

Food Technology Chemical Center
University of Lund, Lund, Sweden
Amm-Charlotte Eliasson Kåre Larsson

〈文献〉 Cereals in Breadmaking 〈文献紹介者〉 瀬口正晴神戸女子大学教授

製パンに於ける小麦(11)

4. ドウ⑧

(2) 空気を取り込み

ドウ中にイーストを入れる理由は、パンを膨らませるためであることについて述べてきた。膨化は、ドウのガス保持によって引き起こされるものであるが、そのためにはドウはガスを保持する力を持つ必要がある。二酸化炭素の生成と、オープン熱で起こるドウの物理的な変化によってドウに圧力増加が生じ、パンの容積は増加する。しかし、高品質のパンにとっては、ただ単に大きなパン容積だけでは十分ではない。

即ち、パンクラム中の気泡率も考えなければいけない。全体的に均一で、かなり整った大きさの気泡のパンが望ましい。この多孔性は、ドウのミキシング、パンチング、モールドイングで生じる。二酸化炭素はドウ中の水相に溶けるが、膨化と気泡の形成のため、二酸化炭素はガス相に転換しなければならない。これは、溶けている二酸化炭素が、すでにドウ中に存在している気泡に拡散する時にだけ起こる。ドウに新しい気泡が作られる可能性はなく、それは次の式で証明されている。

$$P = 2\gamma / r$$

この式では、 P は圧力、 γ は界面張力、 r は気泡の半径である。もし、新しい気泡が作られるとしたら、はじめの半径はゼロであり、これは、圧力が無限大でなければならないことを意味する。その証明が1941年に報告された。それによると、ドウ中に生成された二酸化炭素は、新しい気泡を作れないということであった。気泡の形成に伴う幾何学的問題については、更に後のセクションで考え

たい。

ミキシングの段階で、ドウ中に空気を取り込まれることは、ミキシング中のドウの密度が変化することから明らかである。これは、図12に図示されている。そこでは、ドウの密度の変化が、ミキソグラフで得られるミキシングカーブと関連していることが示されている。最初の密度は1.20 g/mlであったが、連続的なミキシングに伴って1.10 g/mlにまで減少している。この密度の最低値は、ミキシングカーブのブレイクダウンのところであることを知るべきだ。ミキシングカーブの最大のところ（この小麦粉では3分30秒後）で、ドウの密度は1.16 g/mlを示す。最大量の空気を取り込むためには、ある程度のオーバーミキシングが必要である。

ミキシング後、気泡ガスは球状になっているが、その直径は、普通10から100 μ mである。その形状の変化については、後のセクションで述べる。その密度の最初の値は1.20 g/mlであり、この時のガスの体積は、ドウの全体の体積の3%の体積に相当する。ミキシング後、ドウの体積の約10%はガスになり、ガスセルの数は $10^3 \sim 10^5 / \text{mm}^3$ となる。

空気がドウに取り込まれる最大量は、ミキサーのタイプに依存することも注意しておくべきである。最初の密度1.20 g/mlから、ファリノグラフでは1.17 g/ml、ホバートプラネタリーミキサーでは1.16 g/ml、モートンツインZアームミキサーでは1.15 g/mlの密度になる。より低い密度のドウを得るためには、強力なミキシングで最適状

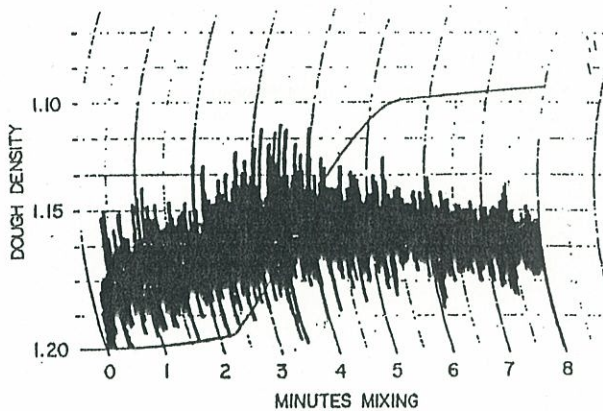


図12 ミキシング中のドウ密度 (g/ml) の変化

態を超えるまでミキシングを続けなければならないということも観察された。これらのデーターは、ミキソグラフで得られた密度1.10 g/mlという値が、ミキシングカーブで最適状態を超えた時点で得られたことと一致した。

気泡率は、望ましい整ったきめを持つパンを作るために重要なものである。ドウを発酵し、パンチング、あるいは再ミックスをすると、大きな気泡は、多くの小さな気泡に分かれる。減圧下でミキシングすると大きな気泡ができ、パンチングで多くの小さな気泡になる。

乳化剤の添加は、気泡率に影響する。SSL(ソディウムステアリン-2-ラクチュレート)のような乳化剤は、ミキシングの間に空気を取り込むのを遅らせる働きがある。ドウの最終的な密度は乳化剤のない時と同じだが、しかし気泡はずっと整っている。この気泡率に与える同一の効果が、レシチンを小麦粉-米粉混合物のベーキング時に添加した時にも得られた。

圧力と気泡の半径の間の関係式(前式)には、界面張力 γ が含まれている。界面張力が、一定圧力下(P)で減少するならば、その時は気泡半径も減少するだろう。そこでドウ中の界面活性剤は、気泡の大きさがある一定のものにそうように影響するものと予測される。小麦粉中には、もともと存在する界面活性物質がある。極性脂質やタンパク質は表面活性作用がある。添加副原料、特に乳化剤も界面活性剤である。乳化剤が加えられた時に得られるパンの良いきめに対する説明は、前式の γ を考えるとできる。

(3) 大気中での混合

ドウが真空中で混合され、その後、直ぐに焼かれると非常に品質の悪いパンになる。パンの容積は小さくなり、クラムのテクスチャ/気泡性は、厚い気泡壁を持つ僅かな数の大きな気泡で特徴づけられる。ドウは大変に詰まっており、ミキシング直後では、顕微鏡で観察しても気泡がほとんど見られない。低圧で捏ねられたドウの密度は1.28 g/mlであり、一方、真空中で捏ねられた同じドウは1.25 g/mlであり、さらに空气中で捏ねられたものは1.15 g/mlであった。この差は、全ドウ中の8%のガス容積に相当する。他の実験では、空气中で捏ねられたドウの密度は1.22 g/mlであった。しかしながら、ドウの密度からパンの容積量を予測することは不可能である。

最終的なパンの品質は、パンチングのステップが製パンプロセスにあることで非常に良くなる。パン容積は、1回のパンチングで590mlから680mlに増加し、2回のパンチングで845mlに増加し、3回のパンチングで933mlに増加する。パンチングは、多少の空気の取り込みを引き起こすかもしれないが、本来のパンチングの目的は、発酵中にできた大きな気泡を、細かな多数の気泡にするために行うステップである。

全てのガスが、気泡に包み込まれて同じ効果を示すわけではない。酸素と二酸化炭素は、ドウの水相にかなりよく溶けるが、窒素ガスは、不活性でごく僅かしか溶けない。もし、ドウを窒素気流中で混合した後、酸素に富んだ大気中で混合したなら、最終的ベーキング結果は空气中の時より良

い。窒素気流中でのミキシングは、大気中でのミキシングに比べドウ密度の変化がないが、最終的なパンではずっときめの細かいパンが得られる。

他の研究では、窒素気流中でのミキシングにおいて密度の減少が認められ、空気中で 1.22 g/ml だったものが、窒素気流中では 1.14 g/ml に減少している。同じような良い結果が、ミキシングチェンバー中に空気が吹き込まれた時にも得られた。これらの研究から言える結論は、低溶解性のガスが、気泡を作るのにはより有効であるということである。しかしながら、更に酸素によるドウの酸化効果も考えねばならない。

(4) 酸化

ファリノグラフのミキシングが窒素気流中で行われても、そのファリノグラムは、空気中で得られたものとそんなに違わない。しかしながら、酸素が入ると、ミキシングカーブは、空気中あるいは窒素気流中での混合に比べて高い値の方にシフトする。ミキシング中の酸素は、このようにドウ中の気泡として取り込まれるだけでなく、酸化剤としても働く。酸化剤が使われなくても、酸化が最も良く進むようにするためには、ドウ表面に酸素を十分含んだ空気を流してやる必要がある。酸化反応については、前のセクションで述べた。

酸化過程の一つの結果として、真空中でミキシングされたドウは、空気中でミキシングされたドウより黄色いということがある。これは、酸素がカロチノイドを酸化するためである。

小麦粉粒子を水の表面にばらまいた時、ある粒子は先に述べたように、空気/水の界面に広がる。脂質を加えることによるパン容積の変化は、ドウをオープンに入るまではわからないが、それは空気/水の界面が、ドウ中のタンパク質分子によって安定化されているためである。我々の小麦、貯蔵タンパク質の示す界面における性質の研究から、タンパク質分子量分布のちがいが、表面積一面積($\pi-A$)の等温式と表面積-時間($\pi-t$)の等温式に影響することを明らかにした。さらに、この分子量分布は、タンパク質膜の収縮-伸張サイクルの繰り返し、または、タンパク質中の酸化剤による酸化によって影響を受ける。タンパク質の高分子量区分は、ゆっくりと空気/水の界面に

広がるが、一方、低分子量区分の方はそれよりずっと早く広がる。

また、先に述べたように、ミキシングの結果生じる分子量分布の広がりや表面秤で観察されている。グルテニンは、空気/水の界面に広がり、その結果タンパク質膜を形成する。この膜は、そこで繰り返しの伸縮をし、ちょうど空気/水の界面でタンパク質膜がミキシングしているようになる。この収縮/伸張の各サイクルの繰り返しで、膜の機械的な強度は増加するが、これはタンパク質分子量の増加によるものである。そのサンプルのSDSゲル電気泳動(SDS-PAGE)も分子量増加を示している。これは架橋結合(例えば酸化)によるタンパク質の重合化によるためである。

この現象を調べるため、タンパク質中に酸化剤を混入させる実験を行った。アスコルビン酸水溶液表面に小麦粉が広がる性質と、無添加の水面上に広がる性質とを比較した(図13)。60分後の π (表面圧)を測定した値は、小麦粉がアスコルビン酸水溶液表面に広がる時の方が、水面上で広がる時よりずっと低い値であった。このカーブ間の相違は、分子量の相違と一致しており、これらの状態下での単分子膜はガス状態である。

これに関連して、泡の安定性に関するS-S結合の影響についての報告がある。SH基が α_{s1} -カゼイン分子内に導入され酸化によってS-S結合が形成されると、その α_{s1} -カゼインは、良好で気泡安定化剤となる。この時の酸化のタイミングが重要である。タンパク質の酸化が起こる前に空気/水の界面にタンパク質が吸着されると、もっとも大きな気泡安定性が生じる。更に、SH基を導入した α_{s1} -カゼインを用いた研究で、 α_{s1} -カゼイン1分子当たり8.9個のSH基を導入した時が一番良い気泡の安定性を示した。SH基数の増加に伴って観察される気泡安定性の低下は、分子内S-S結合が過剰になり、単一層の柔軟性が低下したためであった。これらの結果は小麦貯蔵タンパク質の研究とよく一致する。

(5) ドウのレオロジー的性質

小麦粉ドウのレオロジー的性質は、いくつかのことと関連している。まずこの性質は、製パン時のドウのハンドリングの性質を理解する上の基本

的な性質である点である。更には、このレオロジーの性質から、パンの品質を予測することができることだ。ミキシングカーブと最終的にできるパンの間には相関関係がある。「シルキー 絹糸」、あるいは「クリーン すっきり」といった言葉を使うかわりに、レオロジーの数値で、このディベロップしたドウの性質を表現することは重要である。科学的観点から興味深いのは、レオロジーの性質がドウ構造のマクロな面、ミクロな面の両面と関係している点である。レオロジーを測定すると、そのドウ構造を調べることができる。特に酸化剤、還元剤、塩、乳化剤のような添加物のドウへの影響を測定するとそれがはっきりしてくる。

多くの項目のレオロジー測定を行う目的は、実際のパンベーキングテストを行わずに、パンの出来、不出来を小麦粉を調べるだけで判断するためである。ベーキング結果を正確に予測できる小麦粉レオロジー測定は、ベーキングのための無駄な時間と材料を省くことができる。しかし、そのようなレオロジー試験を計画するためには、まだまだ時間が必要である。我々がベーキングに関するドウのレオロジー的性質を測定しようとする、多くの問題に直面する。まずはじめにどんな変形の種類を使うべきなのか？ドウの伸張性かドウの剪断かのどちらかの選択が必要である。

ドウの伸張性が選ばれるべきであるとのべてきたが、それは発酵中ガス量が増加し、タンパク質マトリックスの伸張を伴う流動がおこるためである。一方、ドウは高粘性のため、ミキシングの間に層流が起こり、剪断にともなうドウの主要変形を引き起こす。このドウの剪断変形は簡単にすすむ。ドウの非直線的性質のために、ドウを剪断した時の結果が、ドウを伸張した時の結果と直接に関係しているとは考えられない。しかしながら、ドウを剪断したとき得られたレオロジー的な実験結果と、ドウを伸張したとき得られたレオロジー的な実験結果はかなり相関がある。

これらの変形タイプの何れかが選ばれたら、その次の問題は、変形の大きさ(γ)と変形のスピード($\dot{\gamma}$)である。ベーキング結果を予測するには、ベーキングにとって最も重要であるひずみスピード(ひずみ値)が選ばれねばならない。この選択

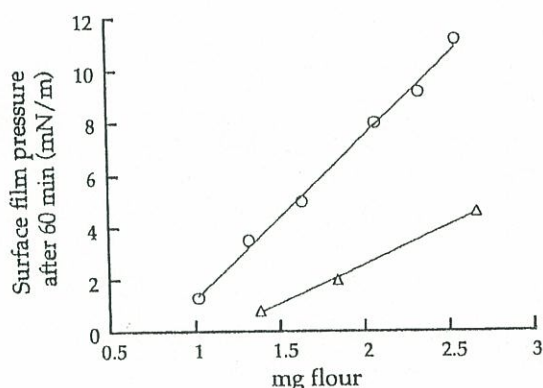


図13 小麦粉のアスコルビン酸添加△、無添加○の水面上でのひろがりの表面圧

は重要であり、ドウは 10^{-4} ~ 10^{-2} S $^{-1}$ のベーキングプロセスの間、いろいろな引っ張り強度を示すが、その引っ張り範囲はドウのシーティングの時を100%とするとミキシングの間で500,000%までになる。発酵中、どの小麦品種のひずみが弱く、ひずみスピードが遅いか、オープンライズの間、多少高目のひずみスピードを示すのはどれか、あるいはミキシングの間、非常に速いひずみスピードを示すのはどれか等数々の小麦品種の最も良いものを決める必要がある。

もう一つの複雑なことは、グルテンとドウは粘弾性体であり、何れも弾力性と粘性流動の両方の性質を示す。そのうちどちらの性質が支配的になるかは、応力変形の大きさと測定時間によって決まってくる。短時間あるいはひずみ値の低い時は、グルテン及びドウは固体のようになり、一方長時間あるいはひずみ値の高い時は、液体のようになる。この性質はすべての粘弾性体に共通の典型的な性質である。

レオロジーの測定は難しいものであるが、そのレオロジー測定方法は、穀物技術と科学の分野において、かなり古くから開発され、使用されてきた。その方法は一般に、経験的なものと原理的な方法とに分けることができる。この経験的方法とその物理的ドウ測定機器についての総説が最近でた。原理的な方法は、経験的な方法に対しドウのひずみや応力を測定する点で異なり、全体の各試験機器にはそれがよく特徴づけられている。さらに、原理的な方法で得られた結果は、他の異なった装置で得られた結果と比較することが出来る。