

製パンに於ける小麦(4)

4. ドウ①

この章では、コロイド及び表面化学の観点からドウ形成について述べる。1個のパンを焼くのに必要な基本原料は、小麦粉、イースト、水である。これらの典型的な比率は、多少は変化するかもしれないが、100:2:65である。

図1に、分散したガス相を含むグルテン、デンプン、水からなる連続相のドウを示した。このモデルには、空気と水の境界線も存在している。すでに述べた小麦粉の各構成成分の知識を取り混ぜて解説する。また、製パン時に添加される原料の塩、砂糖、酸化還元剤、グルテン、酵素、油脂、乳化剤等の役割についても述べる。

ドウの性質を研究する一つの研究手法に、レオロジー的手法を用いるやり方がある。そこで、この章ではいくつかの小麦粉ドウの基本的なレオロジー測定方法についても述べる。最後に数々の考察から生じた一つのモデルをまとめてみた。

1. 連続的なグルテン相

連続体としてのドウは、すでに述べたように、本質的にはグルテンゲルそのものである。後で述べるように、デンプンもまた、最終的にはデンプン-水の連続相を作る。レオロジー的な測定によると、連続的なグルテン相はある種の液体である。連続している構造中には、水が含まれているので、水を含んだ連続体の重要性についても考えてみたい。

もし、短時間のうちにグルテンゲルを作りたいと思うならば、その連続相を得るためにただ小麦

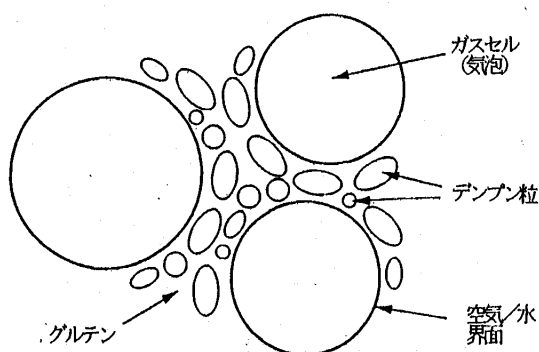


図1. ドウの単純モデル

粉に水を加えただけではだめで、物理的な攪拌という処理を行わなければならない。酸化反応のような化学反応も、ドウのディベロップメント（伸展）にとって重要である。

(1) 水の存在

水なしでパンを作ることとは不可能である。水はグルテン形成のために必要であり、製パン過程に起こるすべての相互作用や反応の媒体となる。パンのクラストとクラムの間には水分含量に違いがある。そのためパンのクラム中とクラスト中では異なった反応が起こっている。

加えられる水の量の違いは、例えばドウのレオロジー的性質やデンプンの糊化程度の違いとして現われてくる。もし、水添加量が最適でないとすると、ドウの取り扱いがしにくかったり、あるいはパンの膨らみが影響を受けたりする。加える水の量は、小麦粉の吸水率を測定して決めるが、

その考え方について述べてみたい。

また、小麦粉中の水分含量は、貯蔵中の安定性にも大きく影響する。貯蔵中の微生物の繁殖や小麦粉自体の悪変を防ぐためには、水分含量を14%以下にすべきである。

① 水の量と水吸収

標準的なパン用ドウ中の水分含量は約40%である。パン仕込み表中で原料の分量は、一般に小麦粉重量に対する比率で表わされるが、パン用ドウ中の水分含量は、約65%である。パンベーキングで最もよい結果を得るための水の最適量は決まっている。

しかし、その水が最適量よりも低いときには、ドウの混合時間は短くしなければならないし、逆に高いときは混合時間を長くしなければならない。パンの容積に与える加水量の影響は、多い加水量よりも少ない方がその影響は大きい。パンの容積は、水分含量が約45%以下になると小さくなる。そして水分含量が35%に近づくと、イーストの入ったドウと入っていないドウの間でパンの容積は殆ど差がなくなる。

次々と進む製パンの過程の中で、ドウ、クラム、クラスト中の水分含量は変化してゆく。以下のような各数値からそのことがわかる。混合したドウでは46.4%、発酵したドウでは47.5%、ベーキングして1時間後のパンのクラムでは44.0%、そして24時間後のパンのクラムでは43.9%である。発酵中に見られる水分含量の僅かな増加は、恐らく発酵で生じる水と発酵室内での多少の水分吸収の結果である。

水の最適量は、小麦粉の構成成分によって異なる。それ故、各々の小麦粉で最適加水量を決める必要がある。もちろんベーキングしてみればよいわけだが、ブラベンダーファリノグラフによって小麦粉の水分吸収量を決めることがより一般的に行われている。小麦粉の水分吸収量は、ある特定の硬さ（普通は500ブラベンダーユニット、BU）のドウにするために、必要な水の添加量として決められている。

小麦粉中のタンパク質の量と質の両方が、この水分吸収量に影響している。水分吸収量は小麦粉中のタンパク質の量が増加するに伴って直線的に

増加するのが、逆に吸収量が落ちる場合があるのは、小麦粉の種類が違うためである。小麦粉中の損傷デンプンのレベルもまた、水の最適量に影響し、損傷デンプン量が増加するとその最適量は増加する。小麦粉中のペントザンと β -グルカン含量もまた水分吸収量に影響する。

② ドウとパン中での水分の分布

コロイド的な観点から見ると、水はドウという連続的な媒体を構成するために重要な成分である。この連続的なグルテン相は、その粘度が非常に高いため、ただちに液相としては認めにくい。その中にある貯蔵タンパク質は水に溶けていないが、先に述べたように、それらはかなりの水分を含んでいる。

ドウ中の水が連続相を構成しているということは、ドウの電気伝導性によって証明されている。電気伝導性は水分含量が減ると減少し、35%になると殆どゼロの値になる。この結果は、連続的な伝導性を与える相を形成するためには、ドウ中に35%以上の水分がなければならないことを示している。この水は自由水のうちの第2相の水と考えられる。この水相は、小麦粉中の水溶性成分を溶かし、化学反応の媒体にもなるし、また飽和点まで二酸化炭素を溶解することもできる。

ドウ中におけるこの第2相の自由水の存在は、超遠心分離したドウの沈殿物から、さらに液相を分離できるという事実からも明らかである。そのゲル相の水分含量は34.5%であった。それより大きい遠心力を用いても、それ以上の液相を分離することはできなかった。この数値はすでに前に述べたように、ドウ中の電気伝導性を得るために必要な最低の水分含量と一致している。分離した液相は、3.4%のタンパク質、0.3%の脂質、3.0%の塩化ナトリウム(NaCl)、残渣(主に水溶性の炭水化物) 7.0%、そして86.0%の水から成っている。

小麦粉を混合しないで、その水分含量を連続的にあげてゆくと、水分含量(W/W) 23%、水分活性(aw) 0.95で非常に急激な変化が現れる。この濃度で、小麦粉は自由に流れる性質を失う。即ち、強い粒子間相互作用を示すわけである。非常にシャープな抵抗ピークが35% (W/W) の水分含量で観察される。この水分含量は、ドウのエク

ステンシビリティ（伸展性）における最も小さな値を示すところとも一致している。自由水は23%（W/W）で分離し始める。また、毛細管凝縮水の量が12%の時、ドウ混合時の機械的な抵抗値は最大となる。これはコロイド的なグルテンゲル構造単位が潤滑条件によって変化するためと思われる。

しかしながら自由水は、ドウ混合の開始時にはドウ全体にむらなく分布しているわけではない。ドウやパンを凍結切断後、その高次構造を顕微鏡で観察すると、水の存在の仕方に三つの違いがあることがわかる。大部分の水はドウ中の広領域に存在しているが、それ以外に水はタンパク質のネットワーク中に小さな水滴で存在するか、あるいはデンプン粒を捕り囲んで存在している。

これら三つのタイプの水の存在状態の違いは、食塩や砂糖のような添加物に影響される。しかし、ドウに電気伝導性があるということは、自由水相が連続的に存在しているということに心を留めておくことが必要である。これはドウが二重の連続相からなるということを示しており、グルテンゲルはもう一つの連続相である自由水によって結ばれて、一つの連続相を成しているということである。これはこの章の最後のセクションで考えることにする。パンの中には自由水はない。恐らくデンプンが糊化する時に全て自由水を吸収するからであろう。

ドウ中の構成成分は、水に対する親和力がそれぞれ異なっているため、連続相と分散相の間ばかりでなく、さまざまな構成成分の間でも、また水の存在の仕方が異っている。ある水は、非常に巨大な分子と密接に結合しているため、その水の特性は変化する。例えば、その水の氷点は普通の水の氷点と異なる。0℃（あるいはこの温度付近）で凍らない水、ここでは不凍水と呼ぶが、この水の量は示差熱分析（DTA）によって求められ、その値は乾燥した小麦粉1g当たり約0.3gの量である。示差走査熱量測定（DSC）でも、同じ値が求められ、その値は小麦粉1g当たり 0.33 ± 0.016 g/gであり、これは小麦粉の水分含量23~24%に相当する。

この水の量は小麦粉の力の強さとは関係ない。

更にこの量はタンパク質含量、損傷デンプン量、ドウの混合時間、あるいは塩化ナトリウムやアスコルビン酸のような添加物によっても影響を受けないドウの中とはほぼ同じ水の比率のデンプン-水懸濁液では、不凍水の量は乾燥物1g当たり0.30gである。この値は、100℃に加熱した後では乾燥物1g当たり約0.38gに変わる。不凍水の水の量は大体タンパク質と同じ量である。しかしこの水は“結合水”と考えてはいけない。というのは、この水は凍結中の性質が普通の水と異なるだけであるからだ。

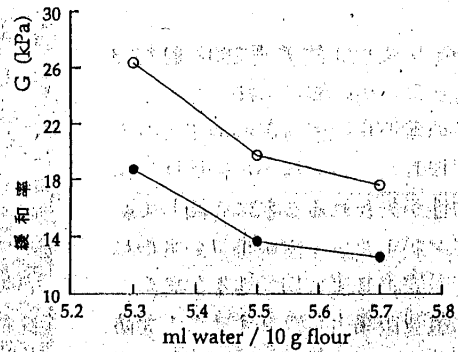
ドウの中に存在する水分の総量は測定できるが、その水分の分布の様子は簡単にはわからない。例えば、ある局所での水の周囲の様子は、デンプンの膨潤や糊化の度合いを決める。グラム中の温度は、ベーキング中100℃を超えない。完全にデンプンを糊化するためには、Tc（示差熱分析での終点温度）は100℃以下になるだろう。ただしこれは、水とデンプンの割合が0.8:1より大きい場合である。

もし水/デンプンの比率が、ドウ中での水分分布の関係からもっと低い時には、デンプン粒の一部糊化したものが、パングラム中に見られるようになるだろう。また、ある局所の水分含量は、結晶状油脂相の液化にも影響することが予想される。しかし、我々は小麦粉中の構成成分の水分含量の違いについては正確には測定できないし、更に、その水の分布状況はその成分によっても変化するかもしれない。

ドウ中の水の分布は各構成成分の水の吸収量の値から計算された。しかし構成成分間の相互作用と、相の分離の可能性については、この計算の中には考慮されていない。各構成成分の水吸収量は次のように求められている。

デンプンは1g当たり0.44g、損傷デンプンは2.00g、グルテンは1.1~2.2g、そしてベントザンは15gの水を吸収し、これらの値からドウ中の水の分布が計算された。それによると、ドウ全体の水分のうちの45.5%がデンプンと、31.2%がタンパク質と、そして23.4%がベントザンと結びついている。しかしながら、すでに述べたように、小麦粉は水を吸収したグルテンゲル相と自由水か

図2. ドウの緊張一緩和に及ぼす水分量の影響



らなる相（デンプンやペントザン）の二相から成っている。グルテンゲルには、全体の水（ドウ中の水分含量は40%）の23/40の量が含まれていることになる。

それとは別に先に述べたグルテンタンパク質の構造的な面から考えるならば、グルテンゲルは約55%（W/W）の水だけを取り込み、過剰の水は分離相になる。小麦粉中の貯蔵タンパク質（グルテン）含量を考慮に入れると、ドウ中のグルテン相での水分保持限界量は、実測したドウ水分含量23%に非常によく一致する。言い換えれば、グルテンゲルとデンプン-水の二相からなるドウの性質は、直接グルテンの構造の基本的な性質に基づいていることを示している。

パンの中の水分分布の研究では、水の77%がデンプンと、23%がペントザンと結合し、タンパク質は全く水と結合していないという結果が示されている。もし、グルテンタンパク質がベーキング中に水との親和性を失うならば、デンプンが多くの水を吸収しなくてはならない。実際にはデンプンの糊化過程で、グルテンからデンプンに移行する水の量は、デンプンの糊化へのグルテンの影響を考慮して計算された。

このような水の再分配は、パンの老化の原因の一つとしても考えられてきた。このことについては、更に後ほど述べたい。しかしながら、グルテンが凝固したゲル（コアゲル）の水分含量が、ゼロであるということは有り得ないだろう。そのゲル空間を埋めている多少の毛細管凝縮水の量が存在していると思われる。このことはモデル実験からも明らかである。加熱したグルテンゲルは、凝固したゲルに変化した後でも多少の水分は保持し

ているであろう。

③ ドウのレオロジー的性質に及ぼす水分含量の影響

小麦粉ドウのレオロジー的な性質は、水分含量に極めて敏感である。図2を見ると、少なくともここに示した水分含量の範囲内では、加水量を少なくすると、増やした時よりずっと大きな効果を示すことが明らかである。小麦粉中の損傷デンプン量は、これらの相互関係の中で大きな影響を与えている。小麦粉中の損傷デンプン量が異なり（9.3%、20.9%）二種類の小麦粉に注目してみると次のことがわかる。

各小麦粉に加える加水量を種々変えて、貯蔵モジュール（Storage modulus）値（ G' ）が同じ量を持つドウを作ることによって同じ位相角（ δ ）にすることはできなかった。損傷デンプンレベルの低い小麦粉は12.4kPaという G' 値を示し、 δ は32.9°あった。同じ加水量を加えた時、損傷デンプンの高いレベルの小麦粉では（小麦粉10.0gに対し5.5mlの加水量） $G'=46.2$ kPaで、 $\delta=21.5^\circ$ を示した。加水量を小麦粉10.0gに対し7.0mlに増加したとき、 G' は14.9kPaまで減少したが、 δ はわずか25.3°だけ増加しただけであった。

G' と G'' （損失率）の水分含量への依存性は、小麦粉中のタンパク質含量に関係する。タンパク質含量が増加すると G' と G'' の両方とも水分含量に対して敏感ではなくなった。しかしながら、ドウの水分含量の増加は、グルテンゲルの水分含量に変化は与えないだろう。即ち、この結果はグルテンタンパク質の膨化する性質と完全に一致した結果であり、このことはすでに述べた。