

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(6)

4. ドウ③

2. 連続相のディベロップメント

連続グルテン相形成を促進するためには、原料はミキシングされる。ミキシングは次の3つの点で大切なプロセスである。パン加工において原料が均質なかたまりに混じること、タンパク質がガスを抱き込む3次元構造にまで伸展すること、そして空気核を持たせることである。連続グルテン相に於けるミキシングの重要性をここで論じ、空気の包含については、この後で論じる。

1. ミキシングとドウディベロップメント(伸展)

ドウの状態は、ミキシングで刻々と変化する。水でぬらして得られるデコボコの固まりが、弾力性のある結合した固まりに変化する。この段階で、ドウは攪拌しているミキサーの壁にくっつきにくくなる。結局ドウは、ミキサーの刃に絡みつく。多くのパン技術者は、ドウが最も適したディベロップメントに達したかどうかを判断するのに、この壁への付着性の程度を基準にしている。

ミキシングがディベロップメントのピークに達したとき、ドウは絹のような光沢を示し、弾力性を持つようになる。もし、ミキシングが、このようなディベロップメントのピークを過ぎてもなお続けられると、オーバーミキシングが起り、ドウは非常にねばねばして伸びるようになる。

ミキシングの過程で、機械的エネルギーはドウに伝わる。必要なエネルギー量はミキサーの機種、小麦粉の種類、あるいは機械的ドウディベロップメントが使用されたかどうかによって決まる。必

要とされるエネルギーの大きさを示すためにいくつかの数字を引用した。最新のミキサーでは、5～12分間にドウ1kg当たり25KJのエネルギーを投入する。ところが古いミキサーでは30分以上かけて、ドウ1kg当たり10～15KJのエネルギーを投入した。

チョリウッドプロセスのような激しい機械的ドウディベロップメントが行われる場合には、ミキシングの強さは勿論のこと、エネルギー投入量も最低のレベルでは不十分である。代表的な数値はドウ1kg当たり40KJで、必要とされるミキシング時間はほんの2、3分である。

パンの最終的な品質は、ミキシングにより大きく影響を受けるが、各小麦粉とミキサーの組み合わせで各々のドウディベロップメントの最適条件を見つけることが重要である。ドウには不十分なミキシング、最適なミキシング、オーバーミキシングがある。ドウミキシングの最適状態が得られるのはいつか、を知るために、パン技術者は前に述べたようにドウがミキサーボール壁にくっつく程度を見て判断する。

しかし、ドウディベロップメントの最適条件の情報をファリノグラフやミキソグラフのミキサーから得ることができる。これらのミキサーではドウを混ぜる力、言い換えればミキシング中の抵抗力を記録する。ミキシング曲線は「ドウディベロップメント」とか「ブレイクダウン」といった言葉で表現される。

図5にミキシング曲線の位置例を示した。ミキ

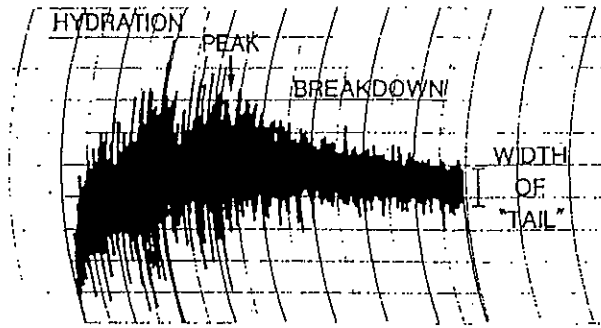


図5 小麦粉のミキソグラム
吸水、ピーク、ブレイクダウンを示す

サー中に小麦粉だけが入っている間は、ミキシングに対する抵抗はない。水が加わるとドウディベロップメントが始まり、ミキシング曲線が上昇し始める。粉の強度次第でミキシング曲線ははっきりとしたピークやフラットな最大値に達する。湿った後、すぐにグルテニン分子はドウ中にランダムに分布する。ミキシングの間、グルテニン分子は伸び、整然と並び、二次的な力で結集されてくる。

ディベロップメントのピークに達するまでの時間は、グルテニン分子の伸張と拡張にかかる時間と思われる。グルテニンが多いほど、そしてそれらの分子量が大きいほど、ディベロップメント時間は長くなる。更にミキシングすると、ミキシング曲線の減少が記録され、ブレイクダウンが開始する。最適なドウディベロップメントに達した点はミキシング曲線でのピークか、あるいはこのピークの僅か後である。ブレイクダウンは、ドウの安定性と物理的操作に対するドウの感受性を示している。

最高のパンベーキングを示す小麦粉は、中間、または中間より長めのミキシング時間を要する。もしその小麦粉がミキシングするのが難しくて、ディベロップメントのピークに達するのに非常に時間がかかるようなら、その小麦粉は普通のミキサーではきちんとディベロップされないかも知れない。

2. 酸化と還元

酵素で支配されている酸化還元反応は、すべての細胞内で中心的役割を果たしている。小麦の貯

蔵タンパク質中には高含量のSH基が含まれているが、これらを基質とする多数の酸化還元酵素が小麦には存在している。臭素酸カリウム（プロメート）、アスコルビン酸といった酸化還元剤は、長い間パン技術者にとって価値のある薬であった。その他の一般的な薬としては酸素（恐らくパン技術者は無意識のうちにこれを利用している）、システイン、酵素活性化した大豆粉等がある。

酸化還元剤が使用される場合、水、塩、その他の副原料と同様、添加量に最適レベルがある。この最適量は、使用小麦粉の違いで変化する。酸化剤の添加量は、およそ小麦粉1kg当たり25mgであるのに対し、激しい機械的ドウディベロップメントする場合は小麦粉1kg当たり約100mgである。酸化の必要性は、小麦粉中のタンパク質含量の増加と共に増し、その必要性は、短いミキシング時間しか必要としない小麦粉で、より大きい。酸化剤によりパン容積は影響されるが、ミキシング条件も酸化剤を加えると大きく影響を受ける。

酸化剤による改良効果は、特に製粉されたたての小麦粉ではっきり出てくる。この新しい小麦粉は、空気中で貯蔵しているだけでも同様の改良効果が生じてくる。製粉されたたての小麦粉中のSH基含量は、空気中に数時間放置しておくで20~30%まで低下する。小麦粉はアスコルビン酸やプロメートのような酸化剤の添加でもっと速いスピードで熟成する。

これは製粉したたての小麦粉の熟成が酸化的変化によることを示している。酸化は、また、小麦粉の漂白を引き起こす。しかし最も一般的な酸化剤、

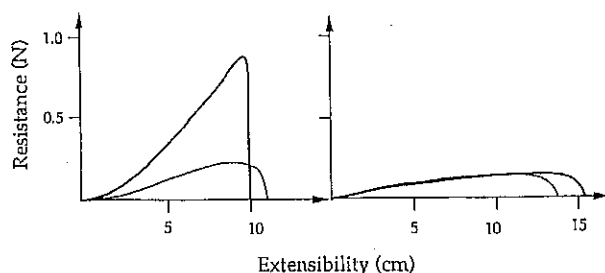


図6 酸素下、窒素気流中で調整したグルテンゲルの力
 左は、モノボル（小麦品種名）から取ったグルテン、右はマリス・ハンツマン（小麦品種名）からとったグルテン。太線が酸素下、細線が窒素気流中。

ブロメートとアルコールビン酸の二種は小麦粉を漂白しない。一つの重要な要因は、勿論酸化剤が乾燥した小麦粉に作用することができるかどうか、また酸化剤がドウミキシングの間、活性化されるかどうかである。

酸化された小麦粉ドウの構造は光学顕微鏡で観察されてきた。酸化されたドウ中のグルテンネットワークは酸化剤なしの最適条件化でミキシングされたドウ中のものと比べると、均一性の点で同一ではないとわかった。さらにタンパク質のネットワークは酸化剤なしのドウ中のものよりもその伸びが少ないようにみえる。

ドウを薄く伸ばし広げたとき、タンパク質のネットワークは薄く広げた方向に整然と方向付けられる。このような配向性は還元されたドウでは観察されない。これらの結果は先に示されており、グルテンゲルの構造と一致し、分子が酸化により大きくなればなるほど、切断された後の弛緩時間は長くなる。

(1) タンパク質分子の酸化と重合化

ドウの性質に及ぼす酸化剤と還元剤の影響には、特にミキシング時における小麦タンパク質中の硫黄を含んだアミノ酸、システインが関係している。酸化剤はドウに強さを与えるが、還元剤は逆にドウを弱める。この反応ではタンパク質の分子間結合が生じ、ドウに強さが増す。還元反応ではS-S結合の開裂を起し、分子のサイズを小さくしてドウを弱くする。

前述の反応式で説明される酸化反応は、空気中の酸素がその原因となる。酸素下及び窒素気流中で調製されたグルテンゲルの各エクステンソグラ

ムが比較されている。もしいろいろな品種の小麦が窒素気流中で製粉され、グルテンゲルも窒素気流中で洗い出されると、どれもとても弱いゲルになる（各品種ともよく似た現象を示す）。もしグルテンゲルが空気中で洗い出されると、強力小麦の品種は力が強くなるのに対し、ベーキングの出来栄の良くない品種の小麦では、ほとんどその改良効果が見えない（図6）。

空気中でグルテンが得た改良効果は、窒素気流中でグルテンを分離する時に、ブロメート添加で得られるものと恐らく同一のものである。アルコールビン酸添加の改良効果は、酸素下でグルテンを分離するより窒素気流中でグルテンを分離するほうが大きい。これらの結果から酸化を受けるタンパク質が確実に存在していることがわかる。

反応が右方向に進んだとき、SH基の数は減少し、S-S結合の数は増加する。SH基の数はミキシングの間に減少し、その効果は、良いパンベーキング結果を与える品種の小麦で非常に顕著に表われる。S-S結合数の増加を直接測定することは難しいが、酸化による分子量増加が起こっているといういくつかの間接的な証拠がある。

酸化剤（アスコルビン酸、ブロメート）の存在下でグルテンの緊張緩和測定を行うと、タンパク質の重合化、または分子間結合の生じていることがわかる。ブロメートとアルコールビン酸、いずれもグルテンの緊張緩和係数（G）は増加する。その効果は、一般にタンパク質分子の架橋剤として用いられるグルタルアルデヒドをグルテンゲルに反応させた時と同じ効果であった。緩和時間、 $t_{1/2}$ も、またブロメートとアルコールビン酸の存在で

増加し、弾力性の大きくなったことを示している。

小麦粉懸濁液は脂質酸化によって、特にリボキシゲナーゼの存在下では酸素を消費する。こうしてできた脂質の過酸化物は次にタンパク質を酸化する。

(2) SH-SS交換反応

もし、SH基阻害剤がドウに加えられるなら、その効果は酸化と同じで強いドウを作るようになる。しかもタンパク質中のS-S結合の数は変化しない。これについての理由はわからない。阻害剤はその自身、タンパク質同士の会合に影響するのかもしれない。酸化剤の一つの作用に、その系からSH基を取り除くことがあるかも知れない。S-S基とSH基の交換反応が考えられるが、その反応にはグルタチオン(GSH)のような低分子量のSH基を含む分子が関与していると考えられている。

小麦粉 1 g 中に約0.1~1.6 μ molのSH基があると報告されているが、小麦粉 1 g 中に4.7~7.2 μ molのSH基(或いは60.4~69.3 μ mol/g タンパク質)があるという報告もある。SH基含量とベーキングの結果との間には相関関係はない。S-S基の数はSH基の数よりも多く、小麦粉 1 g 当たり5~17 μ molのS-S基、またはタンパク質 1 g 当たり約100 μ molが存在すると報告されている。S-S基の含有量とベーキングとの間にも相関関係はない。

ドウ中に存在するSH基とS-S基、すべてがこれらの交換反応に関与するのではなく、関係する基は化学的に活性なものだけであると言われている。その上、この反応がドウの粘弾性に影響するか、しないかは明白ではない。そこで我々はレオロジー的に活性なSH基とS-S基の存在を考える必要がある。レオロジー的に活性なSH基は小さなペプチド中に存在すると考えられている。

このように、ある分子は、SS/S-H交換反応を盛んに行い、ペプチドが消化されてしまうのを抑えている。このようなドウ中に存在する低分子物質はグルタチオンとチオクト酸(リボ酸)である。グルテンタンパク質分子と低分子ペプチドとの間の交換反応は、二つのタンパク質分子間の交換反応よりも起こりやすい。

SH基又はS-S基を含む低分子、例えばグルタチ

オンサルファイド(GSSG)は、タンパク質を低分子化するためにドウを弱める。SH基を含む物質はこの点で最も効果的である。酸化剤が加えられると、ドウを柔らかくする原因である交換反応が停止する。なぜなら酸化剤はSH基を含む低分子物質と反応するからである。

SH基の除去はドウのハンドリングにとっては都合が良くなるかもしれない。それはドウの粘りがタンパク質のSH基含量と関連しているからである。ミキシング中に起こるSH/SS交換反応は、タンパク質を直後に参加した時と同様に、タンパク質分子量分布を変える。最終的な分子量分布は、最初の分子量分布に比べると、混入した酸化剤、還元剤によって変わる。

SH基の数はミキシング中に減少するが、GSHの45%はミキシング 1 分後に失われる。もし、ドウをそのまま休ませるとGSH量の減少は更に継続し、約10分後にその量はゼロになる。ドウに酸化剤(ヨウ化カリウム)またはSH基阻害剤(N-エチルマレイミド(NEMI))を加えて、空気中でミキシングするとSH基の数は減少するが、窒素気流中でミキシングするとSH基の数は変化しない。しかし、脂質があるとSH基は窒素気流中でも減少すると言われている。SH基の数は減少するが、S-S結合数の増加は観察されない。これはSH/SS交換反応が全S-S結合数の変化とは関係なく起こるということを示している。

しかし、現在の分析方法はS-S結合の僅かな増加を感知するほど敏感ではないということも十分知っていなければならない。酸化剤と還元剤はミキシング曲線に影響する。酸化剤があるとミキシング曲線のピークである最適条件に達したとき最高のベーキング結果が得られる。酸化剤のレベルが減少すると、ドウのミキシングはミキシング曲線の最適条件を超えるまで続けなければならない。

チョコレートプロセスでは改良剤としてアスコルビン酸が使用されるが、ベーキング結果はミキシング中の大気状態で変化する。最高の結果は、酸素が豊富な状態(酸素60%-窒素40%)で得られる。プロメートをを用いる場合にはこのようなミキシング中の大気の影響はない。