

予測微生物学

食品中での微生物の増殖、死滅などの挙動を数学モデルを用いて予測しようとする研究が 1980 年代後半から欧米を中心に活発に行われてきた。この研究分野は予測食品微生物学と呼ばれている。その目的は食品の製造から流通、消費に至る全過程で有害(病原および腐敗)微生物の挙動を定量的に解析・予測することによって、食品の微生物学的安全性を確保することである。

増殖および死滅による微生物数の変動に対して純粋に理論的な数学モデルを作り上げることは不可能であるため、予測微生物学ではいかに実際の微生物の挙動をモデルによってフィットするかが鍵となる。WhitingとBuchananは、予測微生物学においてよく使用されている増殖モデルを、その内容から3つのグループに分類した。すなわち、第1段階として菌数の時間的変化を表す基本モデル、第2段階として各種の環境条件によって基本モデルの各パラメータ値がどのように変化するかを表すモデル、第3段階として第1、第2段階モデルを統合した最終モデル、すなわちエキスパートモデルがある。

a. 増殖モデル

(i)基本モデル

ある一定温度下の食品あるいは液体培地中で微生物が増殖すると、菌数は時間と共に増加して、片対数グラフ上でS字型曲線を描くことが一般に知られている。このS字型曲線を表すモデルとして改変したゴンペルツモデルおよびバラニーモデルが現在よく知られている。また、Fujikawaraは最近ロジスティックモデルを基に新ロジスティックモデルを提唱した。定常温度下では3モデルは良く一致し(図1)、変動温度でもバラニーモデルと新ロジスティックモデルは良く一致した。

(ii)環境要因モデル

環境要因としては、温度、pH、水分活性、塩類濃度、ガス分圧などが挙げられる。これらの要因が基本モデルにおける増殖速度定数(対数増殖期の傾き)、タイムラグ、最大菌濃度などに及ぼす影響を数量化、モデル化している。

環境要因の中でも最も重要な要因である温度と増殖速度定数に関しては、アレニウスモデルおよび平方根モデルの2つが一般に使われている(図2)。平方根モデルは拡張してpH、水分活性などの要因も導入することができる。多種類の環境要因の影響を表わす手法として、応答曲面法も使われている。

b. 死滅モデル

(i) 基本モデル

ある温度での微生物の生残率(対数)は時間とともに一般に直線的減少を示す。しかし、実際の食品中での熱死滅はこれから逸脱することもみられるため(図3)、新たに数多くのモデルが提唱されている。

加熱による微生物の直線的死滅には次の2種のモデル、すなわち殺菌工学モデルと化学反応モデルが以前から用いられている。前者では熱死滅を対数を用いて捉え、ある温度で生残数が1/10になる時間をD値(分)とよぶ。本モデルは直観的に理解しやすく、一般によく用いられている。化学反応モデルは微生物の直線的死滅を1次化学反応と考えている。本モデルではシナリオに沿ったモデルを作ることができる。さらに、予測微生物学モデルとして改変ゴンペルツ式など前述した増殖モデルがしばしば使われている。最近ではWeibull分布関数も用いられている。

一方、食品を常温で保管中、食品の環境要因(pH、食塩、有機酸など)によって汚染微生物が徐々に死滅する場合に対しても、改変ゴンペルツモデルなどが適用されている。

(ii) 環境要因モデル

熱死滅に関して最も重要な環境要因は当然、温度である。殺菌工学モデルでは、D値が1/10(または10倍)となるような温度変化量をZ値()とよぶ(図4)。対象微生物についてそのZ値と対照温度でのD

値が求められれば、ある温度におけるD値が求められる。化学反応モデルでは、死滅の速度定数の温度依存性はアレニウスモデルが一般に使われている。また、複数の環境要因の影響は、多項式を使って解析されるか、平方根モデルを用いることが多い。

c. エキスパートモデル

このモデルは今まで述べてきた基礎モデルと環境要因モデルの上に位置する、最終的で総合的なモデルである。ここでは食品に関する各種の初期条件を入力することによってコンピュータに計算させ、その結果を瞬時にグラフ化し、また各種パラメータ値を得ることができる。このようなシステムとして現在入手できるものとして、アメリカ農務省の病原菌モデルプログラムがあり、インターネットを通じて無償で分与を受けることができる(<http://ars.usda.gov/service/docs.htm?docid=6786>)。また、国際的なデータベースとして現在Combase (<http://wyndmoor.arserrc.gov/combase/>)がある。

d. 決定論モデルと確率論モデル

予測微生物モデルを決定論モデルと確率論モデルに分けることもできる。前者はこれまで述べてきたような微生物数の時間的変動を数式で表すものである。後者としてはある事象(増殖・死滅)が起きるか否かがある確率に従って起こるとするモデルである。また、決定論モデル中の係数値がある確率に従った分布をとるという確率論モデルもある。

予測モデルを用いる場合、モデル内の変数、係数は1つの値で代表することは難しく、ある範囲内で変動する、すなわち変動性に注意が必要である。また、それらの変数、係数は様々な要因のため、まだ不確定な部分を持つことに留意する必要がある。

e. 予測微生物学モデルの応用

(i) HACCP システム

予測微生物学モデルは食品衛生管理システムである HACCP システムに活用できると考えられる。具体的には、Critical Control Point の決定およびその許容限界値の設定、逸脱した製造条件の製品の処分、HACCP システムの評価が考えられる。

(ii) 微生物学的リスク評価

微生物学的リスク評価の一連の過程で、食品中の特定された病原微生物の菌数が製造から喫食に至る各過程においてどのように変動するかを求めるために、予測モデルが適用できる。すなわち、喫食者に摂取される病原菌数を推定する暴露評価に使われる。具体的な使用例については、FAO/WHO (www.who.int/foodsafety/publications/micro/en/index.html)、アメリカ FDA (www.foodsafety.gov/dms/fs-toc.html#risk) などの機関からインターネットで情報入手できる。アメリカ FDAの生ガキ中の腸炎ビブリオに関するリスク評価では増殖モデルとしてBuchananらの3相対数モデルが使われている。

(iii) 微生物増殖予測システム

食品の製造・流過程における微生物増殖を監視する増殖予測システムにも応用できる。すなわち、連続温度測定器と組み合わせて食品の温度履歴から微生物増殖を予測する。

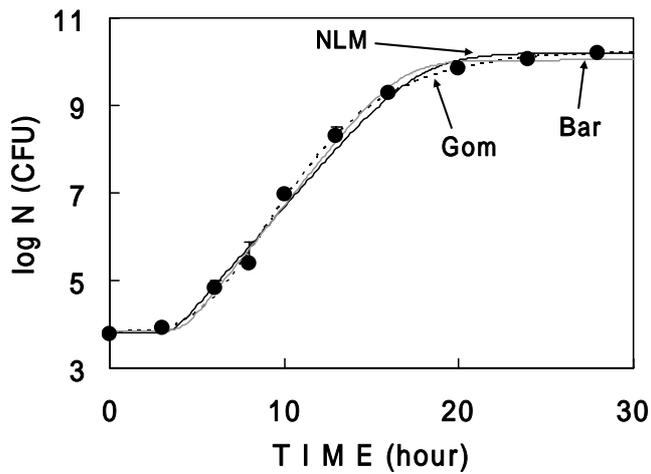


図1. 増殖モデルの比較: 大腸菌の栄養寒天表面上の増殖(26)
 NLM、Gom、Bar はそれぞれ新ロジスティックモデル、ゴンペルツモデル、バラニーモデルを示す。黒丸は実測値を表す。

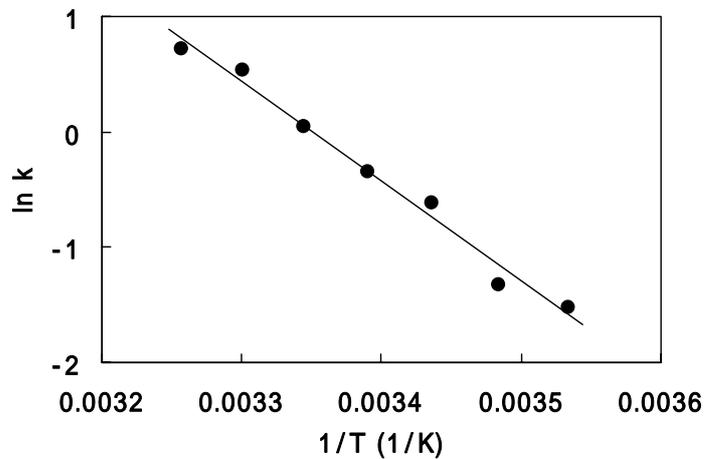


図2. アレニウスモデル.
 大腸菌の栄養寒天表面上の増殖速度定数kの自然対数値を、絶対温度(摂氏温度+273)の逆数でプロットしたもの。黒丸は実測値を、直線は回帰直線を表す。

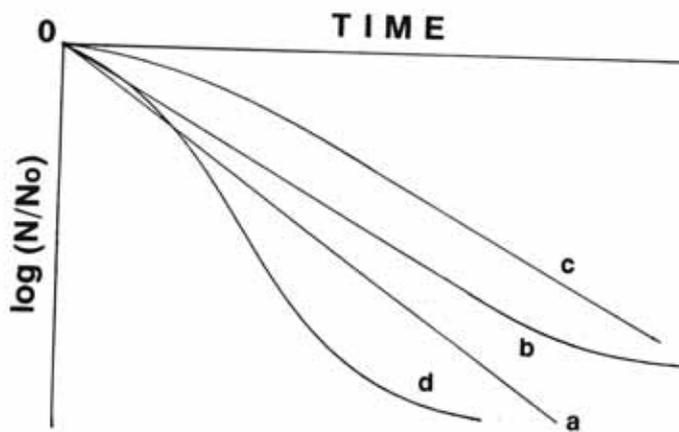


図3. 各種の熱死滅曲線.

a. 直線的(対数)死滅曲線、b. テールのある曲線、c. 肩のある曲線、d. 肩とテールのある曲線.

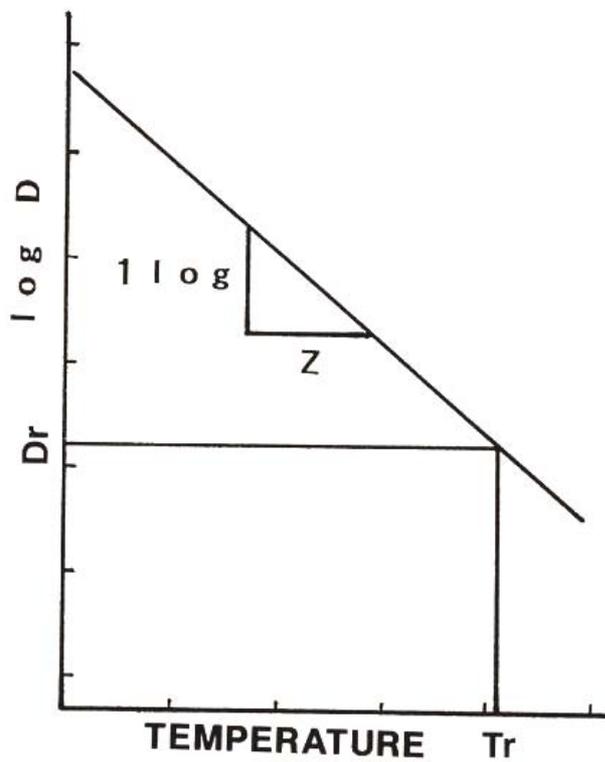


図4. Z値とD値の関係. T_r は基準温度、 D_r は T_r でのD値を示す。