

製パンに於ける小麦(5)

4. ドウ②

(2) 水可溶物

ドウの中で連続相をつくっている自由水は、ドウの性質に大きな影響を与えている。ドウ中のこの自由水には有機物、塩、無機物等が溶けてくるが、それが具体的にどのようなもので、どのくらいの量が溶けているかの違いによってドウの性質が大きく変化するからである。

① pH

ドウを混合している間、ドウのpHは、その中のタンパク質（構成しているアミノ酸側鎖の電荷の解離による）によって一定の値をとる。ドウの最初のpHは約5.5で、ドウはかなりの緩衝能を持つ。発酵により生じた二酸化炭素は、水相に溶けて飽和状態になりpHを低下させる。標準状態（0℃、1気圧）では、0.04Mが飽和状態である。そこでは平衡反応が起こり、最終的なpHは3.7になる（ $pK_a=6.5$ ）。

温度が上昇すると二酸化炭素は次第に脱気し、平衡反応は左に移る。発酵中の温度変化は、微生物の代謝や繁殖に影響を与えるとともに、このようにpH変化にも影響を与える。サワードウは種々の乳酸菌を用いて作られるが、その時の最終的なpHも約3.6である。このpHは乳酸菌の代謝を抑える値である。

ドウのpHは、グルテンゲル相と脂質—水相の両方の物理的性質に影響を与える。まずはじめに脂質について考えてみる。

電荷を持つ極性脂質は、pHの変化による相変化

を引き起こす原因物質の一つである。この脂質には、フォスファチジルセリンとフォスファチジルイノシトール（各リゾ型も含む）の二つの脂質があり、これらはドウ中の非デンプン脂質には約1%（W/W）、そしてデンプン中の脂質には2%含まれている。この濃度は少な目に見えるが、これだけでも二価のイオンが完全に電荷を持つpHになると、ラメラ相がヘキサゴナル相に転換するのに十分である。普通の水の二価イオンの量も十分である。

小麦粉リパーゼ活性を用いると、脂質の中かなりの量の脂肪酸があることがわかる。この脂肪酸は、悪い要因であると長い間考えられてきた。もしpH 5以上になれば、殆どの脂肪酸はイオン化する。この脂肪酸の悪い効果の理由とは、それらが確実に極性脂質の二重層中に溶け込むことである。水層中のCaイオンはすぐそばの電荷を持つ極性分子の頭部に非常に強い親和性を持つ。これは、くさび形の脂質分子の増加、あるいは分岐状炭化水素鎖の増加を引き起こし、ラメラ液晶相からキュービック相および逆ヘキサゴナル相への相転換を誘導する。イオン化したリン脂質（カルシウムの存在下）も同じように作用する。このことはpHの低下が電荷の解離を凝らす方向に働くが、ガス保持力に及ぼす脂質の効果にとっては都合がよいことを意味している。

グルテンタンパク質の等電点（IP）は広い範囲にあるが、そのうちグリアジンタンパク質のほとんどはpH6.5以上の等電点を示し、一方グルテニ

ンタンパク質はpH6.5以下の等電点を示す。これらの等電点の数値から、ペーハーの変化でドウの構造がどのように変化するかを予測することは難しい。一般的には、グルテンタンパク質の構造中の水のゾーン（帯）にかかる斥力が、タンパク質の電荷の増加に伴って大きくなるということが知られている。それゆえグルテンゲルの膨潤は、等電点から離れるほど進み、その結果ゲルの機械的な強度は減少する。

グリアジンとグルテニンを比較するなら、これらの等電点の値からドウ発酵中のpHの低下はグリアジンの方により大きな影響を与えることがわかる。そのためグルテンゲル中の水のゾーン（帯）に斥力が生じることが十分に予想される。タンパク質中のグリアジンはグルテニンから分離しようとする傾向にあり、しかもグルテニンよりも水和したゲルを形成するようになる。しかし、実際には、このような分離が生じるようなpHがドウの中で起こるかどうかわからない。

グルテンは、 β -ラセン構造（第3図）を持つ球状分子の疎水的な集合体である。水連続相中にS-S結合があり、図中には2カ所のこの結合がみえる。S-S結合により隣接しているタンパク質のユニットが結ばれている。LMW（低分子）区分の小ユニットについては図中には示さなかった。LMW区分には、 β -ラセン構造のペプチドは少ない。各構造ユニット中の β -ラセン構造は一方をむいている。ミセルユニット中の棒状分子の並び方は次のようである。

ミセルの大きさは β -ラセンの長さとはほぼ同じで、HMW（高分子）区分からなる長さ約600Åの分子である。棒状のしっかりした構造体は、三次元方向に並んでミセルをつくるか（左図、棒が互いには入り組む）、あるいはそのいくつかが折れ曲がって空間をうめている（右図、この中には極性基の先端がみえ、 β -ラセン構造の軸も見える）。

② 塩

ベーキングする時、塩が添加されるいくつかの理由がある。塩はパンに風味を与え、ガスの保持力に影響する。パンは、小麦粉の重量当たり1.5~2.0%の食塩添加量で最高の容積を示す。塩が仕込み表から除かれると、パン容積に18%の減

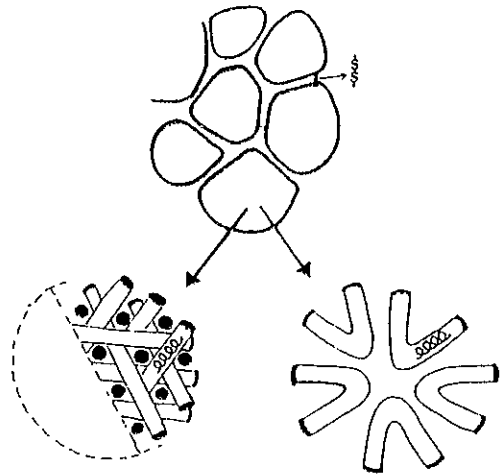


図3 グルテン構造の模式図

少が見られた。また、この時パンクラムの綺目（きめ）は均一であったが、セルの壁が厚くなるということも観察される。

ガス保持力への塩の影響にはいくつかの原因がある。その一つはイーストへの影響である。塩を余り多く入れすぎると、イーストの発酵を遅らせる。また、食塩はドウへの水の吸収を遅らせ、最適のドウディベロップメント（ドウの伸展）までの時間を長びかせる。ファリノグラフで測定すると、塩はドウの安定性を増加させる。ミキソグラフでも同様の結果が得られている。すなわち、最適ディベロップメントまでの時間が食塩添加で長くなり、ドウの安定性が増加する。 α -アミラーゼのような酵素があると、その活性は塩によって阻害される。

コロイドの安定性に対する塩の影響については、DLVO理論と関連させて先に述べた。タンパク質が会合する性質は、電解質で大きく影響を受けるが、そこでは増加した塩の濃度が電荷を持ったタンパク質の二重層を圧縮したり、タンパク質の斥力を減少させることにより生じる。このような観点から、ドウディベロップメントに与える塩の影響が最近ではレオロジー的な測定と粒子サイズの研究から考えられている。

見かけの粘度とずれ率は同じように変化した。具体的には塩の添加量を0から1%にすると約20

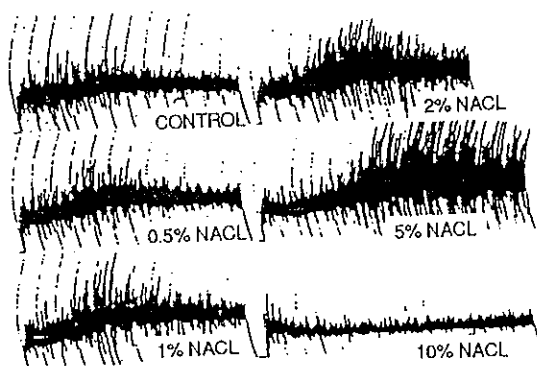


図4 ミキソグラフにみる塩の影響

%の増加が見られ、その量を1から4%に上げるとさらに僅かな変化があった。水-小麦粉のスラリーの粒子径もまたそれに応じて変化し、ドウのディベロップメント時間も添加した塩によって短くなることがわかった。L2相と類似の構造を考えるならば、流動体としての性質へのこの塩の影響を考えることは自然である。塩濃度を増加すると、その結果タンパク質凝集体どうしの間に非常に薄い水ゾーンの生成が起こる。タンパク質のユニットが流動して変形する可能性について示されている。

静電気的な相互作用が塩で覆われて消失してしまうと、その代わりタンパク質間の疎水的相互作用がはっきりと現れてくる。タンパク質中のこれらの疎水的相互作用の強さは、加えられる塩の離水系列中での位置によって予測される。離水系列中におけるイオンの位置の重要性は、それが水分子の構造を決める点にある。すなわち、イオンが水の構造を大きくするように働くか（構造構築者）、あるいはその構造を壊すように働くか（構造破壊者）ということである。

水の構造いかににより疎水的相互作用は、タンパク質分子中の非極性グルーブの位置を決める。これらの塩の作用（電荷を覆ってしまう効果と、それによって生じた疎水的作用）は、ドウの水吸収、レオロジー的な作用、そして最終的にはパンをベーキングした時の結果（たとえばパンの容積）などに影響を与える。

グルテンの強さは塩によって影響される。しかも異なった種類の塩を添加した後では、グルテン

の強さは次のような順、 $\text{KCl} < \text{NH}_4\text{Cl} \approx \text{NaCl} < \text{BaCl}_2 < \text{LiCl} < \text{CaCl}_2 < \text{MgCl}_2 < \text{NaNO}_2 < \text{NH}_4\text{NO}_3$ で大きくなる。また、 Cl^- 、 Br^- 、 ClO_4^- 、 I^- 、 SCN^- のナトリウム塩を0.05–0.10Mという低い濃度で小麦粉ドウに加え、ファリノグラフでドウの水吸収量を測定すると、無添加の時と比較し、その現象が観察された。NaCl濃度0.10M以上の高濃度では、さらに減少が見られた。一方、他の負イオンでは、水吸収量は $\text{Cl}^- < \text{Br}^- < \text{ClO}_4^- < \text{I}^- \approx \text{SCN}^-$ の順で増加する。

ファリノグラフのディベロップメント時間と吸収量の関係を1.00Mという高い濃度で調べて見ると、明らかに水の構造をこわすよう（構造破壊者）な負イオン（ I^- 、 SCN^- ）が小麦粉に高給水量とディベロップメントタイムの短縮を引き起こす原因になっていることがわかる。他のファリノグラフ特性値も変化する。

F^- や Cl^- のような水の構造を作るもの（構造構築者）は、小麦粉の粘りを低下させるが、その安定性は良くする。水の構造を壊すもの（構造破壊者）は、それと反対の方向に働く。すなわち、小麦粉の粘りを増加させるが、安定性を悪くする。ミキソグラフが示す小麦粉の各性質も、塩を加えることによって影響を受ける。NaClは混合時間を長くし、ミキソグラムカーブの高さと幅を大きくする。図4にこれらの性質を示した。

塩化ナトリウムは、小麦粉の会合を大きくし、それに伴ってドウの強さが増加し、水吸収は減少する。塩化ナトリウムを他のイオンに置き換えた時のドウレオロジーに現われる影響について調べられてきた。塩化ナトリウムの20%あるいは40%が、塩化マグネシウムや塩化カルシウムで置換された時、ドウに強さが現われたが、塩素イオンを硫酸イオンに置き換えると逆に、ドウの力を弱くした。予想通り塩化カリウムで置換した時は全く効果がなかった。2価のイオンによる影響は、これらのイオンが単にタンパク質のイオン化している二重層に影響を与えるばかりでなく、タンパク質同士を結合させることにも影響しているため、タンパク質は、全く複雑な様相を呈する。

塩はそのまま直接加えられるが、あるいは一度水に溶かして加えられるかしてドウの水相に入っ

てゆく。これまでの議論からわかるように、水の硬度、つまりカルシウムや他の無機質の含量の高い低いも重要である。一般には中間的な水の硬度が好まれる。極端な軟水はドウを大変に柔らかく、ねばねばにする。一方、極端な硬水は発酵を遅らせる。水の中のイオンは、また極性脂質の性質にも影響する。

電荷を持った脂質があると、脂質-水の相の性質に及ぼす塩の影響は、非常に急激な変化として現われてくる。たとえば、ある電荷をもったリン脂質が、水とラメラ相を作っている穀物中のリン脂質や糖脂質中に存在すると、そこに少量のカルシウムを添加した時、ラメラ相は変化して製パン時に全く異なった機能を示すヘキサゴナル相になる。蒸留水中ではレシチンはラメラ液晶層だけを形成するが、硬質の水道水中では、色々な相の混合状態を作る。ラメラ液晶相は、この水道中にも見られるが、L2とヘキサゴナル相も、その中に存在している。後の二つの相は、パンベーキング中に改良効果は示さない。この水を乳化剤を分散させる水として用いると、あまり有効な分散効果は示さない。

デンプンの糊化は、イオンが存在すると影響を受ける。しかし、その効果が出てくるにはかなり高い塩濃度が必要で、パンベーキングでは、この塩の影響はあまり考えなくてよい。しかし、高濃度では、室温ですらデンプンの糊化が起こる。

③ 砂糖

パンベーキングでは砂糖（普通、蔗糖）が重要な役割を演じる。砂糖はイーストのための簡単な炭素源として用いられる。砂糖の添加量はそれほど多くはないので浸透圧作用は考えなくてもよい。砂糖はパンクラストを茶色にするが、これはメラード反応（イースト中の酵素インベルターゼが砂糖をフラクトースとグルコースに加水分解し、これらがタンパク質と反応する）と、カラメル化によるためである。蔗糖はパンに甘さも与える。

パン仕込み材料中の蔗糖量が少ない場合、パンベーキングへの蔗糖の影響は、ちょうどここに挙げた例によって決まってくる。砂糖/小麦粉の比率がかなり大きくなると、パンはもちろんのこと

ドウの構造や性質にも大きな影響が出てくる。小麦粉100g当たり砂糖6.0gのレベルでは、砂糖はドウ中の水分分布に影響する。水は、ドウの中にむらなく染みわたるが、その大部分の水の中に砂糖がまんべんなく存在しているわけではない。

蔗糖はデンプンと水、あるいは小麦粉と水懸濁液の両方で加熱前、後の粘度に変化を与える。小麦粉と水を1:1の比率で混合すると、多少乾燥した感じの粉体になる。もしその一部として蔗糖の粉末を（デンプン:水:蔗糖=1:1:1）加えると、自由に流れような液状に変化する。小麦デンプン糊のG'値は、その中の蔗糖が低濃度（10%まで）の時には大きくなるが、さらに蔗糖の添加量を増やすと逆にG'値は減少してくる。

糖を添加するとデンプンの糊化温度は上昇する。しかしすべての糖が同じ効果を示すわけではなく、二糖類は単糖類より効果があり（糖の重量を基本とした場合同様、モルを基本とした場合にも）、その二糖類の中では蔗糖が最も効果がある。製パンの添加レベルでは、デンプンの糊化への糖の影響は観察されないかもしれないが、蔗糖/小麦粉を高比率で用いられるようなパンでは、この蔗糖は糊化温度を高温度側に移動させる。それでもその温度は100℃以下であり、完全な糊化は起こらない。

デンプンが糊化する時の糖の影響とは、デンプンと糖が水を奪い合った結果のデンプン糊化の阻害であると述べている。しかし、これだけでは十分に説明しえない。その説明として、砂糖が水に溶けると、水の粘性効果が低下することも挙げられる。即ち、糖分子のサイズは水分子のサイズより大きいので、糖が入るとデンプンのガラス転移温度は水だけの時ほど低下しない。

デンプン糊化のもう1つの減少が、糖/デンプンの高比率の時と、水/デンプンの低比率の時に見られる。これらの条件の時、糊化時の吸熱がより高い温度の方に变化するばかりでなく、その温度域が狭くなる方へ変化する。この事は、高温度下なら、糖が存在していても簡単に糊化が起こることであることを示している。これまで述べたように、これがベーキングの系の中でもより低い粘度になるという一つの説明である。