

筋肉色素タンパク質と畜肉の色調特性

= 色調の管理・解釈の自動化の試み =

岡山大学農学部
泉本勝利

はじめに 食肉は筋肉を素材とする固形物であり、色調は筋肉色素であるヘムタンパク質の含量と誘導形態あるいは素地の状態の相違によって多種多様に変化し、そして色調は人の感覚量であるために、食肉の色調の多様性は繁雑になる。食肉色調の測定・管理を合理的に実施するためには、ヘムタンパク質と素地の光学的性質とこれに関与する生化学的機構を把握し、色調現象を感覚量として定量的、系統的に明らかにする必要がある。

I 筋肉色素と畜肉色調

畜肉の色調に反映する主要因は筋肉中にある色素タンパク質のミオグロビンである。このミオグロビンとその誘導形態は畜肉の色調と深く関連している。食肉は新鮮時にはあざやかな赤色であるが、経時的にその鮮度の低下につれて褐色に変化する。その色調と色調変化は品質の目安となり、消費者の選択性と深く関連する。食肉の表面状態とくに色調は品質を決定する重要な項目である。色調が褐色であれば、例え新鮮であっても、鮮度がよくないとされ、また濃すぎる色調は老齢家畜の肉とみなされるであろう。

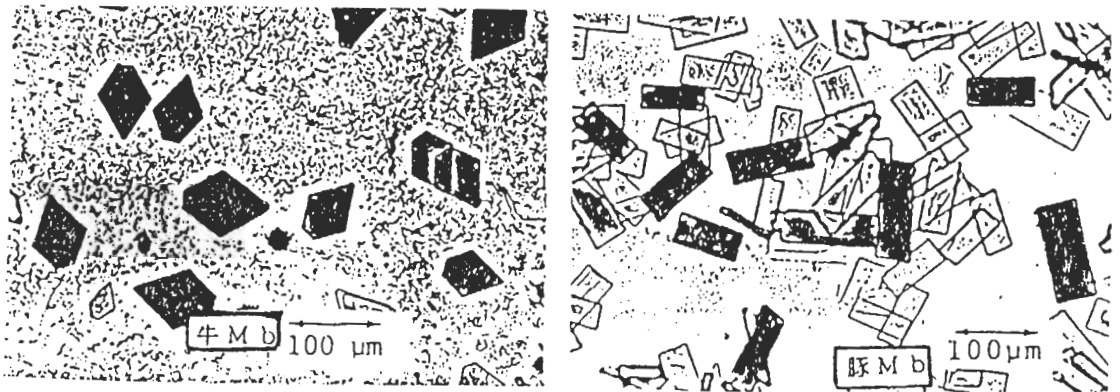


図1 Mbの結晶形

筋肉中のHbの大部分は枝肉処理工程の放血によって失われ、Mbがヘムタンパク質の75-95%になる。生体の筋肉中ではMbは全鉄のわずか10%であるが、食肉中では95%以上の鉄がMbで占められる。Mb含量は家畜の年齢、畜種や筋肉部位で異なる。そこで、食肉の色調はMbが主要因となる。

透過率スペクトルと反射率スペクトル

Mbの透過率スペクトルを図3に示す。Mbの誘導形態はそれぞれ特有な吸収

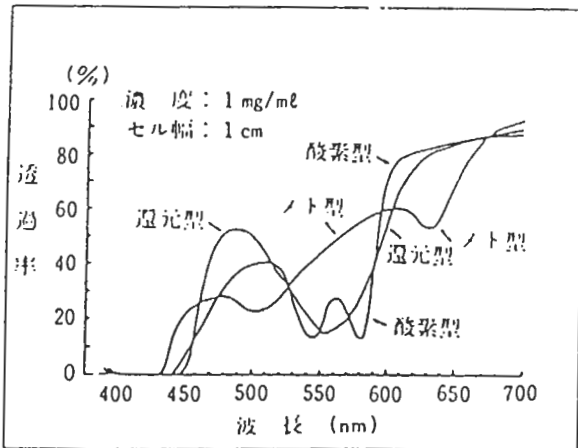


図3 Mbの透過率スペクトル

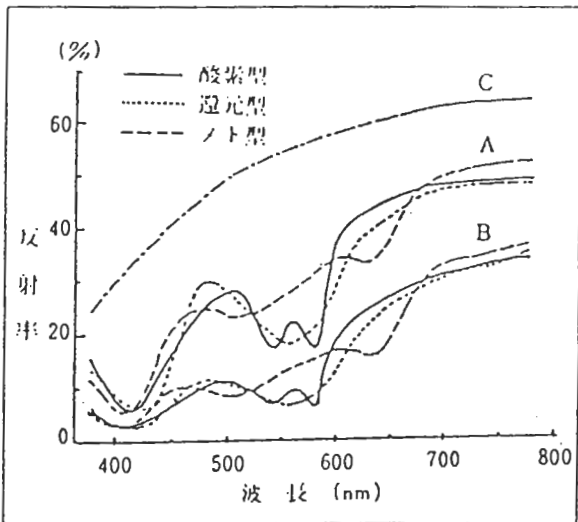


図4 食肉の反射率スペクトル

スペクトルを示すので、筋肉中のヘムタンパク質の含量とその誘導形態の混在割合によって、多様な色調を呈することになる。また、血液を希釈すると赤色から黄色に変化するよう、ヘムタンパク質含量によって明度だけでなく色度も変化する。したがって、色調とその含量の対応関係を明らかにしないで、分析化学的側面のみで肉色調を論じるのは不十分である。

生肉のMbには酸素型 (O_2Mb)、還元型 (RMb)、メト型 (MMb) の3種の誘導形態が混在し、それぞれの典型的な色調は鮮紅色、赤色、褐色である。これら、生肉の反射率スペクトルを図4に示す。AとBは生肉の色の明るさ(濃さ)の違いの比較であり、Cは漂白肉の反射率スペクトルを示している。AはBよりも明るい色調すなわち反射率が高い、生肉である。この違いは畜種や筋肉部位の違いでみられる。漂白肉は筋肉中の色素を除いたと仮定される素地にほぼ相当し、この素地よりも明るい生肉は実在しない。実在の生肉は素地の筋肉組織に色素Mbが溶けているモデルと考えられる。

反射率スペクトルは図3に示す透過率スペクトルと類似し、Mbの光吸収の反映であることが分かる。実際の生肉では、Mbの3種の誘導形態が混在するので反射率スペクトルは混合されて複雑になる。混合された反射率スペクトルには各Mb誘導形態の光学的吸収の特徴が認められる。540nmと580nmに2つの谷が現れるとO₂Mb、560nmに1つの谷と480nmにピークが現れるとRMb、630nmに谷が現れるとMMbの各誘導形態が混在していることになる。

ソーセージやハムの加工肉で一酸化窒素型(NOMb)に発色処理を行った加熱塩漬肉の典型的な色調はピンク色である。

屠殺後のMb誘導形態の変化

屠殺後のMb誘導形態の経時的变化は、以下のように、RMbからO₂Mbに、そして最終的にMMbになる。ヘムタンパク質であるMbとHbの構成成分ならびにその誘導形態のヘム鉄の電価および結合物質は図5に示すとおりである。

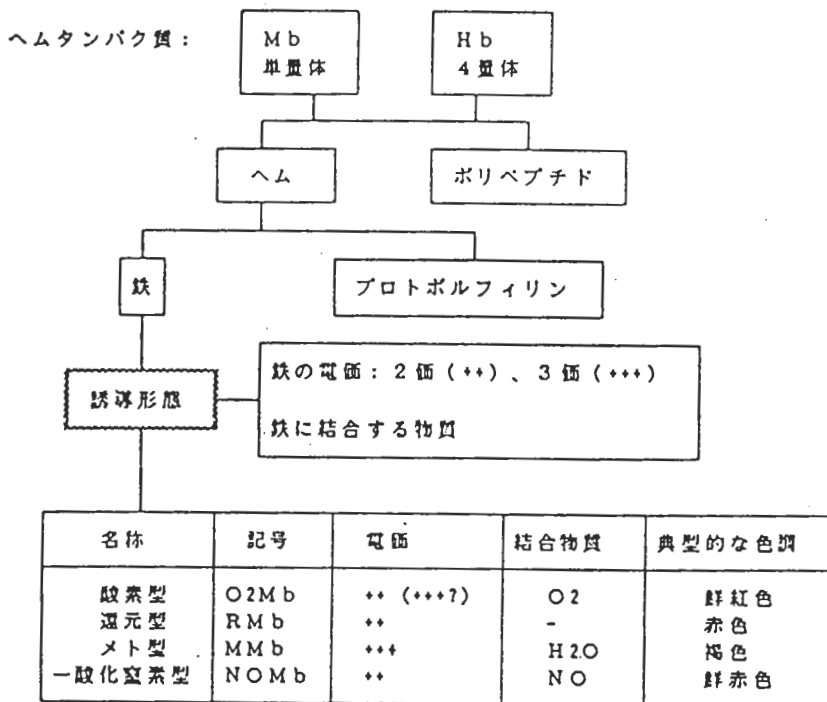


図5 ヘムタンパク質Mb, Hbの構成成分と誘導形態

RMb

生体時には毛細血管から酸素を受け取り、O₂Mbとして酸素を貯蔵している。O₂Mbは環境に酸素が少なくなると結合している酸素を放つ性質があり、しだ

いに O_2Mb は RMb になってくる。それで、屠殺放冷後の筋肉内部の Mb は RMb である。 RMb のヘム鉄は2価で、これに何も結合していない。

O_2Mb

RMb は非酵素的に酸素と結合する能力を保持している。それで、枝肉分割や調理の際に、肉を切断したり挽肉にすると組織に空気が拡散して、表層部において RMb は再び酸素が結合するので、しだいに O_2Mb になり、濃い赤色からあざやかな赤色になる。この現象は酸素化 (Oxygenation) あるいはブルーミング (blooming) といわれる。食肉の良好な色調は表層部の Mb の誘導形態のうち O_2Mb の割合が高いことと、酸素化された層が十分にあることで達成されることになる。 O_2Mb のヘム鉄には酸素分子が結合している。 O_2Mb のヘム鉄の電価は以前から2価であるとされているが、最近では3価 [$O_2(-)Mb(+++)$] であるという報告があり議論されている。

MMb

ブルーミングにより O_2Mb が形成された後、自動酸化 (Autoxidation) により MMb を形成し、肉色はしだいに褐色になる。すなわち、この褐色化は長時間の経過と符号するので、経験的にも古い肉と判定され、忌避されるので、 RMb の色調よりも好まれない。 MMb の形成が40%以上になると色調の劣化が明らかに認められるようになる。 MMb のヘム鉄は3価で、これに水が結合している。

II 牛肉の色調特性

表色

色調を記号や数値によって表現する方法を表色という。表色は色調の伝達や記録に優れた方法である。食肉色調の知覚の過程とその変化の要因について、要約して図6に示す。色調が知覚される過程は、(1)光源から光が物体に照射され、(2)物体固有の反射率スペクトルあるいは透過率スペクトルに規定された反射光あるいは透過光が、(3)最終的に目を通して知覚される3段階に大別される。

このように、色調は人の感覚であると同時に物理量でもあり、これらを総合的に体系化し、科学的に取り扱われるようになったのは比較的新しい。この理論は私達の日常生活に欠かせないカラーテレビにも応用されている。

<心理量>

<心理物理量>

<物理量>

<化学量>

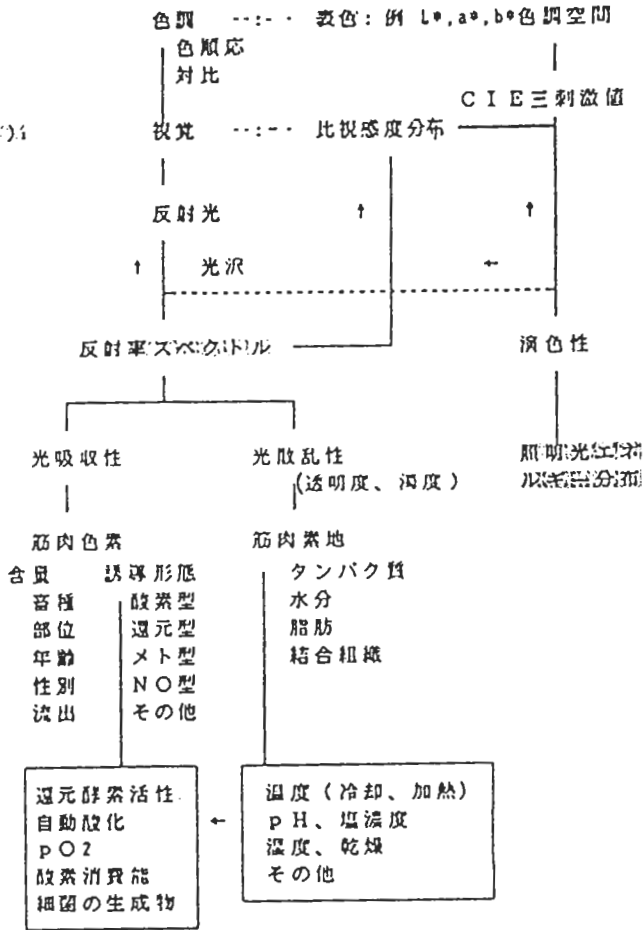


図6 食肉色調の知覚の過程とその変化の要因

<心理量>

色調は主観的な経験であり、観察者の知覚なしにはあり得ない。色調は明度と色度に分けられ、さらに色度は色相と彩度に分けられ、これら明度、色相、彩度の三属性を総合した心理的概念である。目視的検査（主観的判定・評価）は特別な装置を要しないが、恒常性に乏しいことや熟練を要することに難がある。色調の感じ方は色順応と対比によって、常に同じではない。

<心理物理量と表色>

反射率スペクトルのパターンから色調を想定することは難しいが、人の色調感覚とよくマッチする色立体に対応するようにに数値化して表現される。これを表色という。現在、最も一般的な表色系はL*, a*, b*色調空間であり、反射率スペクトルから数値変換して得られ、この過程に心理物理量が用いられる。L*値は明度であり、a*-b*平面は色度平面である。

<物理量>

食肉に色調は一般に反射光の色調を指す。可視光は380nm-780nmの限られた波長範囲である。色調は、この波長範囲における光源のエネルギー分布と食肉の光学的性質である反射率スペクトルが合成された、反射光スペクトルのパターンの違いで異なる。同じ物体でも光源のエネルギー分布で異なる色調に観察されることを演色性という。演色性は陳列照明などにおいて注意がはらわれている。食肉の鮮紅色化や褐色化の変色・退色などを直接的にもたらすのは、食肉の光学的性質である反射率スペクトルである。すなわち、食肉の色調現象は反射率スペクトルのパターンの問題である。

<化学量>

食肉の光学的性質について、ここで光吸収性と光散乱性に大別することにする。それは、(1) 筋肉の化学成分への影響は光吸収と光散乱のどちらかあるいは両方の変化と深く関連している。そして、(2) 光吸収性と光散乱性は反射率スペクトルの変化を説明する要因として十分であるからである。

筋肉色素成分は光吸収性とそして筋肉素地成分は光散乱性と強い関係がある。これら化学成分にたいして先の図6に示したようにpH、温度(冷却、加熱)、湿度、乾燥、還元酵素活性、自動酸化、酸素分圧(pO_2)、細菌の生成物などの要因が影響する。

食肉の色調特性

色調特性はヘムタンパク質含量を変数として、誘導形態、熱処理による白濁化、光源の種類によって異なる定数である生肉と加工肉で共通する関数で示された。色調特性は(1) 明度の変化とともに色度が誘導形態特有の放物線の軌跡を示し、(2) 色調の変動量はヘムタンパク質含量が増加するほど急激に減少する特徴が認められた。その結果、色調特性の全多様性に対して実在の食肉の多様性は大半を占めた。(3) ヘムタンパク質含量と誘導形態の変化のもたらす色調変化の優勢な属性は前者で明度差、後者で色度差であった。ヘマチン含量150ppm付近で色度差は最大となり、誘導形態変化が識別しやすく典型的な色調となる。(4) 生肉と比べて、加熱処理した加工肉は明度が1.3倍となり、かつ色度特性が大きく異なることなどが明らかになった。また、演色性によって彩度が著しく変化し、光源の種類を特定しないと色調を誤って判断する可能性の高いことが示唆された。

食肉の色調特性の位置関係をまとめて示すと図7のようになる。任意のMb含量と誘導形態における食肉の色調の領域は木の葉の形をした限定された平面である。素地と色素そのものの色調が葉の両端にあり、食肉の色素含量の変化により端から端に至る軌跡は誘導形態によって異なり、O₂Mb、RMb、MMbの順にあざやかな軌跡を通る。この軌跡は素地の光学的性質による偏差があり、加工肉のように熱処理されるものは大きく色調が異なる。また、光源の種類はあざやかさに影響する。

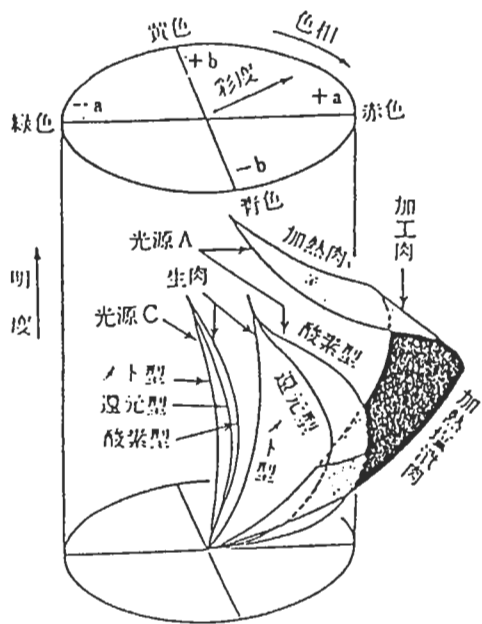


図7 肉色調の空間配置の模式図

図8は牛肉の色度特性である。O₂Mbのとき牛肉ではロース芯が最もあざやかであり、このときがRMbやMMbへの変化による変色が大きいのは注目すべき現象である。

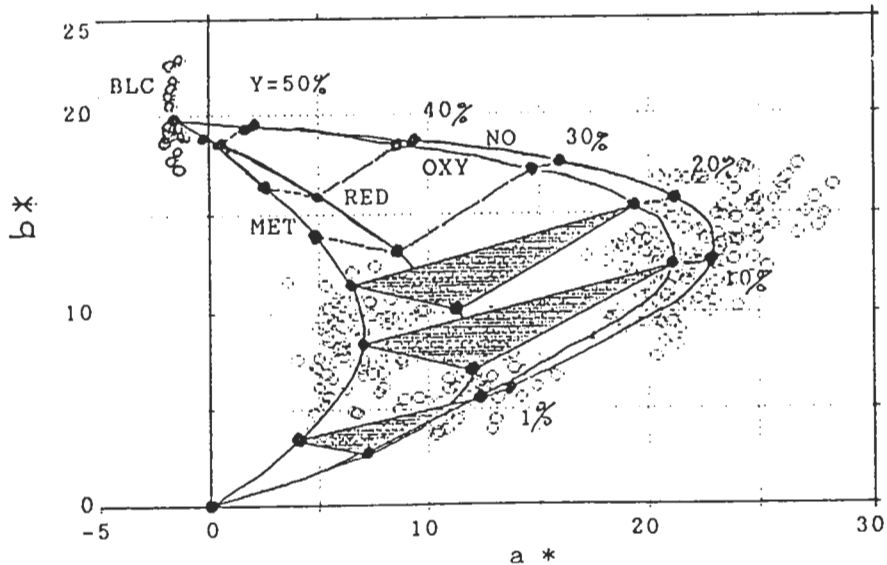


図8 牛肉の色調特性