

【原著論文(一般論文)】

鶏の可食部位における熟成中のうま味形成機構の比較

江草 愛¹・笹野 有唯¹・對比地 美妃¹・石田 真澄²・留村 泰次²

¹ 日本獣医生命科学大学 食品科学科, 東京都武蔵野市, 180-0023,

² 株式会社エターナルホスピタリティグループ 研究開発部, 大阪府大阪市, 541-0047

(2025.11.28 受付, 2025.12.05 受理)

要 約

鶏の可食部位における熟成中のうま味形成機構の違いを明らかにするため、8種類の組織(骨格筋、内臓、軟骨)を対象に、グルタミン酸(Glu)、イノシン酸(IMP)、酵素活性、うま味強度を比較した。骨格筋由来組織ではGluの顕著な増加とIMPの有意な減少がみられたのに対し、内臓由来組織では肝臓を除き、両代謝物の変動はほとんどなかった。また、軟骨由来組織では基質量が少ないために代謝応答は限定的であった。スピアマン相関解析により、Glu変化とアミノペプチダーゼ活性($\rho = -0.54$)、IMP変化と5'-ヌクレオチダーゼ活性($\rho = -0.40$)の相関性はいずれも弱く、酵素と代謝物の関係性が組織間で大きく異なることが示唆された。これらの結果より、鶏肉可食部位における熟成中のうま味形成は、骨格筋の酵素活性依存型、内臓の代謝再利用型、軟骨の基質制限型という組織特異的な応答によって規定されることが明らかとなった。

食肉の科学 66 (2), 113-123, 2025

キーワード：鶏肉、熟成、うま味、組織間比較

1. 緒 言

食肉の熟成は、屠畜後に筋肉中の内因性の酵素が筋原線維タンパク質や核酸関連化合物を段階的に分解することによって進行し、これにより呈味や食感が向上する現象として知られている^{1,2)}。特に骨格筋由来の組織では、カルパインやカテプシンなどのプロテアーゼ群によるタンパク質の分解、ならびにアミノペプチダーゼ群によるオリゴペプチドの加水分解が、熟成に伴う遊離アミノ酸の増加に寄与することが報告されている^{3,4)}。これらの反応は、筋細胞膜の崩壊、リソソーム酵素の活性化、pHの低下など、死後の細胞内環境変化と密接に関係している⁵⁾。

一方、うま味の形成には、遊離アミノ酸だけでなく核酸関連物質の分解過程も重要である。ATP分解により生成されるイノシン酸(IMP)は、グルタミン酸(Glu)と相乗的に呈味を高める主要な因子であり⁶⁾、その残存率は熟成過程における呈味の指標とされている⁷⁾。IMPはAMPデアミナーゼや5'-ヌクレオチダーゼなど複数の酵素群によって代謝されるが、酵素活性と呈味物質変化との関連を可食部位間で比較した報告は限られている⁸⁾。

従来の熟成研究は、主に骨格筋由来の組織を対象として展開されてきた。牛や豚、鶏においては、熟成温度・時間・pHなどの条件とうま味形成や軟化に及ぼす影響について体系的に検討されており^{9,10)}、骨格筋由来の食肉の呈味形成機構は比較的整理されている。

しかし、肝臓・心臓・筋胃(砂肝)などの内臓由来の組織や、やげん軟骨(胸骨先端部)・ひざ軟骨といった結合組織由来の可食部位については、熟成に伴う化学的変化に関する報告がほとんど存在しない。これらの組織は、生体における代謝様式が骨格筋と著しく異なることが知られており^{11,12)}、特に肝臓ではグルタミン酸脱水素酵素(GLUD)やトランスアミナーゼ(AST/ALT)を介したアミノ酸再同化系が活発であるため、生成された遊離アミノ酸がただちに代謝回路へ再利用される「代謝再利用優位型」の組織構造を持つと考えられる。一方、軟骨組織はコラーゲンを主体とする細胞外基質(ECM)を多く含み、可溶性ペプチドの供給が限定されるため、酵素活性が高くても反応が進みにくい「基質制限型」の代謝的な制約を有する。

以上のように、可食部位ごとの組織構造と代謝特性の違いは、熟成過程におけるうま味形成機構の差異を生じさせる主要因と考えられる。そこで、本研究では、鶏の骨格筋、内臓、軟骨を由来とする各組織を対象に、屠鳥後の熟成中のうま味関連物質（GluおよびIMP）の変化と関連酵素活性（アミノペプチダーゼおよび5'-ヌクレオチダーゼ）の経時的変化を比較し、組織特異的なうま味形成機構を体系的に比較することを目的とした。さらに、これらの結果を代謝的観点から統合し、熟成中の呈味形成を「酵素活性依存型」「代謝再利用型」「基質制限型」の三つの型として整理することを試みた。

2. 実験方法

2-1. 試料

宮崎県内の指定農場で生産されたチャンキー種の鶏を各組織（ムネ肉、ササミ、モモ肉、心臓、砂肝、肝臓、やげん軟骨、ひざ軟骨）に解体後、含気下でプラスチック製のバッグ（1袋あたり、5-10羽分）に包装し、試験開始まで5°Cで保管した。屠鳥日をDay 0とし、Day 2からDay 6までの5時点でサンプリング（各n=3）を行った。

2-2. pH測定と微生物検査

試験期間中に微生物の繁殖が無いかを確認するため、各組織のpHを、刺突型ガラス電極（6252、堀場製作所、京都）を装着したpHメーター（LACUAact、堀場製作所、京都）にて測定した。一般生菌数の測定には、混釈平板培養法を用い、カンピロバクターの検出には、スキロー改良法による分離培養法を用いて、食肉汚染に関連する微生物の有無を調べた。

2-3. 遊離アミノ酸とイノシン酸の分析

遊離アミノ酸とイノシン酸分析用のサンプルは、既報¹³⁾に準じて調製した。すなわち、各組織から脂肪組織および不要な結合組織を取り除き、一般家庭用のフードプロセッサー（MK K-61、パナソニック、大阪）で細切した。細切した試料を一定量に秤量後、4倍量の滅菌した冷却蒸留水を加えて、氷上でホモジェナイズ（10,000 rpm、1分間；PCU-11、Polytron、スイス）を行った。その後、遠心分離（10,000 × g、4°C、20分間；Suprema 21、トミー精工、東京）を行い、上清をNo.5Aの定量ろ紙でろ過した。ろ液に対して等量の3%スルホサリチル酸を加え、4°Cで一晩静置した。翌日、再び遠心分離（10,000 × g、4°C、10分間）を行い、上清を0.45 μmのフィルターでろ過し、得られたろ液をアミノ酸分析とイノシン酸分析用のサンプルとした。

アミノ酸分析には、アミノ酸分析計 JLC-500/V（日本電子、東京）を用い、サンプル中の遊離アミノ酸含量を測定した。IMP分析には、高速液体クロマトグラフィー（HPLC；センシユー科学、東京）を用いて、以下の条件で測定を行った。カラム；Shodex Asahipak GS-320 HQ 4.6 mmI.D. × 100 mm（レゾナック、東京）、カラム温度；40°C、移動相（Isocratic）；10 mM リン酸ナトリウム緩衝液（pH 6.1）、検出波長；260 nm、流速；1.0 ml/min

2-4. うま味強度の算出

2-3で得たGluとIMPの測定値を、以下の式⁶⁾に代入し、うま味強度を算出した。うま味強度 = $u + 1218uv$ (u = Gluの重量%濃度、 v = IMPの重量%濃度)

2-5. アミノペプチダーゼ活性の測定

脂肪組織および結合組織を取り除き、フードプロセッサーで細切した各組織を一定量秤量し、4倍量の0.1 Mの塩化ナトリウムを加えた10 mM トリス塩酸緩衝液（pH 8.0）を添加した。氷上でホモジェナイズ（10,000 rpm、1分間）し、懸濁液を得た。その後、遠心分離（7,000 rpm、4°C、30分間）を行い、得られた上清をガーゼでろ過した。このろ液をアミノペプチダーゼ活性測定用のサンプルとした。アミノペプチダーゼ活性の測定は、Greenらの方法¹⁴⁾を改変して使用した。0.25 mM グルタミン酸βナフチルアミドを加えた10 mM トリス塩酸緩衝液（pH 7.5）を、37°Cに設定した恒温槽で10分間加温後、1/20量のサンプルを加え、10分間インキュベートした。その後、0.7%塩酸を加えたエタノールをトリリス塩酸緩衝液と等量添加し、反応を停止させた。0.06%のpara-ジメチルシンナムアルデヒドを加えたエタノールを一定量加え、溶液の酵素によって遊離したナフチルアミドを発色させた。尚、ブランクには、あらかじめ0.7%塩酸を加えたエタノールを入れ、反応を止めたものを使用した。この溶液を、紫外可視分光光度計（uv-1850、島津製作所、京都）を用いて、540 nmの波長で1時間以内に測定した。基質1 mMを1分間に遊離させる酵素活性を1 Unitとし、アミノペプチダーゼ活性値を求めた。

2-6. イノシン酸分解酵素活性の測定

方法の2-3.で調製したIMP分析用のサンプルを、酵素活性測定用のサンプルとして用いた。氷上で、全てのチューブに酵素活性用のサンプルを等量加え、37°Cに設定した恒温槽で1時間インキュベートした。その後、氷上でブランク以外のチューブに、等量の3%スルホサリチル酸を加え、反応を停止させた。除タンパクのため、4°Cで一晩静置し、翌日

に遠心分離 (10,000 × g, 4 °C, 10 分間) を行い、上清を 0.45 μm のフィルターでろ過した。このろ液を高速液体クロマトグラフィー (HPLC) に供し、2-3. で示した IMP の分析と同様の条件で測定を行った。筋肉内に存在する IMP を 1 g あたりで 1 分間に分解する活性を 1 Unit とし、イノシン酸分解酵素活性値を求めた。

2-7. 統計解析

全データは平均値±標準偏差で示した。熟成時間による変化は、組織ごとに熟成時間を因子とした一元配置分散分析 (One-way ANOVA) により評価し、熟成開始時点 (Day 2) との差の検出には Dunnett 法 [Dunnett's HSD post hoc test (SAS ver. 9.3)] を用いた。

また、各組織間における熟成に伴ううま味関連指標の関係性を評価するため、Python (ver. 3.0) および SciPy ライブラリ (scipy.stats) を用いてスピアマンの順位相関係数 (Spearman's rank correlation coefficient, ρ) を算出した。いずれの解析においても危険率 5% を有意差ありとした。

3. 結果および考察

3-1. 熟成期間中の pH 変動と微生物

ひざ軟骨組織で Day 6 において pH が 6.0 から 6.5 まで上昇したが、その他の組織では、熟成期間での経時的な pH 変動は認められなかった (図 1)。また、Day 6 の検体を用いた微生物検査の結果では、一般生菌数については、心臓で約 10⁶ cfu/g 台と他の組織より高い値を示したが (Data not shown), 腐敗臭や粘着性の出現はなく、外観は保持されていた。

3-2. 熟成に伴う遊離アミノ酸とイノシン酸、うま味強度の変動

骨格筋を由来とする組織の遊離 Glu 含量は、熟成と共に経時的に増加し、ムネ肉では、肉 100 g あたり 22 mg (Day 2) であったのが 40 mg (Day 6) と、1.9 倍の有意な増加となった (図 2A)。同様に、ササミでは、17 mg (Day 2) であったのが 28 mg (Day 6) となり、モモ肉でも、28 mg (Day 2) であったのが 48 mg (Day 6) と、それぞれ 1.7 倍に増加した ($p < 0.05$)。一方、IMP については、肉 100 g あたり 180 mg (Day 2) 含まれていたのが、110 mg (Day 6) と含量の 4 割が有意に減少した (図 3A)。同様に、ササミとモモ肉でも、それぞれ 230 mg, 160 mg (ともに Day 2) であったのが、170 mg, 110 mg (ともに Day 6) と、いずれも含量の約 3 割が有意に減少した。Jung ら¹⁵⁾ は、35 日齢のコブ種のムネ肉を用

いて、メタボローム解析を行ったところ、冷蔵期間 Day 1 では、肉 100 g あたり 25 mg の遊離 Glu が含まれていたのに対し、Day 7 では 40 mg と 1.7 倍に増加し、さらに IMP は Day 1 の 160 mg から Day 7 の 110 mg まで 3 割が減少したと報告している。また、Lee ら¹⁶⁾ によると、同様に 35 日齢のコブ種モモ肉を Day 1 から Day 7 で保存したサンプルをメタボローム解析に供したところ、肉 100 g あたりの遊離 Glu が 48 mg から 66 mg と 1.4 倍に増加したのに対し、IMP は 74 mg から 33 mg に 6 割近くが減少したと報告している。本研究では、これら既報よりも遊離 Glu の増加が大きく、IMP の減少が小さい結

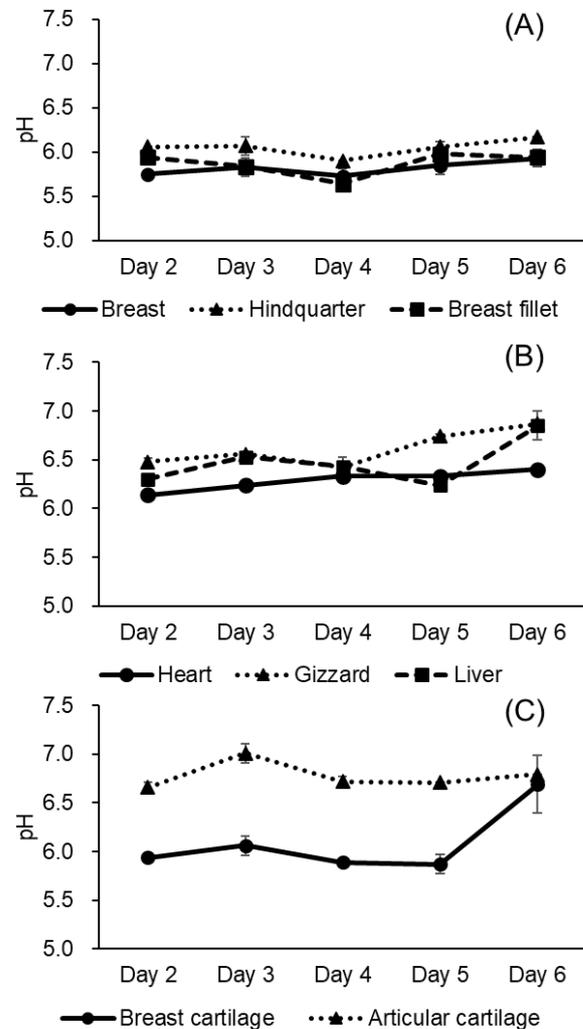


Figure 1 . Postmortem changes in pH across chicken edible tissues.

pH values of skeletal muscles (breast, hindquarter, breast fillet; A), viscera (heart, gizzard, liver; B), and cartilage (articular cartilage, breast cartilage; C) were monitored from Day 2 to Day 6. Data are presented as means ± standard deviation (n = 3).

果となったが、先行研究とよく相関していた。遊離 Glu と IMP の含量から求められるうま味強度については、ムネ肉とササミでは、Day 2 に比べて Day 6 が高くなり熟成効果が認められた (図 4A)。これに対して、モモ肉では、IMP の分解の程度が大きかったため、うま味強度は変動しなかった。骨格筋を由来とする組織では、Glu の遊離と IMP の分解は従前とおりの「酵素活性依存的」であることが確認された。

一方、内臓由来組織である心臓、砂肝、肝臓の遊

離 Glu は、Day 2 で肉 100 g あたり、それぞれ 140 mg, 110 mg, 86 mg と骨格筋を由来とする組織の 2 ~ 3 倍の高値を示した (図 2B)。熟成を経た Day 6 では、それぞれ 130 mg, 130 mg, 120 mg と、心臓では変動がなく、砂肝では 1.2 倍の増加となり、肝臓では 1.5 倍の有意な増加となった。IMP 含量については、Day 2 から Day 6 において、骨格筋由来組織の半分量である 100 mg (100 g 肉あたり) であり、いずれの組織でも変動は認められなかった (図 3B)。

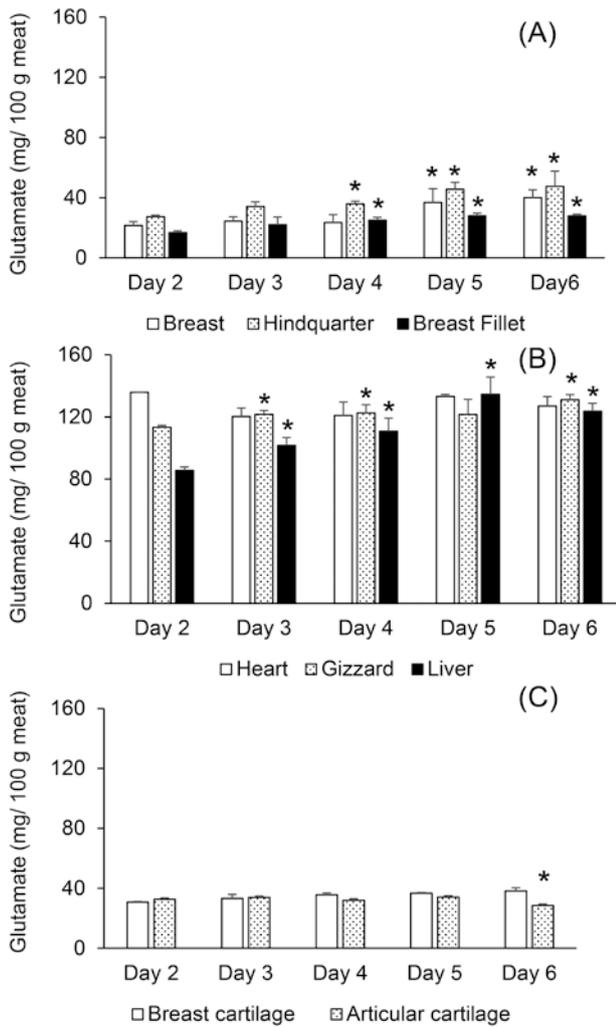


Figure 2 Postmortem changes in glutamate content across chicken edible tissues.

Glutamate content of skeletal muscles (breast, hindquarter, breast fillet; A), viscera (liver, heart, gizzard; B), and cartilages (articular cartilage, breast cartilage; C) was monitored from Day 2 to Day 6. Data are presented as means \pm standard deviation ($n = 3$). * $p < 0.05$ vs Day 2.

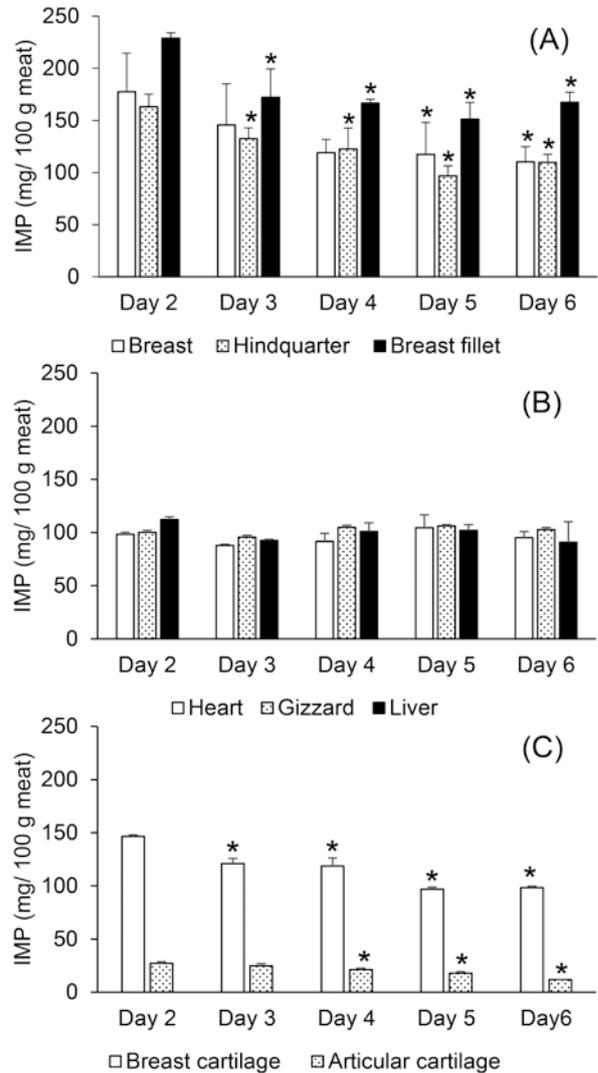


Figure 3. Postmortem changes in inosine monophosphate (IMP) content across chicken edible tissues.

IMP content of skeletal muscles (breast, hindquarter, breast fillet; A), viscera (liver, heart, gizzard; B), and cartilages (articular cartilage, breast cartilage; C) was monitored from Day 2 to Day 6. Data are presented as means \pm standard deviation ($n = 3$). * $p < 0.05$ vs Day 2.

これにより、うま味強度も肝臓を除くと限定的であり、特に心臓においては、Day 3やDay 4がDay 2より低い値を示していた。これらの結果から、内臓由来組織におけるGluの限定された増加や、IMP残存率の維持傾向は、骨格筋由来組織における典型的な熟成反応とは異なる挙動を示していた。先行研究では、鶏ムネ肉において屠殺後のATP分解に伴うIMPの蓄積とその後の減少が観察されている¹⁷⁾。一方、肝臓ではIMPやイノシンが尿酸合成に速やかに利用されることが報告されており¹⁸⁾、筋肉組織のような顕著なIMP濃度変動は生じにくいと考えられる。また、Huら¹⁹⁾の解析では、IMP含量および筋内脂肪量の鶏種差が腸内微生物構成や代謝マーカーと関連しており、肉質形成における代謝構造の個体差を示唆している。これらを踏まえると、内臓組織では、遊離アミノ酸または核酸由来呈味成分の変動が骨格筋由来組織とは異なる代謝によって制御されており、本研究の「代謝再利用型」という分類はこれらの知見とも整合性があると考えられた。

また、結合組織を由来とするやげん軟骨とひざ軟骨については、Day 2でいずれも肉100gあたり30mgの遊離Gluが含まれており、この値は骨格筋由来組織と同等であった(図2C)。熟成を経たDay 6では、それぞれの含量が36mg、29mgと、約2割の有意な減少もしくは変動しない結果となった。一方、IMP含量については、熟成期間を経ることで、やげん軟骨では150mgから90mgへ、ひざ軟骨では25mgから15mgと4割の含量が有意に減少した(図3C)。その結果、うま味強度は大きく減少し、特にひざ軟骨では、Day 2の強度の2割にまで低下した(図4C)。これまで、鶏肉や肝臓の熟成に関する研究は多数報告されているが、可食軟骨組織における遊離アミノ酸の動態を分析した報告は未だ存在しない。Cordeiroら²⁰⁾は鶏キールボーン(やげん軟骨)から抽出したコラーゲンのアミノ酸組成を定量し、グリシン、アラニン、およびグルタミン酸(Glu)が主要構成アミノ酸であることを示したが、これはタンパク質中の結合アミノ酸を測定したものであり、遊離Gluについては検討されていない。さらに、Choiら²¹⁾やYangら²²⁾も、牛骨あるいは鶏軟骨由来抽出物の化学組成やアミノ酸組成を報告しているものの、熟成過程における可食軟骨中の遊離Gluの変化を対象とした研究はこれまで報告されていない。したがって、本研究は、これら知見の空白を補う初の比較検証実験として位置づけられると考

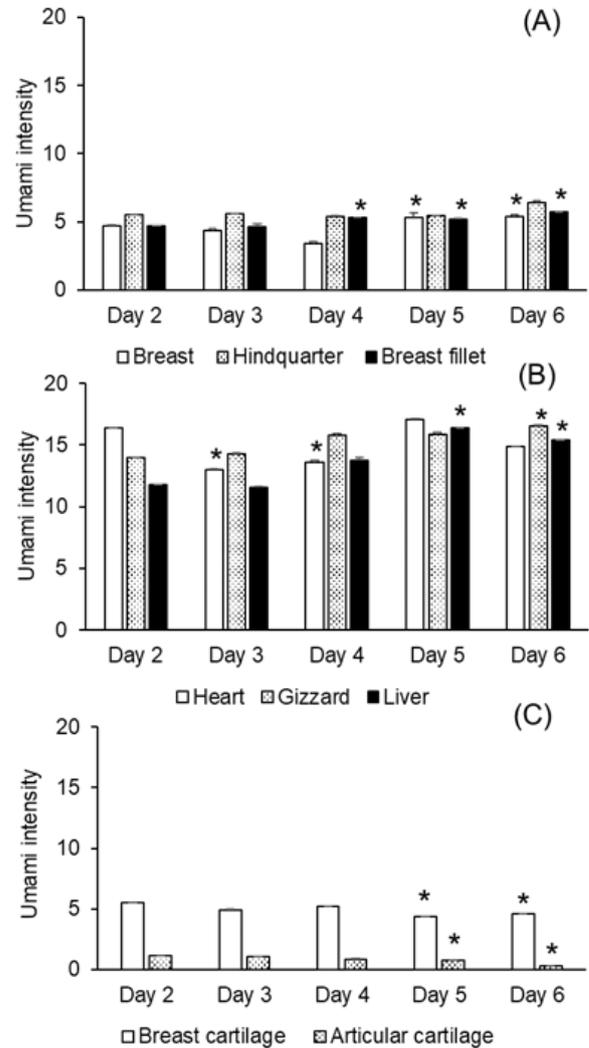


Figure 4. Postmortem changes in umami intensity across chicken edible tissues.

Umami intensity of skeletal muscles (breast, hindquarter, breast fillet; A), viscera (liver, heart, gizzard; B), and cartilages (articular cartilage, breast cartilage; C) was evaluated from Day 2 to Day 6. Data are presented as means \pm standard deviation (n = 3). * $p < 0.05$ vs Day 2.

えられた。

3-3. 酵素活性の推移と組織差

骨格筋、内臓および軟骨由来組織において、熟成期間中の遊離Glu量やIMP量が異なる結果となったことから、両物質の増減に関わる酵素の活性を測定した。骨格筋由来組織のアミノペプチダーゼ活性は、0.2 Unitから2.5 Unitの範囲内の値であり、熟成による有意な変動は認められなかった(図5A)。一方、内臓由来組織は、心臓のアミノペプチダーゼ活性がDay 2で5.4 UnitであったものがDay 6で2.9

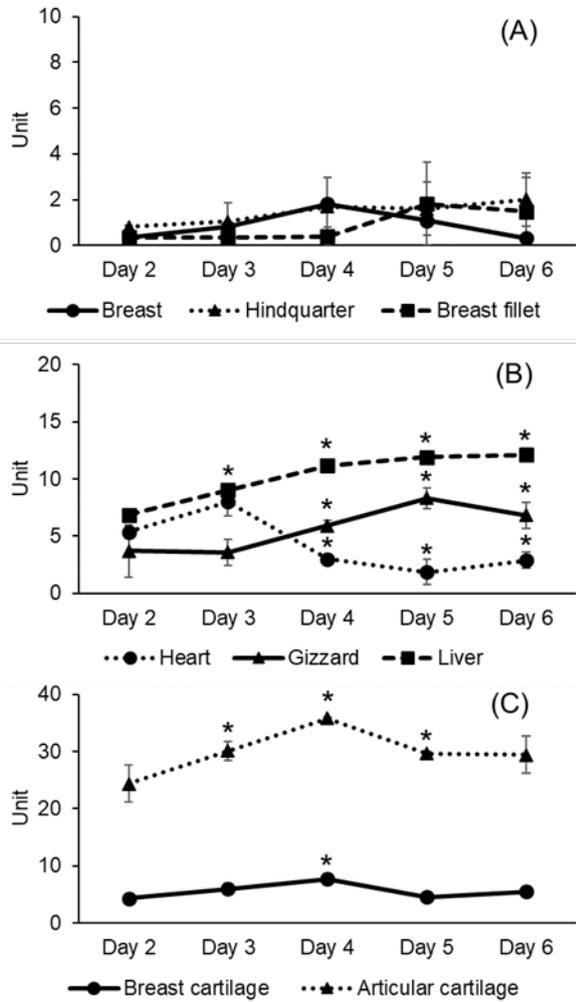


Figure 5. Postmortem changes in aminopeptidase activity across chicken edible tissues.

Aminopeptidase activity of skeletal muscles (breast, hindquarter, breast fillet; A), viscera (liver, heart, gizzard; B), and cartilages (articular cartilage, breast cartilage; C) was measured from Day 2 to Day 6. Data are presented as means \pm standard deviation ($n = 3$). * $p < 0.05$ vs Day 2.

Unit まで低下した (図 5B)。心臓において熟成期間中に遊離 Glu 量に変動しなかったことは、アミノペプチダーゼ活性が経時的に減少したことによると考えられた。対して、肝臓のアミノペプチダーゼ活性は Day 2 で 6.9 Unit であったのが Day 6 で 12 Unit と 1.7 倍に有意に増加した。この活性の上昇は、肝臓で熟成期間中に Glu 含量が増加した理由と合致していた。砂肝のアミノペプチダーゼ活性も Day 2 の 3.7 Unit から Day 6 の 6.8 Unit まで有意に増加したが、Glu の増加にはつながらなかった。砂肝でアミノ酸を遊離させる能力が高かったものの、組織中の Glu

含量は変動しなかった理由として、ペプチドの末端に Glu がほとんど存在しない、もしくは Glu が異化されている可能性が示唆された。軟骨を由来とする組織では、やげん軟骨で 4 Unit から 5 Unit (それぞれ Day 2 と Day 6) と活性が維持しており、同様に、ひざ軟骨でも、25 Unit から 28 Unit (それぞれ Day 2 と Day 6) へと活性が維持していた (図 5C)。特に、ひざ軟骨ではアミノペプチダーゼ活性が骨格筋系の 8 倍、内臓系の 3 倍の高い活性を示した。

続いて、各組織の IMP 分解酵素活性の結果を調べたところ、骨格筋由来組織では、熟成期間中での活性が保持されており、特にモモ肉では、Day 6 においても他の組織の 2 倍以上の活性を有していた (図 6A)。そのため、骨格筋組織では熟成期間中に IMP 含量が低下したと考えられた。一方、内臓由来組織は、心臓のイノシン酸分解酵素活性が Day 2 で 126 Unit であったのに対し、Day 6 では 55 Unit まで有意に低下した (図 6B)。肝臓の IMP 分解酵素活性は、Day 2 で 9 Unit であったのが Day 6 では検出されなかった。また、砂肝の IMP 分解酵素活性は Day 2 で 71 Unit であり、Day 6 では 26 Unit まで低下したが、個体差が大きかったことから有意差は認められなかった。内臓由来組織で熟成期間中に IMP 含量が維持された理由として、5'-ヌクレオチダーゼの活性が経時的に低下したことで、IMP の分解が妨げられたと考えられた。また、軟骨を由来とする組織では、やげん軟骨で 106 Unit から 40 Unit (それぞれ Day 2 と Day 6) と低下し、同様に、ひざ軟骨でも、15 Unit から 0 Unit (それぞれ Day 2 と Day 6) へと活性が消失した (図 6C)。骨格筋由来組織は、熟成期間中に Glu の遊離活性も IMP の分解活性も維持されるため、経時的な遊離 Glu の増加と IMP の減少によるうま味増強効果が認められた。

一方、心臓では各種酵素が減少したため、遊離 Glu 含量も IMP 含量も変動せず、熟成による効果は認められなかった。砂肝では、Glu 遊離活性が増加したものの Glu 含量は変動がなく、IMP 分解活性の低下により IMP の変動がなかったことから、心臓と同様熟成による効果は認められなかった。肝臓では各種酵素の増減によって、Glu が増加し、IMP の変動が認められなかったことから、今回の試験の中でうま味強度が最も高い値を示すことが明らかとなった。

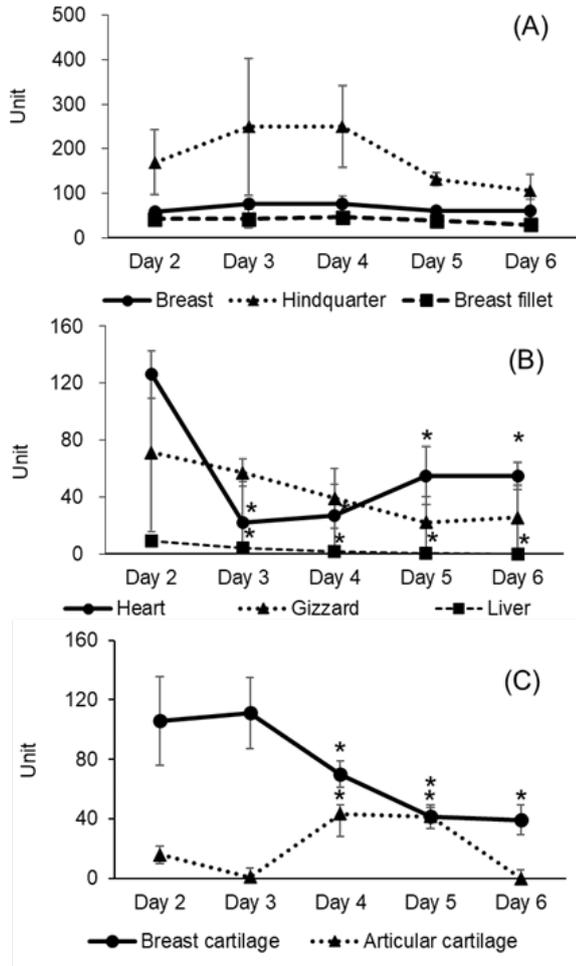


Figure 6. Postmortem changes in 5'-nucleotidase activity across chicken edible tissues.

5'-Nucleotidase activity of skeletal muscles (breast, hindquarter, breast fillet; A), viscera (liver, heart, gizzard; B), and cartilages (articular cartilage, breast cartilage; C) was measured from Day 2 to Day 6. Data are presented as means \pm standard deviation ($n = 3$). * $p < 0.05$ vs Day 2.

3-4. 熟成初期 (Day 2 から Day 4) におけるうま味成分および酵素活性の変化 (Δ 解析)

各組織における遊離 Glu の変動が大きい熟成期間は、Day 3 から Day 5 の間であり、IMP の場合は Day 2 から Day 4 であった。そこで、両うま味物質の変動が大きかったこれら期間の絶対的な変化量 (Δ 値) を求め、各組織で比較した。 Δ Glu は肝臓で最も変化が大きく、2 日間で肉 100 g あたり 25 mg 増加した。一方、心臓では 100 g あたり 15 mg 減少する結果となった。骨格筋を由来とする組織では、ムネ肉での増加が最も大きい値を示した。また、

軟骨由来組織では増加が小さい、もしくは減少しており、基質による制限が強く示唆された (図 7A)。また、 Δ IMP は骨格筋由来の組織で大きく減少し、ムネ肉では肉 100 g あたり約 60 mg が減少した。軟骨系では、減少の幅が骨格筋由来の組織に比べると

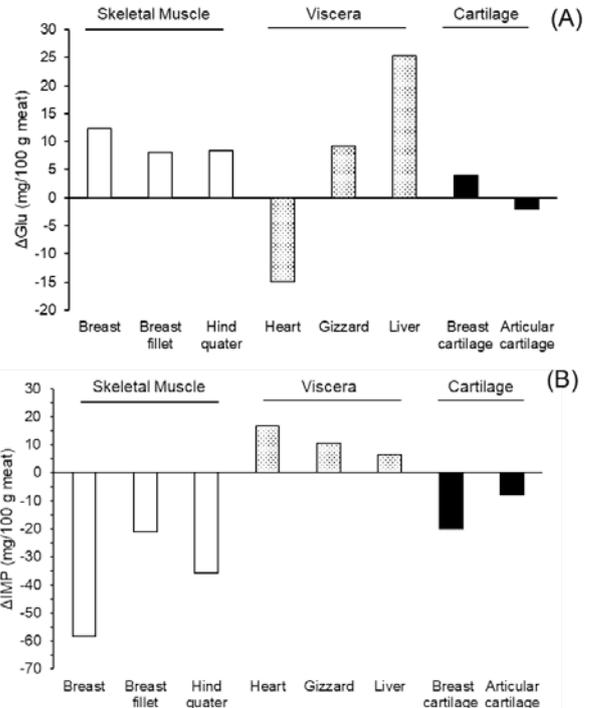


Figure 7. Changes (Δ) in glutamate and IMP during aging across chicken edible tissues.

Changes (Δ) in glutamate content from Day 3 to Day 5 (A) and changes (Δ) in IMP content from Day 2 to Day 4 (B) were calculated for each tissue. Data are presented as means ($n = 3$).

小さかった。一方、内臓由来組織では総じて増加していた (図 7B)。

3-5. うま味成分の変化と酵素活性の関係: スピアマン相関による解析

うま味の形成に関する酵素の寄与を明らかにするため、遊離 Glu の変化率 [(GluDay 5-GluDay 3)/GluDay 3 \times 100] およびアミノペプチダーゼ活性 (Day 3 から Day 5 平均値) と、5'-ヌクレオチダーゼ活性 (Day 2 から Day 4 平均値) と IMP 残存率 (Day 4/Day 2 \times 100) との関係について、Spearman の順位相関解析を実施した。その結果、Glu 変化率とアミノペプチダーゼ活性との間には、弱い負の相関傾向 ($\rho = -0.54$, $p = 0.17$) が示されたが、有意差は

認められなかった (図 8A)。これは、肝臓や軟骨において、高いアミノペプチダーゼ活性を示すにも関わらず、Glu 増加が限定的な組織が存在するため、単純な量的相関が成立しなかったことに起因すると考えられた。通常、筋肉では熟成初期にカルパインやカテプシンによる筋原線維タンパク質の分解が生じ、中期以降にアミノペプチダーゼがオリゴペプチドを切断して遊離アミノ酸を増加させる^{1,23)}。一方、内臓や軟骨ではタンパク質の構造や代謝の背景が筋肉とは大きく異なるため、アミノペプチダーゼの活性値がそのまま Glu 増加に結びつきにくく、相関が認められにくい結果になったと考えられた。

同様に、5'-ヌクレオチダーゼ活性と IMP 残存率 (図 8B) にも弱い負の相関 ($\rho = -0.40, p = 0.32$) が認められたが、有意差はなかった。骨格筋由来の組織に比べ、肝臓や心臓などの内臓組織では ATP や AMP の代謝回転が極めて速いことが報告されており²⁴⁾、こうした高いヌクレオチド変換速度を背景として、IMP の生成や分解経路は単一の 5'-ヌクレオチダーゼ活性だけでは説明できない複雑な代謝網を形成していることが示唆されている²⁵⁾。特に、アデノシンリン酸デアミナーゼ (AMPD) による AMP から IMP への変換²⁶⁾、アデニル酸キナーゼ (AK) による ADP-AMP 間の平衡調節²⁷⁾、さらに細胞質型 5'-ヌクレオチダーゼ (NT5C/N) による IMP からイノシンへの加水分解²⁸⁾ など、複数の代謝酵素群が並行して関与する可能性が高い。今後は、これらの酵素群の活性変動と可食臓器組織における IMP 動態の関係を調べる必要があると考えられた。

さらに、Glu 変化率と IMP 残存率の間には中程度の負の相関 ($\rho = -0.68$) を示し、有意傾向 ($p = 0.06$) であった (図 8C)。これは遊離 Glu が増加しやすい組織ほど IMP が早期に減少することを示している。骨格筋では、熟成に伴い筋原線維の構造変性や結合組織の脆弱化が進行し、これに伴って筋原線維タンパク質の分解が進むことが報告されている²³⁾。これらのタンパク質分解は、IMP や関連ヌクレオチドの分解と同じ熟成初期～中期に進行することから、呈味形成に関わる複数の分解過程が並行して起こる可能性が示唆される。これに対し軟骨では、高いアミノペプチダーゼ活性を示すものの、コラーゲン主体の組織構造であるため基質による加水分解の制限が顕著であると考えられ、Glu の増加が極めて小さい「基質制限型」の挙動を示した。これらの結果を纏めると、骨格筋由来組織は「酵素活性依存

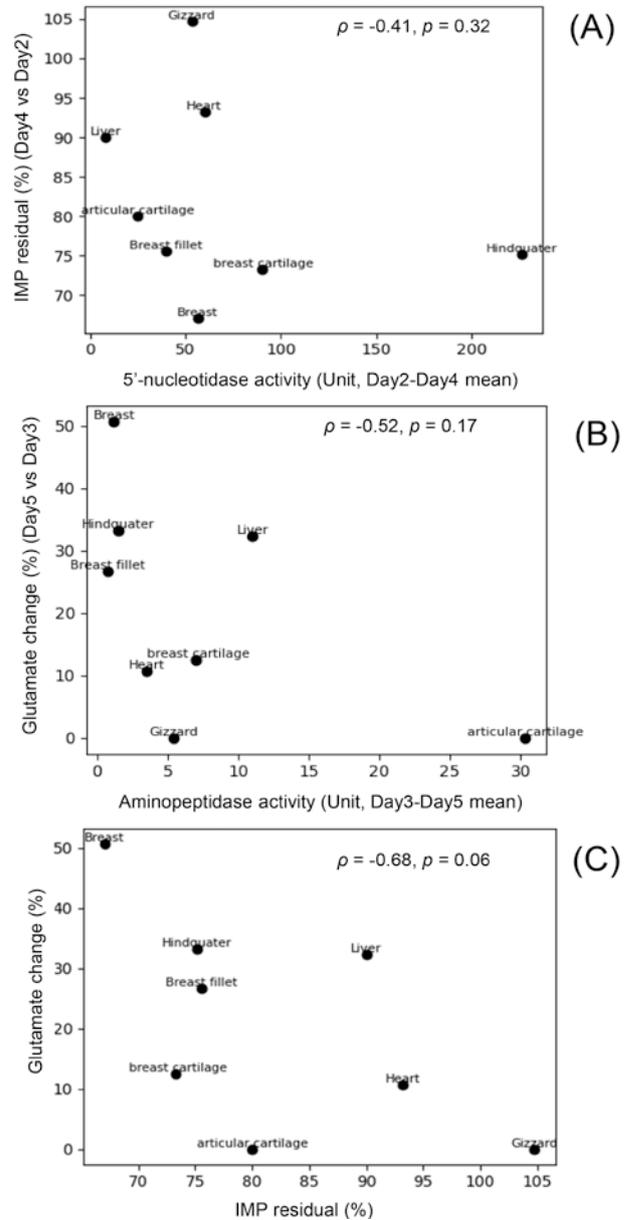


Figure 8. Relationships among glutamate change, aminopeptidase activity, IMP residual, and 5'-nucleotidase activity.

Spearman's correlation analyses were performed between glutamate change (%) and aminopeptidase activity from Day 3 to Day 5 (A), between IMP residual (%) and 5'-nucleotidase activity from Day 2 to Day 4 (B), and between glutamate change (%) and IMP residual (%) (C). Correlation coefficients (ρ) and p -values are shown.

型」、軟骨は「基質制限型」、内臓は「代謝再利用依存型」という組織特異的な熟成応答が、本研究の相関解析から浮かび上がった。これらの型が存在することにより、熟成による呈味形成機構は組織間で統

一的なモデルでは説明できず、統計的にも相関関係が弱いという結果から、その複雑性と特異性を裏づけることとなった。

これまで鶏肉の熟成に関する研究は筋肉組織を中心に進められてきたが、内臓や軟骨などの非筋組織では呈味成分の基質組成や酵素活性が大きく異なることが知られており、熟成応答が同一であるとは考えにくい。しかし、これまでに、これら可食部位間で熟成による呈味形成機構を横断的に比較した研究は存在しなかった。本研究では、筋肉・内臓・軟骨という異なる可食組織を対象に、熟成中の呈味成分および関連酵素活性の変化を比較し、組織特異的な熟成メカニズムの全体像を明らかにすることができたと考えられる。

利益相反

本研究は株式会社エターナルホスピタリティグループとの共同研究として実施され、同社より研究費の提供を受けた。また、著者のうち2名は同社に所属している。これら以外に、本研究に関して開示すべき利益相反はない。

参考文献

- Nishimura T. Mechanism involved in the improvement of meat taste during postmortem aging. *Food Sci Technol Int.* **4**, 241–249 (1998)
- Toldra F, Flores M. The role of muscle proteases and lipases in flavor development during the processing of dry-cured ham. *Crit Rev Food Sci Nutr.* **38**, 331–352 (1998)
- Koohmaraie M. Muscle proteinases and meat aging. *Meat Sci.* **36**, 93–104 (1994)
- Huff-Lonergan E., Zhang W., Lonergan S. M. Biochemistry of postmortem muscle - lessons on mechanisms of meat tenderization. *Meat Sci.* **86**, 184–195 (2010)
- Ouali A., Herrera-Mendez H. C., Coulis G., Becila S., Boudjellal A., Aubry L., Sentandreu A. M. Revisiting the conversion of muscle into meat and the underlying mechanisms. *Meat Sci.*, **74**, 44–58 (2006)
- Yamaguchi S., Ninomiya K. Umami and food palatability. *J. Nutr.* **130**, 921S–926S (2000)
- Nishimura T., Rhue M. R., Okitani A., Kato H. Components contributing to the improvement of meat taste during storage. *Agric. Biol. Chem.* **52**, 2323–2330 (1988)
- Joo S.T., Choi J.S., Hur S.J., Kim G.D., Kim C.J., Lee E.Y., Bakhsh A., Hwang Y.H. A comparative study on the taste characteristics of satellite cell cultured meat derived from chicken and cattle muscles. *Food Sci. Anim. Resour.* **42**, 175–185 (2022)
- Jayasena D. D., Ahn D. U., Nam K. C., Jo C. Flavour chemistry of chicken meat: A review. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.*, **26**, 732–742 (2013)
- Joo S. T., Choi J. S., Hur S. J., Kim G. D., Kim C. J., Lee E. Y., Bakhsh A., Hwang Y. H. Aging mechanism for improving the tenderness and taste characteristics of meat. *J. Anim. Sci. Technol.* **65**, 1151–1171 (2023)
- Watford M. Glutamine and glutamate metabolism across the liver sinusoid. *J. Nutr.* **130**, 983S–987S (2000)
- Garber A. J., Karl I. E., Kipnis D. M. Alanine and glutamine synthesis and release from skeletal muscle. *J. Biol. Chem.* **251**, 826–835 (1976)
- Abe K., Yamashita S., Kitazaki K., Katakura Y. Homogenization in water improves the recovery rate of imidazole dipeptides in meat. *Food Sci. Tech. Res.* **27**, 335–339 (2021)
- Green N. M., Tsou K.-C., Bressler R., Seligman M. A., The colorimetric determination of leucine aminopeptidase activity with l-leucyl- β -naphthylamide hydrochloride. *Arch. Biochem. Biophys.* **57**, 458–474 (1955)
- Jung Y. D., Lee D., Lee H. J., Kim H.-J., Jung H. D., Jang A., Jo C. Comparison of chicken breast quality characteristics and metabolites due to different rearing environments and refrigerated storage. *Poultry Sci.* **101**, 101953 (2022)
- Lee D., Lee J. H., Jung H.-J., Jang A., Jo C. Effect of an animal-friendly raising environment on the quality, storage stability, and metabolic profiles of chicken thigh meat. *Food Res. Int.* **155**, 111046 (2022)
- Davidek J., Khan A. W. Estimation of inosinic acid in chicken muscle and its formation and degradation during post-mortem aging. *J. Food Sci.* **32**, 155–157 (1967).
- Barratt E., Buttery P. J., Boorman K. N. Urate synthesis in the perfused chick liver. *Biochem. J.*

- 144, 189–198 (1974).
- 19) Hu Y., Cui P., Han S., Xiong X., Huang Q., Song X., He G., Ren P. Gut microbial signatures of broiler lines divergently selected for inosine monophosphate and intramuscular fat content. *Animals*. **15**, 2337 (2025).
 - 20) Cordeiro A. R. R. A., Lima K. M. G., Cruz B. C. G., Rocha A. L., Lemos A. S. S., Pires R. S. Biochemical characterization of type II collagen extracted from chicken keel cartilage. *Mar. Drugs* **21**, 260 (2023)
 - 21) Choi H.-G., Jeong J.-Y., Choi Y.-S., Kim H.-W., Kim Y.-B., Paik H.-D., Kim C.-J. Effects of mixed bone and brisket meat on physicochemical characteristics of shank bone and rib extracts from Hanwoo. *Korean J. Food Sci. Anim. Resour.* **36**, 603–609 (2016)
 - 22) Yang J., Hu Y., Wang Y., Chen Y., Zhao Y., Zhang J. Osteoarthritis-alleviating effects in papain-induced model rats of chicken cartilage hydrolysate and its peptide fractions. *Int. J. Food Sci. Technol.* **54**, 524–535 (2019)
 - 23) Takahashi, K. Tenderization mechanism of meat postmortem aging. *Food Sci. Technol. Res.* **5**, 1–10 (1999)
 - 24) Camici M., Corless M., et al. Interplay between adenylate-metabolizing enzymes and AMP-activated protein kinase in skeletal and cardiac muscle. *FEBS J.* **285**, 2707–2724 (2018)
 - 25) Lane A. N., Fan T. W. M. Regulation of mammalian nucleotide metabolism and biosynthesis. *Nucleic Acids Res.* **43**, 2466–2485 (2015)
 - 26) Azzam M. A., Wang C. AMP deaminase: biochemistry, physiology, regulation, and roles in disease. *Int. J. Mol. Sci.* **21**, 3503 (2020)
 - 27) Dzeja, P. P., Terzic, A. Adenylate kinase and AMP signaling networks: metabolic monitoring, signal communication and body energy sensing. *Int. J. Mol. Sci.*, **10**, 1729-1772 (2009)
 - 28) Bianchi, V., Spychala, J. Mammalian 5'-nucleotidases. *J. Biol. Chem.*, **278**, 46195–46198 (2003)

Comparative analysis of umami formation mechanisms during postmortem aging among edible chicken tissues including skeletal muscle, viscera, and cartilage

Ai EGUSA¹ · Yui SASANO¹ · Miki TSUIHIJI¹ · Masumi ISHIDA² · Taiji TOMEMURA²

¹Department of Food Science, Nippon Veterinary and Life Science University, 180-0023

²Department of Research and Development, Eternal Hospitality group. Co., 541-0047

Abstract

Postmortem aging promotes umami formation, yet its mechanisms differ markedly among chicken edible tissues. We compared glutamate (Glu), inosine monophosphate (IMP), enzyme activities, and umami intensity in eight tissues during chilled aging. Skeletal muscles showed clear Glu accumulation and moderate IMP degradation, whereas internal organs exhibited minimal changes in both metabolites. Cartilage displayed little metabolic response due to limited substrate levels. Δ analyses revealed distinct tissue-dependent patterns of Glu increase and IMP behavior. Spearman's rank correlation showed only weak, non-significant associations between Glu change and aminopeptidase activity ($\rho = -0.54$) and between IMP change and 5'-nucleotidase activity ($\rho = -0.40$), indicating that enzyme-metabolite relationships varied substantially across tissues. These findings demonstrate that umami formation during postmortem aging is driven by divergent tissue-specific responses, reflecting enzyme-dependent amino acid release in muscles, minimal IMP turnover in organs, and substrate-limited metabolism in cartilage.

Japanese Journal of Meat Science and Technology 66(2), 113-123, 2025

Key Words: Chicken meat, Postmortem aging, Umami, Inter-tissue comparison