維持などのため、赤色筋が主体
 - グリコーゲン量が少ないので、食肉の最終pHが高め（pH 6前後）
 - 保水性が良く、酸味も少ない
- 負荷のかかる大きな筋肉
 - 強い運動のため、白色筋が主体
 - グリコーゲン量が多いので、食肉のpHが低め（pH 5.5前後）
 - 保水性が低く、酸味が強い
 - 結合組織も発達して多い

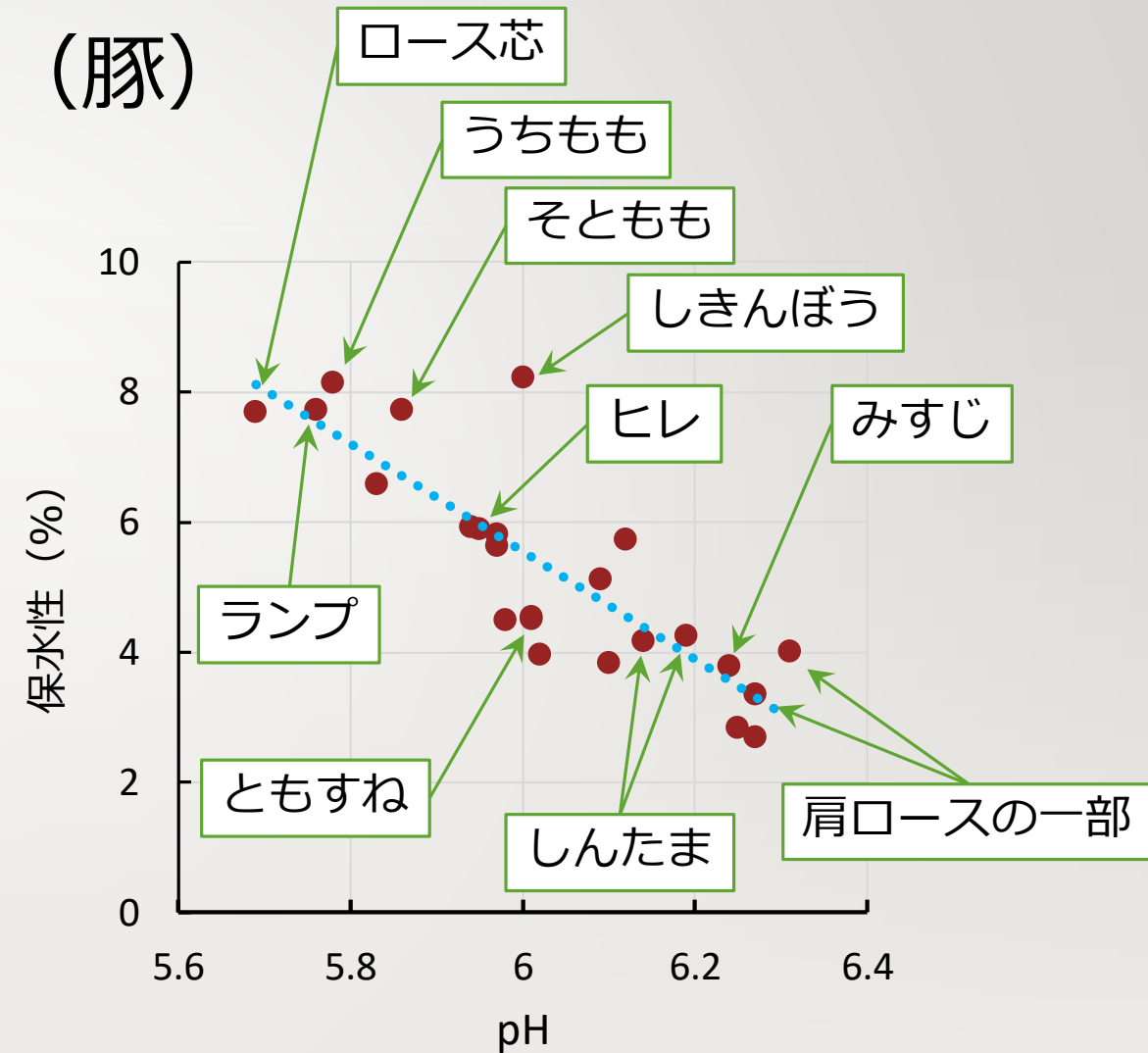
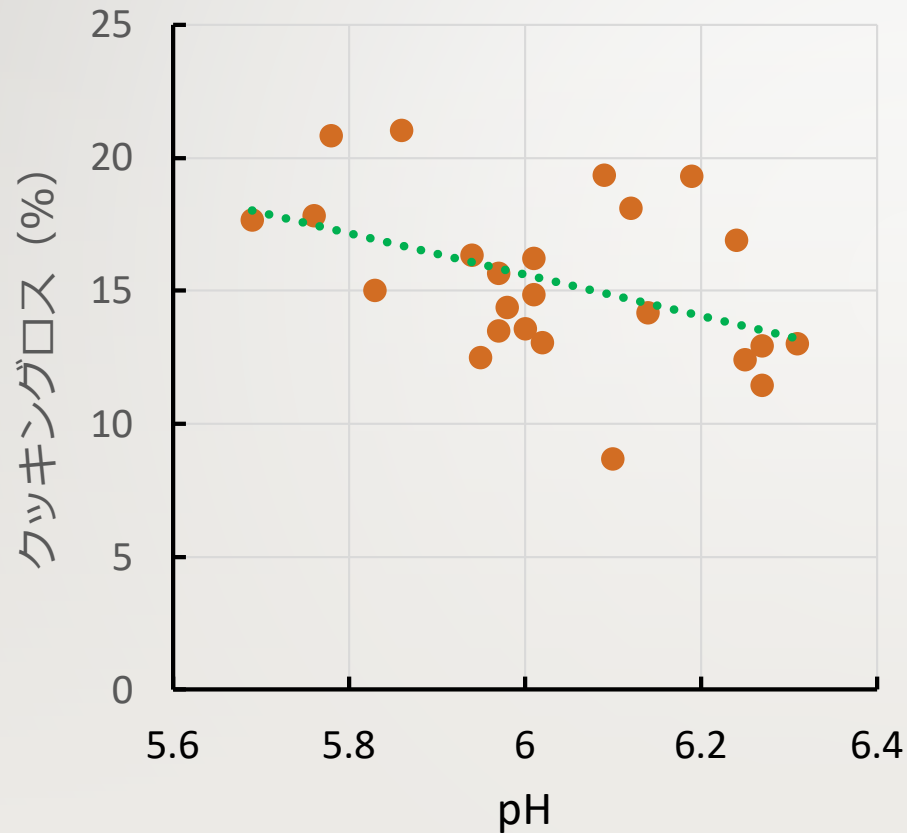
豚枝肉断面



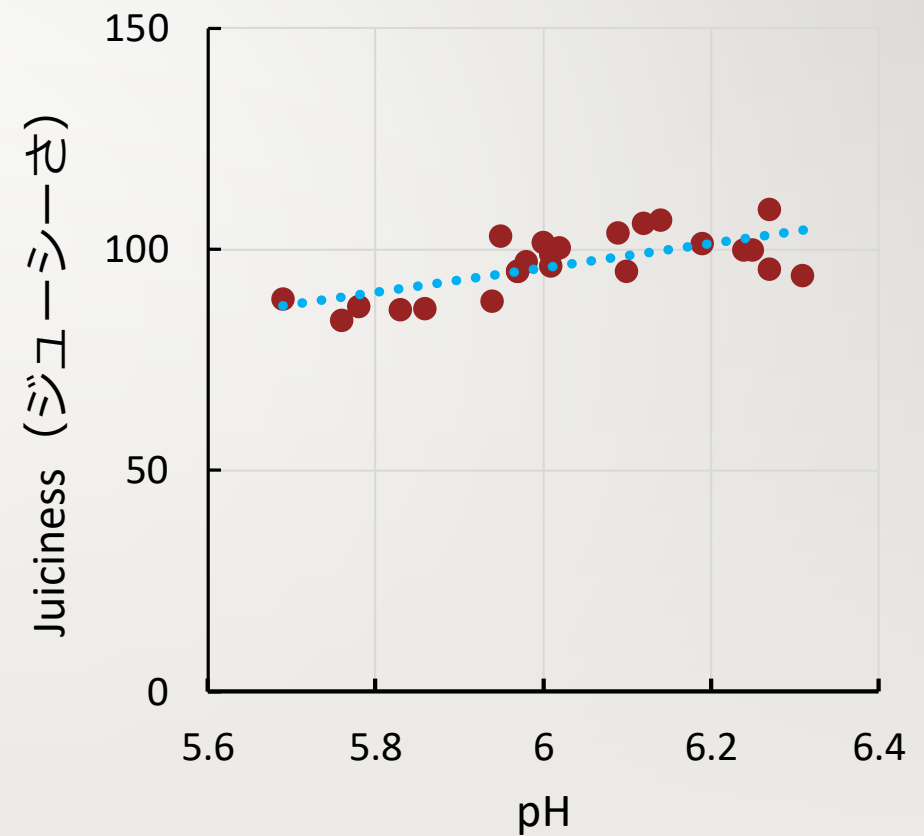
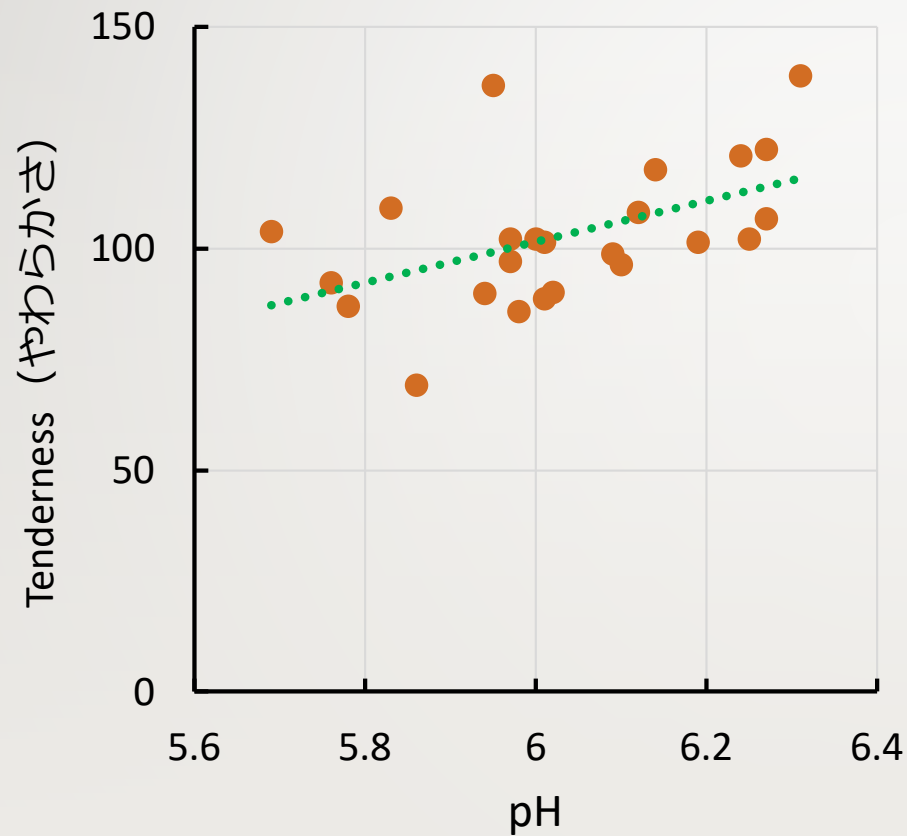
<http://porcine.unl.edu/>

生体での当該筋肉の運動の強度や頻度に影響される

食肉のpHと保水性との関係（豚）



食肉のpHとテクスチャーとの関係（豚）



品種・遺伝・運動も「筋線維型」から考えてみよう!?

- 品種・遺伝
 - 肉用家畜・家禽は産肉成績を重視して育種
 - 大きくなりやすい筋肉は白色筋
 - 産肉成績の良い現代の家畜・家禽（ブロイラー、豚大型種）
 - 白色筋主体で保水性が低く、パサパサした食感
- 運動
 - 筋トレすれば筋肉増えるが、量的に増やすには高負荷が効果的
 - 高負荷で増えるのは白色筋で、高負荷に耐える結合組織も増加
 - 運動で飼料効率も低下

Actomyosin toughnessに 起因する筋線維型

- **赤色筋**の割合の多い筋肉

- 体の内部、骨に近い部位

- キメが細かい
- 最終pHが高い（6以上）

- 保水性が良い
- やわらかく、ジューシー

- **白色筋**の割合の多い筋肉

- 体の外側

- キメが粗い
- 最終pHが低い（5.6-5.7前後）

- 保水性が低い
- かたくて、パサパサ

和牛はなぜやわらかいか

黒毛和種



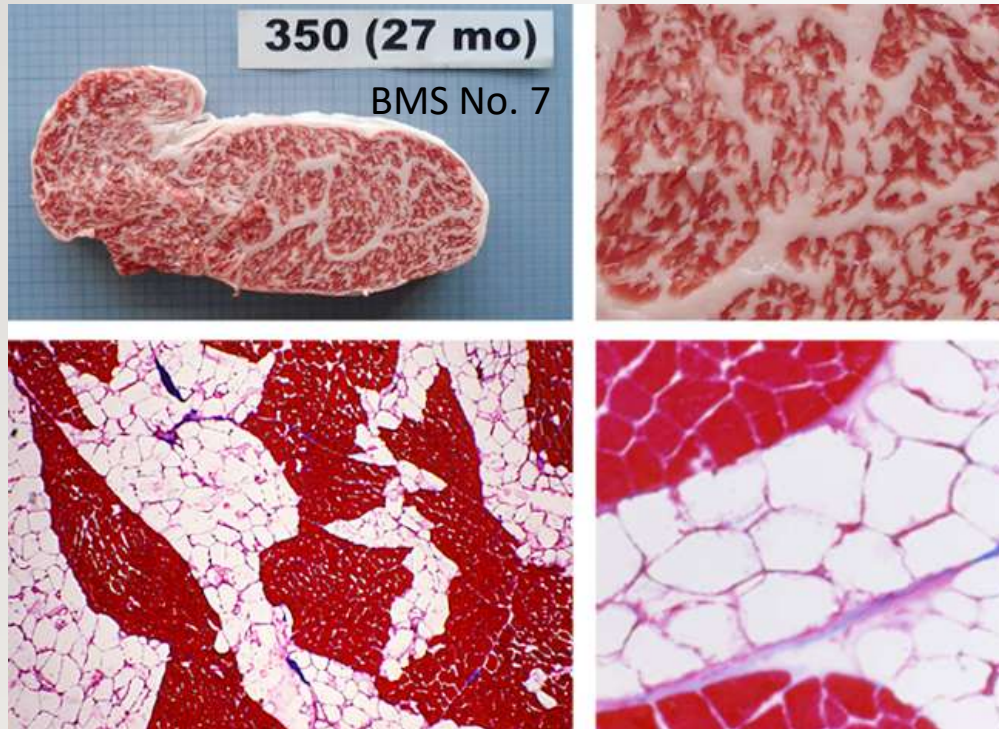
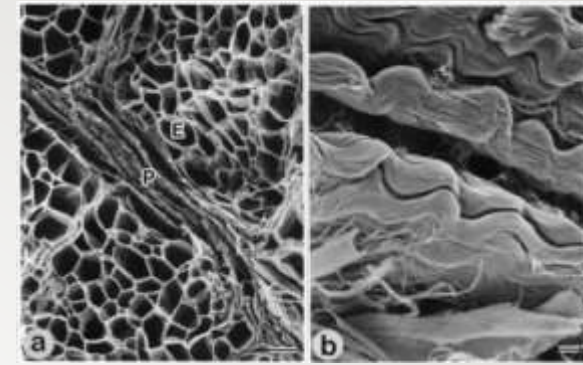
ホルスタイン種



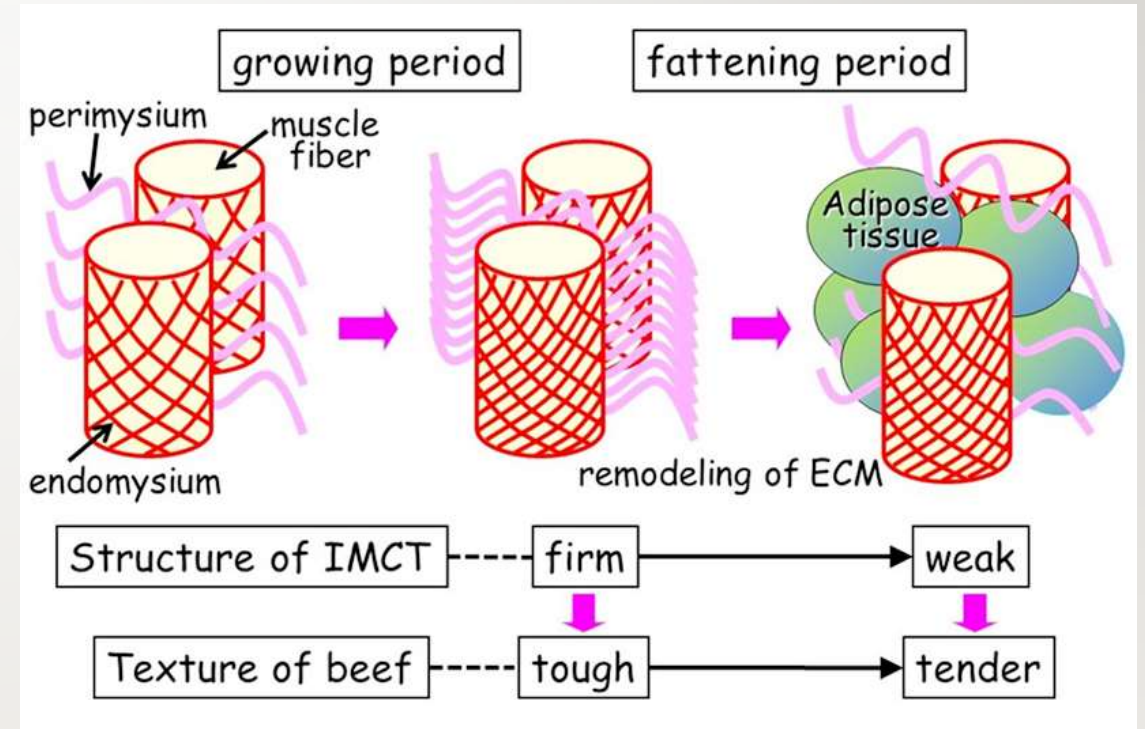
帯広畜産大学 口田研究室

脂肪交雑（筋肉内脂肪）の影響！

和牛はなぜやわらかいか



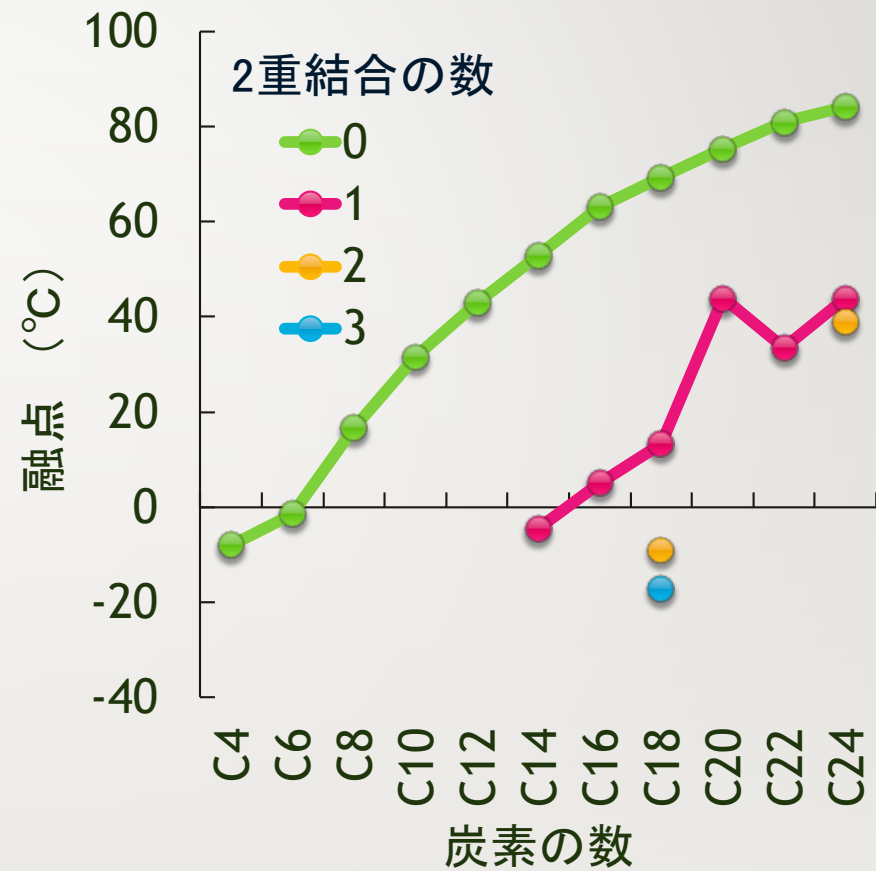
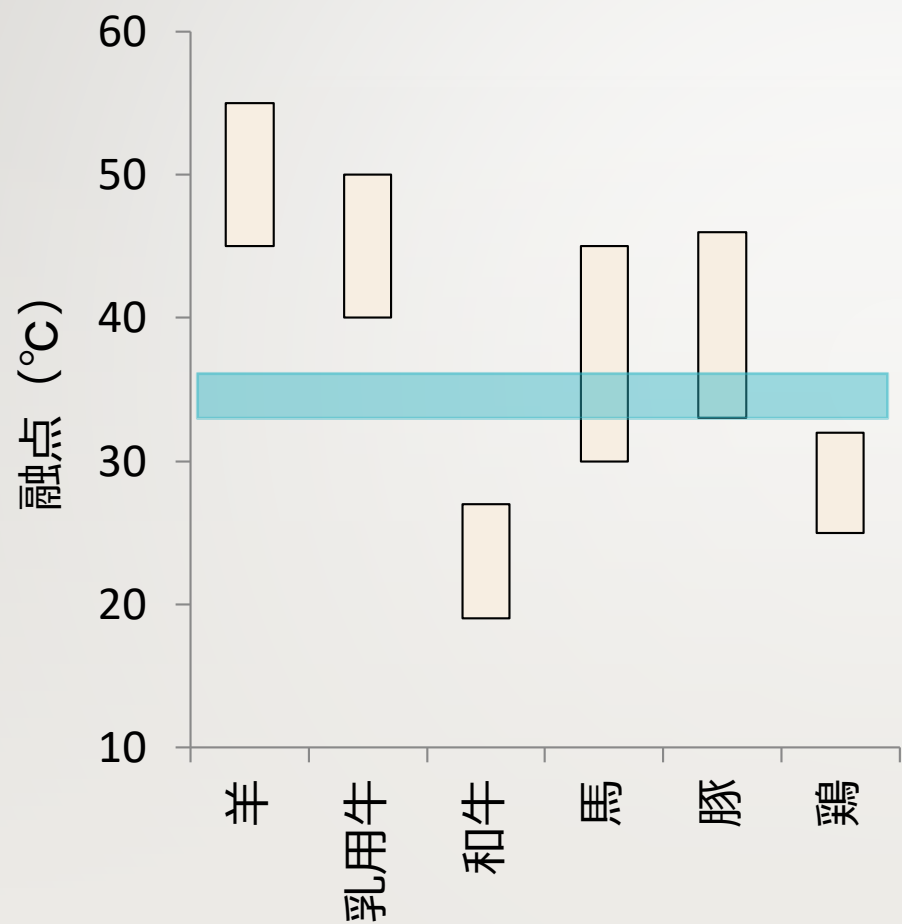
Gotoh et al., (2014) *Anim. Front.* **4**, 46–54



Nishimura (2010) *Anim. Sci. J.* **81**, 21–27

霜降りの脂肪は筋周膜に蓄積し、筋周膜の構造を脆弱化

食肉の脂肪の融点



肉をやわらかく食べるには、

食肉のかたさを決めるタンパク質をなんとかする！

- ✓ 十分な熟成を行う
- ✓ 物理・化学的な方法でタンパク質構造を脆弱化
- ✓ 肉の保水性を高める
- ✓ 熱変性を最低限にする

死後硬直と熟成

- 動物の骨格筋は、死後必ず硬直を起こす（死後硬直）
- しばらく経過すると死後硬直が緩まる
 - 骨格筋組織の構造（主にタンパク質）が脆弱化

先進国ではと畜後しばらく冷蔵保存して
軟化した食肉を食べる
この工程を「熟成」という

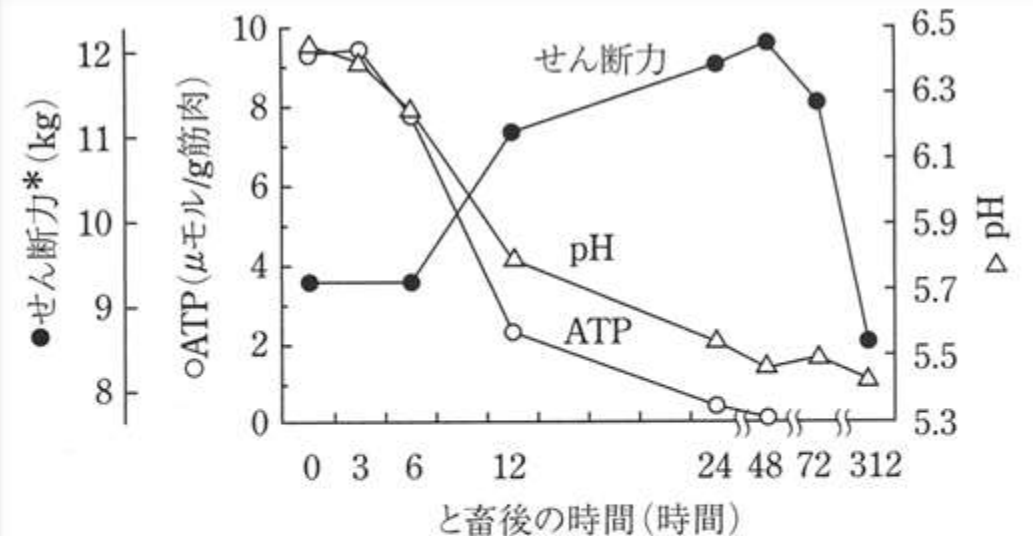


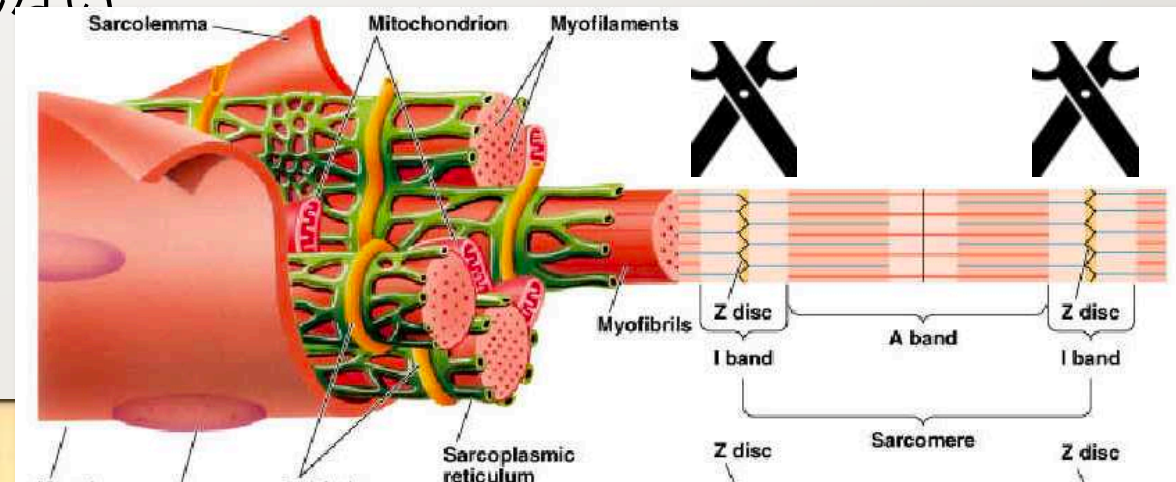
図 10-1 牛そともも熟成中の ATP, pH, せん断力の変化

* せん断力とは肉を切断するのに要する力を表し、小さい値ほど肉が軟らかいことを示す

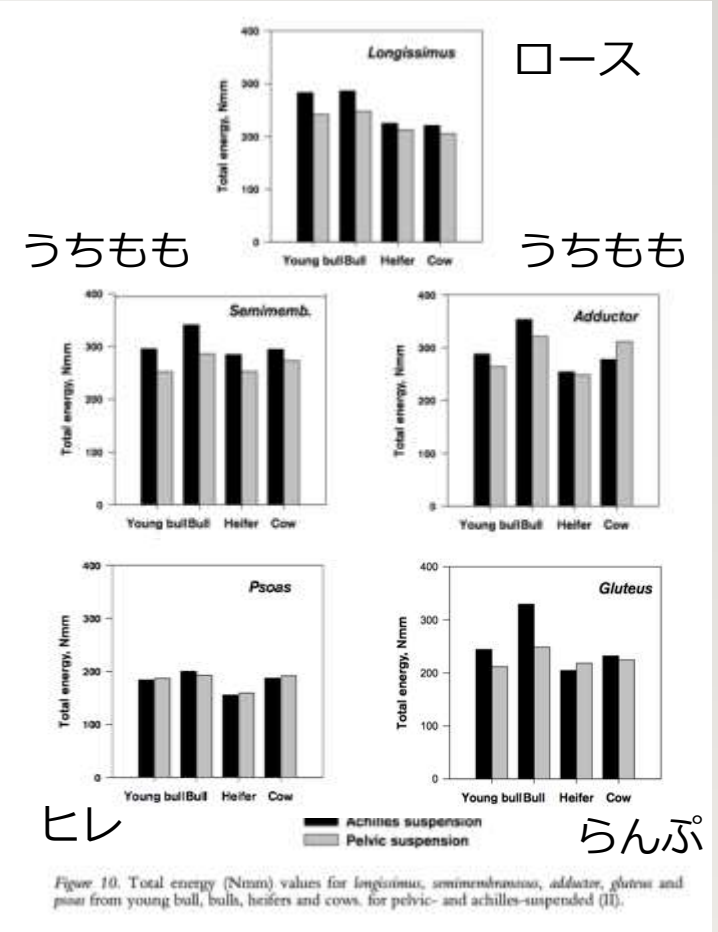
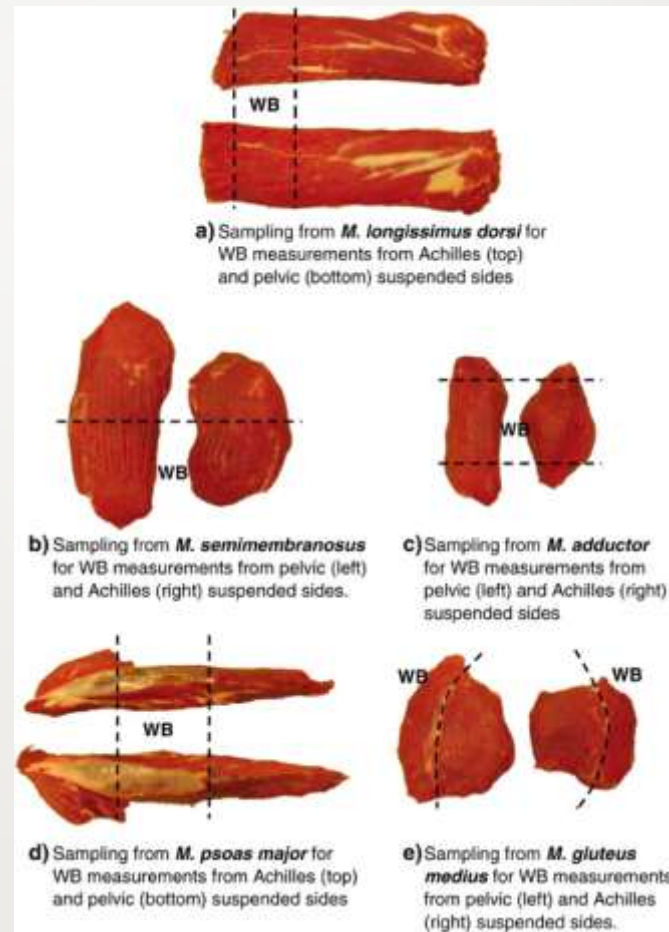
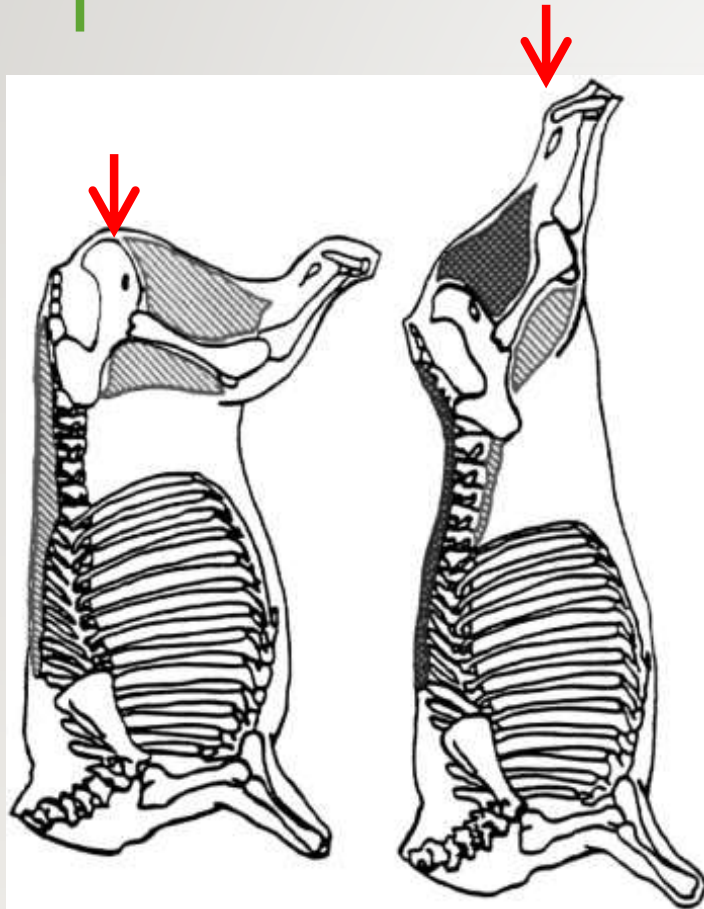
Busch, W. A., Parrish, F. C. Jr. and Goll, D. E., Molecular properties of post - mortem muscle, J. Food Sci. (1967) より改変

枝肉での懸吊

- 骨格筋は骨と骨をつなぐ
- 懸吊して熟成すると、
 - 輸送が簡単で衛生的
 - 放血促進効果
 - 死後硬直を起こしても筋肉は短縮しない
 - 軽度な筋断裂も起こる



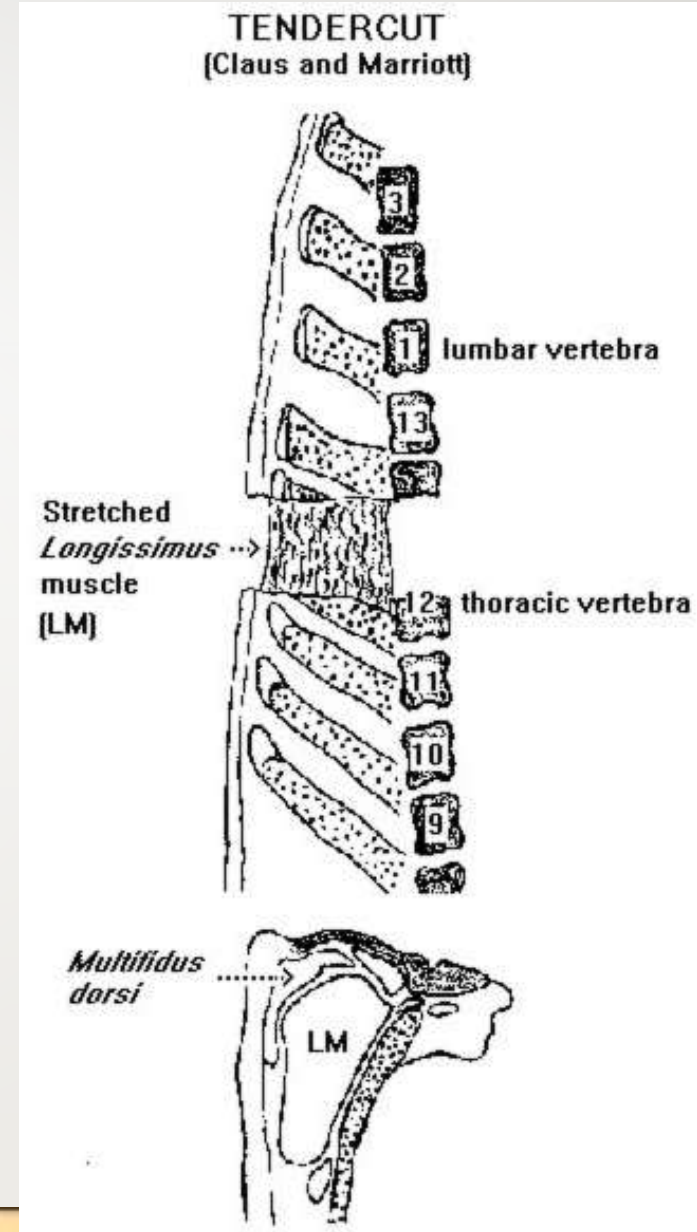
テンダーストレッチ法



テnderカット法

- 枝肉で胸椎を切断して、
最長筋（ロース芯）を自重で引っ張る

死後硬直時に過度に収縮させない！
軽度の筋断裂で肉をやわらかく！



物理・化学的な方法でタンパク質構造を脆弱化

- 物理的手法

- 筋切り
- たたく
- 細切



日本ハムHP



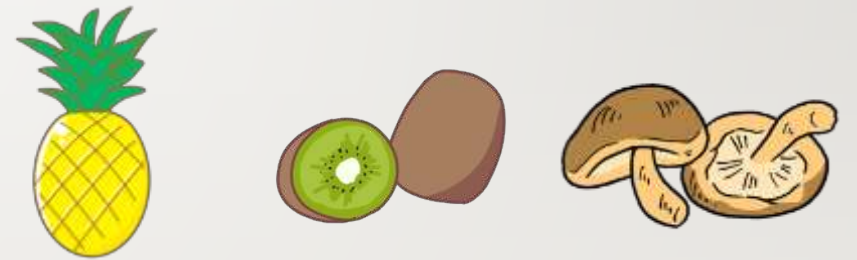
食楽webHP



- 化学的手法

- タンパク質分解酵素

- 果物、きのこ、微生物、発酵食品など



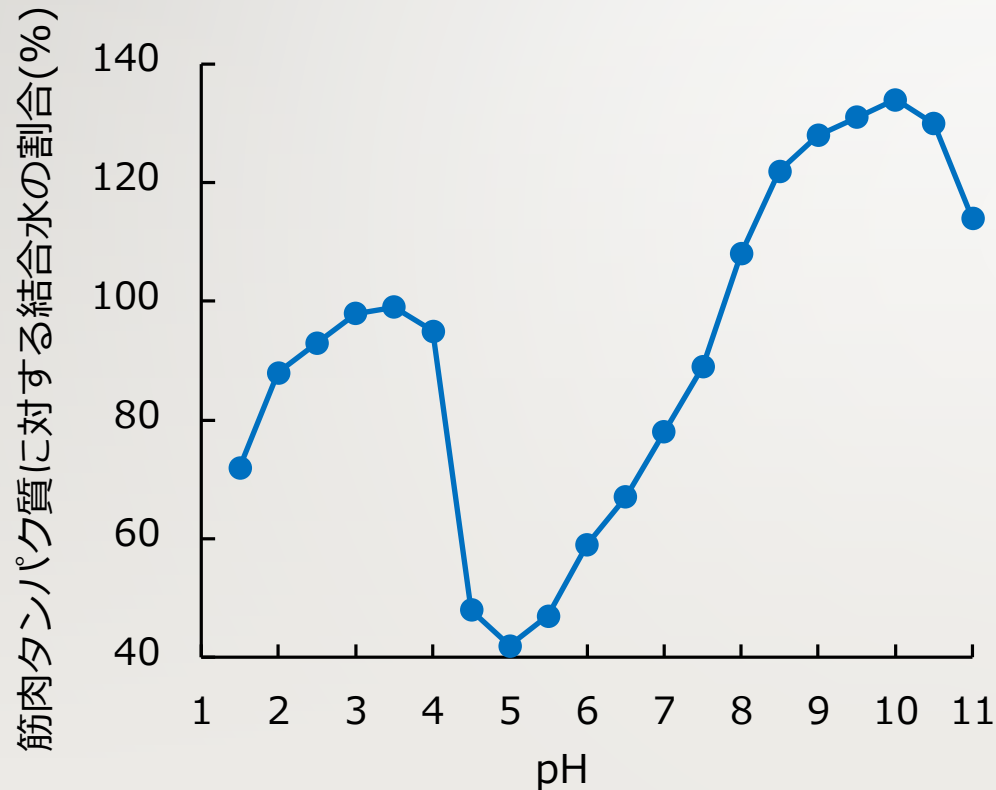
- ✓ 筋原線維タンパク質は分解されやすいが、コラーゲンは分解されにくい
- ✓ 制御が難しい

保水性を高める・低下させない

- 保水性を高めるとなぜ良いのか？
 - コラーゲンなどの加熱収縮にある程度抵抗する
 - 遅い加熱料理では、強く収縮しないでゼラチン化し、旨味ややわらかさが保持
- 保水性を高める要因
 - pH
 - タンパク質の表面電荷と等電点が影響
 - 塩
 - 塩の塩化物イオンが影響
 - 温度



食肉の保水性を変化させるpH



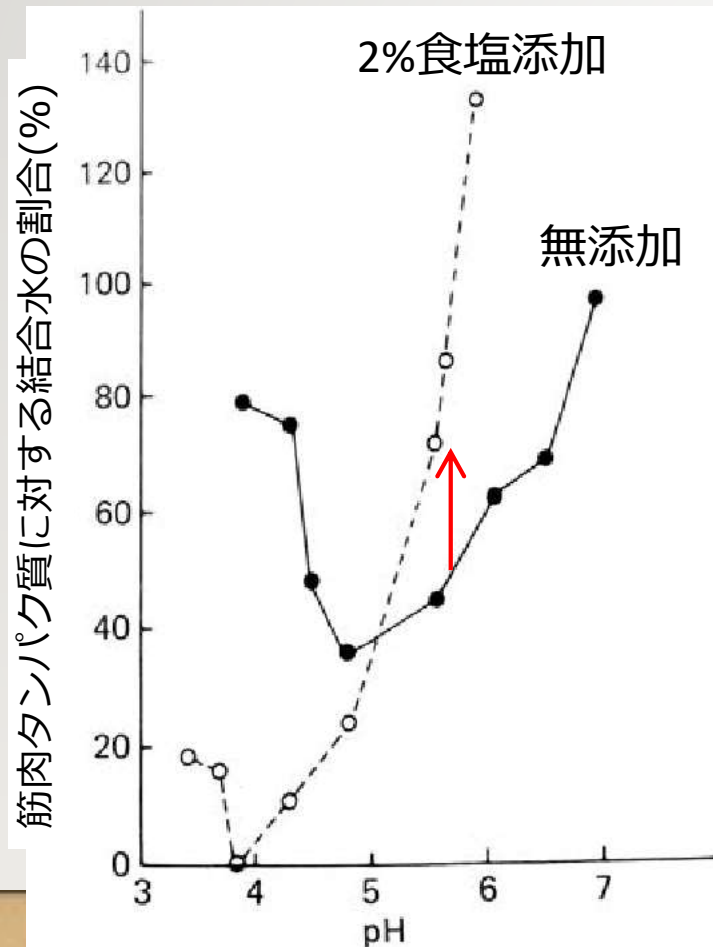
- 酸性

- レモン pH 2.1
- コーラ pH 2.2
- ワイン pH 2-4
- 食酢 pH 3
- みかん pH 3.6
- 乳酸菌飲料 pH 3.6
- ヨーグルト pH 4
- 果汁ジュース pH 4前後
- 醤油 pH 4.7

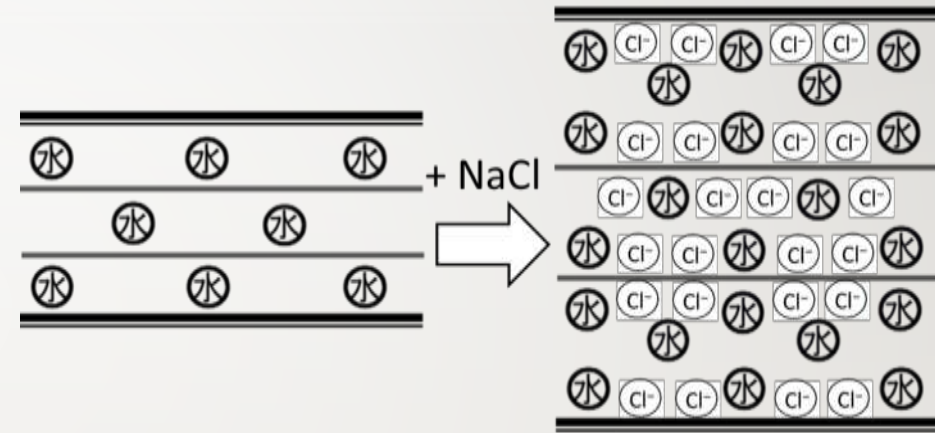
- アルカリ性

- 重曹 pH 8.2
- 重合リン酸塩 pH 9-10

保水性に及ぼす塩の影響



Lawrie's Meat Science



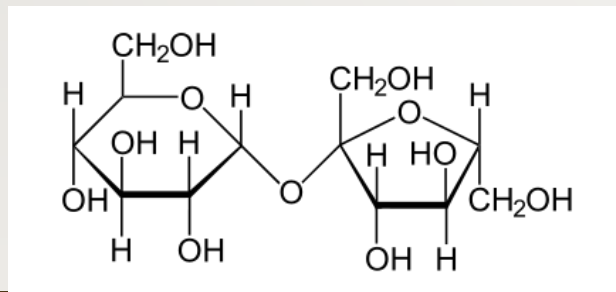
NaCl添加による筋原線維膨潤のイメージ

塩の添加はpHを高めるのと同じメカニズム

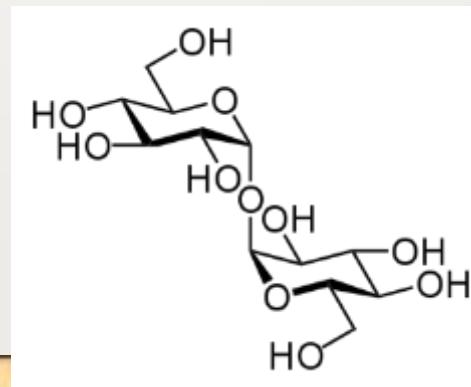
高塩濃度や、食塩（1.8%以上）と重合リン酸塩併用ではタンパク質が溶出して、食肉製品様の保水性・物性を示す

熱変性を抑制

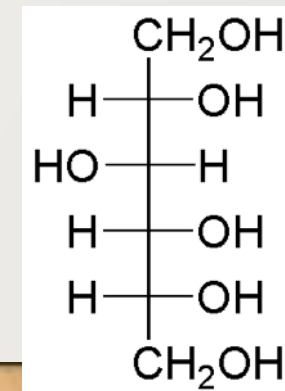
- 加熱温度を下げる
- 糖類（糖、糖アルコールなど）でタンパク質の加熱変性を抑制
 - 分子内のある多量のヒドロキシ基（-OH）がタンパク質の加熱変性時に起こる凝集を拮抗的に阻害して（遅らせて）、かたくなりにくくしていると考えられている



ショ糖



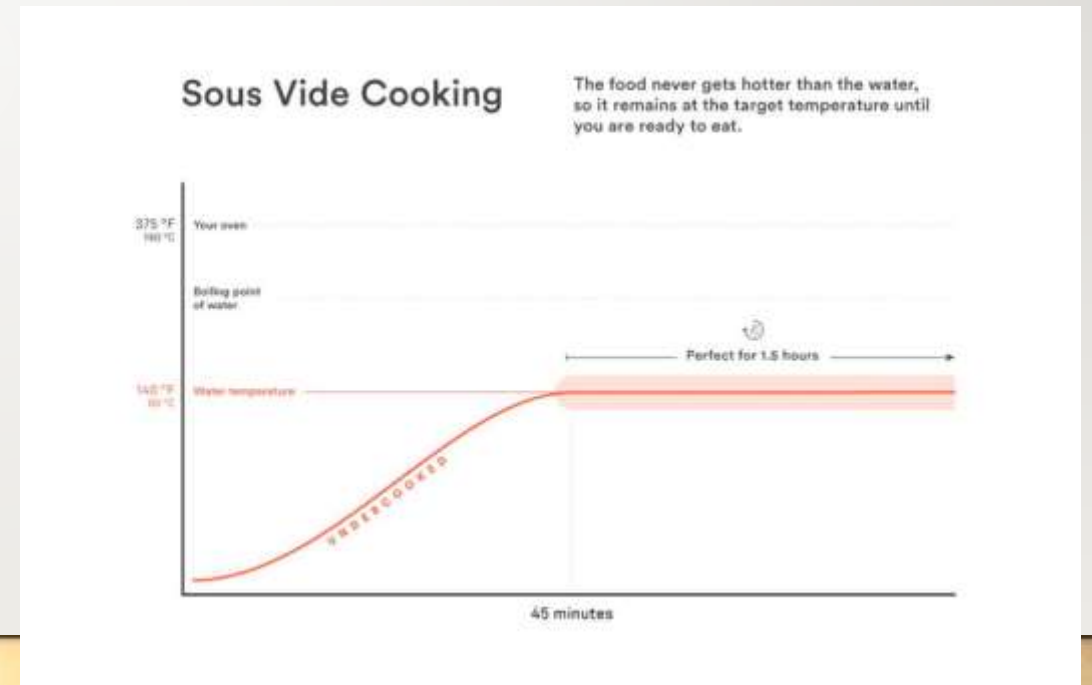
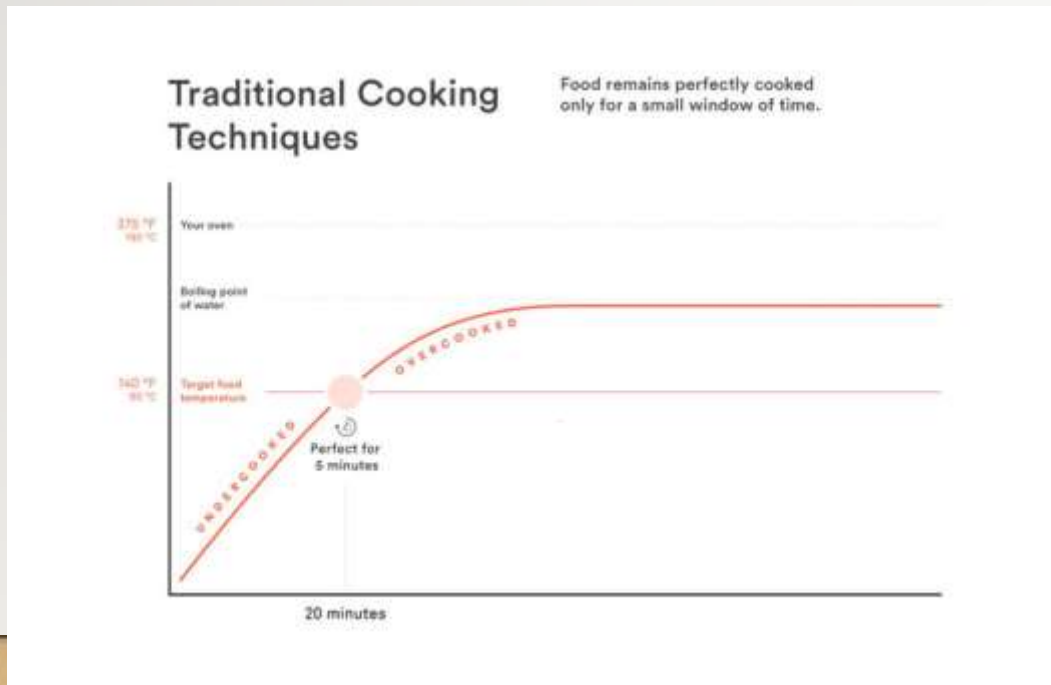
トレハロース



ソルビトール

低温調理・真空調理 (*Sous vide*)

- 下処理を施した食材と調味液を真空包装し、温度と時間管理のできる調理器で材料に応じた時間と温度設定をして調理する方法



保水性に及ぼす各種影響

- 試験

- 試験1 加熱温度の影響 (55~90℃)
- 試験2 塩濃度の影響 (0~2%)
- 試験3 pH調整の影響塩濃度 (乳酸または重曹を用いてpH 4.4~6.6に調整)

- 調理方法

- 牛ランプ肉に食塩とpH調整剤を袋内で混合後、真空包装し、2晩冷蔵庫内静置
- 温浴加熱後、流水冷却

- 検討項目

- 保水性 (クッキングロス)
- 官能評価 (好みの食感)

【個体情報】

2018年06月12日 16時現在

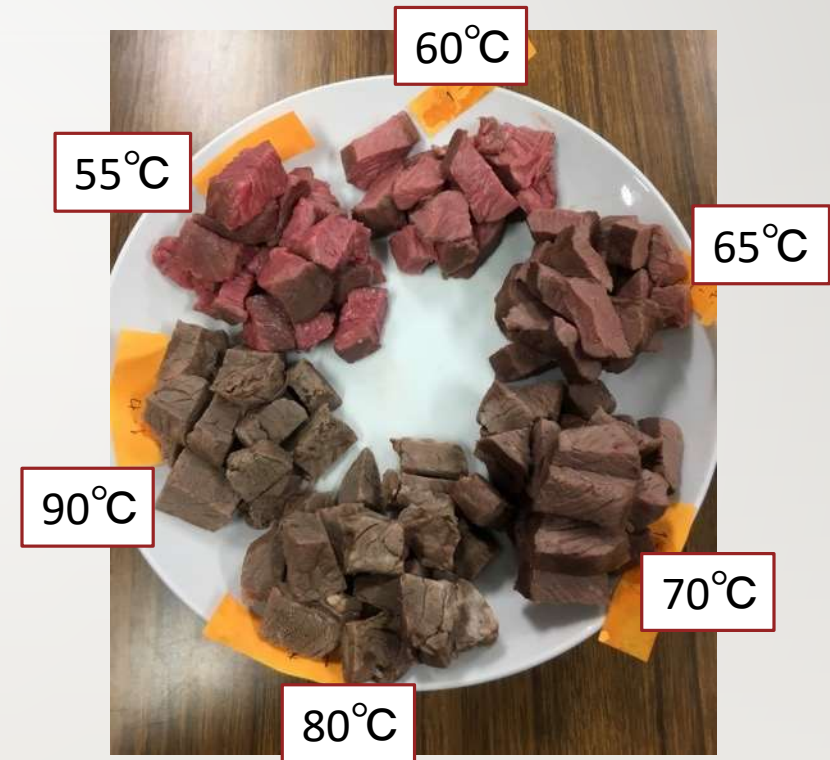
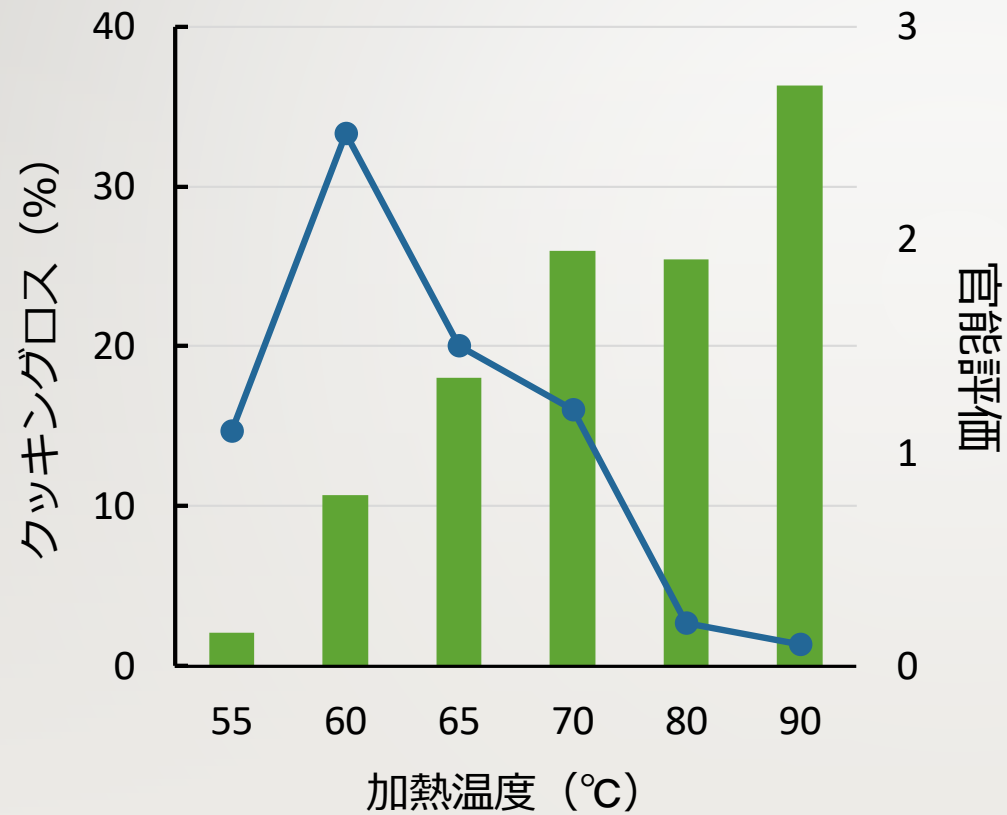
個体識別番号	出生の年月日	雌雄の別	母牛の個体識別番号	種別
0555904594	2009.07.02	メス	0471602611	ホルスタイン種

【異動情報】

	異動内容	異動年月日	飼養施設所在地		氏名または名称
			都道府県	市区町村	
1	出生	2009.07.02	北海道	上川郡東神楽町	後藤 晃司
2	転出	2018.05.16	北海道	上川郡東神楽町	後藤 晃司
3	搬入	2018.05.16	北海道	旭川市	ホクレン北海道中央地域家畜市場
4	取引	2018.05.16	北海道	旭川市	ホクレン北海道中央地域家畜市場
5	搬入	2018.05.27	北海道	名寄市	名寄市立と畜場
6	と畜	2018.05.28	北海道	名寄市	名寄市立と畜場

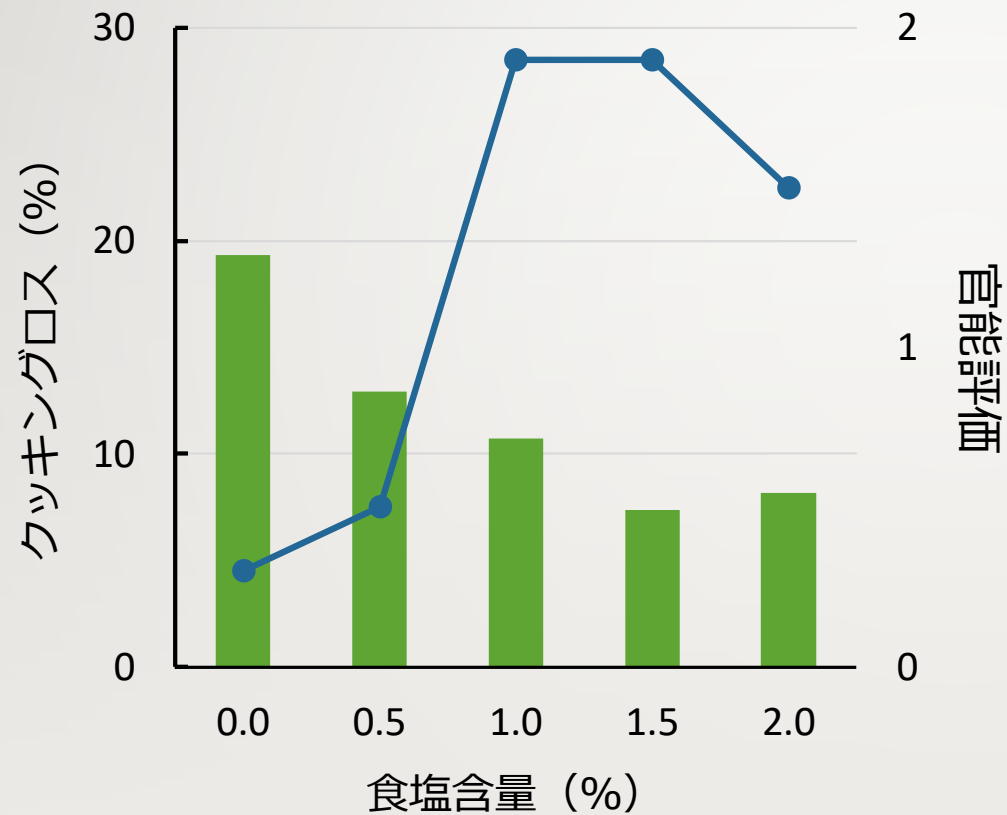
試験1 加熱温度の影響

食塩 1%
1時間 温浴加熱



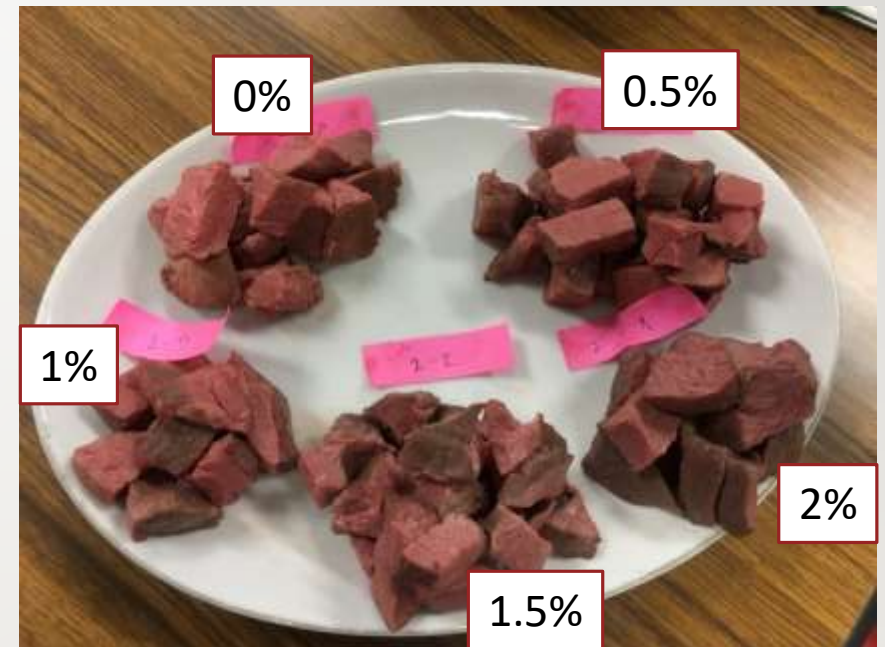
■ クッキングロス ● 評価

試験2 塩濃度の影響



■ クッキングロス ● 評価

60°C 1時間
温浴加熱



pH調整の影響



乳酸1%



乳酸0.25%



無添加

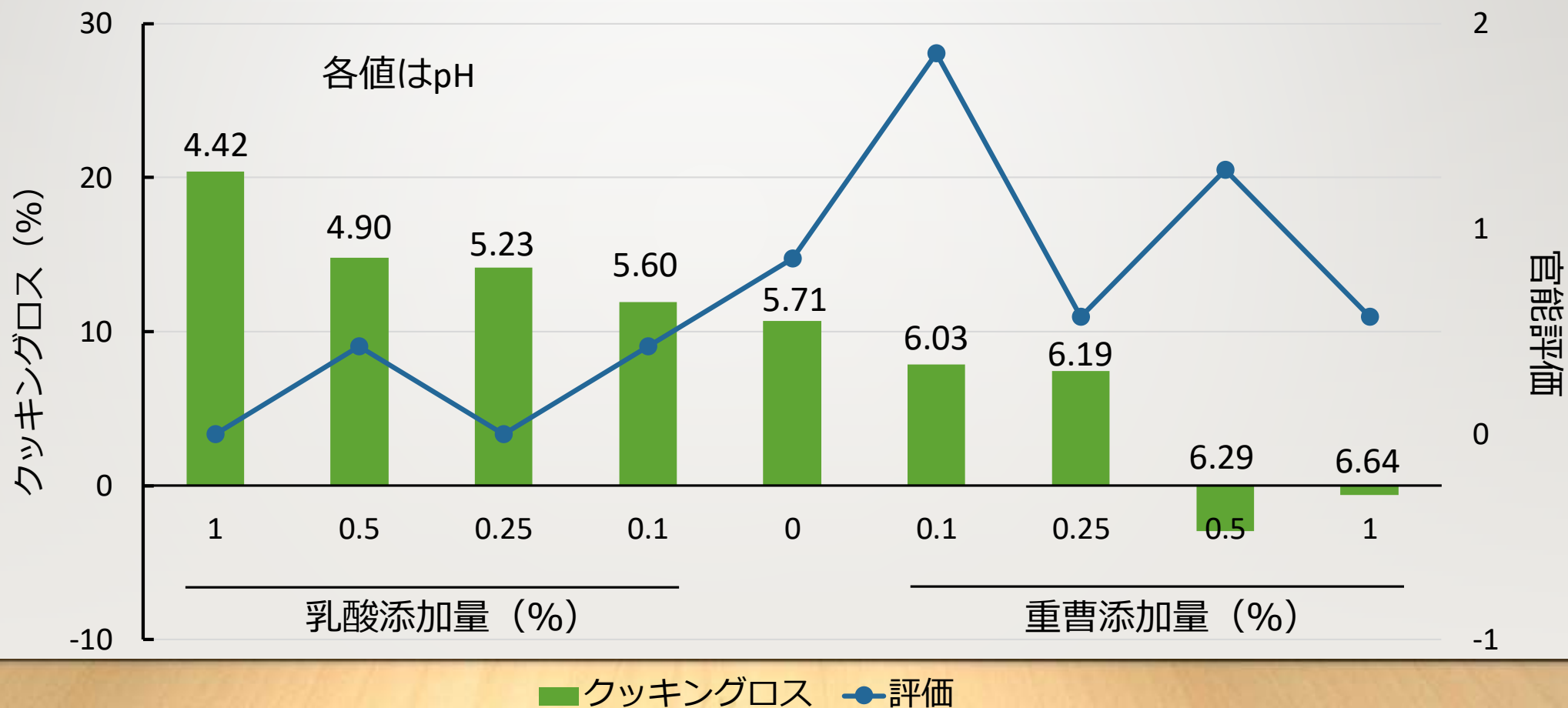


重曹0.25%



重曹1%

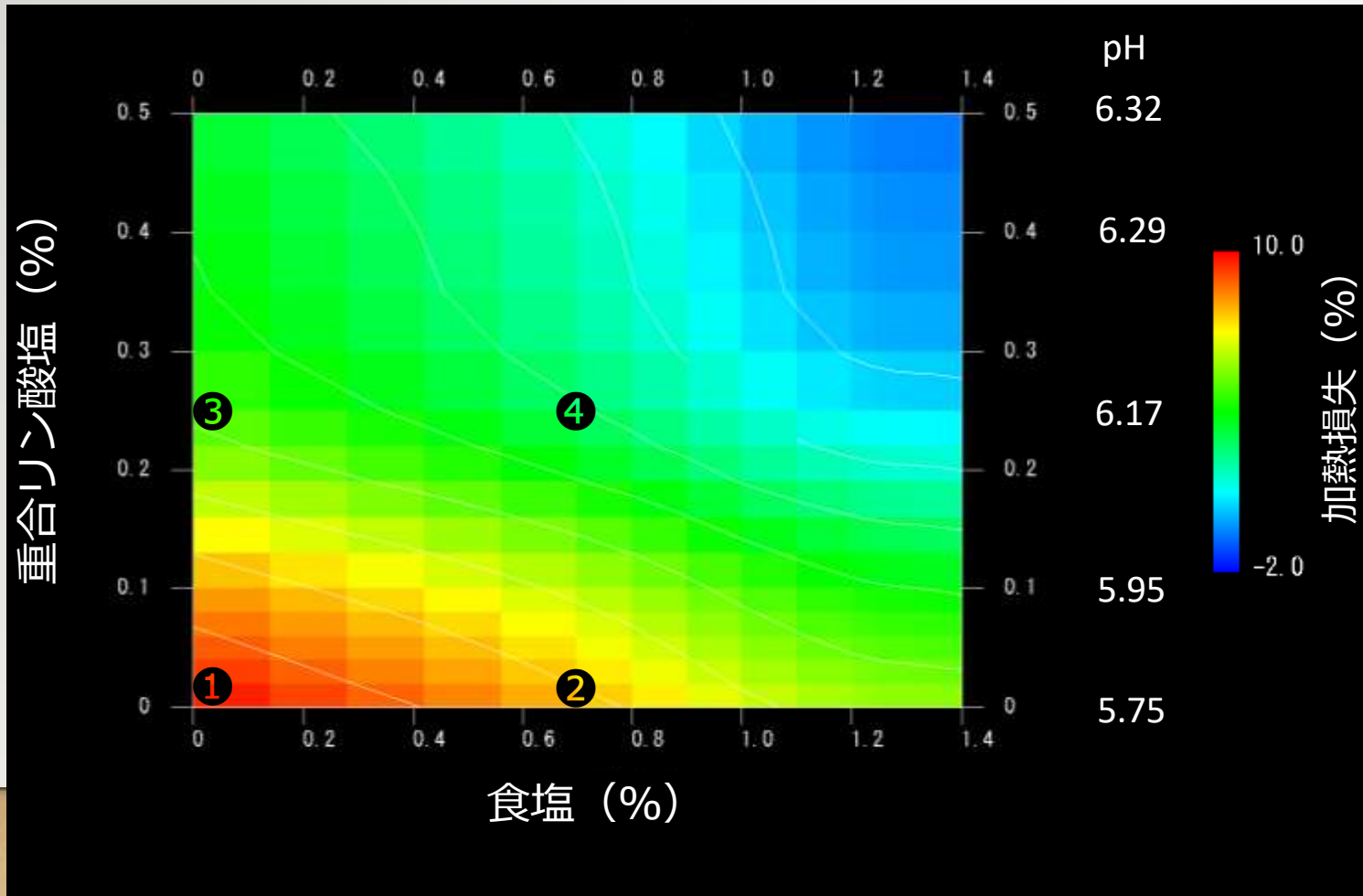
食塩 1%
60℃ 1時間
温浴加熱



真空調理 (*sous vide*) における 加熱損失に及ぼす食塩とpHの影響

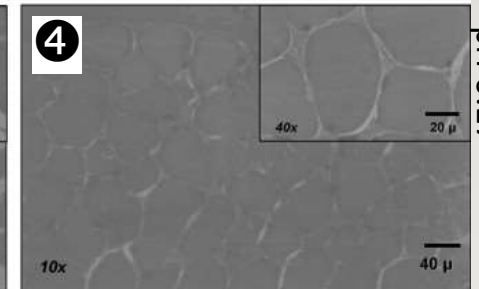
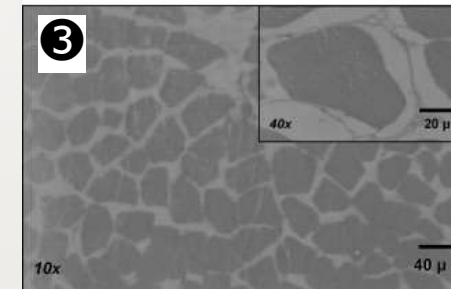
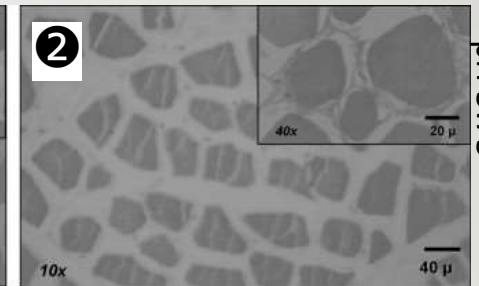
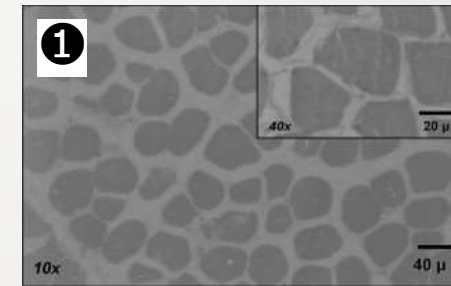
牛半腱様筋 (しきんぼう)

食塩・重合リン酸塩液を注入 (10%) 後、
真空包装して3日間静置
65°Cで真空調理



食塩なし

食塩 0.7%



リン酸塩なし pH 5.75
リン酸塩 0.25% pH 6.17

食肉の食感は、 食肉タンパク質の加熱変化で制御可能!?

ただし、加熱変性を穏やかにすると、殺菌効果も低下します！

メリット、デメリット、ならびリスクを考慮してください