

## アプリケーション ノート

# ペットフードにおける 水分活性

ペットフードの生産は、世界的に最も急成長している産業の1つで、2018年には910億ドルの市場規模が報告されている<sup>(1)</sup>。

食卓の残り物をペットに与えていた時代は過ぎ去り、今日のペットフードは、健康的で、アレルギー対応の他、様々なニーズに応えらえるよう慎重な配合がなされている。

ペットフードの価値が高まるにつれ、安全性や品質そのもの、またその一貫性に対する行政の監視や規制も強化されてきている。

2011年にアメリカで制定された食品安全近代化法 (FSMA) には、ペットフードの生産規制をヒトのそれと同等にするための勧告が含まれている。この規制の最後の更新は2018年9月で、非常に小規模な企業に対しても適用された<sup>(2)</sup>。この新しいFSMA規制を満たしながら、安全で品質の高い製品を利益を上げながら製造することが、現在のペットフード業界の目標であり課題となっている。

## INTRODUCTION はじめに

食品安全近代化法(FSMA)のアプローチの基盤は、ハザード分析及びリスクに基づく予防コントロール(HARPC)プログラムの活用である。これらのプログラムの目的は、食品安全に関連する危害のリスクを評価し、管理策を実施した上で、機能していない場合は是正措置を講じることである。<sup>(3)</sup>

ペットフードにおける危害リスクは、主に食中毒病原菌による微生物腐敗に焦点が当たっているが、金属や化学物質、その他の混入物による汚染なども対象とされている。

危害リスクを防ぐための管理方法は、その種類により異なるが、微生物腐敗の場合は主に病原菌を殺すための致死処理と、保存中の微生物の増殖を防ぐための製品配合となる。これらの管理方法は、致死処理中の内部温度や完成品の水分活性測定などのテストにより監視され、またその監視方法も適切に検証される必要がある。

FSMAの要件を満たすことは容易なことではないが、信頼性が高く、検証が可能な水分活性測定装置などの優れた計測機器の導入は非常に有意である。

食品業界では、すでに水分活性の管理は効果的な予防管理の1つとして使用されており、政府の定める食品安全のための時間/温度管理の中でも重要な部分となっている。<sup>(4)</sup>ペットフードにおいても、その製造における水分活性の管理は1960年代から利用されてきている。

“ゲインズバーガーGainesburgers”はジェネラルフーズ社が製造した中間水分のドッグフードで、ウェットな食感を保ちながらも常温で保存が出来る製品であった。これは水分を除去せずに、水分活性を下げるための保湿剤を配合することで製造が可能になった製品で、現在私たちが楽しんでいる中間水分食品の先駆けとなっている。

FSMAによりペットフード業界に導入された食品安全規制を遵守することは、ペットフードメーカーの成功にとって確かに重要ではあるが、FSMAのすべての要件を満たしていたとしても製品製造に問題が発生することがある。これは通常、安全性の問題ではなく、製品の許容レベルを超えた品質上の問題によるもので、その例には酸敗などの化学的変化や、食感や外観などの

物理的変化が挙げられる。

水分活性は、温度と同じく、品質劣化の速度を決定する最も重要な因子であり、ペットフード製品の理想的な水分活性範囲を特定することで、最大の賞味期限を設定することが可能となる。

このアプリケーションノートでは、ペットフード製造における水分活性の重要性について紹介をしていく。



## THEORY OF WATER ACTIVITY 水分活性とは

水分活性は、システム内の水のエネルギー状態を表す尺度として定義されるもので、熱力学の基本法則のひとつであるギブスの自由エネルギー方程式を適用することで、ある温度におけるシステム内の水の活性を算出することが出来る。その値は、マトリクス内での表面、凝集、毛細管相互作用によって決定される水の相対的な化学ポテンシャルエネルギーを表している。

実際には、サンプルと平衡状態にあるヘッドスペース内の水の部分蒸気圧を、同じ温度での飽和蒸気圧で割ることによって求められる。その値は、完全に乾燥した状態を示す'0'から、部分蒸気圧と飽和蒸気圧が等しい場合の純水を示す'100'までの範囲をカバーしている。

水分活性は、「自由水」と呼ばれているケースがあるが、この言葉は高エネルギー状態の水を指す場合にはよいが、「自由」という単語自体が科学的に定義されていないため、文脈により異なる解釈がなされる場合があり、時として誤解を招く可能性がある。自由水という言葉が、定量的な測定で求められる物理的な結合をしていない水の量を指しているのか、定性的な測定で求められる水が高エネルギーから低エネルギー状態へ移行する際に必要なエネルギーのどちらを指しているのか混乱を生じさせる恐れがある。

水分活性が0.50である状態とは、50%が自由水であることを示しているのではなく、サンプル内の水が同じ環境状況で純水が持つエネルギーの50%を持っていることを示している。水分活性が低ければ低いほど、システム内の水は純水のような動きをしないということになる。

水分活性値は、サンプル内の液相水と密閉チャンバー内ヘッドスペースの気相水が平衡化した時の平衡相対湿度ERHとして算出されるが、その湿度はセンサーを使用して測定される。測定に使用されるセンサーには、電気抵抗式センサー、冷却ミラーセンサーまたは静電容量センサーなどがある。LabMaster-aw neoなどのNovasina社装置は、サンプルを含む密閉チャンバー内のERHの変化を電解質を塗布したセンサーで電気抵抗値の変化として捉え、測定をしている。この方法は、非常に安定しており、冷却ミラーセンサーでは弱点となりうるサンプルによる汚染に伴う不正確な読み取りが起りにくい。また電気抵抗式センサーは、メンテナンスや頻繁な校正なしで最高レベルの精度と精確性を実現することができる。

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。水分含量は通常、乾燥減量法や化学滴定法で測定され、その値は純度の測定や同一性の基準としては役立

つが、微生物の増殖や化学的安定性、物理的安定性との相関は水分活性ほど高くない。その関係性は水分吸脱着等温線において示される。ただし表1に示されるように、製品仕様の似ているペットフードにおいて水分活性はおなじような値を示すものの、水分含量については全く異なっているというケースもある。このことは、安全な水分活性値のときの水分含有量が製品ごとに異なっているため、水分含有量を微生物の安全性の指標として依存使用すべきではないことを明らかにしている。

製品	水分活性	水分含量 (% d.b.乾燥基準)
しっとりした缶詰ペットフード	0.994	79.60
調理済みペットフード	0.830	24.00
骨の形状をしたおやつ	0.679	8.43
ベーコンのようなおやつ	0.669	13.00
乾燥粒状ドッグフード	0.493	8.59
乾燥粒状キャットフード	0.459	7.79

表1. 一般的なペットフードの水分活性調査結果

## MICROBIAL GROWTH 微生物の増殖

微生物が正常な代謝活動を行うためには、膜内部を理想的な水分活性で維持することが重要である。

微生物は、体内水分活性よりも低い環境に遭遇すると浸透圧ストレスを受け、水が細胞外へ流出してしまう。（これは水が水分活性（エネルギー）が高い方から低い方へ移動するため）これにより膨圧（細胞内へ水が進入することによって細胞内に生じる圧力）が低下し、代謝活動が停止してしまう。ある程度までの環境変化については、体内の水分活性を制御し対応を行うが、微生物ごとに異なる増殖に必要な最低限水分活性値を持っている。<sup>(5, 6)</sup>微生物が増殖できるかどうかを決定するのは、生育環境内の水の量ではなく、細胞内外の水分活性（エネルギー）であり、十分なエネルギーを持つ水にアクセス出来るかどうかを鍵を握っている。

表2に一般的な腐敗微生物の増殖に必要な水分活性の下限値を示す。水分活性が0.87未満になると、病原性細菌においては増殖が停止することがわかる。一方で、腐敗酵母やカビの増殖は、実質限界として知られる0.70  $a_w$  で停止する。0.70  $a_w$  未満では、好乾性や耐塩性菌のみが生存可能で、0.60未満ですべての微生物の増殖が停止する。微生物の増殖速度については、水分活性だけではなく、温度やpHなどの他の成長因子と共にモデル化することが出来る。

ペットフード製品において、その保存安定性を示すためには、水分活性を0.86  $a_w$  未満に維持し、保存期間中においても病原性微生物が増殖できないようにしなければならない。水分活性が0.70から0.86  $a_w$  の製品については、一部のカビや酵母の増殖を完全に否定できるわけではない

が、病原性はないため、保存安定性があるとみなされる。そして万が一病原性のない微生物の増殖が認められたとしても、製品の保存期間が通常通り終了したと見なされる。従って、水分活性を0.70  $a_w$  以下に管理するか、防腐のための措置や真空包装などの対策を講じて、カビの増殖を防止する必要がある。

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 bailii	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
リゾープス菌（クモノスカビ） 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

## CHEMICAL STABILITY 水分活性と化学的安定性

水分活性が0.70 $a_w$ 未満の中間水分および乾燥ペットフードは、通常微生物の増殖は起こりにくい。ただし、水分活性がこの範囲であったとしても、その保存期間が無制限な訳ではない。では保存期間の終了を引き起こす可能性のあるその他の劣化要因にはなにがあげられるだろうか。

水分活性が0.40から0.70  $a_w$ のペットフードの場合は、化学分解が最も有力な原因となり得る。メイラード褐変、脂質酸化、酵素などの化学反応は、ペットフード製品の味、外観、栄養価すべてに影響を与えてしまう。水分活性は、活性化エネルギーの減少、可動性の増加、速度定数の増加によって反応速度に影響を及ぼすため、水分含有量よりも化学反応と相関が高いといわれている。一般的に、水分活性が増加すると反応速度も増加していくため（図1）0.70から0.80  $a_w$ 範囲が最大となる。ただし脂質酸化だけは、低い水分活性において最大となる。

ペットフードの品質に最も影響を与える可能性が高いのは、脂質の酸化すなわち酸敗である。酸敗とは、脂質の酸化が原因で臭気化合物が生成され、カビ臭や不快な味が引き起こされた状態を指す。この反応には脂質（脂肪）、酸素そしてフリーラジカル（活性酸素）の存在が必須で、複数の反応経路を伴って進行する複雑な反応系である。一般的には、窒素ガスによる酸素置換や酸素吸収材を用いて予防措置が講じられる。

ドライペットフードでは、新鮮さを保ち、栄養価を高めるために、脂肪コーティングをされることが多く、特に酸敗の影響を受けやすい。当然、ペットは腐敗臭のする食べ物を拒絶し、飼い主は廃棄処分を選択せざるを得なくなってしまう。前述の脂質の酸化反応は、水分活性が増加すると速度上昇するだけでなく、低い場合でも速度上昇が認められるという特徴があるため、水分活性が低ければ良いという一般的なルールが当てはまらないケースである。

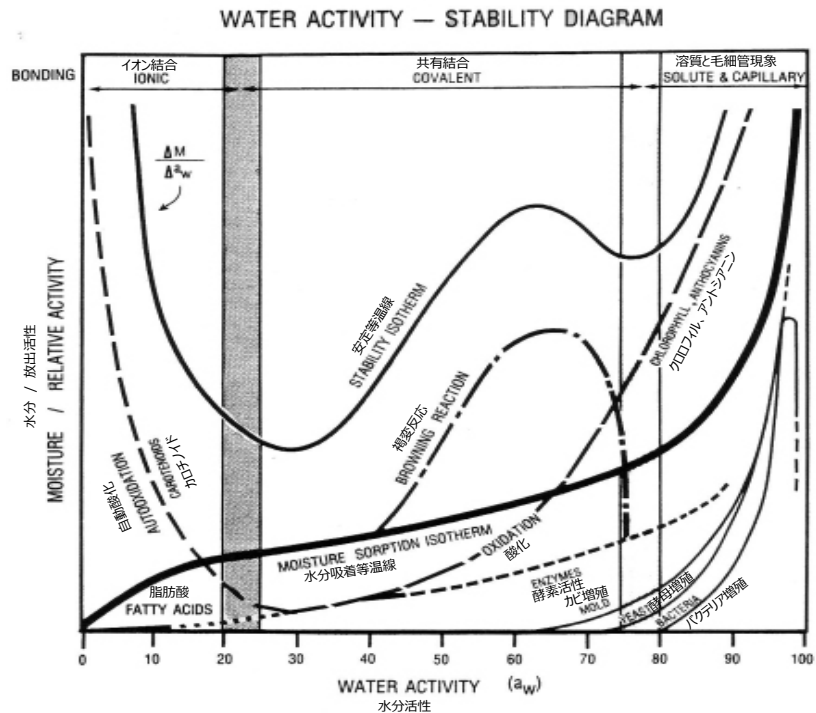


図1. 水分活性の安定性図  
水分活性が様々な劣化反応と相関関係を持つことを示す  
(Ted Labuza氏の許可を得て掲載)

保存期間モデルを使用して反応速度を予測することは、化学的劣化を遅らせるための理想的な水分活性を決定する際に有用である。効果的なモデルとするためには、水分活性と温度の影響を考慮に入れる必要があるが、それら両方を含むのは湿熱時間モデル (Hygrothermal time) のみである。(7)このモデルは、温度による化学反応の速度変動を求める際に用いられるアILINGの式(8)と自由エネルギーに関するギブス方程式を組み合わせて、温度と水分活性に基づく反応速度を算出する：

ここで、Tは温度 (K)、Rは気体定数 ( $J mol^{-1} K^{-1}$ )、 $E_a$ は活性化エネルギー ( $J mol^{-1}$ )、Bは分子体積比、 $a_w$ は水分活性、そして $r_0$ は標準状態での速度となっている。実際には、B、 $E_a/R$ および $r_0$ の値は、それぞれの状況に固有であり、最小二乗法による反復で経験的に導出される。定数がわかれば、この予測モデルを使用して、任意の温度と水分活性における反応速度を求め、その条件下での製品の保存期間を決定することが出来る。

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

## PHYSICAL STABILITY 水分活性と物理的安定性

乾燥粒状の低水分活性(0.20-0.40  $a_w$ ) のペットフードの場合、化学反応や微生物汚染は起こりにくいとされているが、保存期間を経るに従って製品の質感(食感)の変化は免れない。これは水分活性の変化に伴うもので、その変化は構造と食感両方に影響を与える。

品質保持期間を最大化するためには、製品を最も理想的な水分活性範囲で製造し、輸送中や保管中もその水分活性を維持する必要がある。一般的に乾燥粒状のペットフードは水分活性が低く、サクサクと歯ごたえのある食感をしているが、水分活性が理想的な範囲を超えると柔らかくなり、好ましくないものになってしまう。

一方で、しっとりとした食感のペット用おやつは水分活性が高く、柔らかくしなやかな構造であることが求められる。その場合、水分活性が理想的な範囲外に低下すると、硬く望ましくない食感に変化する。

サクサクとした食感をもつ様々な製品を用いて検証した研究では、ある水分活性値に平衡化させた際にその食感に変化が記録されることを示している。<sup>(9,10)</sup>官能評価パネルデータと測定機器を使用した結果、パネルが捉えたサクサク感と水分活性の関係は、基本的に直線的であり、サクサク感が許容範囲から逸脱するまでの水分活性範囲を

特定することが出来る。その後、臨界水分活性を越えるまでは食感を維持することが出来、越えた場合はシグモイド状の食感の低下が発生する。(表2)

乾燥しているペットフードの水分活性が変化する原因の1つは、水分の移動である。ペットフードのパッケージ内で水分活性レベルが異なっている場合、水分含有量に関らず製品内で水分の移動が起こる。これは水分の移動が、水分活性(エネルギー)が高いほうから低いほうへ移動する性質によるものである。

柔らかい食感と硬い食感の素材を異なる水分活性で組み合わせている製品の場合、水分の移動が発生し、各成分の質感が変化する可能性がある。この問題を回避するためには、それぞれの食感の水分活性を同じ値になるよう設計する必要がある。異なる水分活性のまま組み合わせる場合には、最終的な平衡水分活性を予測するモデルを使用する。

もうひとつの原因には、製品を保管している湿度環境があげられる。水分活性は平衡相対湿度であり、保管している環境湿度と強い相関関係を持つ。水分活性が0.40  $a_w$  の製品を60%相対湿度で保管した場合、理論的には製品の水分活性が0.60  $a_w$  になるまで吸湿し続ける。このプ

ロセスには当然長時間を要するが、その過程を防がない限りは製品の水分活性は徐々に理想的な範囲を超え食感の変化をもたらしてしまう。

水分活性の変化を最低限にするためには、製品に防湿包装を施すことが有用である。既知の水蒸気透過率を持つ包装資材内での水分活性の変化速度は、フィックの拡散方程式を用いてモデル化することが出来るので、望ましい保存期間を達成するために必要な最低限の包装資材の透過性についても同様に検討することが可能である。<sup>(11)</sup>

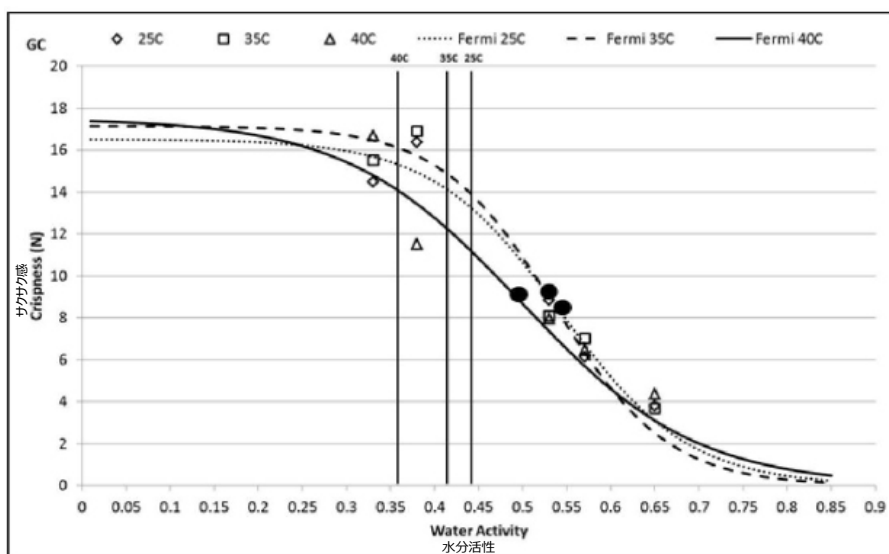


図2. 3つの異なる温度における水分活性の変化に伴うドライペットフードのサクサク感の変化<sup>(10)</sup>

## INGREDIENT INSPECTION 原材料の水分活性

理想的な水分活性の仕様が特定された製品製造の次の課題は、その理想的な水分活性で一貫生産をしていくところとなる。

理論的には、オーブンの温度やベルトの速度などの製造設備の設定を確立し、各生産工程を通じて同様の製造を行えば、毎回同じ水分活性の製品を生産することが出来るはずである。しかし残念ながら実際には、製造設備設定を調整せざるを得ない外部要因が存在する。これらの要因には、入荷してくる原材料の不均一性や製造環境の変化も含まれるが、それだけに限らない。

入荷してくる原材料の水分活性が一定であるという前提で、最終製品の水分活性が理想的なものになるように製造設定している場合、実際の水分活性が予想から逸脱してしまうと、水分活性にばらつきのある製品が生産されてしまう。そしてこれは通常、初回生産品の品質保証テストが行われるまで明らかにならない。

品質保証テストの時点で製品が仕様を満たしていない場合は、再加工もしくは廃棄となる。このような不均一な原材料の入荷により発生しうる問題を効果的に回避するためには、原材料の水分活性を確実に検証し、限られた生産調整で仕様を満

たす製品を生産できる許容範囲を確立することである。そしてこれは入荷してくる原材料のサンプルの水分活性を測定していくことで、簡単に実現することが出来る。原材料の水分活性が要件を満たしていない場合は、受け入れ拒否もしくは通常の製造設定からの変更が必要なることを認識した上で、生産に必要な調整を行うことが可能となる。

多くのペットフード製造業者は、最終製品の水分活性測定については実施しているが、入荷してくる原材料のスクリーニングに水分活性を導入するというアイデアは新しくかつ今後有用なものになっていくだろう。



## THE MOST IMPORTANT SPECIFICATION ペットフードにおける最も重要な仕様とは

ここまで述べてきた通り、ペットフード配合における理想的な水分活性仕様は、微生物リスク、化学反応や物理的および構造的劣化、予期せぬ水分の移動を回避するよう、製品種類ごとに最も起こりやすいリスク（乾燥製品であれば食感の低下、中間水分製品であれば化学的劣化、しっとりしたペットフードでは微生物増殖など）に基づいて設定される。

水分活性の仕様を満たす製品を生産す

るために、最も一般的に行われる製造処理工程は、調理または乾燥による水分の除去である。しかしながらペットフードは通常重量ベースで販売されるため、水分を除去してしまうと製品自体の重量も減少し、収益の損失につながってしまう。そこで、砂糖、塩、グリセリンなど水分活性を低下させる保湿剤を配合することで、水分活性の仕様を満たしつつも製品自体の水分量を最大化させていく。さらに製造ライン上の製

品を注意深く監視し、理想的な水分活性を下回るものを処理していくことで、不必要なエネルギーの浪費や重量損失の回避につながっていく。

これらのことから最適な保存期間と収益性のある安全で高品質なペットフードを製造するために、水分活性を最も重要な仕様のひとつとして位置づけることは非常に有用であることが示唆される。

## 【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. Phillips-Donaldson, D. 2019. Global pet food sales hit \$91 billion in 2018. PetFood Industry. Retrieved April 18, 2019 from <https://www.petfoodindustry.com/articles/7899-global-pet-food-sales-hit-91-billion-in-2018>
2. US Food and Drug Administration. 2019. Compliance Dates. Retrieved April 18, 2019 from <https://www.fda.gov/Food/GuidanceRegulation/FSMA/ucm540944.htm#AnimalFood>
3. HARPC.com. 2019. What is HARPC? Retrieved April 18, 2019 from <https://www.harpc.com/what-is-harpc/>
4. US Food and Drug Administration. 2017. Food Code. Pages 22-24. Retrieved April 18, 2019 from <https://www.fda.gov/downloads/Food/GuidanceRegulation/RetailFoodProtection/FoodCode/UCM595140.pdf>
5. 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.
6. Scott, W. 1957. Water relations of food spoilage microorganisms. *Advances in Food Research* 7:83-127.
7. 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.
8. Eyring, H. 1936. Viscosity, plasticity, and diffusion as examples of absolute reaction rates. *J. Chem. Phys.* 4:283.
9. Katz, E.E. and Labuza, T.P. 1981. Effect of water activity on the sensory crispness and mechanical deformation of snack food products. *Journal of Food Science* 46, 403.
10. Carter, B.P., Galloway, M.T., Campbell, G.S., and Carter, A.H. 2015. The critical water activity from dynamic dewpoint isotherms as an indicator of crispness in low moisture cookies. *Journal of Food Measurement and Characterization* 9(3):463-470.

 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](mailto:tp.labtyo@dksh.com)  
 URL [www.dksh.jp](http://www.dksh.jp)
