



室蘭工業大学

学術資源アーカイブ

Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive



Maxwell

モデルを応用した道産中力小麦生地が発酵時における膨張シミュレーション

メタデータ	言語: jpn 出版者: 北海道開発技術センター 公開日: 2012-08-30 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 河合, 秀樹, 田中, 文武, 高橋, 洋志, 山内, 宏昭 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/1605

Maxwell モデルを応用した道産中力小麦生地が発酵時における膨張シミュレーション

その他（別言語等）のタイトル	Expanding Simulation of Middle strong Domestic Flour Dough in Fermentation by using Maxwell 2 Element Model
著者	河合 秀樹, 田中 文武, 高橋 洋志, 山内 宏昭
雑誌名	寒地技術論文・報告集
巻	23
ページ	61-65
発行年	2007
URL	http://hdl.handle.net/10258/1605

CTC07-I-011

Maxwell モデルを応用した道産中力小麦生地が発酵時における膨張シミュレーション

河合秀樹*, 田中文武*, 高橋洋志*, 山内宏昭**
 *室蘭工業大学機械システム工学科
 **独立行政法人農業食品産業技術総合研究機構北海道農業研究センター

Expanding Simulation of Middle Strong Domestic Flour Dough in Fermentation by using Maxwell 2 Element Model
 Hideki KAWAI*, Fumitake TANAKA*, Hiroshi TAKAHASHI*, Hiroaki YAMAUCHI**
 *Muroran Institute of Technology
 **National Agricultural Research Center for Hokkaido Region



1. 研究目的

国内の小麦生産量は年間約 80 万トンに上るが、その大半は中力粉であり、寒冷地北海道・東北などに集中している。中力粉の代表銘柄である「ホクシ」は収穫量が多く、雪腐小粒菌核病、紅色雪腐病などに対する抵抗性を有し、且つ耐雪性に優れる。このため作付面積は総面積の 48%に上り、特に広大な北海道での人気は高い。しかし近年、食の欧米化に伴いパンやラーメンなどコシの強い強力粉が支配的になり、国産中力粉の需要は低迷している。強力粉の国内生産はほとんどなく、大半は輸入に頼るのが現状である。そこで食の安全を保障し、国内小麦生産の安定化を図るためにタンパク含有量が強力粉よりも高い「超強力粉」を育成し、中力粉とブレンドさせる方法が模索されている^{(1),(2)}。これより強力粉市場へ参入できれば国内中力粉の用途は大きく広がる。すでに有力な国産超強力粉の試験的栽培が行われ、そのブレンドによる国産パン製法の開発にも重点が置かれている。しかし、ブレンド小麦による生地の安定性については不明な点も多く、そのレオロジー特性の評価法が今後より重要になるものと予想される。最近の研究⁽³⁾によれば、焼成時におけるパン膨張特性と生地のレオロジー特性に明確な相関があることが報告されている。この結果は従来から経験的に言われてきたことであるが、パンの膨張特性が瞬間弾性係数、定常粘性係数、遅延弾性係数などの物性値と関連付けられたため、今後生地のブレンド特性を把握する上で、より具体的な相関性を得ることができると考えられる。

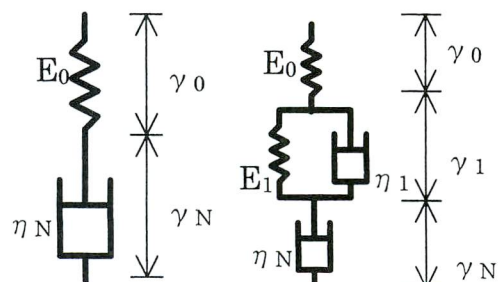
一方これらの知見は、パンの膨張性と発酵時における生地内部の動的な力学特性にも相関があることも示唆している。経験的にも生地発酵時の内部応力が焼成時膨張性に大きく関与することが言われているが、このことについて実測定されまとめられたデータはほとんど見当たらない。こ

れらの相関が数値として得られれば、レオロジー物性の低い生地でも、生地膨張時の内部応力を制御すれば、改善された焼成パンを作ることができる可能性がある。

このような背景から、ここでは線形粘弾性モデルを用いてパン生地の膨張時に生じる内部応力を計算できるシミュレーションを構築する。生地の物性値を基本データとして本シミュレーションを実行することにより、それぞれの発酵速度に対して生地の内部応力が計算できれば、より定量的な指標が確立されると考えられる。

線形モデルについては Maxwell-2 要素モデル⁽⁴⁾と Kelvin-4 要素モデルを試行し、単純な Maxwell-2 要素モデルでも瞬間弾性係数を補正すれば Kelvin-4 要素モデルと同等の精度で内部応力を求めることができることを示す。これより、発酵速度と発酵時間の調整によって得られる最終発酵時応力が求められ、パン生地および焼成パンの膨張量がこの応力値によって相似的に整理できることを示す。

2. 解析モデルと解析条件



(a) Maxwell model (b) Kelvin model

Fig.1 Linear models

第23回寒地技術シンポジウム(2007)

本解析で使用する線形粘弾性モデルを Fig.1 に示す。Fig.1-(a) はバネとダッシュポットから構成される Maxwell-2 要素モデル(Maxwell モデルと略)で、Fig.1-(b) は Maxwell-2 要素モデルの中にバネとダッシュポットを並列に組み入れた Kelvin-4 要素モデル(Kelvin モデルと略)である。図中 E_0 は瞬間弾性係数、 E_1 は遅延弾性係数、 η_N は定常粘性係数、 η_1 は遅延粘性係数と呼ばれる。一般的に遅

延弾性を伴う応力変化の場合、Fig.1-(b)の Kelvin モデルが詳細な情報を与える。本解析でもパンの膨張変化は遅延弾性が顕著に含まれるため Kelvin モデルによる物性値の評価が一般的には妥当である。

尚、両モデルとも上下端を応力 $\sigma(t)$ [t は時間] で引っ張ることで膨張応力を表す(引張速度=C)。歪を γ とすれば Maxwell モデルに基づく膨張応力は次式で求められる。

$$\sigma(t) = \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right) \left[T_0 + E_0 \int_0^t \dot{\gamma}(t') \exp\left(\frac{t'}{\tau_0}\right) dt' \right] \quad \text{-----(1)}$$

ただし、 T_0 は初期応力で、今回は 0 とした。一方、Kelvin モデルでは膨張応力は

$$\sigma = E_0 \gamma_0 \quad \text{(instantaneous modulus area)-----(2)}$$

$$\sigma = E_1 \gamma_1 + \eta_1 \frac{d\gamma_1}{dt} \quad \text{(retardation area)-----(3)}$$

$$\sigma = \eta_N \frac{d\gamma_N}{dt} \quad \text{(regular viscosity area)-----(4)}$$

で表される。 γ_1 は Fig.1-(b)における歪 γ_1 で、初期条件 $t=0$ において $\gamma_1=0$ 、 $d\gamma_1/dt=0$ を仮定すると、次式に示される微分方程式が得られる。

$$\frac{\eta_1}{E_0} \frac{d^2 \gamma_1}{dt^2} + \left(\frac{E_0 \eta_1 + E_0 \eta_N + E_1 \eta_N}{E_0 \eta_N} \right) \frac{d\gamma_1}{dt} + \frac{E_1}{\eta_N} \gamma_1 = \frac{C}{a_0 + Ct} \quad \text{-----(5)}$$

なお、Fig.4 以降の解析結果については、Bloksma⁽⁴⁾ にしたがって応力に試料断面積 $S(t)$ をかけた、

$$Fz(t) = \sigma(t) S(t) \quad \text{-----(6)}$$

で表すことにする。

解析銘柄として、超強力粉には国産試験栽培品である Victoria-INTA、強力粉にはカナダ産銘柄 Cameriya を使用し、それぞれ膨張剤(ASA)を 100ppm 添加した。また中力粉には北海道産銘柄である Hokushin を使用し、同じく膨張剤 ASA を 100ppm 添加した。これと同等のレオロジー特性を持つ試験品として Cameriya に還元剤(GSH)を 100ppm 添加させたものを使用した。生地中の水分添加量は生地 100g に対して、Victoria-INTA は 64ml、Cameriya、Cameriya (GSH) はそれぞれ 66ml、Hokushin は 60ml とした。混練生地のサンプル直径は 93mm で、高さは 14mm、Yeast 菌 1, 2, 3% に対する膨張速度 C はそれぞれ実測値にあわせて、 $C=0.0038\text{mm/s}$ (Proof-time=8880s), 0.0065mm/s (Proof-time= 5280s), 0.0109mm/s (Proof-time=3060s) とした。Maxwell モデルの解析には数値積分を使用し、Kelvin モデルには Runge-Kutta 法を用いた。

Table1 Coefficients derived from Kelvin 4-element model

	Victoria-INTA	Camellia-ASA	Camellia-GSH	Hokushin
E_0 [Pa]	4.84E+03	4.99E+03	4.22E+03	2.00E+03
η_N [Pa·s]	2.01E+06	1.75E+06	5.32E+05	4.29E+05
τ_0 [sec]	4.14E+02	3.50E+02	1.29E+02	2.15E+02

Table2 Coefficients derived from Maxwell 2-element model

	Victoria-INTA	Camellia-ASA	Camellia-GSH	Hokushin
E_0 [Pa]	1.04E+04	1.25E+04	1.26E+04	6.60E+03
E_1 [Pa]	9.11E+03	8.38E+03	6.40E+03	2.87E+03
τ_1 [sec]	3.60E+00	4.50E+00	6.00E+00	7.33E+00
η_1 [Pa·s]	3.23E+04	3.74E+04	3.73E+04	2.11E+04
η_N [Pa·s]	2.01E+06	1.75E+06	5.32E+05	4.29E+05
τ_0 [sec]	1.92E+02	1.42E+02	4.26E+01	6.55E+01

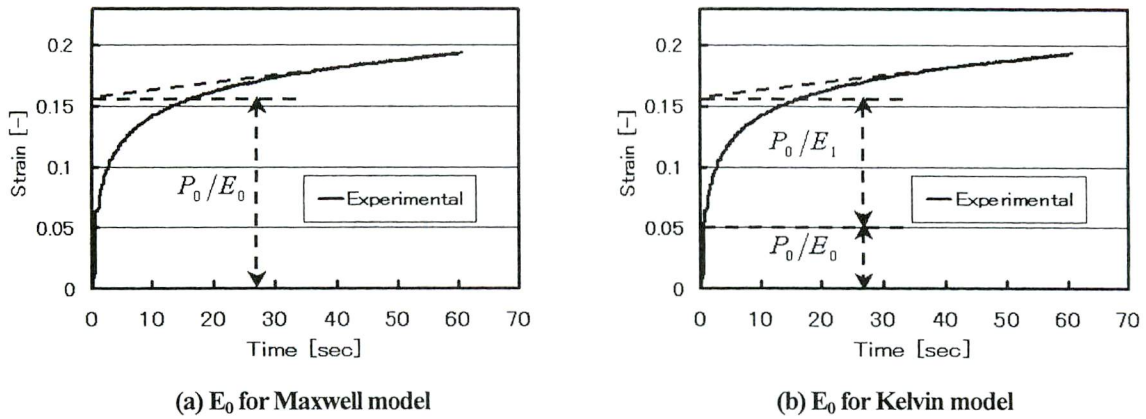


Fig.2 Creep curve (Victoria-INTA, Constant stress 499Pa)

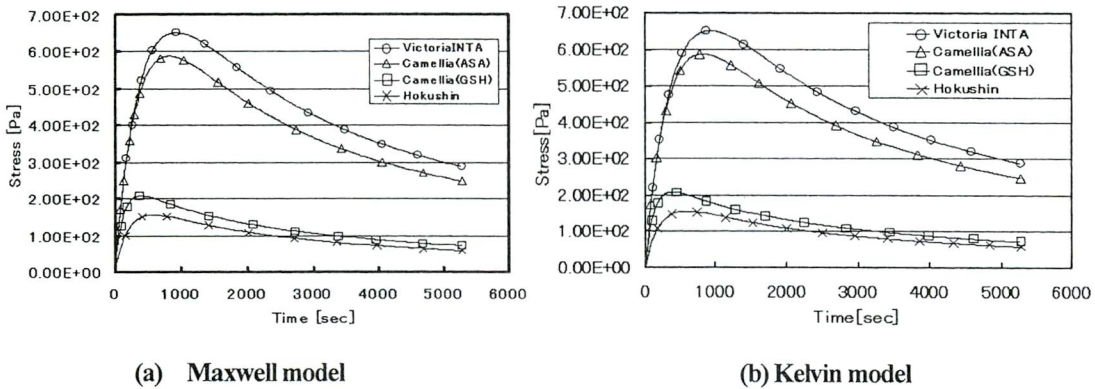


Fig.3 Stress relaxation curve (Yeast 2%)

3. Maxwell モデルと Kelvin モデルの解析結果 (同等性について)

Fig.2 には超強力粉(Victoria-INTA)から得られたパン生地
のクリープ曲線を示した. Fig.2-(a)と(b)は同じ測定結果で,
 $t=0$ で瞬間弾性によって瞬時に立ち上がり, その後遅延弾性
領域を経て直線近似できる定常粘性領域に至る. ところが,
Maxwell モデルでは遅延弾性領域をモデル化できない. そこ
で, 定常粘性領域の直線を $t=0$ まで延長させ, $t=0$ の交点の
高さをそのまま瞬間弾性値として定義した[Fig.2-(a)]. Kelvin
モデルでは瞬間弾性値と遅延弾性値に分けられ, それぞれ
Fig.2-(b)のように定義される. これらの値を使用して, Maxwell
モデルおよびKelvinモデルで解析した結果をFig. 3に示した.
ただし, 生地の膨張速度($\dot{\epsilon}$)は Yeast 菌 2%に相当する
 $\dot{\epsilon}=0.0065\text{mm/s}$ とした. これより, 上記の定義に基づいて物性
値を定義した場合, Maxwell モデルと Kelvin モデルにほとん
ど差が生じないことが分かる. 遅延弾性部をすべて瞬間弾性
と定義することに問題は残るものの, 本解析のように膨張過
程が長時間にわたる場合, 生地の膨張過程は遅延弾性領域に
あまり大きく影響されなかった. すなわち, 生地の膨張過程
は定常粘性領域が支配的であり, $t=t_0$ における Strain 値を
瞬間弾性値と定義した Maxwell 近似でも十分使用できるもの
と思われる. 初期条件や解析の煩雑さを考慮すれば, 今後こ
の定義に基づく Maxwell モデルを使用する方が実用的である

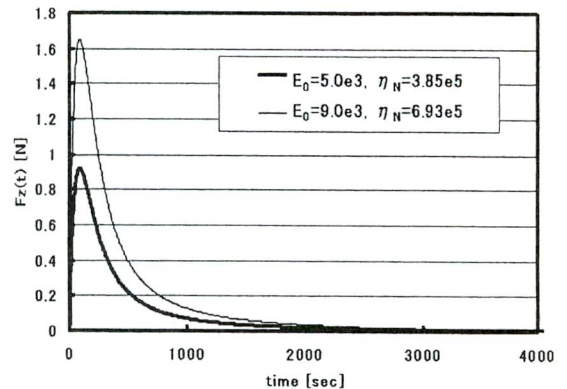


Fig.4 $F_z(t)$ with different E_0 and η_N , but same τ_0

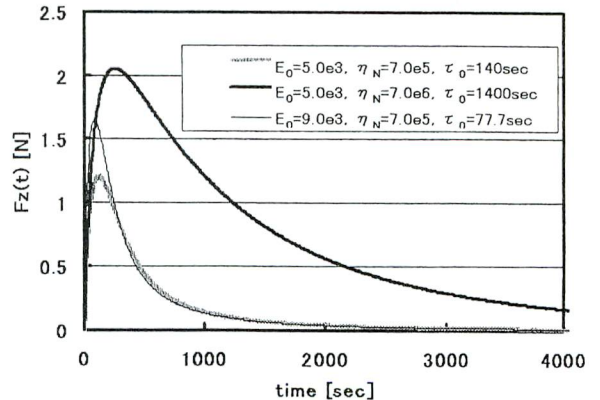


Fig.5 $F_z(t)$ with different E_0 and η_N

と考えられる。

4. 解析結果および検討

Fig.3 は、前述のように解析モデルの同等性を示すと同時に、それぞれ小麦銘柄 Victoria-INTA, Cameriya-ASA, Camerya-GSH, Hokushin 生地における膨張時応力緩和曲線を示している。これより、超強力粉、強力粉(+膨張剤)、中力粉の生地の順に応力緩和が減じられている様子が明確に分かる。特に中力粉(ホクシン)や強力粉生地でも還元剤(GSH)を入れた生地では低応力で推移している。超強力粉生地である Victoria-INTA はこれらの銘柄の中では確かに最も高い応力曲線を示すが、外国産 Cameriya-ASA に接近されており、超強力粉としてのブレンドには未だ検討を要する可能性がある。

Fig.4 および Fig.5 は Maxwell モデルから得られた Hokushin の物性値を基本に、 E_0 と η_N を変化させて初期の立ち上がりを含めた膨張力 $F_z(t)$ の時間変化を示した。

Fig.4 では同じ時定数 $\tau_0 (= \eta_N/E_0)$ を持つ生地でも、 E_0 および η_N の絶対値が大きい生地の方が、膨張力の初期の立ち上がりが鋭いことを示している。しかし、その一方でピークからの減衰も著しく大きく、トータル時間においては同じような緩和曲線を描く。Fig.5 では、 η_N を一定にして E_0 の値を2倍近くにした場合と、 E_0 の値を一定にして η_N の値を10倍にした場合の膨張力曲線を示した。 E_0 が高い生地ほど硬さが増すため、同じ膨張速度を維持するためには大きな膨張力が必要になる。しかし η_N が同じ場合は、膨張力のピークを過ぎた後の緩和曲線はよく似た現象を示している。更には E_0 が同じ生地でも η_N が10倍に増加すれば膨張力の緩和曲線に大きく影響を与え、減衰度は大きく押さえられ、高い膨張力を維持しながら徐々に緩和されていくことが分かる。これより高い膨張力を維持するためには η_N の大きな生地を作製することが重要である。

Fig.6 は膨張速度を3倍に上げた場合の膨張力緩和曲線を通常の膨張速度の場合と比して示した。ただし、この物性値では、膨張速度が3倍になれば、立ち上がり時の膨張力はそれにつれて高いピークを示すものの、ピークを過ぎた後の減衰も著しく、むしろ通常の膨張速度の場合よりも早い段階で膨張力の絶対値が減衰した。したがって、最初から高い膨張力を意図して Yeast 菌を多く投入しても、生地の物性によっては必ずしも高い膨張力を保持できるとは限らない場合があることが示唆される。

Fig.7 には Maxwell モデルにより測定され、Table3 に示された生地の物性値を基本に、本法の膨張シミュレーション(Maxwell モデル)を実用化した結果を示す。Yeast 菌が投入され、前述のようにそれぞれの膨張速度に応じて Proof-time が決定される。Proof-time は生地の発酵終了時間であり、そのとき膨張シミュレーションで得られた応力値を最終発酵時応力値 (σ_{end}) とする。Fig.7 では Yeast 菌投入量(膨張速度)

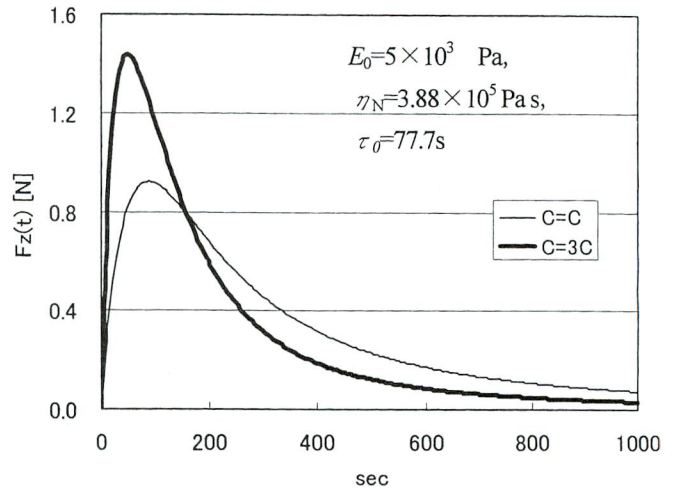


Fig.6 $F_z(t)$ with different expansion speed

Table3 The physical properties of bread dough¹⁾

Dough Samples ²⁾	$E_0(X10^3N/m^2)$	$\eta_N(X10^5Pa.s)$	$\tau_0(X10^2s)$
Camellia, ASA100ppm	4.215	12.232	2.910
Camellia, ASA0ppm	4.371	9.138	2.087
Camellia, GSH50ppm	3.333	5.577	1.675
Camellia, GSH100ppm	3.347	4.761	1.427

¹⁾Data are shown in mean (N=10). Physical properties were measured using no yeast dough.
²⁾ASA:L-ascorbic acid, GSH:reduced glutathione.

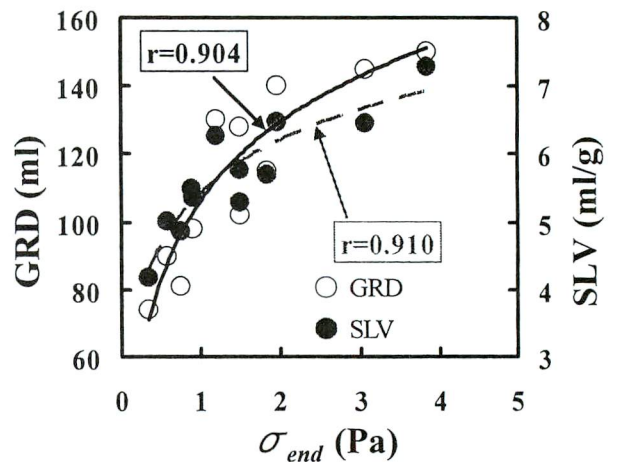


Fig.7 The relationship between σ_{end} and GRD or SLV
 The lines are log approximate curves

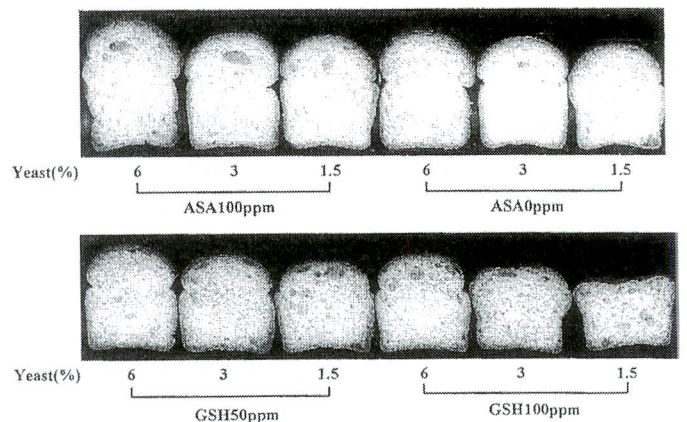


Fig.8 The copy of breads made from 4 types dough added 3 levels of yeast

第23回寒地技術シンポジウム(2007)

を変えて σ_{end} を計算し、SLV(Specific Loaf Volume)並びにGRD(Gas Retention of Dough)との関係を示した。この図から、SLV、GRDとも σ_{end} で整理するとそれぞれ一本の曲線で表されることがわかる。この結果、例えばレオロジー物性値の劣化した生地でもYeast菌の投入量を変化させて高い σ_{end} をキープできれば、焼成時パンの膨張性が改善される可能性がある。すなわち加工方法によってもある程度膨張性が改善できることが期待される。Fig.8は本シミュレーションによって得られたデータをもとにイースト菌投入量を変化させて同じ物性値のパン生地から焼成させた例を示した。本ケースの場合、イースト菌の投入量に比例して、パンの膨張量も確保される。

5. 結 言

瞬間弾性係数を補正することにより生地膨張時における応力シミュレーションをMaxwellモデルでKelvinモデルと同程度に実施できることを示した。これより得られた発酵最終時の応力 σ_{end} でSLV並びにGRDを一本の曲線で相似的に表示できることがわかった。レオロジー物性の低い国内産生地を超強力粉とブレンドし、焼成時パンの物性を改善する方法の一つとして、 σ_{end} を指標とする膨張速度等のコントロール法が考えられる。

参考文献

- (1) 山内宏昭ほか：超強力小麦粉のパン、麺への新利用技術、食品工業、43、(2000)、pp31-38
- (2) 入来規雄・高田兼則・山内宏昭・一ノ瀬靖則・桑原達雄：硬質春播コムギ品種ハルユタカと高タンパク含量の秋播コムギ品種ホクシンのブレンドにおける製粉性および製パン性、日作紀、70、(2001)、pp.267-270
- (3) Kawai *et al.*, Food Preservation Science, vol.32, No.5 (2006), pp209-216
- (4) Bloksma, A.H., Cereal Chem. Vol.34, 126 (1957)