

水分活性測定から利益を得る5つの簡単なレッスン

水は、利用できる中で最も安価な原料である。水を加えることにあまり費用はかからない。間違った量を加えない限りは。もし、間違えると、水は信じられないほど高価なものになる。過度に加えると、製品は棚でカビが生えてしまうだろう。量を間違えると、製品はサクサクした食感や柔らかさを失うだろう。互換性のない水分レベルの二つの成分を混ぜ合わせれば、ベトベトした塊ができ、工場の機械を台無しにしてしまうだろう。不安定な水分の成分の組み合わせを貯蔵すれば、成分はあまりに固く干上がってしまうので、消費者の歯が折れてしまい、訴訟が起こるかもしれない。安価な成分の割には、水はお金のかかる頭痛の種をたくさん引き起こし得るのだ。

多くの食品製造者は、製品中にどのくらい水が含まれているのかを明らかにすることによって、問題を管理しようとしている。製造者は重さを量り、乾燥させ、重さを量り、たくさんの製品を灰にして、終いには、質問に対する答えにはならないおおざっぱな測定値を得る。量からは、質に関してあまり多くの情報は得られない。また、良い食品の質とは、良い食品科学にほかならない。水分活性を測定すれば、迅速、正確で強力な食品の品質の測定値が得られる。水分活性について知れば、製品中のどのくらい水が含まれているかだけでなく、その水がどのような挙動をしているのか、また、製品が棚に貯蔵されたときにはどうなるのかを知ることができる。水分活性により、品質の全体像をみることができる。そして、全体像を見たときに、水は再び製品中の最も安価な成分となるのである。

ドルとセント

#1：健康的なドッグフードの乾燥

製品の安全性と品質は、最終的な収益である。腐敗と低品質は、売り上げに損失をあたえるか、完全に損ねてしまう。品質の基準を定め、その範囲にとどめなくてはならない。だが、どこに基準を定めたらいいのだろうか。そして、ど

のくらいの安全域が必要なのだろうか。あまりに多くの製造者が、含水量を測定し、全くの推測による基準を用いている。例えば、我々の知っているあるペットフード製造者は、8%の含水量で生産していた。なぜか。それは、そのレベルでは、腐敗の問題も有効期間の懸念事項も起こったことがないためである。その製造者は、安全な製品を製造していた。しかし、製造者は収益を干上がらせていたことに気付いた。そこで、より正確な製品品質の状況を把握するために、水分活性の測定値を用いることにした。その製造者の製品の水分活性は、 $0.50 a_w$ であった。少し調べてみると、高品質の常温保存可能な製品を製造するためには、カビの増殖限界である $0.65 a_w$ 未満に保てばいいだけであったことが明らかになった。

その製造者の正確な費用を知らなくても、利益幅は $0.50 a_w$ と $0.65 a_w$ の差に表れていたと推測することができる。もし、その製造者が1日16時間、週に5日操業し、1時間当たり2万ポンドの製品を生産し、1ポンド当たり40セントで製品を販売していたら、目標 a_w 値を上げることによって、1年当たり製品を187万7,314ポンドも余分に生産することができ、追加の75万925ドルの収入をもたらすことになるだろう。さらに良いことに、この変化は、人件費、原材料費、設備の摩損は同じに保ったまま、光熱費を減らすので、収入の大部分は収益となるであろう。ちょっと難しい文章題に過ぎないだって？それは全く違う。多くの製造者は、水分活性を用いることによって、費用を減らし、収益を上げている。含水量の測定値では、安全性と品質に関する必要情報を得ることはできない。含水量を知っていても、食品の品質の全体像については何も明らかにされない。良い情報を用いることによってしか、経営上の良い判断はできない。食品品質基準を設定し、維持するときは、通常水分活性が最良の情報の一部となる。食品産業は、アメリカ食品医薬品局 (FDA) とアメリカ合衆国農務省 (USDA) とともに、安全性を改善し、食品由来の疾病の発生を減らすためのシステムを導入している。危害分析重要管理点 (HACCP) 計画には、製造過程

を通して、食品の品質を測る重要管理点を設定することが定められている。最終段階で「調べて捨てる」のではなく、生産ライン全体を通して、これらの重要管理点で問題を検出する。水分活性は、多くの過程で重要管理点となる。水分活性は、食品の安全性に関わるハザードを防ぐために管理されなければならない、微生物学的および化学的パラメーターの、決定的な限界値を定義する。

安全性は問題でないとしても、水分活性は品質の重要な尺度である。乾燥した製品のサクサクした食感の損失、粉末の固化や凝集、湿った製品の固くかみ切れない食感および有効期間の減少を防ぐため、重要管理点を設定することもできる。水分活性は強力な値である。水分活性を測定し管理することで、製品の品質を管理することができる。一貫して高品質の製品を生産し、不良品を廃棄する必要もなく、期待に応えることができる。そして、潜在的な収益を無駄にしてしまう、広範な安全域も必要ではない。

新鮮な焼き菓子の輸送

2 : 食料品の分布と有効期間

マム・アンド・パップ・ベーカリーは、並外れたケーキを焼いていた。地元での需要は高かった。マム・アンド・パップは、拡大して売り上げを増やしたいと思っていた。だが残念なことに、その美味しいケーキは、賞味期限が3日しかなかった。3日間の賞味期限では、ケーキを配達する時間はなかった。どのようにしたら、品質は維持したまま、同時に、賞味期限を延長することができるのだろうか？ここでもまた、水分活性が答えとなる。水分活性は、微生物の増殖を予測するためのよく知られた判断材料である。簡単なグラフにより、それより低いとカビが増殖しなくなる特定の水分活性値が示される。そして、そのグラフは1つしかない。これらの値は、ブリ（チーズ）の水分活性測定でもドッグフードの水分活性測定でも、同じである。製法を変えても、それらの値が変化することはない。なぜ、水分活性はより良い予測因子なのか？含水量は量を測ったもので、製品中にどのくらい水が存在するかが示される。水分活性は、製品中で水はどのような挙動をしているかを示すので、質を測ったものである。一部の水は「結

合性」である—製品中で化学的に結合している。残りの水は「自由」である。この「自由」な水が、微生物を感染させ、微生物に利用される。しかしそれは、十分利用可能な量が存在した場合にだけである。微生物には、より多くの水を必要とするものもあれば、あまり必要としないものもある。しかし、全微生物が、ある特定量の「自由」な水を要求する。含水量からは、水がどのくらい存在するかは示されず、どのくらいの水が利用可能なかはわからない。製品の水分活性を測定すると、どの細菌、カビまたは菌類が、製品表面または製品中に増殖できるのかを知ることができる。水分活性を下げることにより、全種類の微生物の増殖を排除することができる。低い水分活性 (> 0.60) では、どんな微生物の増殖をも不可能にすることができる。キンバリー・J・バリントン (1998年8月) は、『フード・プロダクト・デザイン』に以下のように記している。「多くの焼いた製品の開発は a_w を最小に抑える一方で、可能な限り最高の食の品質を生むため、含水量を最大限にすることに関連している。 a_w を低くすることにより、微生物増殖の感受性に関して、製品の安全性を向上させることができる。」

製品の a_w は、いくつかの方法によって減少させることができる。塩や砂糖などの保湿剤を添加することにより、製品の水と「結合」する。含水量は減っていないが、水分活性が低下する。製品は、多くの方法により乾燥させることができる。空気乾燥、真空乾燥、凍結乾燥および浸透脱水は、全て水分活性を減少させる。製品の温度を下げることにより、水分活性を低下させることもできる。多くの例で、小さな製法の変化により、水分活性を、安全で常温保存可能なレベルまで下げることができる。

マム・アンド・パップは、小さな変化によって問題を解決した。水分活性の変化を監視し続ける中で、レシピを巧みに修正した。最終的な製品は、もとの製品とまったく同じ美味しさを保っていたが、水分活性は低くなった。9-12日の賞味期限を持つ新製品は、配達が可能になり、事業拡大も成功した。

水分活性と食品中の微生物増殖*

a_w の範囲	その範囲の最小 a_w で一般に抑制される微生物	その範囲の一般的な食品
1.00-0.95	シュードモナス属、エシェリキア属、プロテウス属、シゲラ属、クレブシエラ属、バシラス属、ウェルシュ菌、酵母の一部	非常に痛みやすい（生鮮）食品、缶詰の果物、野菜、肉、魚、および牛乳
0.95-0.91	サルモネラ属、腸炎ビブリオ、ボツリヌス菌、セラチア属、ラクトバシラス属、ペディオコッカス属、カビの一部、酵母（ロドトルラ属、ピチア属）	チーズの一部（チェダー、スイス、ミュエンスタ、プロヴォローネ）、塩漬け肉（ハム）
0.91-0.87	多くの酵母（カンジダ属、トルロブシス属、ハンセヌラ属）、ミクロコッカス属	燻製肉（サラミ）、スポンジケーキ、乾燥したチーズ、マーガリン
0.87-0.80	多くのカビ（マイコトキシン産生ペニシリウム）、黄色ブドウ球菌、多くのサッカロミセス属（バイリイ）、デバリオミセス属	ほとんどの果物ジュース濃縮果汁、加糖練乳、シロップ
0.80-0.75	多くの好塩性細菌、マイコトキシン産生アスペルギルス	ジャム、マーマレード、マジパン、砂糖漬けフルーツ
0.75-0.65	好乾性カビ（アスペルギルス・チェバリエリ、アスペルギルス・カンディダス、ワレミア・セビ）、サッカロミセス・ビスポラス	ゼリー、糖液、生のサトウキビ、一部のドライフルーツ、ナッツ
0.65-0.60	好濃性酵母（サッカロミセス・ルークシイ）、少数のカビ（アスペルギルス・エキヌラタム、モナスカス・ビスポラス）	15-20%の水分のドライフルーツ、一部のトフィーとキャラメル、蜂蜜
0.60-0.50	微生物の増殖なし	乾燥したパスタ、スパイス
0.50-0.40	微生物の増殖なし	全卵粉
0.40-0.30	微生物の増殖なし	クッキー、クラッカー、パン粉
0.30-0.20	微生物の増殖なし	全脂粉乳、乾燥野菜

Adapted from L.R. Beuchat, Cereal Foods World, 26:345 (1981)

ガラス状の製品

水分活性は、凝集や固化の間に起こっている化学的プロセスを完全には説明しない。製品の中には、粉ミルクのように、不定形の結晶質の化合物を含むものもある。これらの製品は、「ガラス転移」として知られる現象の影響を受けやすい。ガラス転移の温度より高い温度で加工または貯蔵されると、これらの粉末は、 T_g を超えたことによる粘性の低下と水による可塑性の増進により、粘着、崩壊または結晶化を示す。崩壊する間は、水分は結晶化した領域から不定形の領域へと放出され、それにより粒子間液体架橋が形成され、結果として粒子同士がくっつき合う。加工の間、ガラス転移をモニタリングするために利用できる常法は、今のところない。しかし、水分活性をモニタリングし、製品を特定の水分活性未満に保つことで、ガラス状の製品でも固化や凝集を防ぐことができる。

スープミックスの話

#3 固化と凝集

高地にある乾燥したソルトレイクシティでは、塩入れは塩入れである。逆さまにすれば、小さな塩の粒子が流れ出てくる。雨の多いシアトルでは、塩入れをひっくり返して振ってみると、おそらく「ズシッ」という音が聞こえ、何も出てこないだろう。家の付近でさえも、凝集と固化は問題を起こし得る。生産ライン上では、これらの問題は大きく、費用のかさむものになる。

ある小規模の乾燥スープの製造者は、スープの素が塊になることを防ごうと決意した。ある日、その製造者は3%の含水量のスープの素を加工していた。新しく届いた胡椒も測定してみたところ、その胡椒もまた3%の含水量であることがわかった。彼は2つの成分を混合するのは安全だろうと確信し、実際にそうして昼食へ出かけた。昼食から戻り、加工機械の電源を入ると、全ての処理物が塊になっていることに気付いた。それを廃棄しなくてはならなかった。長い間、機械を清掃するのに費やしたので、損失はさらに大きいように思えた。

固化と凝集は、食品および医薬品産業では、至るところで見られる問題である。問題を予測すること（そして防止すること）は、時間、温度そして水分活性の、3つのことに

注意を払うことを意味する。時間の経過につれて、自由に流動する粉末は固化段階へと進む。粉末の粒子は湿気を帯び、粘着化するようになる。粘性の粒子は、塊になり、圧縮し、最終的には液状化段階に達する。その過程は、粒子の形や大きさ、温度、システム中で有効な水分、加えられた圧力そして化学成分に影響される。この問題は、粉末を特定の水分活性より下に保つことで、防ぐことができる。そのスープ製造者は、工程は管理下にあると思っていた。スープの素は乾燥しており、加工工場の温度と相対湿度にも問題なかった。ではなぜ、塊ができてしまったのだろうか？この製造者は、含水量の値に惑わされていたのである。レッスン5のフルーツケーキ生産者とちょうど同じように、彼は自分では油断していないと思っていたが、実際には全く見当違いなことをしていたのである。彼はスープの素にとっての十分な乾燥具合は、胡椒にとっても十分な乾燥具合であると思っていた。しかし、肝心なのは水の量ではなく、水の質である。どのくらい存在するのかではなく、どのくらい有効であるか、なのだ。そして、胡椒の3%の水は、台無しにするのに十分なくらい自由な状態であった。もし水分活性を測定していたなら、スープの素の水分活性は0.28、新鮮に挽かれた胡椒は0.69 a_w であることがわかっただろう。これら2つを混ぜ合わせたと、彼は混合物の水分活性を、固化の臨界値よりも高くしてしまったのである。

製品が固化や凝集する臨界値は、製品特有のものである。それは、製品を異なる湿度におき、製品の固化が始まる水分活性を測定することによって、決定されなければならない。製品をその値未満に保つことにより、固化を防ぐことができる。スープ製造者が発見したように、水分活性がより高い成分を加えることにより、製品の水分活性が変化する可能性がある。さらに、高い周囲湿度と温度の上昇は、製品の水分活性を上昇させる可能性がある。

一般的に、芳香性ハーブの空気乾燥は微生物の増殖を抑制し、最終産物の生化学反応の開始を遅らせる効果的な保存方法である。

—ユーシフ・AN (2000年) ジャーナル・オブ・フード・サイエンス 65:926-930 から。

粉末の固化を防止する方法

- 粉末をより低い a_w に乾燥させる。
- 粉末を低い湿度環境で取り扱う。
- 粉末を耐湿効果の高いパッケージで包装する。
- 包装内乾燥剤を用いる。
- 凝集させる。
- 固化防止剤を加える。

過去 30 年間における汚染スパイスの発生の全件数は少なく、アメリカ合衆国では報告された発生は全くない。いくつかの病原性細菌および指標細菌が、ハーブやスパイスから時折検出される可能性があるため、そのような低い発生件数は、部分的には、原料としてのスパイスの役割、および低水分活性による抑制効果や致死効果に由来するのかもしれない。
—アメリカ合衆国スパイス貿易連合 (ASTA) より

等温線の比較

#4 ピーカンナッツとエアバッグ

多くの製造者は、「乾燥による水分減少」方法を用いて含水量を測定する。彼らは、もとの製品の重さを量り、それを乾燥させ再び重さを測る。「乾燥」は本当に乾燥していることを意味し、通常は短時間で行われる必要があるため、多くの製造者が中間段階で、真空乾燥器、マイクロ波、または水分測定計を用いて、製品を急速に乾燥させる。ある魚類加工者は、「これは本当に不愉快なプロセスだ」と言う。残念なことに、それには時間がかかり、しかも大雑把で、しばしば誤解を招く測定なのである。

誤解を招くのは、含水量を測定するとき、どのくらい乾燥させれば十分乾燥しているのかを知る必要があるからである。安全な製品の含水量は、製品によって、そして製法によって異なる。トウモロコシの種では、保存の安全とは、含水量が 12.5%であることを意味するが、マスタードの種では 7.5%である。様々な含水量の全てが、同一の水分活性に関連している。単純なグラフにより、それより低値では、特定のカビが増殖するのに十分な「自由」な水がなくなる水分活性の値が明らかにされる。例えば、0.6 a_w 未満では、水は密



接「結合」しているため、最も好乾性の菌類ですら利用できない。この数値は、全製品、原料および物質に関して同一である。

含水量の測定は、測定法があまり正確ではない可能性があるため、大雑把である。あるピーカンナッツ栽培者は、14 年の経営の中で、そのことを発見した。彼は、学校の資金集めのためにピーカンナッツを育てていた。彼は毎年、ピーカンナッツを 4%の含水量まで乾燥させた。13 年の間、その方法は完全にうまくいった。14 年目は、「カビたピーカンナッツの返却」の年であった。彼は当惑した。水分活性を理解することにより、食品の品質の全体像が把握できた。4%の含水量は、ピーカンナッツでは 0.68 a_w に関連している。これはかなり安全な値である。0.60 a_w 未満のものは何でも、微生物の増殖が完全に起こらなくなる。ピーカンナッツでは、それは 3.8%の含水量に関連する。残念なことに、含水量の測定値は、 $\pm 0.5\%$ の範囲でしか正確ではない。つまり、14 年目に出荷されたピーカンナッツは、おそらく 4.5%に近い含水量であり、安全域からは外れていたのだ。

a_w 測定器を使用することにより、正確度の問題は解決される。ピーカンナッツ生産者の不明確な数値の差 (0.68 と 0.70) は、 $\pm 0.003 a_w$ の正確度をもつ水分活性測定器にとっては莫大である。ピーカンナッツ製造者は、水分活性を測定すれば、全出荷に関して製品の安全性を確信することができる。

実際、水分活性のより良い正確度、速度および簡単な測定は、水分量を測定する必要のある生産者にとってさえも魅力的である。あるエアバッグ製造者は、エアバッグ内に用いる化学的推進剤 (酸化銅) の水分量を調節する必要があった。それには、厳格な管理が必要とされた。もし酸化銅の水分量が仕様範囲内になかったら、

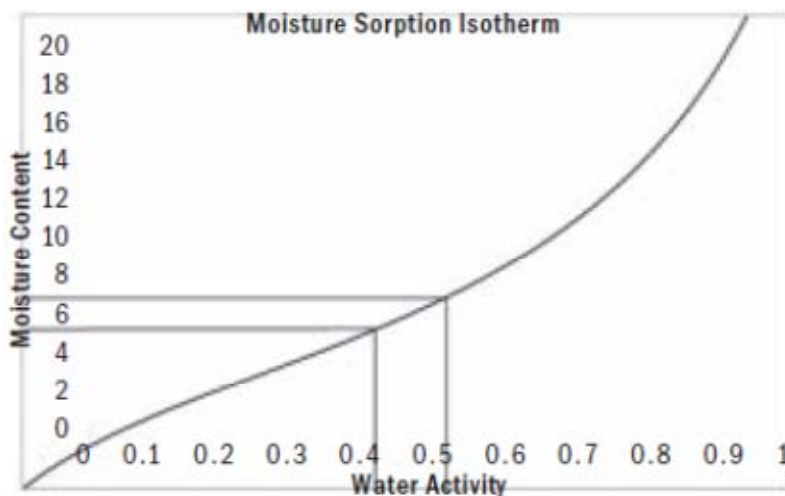
エアバッグは膨らまないだろう。酸化銅の水分量は約 0.05%である (あまりに低いので、測定は困難であった)。高い精密度の水分量と、科学技術への入念な留意が必要とされた。最良の条件下でも、測定するのは難しかった。製造者は、酸化銅に関する水分量と水分活性の関係に気付き、その後、0.02%もの小さい水分量の変化が 0.2 a_w の変化に関連していることがわかった。 a_w 測定器 $\pm 0.003 a_w$ の

正確度によって、厳格な調節を行うことができるようになった（そして、測定もずっと簡単になった）。

等温線の発展

でも私は、どうしても本当に含水量を測らなくてははいけないんです！

水分活性は、常に、食品の品質に最も関連があって強力な測定値である。しかし、含水量も知る必要のある製造者もいる。これらの製造者は、重量を基に製品を売っているかもしれないし、特定の栄養素の値を決定しなければならないかもしれない。その場合、両方の長所を得ることは可能である。水分活性と含水量は、お互い関連している。この関係は、吸湿等温線と呼ばれ、各製品について特異的である。それは、製品を湿らすことによって得られたのか、乾燥させることによって得られたのかによっても異なる。典型的には、水分量の仕様には、不確かさを考慮するために、広い安全域が設定される。乾燥野菜製造者は、水分量を測定しなくてはならなかった。製造者は、水分活性を製造所で、迅速で正確に測定したかった。製造者は、製品に関して、吸湿等温線を発展させた（表参照）。



製品は含水量仕様の6%まで乾燥させなければならなかった。6%の含水量は、特異的吸湿等温線を用いると、0.462 a_w に対応している。ひとたび水分活性の測定に切り替えると、製造者は含水量をずっとよく調節できるということに気付いた。過去の水分計を用いた方法は、遅くて骨が折れるのに加え、 $\pm 0.5\%$ でしか正確でなかった。それは、製品の含水量が5.5%から6.5%まで変化することを意味していた。水分活性測定器の $\pm 0.003 a_w$ の正確度によって、ずっと高い精密度を得ることができた。製造者は、生産ライン上の $\pm 0.01 a_w$ の許容誤差を特定できた。今では、彼らの製品の含水量は、5.86 から 6.14%までしか変化しない。

吸湿等温線は、理想的には製品が最終含水量に達するような過程（ケーキは焼く、ポテトフレークは標準的な乾燥過程）を用いて、作成される。等温線の作成に関する詳しい情報は、アイネクス（株）までお問い合わせください。

水分移動

#5：フルーツケーキとフルーツシリアルの驚くべき話

食品製造者は皆、保存中、製品に何が起こるのを知っておく必要がある。常温保存可能とは、「カビが生えない」ことを意味するが、他の食品品質もまた表している。例えば、よく知られているレーズンブランの製造者を例に挙げ

てみよう。製造者と消費者はお互い、レーズンブランが、カリカリしたフレークとかみごたえのあるレーズンをもつことを期待していた。消費者は、岩のように固いレーズンをかんで歯が折れてしまい、とても驚いた。製造者は、すぐに訴訟の書類が届き、とても驚いた。幸運なことに、水分移動の問題は全てが裁判所に行き着くわけではない。しかし、もし製造者が分離した成分を含む製品を生産し販

売するのなら、製品が保存されるときに、水分がどこへ移動するのかを知っておく必要がある。

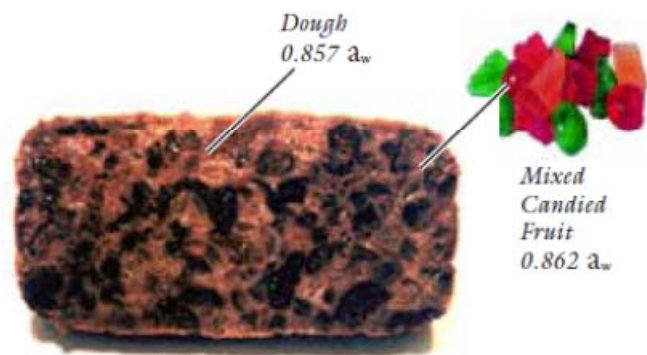
あるフルーツケーキ製造者は、時間の経過によるフルーツケーキの状況を予測したいと思っている。フルーツ片が乾燥して固くなるにつれて、ケーキが湿っぽくなるのは好ましくない。そこで、製造者は含水量を測る。ケーキは、30%の水を含み、フルーツ片は50%の水を含んでいる。その製造者は、水が平衡に達しようとしていることを知っている。したがって、水はより湿った成分（フルーツ）からより乾燥した成分（ケーキ）へと移動することを予想する。残念なことに、この製造者は見当違いなことをしている。含水量を監視し、うまくいくことを確信しているが、水分活性レベルでは、全く違った状況が起こっているのである。もし製造者が、結末を知らずにこの方法を継続するのなら、急に驚くべき結果に直面することになるだろう（この場合、乾燥しきったケーキと、水気を含んでベタツとしたフルーツである）。なぜなら、これらの含水量でケーキはフルーツ片よりも高い水分活性をもっていたからである。

この場合、含水量は気を散らすもの以外の何ものでもない。この数値に注意を向ければ、結果は、手品のように感じられる。他の力が作用しない限り、水は平衡に達しようとするのは真実である。しかし、平衡は部分的なギブス自由エネルギーが、システム中どこでも等しくなったときに達成される。水分活性は、ギブス自由エネルギーの尺度である。含水量は、水のエネルギーと全く関係はない。この概念を

- 水分移動の方向を決める。
- 水分活性の増加に従って、ほとんどの分解反応速度は上昇する。
- ほとんどの分解速度は、含水量よりも水分活性とよく相互関連している。
- 水分移動により好ましくない食感の変化が起こる。
- サクサクした食感やカリカリした食感は、 $a_w > 0.4$ で失われる。
- 柔らかさやコシは、 $a_w < 0.5 - 0.6$ で失われる。

よりよく理解するためには、二つの水のタンクを思い浮かべて欲しい。1つは、1万ガロンでほとんど満杯である。もう一つの巨大なタンクは、ほぼ空で、1ガロンしか含んでいない。水はどちらの方向に移動するだろうか？タンクの水の量に関する知識は、全くもって誤解を招いてしまう。水の容積は無関係である。水は、高い圧力から低い圧力へと移動し、満杯から空へと移動するのではない。もし、ほぼ空のタンクを、ほぼ満杯のタンクの上に置くことにより、圧力を増加させたら、その残った1ガロンの水は、すぐにその広いタンクから出ていこう。

同様に、含水量ではなく、水分活性により、製品中でどのように水が移動するのかを予測することができる。フルーツケーキ製造者は、ケーキとフルーツ片が両方とも同じ水分活性をもつようなレシピを開発すればよい。このケーキが保存され、売られても、水分に関する驚きは生じない（それは、安全で美味で、常温保存可能な製品である）。分離した成分の水分活性を知ることは、どのようにそれらを加工すればよいのかを決めるのに役立つかもしれない。水分移動問題の一つの解決法は、分離した構成成分の水分活性が同じ値になるまで、減少させるか増加させるかすることである。また、粘性を上げることにより、成分間の拡散過程を遅らせることもできる。アイスクリームのコーンの内側のチョコレートコーティングのような、食べられるバリアは水分移動を防ぐことができる。時には、同一化できない a_w の差は、別包装を必要とする。



レッスン表	a_w	含水量(%)
生地	0.857	24.5
フルーツ (混合)	0.862	52.2