

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(13)

5. パン①

1. 熱の影響

パン生地(ドウ)を発酵した後、オープンに入れると、かなりの容積増加が起こる。すなわちオープンスプリングである。容積の増加はドウ中の空気と水の接触面に相当な力(ストレス)を引き起こす。これはパンの製造過程で最も重要な点である。このパン製造過程でのそこまでいたる各段階のあらゆる失敗について今から明らかにしていく。

小麦品種間の違いのために生じるベーキングの出来栄の相違は明確である。何れのドウも同じ大きさにまで発酵膨張するが、オープンスプリングの段階でパンに満足なボリュームを与えるだけの力がそのドウにあるかどうかがわかる。脂肪や乳化剤のような添加物の影響はこのベーキングの

段階までは認められない。

オープンスプリングで観察されるパン容積の増加は、温度上昇によるためであり、また、温度上昇はドウの不連続相(分散相)と連続相の両方に変化を引き起こす。これらの変化はパン容積の膨張とクラムの形成を引き起こす。温度の上昇スピードと最終的な到達温度はドウの異なった部分でそれぞれ異なる。特に表面と比較し、ドウの中心部ではその差が明白である。この時間と温度の関係を図16に示した。

温度上昇はイーストの活性、ガスの溶解性、気化したガスによる容積増加等のいろいろな面でドウに影響する。小麦粉成分もまた影響を受け、例えばデンプンの糊化やタンパク質の変化がおこる。ドウ中のガスの物理的变化の結果、容積に大きな増加が起こり、この容積増加がドウに間接的

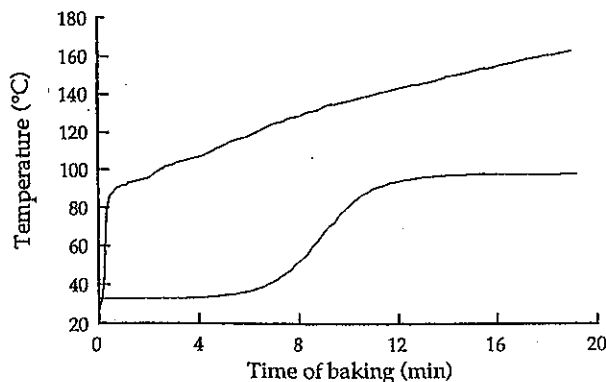


図16 ベーキング中のドウ中心部の温度(下線)と表面温度(上線)。オープン中の温度は230°C

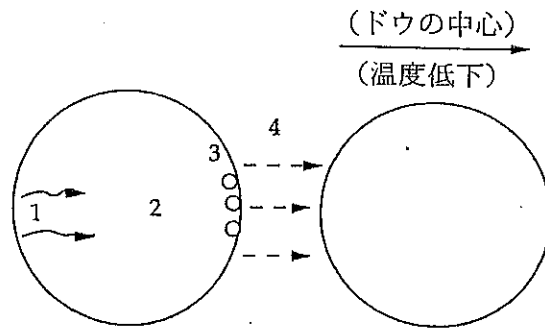


図17 de Vriesらによるドウ中の4段階の熱移動
①水は気泡のあたためた側で蒸発し、気化のための潜熱を吸収する。②水蒸気は気相を通して移動する。③気室のつめたい側で水は凝縮し、潜熱を放出する。④熱と水は伝導、拡散によってグルテンゲルを通じてとなりの気室のあたためた側に移動する。このプロセスは再びくりかえされる。

ないいくつかの効果を与える。ベーキング過程のこの段階でのドウの示すガス保持力の意味をこの章で論じる。ドウの主要な構成要素（脂質、タンパク質、デンプン）への熱の影響についても述べる。

(1) オープンスプリング

① 熱とのかたまり（水の）の移動

ドウがオープンに入れられたとき、熱は対流、放射、伝導、蒸気の凝縮、さらに水分の蒸発等を含むいくつかのメカニズムによって移動する。ドウの中での熱の移動は、熱伝導や蒸発-凝縮のメカニズムによって起こると考えられている。

あるタイプのパンでは、ベーキングのはじめに短時間だけ蒸気をかけることを行っている。蒸気をかけることはベーキング時間を短くするが、それはまた弾力のあるドウ表面を維持し、ある特有のパンの皮の性質を作り出す。オープン中で起こる変化を3つの期間に分けることができる。

蒸気をかけている期間中はパンの容積は一定であるが、表面の温度は急激に増加する。この蒸気処理期間につづいてパン容積増加の期間になる。この期間の間、表面温度は増加をつづける。その後クラムやクラストができる期間になるが、ここでは容積は変わらないが、表面温度はまだ上昇している。蒸気を添加すると、空気中の相対湿度は0.7~0.9まで増加する。ドウの表面は周囲と比べて冷たいので、空気中の水分はドウの表面で凝縮する。その凝縮は表面温度を素早く露点にまで上

昇させる。表面で凝縮する水分量はパンの重さの約1%となる。

こうして蒸気をかけることは、最初はパンの重さの増加の原因となる。しかしながら、表面が露点の温度に達するとすぐ蒸発作用が始まり、重量の減少となる。ベーキング中の重量減少は、最大表面温度によって変化するが、表面温度が高ければ高いほど重量は減る。ある研究では150℃で約13%、200℃では17%の重量の減少が記録されている。表面温度の増加は、クラストよりすぐ下の部分からの水の蒸発作用を引き起こす。水蒸気の一部はクラストを通して周囲の空気中へ抜けていくが、ある一部分はクラムの内側の冷たい区域の方へ移動する。ここで水蒸気は凝縮し、クラム温度の増加の原因となる。蒸発-凝縮はパン中での熱移動の主要なメカニズムであると考えられている。熱伝導の役割は重要でないと思われていたけれども、やはり不可欠である。もし伝導熱が熱移動の唯一のメカニズムか、またはそれが主要なメカニズムであったとしたら、ドウ中のガスのない部分での熱伝導は、ドウの発酵している部分での熱伝導と同じくらいの熱伝導速度だろう。

しかしながら、これは事実ではない。すなわち温度上昇はガスのないドウよりも発酵したドウの方が速いのである。ドウ中の熱移動はこのように連続的な液体相での伝導と、ガス相での蒸発-凝縮作用のコンビネーションの結果である（図17）。

蒸発-凝縮作用はただ多量な(水の)かたまりの移動のメカニズムだけと考えられる。ベーキングの間の水の移動は、一個のパン中の水分含量の段階的な違いがあることによって説明されている。

クラムとクラストの間で水分含量に違いがある、ある例ではベーキング1時間後、クラムでは44.2%の水分、クラストで15.5%の水分であった。クラム中心部の水分含量は45.7%であったが、同じパンの端では37.2%であった。ベーキング中に中心部の水分含量は増加し、最初のドウでは乾物1kg当たり0.776kgであったものがベーキング直後のパンでは乾物1kg当たり0.894kgであった。周囲の温度まで冷ますと、パンの水分含量は1kg当たり0.779kgの乾物となった。最終的なパンの水分含量は、ドウに加えた水分量によって影響される。

ドウのガス容量は、デンプンが固まり始める温度より少し上の温度までは温度が上がるほど増える。容量の増加が止まる温度はずっと68~80℃の範囲であるとされてきた。容量増加の速度がにぶるのは、ある場合には55℃の低い温度と観察された。全ガス容量が変化するだけでなく、その成分も温度によって変化する。ベーキングの始めの段階で、ガス容量はほとんどすべてCO₂から成り立っているが、温度によりガス中の水分の部分が増加する。熱伝導は初期のドウ中のガス容量に関係する。すなわち、ドウ中にガスが多いほどベーキングの時間が短くなり、中心での温度がより早く100℃に近づく。

② ガスの生成、溶解性、加熱膨張

オープン中での初期の段階には、イーストの高い活性が観察される。20~40℃では、イーストの活性は10℃で2倍増加する。しかし、約60℃になるとその活性はイーストの死滅のため消失する。イーストの活性を保持するためには、発酵できる炭水化物が必要である。そのためには砂糖がドウ中に含まれていなければならない。

アミラーゼ活性もまた、温度によって大きく影響を受ける。アミラーゼの中でもβ-アミラーゼはα-アミラーゼより熱に対して不安定である。α-アミラーゼはβ-アミラーゼから70℃15分間の加熱処理によって精製することができる。α-アミラーゼの至適温度は60~66℃であるのに対

し、β-アミラーゼでは48~51℃である。α-アミラーゼは、温度が60℃から70℃にまで上昇する間、糊化デンプンに反応する機会がある。デンプンの加水分解に使われるこの時間は、パンの種類やパンの大きさによって違ってくる。500gのパンでは2~3分かかる。

オープンスプリングの終了は、抵抗器付きオープンを用いる実験から測定することができるが、ドウの高さの増加は約80℃で止まる。しかしながら、パン容積の増加が止まる温度はパンがどんなタイプのパンであるかによって決まってくる。

(2) 小麦粉成分に与える熱の影響

(1) 脂質

我々は小麦脂質-水相の熱移動についてはこれまで室温と80℃の間でまったくにも観察していない。全ての非極性脂質はこの温度域で液状である。極性脂質は荷電を持つものであれば、温度にはあまり影響を受けずに水相を示す。酸化効果は温度と関係が深い、我々はそれらの効果がベーキングプロセス中には顕著にあらわれないと考えている。

(2) タンパク質

① 立体構造の変化

タンパク質が加熱されると、一般に熱変性がおこる。タンパク質の構造は、その折りたたみが外れ、秩序のない方向へと進み、ランダムコイルをとる。変性は次に会合に進み、あるタンパク質ではゲル化する。タンパク質の変性は、至差走査熱量測定(DSC)でこれまで深く研究されてきた。変性はDSCのチャート上に吸熱ピークとして観察される。しかしながら、グルテンがDSCで解析されると、そのチャートは図18に示されるようになる。そこには4つのピークが観察されるが、いずれも非常に小さなピークである。

最もはっきりしているピークのエンタルピーは、約65℃のところにあるピークであるが、それは1.5J/gと計算された。さらにこの熱移動はデンプンに基づいており、このデンプンはいつもある程度はグルテンを調製するときに残ってしまうものである。グルテンタンパク質は、単にタンパク質からだけからなっているのではないので、カロリメーター中でそれらを加熱するときに変性の

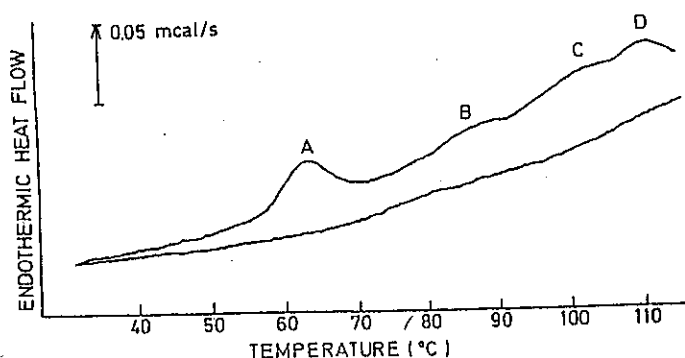


図18 グルテンのDSCサーモグラム

上のカーブは最初にスキニングしたもの。下のカーブは2回目にスキニングしたもの。ピークA及びDはデンプンによるものであり、ピークB及びCは恐らくタンパク質によるものである。

ための吸熱は起こらない。これは牛乳中のカゼインでも認められているもう一つの例である。その時のグルテン変性で吸熱が怒らない理由に対する十分な説明はなされていない。

このDSCサーモグラムは、グルテンタンパク質には何らの秩序だった構造がないことを示していると解釈される。しかしながらグルテンタンパク質は溶液中ではかなりの2次構造をとっていることが知られている。そのかわりにグルテンタンパク質の説明はいろいろある。DSCの技術では、一般に検知できるほどの熱移動を得るため、かなりの強調作用を必要とするが、それでも恐らくグルテンタンパク質では検知は不可能であり、同定できるような秩序ある構造の区域がグルテンタンパク質中にはあまりにも少ないためであろう。もう一つの説明は、グルテンタンパク質が熱に関して異常なほど安定な物質であるということである。

小麦タンパク質の溶液中での熱変性は、円二色性で研究されてきた。20℃から80℃までの温度上昇では、単調だがわずかにγ-グリアジンの秩序構造の量が減少した。その構造変化にはα-ラセンの転移が含まれるが、その変化は可逆的であるためα-ラセン含量の消失は少なく10%以下であった。元々のα-及びβ-グリアジンは非常に類似的の性質を示す。熱に対して顕著な安定性の理由は、部分的にはSS結合にもよるが、かなりの部分は水素結合による。ω-グリアジンは熱で構造的な

変化を示し、約60~70℃で安定した状態に落ち着くようになる。加熱による変化は、疎水的な相互作用の増加や水素結合の減少によるところが大きい。さらに低分子量(LMW)のグルテニンのサブユニットや、会合しているグリアジンの加熱処理はα-ラセンやβ-シート構造といった秩序の消失を引き起こす。還元したLMWグルテニンではこの消失がより大きく、SS結合が構造の安定化にとって重要であることを示している。Carbon-13NMRスペクトルを用いて80℃に水和グルテンを保持した時のその前後のスペクトルの違いを調べると、加熱によっても小麦グルテンは影響を受けず、スペクトルのピークの位置とその強度はその前後で同一であった。パルスNMRは、タンパク質分子の移動度が温度増加で上昇することを示した。このことは分子がより高い温度になると構造がより開かれた状態になることを示している。サンプルを冷やすとその移動度は加熱前と同一の値にまで低下した。

グルテンゲルに与える加熱の影響は先に論じたが、そこでは電子顕微鏡観察から、加熱によるゲルからコアゲルへの変化は主は球状ユニット間のSS架橋の増加によるものであり、そのために全体の構造が変化しないようになっていると判明した。これらの次々生じる橋かけ反応はこれまで述べた結果と一致するものである。

② 機能的性質の変化

グルテンを加熱することにより、その物理化学

的あるいは機能的性質はドラマチックに変化する。再合成粉でベーキングテストを行う時、ベーキングに入る前にグルテンを加熱すると、そのグルテンの機能が低下する。55℃までですらグルテンへの加熱は好ましくなく、パン容積は約10%ほど減少する。75℃、あるいはそれ以上に加熱すると機能面の全体的損失が起こる。

グルテンの加熱処理は、グルテン自体のレオロジー的な性質を変化させる。この変化は、視覚的な観察からも明らかである。グルテンゲルの一片を90℃に数分間保った後これを冷やすとゴム状になり、完全にその粘性を失う。粘性変形は、温度上昇に伴って消失してゆく。さらにグルテンを沸騰水中で処理すると、その処理時間の長さに伴って圧縮性が低下してゆくことがわかった。

ゴム弾力性の統計理論を用いて、架橋間の分子量とその架橋数が計算された。架橋間の分子量は低下し、その結果架橋数は増加した。50℃以上に前処理をすると変化が顕著にあらわれた。レオロジー的性質の変化から、加熱処理で不可逆的な変化が起こっていることがわかる。もし、これがグルテンでない時には、他の一般的な溶液同様、温度上昇に伴って粘度低下が予想される。これらの変化は、グルテンとも構造ともまた一致するものである。

グルテンタンパク質の表面活性は加熱処理によって変化する。グルテンサンプルを70℃か、あるいはそれ以上に加熱すると、未処理のコントロールより伸展性はずっとにぶくなる。また、長時間の伸展時間後の π 値は、コントロールに比べ減少した。もう一つの観察が π -A等温線で行われた。コントロールのグルテン及び、かなり温和に加熱処理されたグルテンの圧縮サイクルを行うと、圧縮している間にそのグルテンを形成している材料が消失していくことがわかった。すなわち、あるグルテン形成材料は、タンパク質膜から絞りだされてしまう。もっとひどく加熱処理したグルテンでは、このような消失は起こらない。

加熱処理グルテンの溶解性は、これまでいろいろな溶媒でチェックされてきた。0.5M食塩水中のグルテンを沸騰水中に入れてその溶解性をしらべると、加熱時間とともに減少してゆくことがわか

った。沸騰5分後の残存しているグルテンの溶解性は、小麦の品種の違いによって違っていた。ドデシル硫酸ナトリウム(SDS)-トリス-HCl緩衝液中におけるグルテンタンパク質の抽出率は、温度上昇に伴って減少することがわかった。

しかしながら、より高い温度はパン容積やクラムのテクスチュアに影響することよりも、グルテンの抽出性に影響することの方に必要であった。1.5% SDS 溶液中のグルテン溶解性は加熱後に低下するが、水中でのグリアジンの溶解性は加熱の影響を受けにくい。 ω -グリアジンの溶解性は加熱で全く影響を受けないが、 α -、 β -、 γ -グリアジンの溶解性は低下する。

これまで述べたデータのすべては、加熱処理でグルテンタンパク質の重合化が起こっていることを示している。結局、これは新しいSS結合がSH基を使って形成されることで生じるはずである。しかしながら、全SH基の数はグルテンの加熱処理でも変化していない。SH基の大部分は、SDS-不溶残渣中に認められたが、このことは、そのメカニズムにはグルテンタンパク質の中のSH/SS交換反応が入りこんでいることを示している。グリアジンは75℃以上の温度の時だけ影響を受ける。

加熱による変化は、貯蔵タンパク質の分子量増加になって現われてくるので、まず最初に考えられるのが、このことがベーキング結果に効果を示すのではないだろうかということである。何故なら、グルテンの分子量が小麦粉品質を決める一つの重大なファクターであるからである。我々のグルテンゲルのモデルでは、すべての架橋は水の帯(ゾーン)の中で生じるものと思っている。もし、このようなゲル、すなわち、水のゾーンがあって、そこではSS結合が未だ全くブロックされていない状態のゲルから考え方をすすめると、ドウミキシングの間、本来の場所にSS結合が生じることによって、ゲルの機械的な強度の増加を得ることができると考えている。殆ど全てのSS結合になりえる可能性が、もしもすでに加熱によってブロックされているようなグルテンゲルで我々の考えをスタートすると、このグルテンは活性のない単なる充填剤にすぎないものであろう。