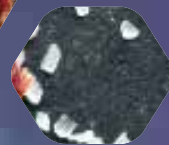


アプリケーション ノート



肉製品の常温保存 を支える技術： 水分活性制御が導く 品質と安全性

肉の保存は、数千年にわたり文明によって受け継がれてきた技術であり、貴重なタンパク源を長期的に確保し、輸送や保管中の腐敗を防ぐために活用されてきました。肉を保存する手段として最も古くから使われてきたのが「乾燥」「塩漬け」「塩水漬け」「燻製」といった「保存処理 キュアリング」であり、その起源は偶然の発見や失敗の中から生まれたとされています。

これらすべての方法の共通点は、「水分活性」の制御を通じて微生物の繁殖を抑え、肉を常温で保存可能な状態にするという点です。

古代の人々は、水分活性という概念そのものを理解していたわけではありません。しかし経験を重ねる中で、保存処理が効果を発揮する本質的な理由を突き止めました。それは、単なる水分量の削減ではなく、「水分活性の制御こそが、肉製品の常温保存を可能にする鍵」だということです。

THEORY OF WATER ACTIVITY なぜ水分活性が重要なのか

水分活性とは、「システム内における水のエネルギー状態」を表す指標であり、その概念は熱力学の基本法則、特にギブズの自由エネルギー式に基づいている。

水分活性は、食品などのマトリックス内における水の表面張力の相互作用、集合効果（コリガティブ効果）、毛管現象といった物理化学的な影響によって決まる相対的な化学ポテンシャルエネルギーである。実際の測定においては、試料と平衡状態にある密閉チャンバー内のヘッドスペースに存在する水蒸気分圧を、同温度下における純水の飽和水蒸気圧で除した値として定義される。

水分活性は「自由水（free water）」と呼ばれることがあるが、この表現は科学的には不正確である。「自由」という語が明確に定義されておらず、文脈によって異なる解釈がなされるためである。

「自由水」という言葉は量的な概念を連想させるが、水分活性はあくまで相対的なエネルギー状態を示す質的な指標である。たとえば、 $A_w = 0.50$ という数値は、「含まれる水分の50%が自由水である」という意味ではなく、「その水が持つ化学的ポテンシャルが、同条件下の純水の50%である」ことを示している。すなわち、 A_w が

低いほど、その水は純水のように振舞わなくなるのである。

常温保存可能な肉製品（Shelf Stable Meats, SSM）においては、試料中の水分（液相）とチャンバー内の水蒸気（気相）を平衡状態に保ち、そのヘッドスペース内の平衡相対湿度（Equilibrium Relative Humidity, ERH）をセンサーにより測定することで、水分活性を求める。

代表的なセンサーには、以下の種類がある：電気抵抗式センサー、冷却ミラーセンサー、静電容量センサー

たとえば、Novasina社の「Labmaster-aw NEO」は、電気抵抗式センサーを採用しており、密閉チャンバー内のERHの変化を電解質の電気抵抗の変化として測定する。この方式は、汚染に対する耐性が高く、精度や再現性に優れており、冷却ミラー方式に見られるような誤差の影響を受けにくい。また、メンテナンスが不要で、キャリブレーションの頻度も少ないことから、安定的な測定が可能である。

水分活性は、システム内の水のエネルギーを表す示強性質であり、一方で水分含量は、製品内の水分量を決定す

る示量性質である。水分含量は一般に加熱乾燥法により測定され、湿潤試料と乾燥試料の質量差から求められる。

両者は湿潤等温線によって関連づけられるが、同一の水分活性であっても製品ごとに水分含量は大きく異なる。すなわち、同じ A_w 値を示す複数の製品が存在しても、それらの水分含量は必ずしも一致しないということである。

常温保存可能な肉製品において、水分含量は製品の「同一性」や「食感」に関する基準として機能するが、微生物学的な安全性を保証するものではない。製品が安全に保存可能か否かを判断する上で、水分活性の制御こそが核心的な技術要素となる。

次節では、複数のSSM製品における水分活性と水分含量の比較を通じて、その違いと相関を図表により示す。

製品	水分含量(% d.b.)	水分活性
ビーフステーキストリップス (牛肉ステーキを細長くカットし、味付け乾燥した肉製品)	37.45	0.8664
オリジナルビーフジャーキー (牛肉を薄くスライスして、味付け乾燥した製品)	40.66	0.8655
ペパロニスティック (ピリ辛サラム風ソーセージを細長く棒状に加工した製品)	25.89	0.8344
スパイシービーフジャーキー (ピリ辛の牛肉ジャーキー)	26.04	0.8309
テリヤキビーフジャーキー (甘辛いテリヤキ味の牛肉ジャーキー)	25.59	0.7899
ベーコンジャーキー (燻製されたベーコンを使ったジャーキー)	18.58	0.7542

表1. 代表的な常温保存肉製品 SSMにおける水分活性

WATER ACTIVITY AND MICROBIAL GROWTH 水分活をと微生物の増殖

微生物は、それぞれの細胞内に理想的な水分活性を持っており、その増殖および繁殖能力は、この水分活性を維持できるかどうかによって依存している。

微生物が自身の内部水分活性よりも低い水分活性の環境にさらされた場合、浸透圧ストレスを受け、水は高い水分活性（＝高エネルギー状態）から低い水分活性の環境へと移動するため、細胞から水分が失われていく。⁽¹⁾この水分の喪失は、膨圧を低下させ、正常な代謝活動を阻害する。微生物が引き続き増殖を続けるためには、自身の内部水分活性を、周囲環境の水分活性よりも低く保たなければならない。これを実現するために、微生物は細胞内に溶質（主に塩や糖など）を濃縮することで内部の水分活性を低下させようとする。

このような水分活性調整能力は微生物ごとに異なり、結果として、それぞれの微生物が増殖可能な「最低水分活性値」を持つこととなる。^(2,3)ここで重要なのは、微生物の増殖は、環境中の水分の「量（＝水分含量や自由水）」ではなく、「水分のエネルギー状態（＝水分活性）」にのみ依存しているという点である。

食品においてよく問題となる腐敗微生物の水分活性下限値を示したリストが表2に掲載する。これをみると、病原性細菌は、 $A_w = 0.87$ 未満では増殖が停止すること、一般的な腐敗酵母およびカビは、 $A_w = 0.70$ 未満で増殖が停止すること（この0.70が実用的な増殖限界とされる）、 $A_w = 0.60$ 未満では、すべての微生物の増殖が停止し、完全な静菌状態となることがわかる。（なお、 $A_w = 0.60 \sim 0.70$ の範囲では、好乾性菌や耐浸透圧性酵母など、特殊な微生物のみが増殖可能）

水分活性に加えて、pHも微生物制御における重要な内因性因子である。常温保存肉製品（SSM）が「低リスク食品」とみなされるためには、以下のいずれかの条件を満たす必要がある：水分活性（ A_w ） < 0.86 、 $pH < 4.2$

このような条件下では、病原性細菌の増殖は不可能となる。さらに、水分活性とpHは相乗的に作用し、単独の制御因子よりも高い値でも微生物制御を可能とする。⁽⁴⁾

$A_w = 0.70 \sim 0.86$ の範囲にあるSSMは、「常温保存可能」とされるが、カビや酵母の増殖は依然として起こり得る。ただし、

これらの非病原性微生物は、食中毒の原因とはならないため、この範囲の製品は「安全でない」とは見なされない。

しかしながら、非病原性の微生物による増殖であっても、消費者にとっての品質劣化（見た目・臭い・味など）を引き起こすため、商品としての寿命は終了したと見なされる。このため、製品の A_w を0.70未満にまで下げるか、保存料の使用や真空包装などの他の制御手段を組み合わせ、カビの発生を抑える必要がある。

微生物	a_w 下限値	微生物	a_w 下限値
ボツリヌス菌 E型 Clostridium botulinum E	0.97	ペニシリウム属菌（リング青かび病菌） Penicillium expansum	0.83
土壌細菌 Pseudomonas fluorescens	0.97	ペニシリウム属菌（黄変米） Penicillium islandicum	0.83
大腸菌 Escherichia coli	0.95	耐塩性酵母 Debaryomyces hansenii	0.83
ウェルシュ菌 Clostridium perfringens	0.95	アスペルギルス属菌 Aspergillus fumigatus	0.82
サルモネラ属菌 Salmonella spp.	0.95	ペニシリウム属菌 Penicillium cyclopium	0.81
ボツリヌス菌 A型, B型 Clostridium botulinum	0.94	酵母 Saccharomyces bayanus	0.80
腸炎ビブリオ Vibrio parahaemolyticus	0.94	ペニシリウム属菌 Penicillium martensii	0.79
セレウス菌 Bacillus cereus	0.93	アスペルギルス属菌 Aspergillus niger	0.77
リゾプス菌（ケモノスカビ） Rhizopus nigricans	0.93	アスペルギルス属菌 Aspergillus ochraceus	0.77
リステリア菌 Listeria monocytogenes	0.92	アスペルギルス属菌 Aspergillus restrictus	0.75
枯草菌 Bacillus subtilis	0.91	アスペルギルス属菌 Aspergillus candidus	0.75
嫌気性 黄色ブドウ球菌 Staphylococcus aureus	0.90	好乾性菌類 Eurotium chevalieri	0.71
出芽酵母 Saccharomyces cerevisiae	0.90	好乾性菌類 Eurotium amstelodami	0.70
カンジダ属真菌 Candida	0.88	耐塩性酵母 Zygosaccharomyces rouxii	0.62
好気性 黄色ブドウ球菌 Staphylococcus aureus	0.86	好乾性菌類 Monascus bisporus	0.61

表2. 一般的な腐敗菌の増殖における水分活性 a_w の下限値

GOVERNMENTAL GUIDANCES AND REGULATIONS 政府の指針および規制

常温保存肉製品（SSM）は微生物学的に安全でないリスクを伴うため、各国の行政機関による規制対象となっている。アメリカでは、SSMの製造・加工・販売に関する安全性の監督と規制は、米国農務省（USDA）に属する食品安全検査局（FSIS）が所管している。

USDAが2011年に発行した「常温保存乾燥食肉製品の保存原則」では、SSMの安全性を確保する上で水分活性の制御

が極めて重要な役割を果たすことが明記されている。また同文書では、従来使用されてきた水分-たんぱく質比について、これは微生物学的な安全性の指標にはならず、あくまで製品の「標準的形態」を示すものに過ぎないと警告している。

FSISは、全てのSSM製造業者に対して、HACCP（危害要因分析・重要管理点）プランの策定を義務付けている。このHACCPプランでは、各製造工程におい

て最もリスクの高い危害要因を特定し、それに対してどのように制御措置を講じるかを明示する必要がある。

SSMにおいて水分活性を重要管理点として設定する方法については、FSISの公開資料であるGeneric HACCP Model 10および15に具体的に示されている。これらの資料は、FSIS公式ウェブサイトより入手可能である（<https://www.fsis.usda.gov/wps/portal/fsis/home>）。

CHEMICAL STABILITY 水分活性と化学的安定性

中間水分または乾燥タイプの常温保存肉製品（SSM）は、通常水分活性が0.70未満（ $a_w < 0.70$ ）であり、この範囲では微生物の増殖がほとんど起こらないとされている。しかしながら、このことはSSMの保存期間が無限であることを意味しているわけではない。

では、このような水分活性領域において、製品寿命を制限するその他の劣化要因とは何か。0.40-0.70Awの水分活性範囲では、化学反応速度が最大に達することから、化学的劣化が製品寿命を終わらせる主要因となる。特に、SSMは脂質含量が高いため、最も懸念される化学反応は脂質酸化である。脂質酸化は、酸敗臭や異臭、風味劣化の原因となる。

水分活性は脂質酸化反応の速度に影響を与える。具体的には、活性化エネルギーの低下、反応物の移動性の向上（モビリティ増加）、反応速度定数（rate constant）の増大が挙げられる。一般的に、水分活性が高くなるにつれて多くの化学反応速度は増加するが、脂質酸化

に関しては水分活性が極端に低い場合にも反応速度が増加するという特異性を持つ。⁽⁵⁾そのため、SSMにしつとりとした食感を維持するために必要な水分活性を保ちつつ、脂質酸化の速度を抑制するというのは困難である。したがって、水分活性のさらなる低下ではなく、以下のような代替的な対策が有効となる：酸素吸収剤の封入、改良包装（これにはカビの発生抑制という副次的な利点もある）

SSMにおいて、風味や香りの変化が劣化の主因である場合、製品の酸化が進行し、消費者が受け入れられないレベルに達するまでの時間がすなわち賞味期限となる。

この賞味期限を予測するための唯一のモデルは、湿熱時間モデル（Hygrothermal Time）である。⁽⁶⁾このモデルは、反応速度変化に関するアーイングの式⁽⁷⁾とギブス自由エネルギーの式から導かれている。

$$r = r_0 \exp \left(B a_w - \frac{E_a}{RT} \right)$$

モデル式では、Tが温度（K）、Rが気体定数（J/mol・K）、E_aが活性化エネルギー（J/mol）、Bが分子体積比、a_wが水分活性、r₀が標準状態の速度である。

実際には、B、E_a/R、r₀は各製品ごとに経験的に最小二乗法で決定される。これらの定数がわかれば、任意の温度・水分活性で反応速度を計算し、その条件下での保存期間を推定できる。

製品ごとの条件に応じて湿熱時間モデルを構築することは、水分活性測定装置メーカーのアプリケーションサイエンティストとの連携により、実用的な保存期間予測ツールの開発へとつながる。a

CHEMICAL STABILITY 水分活性とテクスチャー

常温保存肉製品（SSM）には、製品ごとに特有の食感やテクスチャーがあり、これが期待された物性から外れると、消費者の満足度は大きく損なわれる。硬めの食感が求められる製品は低水分活性で、柔らかさが求められる製品は高めの水分活性で仕上げる必要がある。いずれの場合も、適正な水分活性で加工されていないければ、狙った食感は得られず、消費者に受け入れられない可能性がある。

ただし、製品が適切な水分活性で加工・維持されている限り、食感の変化は保存期間を制限する主因にはなりにくい。

一般に、低水分活性の硬めの製品では風味の劣化が、柔らかめの製品では微生物的腐敗が、保存期間を決定づける主要因となる。

一方で、保存中の環境湿度によって水分活性が変化した場合には、食感自体が劣化要因となる可能性がある。水分活性は平衡相対湿度と等価であるため、保管環境の湿度の影響を受ける。たとえば、水分活性0.80の柔らかい製品が相対湿度60%の環境に置かれると、水分が失われて0.60程度まで低下し、硬くなる。この変化は徐々に進行するが、包装による

保護が不十分な場合、理想の水分活性から外れて食感が損なわれる。

こうした変化を防ぐには、水分バリア性のある包装材を使用することが有効である。さらに、包装内の水分活性の変動速度はフィックの拡散法則に基づいてモデル化でき、希望する保存期間を実現するために必要な包装材の透湿性も数値的に設計できる。⁽⁸⁾これらのモデル構築においても、水分活性測定機器メーカーのアプリケーションサイエンティストとの連携により、実用的なツールの設計と導入が可能である。

THE MOST IMPORTANT SPECIFICATION 水分活性とテクスチャー まとめ

常温保存肉製品（SSM）では、安全性と品質を確保するために、適切な水分活性仕様の設定が不可欠である。これにより、微生物の増殖を抑え、化学的劣化を抑制し、望ましい食感をいじできる。

理想的な水分活性値は、想定される劣化要因に応じて設定をされる。低Aw製品では食感の変化、中程度のAwをもつセミモイスト製品では化学分解、高Awの製品では微生物増殖が主な懸念である。設定した水分活性に対しては、製造工程と製剤設計によって対応可能である。

一般的に、水分活性の調整は乾燥処理によって行われるが、SSMは重量ベースで販

売されるため、過度な水分除去は製品重量の減少と収益損失を招く。

この課題には、糖、塩、グリセリンなどの保湿剤（ヒューメクトant）を添加による製品調整が有効である。これにより、水分を保持したまま目標の水分活性を実現し、歩留まりを維持できる。必要なヒューメクトant量は、Norrish式やRoss式により予測でき、簡易的な予測ツールの構築も可能である。

さらに生産中の水分活性を適切にモニタリングすることで、エネルギー使用を最適化し、不要な乾燥による重量損失を防止できる。

これにより、コスト削減と収益性の向上が図れる。

常温保存肉製品の品質と収益を最大化するには、理想的な水分活性の設定、それに適した製品設計、生産中のモニタリングの3点が重要である。

常温保存肉製品の成功は、水分活性管理の工夫と継続的な改善に支えられてきた歴史によるものである。

【著者紹介】

Brady Carter博士

カーターサイエンティフィックソリューション社 シニアリサーチサイエンティスト

専門分野：水分活性および水分吸着

ウェバー州立大学で植物学の学士号を取得後、ワシントン州立大学で食品工学と作物化学の修士および博士号取得

自身会社設立前、デカゴンデバイス社ならびにワシントン州立大学に勤務し、20年にわたる研究開発に従事

数多くの水分活性に関するセミナー講師を務め、世界中の企業にオンサイトで水分活性測定をトレーニングした経験を持つ

論文執筆多数、保存期間の簡略化パラダイムと湿度温度保存期間モデルを開発



REFERENCES

1. Grant, W. 2004. Life at low water activity. Philosophical Trans of the Royal Soc London 359:1249-1267.
2. Beuchat, L. 1983. Influence of water activity on growth, metabolic activities and survival of yeasts and molds. Journal of Food Protection 46(2):135-141.
3. Scott, W. 1957. Water relations of food spoilage microorganisms. Advances in Food Research 7:83-127.
4. Leistner, L. 1985. Hurdle technology applied to meat products of the shelf stable product and intermediate moisture food types. In Properties of Water in Foods pg. 309-329. Martinus Nijhoff Publishers, Boston, MA.
5. Bell, L. and Labuza, T. 1994. Influence of the low-moisture state on pH and its implication for reaction kinetics. Journal of Food Engineering 22:291-312.
6. Carter, B. P., Syamaladevi, R. M., Galloway, M. T., Campbell, G. S., & Sablani, S. S. 2017. A Hygrothermal Time Model to Predict Shelf Life of Infant Formula. In U. Klinkesorn (Ed.), Proceedings for the 8th Shelf Life International Meeting (pp. 40-45). Bangkok, Thailand: Kasetsart University.
7. Eyring, H. 1936. Viscosity, plasticity, and diffusion as examples of absolute reaction rates. J. Chem. Phys. 4:283.
8. Labuza, T.P. and Altunakar, B. 2007. Diffusion and sorption kinetics of water in foods, pp. 215-239 in Water Activity in Foods, edited by G. Barbosa-Canovas, A. J. Fontana, S. J. Schmidt and T. P. Labuza. Blackwell Publishing and IFT, Ames, Iowa.

DKSHマーケットエクспанションサービスジャパン株式会社
テクノロジー事業部門 科学機器部

本社
〒108-8360 東京都港区三田3-4-19
Phone 03-5730-7610 FAX 03-5730-7605

大阪サービスセンター
〒564-0052 大阪府吹田市広芝町2-3
Phone 06-6170-3607 FAX 06-6170-3608

e-mail tp.labtyo@dksh.com
URL www.dksh.jp

