

2012 年度
修士論文

筋肉タイプによる圧力感受性の違い

21034005 高柳 耕平

指導教員 食品機能生化学 教授 山本 克博

酪農学園大学大学院酪農学研究科

目 次

緒 論	1
材料および方法	10
1. 実験材料	10
2. ミートパティの作製	10
3. 高圧処理	11
4. ゲルの保水性評価	12
5. pH 測定	12
6. テクスチャー解析	12
7. 筋肉タンパク質の分画	13
8. 各画分中の筋肉タンパク質の定量	14
結 果	17
1. 筋肉タイプによる加熱ゲルと加圧ゲルの保水性	17
2. 筋肉タイプによる加熱ゲルと加圧ゲルの pH	20
3. 筋肉タイプによる加熱ゲルと加圧ゲルの物性	20
3. 1. かたさ	21
3. 2. 凝集性	22
3. 3. 付着性	23
3. 4. ガム性	25

4. 筋肉タイプによるタンパク質画分の組成	26
考 察	28
要 約	37
Abstract.....	39
謝 辞	42
参考文献.....	43
図 表	48

緒 論

動物の運動を司る筋肉組織は、その機能と構造に基づいて心筋、平滑筋、骨格筋の 3 種類に分けられる。心臓を構成する心筋と内臓や血管壁に存在する平滑筋は意志とは無関係に動く不随筋である。一方、骨格筋は運動神経の支配を受けて、意志によって収縮させることができる随意筋である。また、組織学的に骨格筋は心筋と同様に、位相差顕微鏡で筋線維を観察すると横紋構造が認められるが、平滑筋ではこのような構造は認められない。異なる動物種の間においても、それぞれの筋肉の機能的役割や構造はほとんど同じである。食肉としては、心筋や消化管のような平滑筋も供されるが、日常的に我々が食用としているのは主に骨格筋である [20]。

単に骨格筋と言っても、筋肉の部位により生化学的・生理学的特徴は異なっており、それに影響する因子として筋線維型が挙げられる。筋線維型には大きく 2 種類あり、一つは瞬発的な力を発揮する速筋型、そして、もう一つは持続的な力を発揮する遅筋型である。一般的に、速筋型筋線維は、クレアチンリン酸と ATP に富み、筋グリコーゲンを多く蓄え、主に嫌気的条件下で解糖系による迅速なエネルギー供給をするため、ミトコンドリアが少なく酸素を貯留するミオグロビンも少ない。一方、遅筋型筋線維では、貯蔵脂肪が多く、

主に好氣的条件で TCA サイクル-電子伝達系によってエネルギーを供給するためミトコンドリアとミオグロビンを多く含有する．筋線維型の構成割合は各部位の筋肉によって様々で，どちらか一方の筋線維のみから構成される筋肉は少ない．したがって，これらの筋線維型の分類は，ATPase 染色した筋組織を観察し，個々の筋線維の染まり方の違いから判断される．また，2 つの筋線維型のミオグロビン含量に由来する肉色の違いにより速筋を白色筋，遅筋を赤色筋とも呼ぶ [11, 21].

上述のように動物の筋肉には部位によって様々な特徴があり，さらには畜種によっても多少特徴に差異がみられる．

ここで食肉とは，一般に家畜や家禽の筋肉を衛生的に処理して食用に供されるものの総称である．我が国で食用として供される家畜（獣畜）は，「と畜場法」によりウシ，ウマ，ブタ，ヒツジ，ヤギの 5 種とされ，ニワトリやシチメンチョウ，アヒルなどは「食鳥処理の事業の規制及び食鳥検査に関する法律」によって家禽として取り扱われている．農林水産省が公表した統計データから，日本における食肉消費量をみると，豚肉，鶏肉，次いで牛肉の順に多く，この 3 種類で全体の 99.2%を占めており，その他の肉は 1%にも満たない [18].

筋肉としての特徴は，食肉としての性質にも反映されることから，

家畜の種類や品種，性別，年齢，栄養状態，筋肉の部位，脂肪交雑によって肉質，柔らかさ，風味，成分組成などが異なってくる．さらに，加工特性（保水性，結着性，溶解性，乳化性，発色度合いなど）についても差異が認められる．

通常，食肉製品の製造においては，肉を塩漬した後，乾燥やくん煙あるいは湯煮や蒸煮といった加熱処理を伴って行なわれる．食肉製品に限らず，食品の調理・加工や殺菌には加熱処理が最もよく用いられる．

食品は多種多様な成分の混合系であり，加熱によって様々な化学的变化や構造的変化が生じる．デンプンの糊化，タンパク質の熱変性，脂肪の融解と熱分解，ビタミン・ミネラルの溶出，水分の減少または増加などの成分変化とともに組織の軟化などのテクスチャーの変化が起こる．消化吸收率および栄養効率の改善，酵素を失活させ食品の変質を防ぎ，同時に微生物や寄生虫などを殺菌・死滅させ，衛生的に安全な状態とし腐敗を防いで保存期間を延長できる．また，加熱に伴う代表的な反応としてメイラード反応（アミノ-カルボニル反応），ストレッカー分解，カラメル化反応などが知られている．これらは，褐色化，香気の生成，風味の変化などに繋がるため加工食品（特に味噌，パン，製菓子など）にとって重要な反応である．さらに，メイラード反応の最終生成物群であるメラノイジンは抗酸化

などの活性を有し，食品中で有用な影響をもたらすと考えられている．このような食品における加熱処理は，味や食感を変えて嗜好性を向上させ，食品の栄養価を高めると共に品質保持期限を長期化するなどの利点がある [13, 29].

しかしその反面，加熱による食品成分の化学反応は共有結合に影響を及ぼすことから好ましくない変化も引き起こす．例えば，熱に弱いビタミンや色素などの栄養素の破壊，またはメイラード反応などの結果，栄養価の低下，変色や異臭の発生，風味の劣化など，食品としての品質を損なうこともある．また，食品添加物の効果を半減・消失させる原因になることもあり，アスパルテーム（甘味料）では加熱によって中性～アルカリ性で容易に環化し無甘味のジケトピペラジンになる．さらに，加熱による有害物質の生成も報告されている．食肉や魚などのタンパク質食品では，高温で加熱した場合，タンパク質やアミノ酸が熱分解され，強い変異原性・発がん性を示す多環芳香族炭化水素（ヘテロサイクリックアミン）やベンゾ [a] ピレンが生成される．また，必須アミノ酸であるリジン，トリプトファン，メチオニンはメイラード反応により還元糖と反応して生体内で利用できなくなるためアミノ酸スコアも小さくなる．特にリジンは影響を受け易く，加熱条件によっては，腎臓毒性を有するリジノアラニンに変換，ラセミ化して栄養的有効性を失う．タンパク質

は、加熱により架橋形成して凝集体となるため消化性が低下し、生体内への吸収が妨げられる。同時に、未消化物が腸内細菌に利用されることで、チロシンの分解よりフェノールや *p*-クレゾールのような有害物質が生成し、大腸がんのリスクを高める可能性もある [13, 29, 34].

これらの加熱に伴う変化は、良質なタンパク質供給源とされる食肉や魚の栄養的価値を低下させることになる。このような食品の加熱処理における課題や問題を解決するため、低温化処理や処理時間の短縮といった新たな食品加工技術の研究開発が盛んに行なわれている。

今日まで、超音波の利用、減圧水蒸気蒸留による低温濃縮、超臨界ガスの利用、電磁波の利用などが提案され、実用化もされてきている。高圧処理（HPP ; high pressure processing）も食品分野への応用が期待される非加熱処理技術の一つである [10].

実用化に向けた食品への高圧利用は、世界に先駆け日本で 1987 年頃から研究が始められた。しかし、当時は連続処理の問題、装置の軽量化、コストなどの課題があり、日本であまり普及することにはなかった。その後、HPP の研究は世界に波及し、米国をはじめ各国でも注目され、1999 年では 11 ヵ所だけであった HPP 装置の導入施設も 2010 年には世界中で 156 ヵ所となった [2]。現在、食品産業で

HPP を行なう目的は大きく分けて 3 つあり，加熱処理に代わる低温滅菌処理，次にエビやカニおよびアサリやカキ等の殻を分離するむき身処理，三つ目にタンパク質の変性による高機能性食材の開発で，加圧食品市場は北中米を中心に一大産業となっているとも言われている [26]．また，近年では高圧処理により誘引される形質転換を利用して食品を加工する方法（High-Pressure Induced Transformation）に関する研究が始められている [25]．この新たな高圧処理の利用方法は，酵素の働きを制御することにより食品の組成を変換させ食品から医薬品への変換を可能にするとして，今後の研究が期待される．こうした海外での実績，または新規の研究成果から日本でも HPP 導入を再検討する余地があると思われる．

HPP とは，水を圧力媒体として，静水圧つまり「密閉した容器の中で静止している流体の一点の圧力がある大きさだけ増すと流体内の全ての点の圧力は同じだけ増す」というパスカルの原理を利用して，食品に 100～1,000 MPa（1,000～10,000 気圧）の圧力を加える処理である [4, 19]．

HPP の特徴として，他の処理技術には見られない次のようなものがある．まず HPP は，瞬時に食品の中心まで伝わり効果が表れ，その効果は食品の成分・大きさ・重さ・形状に依存しない．次に，加熱処理のように継続的なエネルギーの供給が必要なく省エネルギー

である．そして最後に，加熱処理とは異なり食品の色，味，香りを変化させずに新しい物性の食品が得られ，食品加工や殺菌ができることが挙げられる．

一般に，より高い圧力では体積の減少も大きくなり，室温における単純な水の圧縮による体積減少は 100 MPa で約 4%，400 MPa で約 12%，600 MPa で約 15% である．また，断熱圧縮により水は 100 MPa で約 2℃ 温度上昇し，ピエゾ効果によってイオンは解離しやすくなり誘電率が高くなる．脂質の融点は 100 MPa につき 10℃ 以上高くなり，デンプンの糊化，多糖やタンパク質のゲル化，結晶の析出，タンパク質の圧力変性なども引き起こされる．

特に，タンパク質は高圧下にさらされると，たとえ 1% の圧縮であっても，わずかな体積変化を生じ変性してしまう．しかしこの場合，タンパク質の主要構造と共有結合は影響を受けず，疎水性相互作用やイオン結合の崩壊および水素結合の形成等が高次構造の変化に係わると考えられている．室温で 100 MPa 以上の高圧では，サブユニットの解離，局所的なアンフォールディング，サブユニットの変性が原因となり，タンパク質の凝集あるいはゲル化が引き起こされる [4]．

また，HPP は熱の発生が少なく共有結合に影響を及ぼさないことから，栄養分の損失，異臭の発生，有害物質の生成もないが，加熱

香気や褐変も起こらない．高圧下における細胞レベルへの影響は，代謝酵素などが失活し，リン脂質の結晶化により細胞の膜構造が破壊され生命活動の停止を招く．そのため，低温においても 100～600 MPa で微生物の栄養細胞は損傷を受け不活性化や死滅に至る．多くの細胞，酵母，糸状菌は 300～400 MPa で死滅し，耐熱性が比較的高い *Micrococcus*, *Staphylococcus*, *Enterococcus*, *Bacillus*（芽胞）では 600 MPa 以上の加圧によって死滅する．したがって，非加熱での食品の殺菌・殺虫が可能となり，それ以外にもエマルジョンの改良，加圧解凍や急速凍結，種子の発芽制御などの利用も考えられる [19]．

食肉への HPP の利用としては，熟成期間の短縮，食肉の軟化，タンパク質の消化性の改良などが考えられる．また，HPP により筋原線維タンパク質の可溶化が促進されることから，食肉の結着性や保水性の向上，ゲル化，食感や風味の改善が期待でき，低塩分で添加物を使用しない食肉製品や新規食肉製品の開発などの可能性も広がる [8]．

これまでの多くの研究報告から，食肉のタンパク質レベル（特にミオシンやアクチン，アクトミオシンなど）における高圧下の分子動態やゲル化機構について徐々に明らかとなってきた．食肉レベルについても，HPP の実用化に向けた低塩，低脂肪，低リン酸の

ソーセージや微生物叢を制御した発酵ソーセージの開発などの試みが行なわれている [6, 7].

しかしながら、先述したように食肉の性質は、筋肉の特徴（畜種、筋線維型、性別、年齢など）に由来することから、HPPでの食肉に与える応答にもこれらが影響するものと考えられるが、そのような基礎的知見はあまり見受けられない。食肉加工へのHPPの実用化については、これらの因子が圧力の効果にどのように関わってくるかも理解しておく必要があると思われる。

そこで本研究では、特に筋肉タイプ（畜種、筋線維型）の違いに着目し、日本での消費が多い豚肉と鶏肉について、それぞれの白色筋と赤色筋で圧力に対する影響の受け方が異なるのかを明らかにすることを目的とした。

材料および方法

1. 実験材料

ニワトリ肉は、本学の実験鶏舎で飼養されている採卵廃鶏（ポリスブラウン種）から分取した．と畜直後に白色筋としてムネ肉（浅胸筋および深胸筋），赤色筋としてモモ肉を採取した．ただし，死後履歴による影響を調べるため，それぞれの筋肉は左右のうち片側のみを死後硬直前の筋肉として採取した．もう一方の筋肉は，そのまま骨格に保持し，5 mM NaN₃を湿らせたガーゼで表面を覆い，その上からラップをして乾燥と微生物の増殖抑制を行なった．これを4℃で24時間放置し，同部位を死後硬直解除後の筋肉として採取した．

ブタ肉は，最寄りの小売店から道南クリーンポーク（生産者；インターファーム株式会社，加工者；フードパッカー道南工場）を購入した．部位には，白色筋としてロース肉の切り身，赤色筋としてヒレ肉のブロックを用いた．

2. ミートパティの作製

得られた各筋肉は，結合組織と過剰の脂肪を除去して，口径 5 mm プレートのミートグラインダー（MK-G2；松下電器産業株式会社）

に 2 度通過させ挽肉とした。

挽肉には，その重量に対して 20% (w/w) の砕氷を加え，終濃度が 1% または 2% (w/w) となるように NaCl を添加した．これをミニチョッパー (MK-M10 ; 松下電器産業株式会社) で 10 秒間のカッティングを 5 回繰り返して混和・細切し，ミートパティとした．

ただし，ニワトリのモモ肉については，微細な結合組織が多かったため，十分な結着性が得られるよう 10 秒間のカッティングを 8 回繰り返した．

3. 高圧処理

低温下で，団子状にしたミートパティを掌に叩きつけて空気を抜き，プラスチック製の絞出し器に入れた．それを円筒状に加工した内径 14 mm，長さ 5～6 cm のポリアロマ製チューブに空気が入らないよう注意深く充填し，シリコン栓で両側から封をして真空包装した．その後，超高圧試験カプセル (P7K-3-10-15 ; 株式会社山本水圧工業所) を用い，100, 200, 300 MPa で 30 分間加圧してゲルを得た．

対照として 70℃ のウォーターバスで 30 分間加熱後，直ちに氷水に入れて急冷し加熱ゲルを調製した．

4. ゲルの保水性評価

各処理で得られたミートパティゲルは，まず全体の重量を測定してからゲルを取り出した．ゲルの表面ならびに円筒チューブ・シリコン栓の水気を吸い取った後，ゲルおよび容器の重量を測定した．

これらの値を基にして以下の式より，離水率を算出しゲルの保水性を評価した．

$$x = A - B - C$$

$$X = x / (C + x) \times 100$$

ここで， x は離水量 (g)， A は全体の重量 (g)， B は容器重量 (g)， C はゲル重量 (g)， X は離水率 (%) を表している．

5. pH 測定

加熱処理あるいは高圧処理によって得られた各ゲルを 2.0 g 採取し，水を 10 mL 加えてホモジナイズした．これをろ過（ろ紙；No.1）し，ろ液の pH を測定した．

6. テクスチャー解析

測定には CREEP METER (RE-33005；株式会社山電) を使用した．用いたプランジャーは直径 40 mm，高さ 8 mm のアクリル製 (No. 2；株式会社山電) とした．2 kgf ロードセル，アンプ 1 倍，測定歪み

60%，格納ピッチ 0.01 sec，測定速度 5 mm/sec で 1 軸反復圧縮試験を行なった．

加熱処理あるいは高圧処理で得られたゲルは，チューブから取り出してノギスで直径を計測し，厚さ 15 mm の円柱状試料とした．試料の測定温度は常温とした．

解析は，専用の自動解析ソフトウェアであるテクスチャー解析 Ver. 2.0（TAS-3305-16；株式会社山電）により行った．それぞれのゲルの解析値から，かたさ応力，凝集性，付着性，ガム性応力について平均値を求め比較した．

7. 筋肉タンパク質の分画

筋肉タンパク質の分画は Busch らの方法 [1] に従って行った．

20 g の挽肉と 200 mL の抽出バッファー (0.1 M KCl, 5 mM EDTA, 20 mM KH_2PO_4 , pH 7.0) をミニカップに入れ，クッキングミキサー (MX-915C; 松下電器産業株式会社) を用い，スイッチ 6 (15,000 rpm) で 30 秒間ホモジナイズした．このホモジナイズ液を遠心分離 (RPR 20-2 (7); 10,000×g, 10 min, 4°C) して，上清部を筋漿画分 1 として回収し，得られた沈殿に抽出バッファーを 100 mL 加えて再びホモジナイズと遠心分離を行った．得られた上清部は筋漿画分 2 として回収し，沈殿部に抽出バッファーを 100 mL 加えてホモジナイズ

後ガーゼでろ過した。ガーゼ上の残渣を結合組織画分として回収し、ろ過液は遠心分離した。上清部は筋漿画分 3 として回収し、沈殿部は 100 mL の抽出バッファーを加えてホモジナイズと遠心分離を再度行なった。その後、上清部を捨て得られた沈殿を筋原線維画分とした。

なお、操作の途中に 3 度回収した上清液は、全て混合して筋漿画分として用いた。

8. 各画分中の筋肉タンパク質の定量

筋肉に含まれる総タンパク質量に占める 3 画分(筋漿タンパク質、筋原線維タンパク質、結合組織タンパク質)で各々のタンパク質を定量した。

挽肉 20 g から分画された筋漿の容量、また筋原線維と結合組織の各湿重量を測定し、そこから一部を採取してタンパク質量を調べ、分画された全体の容量あるいは重量の時のタンパク質量を求めた。また、筋肉タンパク質の分画に用いた挽肉のタンパク質量も同様に調べ、これを筋肉の総タンパク質量とした。各試料におけるタンパク質の定量にはマイクロケルダール法 [33] を用いた。

試料の分解は、試料のタンパク質量が 30 mg 程度となるように適当量採取して分解びんに入れた。これと一緒にブランクとして溶媒

または薬包紙を入れたものも準備した。さらに、酸化剤（硫酸カリウムと硫酸銅・五水和物を 9:1 の割合でよく混合し乳鉢で細粉化したもの）をミクロスパチュラで軽く 1 杯程度入れ、2 mL の濃硫酸を加えた。試料の入った分解びんをドラフト内に設置したマイクロケルダール窒素分解器（柴田科学器械工業株式会社）を用い、液が透明になるまで加熱して試料を十分に分解させた。試料分解液を放冷後、洗ビンから 10~20 mL の水を注意深く加え、発熱が治まってからさらに、全て分解液を 50 mL メスフラスコに移し、2~3 滴のメチルレッド（MR）指示薬（0.1% MR in EtOH のろ過液）を入れ、水を加えて 50 mL とし良く混合した。

蒸留は、マイクロケルダール窒素蒸留装置（パルナス・ワグナー法）（柴田科学器械工業株式会社）を用いて行なった。10 mL ホールピペットを用いて分解液を正確に量り取り、これに 30% NaOH を約 5 mL 加えて水蒸気蒸留した。100 mL コニカルビーカーに 10 mL の 2% H_3BO_3 水溶液と 2~3 滴のブロモクレゾールグリーン・メチルレッド（BCG-MR）指示薬（EtOH に溶解させた 0.2% BCG と 0.02% MR を 5:1 (v/v) で混合したもの）を入れて排気口に固定し、水蒸気と共に遊離してきたアンモニアを吸収させた。

滴定は、コニカルビーカーの内容物を 0.01 N H_2SO_4 で滴定し、終点での容量を読み取って、次式によりタンパク質量を算出した。

$$\text{タンパク質量 (mg)} = f \times V \times 5 \times 0.14 \times 6.25$$

ここで、 f は 0.01 N H_2SO_4 のファクター、 V はブランクでの滴定容量を差し引いた試料の滴定容量 (mL)、0.14 は 0.01 N H_2SO_4 1 mL に相当する窒素量 (mg)、5 は希釈係数 (= 50 / 10)、6.25 は窒素－タンパク質変換係数 (100 / 16) である。

さらに、この求めた各々の採取量中に含まれるタンパク質量を分画した全体の容量または湿重量当りで計算し、同様に各筋肉タイプの挽肉 20 g 中に含まれるタンパク質量にて除して、百分率で表した。

なお、3 画分のタンパク質量の合計と挽肉のタンパク質量との差を、操作中における損失分として表した。

結 果

1. 筋肉タイプによる加熱ゲルと加圧ゲルの保水性

保水性の高いゲルは離水量が少なくなることから，各処理によって形成されたゲルの保水性を離水率として評価した．

筋肉タイプによる高圧処理の影響の差異をより明らかにするため，食品の加工・殺菌手段として一般的な加熱処理についても検討を行った．

筋肉の保水性は死後硬直後よりもと畜直後の方が高いことが知られている [9, 23] ため，死後硬直の前後でのニワトリ肉で加熱処理ならびに高圧処理した時の保水性について 1%と 2%の NaCl 濃度で調べた（図 1 と 2）．

得られた結果では，加熱ゲルと加圧ゲルでニワトリのムネ肉とモモ肉のどちらについても，死後硬直の前後での筋肉間に離水率の大きな違いは認められなかった．1% NaCl の場合，ニワトリのムネ肉は，モモ肉に比べて加熱処理による離水が少なく，離水率は約 8%であった．NaCl を 2% 添加した時でも加熱処理による離水は 1% NaCl の時と同程度であり，NaCl 濃度を上昇させても保水性の向上は認められなかった．これに対して，モモ肉の場合では，1% NaCl での加熱処理による離水率は 20%以上と高く，加えた水のほとんどがゲル

内部に保持されることはなかった．しかし，NaCl を 2% 添加した場合では，加熱処理後も離水率が 10% 程度に抑えられ，加塩による保水性の改善効果がみられた．

通常，白色筋は赤色筋に比べて筋線維が太く，低イオン強度下でのタンパク質溶解性が高い [21]．また，様々な濃度の NaCl 溶液にさらした筋原線維の膨潤の度合を白色筋タイプと赤色筋タイプで比較すると，前者の方がより低濃度で膨潤し始め [30]，白色筋の保水性の高さを裏付けている．このことは，モモ肉が高い NaCl 濃度ないと，加熱後にカッティングで一度取り込んだ過剰の水分を内部に維持することができないという今回の結果を支持している．

田邊ら [28] は，ブロイラー肉における死後変化について生肉の保水性を調査し，死後 24 時間経過したムネ肉の保水性がモモ肉よりも優れていると報じている．このことは，今回の結果と一致しており，潜在的にモモ肉よりもムネ肉は保水性が高いことを示している．

一方，ニワトリ肉の加圧ゲルでは，ムネ肉とモモ肉のいずれも保水性の高いゲルを形成した（図 1 と 2）．加熱ゲルの場合と異なり，両者の筋肉で特徴的な保水性の違いは認められず，1% NaCl での離水率は 1.9% 以下と小さかった．また，1% NaCl に比べ 2% NaCl の時の方が離水率は 0.7% と低く，ムネ肉とモモ肉での値のばらつきも小さかった．100～300 MPa での圧力強度による保水性の差は，ほとん

ど認められなかった。

ブタ肉の場合（図 3）では，1% NaCl でのニワトリ肉の加熱ゲルにみられたような白色筋と赤色筋での大きな保水性の差はなく，ロース肉とヒレ肉ともに 10%前後の離水率であった。また，2% NaCl での加熱ゲルは，いずれの筋肉も 1% NaCl の時に比べてわずかに離水率が低下した。ただし，ブタ肉においても加塩による保水性の向上は，赤色筋（ヒレ肉）の方が白色筋（ロース肉）に比べて顕著だった。

ブタ肉の加圧ゲルもニワトリ肉のと同様に，ロース肉とヒレ肉のいずれも保水性の高いゲルを形成し，両者にほとんど違いはなかった。しかし，NaCl 濃度が 1%と 2%の時のそれぞれの離水率が，ロース肉では 0.7%と 0.4%であったのに対し，ヒレ肉では 1.1%と 0.7%とわずかに大きかった。また，ゲルの保水性には圧力強度による影響はほとんどなかった。

全体的な傾向として，ニワトリ肉よりもブタ肉の方が加熱後の保水性は高いと考えられた。畜種や筋線維型によって加熱ゲルでの保水性は異なったが，高圧処理により，今回使用された筋肉の全種類で保水性の高いゲルを形成した（図 1，2 および 3）。また，加水率 20%では 1% NaCl の時でも離水率は 1.5%以下と極めて小さく，100～300 MPaの間では圧力強度による保水性の差はほとんど認められ

なかった。

2. 筋肉タイプによる加熱ゲルと加圧ゲルの pH

各処理による pH の変化を図 4 と 5 に示す。pH の範囲はニワトリ肉で 5.82～6.47，ブタ肉では 5.66～6.19 であった。各処理による pH の変動は僅かではあったが，全体的な傾向としてニワトリ肉よりもブタ肉の方が低く，また白色筋よりも赤色筋の方が高かった。

加熱処理では筋肉タイプによらず，共通して生肉（未処理）よりも pH は高くなった。一方，加圧処理では，100 MPa での pH がいずれの筋肉タイプでも生肉とほぼ同じであった。しかし，300 MPa 処理では加熱処理の場合と同程度の pH となり，処理圧力の増大に伴って pH が上昇した。

前述の田邊らの研究 [28] では pH の変化についても調べられており，ブロイラー肉の死後の pH 変化の範囲は狭く，死後 3 時間にムネ肉で pH 5.62，モモ肉で pH 5.89 と共に最も低くなり，その後は両方とも緩やかに pH が上昇した。死後 72 時間経つと，ムネ肉では pH 5.68，モモ肉では pH 6.00 になったと報じている。

3. 筋肉タイプによる加熱ゲルと加圧ゲルの物性

テクスチャー解析における測定速度は，実際の咀嚼スピードを考

慮し、今回使用した機器で連続圧縮が可能な 5 mm/sec で行なった。

テクスチャーの解析方法を図 6 に示す。この方法を用いた加熱ゲル（硬直前のニワトリのモモ肉およびブタのロース肉共に 2% NaCl）のテクスチャープロフィール曲線（図 7 と 8）では、2 つのピークが検出されずに測定限界荷重に達した。一方、加圧ゲルは、圧力強度に依存した推移が認められた。両方の処理で正の荷重に対して負の荷重（付着性）は小さかった。もろさは認められなかった。

ニワトリ肉の加圧ゲルおよびブタ肉の 100 MPa または 200 MPa 処理したミートパティゲルでは、第 1 ピークに塑性変形のような荷重変化が認められた。しかし、それ以外の場合では、第 1 ピークは尖状となり、荷重は大きく増加しながら最大値まで達した。

以下に、テクスチャーパラメータごとの結果を記す。

3. 1. かたさ

かたさの結果を図 9～11 に示す。全ての筋肉タイプで加圧ゲルは、加熱ゲルに比べて軟らかかった。また、加熱ゲルのかたさは、筋肉タイプ間で大きな差はみられず、120～140 kPa 程度となった。NaCl の増加に伴い、加熱処理では硬いゲルが形成されたが、加圧処理では必ずしもかたさの増加には繋がらなかった。

加圧処理によるニワトリ肉のゲル化は、圧力強度の影響をほとん

ど受けず，100～300 MPa 処理で，いずれもかたさは 10～32 kPa 程度となったが，100 MPa に比べて，それ以上の圧力で処理した方が硬くなった．また，死後硬直の前後でのゲルのかたさには顕著な違いがみられなかった．

ブタ肉は 1% NaCl でもしっかりとしたゲルを形成した．加圧処理で得られたブタ肉ゲルのかたさは，100 MPa 処理で 20～30 kPa，300 MPa 処理で 86～110 kPa となり，圧力の上昇によってゲルのかたさは大きく増加した．

処理圧力の増大に伴うかたさの増加は，ニワトリ肉よりもブタ肉で顕著に認められた．また，両種の筋肉において白色筋と赤色筋を比べると，白色筋の方が圧力強度に依存したかたさの変動がみられ，この違いは低塩濃度（1% NaCl）の時に明確であった．

3. 2. 凝集性

凝集性の結果を図 12～14 に示す．加熱ゲルと加圧ゲルでは，かたさのような著しい差はみられなかった．1% NaCl に比べ 2% NaCl では，いずれの筋肉タイプも圧力依存的な凝集性の上昇が明確にみられ，300 MPa 処理での値は加熱ゲルの凝集性と同等であった．しかし，死後硬直後でのニワトリのムネ肉の場合は，処理圧力に伴う凝集性の上昇というよりも，むしろ凝集性の低下を抑制するようにみ

えた。

死後硬直前のニワトリ肉では，硬直後に比べると特にムネ肉の凝集性がどの処理条件でも高い傾向があり，2% NaCl での加圧ゲルの凝集性は圧力強度に依存して大きく増加した．一方，死後硬直後のニワトリ肉については，加熱処理では 1% NaCl よりも 2% NaCl の方が凝集性は増加し，またムネ肉よりもモモ肉の方が凝集性は増加した．加圧処理では NaCl 濃度によって圧力強度に伴う凝集性の変化が異なった．圧力強度の増大に伴う死後硬直後のニワトリ肉の凝集性は，1% NaCl の時にはムネ肉で緩やかに低下し，モモ肉ではほぼ一定の値となり，2% NaCl の時にはムネ肉はほぼ一定の値となり，モモ肉では増加した．

ブタのロース肉とヒレ肉の凝集性では，両方とも同程度の値で類似した変化であった．1% NaCl でのゲルの凝集性は，いずれの条件で処理しても大きな差はなかったが，2% NaCl での加圧ゲルは圧力強度に依存して増加し 300 MP 処理のモモ肉での加圧ゲルは加熱ゲルの凝集性を大きく上回った．

3. 3. 付着性

付着性の結果を図 15～17 に示す．いずれの筋肉タイプにおいても加熱ゲルでの付着性は非常に低いのに対し，加圧ゲルでは比較的高

い値を示した。

死後硬直前でのニワトリのムネ肉では、1% NaCl での加圧ゲルの付着性はいずれの圧力強度でも一定の値であった。2% NaCl では 200 MPa 処理した時に付着性が大きく増大し、100 MPa と 300 MPa での付着性は 1% NaCl の場合と大差がなかった。モモ肉では、1% NaCl での加圧ゲルは圧力依存的に付着性が増加したが、2% NaCl では 100 MPa 処理した値から処理圧力の増大に伴って緩やかに低下した。

死後硬直後でのニワトリのムネ肉では、NaCl 濃度にほとんど影響されず、100 MPa 処理した時に最も付着性が大きくなり約 600 J/m^3 であった。200 MPa 処理すると 340 J/m^3 程度にまで低下し、300 MPa での処理では 400 J/m^3 程度までわずかに増大した。モモ肉では、1% NaCl での付着性は 100 MPa 処理で低く、200 MPa で処理するとわずかに増加したが 300 MPa では同程度の値に留まった。しかし、2% NaCl では、100 MPa と 200 MPa で処理した時の値はほぼ同じで、300 MPa 処理でわずかに低下した。

ブタのロース肉では、硬直後のニワトリのムネ肉でみられたような変化と類似しており、1% と 2% のいずれの NaCl 濃度でも 100 MPa 処理で付着性は最大となり、200 MPa と 300 MPa では大差なかった。ヒレ肉では、圧力に依存して付着性が減少し、特に 2% NaCl で顕著だった。

3. 4. ガム性

ガム性の結果を図 18～20 に示す．加熱ゲルと加圧ゲルでは，加圧ゲルの方がガム性は小さく，かたさの結果と類似していた．また，ニワトリ肉とブタ肉のどちらも，100 MPa よりも 200 MPa 以上で処理した方がガム性は比較的大きかった．

死後硬直前でのニワトリのムネ肉では，1% NaCl での加熱ゲルのガム性が 86 kPa となり，モモ肉の 60 kPa よりも大きかった．しかし，死後硬直後での 1% NaCl の加熱ゲルを比べると，モモ肉は 60 kPa とほぼ変わらなかったが，ムネ肉では 44 kPa に低下したため，逆にモモ肉よりも小さくなった．また，これとは別に死後硬直後での両方のニワトリ肉は，2% NaCl でのガム性がより大きな値となった．

一方，加圧ゲルでは死後硬直の前後でのこのような傾向はみられず，むしろ NaCl 濃度や圧力強度に関係なく，ムネ肉とモモ肉ともに 3～19 kPa の値であり，大きな差もなく加熱ゲルに比べてかなり小さかった．ただし，2% NaCl での死後硬直前のニワトリ肉では，圧力依存的なガム性の上昇が僅かにみられた．

ブタ肉では，1% NaCl での加熱ゲルのガム性がロース肉では 56 kPa，ヒレ肉では 44 kPa となり，ニワトリ肉に比べてわずかに小さかった．また，2% NaCl としてもヒレ肉の加熱ゲルのガム性はほぼ

変わらなかった．加圧ゲルのガム性は，ニワトリ肉に比べて全体的に高く，また圧力強度の増大に伴うガム性の上昇が顕著だった．1% NaCl の時に比べ 2% NaCl では大きな値となり，特に 300 MPa 処理では加熱ゲルと同程度の値となった．

4. 筋肉タイプによるタンパク質画分の組成

筋肉組織を構成するタンパク質は，筋原線維タンパク質，筋漿（筋形質）タンパク質および結合組織（肉基質）タンパク質に大別され，これらの中でゲル形成に係っているのは筋原線維タンパク質である．筋原線維タンパク質のゲル形成能は，ゲルの保水性や物性にも深く関係していることがよく知られている．そこで，本実験で用いた筋肉での各々の画分比がどのようなになっているのかを調べた（図 21）．

五訂増補日本食品標準成分表によると，各筋肉での可食部 100 g あたりのタンパク質量は，成鶏肉でのムネ（皮なし）で 24.4 g，ささ身で 24.6 g，モモ（皮なし）で 20.7 g とされ，豚の大型種肉でのロース（赤身）で 22.7 g，ヒレ（赤身）で 22.8 g とされている [15]．本実験での各筋肉に含まれるタンパク質量は 21～25% 程度であった．この結果は，筋肉のタンパク質含量が畜種や部位だけでなく品種や肥育飼料等によっても異なることを考慮すると，妥当的と考えられた．なお，各筋肉 20 g から調製した 3 画分でのタンパク質の回収率

は 90～95%であった。

本実験で用いた筋肉のタンパク質量は、ニワトリのムネ肉が最も大きい値となり 24.7%，それに対してモモ肉では 20.7%と最も小さい値となり，部位によるタンパク質量差が顕著だった．一方，ブタ肉ではロース肉で 23.0%，ヒレ肉で 21.7%となり，比較的大きな差はみられなかった．

ニワトリ肉とブタ肉のどちらも，白色筋（ムネ肉，ロース肉）より赤色筋（モモ肉，ヒレ肉）の方が筋肉中の総タンパク質量は少なく，また筋漿タンパク質量も少なかった．筋原線維タンパク質量は，ブタのロース肉で若干少なかったが，いずれの筋肉においても 10.8%前後の値であった．しかし，筋肉タンパク質に占める筋原線維タンパク質の割合は，白色筋で 40～45%であったのに対して赤色筋では 53～56%と大きかった．筋肉タンパク質における 3 画分の構成割合は，おおまかに筋原線維タンパク質で 50%，筋漿タンパク質で 30%，結合組織タンパク質で 20%と言われている [20]．事前に主要な筋や皮を取り除いた挽肉を用いてタンパク質の分画を行なったため，今回得られた結合組織タンパク質量の結果は，それと比べて 1～2%と非常に少なかった．

考 察

通常，死後硬直を経た筋肉に比べて，死直後の筋肉の保水性は大きい．しかし，本研究で得られた結果（図 1 と 2）では，死後硬直の前後でのニワトリ肉における加熱ゲルと加圧ゲルの離水率はそれと一致しなかった．この原因として，死直後の筋肉採取からの作業の遅れによる筋肉の収縮の程度の違いが考えられた．ミートパティの作製工程でのカッティング時の様子からは，硬直前の筋肉の方が硬直後よりも粘稠性や表面の湿っぽさがないように感じられ，両者の筋肉が異なる状態にあることを思わせた．また，テクスチャー解析の際の圧縮によって加熱ゲルからはドリップが出てきた．この時のドリップの多少に死後硬直の前後の筋肉間で差があったかは判断しかねるが，加熱ゲル表面の水分を吸い取ってもなお多くの自由水が内部に保持され続けていることを示している．

製品歩留りにおいての重要性のみだけでなく保水性は，多汁性やかたさ等の品質にも影響を与えることが報じられている [3, 9, 11, 23]．本研究では死後硬直の前後での筋肉は離水率に大きな差がみられなかった（図 1 と 2）にも係らず，かたさや凝集性は死後硬直前の筋肉の方が高かった（図 9 と 10, 図 12 と 13）．かたさや凝集性の値が大きかったことは，より緻密なゲル構造をした加熱ゲルが形成

されたからと考えられる．これらのことから，強制的にゲル内部の水分を流出させる様な保水性の評価では，緻密なゲル構造を有し毛細管力が大きい硬直前の筋肉の方が水を逃がさないが，自然流出での保水性評価は硬直後の筋肉でも重力を上回る程度の毛細管力はあるため離水量に明確な差が表れなかったと推察した．

死後履歴によるニワトリ肉の加熱あるいは加圧ゲルでの保水性の違いを明確にすることはできなかったが，筋肉タイプによる加熱ゲルの保水性の差異は明白であった（図 1-3）．それにも係らず，加圧ゲルの保水性は筋肉のタイプに関係なくいずれも非常に大きく，また圧縮時にドリップが漏れ出てくることもなかった．加圧ゲルでも死後履歴による保水性の違いはみられなかったが，その原因は加熱ゲルとは違って筋肉タイプ間での差異がないかのように保水性を高めた理由に通じると思われる．

一般的に，筋肉の保水性には筋原線維が大きな役割を果たすと言われる．筋原線維は，ミオシンフィラメントとアクチンフィラメントが互い違いに組み合わさるように格子状の規則的な構造をしている．NaCl などの塩類の添加は，この構造内のミオシンフィラメントとアクチンフィラメントの間に静電的反発力を生じさせて間隙を拡張する．その広がった空間に水分子が入り込むことで筋原線維は膨潤し，結果，筋肉の保水性が向上する．また，NaCl の添加はミオシンの抽

出性を高めて結着性を増大させ、ミオシンやアクトミオシンがつくる網目構造の隙間にも水分子を保持させる [23, 24]. ミートパティの水分子もこのような存在状態にあったと考えられ、ニワトリ肉とブタ肉（畜種）または白色筋と赤色筋（部位）で保水性の違いは、各々の筋原線維の特徴や細胞質基質の成分組成、ミオシンアイソフォームによるゲル化特性が反映されたためと考えられる.

以前から筋肉タンパク質の加熱ゲル形成機構については、多くの研究が行なわれており、筋肉タンパク質のゲル化に主要な役割を担うミオシンを中心にその詳細が解明されてきている [32]. ミオシンモノマーの加熱ゲル形成は、加熱初期にミオシン分子の頭部が変性を始め表面疎水性が増加し、分子間の頭部が疎水性相互作用によって会合する. 加熱の進行とともに一定の大きさの凝集体となり、続いて尾部に変性が生じヘリックス構造からランダムコイル構造に変化して頭部で形成される凝集核を覆うようにして折り畳まれる. これと並行して、隣り合う凝集体間で寄り集まり、さらに大きな凝集体を形成し、これらが数珠状に連なることで **aggregated type** のネットワークを形成しゲル化に至る.

ミオシンフィラメントの加熱ゲルでも、同じ様に頭部の変性が最初に起こるが、続く尾部の変性はフィラメントを呈した状態のまま進行するため、モノマーの時の様な現象は見られず **strand type** のゲ

ルを形成する．

実際の食肉においては，ミオシンモノマーやミオシンフィラメントよりも筋原線維が主体になると考えられ，筋原線維での加熱変化については３段階凝集モデルが提案されている [22]．そこでは，大雑把な加熱の温度と時間による筋原線維の動態が考察されており，まず生肉（未加熱）の筋原線維の断片があり，比較的低温または短時間（50～60℃や 80℃で 20 分未満）の加熱によって線維間で長軸方向に相互作用して細長い中間凝集体を生じ，さらに高温または長時間の加熱（100～140℃や 80℃で 20 分以上）で，これら凝集体のランダムな折り畳み構造を誘導してより球状の凝集物を生じるとしている．

このような筋原線維の変化がゲル形成にどのように関与するのかについては不明だが，いずれにしても加熱ゲルでは三次元ネットワークを形成して，その間隙に大部分の水を保持することになる．通常，食肉における保水性は，物理的な作用（筋原線維や網目構造での毛細管力）だけでなく，化学的な作用（タンパク質分子等との水和）によっても説明される．

加圧ゲルで保水性が著しく高いのは，タンパク質分子との水和によって水分子を捉えるからではないかと考えられる．

緒論でも触れたように，高圧下ではタンパク質にも様々な変化を

生じ、熱を加えた時のように変性を起こす。高压下のミオシンモノマーは、加熱した時のように頭部間の相互作用を引き起こして凝集するが、その後の尾部間の相互作用まで発展することはなくゲル化は起こらない。ミオシンフィラメントでは、0.1 M KCl で pH 6.0 の条件で 210～280 MPa での加圧によってゲル化が確認されている。しかし、pH 6.0 でも塩濃度が 0.2 M であったり、0.1 M KCl でも pH が 7.0 となったりすると、加圧によるミオシンフィラメントの解離を誘発し、モノマー化したミオシンではゲル化は起きない。

加圧によるミオシンフィラメントのゲル化も、加熱した時にみられる変化によく似ており、フィラメントの表面に会合した頭部がコブのように突起し、フィラメント間での頭部の会合によって側面的ならびに交差的な連結が生じて strand type のゲルを形成する [31]。このように、加圧によるミオシンの挙動は、加熱時の変化に類似していることが分かっている。

筋肉のゲル形成に主要な役割を担うミオシンが加熱と加圧で類似した挙動をとると言っても、両処理間での筋原線維タンパク質の ATPase 活性や溶解性に与える影響の違い [14]、またそれぞれの処理で得られるゲルの保水性やテクスチャーあるいは外観等からも全く異なる変性機構をたどっていることは明らかである。高静水压下でのタンパク質の変性する原因については、まだ不明な点が多いが、

その原動力となるのは体積減少と言える．つまり，加圧に伴い系全体は負の体積変化を生じ，それによって溶液中の水分子やタンパク質分子は稠密構造をとるようになる．通常，天然状態でのタンパク質の立体構造は，非常にコンパクトに折り畳まれており，分子内の原子は密に充填され固い構造をしていると考えられている．しかし，その充填密度は場所によって異なり，常圧下では水分子の侵入を許さないような僅かな空洞をもっていることも多い．直感的には，高圧下に曝されたタンパク質が，系全体の体積を小さくするために構造の隙間へ侵入してきた水分子によって，常圧構造（天然構造）よりも広がった状態，すなわち圧力変性に至ると思われる [4]．

水分子は自由水として存在するよりも，タンパク質のアミノ酸側鎖の周囲に配位した方が体積は小さくなるため，タンパク質は内部のアミノ酸側鎖を水中へ露出させて落ち着く．また，加圧によるミオシンフィラメントの解離にみられるように，一般的にタンパク質の会合体は，そのままであるよりもモノマー化した方が体積を減少させるのに有利となる．その他にも，水の分子間距離の短縮，タンパク質の充填効果，タンパク質分子とリガンドの解離，サブユニットの解離，アンフォールディングといった様々な現象が引き起こされる [5]．

実際のタンパク質の圧力変性は，タンパク質構造を保持する結合

に關与するアミノ酸側鎖の種類、圧力強度、加圧時間、pH や温度等の影響によって複雑な過程を経るものであり、タンパク質の種類や処理条件によって挙動は大きく異なる。そのことは、ミオシンの加圧ゲル形成が処理圧力や塩濃度、pH によることをみても察せられる。

100～300 MPa での加圧時においては、ペプチド結合や S-S 結合等の共有結合は影響を受けないが、水素結合以外の非共有結合は切断されるため、ゲル形成はまだ起こっておらず、タンパク質と水分子の配位における構造化に留まり、圧力の解放によって非共有結合が再構成されゲルになると推察される。この時、水素結合によって構造化されたタンパク質と水分子の配位は、徐圧後もある程度保持された状態で縮小されていた体積が元に戻り離水せずにゲルを形成できたと考えられる。

加圧ゲルでも数%のわずかな離水率の違いが結果にみられたが、これは本研究での測定方法が原因（ろ紙に接触させた時のゲルの付着による損失）であると考えられる。1% NaCl での時の方が 2% NaCl の時よりもわずかに離水率が大きいにみえるが、1% NaCl でのゲルは表面の粘着性が強かったのでろ紙等に付着して重量が減少したためと思われる。実際には、いずれの筋肉タイプであっても加圧ゲルの離水率は 0% に近く、HPP は筋肉試料の死後履歴や NaCl 添加量、筋肉タイプによらずに保水性の高いゲルを形成した。

既に報告されているミオシンの加熱ゲル形成に最適とされる pH は、ニワトリではムネ肉で 5.4，モモ肉で 5.1，ブタでは部位が異なっても同範囲の 5.7～5.8 である．また，ゲル形成の最適 pH といっても，その時のゲル強度は様々であり，ニワトリのムネ肉はモモ肉の約 2 倍大きく，ブタのロース肉ではヒレ肉の約 3 倍と大きい．さらに，ニワトリ肉とブタ肉で比較すると，ムネ肉はロース肉よりも約 10 倍大きな値となる [15]．本実験での各処理前の筋肉 pH は，ニワトリ肉ではムネ肉で 5.82～5.95，モモ肉で 5.95～6.09 であり（図 4），ミオシンでのゲル形成の最適 pH からは外れて，いずれの筋肉も大きな値となった．死後硬直前でのニワトリ肉の pH は，硬直後の pH とほとんど変わらない測定に要するまでの時間の経過によるものと考えられた．ブタ肉での各処理前の pH は 5.66～5.86 であり（図 5），ミオシンでのゲル形成に最適な pH と一致していた．しかし，各筋肉タイプでの加熱ゲルのかたさ（図 9-11）には，それぞれの畜種のミオシン加熱ゲルで認められているような大きな差はないように思われた．加圧ゲルのかたさをみると，ニワトリ肉では全体的に軟らかく，ブタ肉では高い圧力で処理する程固いゲルを形成した．加熱時のゲル形成に最適な pH と加圧による形成にも pH が影響する．

近年，筋肉の加熱ゲル化における筋漿タンパク質の重要性が報告

されている．これらのタンパク質それ自身はゲル化しないものの筋肉ホモジネートに添加することによって，ゲル強度を増加させ，保水性を高める [16, 17] ことが分かっており，加圧ゲルにおいても徐圧後のゲル形成や水分保持への寄与も考えられる．

本研究のニワトリのムネ肉とモモ肉では，加熱処理で白色筋と赤色筋によってゲル保水性の差異があった．一方，ブタのロース肉とヒレ肉では顕著な差異はなく，白色筋と赤色筋への加熱や圧力の影響の違いは不明瞭であった．物性パラメータの圧力依存性は，ニワトリ肉でわずかに見られたが，ブタ肉の方がより顕著であった．

要 約

最近，新たな食品加工技術として注目されている高静水圧を用いた高圧処理（HPP）は，新規食肉加工品の開発や食肉熟成の短期化などの応用が期待できる．一般に，食肉は畜種や部位によって加工特性が異なるが，種々の食肉でも同様の HPP 効果が得られるかは未だ確認されていない．そこで本研究は，食肉に及ぼす圧力の影響が筋肉タイプ（畜種ならびに筋線維型）によって異なるかについてゲルの pH，保水性およびテクスチャーを調べた．

白色筋と赤色筋として各々，ニワトリのムネ肉とモモ肉，ブタのロース肉とヒレ肉を用いた．肉重量に対して 20%の水と 1%または 2%の NaCl を添加した各々のミートパティを 70℃で 30 分間加熱あるいは 100～300 MPa で 30 分間加圧した．

広く知られているように，加熱ゲルの保水性や物性は筋肉タイプによって異なる．本研究でもそのような違いが認められた．1% NaCl でのニワトリのモモ肉は，全ての条件の中で最も離水率が高かったが，2% NaCl への増量による保水性の改善が最も顕著だったのもニワトリのモモ肉であった．その他の筋肉タイプの加熱ゲルの保水性には大差がなく，また処理後の pH 変化から保水性との関連を説明できなかった．加熱ゲルのかたさは筋肉タイプによらず同等であっ

たが、凝集性はブタ肉よりもニワトリ肉の方が大きく、ニワトリ肉は比較的壊れにくいタイプのゲルを形成した。

一方、加圧ゲルでも筋肉タイプによって物性が異なった。加圧ゲルの保水性は加熱ゲルと比べると非常に大きかったが、肉重量に対して 20%の加水では、いずれの筋肉タイプにおいてもほぼ全ての水分を保持した。また、処理圧力の強度によって離水の程度に大きな違いは生じなかったが、圧力の増大に伴ってゲルのかたさと凝集性は増加し、付着性は低下する傾向を示した。このような圧力依存的なゲル物性の変化は、ニワトリ肉よりもブタ肉の方が顕著に認められた。特に、ブタのロース肉は最も圧力の影響を受け易く、1% NaCl に比べて 2% NaCl の方がゲル物性の変化はより大きかった。また、白色筋と赤色筋では、畜種によって圧力に対する影響の受け方が異なっていた。

これらの筋肉タイプによる圧力感受性の違いに関するデータは、食肉業界における HPP の実用化にあたって、有用な基礎的知見となるとと思われる。

**Difference in hydrostatic pressure sensitivity
in different type of muscle**

Kouhei Takayanagi

Abstract

High pressure processing (HPP) is one of new technologies for food processing. HPP is expected to develop novel processed meat products and to shorten aging time of meat as well. The properties of meat for processing depend on species or anatomical location of muscle. The effect of pressure treatment on the properties of different type of muscles is not well known so far. The present study aims to reveal the difference of pressure effects on different type of muscle, such as white-type and red-type muscles of chicken and pork, by measuring water-holding capacity, pH, and texture of pressure-induced gel. Those properties of heat-induced gels were also investigated for comparison.

Chicken breast muscle and leg muscle were used for white and red-type muscles, respectively. Porcine loin and tenderloin were also used for white and red-type muscles, respectively. Meat patty was prepared

from each muscle by food processor with addition of 20% (w/w) of water and 1% or 2% of NaCl. The meat patty was pressurized at 100–300 MPa for 30 minutes or heated at 70°C for 30 minutes.

The water-holding capacity of heat-induced gel of chicken leg muscle with 1% NaCl was the lowest among the samples, though it was improved by increasing NaCl concentration to 2%. There were no obvious differences in water-holding capacity of heat-induced gel among other muscles. There were some pH changes in formed-gel after heat or pressure treatments, though it was difficult to explain the relation between pH change and water-holding capacity. The hardness of heat-induced gels was almost the same among the muscles, while the cohesiveness of chicken was larger than pork, and the heat-induced gel of chicken was more unbreakable compare to pork.

Pressure-induced gels of all kinds of muscles showed very high water-holding capacity in the pressure range of 100–300 MPa. All of added water (20%) was retained in a gel. The hardness and cohesiveness of the gel increased with elevating pressure, while the adhesiveness of the gel decreased. These pressure-dependent rheological changes of gels were notable in pork than those in chicken. Pork loin was the most pressure-sensitive, and the changes in rheological parameters in the gel

with 2% NaCl was larger than that with 1% NaCl. There was some difference in pressure sensitivity of white- and red-type muscles among species.

The present results indicate the difference in pressure-sensitivity among different type of muscles, and give useful information in application of HPP in meat processing.

謝 辞

本論文をまとめるにあたり，御指導，御鞭撻いただきました食品科学科応用生化学研究室の山本克博教授に深く感謝致します．

また，御校閲を賜りました食品科学科肉製品製造学研究室の石下真人教授ならびに舩津保浩教授に深く感謝致します．

御助言，御指導いただきました岩崎智仁准教授に深く感謝致します．

参考文献

- [1] Busch, W. A., M.H. Stromer, D. E. Goll, and A. Suzuki . 1972.
Ca²⁺-specific removal of Z lines from rabbit skeletal muscle. J.
Cell Biol., 52: 367-381.
- [2] Clark, J. P. 2011. High pressure processing draws high interest.
Food Technol., 45: 107, 109-110.
- [3] Farouk, M. M., N. Md. Mustafa, G. Wu, and G. Krsinic. 2012. The
“sponge effect” hypothesis: An alternative explanation of the
improvement in the waterholding capacity of meat with ageing.
Meat Sci., 90: 670-677.
- [4] 今井隆志. 2010. タンパク質の圧力誘起構造転移の分子メカ
ニズム. 生物物理, 50: 289-299.
- [5] 林力丸（編）. 1989. 食品への高圧利用, 第 1 版. 1-30. さんえ
い出版. 京都.
- [6] 池内義秀. 1993. 高圧処理と食肉タンパク質の性状変化; 加
圧食肉タンパク質の加熱ゲル形成能. 食科工誌, 40: 299-307.
- [7] 池内義秀. 2006. 高圧による食肉タンパク質および食肉製品
の物性変化〔2〕; 高圧による食肉タンパク質の物性変化. 食
品と容器, 47: 200-203.

- [8] 池内義秀, 吉岡慶子, 鈴木敦士. 2006. 食肉加工分野への高圧利用をめぐる最近の情勢. *Rev. High Pressure Sci. Technol.*, 16: 17-25.
- [9] 入江正和. 1993. 食肉の保水性の測定方法と理論. 食肉の科学, 34: 9-15.
- [10] 五十部誠一郎. 2010. 非加熱殺菌法を中心とした新規殺菌技術. *Jpn. J. Food Microbiol.*, 27: 115-122.
- [11] 伊藤肇躬. 2007. 肉製品製造学, 第1版. 1-86, 1101-1110. 光琳. 東京.
- [12] Jafarpour, A., and E. M. Gorczyca. 2012. Contribution of sarcoplasmic proteins to myofibrillar proteins gelation. *J. Food Sci.*, 77: R73-R81.
- [13] 香西みどり (監訳). 2008. マギーキッチンサイエンス; 食材から食卓まで, 第1版. 116-174. 共立出版. 東京.
- [14] Lee, E. J., Y. H. Kim, N. H. Lee, S. I. Hong, K. Yamamoto, and Y. J. Kim. 2011. The role of sarcoplasmic protein in hydrostatic pressure-induced myofibrillar protein denaturation. *Meat Sci.*, 87: 219-222.
- [15] 前田尚之, 石下真人, 鮫島邦彦. 2001. 食肉の加工特性の多様性; 畜種の異なるミオシンの加熱ゲル形成能. *New Food*

Industry, 43: 20-24.

- [16] Miyaguchi, Y., K. Nagayama, and M. Tsutsumi. 2000. Thermal and functional properties of porcine sarcoplasmic proteins: A comparison with some water-soluble animal proteins. *Anim. Sci. J.*, 46: 4-6.
- [17] 宮口右二, 坂本太郎, 林佑樹, 永山精美. 2005. 採卵廃鶏の有効利用: 鶏筋漿タンパク質画分によるモデルソーセージの物性改善効果. *食科工誌*, 46: 53-55.
- [18] 農林水産省. 2012. 項目別累年表; 国内消費仕向量. 確報平成22年度食料需給表.
- [19] 岡田邦夫. 2010. 高度・高品質食肉加工技術, 第1版. 160-162, 187. 幸書房. 東京.
- [20] 沖谷明紘 (編). 2000. シリーズ〈食品の科学〉肉の科学, 第1版. 39-58, 128-140. 朝倉書店. 東京.
- [21] Pearson, A. M., and R. B. Young. 1989. *Muscle and Meat Biochemistry*, 1st ed. 240-241. Academic Press, Inc. London.
- [22] Promeyrat, A., M. L. Bax, S. Traoré, L. Aubry, V. Santé-Lhoutellier, and Ph. Gatellier. 2010. Changed dynamics in myofibrillar protein aggregation as a consequence of heating time and temperature. *Meat Sci.*, 85: 625-631.

- [23] 鮫島邦彦. 1987. 食肉・肉製品の保水性・結着性. 肉の科学, 28: 151-163.
- [24] 鮫島邦彦, 高橋史生(編). 2005. ニューフードサイエンス, 第1版. 21-29. 三共出版. 東京.
- [25] 笹川秋彦. 2007. 食品と高圧科学. *Rev. High Pressure Sci. Technol.*, 17: 230-237.
- [26] 佐藤典昭. 2010. 賞味期限の延長と素材の風味を維持する高圧処理 (HPP) 技術; 非加熱滅菌処理がもたらすもの. 食品と開発, 45: 20-22.
- [27] 佐藤典昭. 2011. 高圧処理 (HPP) 技術による新しい鮮度保持方法について; 非加熱殺菌処理がもたらす新たな食品流通とは. 食品と開発, 46: 53-55.
- [28] 田邊亮一, 本村高一, 栗木隆吉, 安藤四郎, 池田敏雄, 大塚茂, 中井博康. 1990. 鶏肉における pH, K 値, 保水性および遊離アミノ酸含量の死後変化. 日畜会報, 61: 998-1003.
- [29] 菅原龍幸 (編). 2008. 食品加工学, 第2版. 124-124. 建帛社. 東京.
- [30] Xiong, Y. L., X. Lou, R. J. Harmon, and W. G. Moody. 2000. Salt- and pyrophosphate-induced structural changes in myofibrils from chicken red and white muscles. *J. Sci. Food Agric.*, 80:

1176-1182.

- [31] 山本克博. 1999. 加圧によって筋肉タンパク質はどう変わるか; 食肉科学の見地から. 化学と生物, 37: 375-380.
- [32] 山本克博. 2008. 筋肉タンパク質ミオシンの加熱ゲル化機構の新たな展開; 電子顕微鏡で観るミオシン分子の加熱変性過程. 化学と生物, 46: 748-750.
- [33] 矢沢洋一, 三浦敏明, 佐々木胤則 (編). 2002. 基礎生化学実験, 第 2 版. 83-85. 三共出版. 東京.
- [34] 吉田勉 (監修). 2008. わかりやすい食品化学, 第 1 版. 68-95. 三共出版. 東京.

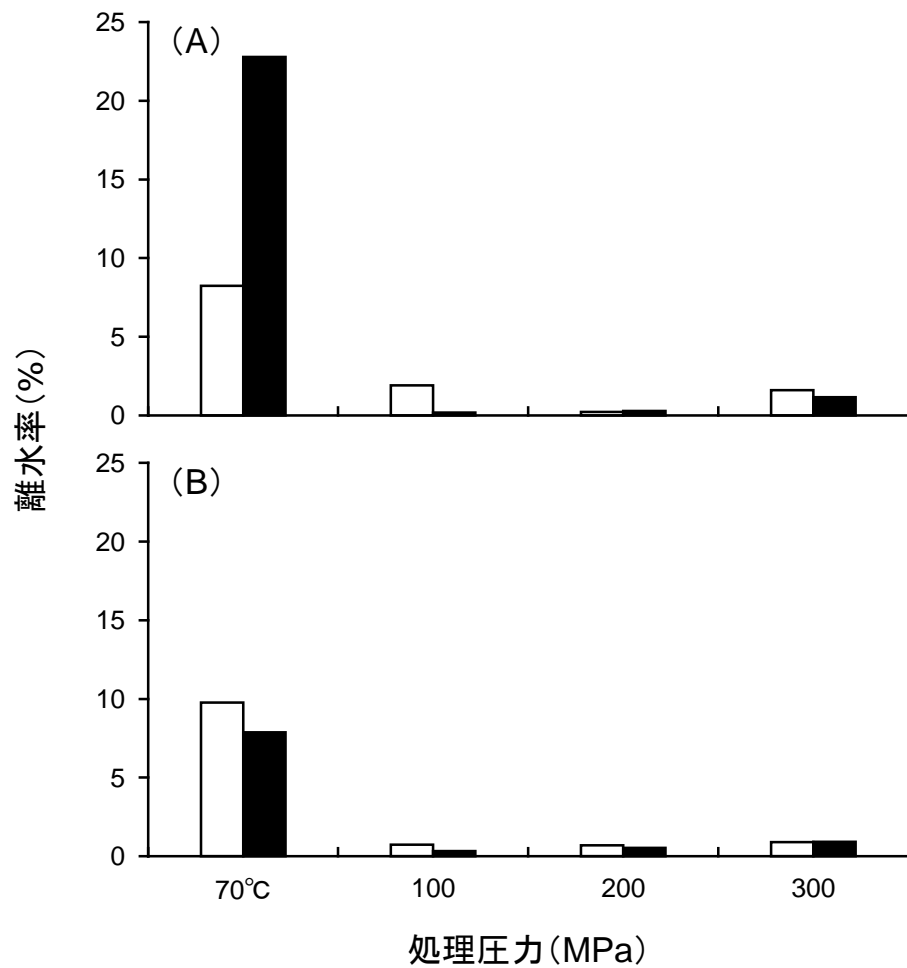


図1. 死後硬直前のニワトリの白色筋と赤色筋による加熱ゲルならびに加圧ゲルの離水率。
 と畜直後のニワトリからムネ肉とモモ肉を採取し、それらの挽肉に肉重量比20%の水ならびに所定のNaClを加えて、加熱処理または高圧処理を30分間行ないゲルを調製した。離水率は、離漿によって生じたゲル重量の減少分を離水量として処理前の重量に対する離水量の割合で表した。(A) ; 1% NaCl, (B) ; 2% NaCl, □ ; ムネ肉, ■ ; モモ肉。

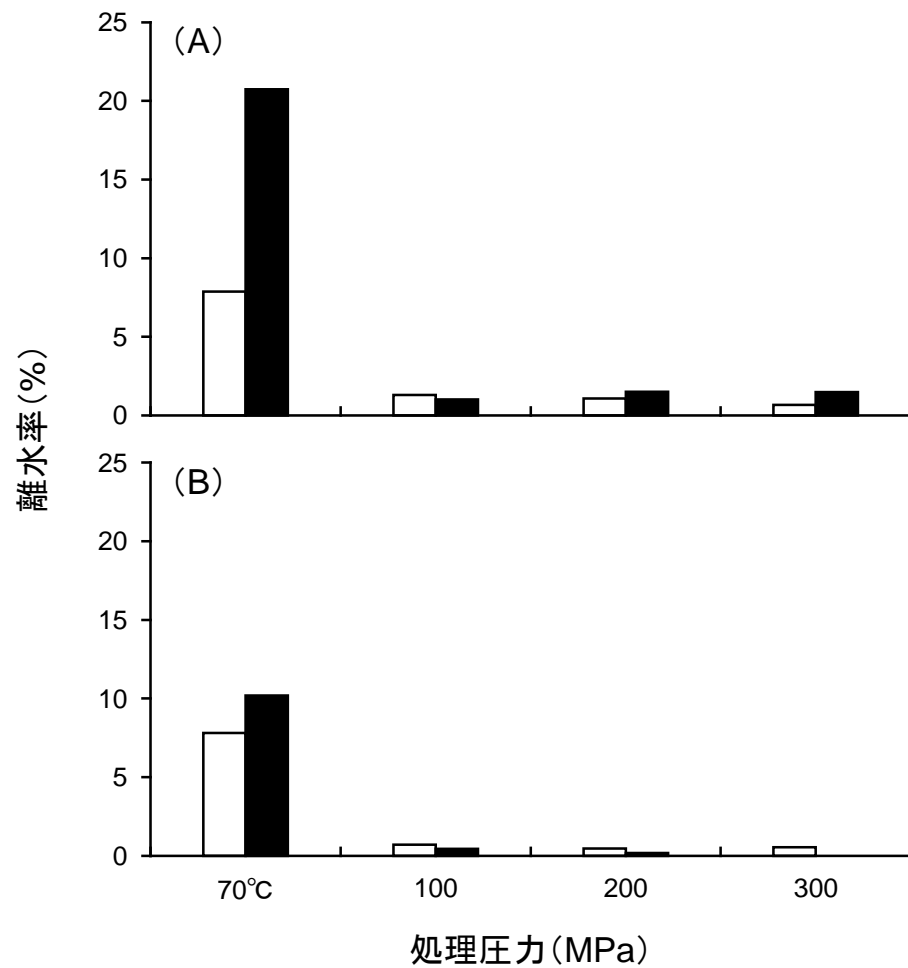


図2. 死後硬直後のニワトリの白色筋と赤色筋による加熱ゲルならびに加圧ゲルの離水率.
死後24時間後のニワトリから採取したムネ肉とモモ肉の離水率は図1と同様に求めた. (A) ; 1% NaCl, (B) ; 2% NaCl, □ ; ムネ肉, ■ ; モモ肉.

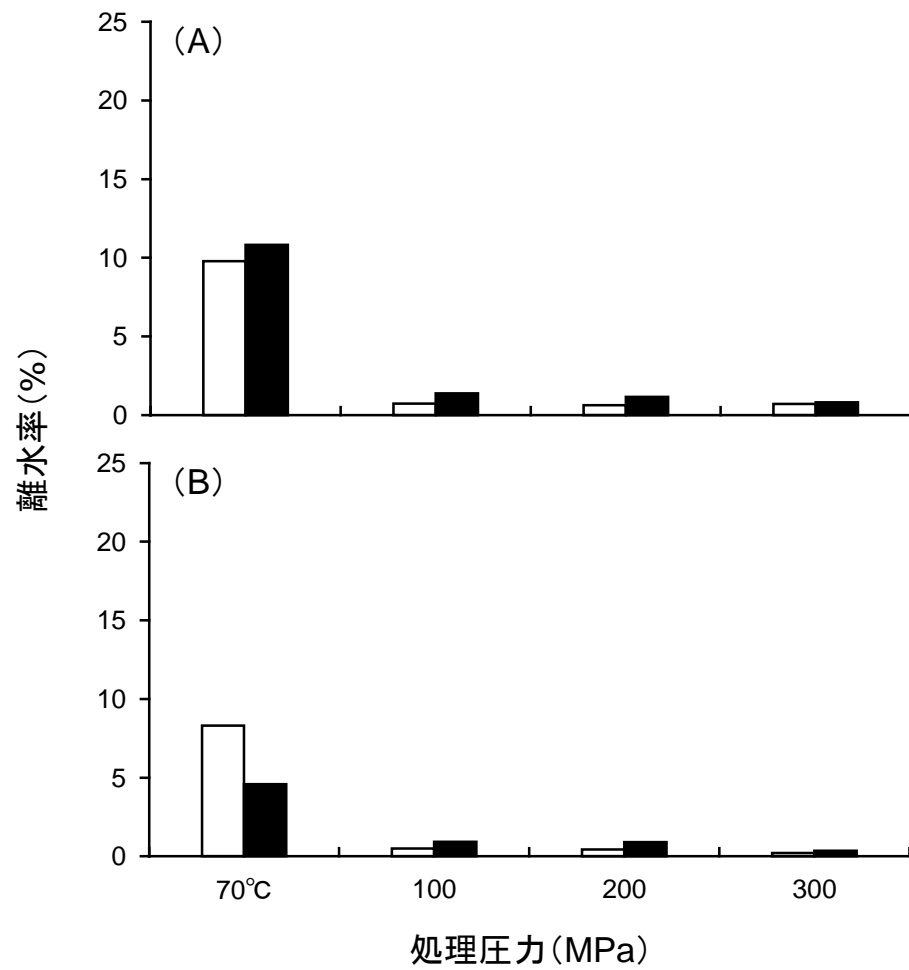


図3. ブタの白色筋と赤色筋による加熱ゲルならびに加圧ゲルの離水率.

ブタのロース肉とヒレ肉の離水率は図1と同様に求めた.

(A) ; 1% NaCl, (B) ; 2% NaCl, □ ; ロース肉, ■ ; ヒレ肉.

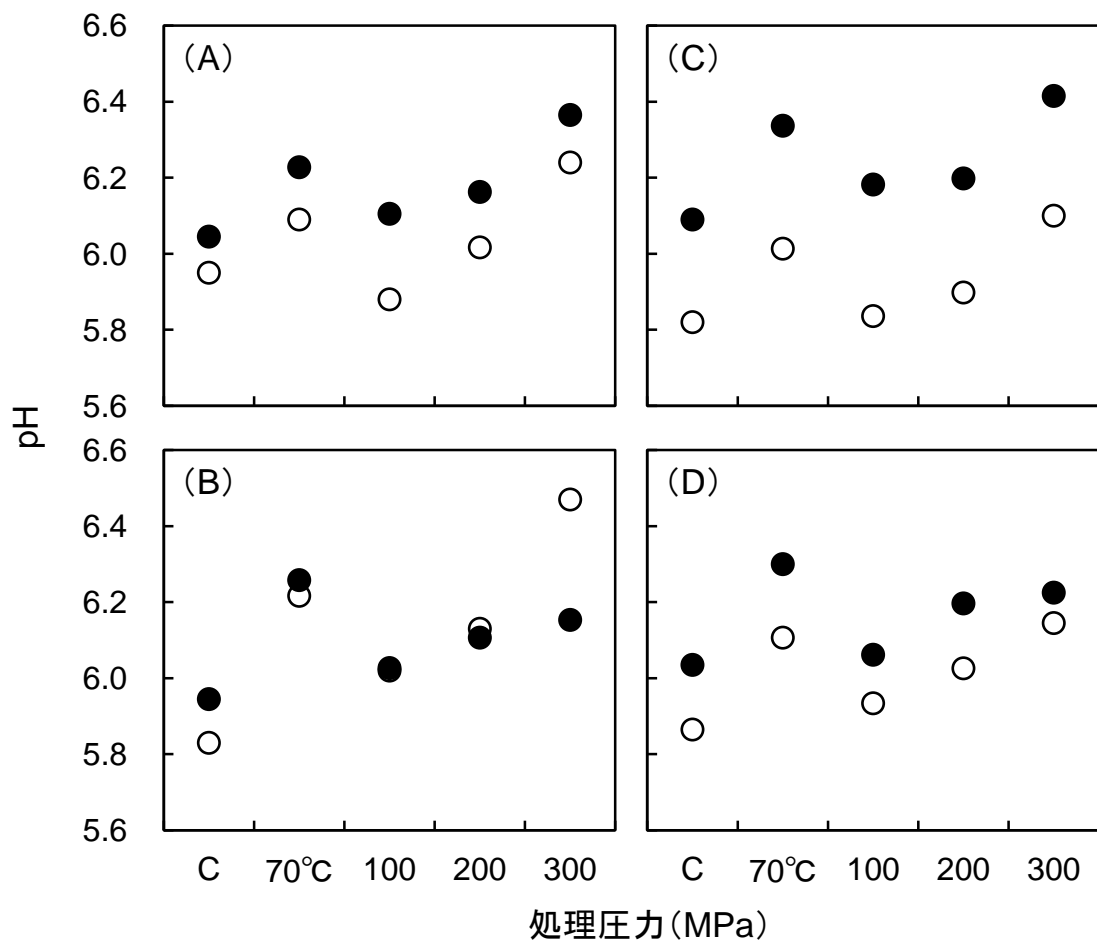


図4. 死後硬直前後のニワトリの白色筋と赤色筋による加熱ゲルならびに加圧ゲルのpH.

ニワトリのと畜直後（AとB）および死後硬直後（CとD）のムネ肉とモモ肉を採取し，それらの挽肉に肉重量比20%の水ならびに所定のNaClを加えて，加熱処理または高圧処理を30分間行なった．得られたゲル2.0 gに10 mLの水を加えてホモジナイズし，そのろ過液のpHを測定した．図中のCは未処理（control）とした．

（A）；1% NaClでの硬直前肉，（B）；2% NaClでの硬直前肉，
（C）；1% NaClでの硬直後肉，（D）；2% NaClでの硬直後肉，
○；ムネ肉，●；モモ肉．

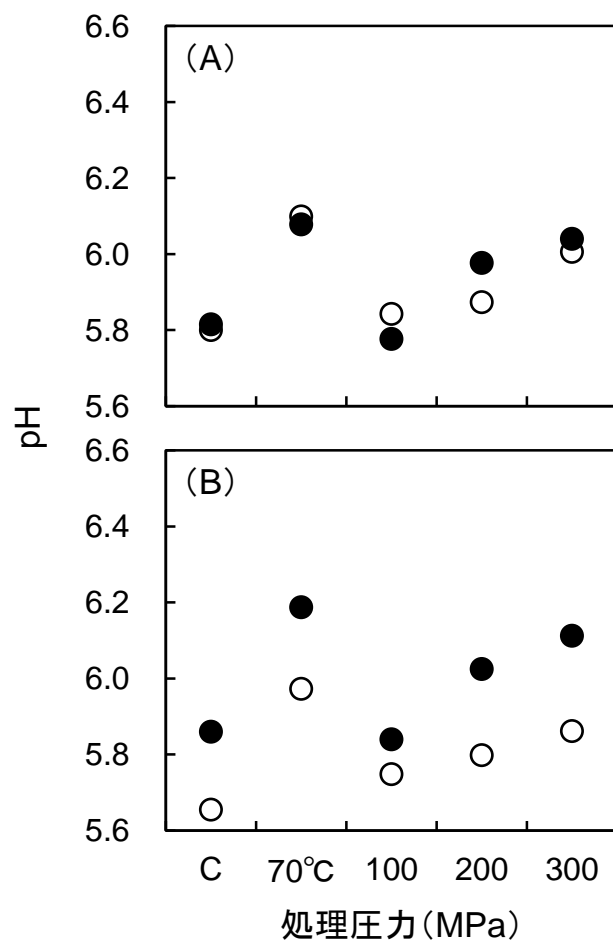


図5. ブタの白色筋と赤色筋による加熱ゲルおよび加圧ゲルのpH. ブタのロース肉とヒレ肉でのpHは図6と同様に測定した. 図中のCは未処理 (control) とした. (A) ; 1% NaCl, (B) ; 2% NaCl, ○ ; ロース肉, ● ; ヒレ肉.

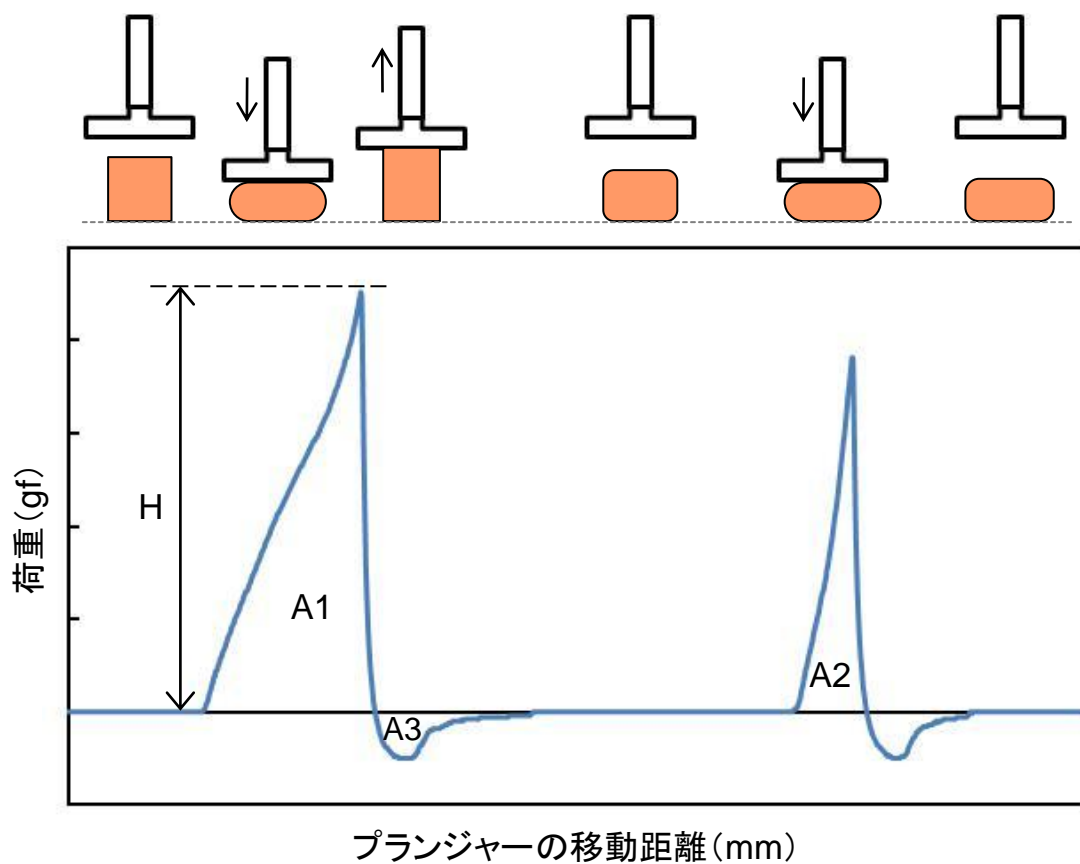


図6. テクスチャー測定と解析法.

かたさ；1回目の圧縮動作中の最大荷重 H [gf] または応力 [Pa] ,
凝集性； $A1$ の面積（エネルギー）に対する $A2$ の面積（エネルギー）の比率， $A2$ [J/m³] / $A1$ [J/m³] ,
付着性；1回目の戻り動作から2回目の圧縮動作に移行する時のマイナス側の $A3$ の面積（エネルギー） [J/m³] ,
ガム性；かたさ×凝集性で求められる値で，単位は [gf] または [Pa] .

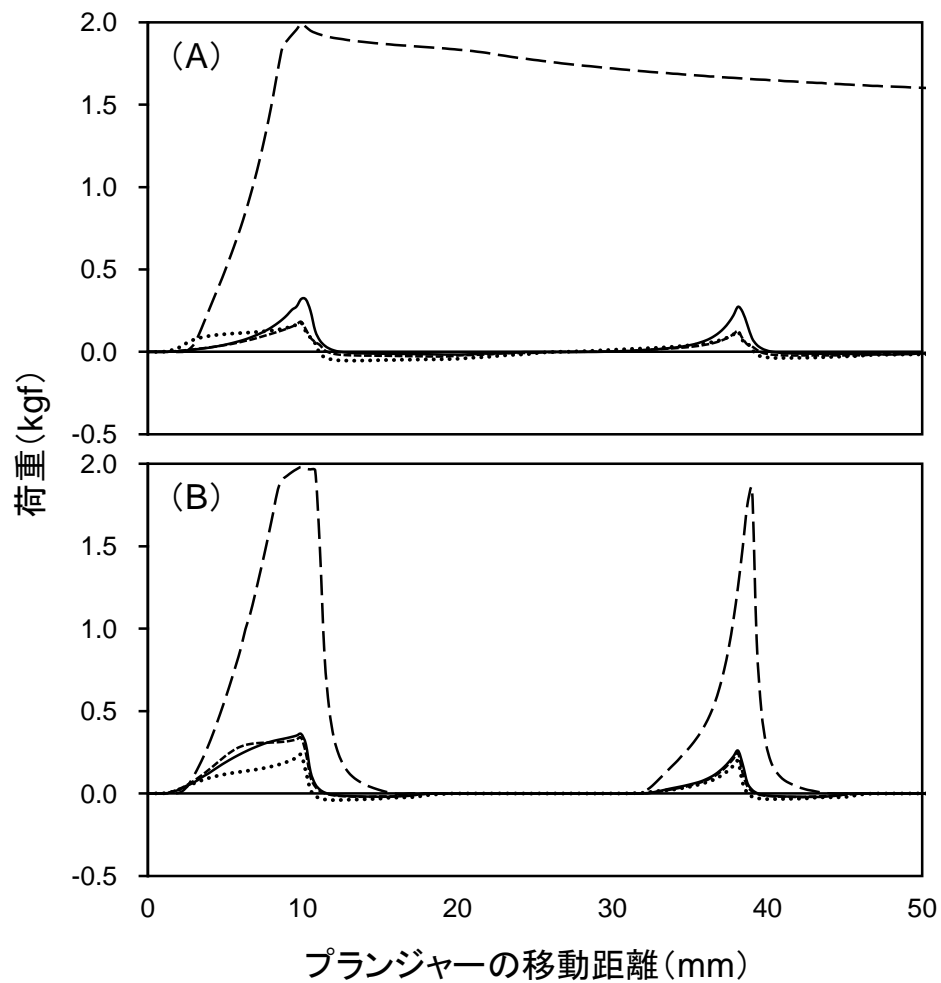


図7. テクスチャー解析による加熱ゲルと加圧ゲルの波形の一例（ニワトリ）.

様々な筋肉タイプで加熱ゲルと加圧ゲルを調製した．これらについて平板型プランジャー（ ϕ 40 mm）を用い，2 kgfロードセル，アンプ1倍，歪み率60%，格納ピッチ0.01 sec，測定速度5 mm/secで1軸反復圧縮試験を室温にて行った．その時の結果を修正し，第1ピークをプランジャーが10 mm移動した時に一致させて表した．例は，2% NaClの時のニワトリのムネ肉で（A）；硬直前，（B）；硬直後，
 ; 70℃, --- ; 100 MPa, ; 200 MPa, ---- ; 300 MPa. —

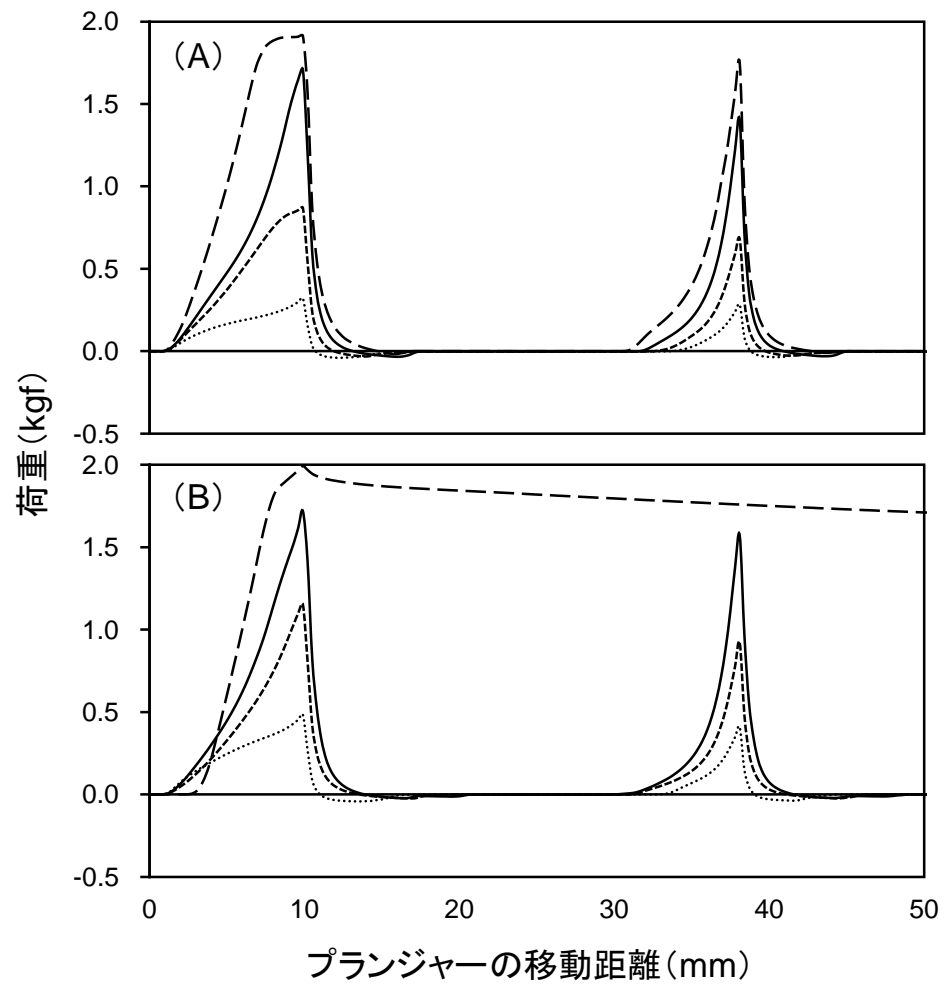


図8. テクスチャー解析による加熱ゲルと加圧ゲルの波形の例（ブタ）．
 様々な筋肉タイプでの加熱ゲルと加圧ゲルで行った1軸反復圧縮試験の結果の一例を図7と同様にして表した．例は，ブタのロース肉で（A）；1% NaCl，（B）；2% NaCl， --- ；70℃， ；100 MPa， ---- ；200 MPa， —— ；300 MPa．

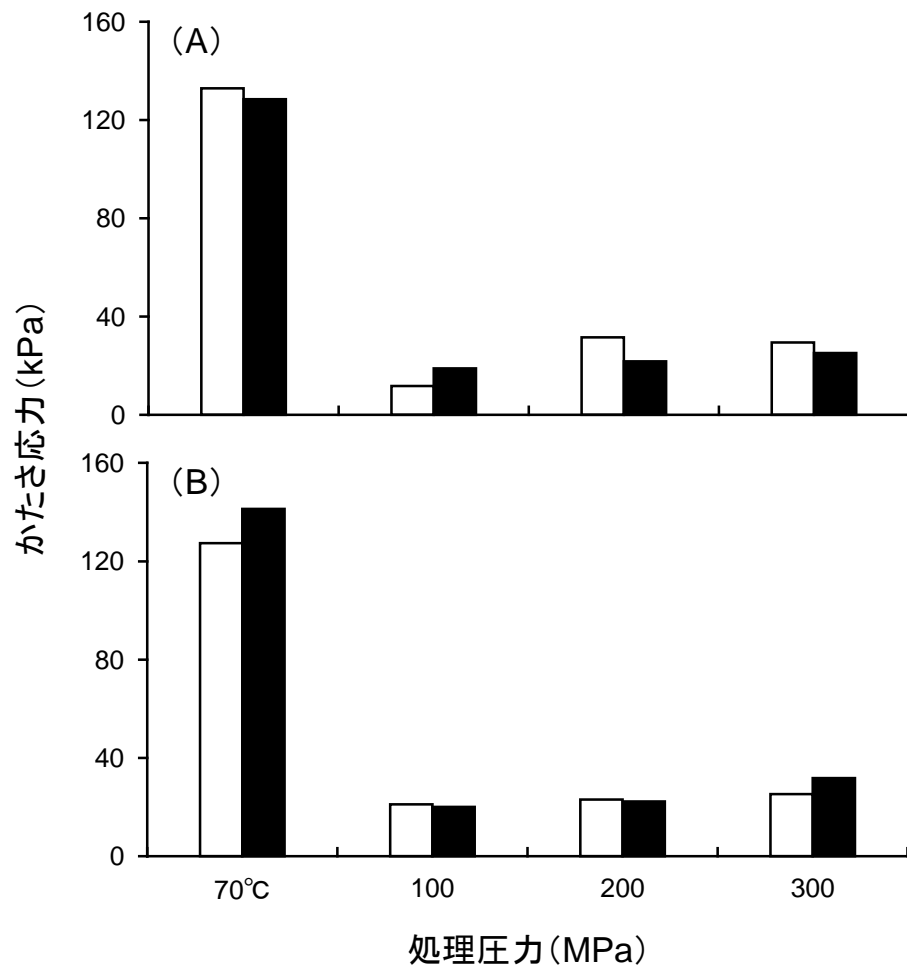


図9. 死後硬直前のニワトリの白色筋と赤色筋の加熱ゲルならびに加圧ゲルのかたさ.

と畜直後のニワトリのムネ肉およびモモ肉に1%または2%の加塩と20%の加水をした加熱ゲルと加圧ゲルについてテクスチャー解析を行った. 平板型プランジャー (ϕ 40 mm) を用い, 2 kgfロードセル, アンプ1倍, 歪み率60%, 格納ピッチ0.01 sec, 測定速度5 mm/secで1軸反復圧縮試験を室温で実施した時の各ゲルのかたさを示した. (A) ; 1% NaCl, (B) ; 2% NaCl, □ ; ムネ肉, ■ ; モモ肉.

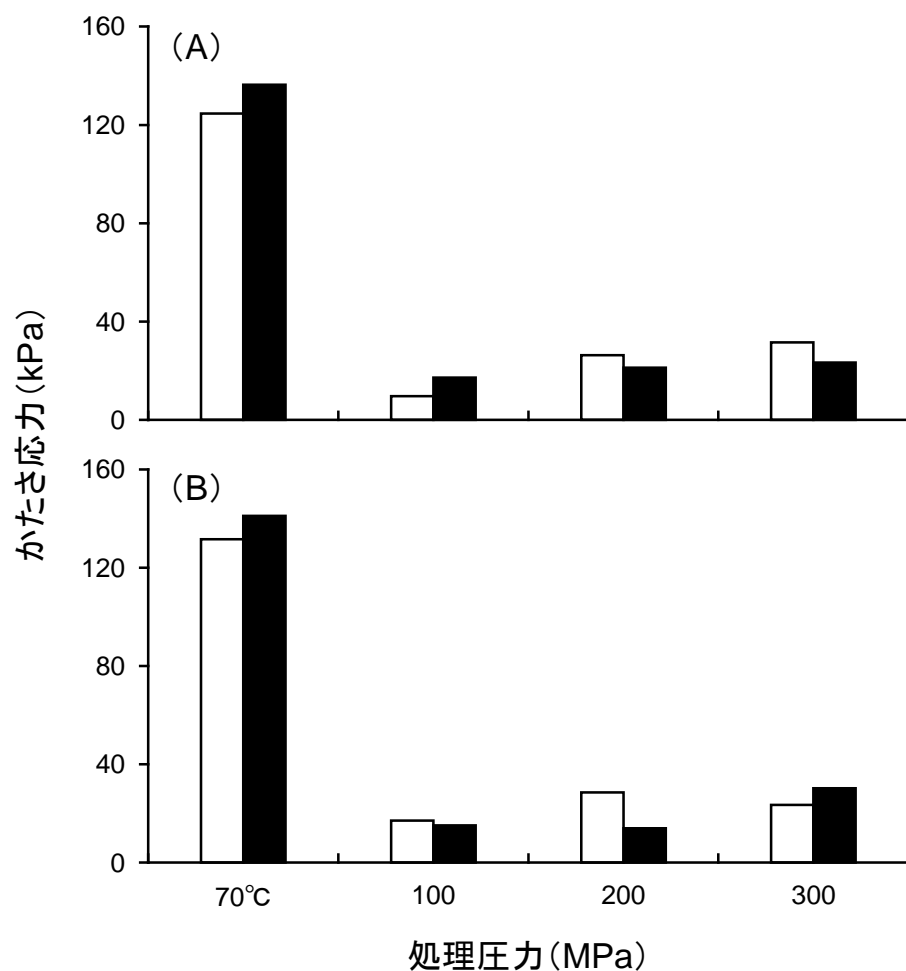


図10. 死後硬直後のニワトリの白色筋と赤色筋の加熱ゲルならびに加圧ゲルのかたさ.

死後24時間後のニワトリのムネ肉およびモモ肉に1%または2%の加塩と20%の加水をした加熱ゲルと加圧ゲルについて図9と同様にテクスチャー解析を行った. (A) ; 1% NaCl, (B) ; 2% NaCl, □ ; ムネ肉, ■ ; モモ肉.

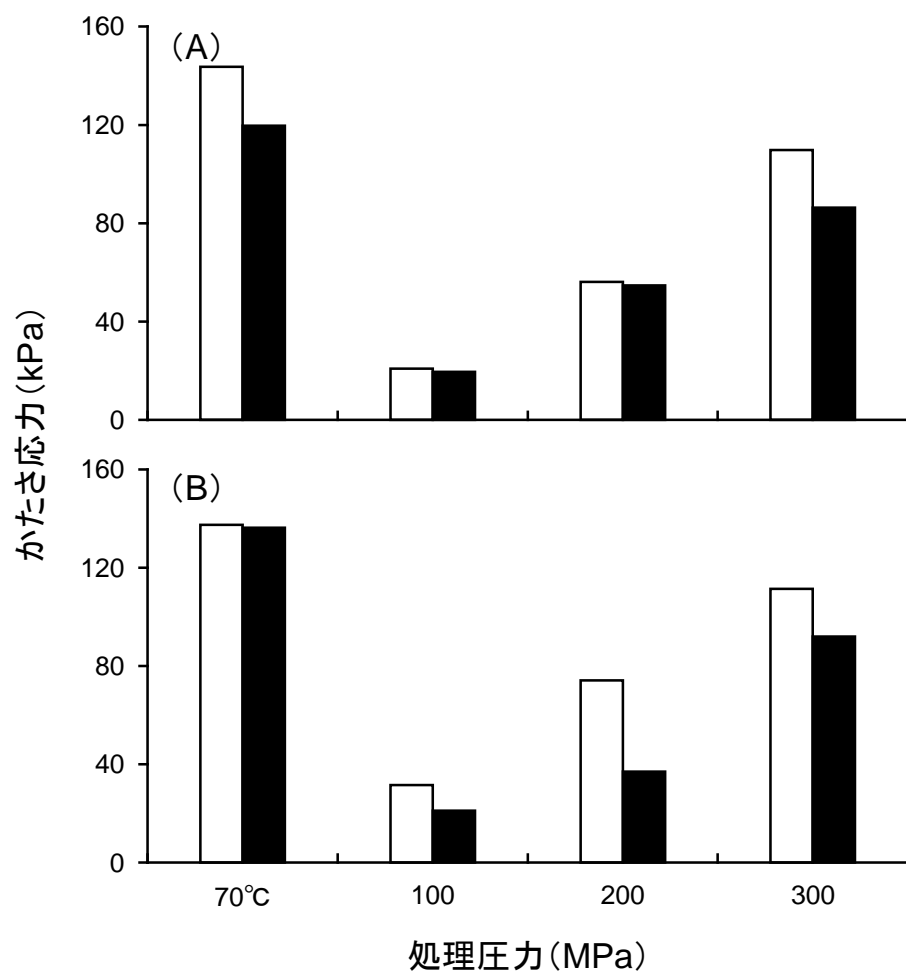


図11. ブタの白色筋と赤色筋による加熱ゲルならびに加圧ゲルのかたさ.
 ブタのロース肉およびヒレ肉に1%または2%の加塩と20%の加水をした加熱ゲルと加圧ゲルについて図9と同様にテクスチャー解析を行った. (A) ; 1% NaCl, (B) ; 2% NaCl, □ ; ロース肉, ■ ; ヒレ肉.

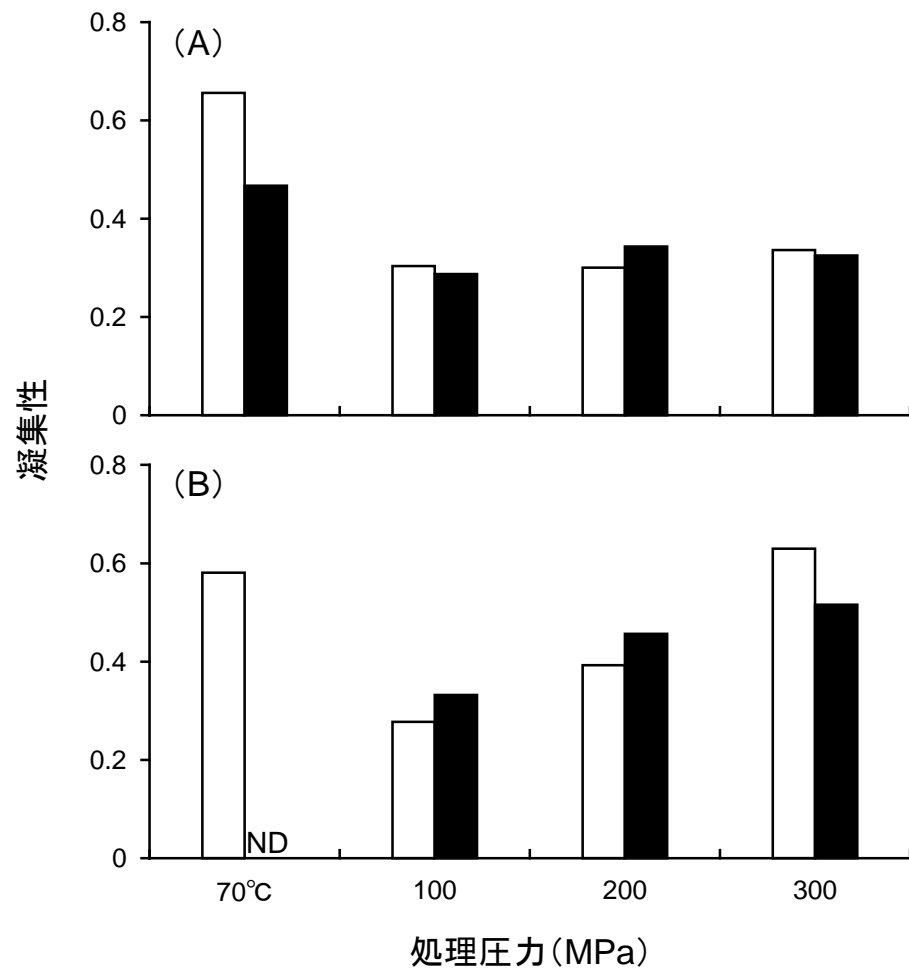


図12. 死後硬直前のニワトリの白色筋と赤色筋の加熱ゲルならびに加圧ゲルの凝集性.

と畜直後のニワトリのムネ肉およびモモ肉に1%または2%の加塩と20%の加水をした加熱ゲルと加圧ゲルについて図9と同様にテクスチャー解析を行った. (A) ; 1% NaCl, (B) ; 2% NaCl, □ ; ムネ肉, ■ ; モモ肉, ND ; 不検出 (Not Detected) .

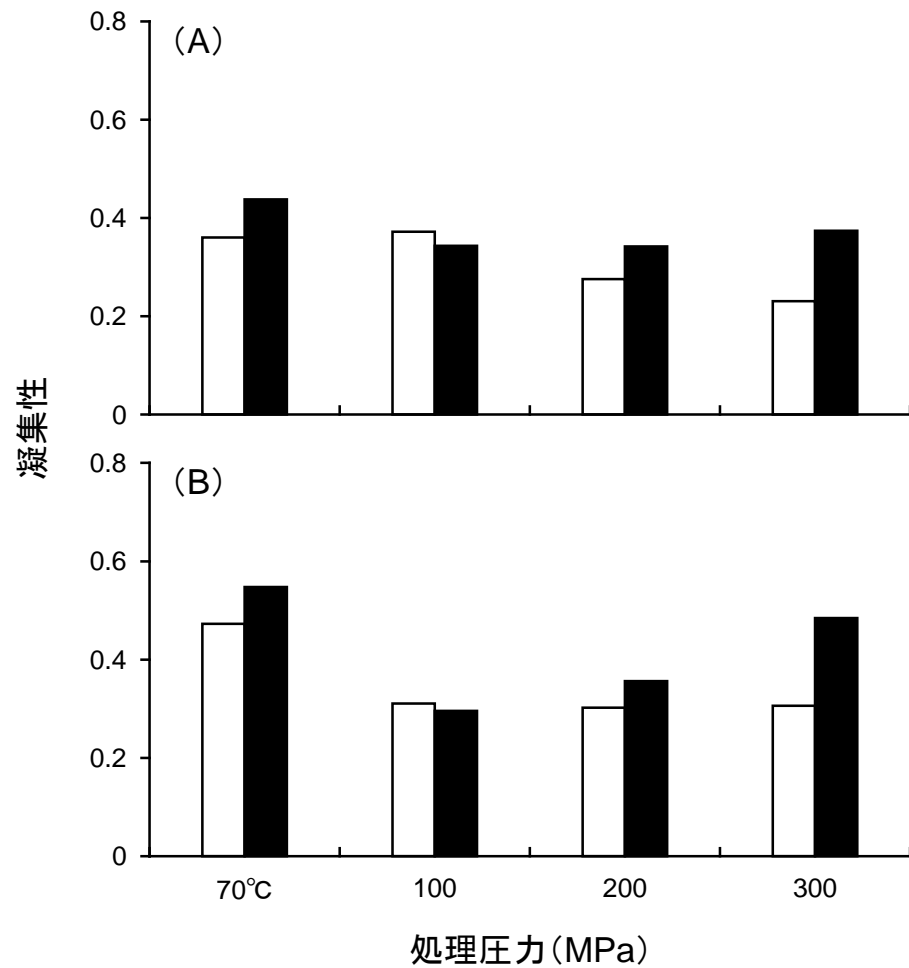


図13. 死後硬直後のニワトリの白色筋と赤色筋の加熱ゲルならびに加圧ゲルの凝集性.

死後24時間後のニワトリのムネ肉およびモモ肉に1%または2%の加塩と20%の加水をした加熱ゲルと加圧ゲルについて図9と同様にテクスチャー解析を行った. (A) ; 1% NaCl, (B) ; 2% NaCl, □ ; ムネ肉, ■ ; モモ肉.

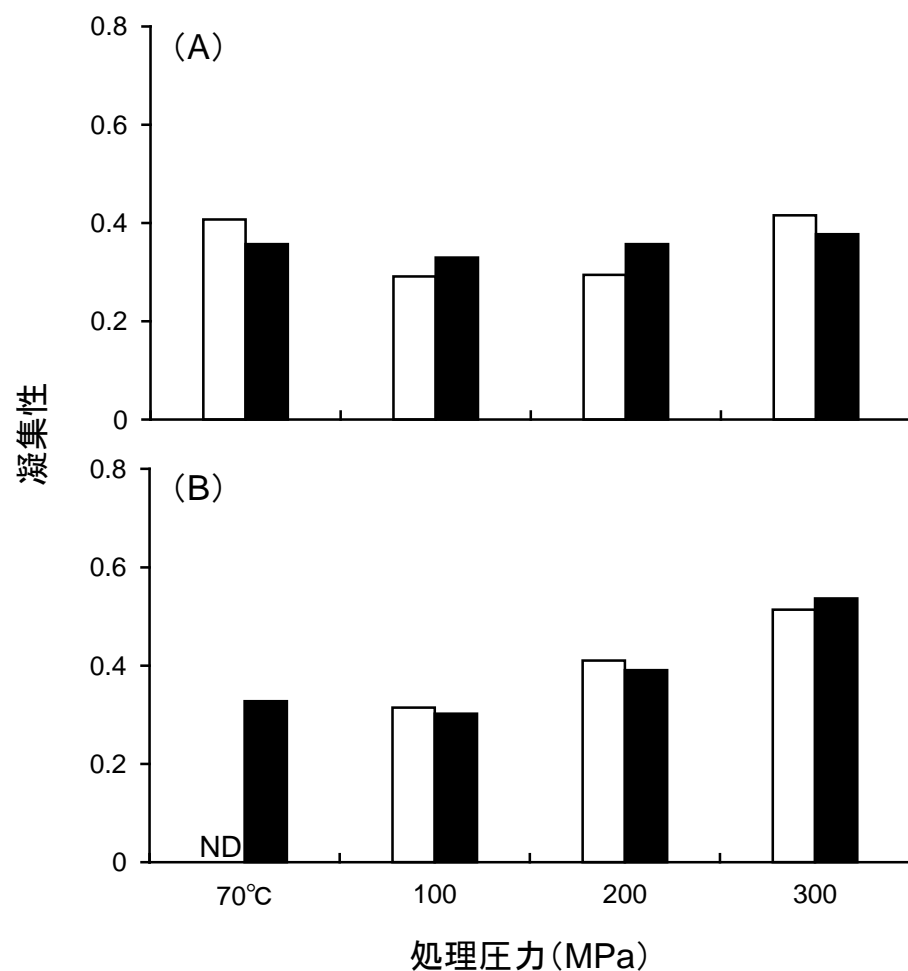


図14. ブタの白色筋と赤色筋による加熱ゲルならびに加圧ゲルの凝集性.
 ブタのロース肉およびヒレ肉に1%または2%の加塩と20%の加水をした加熱ゲルと加圧ゲルについて図9と同様にテクスチャー解析を行った. (A) ; 1% NaCl, (B) ; 2% NaCl, □ ; ロース肉, ■ ; ヒレ肉, ND ; 不検出 (Not Detected) .

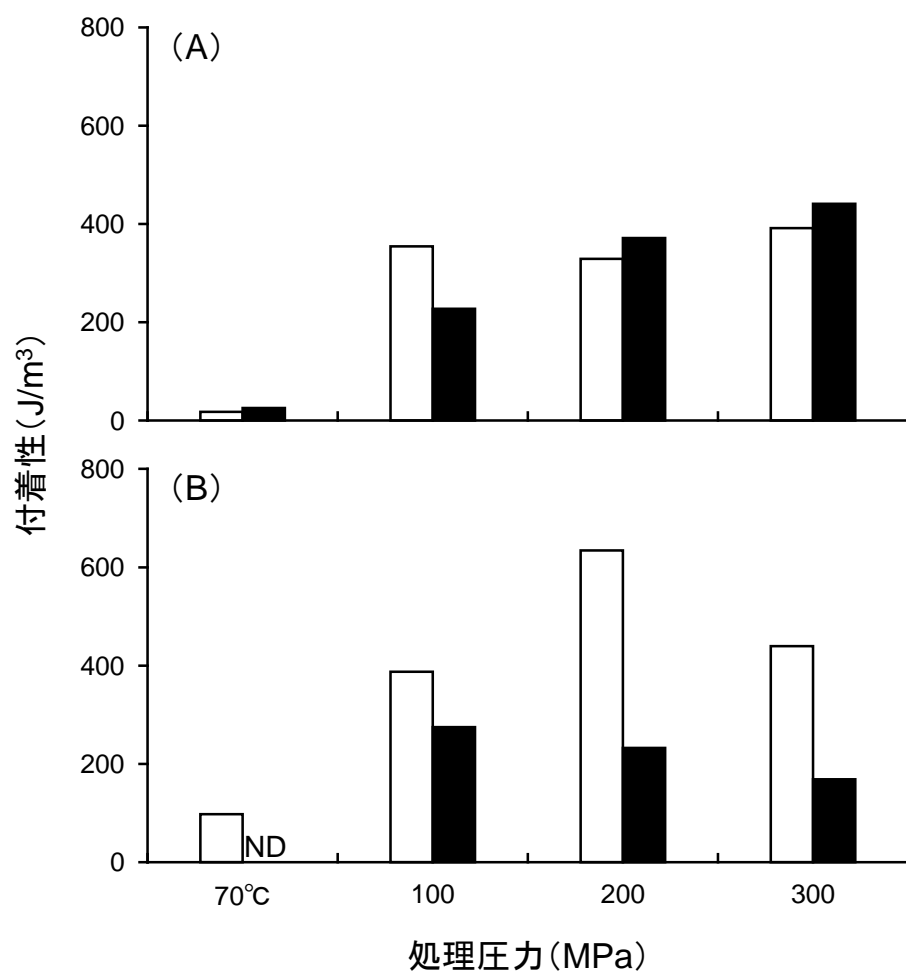


図15. 死後硬直前のニワトリの白色筋と赤色筋の加熱ゲルならびに加圧ゲルの付着性.

と畜直後のニワトリのムネ肉およびモモ肉に1%または2%の加塩と20%の加水をした加熱ゲルと加圧ゲルについて図9と同様にテクスチャー解析を行った. (A) ; 1% NaCl, (B) ; 2% NaCl, □ ; ムネ肉, ■ ; モモ肉, ND ; 不検出 (Not Detected) .

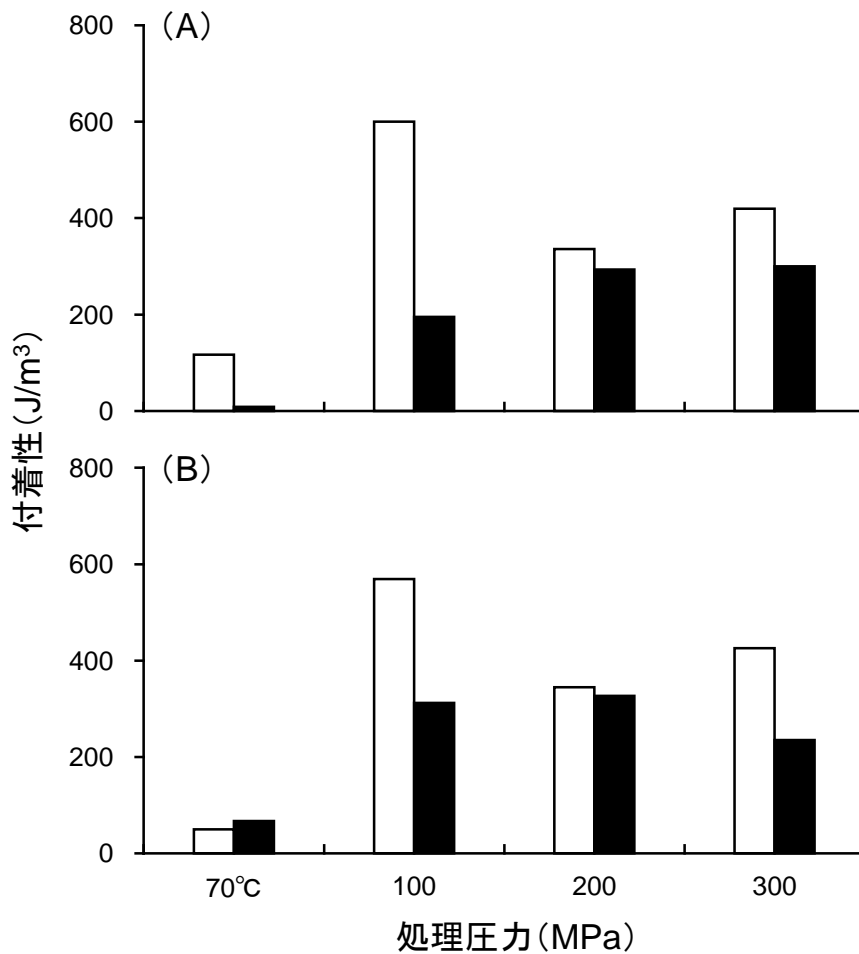


図16. 死後硬直後のニワトリの白色筋と赤色筋による加熱ゲルならびに加圧ゲルの付着性.

死後24時間後のニワトリのムネ肉およびモモ肉に1%または2%の加塩と20%の加水をした加熱ゲルと加圧ゲルについて図9と同様にテクスチャー解析を行った. (A) ; 1% NaCl, (B) ; 2% NaCl, □ ; ムネ肉, ■ ; モモ肉.

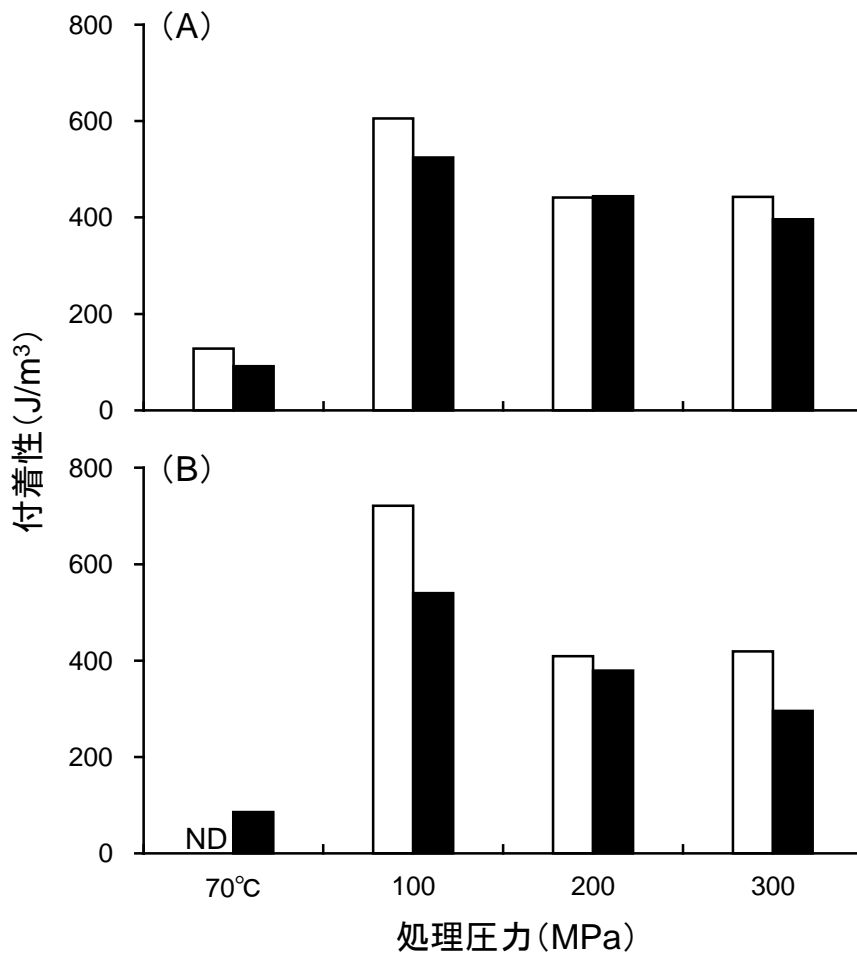


図17. ブタの白色筋と赤色筋による加熱ゲルならびに加圧ゲルの付着性。
 ブタのロース肉およびヒレ肉に1%または2%の加塩と20%の加水をした加熱ゲルと加圧ゲルについて図9と同様にテクスチャー解析を行った。(A) ; 1% NaCl, (B) ; 2% NaCl, □ ; ロース肉, ■ ; ヒレ肉, ND ; 不検出 (Not Detected) .

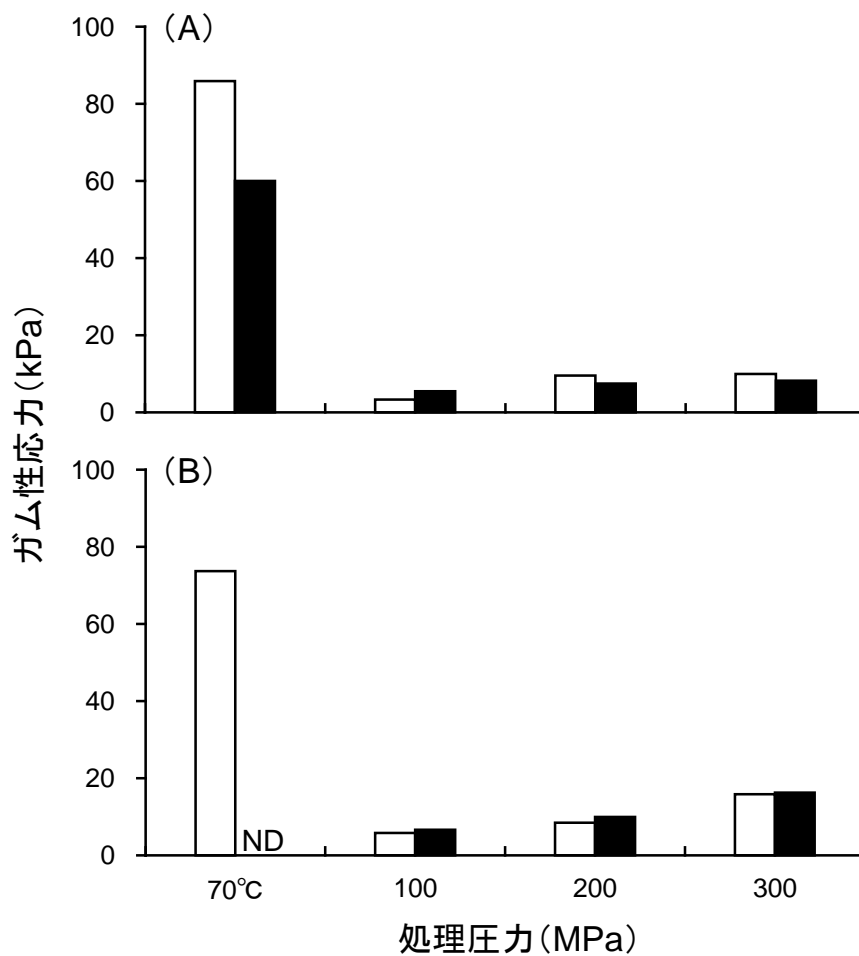


図18. 死後硬直前のニワトリの白色筋と赤色筋による加熱ゲルならびに加圧ゲルのガム性.
と畜直後のニワトリのムネ肉およびモモ肉に1%または2%の加塩と20%の加水をした加熱ゲルと加圧ゲルについて図9と同様にテクスチャー解析を行った. (A) ; 1% NaCl, (B) ; 2% NaCl, □ ; ムネ肉, ■ ; モモ肉, ND ; 不検出 (Not Detected) .

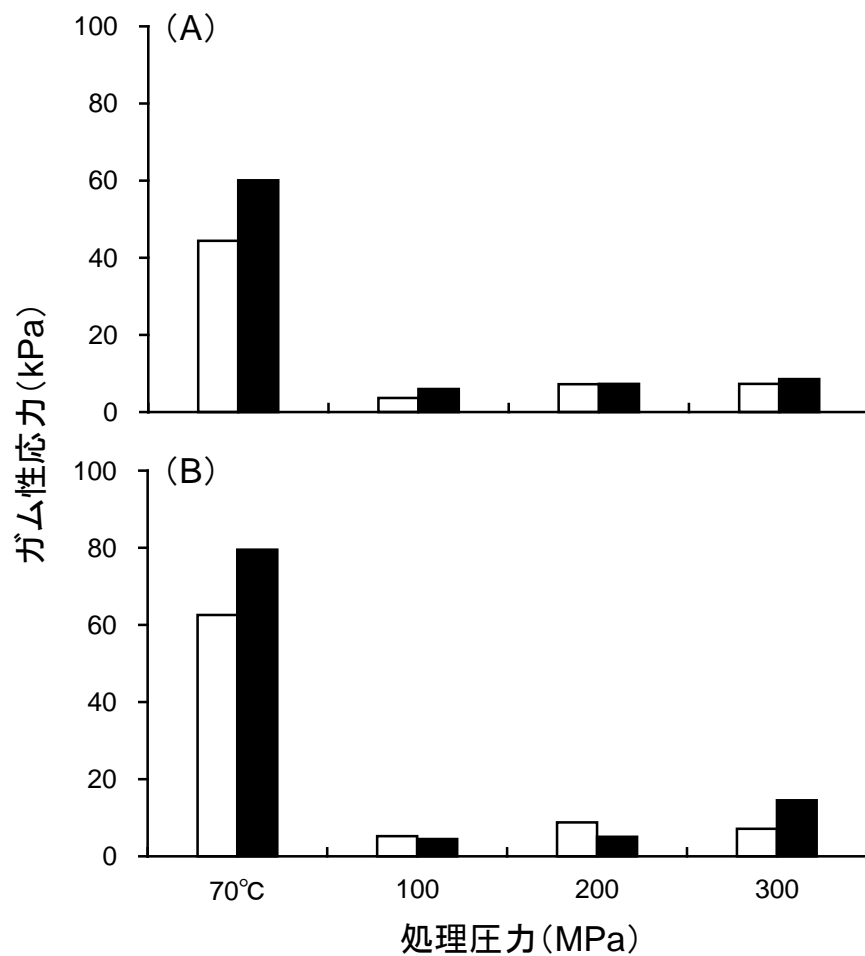


図19. 死後硬直後のニワトリの白色筋と赤色筋による加熱ゲルならびに加圧ゲルのガム性.

死後24時間後のニワトリのムネ肉およびモモ肉に1%または2%の加塩と20%の加水をした加熱ゲルと加圧ゲルについて図9と同様にテクスチャー解析を行った. (A) ; 1% NaCl, (B) ; 2% NaCl, □ ; ムネ肉, ■ ; モモ肉.

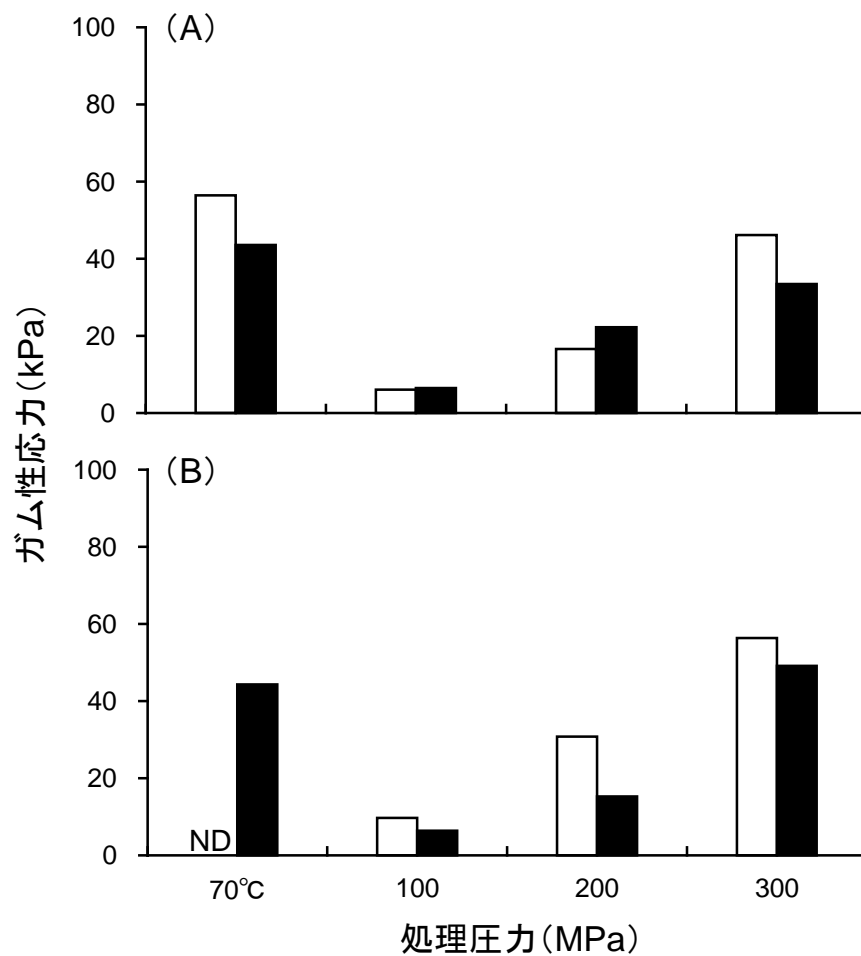


図20. ブタの白色筋と赤色筋による加熱ゲルならびに加圧ゲルのガム性.
 ブタのロース肉およびヒレ肉に1%または2%の加塩と20%の加水をした加熱ゲルと加圧ゲルについて図9と同様にテクスチャー解析を行った. (A) ; 1% NaCl, (B) ; 2% NaCl, □ ; ロース肉, ■ ; ヒレ肉, ND ; 不検出 (Not Detected) .

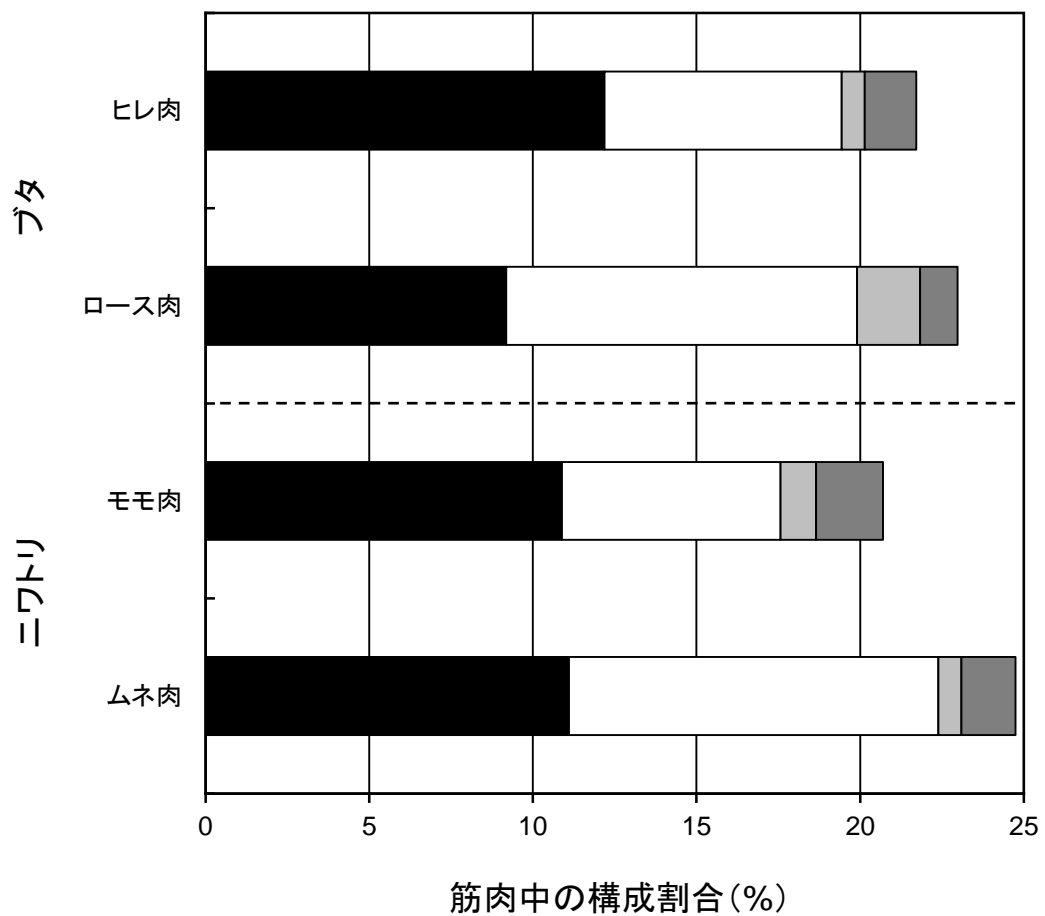


図21. 筋肉タイプによる各筋肉タンパク質の組成.

各々の筋肉20 gから筋原線維タンパク質，筋漿タンパク質，結合組織タンパク質の3画分を調製し，これらの画分と筋肉に含まれるタンパク質量をマイクロケルダール法によって調べた．筋肉100 g中にそれぞれの成分が占める割合を表した．3画分のタンパク質量の合計と挽肉のタンパク質量との差を操作中における損失分（ロス）とした．■；筋原線維，□；筋漿タンパク質，■；結合組織，■；ロス．