

《解 説》

食品の品質と美味しさの科学的管理

根岸晴夫

中部大学応用生物学部

はじめに

優良な食品工場では、生産の3率管理（「能率」，「効率」，「収率」），および作業の3S管理（Simple（単純化），Specialize（専門化），Standardize（標準化））が徹底している．3率や3Sは標準作業手順書（SOP：Standard Operation Procedure）によって確実に実行され，先端企業では安全で高品質な食品生産の自動化が進んでいる．

高品質な製品の生産管理の仕組みを作るためには，美味しさや品質を客観的，科学的に管理するための技術が要求される．製品の美味しさと品質は，コスト管理と並び食品メーカーの最大の課題であることから，多くの管理技術が検討されている．図1に示すように，食品の美味しさの要素には，外観，味，香り，テクスチャーがある．品質面に関しては，食品衛生法などの法的規制のほか，最近ではトレーサビリティが普及し，原料から最終商品までの履歴管理のシステムが発展している．これらの特性を科学的に管理することを目標として，味覚センサなどの各種センサや微生物検査，理化学分析などの手法が開発されている．

ここでは食品の美味しさや品質の科学的管理法

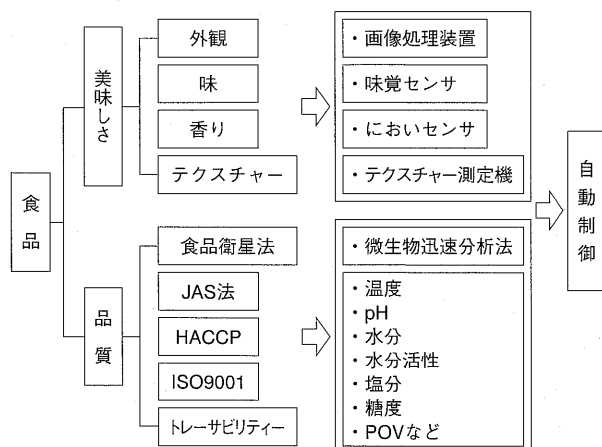


図1. 食品の美味しさと品質の管理

として，食肉の事例，および香気成分による管理の可能性について述べる．

食肉の美味しさの管理方法

1 肉の死後変化と食味性の変化

家畜の死後の筋肉は図2に示す過程を経て食肉へと変換される．と畜直後の肉はミオシンとアクチン間の結合がトロポニン-トロポミオシン系により抑制されているために，筋肉は弛緩状態にあり，軟らかく弾力性に富む．しかし，その後の時間経過に伴い筋細胞内は嫌気的狀態となってATPが減少し，解糖作用によりグリコーゲンから乳酸が生成し，pHが低下する．pH低下と共に筋小胞体が Ca^{2+} を内部に取り込むポンプ機能を失い，筋細胞内の Ca^{2+} 濃度が増してくる．漏出した Ca^{2+} はトロポニンCに結合する．その結果，アクチンはミオシンに結合し不可逆的な硬直アクトミオシンを生じ，収縮が起こり死後硬直に至る．pHはと畜直後は7付近にあるが，最大硬直期には5.5付近にまで低下する．死後硬直期の筋肉は肉質が硬く，保水性が悪い．食味は多汁性に欠け，風味も乏しいため食用として適さない．その後放置すると硬直が解け（解硬），筋肉は軟らかくなり，多

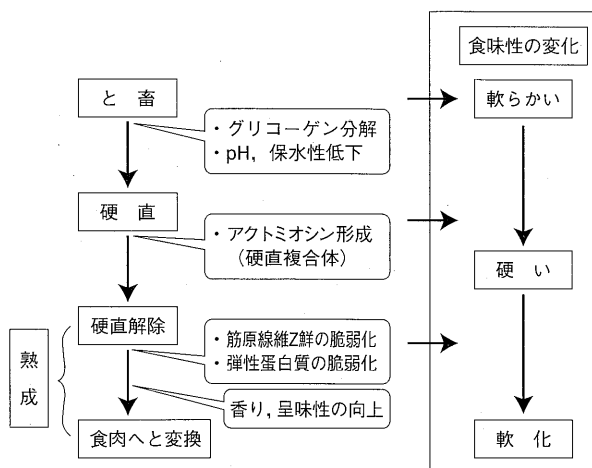


図2. 肉の死後変化と食味性の変化との関係

キーワード：筋原線維小片化，30kDa成分，ATP関連化合物，香気物質

受理日：2006年3月2日受理

汁性や風味が増し、食肉へと変換する(沖谷, 1994). この過程が熟成である. 解硬に要する時間は5℃貯蔵の場合, 牛肉で8~10日, 豚肉で4~6日, 鶏肉では0.5日~1.0日を要する(高橋, 1989).

2 牛肉の美味しさをはかる

牛肉は解硬に要する時間が長いため, 鶏・豚肉に比べて熟成処置はたいへん重要である. 熟成不足の場合には, 肉質は硬く, 風味も乏しく, 食味性が悪い. この状況を避けるためには, 適確に牛肉の熟成状態(以下, 熟度と呼ぶ)を判定する管

表1 肉の死後変化

- 1) 筋原線維のZ線脆弱化(高橋, 1983)
- 2) サルコメア(筋節)の長さの伸長(Yamanoue & Takahashi, 1988)
- 3) アクチン-ミオシン間結合の脆弱化(高橋, 1988)
- 4) 硬さ(せん断力価)の低下
- 5) ATPase活性の変化(Ouali et al., 1983)
- 6) トロポニンTの減少と消失(Olson et al., 1977)
- 7) 30kDa成分の出現(Olson et al., 1977)
- 8) コネクチンの網状構造の脆弱化(高橋, 1983, 1988)
- 9) 不溶性の α -コネクチンが可溶性の β -コネクチンに変換(Seki & Watanabe, 1984)
- 10) ネブリンの減少と消失(Tatsumi & Takahashi, 1992)
- 11) ATP関連化合物の分解(沼田ら, 1981)

理が要求される. 仮に熟度が不十分と判定された場合には, 追加熟成の処置を講ずる必要がある. 表1に, これまでに明らかにされていると畜後の筋肉の主要な変化を示した. こうした生化学的, 組織学的諸変化の中から, 筋肉の死後の経過時間と適切な食味時期の予測可能な指標が熟度判定の候補となる. 以下に, これらの中から簡便で, 確実性の高い熟度判定法について紹介する.

2.1 筋原線維の脆弱化をはかる

骨格筋を構成する筋細胞は筋原線維が多数つまっている. 筋原線維はサルコメアを構成単位とし, Z線で連結されている(図3). 死後の筋肉の解硬に伴う軟化は, 主にこのZ線が脆弱化して起こる(Takahashi, 1967). このため熟成が進行した筋肉のZ線は外部からの機械的衝撃で非常に切断されやすくなり, 筋原線維は小片化する. 図3に示したように, 生の筋肉をブレンダーでホモジナイズすると, Z線部分で切断された小片化筋原線維を観察することができる.

と殺後3日の牛ロース肉をポリ塩化ビニリデン(PVDC)フィルムで真空包装後0℃で31日間貯蔵し, 貯蔵中の筋原線維の形態を観察した(図4). 筋原線維は貯蔵日数の進行に伴い, 小さな断片に分かれ, サルコメアが4個以下の細かな筋原線維が数多く見られるようになり, さらに死後31日目(と畜後35日)になると, 小片化した筋原線維の割合が著しく増した. 全筋原線維数に占める1~4個のサルコメアからなる筋原線維数をカウント

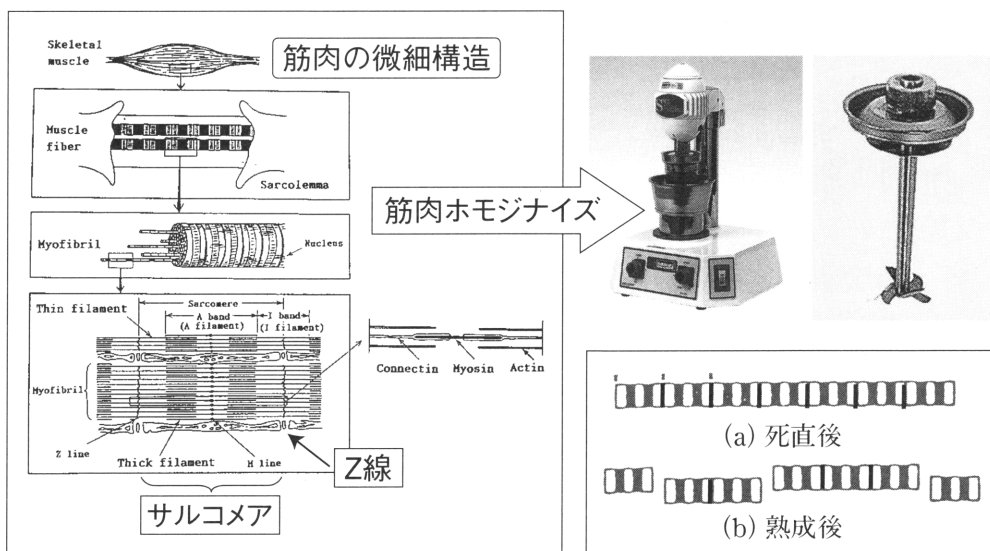


図3. 筋肉の微細構造とホモジナイズ

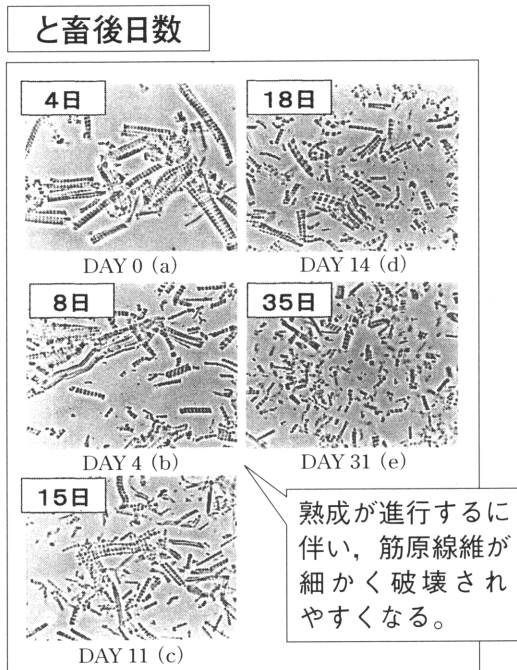


図4. 牛肉熟成中の筋原線維の小片化の進行 (×1,000)

し、そのパーセントを求めることによって数値化できる。これを筋原線維の小変化率(MFI)と呼び、熟度指標として応用可能である(根岸ら, 1991, 1992, 1993, 1996)。

2.2 筋原線維タンパク質の分解をはかる

前述2.1と同じ貯蔵中の牛肉から調製した筋原線維をSDS-ポリアクリルアミドゲル電気泳動(SDS-PAGE)で分析すると、図5に示す泳動バンドが得られる。貯蔵4日目(と畜後8日)に分子量マーカー29kDa付近に新しいバンドが出現し、分子量は30kDa成分と推定された。牛肉貯蔵中、アクチン含量は変化せず一定である(Takahashi et al., 1967)ので、30kDa成分はアクチン濃度に対する割合から定量可能である。本成分は熟成中、

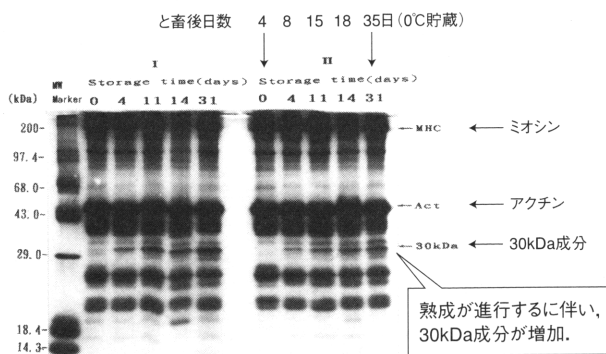


図5. 牛肉熟成中の筋原線維のSDS-PAGEパターンの変化

ほぼ直線的に増加し、肉質の硬さの低下との相関性も高いことから、熟度指標として非常に有効であった(根岸ら, 1991, 1992, 1993, 1996)。最近の二次元電気泳動によるプロテオーム解析から、新たな熟度指標の解明も進んでいる。

2.3 ATP関連化合物の変化をはかる

鶏肉は死後変化のスピードが豚・牛肉よりも速く、腐敗しやすいことから、チルド輸送が徹底し低温管理に注意が払われている。牛肉の熟度管理に対して、鶏肉は鮮度管理が美味しさと品質の管理につながる。一般に、食鳥処理工場における生鳥処理から店頭に至る24時間までの鶏肉処理の流れは次のようになる。

懸鳥(0min)→と畜→放血→湯浸け→脱羽→中抜き(18min)→チラー水によると体冷却(48min)→正肉解体(1~2hr)→包装→出荷(3~4hr)→店頭陳列(24hr)。(カッコ内はと畜後の経過時間)

この工程間における鶏肉のATP関連化合物の変化は図6のようなになる。ATPは死後急速に減少し、と畜後3~4時間目の出荷時にはほぼ完全に消失した。ADPとAMPは低含量のまま推移し、徐々に減少した。IMP(イノシン酸)含量はATP含量の減少と対照的に増加し、チラー冷却工程で最大に達し、その含量は翌日の死後24時間後までほとんど変化しなかった。HxR(イノシン)は死後3~4時間の出荷時以降から徐々に増加した。これらに対し、Hx(ヒポキサンチン)含量は処理工程中ほとんど変化がみられなかった。

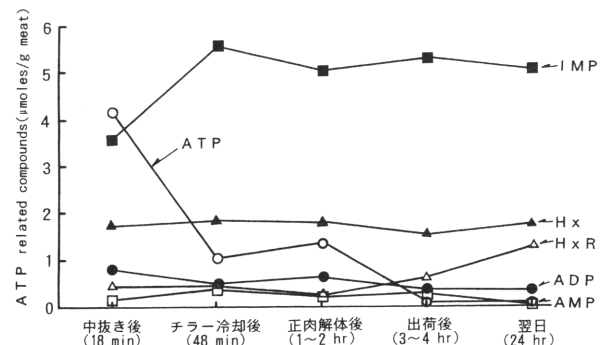


図6. 鶏肉処理工程中のATP関連化合物の変化

ATP関連化合物の変化から次式でK値を求めると、K値はと畜後の経過時間と共に直線的な増加を示した。

$$K \text{ 値} (\%) = (HxR + Hx) \times 100 / (ATP + ADP + AMP + IMP + HxR + Hx)$$

鶏肉をPVDCフィルムで真空包装し、0、5、10、15℃に4日間貯蔵してK値の変化を分析した。図7に示すように、貯蔵日数の進行に伴いほぼ直線的に増加し、その変化は貯蔵温度依存的であった。

このように、鶏肉ではATP関連化合物の変化から求めたK値が鮮度判定指標として有効である(根岸・吉川, 1994, 1994)。

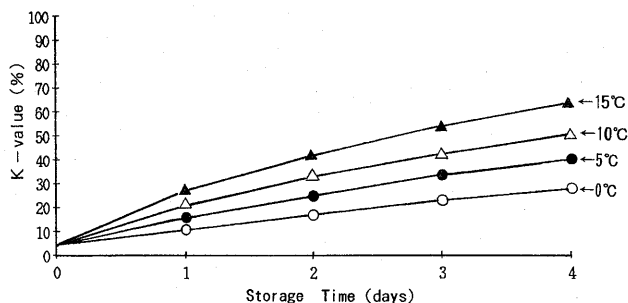


図7. 鶏むね肉の0、5、10、および15℃貯蔵中のK値の変化

香気物質による食品の品質管理

食品の「美味しさ」は「味」と「テクスチャー」で論じられることが多く、「香り」の面から論じた研究は少ない。その理由として、食品香気をガスクロマトグラフィーで分析すると多成分が検出されるが、美味しさに寄与する香気成分の特定が極めて困難である等が挙げられる。しかしながら、食品の美味しさ・品質を論じる上で、香りは大変重要な要素であり無視できない。ここでは香気物質による食品の品質管理の可能性について検討を進めているので、その一部を紹介する。

1 ヨーグルトの食味性と香気物質との関係

1. 1 ヨーグルトミックス発酵中のpHとゲル強度の変化

牛乳、脱脂粉乳を主原料とするヨーグルトミックスに市販ヨーグルト(明治ブルガリアヨーグルトLB81)を接種して43℃で培養すると、ヨーグルトミックスのpHは徐々に低下する。約3時間でpH4.6付近に達し、ゲル強度が上昇し始める(図8)。

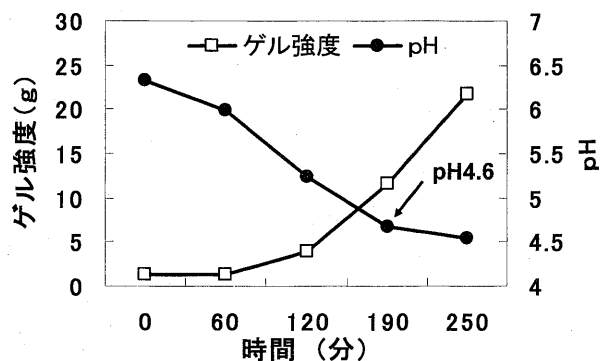


図8. ヨーグルトミックス発酵中のpHとゲル強度の変化

発酵中のpH低下は、*Lactobacillus bulgaricus*, *Streptococcus thermophilus*の作用によって乳糖から生成した乳酸などの有機酸による。pH4.6でカゼインミセルのゲルネットワークの中にホエータンパク質が取り込まれ、ホエー分離が少ないカードが形成される。その後カードに振動を与えないように培養室から急冷室に移し、発酵を停止させる。一夜冷蔵すると、ヨーグルトらしい組織と香味が得られる。

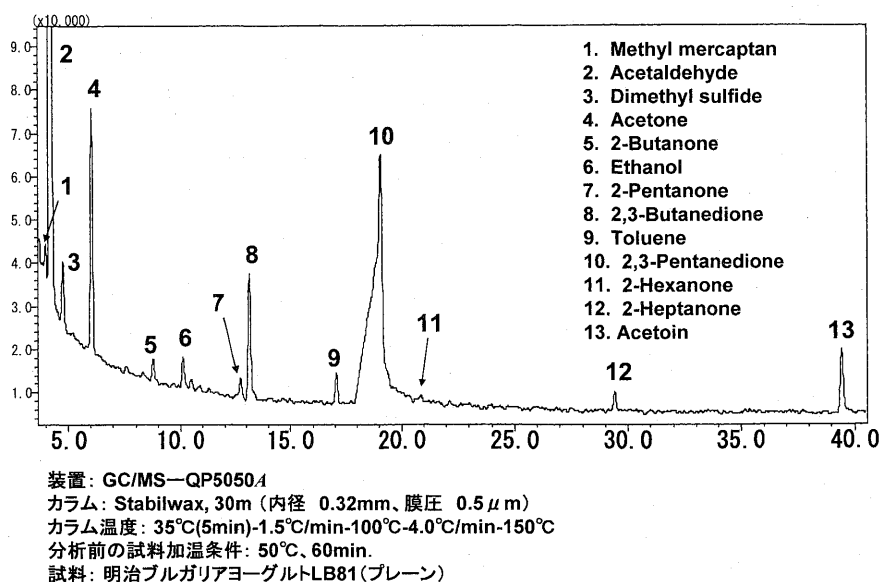


図9. ヘッドスペースガス-GC/MS分析によるヨーグルト香気物質のクロマトグラム

1. 2 ヘッドスペースガス法によるヨーグルトの香気物質の測定

前述 1.1 で試作したヨーグルトの香気成分をヘッドスペースガス-GC/MSで分析すると、図9のクロマトグラムが得られる。検出ピークの成分は溶出順に、①Methylmercaptan、②Acetaldehyde、③Dimethyl sulfide、④Acetone、⑤2-Butanone、⑥Ethanol、⑦2-Pentanone、⑧2,3-Butanedione、⑨Toluene、⑩2,3-Pentanedione、⑪2-Hexanone、⑫2-Heptanone、⑬Acetoin であることが確認されている。このうちヨーグルトの典型的香気成分は、②Acetaldehyde、⑧2,3-Butanedione、および⑬Acetoinである。

1. 3 ガスセンサによる香気物質計測

(1) 香気成分分析計の試験装置

本装置は、エフアイエス株式会社が口臭チェッカー用センサの技術をベースに開発した試験装置である。装置は図10に示したように計測部とデータ取り込みPC部から構成される。検出部の半導体ガスセンサは、酸化錫などの金属酸化物半導体の電気抵抗がガスの存在下で変化することを利用したものである。半導体表面とガスの吸脱着反応による半導体の電気伝導度の変化を高感度に検知し、ppbオーダーのガス濃度の検出が期待できる。また本装置のキャリアガスはHeやN₂ガスなどの特殊ガスを必要とせず、空気をキャリアガスとする点も使用上の利点である。装置のサイズは400×300×140mm、重量は5kgと小型、軽量でポータブルである。1回あたりの分析時間は8分間である(矢野ら、2003)。

標準混合ガスの分析試験(図11)から、アルコール類としてMethanol, Ethanol, ケトン類としてAcetone, カルボニル化合物としてAcetaldehydeの一斉検出が可能であった。単一ガスでは、Hydrogen sulfide, Methylmercaptanについても検出が確認された。

(2) ヨーグルト発酵中の香気成分の変化

前述 1.1 で作製したヨーグルトの香気物質を本ガスセンサ装置で測定すると、図12のクロマトグラムが得られた。最初のピークがAcetaldehyde、もう一つのピークがAcetoneである。図9のGC/MSクロマトグラムと比較すると検出ピークは少ないが、主要ピークのAcetaldehyde, Acetoneは検出

可能であった。本装置では、乳製品や発酵食品に特徴的な2,3-Butanedione, Acetoinなどは検出されなかった。

本装置でヨーグルトミックスの発酵過程、および冷蔵保管中の香気物質の挙動を追跡した。図13に示すように、発酵中にAcetaldehyde濃度は増加し、その後5週間冷蔵中もその濃度は大きく減少することはなかった。この間、ヨーグルトらしい

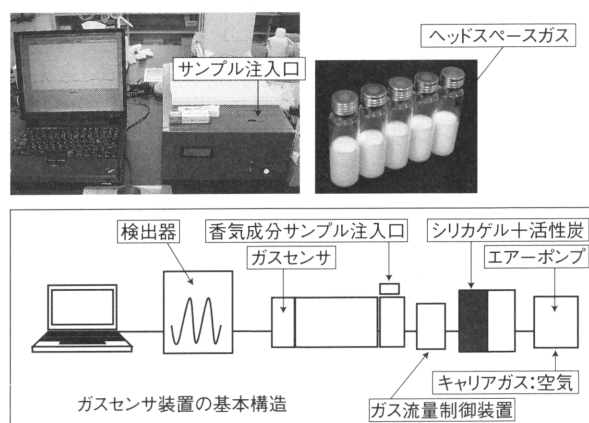
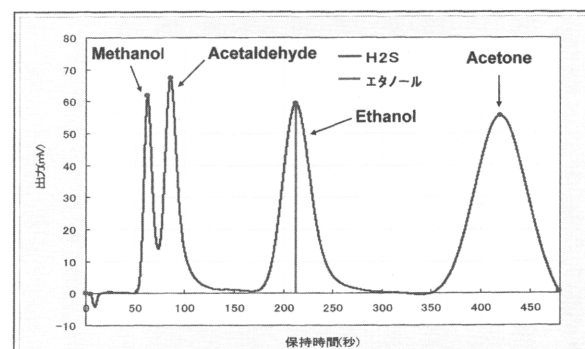


図 10. ガスセンサ装置



Methanol, 50ppm; Acetaldehyde, 5ppm; Etanol, 175ppm; Acetone, 10ppm

図 11. ガスセンサによる標準混合ガスの分析

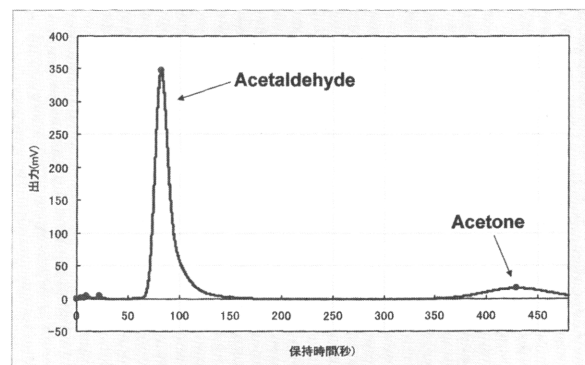


図 12. ガスセンサによるヨーグルト香気物質のクロマトグラム (ヘッドスペースガス分析)

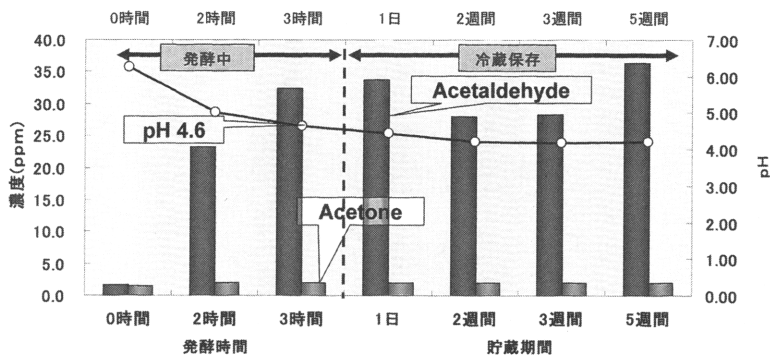


図 13. ヨーグルト発酵、貯蔵中の香気物質の変化

食味性も失われていないことから、Acetaldehyde濃度の変化を追跡することで、品質管理が可能なが示唆された。Acetoneは発酵、貯蔵期間中、ほとんど変化がなかった。本ガスセンサ装置は数種の香気物質の一斉分析が可能であることから、ヨーグルトなどの発酵食品の工程管理や品質管理にはたいへん有効な手段であると考えられる。

2 ガスセンサによる他の食品分析例

数種の市販納豆を本ガスセンサ装置で計測したクロマトグラムを図14に示す。においが弱い「金のおわなっとう」で香気物質が少ない傾向にあった。ヨーグルト同様に、納豆についても、

本装置で品質管理や美味しさの管理に有用な情報が得られるものと期待される。この点については、さらに検討中である。

食品の品質と美味しさの科学的管理は、食品業界の永遠の課題である。本論では、最初に著者らが以前に行った食肉の研究事例を取り上げた。今後は、GC/MSによる食品の香気物質データの解析と合わせて、香気物質による食品の美味しさや品質管理に関して、さらに研究を継続していく予定である。また現場で簡便に計測可能な手段として、ガスセンサ装置についても実用化を目指したいと考えている。

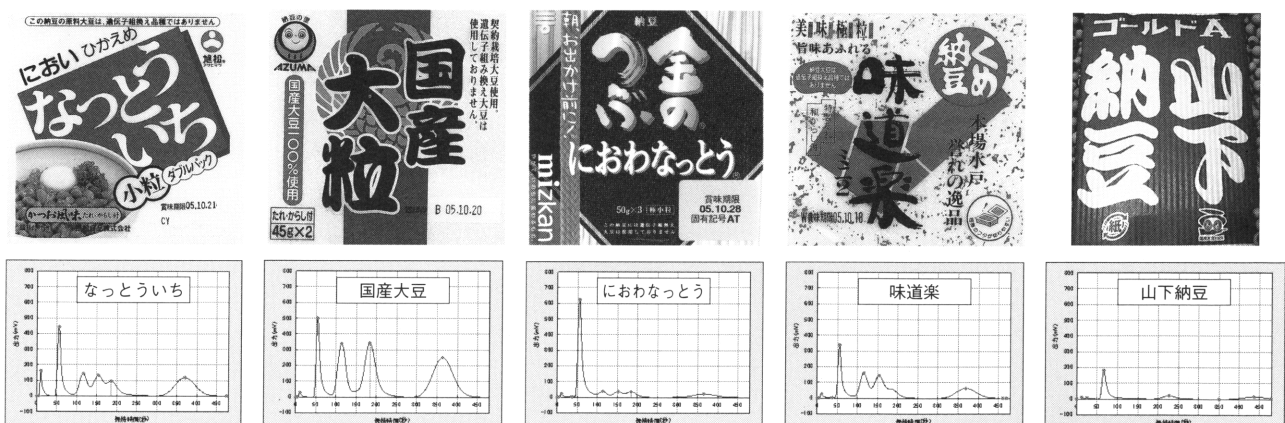


図 14. ガスセンサによる市販納豆の香気物質のクロマトグラム

引用文献

- 沖谷明紘. 1994. 食肉はどのようにしておいしくなるか. 熟成による香味と軟らかさの発現機構. 化学と生物. 32:229-237.
- 高橋興威. 1989. 熟成に伴う食肉の軟化と筋原線維構造の脆弱化. 日酪農学会誌. 38:A285-A289.
- 高橋興威. 1983. 総説 食肉の熟成と物性の変化. 日畜会報. 54:423-436.
- Yamanoue, M. and Takahashi, K. 1988. Effect of paratropomyosin on the increase in sarcomere length of rigor-shortened skeletal muscles. J. Biochem. 103:843-847.
- 高橋興威. 1988. 骨格筋に関する最近の研究. 生物科学. 40:140-147.
- Ouali, A., Obled, A., Cottin, P., Merdaci, N., Ducastaing, A. and Valin, C. 1983. Comparative effects of post-mortem storage and low-calcium-requiring neutral proteinase on bovine and rabbit myofibrillar proteins. J. Sci. Food Agric. 34: 466-476.
- Olson, D.G., Parrish, F.C.Jr. Dayton, W.R. and Goll, D.E. 1977. Relationship of myofibril fragmentation index to measures of beefsteak tenderness. J. Food Sci. 42: 117-124.
- Seki, N. and Watanabe, T. 1984. J. Biochem. 95: 1161-1167.
- Tatsumi, R. and Takahashi, K. 1992. Calcium-induced fragmentation of skeletal muscle nebulin filaments. J. Biochem. 112: 775-779.
- 沼田邦雄, 鈴木善, 薄井耕三. 1981. 鶏筋肉中のATP関連化合物の消長と鮮度. 日本食品工業学会誌. 28:542-547.
- Takahashi, K., Fukazawa, T. and Yasui, T. 1967. Formation of myofibrillar fragments and reversible contraction of sarcomeres in chicken pectoral muscle. J. Food Sci. 32:409-413.
- 根岸晴夫, 夏野めぐみ, 吉川純夫. 1991. 牛肉の熟度指標としての物理化学的性質. 日畜会報. 62:1095-1103.
- 根岸晴夫, 夏野めぐみ, 吉川純夫. 1992. 輸入冷凍牛ロース肉の熟度指標としての剪断力価, ATP関連化合物, 筋原線維小片化率, および30,000ダルトン成分. 日畜会報. 63:1267-1275.
- Negishi, H and S. Yoshikawa. 1993. The effects of beef muscle variety on beef aging indices. Anim. Sci. Technol. 64:1168-1177.
- Negishi, H., E. Yamamoto and T. Kuwata. 1996. The origin of the 30 kDa component appearing during post-mortem ageing of bovine muscle. Meat Sci. 42:289-303.
- 根岸晴夫, 吉川純夫. 1994. 鶏肉工場で屠殺後処理中の鶏胸肉の物理化学的性質の変化. 日畜会報. 65:738-745.
- 根岸晴夫, 吉川純夫. 1994. 鶏肉貯蔵中に出現する30kDa成分とK値との関係. 日畜会報. 65:882-889.
- 矢野幸男, 香田弘史, 花田真理子, 宇田川武昭. 2003. 「半導体センサ検出器を用いた匂いによる食肉のトレーサビリティ」, 第44回日本食肉研究会大会発表要旨(茨城つくば国際会議場).