Testo Food Solutions
Whitepaper
First Expired – First Out

Be sure. testo

確かな測定で見える化を。
Testo from Germany

First Expired – First Out:
FEFO（先消費先出）方式で実現する食品の品質向上とコスト削減

www.testo.com

毎年、世界で生産される食糧の30% が「農家から食卓まで」のいわゆる付加価値連鎖の中でロスしている と言われています。これは重量にして、13億トンに相当します。[1] 特に青果物に関してはそのロス率が高く、50%近くに達しています。

増加し続ける世界人口の食糧需要を満たすためには、生鮮・加工食品のロスを最小限に抑えるインテリジェント・ロジスティクスに注力する必要があります。[2]

これまで最もよく使われてきたのは、FIFO（First In - First Out 先入先出）方式で、可能な限り、先に貯蔵された在庫が先に使われる方法です。しかし青果物のような生鮮食品は、早く収穫したからといって鮮度が長持ちするわけではないので、この方法は最適とは言えません。

食品物流プロセスの効率化および食品ロスの大幅な削減は、私たちが付加価値連鎖における食品の取り扱われ方、また外部からの環境要因による食品への影響を正確に把握してこそ、初めて可能になると言えます。それを可能にする方法のひとつがFEFO (First Expired – First Out 先消費先出 ＝ 最初に賞味期限がくるものから先に出荷する) 方式です。

本書では、果物や野菜などの農産品類の熟成過程に影響を与える要因にはどのようなものがあるか、FEFOとは何か、そしてFEFOから得られるメリットについて解説します。

1. 食品品質への影響

果物、野菜、農産品の品質は、色、質感、味など、多くの特性から構成されます。また、糖度や細胞壁の構造など、製品の特性によっても大きく依存します。[3,4]

一般的に、品質は時間の経過とともに低下していきます。あらゆる努力にもかかわらず、ポストハーベスト処理によって製品の品質が向上することはありません。つまり、製品のロスを遅らせることしかできないのです。

腐敗しやすい食品の品質は、不確定要素にかかっています。時間の経過とともに、さまざまなスピードで変化していきます。生理的、物理的、微生物的、化学的プロセスは、熟成プロセスを開始させる要因の一つであり、食品ロスにも多大な影響を及ぼします。

しかし、保管、包装、輸送の条件に的を絞った介入があれば、これらのプロセスを抑制、または遅延させることができるのです。

食品の品質は、サプライチェーン全体を通して、以下の要因に影響されます。つまり賞味期限の残りを計算する際に、これらを考慮する必要があります。

- 温度
- 相対湿度
- O_2 /CO_2 濃度
- エチレン濃度
- 光（照度）
- かび

1.1. 温度

温度は、生鮮食品および加工食品における酵素作用および非酵素作用に影響を与えます。保管や輸送の温度が低いと、ほとんどの食品の賞味期限が延びます。しかし、例外もあります。例えば、トロピカルフルーツは温度に敏感で、低温になりすぎると品質に悪影響を及ぼします。一般的には、食品の賞味期限と品質を確保するために、輸送中は適切な（通常は低い）温度に設定されます。

食品のコールドチェーンについては、収穫後、あるいは畜産物では屠殺の直後から始まり、消費者の食卓に並ぶまで途切れることなく継続する、ということが理想です。参考文献の中で著者のHuelsmann と Brenner が示しているように、コールドチェーンの中断は食品の品質とロスに多大な影響を与える可能性があります。[5] 著者は、保管中または輸送中の問題について、100以上の事例を発見しました。その中で影響因子として、誤った温度管理、冷蔵室内の空気循環の阻害、急激な温度変化などを挙げています。また、船舶による輸送の場合、使用される冷蔵コンテナが目標温度に達するまでに2週間を要する場合がある、という衝撃的な事例もありました。

1.2. 相対湿度

空気中の湿度を奪う機械的な冷蔵は、食品の水分も奪い、縮みやしおれなど、外観にも影響を及ぼすことがあります。[6] 水分損失を最小限に抑えるためには、冷蔵だけでなく、適切な包装や加湿などを徹底することが必要です。
一方、湿度が高すぎると、微生物の腐敗が始まる可能性があります。湿度は、乾燥食品、水分量の多い生鮮・加工食品のいかんを問わず、食品の品質に影響を与える第二の重要なパラメータです。つまり、輸送や保管の際には、この測定パラメータを常に監視することが不可欠なのです。

1.3. O_2 /CO_2 濃度

多くの生鮮食品は、収穫後あるいは最小限の加工を施した後も、組織を維持するために活発な代謝プロセスを継続します。このような食品の代謝プロセスは、保管環境のO_2およびCO_2含有量を適切に調整することで制御することができます。O_2濃度を下げCO_2濃度を上げると、代謝速度が最低限まで下がり、食品の保存期間を延ばすことができます。[7, 8] またCO_2濃度が高いと、微生物の繁殖も抑制することができます。[9]

1.4. エチレン濃度

エチレンは、リンゴやバナナなど特定の果物や植物が収穫後に放出する植物ホルモンの一種で、特に果物の熟成度合の指標にもなっています。クリマクテリック型果実が特定のエチレン濃度にさらされると、急激に熟成が進みます。このとき、果実はエチレンを生成します。果実から発生するエチレンの量は、熟成の度合いや種類によっても異なります。従って、クリマクテリック型果実のコンテナー内のエチレン濃度は、熟成の度合いと直結しており、品質管理上、非常に重要な意味を持っています。

2. 賞味期限モデル

温度偏差が食品の品質や賞味期限に及ぼす影響は、下記の賞味期限モデルを用いて推定することができます。[10] このモデルは、アレニウスの反応速度法則 (1.1) に基づいています。これは、反応速度定数k_N の温度に対する定量的な依存性を示しています。

$$k_N = k_{RN} \cdot e^{\frac{E_N}{R_{gas}} \cdot \left(\frac{1}{T_R} - \frac{1}{T}\right)} \quad (1.1)$$

k_N= 反応速度定数
k_{RN}= アレニウス係数
EN= 活性化エネルギー
R_{Gas}= 普遍気体定数
T = 温度

複数のアレニウス条項を組み合わせることで、さまざまな果実の賞味期限や傷みやすさの度合を推定することができます (図 1)

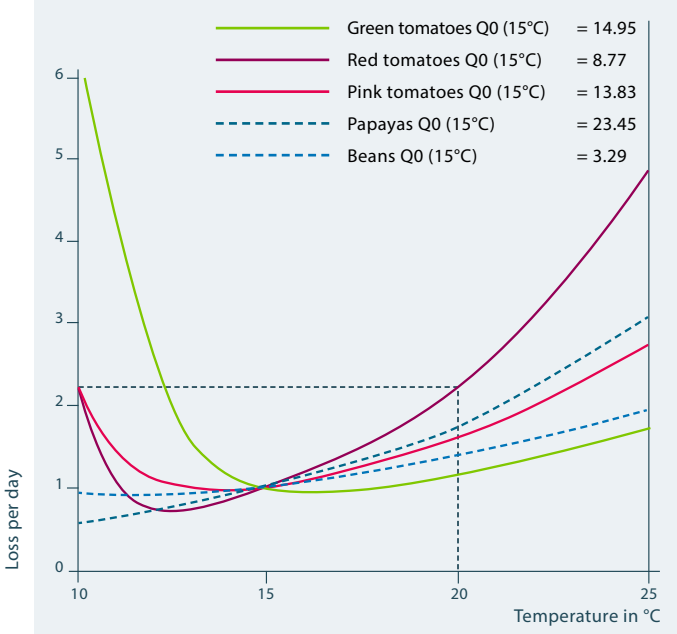

図1. フルーツの1日当りの損失[11]

賞味期限モデルは、まず食品が加工や輸送中に直面する品質の変化について、次にこの情報を倉庫管理システムにどのように実装するかについて示しています。これには、従来の先入先出（FIFO）方式から先消費先出（FEFO）方式へと重点を移すことが含まれます。これにより、サプライチェーン全体にわたるロスを防止し、常にカスタマーの要求を満たす製品を提供することができるのです。[12]

食品の品質と賞味期限のバラツキは、温度などの環境条件から自動的に計算されます。そして、倉庫管理者はこの賞味期限の違いを利用して、在庫、ルート計画、特定の商品の特別な処理の可能性に合わせて賞味期限を調整することができるのです。
これまでのところ、データを記録して賞味期限を計算する自動化されたシステムがないため、FEFOが実践で使用されることはほとんどありません。[13]

食品の実際の状態は、測定が難しいことが多く、外見で判断することはできません。例えば、赤いトマトは、あと2週間は完璧な状態であるかもしれないし、翌日にはもう腐っているかもしれません。一般的に、賞味期限の残りを直接測定することはできません。しかし、生物学的モデルを使って予測することは可能です。このモデルでは、累積的な温度値やその他の影響を計算します。[14]

課題は、食品の品質をモニタリングするこの種の自動化システムには、総合的なアプローチが必要だということです。つまり、センサーシステム、通信技術、予想生物学、食品技術の各分野のエキスパートが、輸送会社やサプライチェーンのマネージャーと協力する必要があるのです。

3. FEFOの原則

FEFO (First Expired – First Out先消費先出) 方式とは、FIFO (First In – First Out先入先出)方式とは対照的に、固定的に印刷された製造日を判断基準にせず、実際の品質（動的使用期限ともいう）を基準にする保管方法です。在庫を出荷する重要な判断基準は、賞味期限の残り期間です。この方法は、保管中のリスクを最小限に抑えることができます。またこれにより、食品が期待された品質で届けられることを保証し、輸送中の食品ロスを防ぐことも可能にします。[15]
一言で言えば、FEFO とは熟成が最も進んだ食品から先に使用する、ということなのです。

食品は非常にデリケートな商品です。特に果物や野菜に関しては、輸送中や保管中の温度差が原因で、最大で30%のロスが発生する可能性があります。正確な温度管理とモニタリングに加え、FEFO方式を採用することで、ロジスティクスチェーン全体でロス率を大幅に削減することができます。[16] FEFOでは、各パレットまたは出荷単位ごとの品質または残存賞味期限を、センサーベースの適切なモニタリングによって評価することができます。

3.1. FEFOの方法

在庫から出荷される食品は、残りの賞味期限が残りの輸送期間と一致していなければなりません。つまり、賞味期限の短い食品はすぐ近くの購買者にできるだけ早く出荷され、賞味期限の長い食品はより遠くの購買者に向けて出荷されたり、後日出荷されるために保管されたりします。これはLangらによって初めて使われた「ダイナミックFEFO」という用語で示されています。[17] これにより、食品の配送割り当ては固定されておらず、新しい情報や賞味期限の変動によりいつでも調整可能である、ということが示されています。

3.2. ロス削減

収穫時のコンディションは決して同じではありません。また、冷蔵開始までの時間も、冷蔵コンテナ・車両内の条件と同様、常に一定ではありません。そのため、生鮮食品の品質にバラツキが生じるのは避けられないことですが、食品の品質をモニタリングし、FEFOを活用することで、輸送管理や保管中のロスを削減することはできます。

下図の棒グラフ（図2）は3つの研究による異なる種類の食品ロスの比較を示しており、食品の種類によっては8〜15%の削減が可能であることがわかります。ただし、これにはパレット単位での温度・品質モニタリングがその前提条件となります。

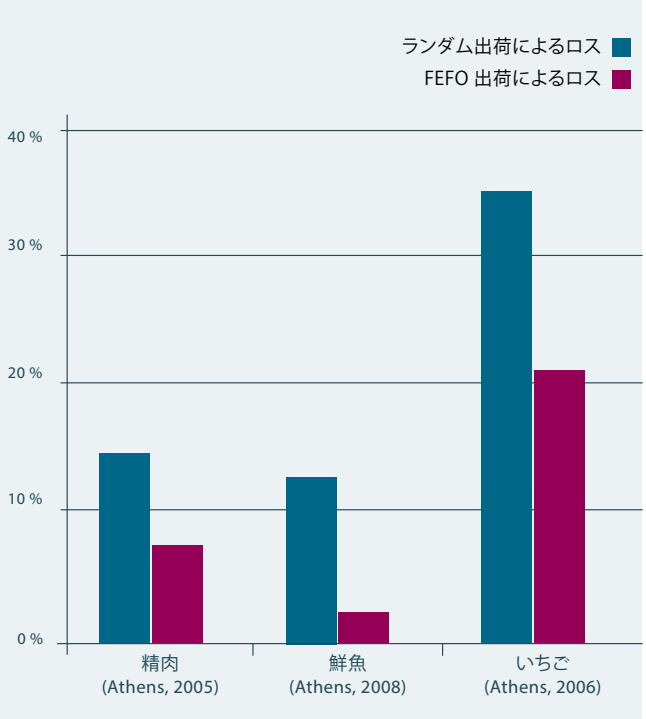

図2. 3つの研究による異なる種類の食品ロス比較 [18]

ロスの削減は、FEFOで品質の低下（バラツキ）が最小になることにより実現されます。その一方、品質の平均値は原理的に改善することができません。

しかし、バラツキが小さくなることで、品質が許容範囲を下回る食品の割合が減少することがわかります (図3の赤色部分)。

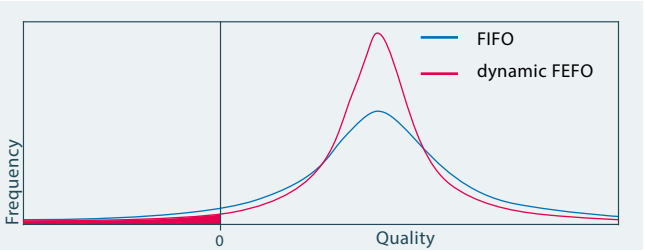

図 3. ダイナミックFEFO効果による許容範囲を下回る品質の製品割合[19]

3.3. FEFO のメリット

- 輸送中の製品ロスの低減
- 生産者のコスト削減
- 腐敗した食品の輸送がなくなることによる環境汚染の削減
- 製品品質のバラツキを削減し、カスタマーにより高い品質の製品を安定的に提供可能
- カスタマーの手元に届くまで新鮮さを保ち、廃棄食品の削減
- プロセスチェーンに関わるすべての人がより多くの利益を享受

4. Testo – 食品安全のエキスパート

Testo SE & Co.KGaA

Testo (Testo SE & Co.KGaA) は、ドイツのシュヴァルツヴァルト (Schwarzwald/黒い森)のティティゼー-ノイシュタット (Titisee-Neustadt)に本社を置き、ポータブルおよび固定測定ソリューションの環境計測器のメーカーとして、この分野での世界のマーケットリーダーです。現地法人、グループ子会社および地域総代理店は世界96か国でビジネスを展開しており、3,000人を超える従業員が研究開発、製造、販売などに従事しています。

Testoは、高精度の環境計測器とデータ管理のソリューションを提案することにより、省エネルギー・安全管理・環境保全・フード&ヘルスケアなどの幅広い分野で、高い評価を受けてまいりました。

食品分野では、Testoの幅広い測定技術、ソリューション、サービスを、生産者、スーパーマーケット、レストランおよびケータリング事業者に日々ご利用いただいており、食品の安全と品質に関し必要不可欠な存在となっています。

株式会社テストー

株式会社テストーはTestoの日本法人として設立されました。横浜に本社、営業拠点、サービスセンターを設け、テストー製品の国内販売から校正試験、測定器の修理やメンテナンスなどを行っています。

詳しくは www.testo.com をご覧ください。

5. 参考文献

[1] Gustavsson J, Cederberg C, Sonesson U, van Otterdijk R, Meybeck A. 2011. Global food losses and food waste, extent, causes and prevention, p. 29 Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

[2] Jedermann R, Nicometo M, Uysal I, Lang W. 2014. Reducing food losses by intelligent food logistics. Phil. Trans. R. Soc. A 372, 20130302 (doi:10.1098/rsta.2013.0302) [PMC free article] [PubMed].

[3] Sloof M, Tijskens LMM, Wilkinson EC. 1996. Concepts for modelling the quality of perishable products. Trends Food Sci. Technol. 7, 165–171 (doi:10.1016/0924-2244(96)81257-X).

[4] Shewfelt RL. 1999. What is quality. Postharvest Biol Technol 15, 197–200 (doi:10.1016/S0925-5214(98)00084-2).

[5] Huelsmann M, Brenner V. 2011. Causes and effects of cold chain ruptures: performance of fragmented versus integrated cold chains. Bremen, Germany: Jacobs University Bremen.

[6] Maguire KM, Banks NH, Opara LU. 2001. Factors affecting weight loss of apples. Hortic. Rev. 25, 197–234.

[7] Kader AA. 1986. Biochemical and physiological basis for effects of controlled and modified atmospheres on fruits and vegetables. Food Technol. 40, 99–104.

[8] Geysen S, Escalona VH, Verlinden BE, Nicolai BM. 2007. Modelling the effect of super-atmospheric oxygen and carbon dioxide, concentrations on the respiration of fresh-cut butterhead lettuce. J. Sci. Food Agric. 87, 218–226.

[9] Hertog MLATM, Boerrigter HAM, Van den Boogaard GJPM, Tijskens LMM, Van Schaik ACR. 1999. Predicting keeping quality of strawberries (cv 'Elsanta') packed under modified atmospheres: an integrated model approach. Postharvest Biol. Technol. 15, 1–12.

[10] Hertog MLATM, Uysal I, McCarthy U, Verlinden BM, Nicolaï BM. 2014. Shelf life modelling for first-expired-first-out warehouse management. Phil. Trans. R. Soc. A 372, 20130306.

[11] Fig. 1:
Lang W, Jedermann R, Mrugala D, Jabbari A, Krieg-Brückner B, Schill K. 2011. The intelligent container: a cognitive sensor network for transport management. IEEE Sens. J. Spec. Issue Cogn. Sens. Netw. 11, 688–698.

[12] Blackburn JD, Scudder GD. 2009. Supply chain strategies for perishable products; the case of fresh produce. Prod. Oper. Manage. 18, 129–137.

[13] Jedermann R, Nicometo M, Uysal I, Lang W. 2014.

[14] ibid.

[15] ibid.

[16] ibid.

[17] Lang W, Jedermann R, Mrugala D, Jabbari A, Krieg-Brückner B, Schill K. 2011. The intelligent container: a cognitive sensor network for transport management. IEEE Sens. J. Spec. Issue Cogn. Sens. Netw. 11, 688-698.

[18] Fig. 2:
Koutsoumani K, Taoukis PS, Nychas GJE. 2005. Development of a safety monitoring and assurance system for chilled food products. Int. J. Food Microbiol. 100, 253–260
Emond JP, Nicometo M. 2006. Shelf-life prediction and FEFO inventory management with RFID. In Cool Chain Association Workshop: Temperature Measurements: When, Where and How? Knivsta, Sweden, 13–14 November 2006. Bremen, Germany: Cool Chain Association
Tsironi TE, Gogou P, Taoukis PS. 2008. Chill chain management and shelf life optimization of MAP seabream fillets: a TTI based alternative to FIFO. In Cold Chain-Management, 3rd Int. Workshop, Bonn, Germany, 2–3 June 2008, pp. 83–89 Bonn, Germany: University Bonn
Tromp S-O, Rijgersberg H, Pereira da Silva F, Bartels P. 2012. Retail benefits of dynamic expiry dates: simulating opportunity losses due to product loss, discount policy and out of stock. Int. J. Prod. Econ. 139, 14–21.

[19] Fig. 3:
Labuza TP, Taoukis PS. 1990. The relationship between processing and shelf life. In Foods for the 90s (eds Birch GG, Campbellplatt G, Lindley MG, editors.), pp. 73–106 New York, NY: Elsevier Applied Science.

＊本カタログの内容は、予告なく変更される場合があります。本カタログの掲載内容は2022年8月現在のものです。

株式会社 テストー www.testo.com

〒222-0033 横浜市港北区新横浜2-2-15 パレアナビル7F TEL.045-476-2544(代表)
● セールス TEL.045-476-2288 FAX.045-476-2277
● サービスセンター(修理・校正) TEL.045-476-2266 FAX.045-393-1863
● ヘルプデスク TEL.045-476-2547

ホームページ https://www.testo.com e-mail info@testo.co.jp

(Ver.1)(2022.08)