発酵 dough の内圧と気泡の大きさの関係

三田朝義, 松本 博

(大阪女子大学基礎理学科)

昭和 52 年 8 月 8 日 受理

Relationship between Internal Pressure and Bubble Size of Fermented Dough

Tomoyoshi MITA and Hiroshi MATSUMOTO

Department of Natural Science, Osaka Women's University, Sakai

An investigation was made to obtain the relationship between the internal pressure and size of bubble in dough produced by carbon dioxide during the fermentation of 2% yeasted dough at 30°C. In the early stage of fermentation (0~20 min), the number of bubbles and internal pressure significantly increased with the lapse of time, while the bubble size was approximately constant. During the second stage of fermentation (20~50 min), the bubble size progressively increased, while internal pressure increased very gradually and approached to the maximum value. At the final stage where the fermentation time exceeded above 50 min, the bubble size rapidly increased because of the coalescence between the bubbles, and the internal pressure discontinuously decreased. By adding lecithin, the bubble size decreased and the coalescence rate of bubbles also decreased.
(Received August 8, 1977)

緒 言

小麦粉, 水, 食塩, イーストなどの複雑な成分から混ねつて得られる小麦粉 dough (以下 dough と略記) を焙焼することによりパンがつくられる。したがって dough の物理的性質は小麦粉からパンをつくる過程の間物質として非常に重要であり, 最も古くから研究されている食品材料の1つである。しかしながら dough にイーストを加えて発酵させるとさらに複雑な構造となるため, 発酵 dough の物理的性質を調べることは非常にむずかしくなる。

Matsumoto ら^(1,2)は dough をイーストで発酵させた時に生じる炭酸ガス気泡により dough に内圧が生じることから, そのような内圧を調べるための測定装置を開発し, 発酵 dough の内圧に対する酸化剤や還元剤の影響などを調べている。しかしながらこのような装置によって測定される発酵 dough の内圧の発生機構についてはまだ十分に解明されていない。著者らはコロイド学的観点から発酵によって dough の内部に生じる炭酸ガス気泡の分散状態に着目し, これと dough の内圧との関

係を明らかにすることを試みた。また界面活性物質であるレシチンの添加による影響についても 2, 3 の知見を得たので, それらについても述べる。

実 験 方 法

1. 実験材料 実験に用いた小麦粉は日清製粉神戸工場より提供された無漂白強力粉「Milling」である。なおこれはタンパク含量 (N×5.75) 12.7%, 水分 (AACC 法⁽³⁾による) 13.8%, 灰分 0.4% であった。イーストはオリエンタル酵母社製圧搾酵母を使用した。またレシチンは理研ビタミン油社より提供された分子蒸留大豆レシチン (純度 90%) を使用した。

2. 試料 dough の調製 Table I に示す組成で所定量の食塩, ショ糖, イーストを溶解または分散させた Atkin's complete medium⁽⁴⁾を小麦粉に加え, Minorpin mixer (Henry Simon 社製) で 2 分間混ねつた後, 30°C の恒温器中に 1 時間保った。その後, 45g の dough を厚さ 7 mm のシート状に伸ばし, AACC ベーキング法⁽⁵⁾に準じて成型し, 次にエキステンソグラフのラウンダーおよびモルダーで成型し, 最後にプラスチックシー

Table I. Composition of Sample Dough (Yeast)

Constituent	Quantity
Wheat flour	60.0 g
Sucrose	1.8 g
NaCl	0.6 g
Yeast	1.2 g
Atkin's medium ^{a)}	38.0 ml

^{a)} Medium (per liter): $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 3.0 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 2.0 g, KCl 0.8 g, asparagine 10.0 g, thiamine 4 mg, pyridoxine 4 mg, niacin 40 mg, 1/3M sodium citrate buffer 120 ml (pH 5.5).

トで直径 50 mm の円筒状に成型し, 内圧測定装置⁽²⁾にセットした。

3. 発酵 dough の内圧変化および体積増加量の測定
発酵 dough の内圧は内圧測定装置を用いて測定された。この装置は下部に感圧ゴム膜を取付けたガラスシリンダー (直径 50 mm) に試料 dough を充填し, 感圧膜を常にフラットに保つように圧力を補償しながら感圧膜にかかる圧力を自動記録するようになっている。なお対照実験としてこの装置のシリンダーに水を入れ圧力を測定すれば, 自動記録される圧力は水深, すなわち水压に比例することが確かめられている⁽²⁾。そこで, このようにして自動記録される圧力の校正を内圧測定の前に行った。また内圧の測定と併行して dough の膨張にともなう高さの変化をカセットメーター (中村工業社製) により測定することから, dough の体積増加量を求めた。なお測定温度は 30°C であった。

4. 発酵による炭酸ガス発生量の測定 発酵にともなって生成する炭酸ガス量を液ガス置換法により求めた。測定温度は 30°C であった。

5. 発酵 dough 中の分散気泡の大きさの測定 内圧測定と同じ条件で調製した dough をトルビーカーに取り, 30°C の恒温水槽中で発酵させた。所定の時間発酵させた後, ただちに液体窒素中に dough を浸し, 急速に凍結させ, これを凍結真空乾燥させた。このようにして調製した発酵 dough を, 気泡の破壊を最小限にとどめるよう留意しながら鋭利なカミソリで切断し, その切断面を 10 倍の拡大倍率で写真にとり, これから発酵 dough 中に含まれる気泡 1 個の平均体積を計算より求めた。すなわち, dough 中に気泡が一様に分布していると仮定して, 発酵 t 分後の dough の断面 1 cm^2 あたりの気泡の個数を n_t とすれば, 発酵 t 分後の dough 中の気泡の全個数 (N_t) は

$$N_t = \sqrt{n_t^3} \times (V_0 + V_t) \quad (1)$$

と推定される。ここに V_0 は発酵 0 分における dough の体積, V_t は発酵 t 分後の dough の体積増加量である。したがって, 発酵 t 分後の dough 中の気泡 1 個の平均体積を $\bar{v}_t$ とすれば

$$V_t = \bar{v}_t \times N_t \quad (2)$$

となり, 次式によって発酵 t 分後の dough 中の気泡の平均体積が求められる。すなわち

$$\bar{v}_t = \frac{V_t}{V_0 + V_t} \times \sqrt{\left(\frac{1}{n_t}\right)^3} \quad (3)$$

結果と考察

1. 発酵 dough の内圧と体積の変化

Fig. 1 は dough の発酵にともなう内圧, 体積増加量および炭酸ガス発生量を示したものである。発酵にともなって内圧は増加するが, その増加速度は時間の経過とともに小さくなり, 50 分以上経過すると内圧は不連続的に減少するようになる。dough の体積増加もまた 60 分以上になるとその増加速度は低下し始め, 80 分以降ではその増加量はほとんど 0 となる。一方, 炭酸ガス発生量は測定時間内では発酵時間に比例して増加することがわかる。したがって, 発酵 60 分以降になると dough からガス漏れが起り, これが内圧の減少する 1 つの原因になっていると考えられる。

2. 発酵 dough 中の気泡による圧力の発生

発酵によって dough の内圧が増加する原因として, (a) 膨張する dough の先端の紡錘形の膜で発生する圧力, (b) dough の膨張にともなうシリンダー壁面との

Fig. 1. Changes of Internal Pressure, Amount of CO_2 , and Increment of Volume with Fermentation Time (Dough 45 g). — internal pressure, ---●— amount of CO_2 , —○— increment of volume.

摩擦および付着によって発生する圧力, (c) 発酵により dough の内部に生成する気泡による圧力, (d) 発酵により感圧膜面と接触する部分に生成する気泡による圧力が考えられる. ところで, この実験に用いられた装置で (c) による圧力は dough 中の気泡が球形に近いことから, 内圧と外圧の力のベクトルがつり合っているため感圧膜面に対して働く力は 0 であるのに対して, 感圧膜と接触する気泡は半球状またはそれに近い形状で 1 つの平面で感圧膜に接触しているものと考えられる. した

Fig. 2. Preparation Scheme of Connected Dough.

がって, (d) による圧力は感圧膜に伝達され, 圧力として測定されることが考えられる⁽²⁾. そこで膜面に接する気泡による圧力 (d) とその他の要因による圧力 (a) ~ (c) とを区別するために, dough の膨張にともなって感圧膜面に気泡が接触する場合, および感圧膜面に気泡が接触しない場合の 2 つの条件を設定した. すなわち Fig. 2 に示されるように感圧膜面に気泡が接触する場合として, イーストを加えない dough (45 g) を上に, イ

Fig. 3. Changes of Internal Pressure with Fermentation Time. — U/Y dough, Y/U dough.

Fig. 4. Photographs of Cross Section of Fermented Dough in Different Times.

ーストを加えた dough (45g) を下にして重ね合せた dough (U/Y dough とする), および逆に重ね合せた dough (Y/U dough とする) を調製し, これらについてそれぞれ内圧を測定した. Fig. 3 はそれらの dough について測定された結果であるが, この両方の系の間に明らかに相違が見られる. すなわち, 発酵にともなって U/Y dough の内圧曲線は Y/U dough にくらべて著しく大きくなる. これらの両方の系の間において, 膨張する速度が等しいことから dough の膨張によって発生する (a) および (b) による圧力はほとんど差がないと考えられる. したがって, 定性的には感圧膜面に接する気泡による圧力は U/Y dough および Y/U dough の内圧曲線の差であると考えられる.

3. 発酵にともなう dough 中の気泡の大きさの変化

次に発酵の経時変化による dough 中の気泡の大きさの変化を調べた. Fig. 4 は種々の発酵時間における発酵 dough の切断面の写真を示したものである. 発酵 20 分位までは気泡の大きさにほとんど変化が見られないが, 発酵 30 分位経過すると大きな気泡が現れ始め, 80 分位になると非常に大きな気泡になっていることがわかる. これから発酵の経時変化による気泡の大きさの変化を調べた. Fig. 5 は気泡 1 個の平均体積 ($\bar{v}$) を発酵時間に対してプロットした結果である. なお内圧変化曲線を併せて示した. グラフから気泡の大きさの変化はだいたい 3 つの過程に分けられると考えられる.

A. 発酵 0~20 分 発酵 20 分位までは dough 中の気泡の大きさはほとんど変化しない. この過程では気泡の大きさはほとんど変化せず, その数のみが増加するものと考えられる. Baker⁽⁶⁾ によると dough 中にイ-

ーストが炭酸ガス気泡を発生させるためにはその発生の核となる小さな気泡が必要であり, 混合の際ねり込まれた小さな気泡が核となる. したがって, この過程では小さな空気の気泡を核としてイーストの発酵による炭酸ガス気泡を生成する. 1 つの気泡を形成すると, 他の核の存在する部分で新しく気泡を生成する. したがって, この過程では気泡の大きさはある程度以上大きくならず, 気泡の数のみが増加するものと考えられる. なおこの過程を stage I とする.

B. 発酵 20~50 分 発酵 20 分以降になると気泡の大きさは徐々に大きくなる. これは発酵 20 分以上経過すると dough 中に核がほとんどなくなるため新しい気泡を生成することができず, 先に生成された炭酸ガス気泡が生長するものと考えられる. 一方, dough 中の気泡の数 (N_b) は 20~50 分ではほとんど変化していないこと, および Fig. 4 に見られるように気泡粒子が互いに接触したものはほとんど見られないことから, 気泡粒子の合一はこの過程ではほとんど起っていないと考えられる. なおこの過程を stage II とする.

C. 発酵 50 分以上 発酵 50 分以上経過すると気泡の大きさは急激に大きくなる. また dough 中の気泡の数 (N_b) も 60 分では約 2/3, 80 分では約 1/2 に減少する. すなわちこの段階になると stage II までの過程で形成された気泡粒子が合一し, 気泡の数が減少する. また合一が進むと Fig. 1 に見られるように, やがて dough からガス漏れが起り始める.

4. 気泡の大きさと内圧の関係

dough 中の気泡を球形と仮定すると, 内圧 (P) は

$$P = 2T \cdot \Delta / r \quad (4)$$

で表わされる. ここに T は気泡の膜の張力, Δ は気泡の膜の厚さ, r は気泡の半径である. 気泡の膜が非常に薄い時, 内圧 (P) は

$$P = 2\gamma / r \quad (5)$$

で表わされる. ただし, γ は表面張力で (4) 式の T とはディメンションを異にする値である. Hlynka と Barth⁽⁷⁾ はアルペオグラフを用いて dough のフィルムを脹らませた時の dough の気泡の曲率半径と圧力の関係を調べているが, 彼らによると dough のフィルムを脹らませると気泡の半径はだんだん小さくなるが, この間圧力は非常に増加し, dough の気泡の半径が最小, すなわち半球状となるときの圧力は最大となる. それ以後, dough の気泡が大きくなるにしたがって圧力は徐々に減少す

Fig. 5. Plots of Mean Volume of Bubble against Fermentation Time.

る。

以上のようなことから、発酵 dough の内圧と気泡の大きさとの関係は次のように考えられる。発酵 dough 中において気泡が大きくなることより (4) 式において Δ は小さくなるが、Hlynka と Barth の実験から $T \cdot \Delta$ はそれほど変化しないと予想されるため、内圧 (P) は気泡の半径に依存すると考えられる。stage I では気泡の大きさがほとんど変化しないことから dough の内部の気泡の圧力はほとんど変化しないと考えられる。しかしながら、感圧膜面では最初、感圧膜と接する分で球形であるため感圧膜に対しておおよす力が 0 であったものが、dough の膨張にともない徐々に感圧膜と半球状で接するようになり、そのために感圧膜に対して下向きの圧力を与えるようになり、これが時間の経過とともに大きくなると考えられる。これはちょうどアルベオグラフの圧力が増加する領域にあたると考えられる。なお発酵 0 分において多数の小さな核は (4) 式から大きな圧力を及ぼすと考えられるが、前述のようにこのような核は感圧膜面で平面で接していないために感圧膜に対して及ぼす力は 0 であると考えられる。stage II になると気泡の大きさは徐々に大きくなる。これはちょうどアルベオグラフの圧力が減少する領域にあたると考えられる。しかしながら気泡による圧力は減少するが、dough の膨張にともなう (a) および (b) による圧力が気泡による圧力の減少を相殺しているため dough の内圧は減少せず、わずかに増加しているのであろう。stage III になると気泡は合一を起し非常に大きくなる。したがって、(4) 式で $T \cdot \Delta$ に大きな変化がないとすると、内圧 (P) は気泡の大きさが大きくなるほど減少するため、気泡による圧力が急激に減少すると考えられる。また stage III では気泡の合一が進むことにより dough からガス漏れも起り始め、したがって dough の膨張にともなう圧力も小さくなり、それらの影響が加算されて現れ、内圧が減少したものと考えられる。以上のようなことから内圧が減少し始める時間における dough の発酵による体積増加率から dough 中の気泡の安定性またはガス保持力を推定することが可能と考えられる。

5. レシチン添加の影響

界面活性物質であるレシチンを添加した時の影響について調べた。Fig. 6 はレシチンを添加した時の発酵にともなう dough の体積増加量およびガス発生量の変化を示したものである。本実験に使用した濃度のレシチンの

Fig. 6. Changes of Amount of CO₂ and Increment of Volume with Fermentation Time (Dough 45g). Amount of CO₂; ---●--- lecithin 2%, ---○--- 1%, ---○--- without lecithin. Increment of volume; —●— lecithin 2%, —○— 1%, —○— without lecithin.

Fig. 7. Changes of Internal Pressure with Fermentation Time. — lecithin 2%, 1%, 0.5%, — without lecithin.

Fig. 8. Plots of Mean Volume of Bubble against Fermentation Time. ● lecithin 2%, ○ 1%, ● 0.5%, ○ 0.1%, ○ without lecithin.

添加による対照との間のガス発生速度の差はほとんど見られないが、発酵 50 分以上になると dough の体積変化には対照との間に大きな違いが見られる。すなわち Fig. 6 からレシチンを加えることにより dough からのガス漏れが起りにくくなり、またレシチン添加量の増加によりさらにガス漏れが小さくなることが観察される。

一方、レシチンを加えると dough の内圧は Fig. 7 に示されるように大きくなり、また内圧が減少し始める時間が遅くなった。これらの結果を明らかにするためレシチンの添加による発酵 dough 中の気泡の大きさの変化を調べた。Fig. 8 はレシチンを添加した dough 中の気泡 1 個の平均体積 ($\bar{v}$) の経時変化を調べた結果である。レシチンを添加するといずれの発酵時間においても気泡の体積は小さく、またレシチンの添加量が大きいほど気泡の体積が小さくなることが認められる。したがってレシチンの添加により気泡が小さくなり、そのために気泡による圧力が大きくなり、発酵 dough の内圧も大きくなったものと考えられる。レシチンは発酵 dough と形態的によく似た肺の肺胞膜にも存在し、その界面活性により肺胞の内圧を下げることが知られている⁽⁸⁾。このような観点からすればもし気泡の大きさが一定であれば、レシチンの添加により発酵 dough の内圧は低下するはずである。本実験ではレシチンの添加による dough 中の気泡の大きさが対照の試料よりも小さくなるために、内圧が対照よりも大きくなる効果が発生したと考えられる。なおレシチンを添加することにより Fig. 6 および Fig. 7 に見られるようにガス漏れが起りにくく、内圧が減少し始める時間も遅くなった。また Fig. 8 に見られるように気泡の平均体積の増加速度も小さくなった。これらはレシチンの添加により気泡の合一速度が小さくなり、したがって発酵 dough 中の気泡の安定性が大きくなることを示すものである。

要 約

発酵によって dough の内部に生成する炭酸ガス気泡の大きさと dough の内圧の関係が調べられた。発酵 20 分位までは dough 中の気泡の大きさはほとんど変化せず、その数のみが増加した。なおこの過程においては dough の内圧が著しく増加した。発酵 20~50 分経過すると dough 中の気泡の大きさは徐々に大きくなった。一方、内圧の増加速度は小さくなり、発酵 40~50 分ではほぼ一定となった。発酵 50 分以上経過すると気泡は合一を起し、その体積は非常に大きくなった。なお発酵 50 分以上になると内圧は不連続的に減少した。レシチンを添加すると発酵 dough 中の気泡の大きさは小さくなった。一方、内圧は大きくなった。またレシチンの添加により気泡の合一速度が小さくなった。

本研究の遂行にあたり、山本和代および平馬順子両氏のご協力を得たことを深謝する。

- (1) H. Matsumoto, J. Nishiyama and I. Hlynka: *Cereal Chem.*, **48**, 669 (1971).
- (2) *idem*: *ibid.*, **50**, 363 (1973).
- (3) American Association of Cereal Chemist, "Cereal Laboratory Methods," American Association of Cereal Chemists, Inc., St. Paul 4, Minnesota, 1962, 44-15.
- (4) L. Atkin, A. S. Schultz and C. N. Frey: *ibid.*, **22**, 321 (1945).
- (5) American Association of Cereal Chemists, "Cereal Laboratory Methods," American Association of Cereal Chemists, Inc., St. Paul 4, Minnesota 1962, 10-10.
- (6) J. C. Baker and M. D. Mize: *Cereal Chem.*, **18**, 19 (1941).
- (7) I. Hlynka and F. W. Barth: *ibid.*, **32**, 463 (1955).
- (8) M. F. Frosolono: *J. Lipid Res.*, **11**, 439 (1970).