

# 食品の力学的性質(Ⅱ)

パン生地 (Dough) のレオロジー

岡 部 巍\*

## I 前 が き

去る10月17日、京都大学農学部に於いて、京都大学食糧科学研究所、京都大学農学部、及び日本農芸化学会関西支部の共催で当時訪日していた穀類科学者のカナダ、アルバータ大学農学部長A.G. McCalla 博士と、カナダ国立穀類研究所次長I. Hlynka 博士の穀類科学に関する講演会が開催された。Dr. McCalla の演題は「最近の穀粉化学」であつたが、内容はカナダに於ける小麦、大麦、等の穀物事情を主として小麦粉の品質に関する化学的な問題が取り上げられていた。又Dr. Hlynka の演題は「食品のレオロジー」であつたが内容は dough のレオロジーに関する博士の最近の研究について述べられたものである。この機会に dough のレオロジーに関する従来の研究をごく簡単に概説すると共に、Dr. Hlynka の講演の要点について解説を加えて見たい。

欧米に於いては、パンは主食として極めて重要なものであるが、この生産は主として大規模工場に於いて行われ、製パン技術についての研究も亦非常に盛んである。パンの品質を決定する一つの大きな要素は主原料である小麦粉の性状である。製パンに関する小麦粉の性状は其の化学的組成にも支配されるが、むしろ物理的性状が重要な役割を果している。

このため amylograph によつて原料小麦粉の澱粉の糊化性状をしらべたり、更に水でこねて dough をつくり其の物理的性質を検討する。dough は製パンに於いて小麦粉と製品のパンの中間に位し、其の性状は原料小麦粉の性質をある程度反映し、又それから作つたパンの品質に関係するものである。よつてパン生地の流動学的性質は古くより多くの研究がされており、又之の様な性質を測定する機器も種々のものがあり、製粉、製パン等の工場の研究所及び試験室に於いて実用的な試験、研究が続けられている。

## II Doughの基本的な流動学的性質

小麦粉を約其の半量の水でこねると dough が出来

る。之を極く軽く指で押えると凹むが指を放すと元に回復する。之は弾性変形である。しかしもう少し強く押えて放すと完全に元にもどらない。即ち流動を生じている。ある力以上力を加えないと流動が起らないから塑性流動である。この dough を其のまま長く放置しておくとは変形はゆつくり回復して行くのが認められる。之はクリープの回復である。しかし如何に長く放置しても完全には回復しない。この様に dough は簡単な定性的方法による試験によつても、相当複雑な流動学的性質をもっている事が予想される。よいパンをつくるには強力粉が用いられるが、強力粉は小麦粉中の gluten の量が多く、質の良いものである。dough の弾性は蛋白質の連鎖から出来ているバネ様構造による事が明らかになつており、更に、良質の gluten では蛋白質を形成するポリペプチド連鎖間がシスチン等の含硫アミノ酸の—S—S—結合によつて結ばれている。質の悪いものはこの—S—S—が—SH HS—と還元された形となつて結合が解けてしまつている。之が小麦粉より作つた dough が完全な gluten による網状構造を形成するか否かにかかつて来ており、ひいては製パンに大きな効果を及ぼす様になつて来る。このグルテンの質の問題はコールドパーマの方法より類推する事が出来る。コールドパーマに於いては最初還元剤を振りかけて、毛髪の蛋白質ケラチン中に多量に含まれているシスチンの—S—S—結合を—SH HS—形として毛髪を弱くして置き、この状態で希望の髪形にクリップする。次で酸化剤を用いて—SH HS—を酸化して—S—S—形にもどして毛髪の強さを元にかえす。其の後クリップをはずしても髪形はくずれなくなる。

この—S—S—結合が gluten に於いて網状構造の形成に関係しており、更に dough の弾性的性質にも重要な役割を果している。

Schofield, Scott-Blair は円筒形の dough の試料をつくり、特殊な Extensimeter によつてこの試料を引張り、其の粘弾性的性質を研究した。この結果、引張り応力の作用による dough の挙動は (3.1)式の

\* 本学講師

様になる事を見出した。

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{G} \frac{d\tau}{dt} - \frac{d\alpha}{dt} + \frac{\tau}{\eta} \dots\dots\dots(3.1)$$

之の式は前回の(12')式に  $d\alpha/dt$  の項を附加したものである。前回の(12')式を再録すると、

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{G} \frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{\eta} \dots\dots\dots(3.2)$$

ここで  $d\gamma/dt$  は粘断速度,  $G$  は剛性率,  $\tau$  は剪断応力,  $\eta$  は粘性係数,  $t$  は時間である。

(3.1) 式の  $\alpha$  は弾性余効 (elastic after effect) の影響を示している。(3.1) 式が (3.2) 式に近い事は dough の粘弾性が主として弾性を象る spring と、粘性を象る dashpot が直列になつている Maxwell の要素により近似的に記述される事を示しているが、この他に時間的な弾性効果の影響が入つて来ていることを示しており、挙動を完全に記述するにはもう少し複雑な要素を考えねばならない。

dough の粘度や弾性率は水分量の変化によつて増減するが、粘度や弾性率の水分量による影響は同一でない。それで一般に用いられる様な条件では弾性率の変化は一般に少いので弾性率を一定条件にして行つている。この様な条件では強力粉の dough は薄力粉の dough より粘度がずつと大きい。しかし同じ粉で、同じ水分量で造つた dough も、こね方、こねる時間、ねかしの時間によつて粘弾性的性質は変化する。

Schofield 及び Scott-Blair は dough の構造と粘弾性について次の様に結論している。

- 1) パン生地の中の二つの重要な性質は粘度と弾性である。
- 2) 両者共、応力、歪の大きさに依存し、dough の温度、放置時間、水分量により変化する。
- 3) Maxwell の緩和時間の概念を拡張して適用出来る。
- 4) パン生地は構造粘性、加工硬化、弾性余効、遅延弾性等の諸現象を示す。
- 5) パン生地の弾力は緩和時間に依存するが、もろさは構造粘性と関係を持つている。
- 6) グルテンの分枝結合を有する蛋白質連鎖が連続的な弾性網状組織を形式している。この連鎖間結合は場所により強さが異なる。

ところで Katz は、この様な方法で測定した弾力、及び粘性はパン業者が感覚によつて得る "body" とか "spring" とか異なるものであると述べている。感覚による主観的な印象は総合された力学的性質を感じるが、客観的な測定は粘性とか弾性とか云うパラメーターによつて dough の力学的性質の中、一部を抽出

しているに過ぎない。しかし正確さに於いて客観的な方法がまさつている。

この様に dough の流動学的性質を粘弾性体と考えて、粘性係数、弾性係数、緩和時間等のパラメーターによつて記述して行く事は有用であるが、之だけでは充分実用的な知識を得る事は出来ない。そこで dough の力学的性質をこの様なパラメーターで記述せず、もつと実用的な性質を知ろうと云う目的でいろいろの測定法が行われている。

### III Dough の流動学的性質の測定器

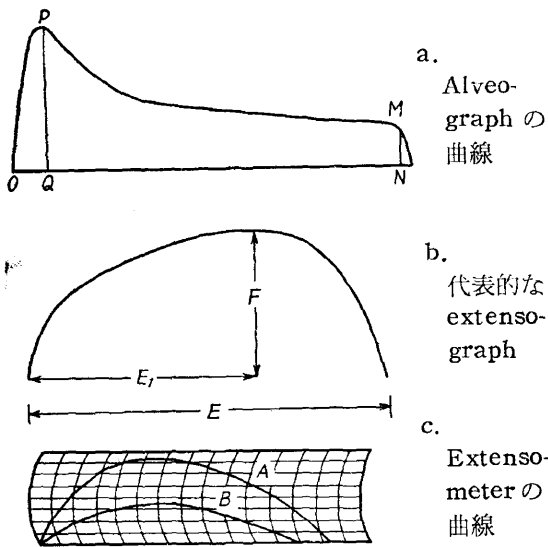
Dough のレオジカルな性質を測定する装置や試験機は色々あるが、其中主な二三の機器について述べる。

#### 1. 伸張性試験機

**Alveograph, Brabender Extensograph, Halton Extensometer** 等がある。

- 1) **Alveograph**: dough の薄膜りをつく之を上二つの平板の間に狭む。上の板には大きな円形の孔があいており、下の円板の中心には小孔がありここから空気が流入して来る。この空気によつて dough は風船の様にふくらむ。この時の dough の膨張と空気の圧力を自記する。Alveograph によつて第3.1図 A の様な曲線が得られる。横軸は伸張度、縦軸は空気の圧力である。最初膨張に対する抵抗は最大となり、圧力は  $P$  で最大となり、次いで大きく減少し最後に殆んど変化がなくなる。M 点で気泡が破れる。最大圧力  $P$ 、破れる直前の気泡の容積の平方根  $G$ 、及び曲線の下の方の面積の函数である  $W$  が伸張性を表わすのに用いられる。 $W$  は空気が dough の膜を押し拡げるのにした仕事である。粉の種類によつてこの曲線の形は変り、一般に薄力粉の dough は強力粉の dough より伸強度が劣つている。

- 2) **Brabender Extensograph: Farinograph** (後出) で一定の条件で dough をつくり、之の一定量をとつて円筒形に成形し、之をクリップで支えて置いてアームで引つかけて引き伸ばし、その時に要する力と伸びとを自己記録する。extensogram は第3.1図 B の様になる。一定伸張速度で dough を伸張させるのに加える力  $F$ 、伸張度  $E$ 、最高の引張り力に対応する伸張  $E_1$ 、extensogram 下の面積  $A$  が粉の特性を示す為に用いられる。 $F$  と  $E$  の比は製パン性を示し、面積  $A$  は粉の力の尺度となり、 $E_1$  は弾性を反映している。



第 3. 1 図

3) **Halton Extensometer** : 特定の条件で作った dough の塊を二つの針にさし、一方の針が一定速度でこの塊を引き伸ばし、其の時の力と伸びの関係を自記する。この試験は弾性率を一定にした条件で行われるので厳密な意味でのレオロジカルな性質をつかまえやすい。曲線は荷重—伸張の関係を示すが、弾性率を一定すると曲線の形は粘度/弾性率、即ち、緩和時間を表わす。曲線を第3.1図 C に示す。曲線A, B は共に伸張度はよいが、Aは製パン用に適した粘度/弾性率の高いものである。

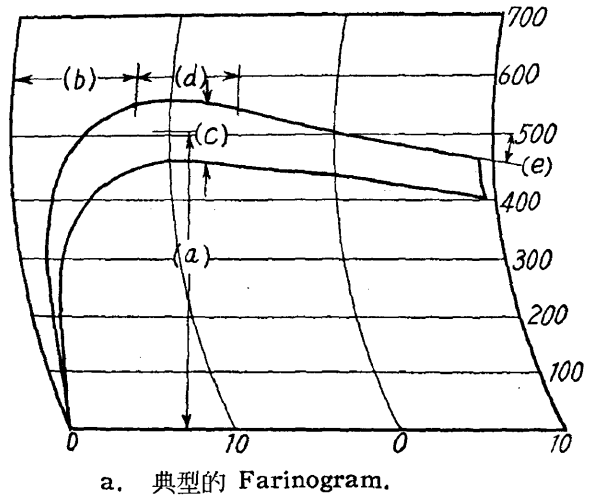
2. 混捏試験機

**Farinograph** や **Mixograph** がある。

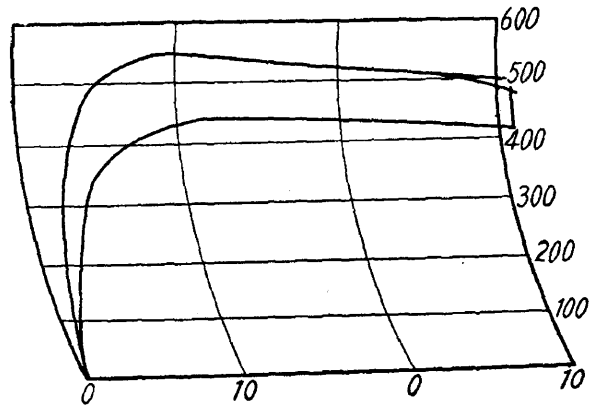
1) **Farinograph** : 自記装置を持った遅速度混捏機と云える。粉の吸水量をあらかじめしらべる予備試験をして置き、粉を入れた後定められた量の水を一度に加える。混捏機の腕は一定速度で回転するが、之に要する力を時間に対して記録して行くものである。**Brabender Farinograph** では其の力を **Brabender Unit** の粘度で表はしている。**Farinogram** は第3.2図 a, b, c, の様に得られる。a, は標準型, bは強力粉の場合, cは薄力粉の場合を示す。

3.2図 a に於いて (a) は dough のかたさか示し、(b) は最適 dough 生成時間を示しており、之は粉の吸水速度に依存し、強力粉では長く薄力粉では短い。(d) は混捏に対する抵抗力の持続性即ち dough の安定性を示すものでやはり強力粉は之が長い。之は製パン業者が重要な関心を持つものである。(c) は dough の易動度の函数であ

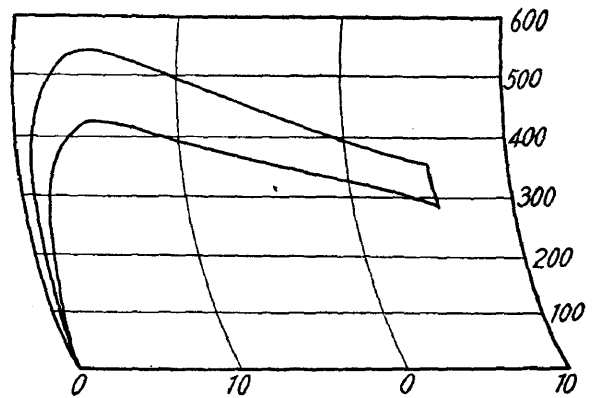
る。(e) もやはり dough の安定性に関する。



a. 典型的 Farinogram.



b. 強力粉の Farinogram.



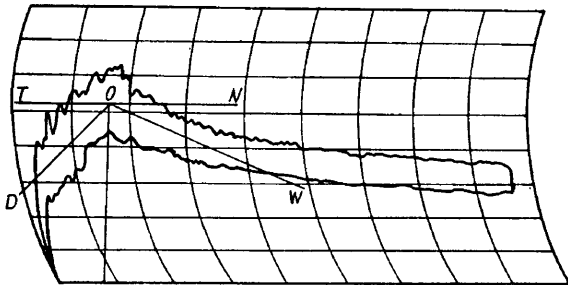
c. 薄力粉の Farinogram.

第 3. 2 図

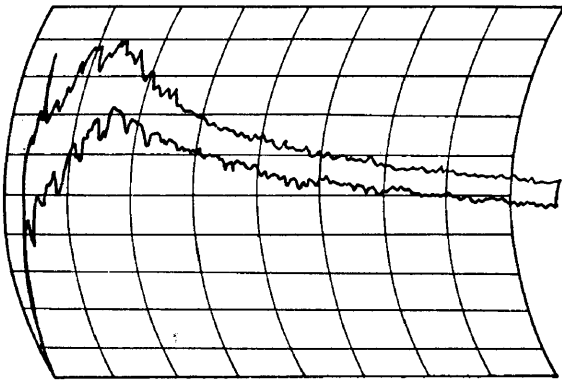
2) **Mixograph** : 四本の固定したピンと四本の回転するピンとの間で粉と水とをこね、更に dough はこねまわされ、引き伸ばされ、折りたたまれる等の複雑な運動をする。この間の抵抗を時間に対して自記記録する。この間の抵抗を時間に対して自記記録する。記録図は第3.3図 a, b, c, の様に得られる。図aに於いてOは最小易動度になる点、TOは最少易動に達する必要な時間

∠DOT は dough の生成速度, HO は蛋白質量と吸水に左右される。∠WON に弱化速達である。

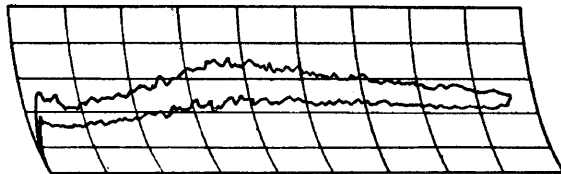
図 b は高蛋白質小麦粉, 同図 c は低蛋白質小麦粉の mixogram を示す。



a. Mixogram の説明図.



b. 高蛋白粉の Mixogram.



c. 低蛋白粉の Mixogram.

第 3. 3 図

#### Ⅳ. Dr. Hlynka の講演について

Dr. Hlynka は dough のレオロジーと化学に対し興味を持つて研究しているカナダの穀類化学者である。博士の講演は dough のレオロジーについて **structure relaxation (構造緩和)** の考えを主として導入しており, 特に **relaxation constant (緩和常数)** で dough のレオロジカルな性質の多くを語らせようとしている印象を受けた。今この要点を述べると共に若干の補足的な説明を加えておく。

前述の如く dough は小麦とパンの中間にあつて重要な役割を果しているが, パン製造業者は長い間の観察と経験で dough の最もよい品質のものを見分ける技術を習得して来たのである。しかし研究科学者は dough をより基本的なより有意義な方法によつて測定し, 記述する方法を發展して来た。

dough の性質は主として次の様な要素によるものと考えられる。

- 1) 粉の品質
- 2) 添加した水の量と吸水量
- 3) 一般に小麦粉改良剤として加えられる添加物の特性基, 即ち bromide, iodide, 及び chlorine dioxide の存在,
- 4) 混合の時間と強さ,
- 5) ねかし時間と反応時間,

之等が主な要素である。

実験は多くの場合, 粉—水—塩の単純な組成の dough を用いたが, これによつて得られた知識をもつと複雑な dough の理解に役立たせ得る。

次に研究の要点を示す。

##### 1. ねかし時間 (Rest period) の効果

同じ様に処置した dough を 10, 20, 30, 40, 60, 及び 120 分とねかし期間をかえて試料として, extensograph にかけて観察する。之から得られた extensogram はねかし時間によつて相当異なつて来る事がわかつた。(第 4 図 a), そこで更に動的な dough の性質を性格づけるのに構造緩和の概念を導入した。

##### 2. 構造緩和 (Structural relaxation)

第 4 図 a を三次元的に配置すると同図 b の様になる。この diagram で一定伸長に対応する荷重 (load) を結んで行くと図の太線が得られる。之を構造緩和曲線と呼ぶ。之が動的な dough の特質を示している。この緩和曲線を検討すると, 双曲線の方程式に近似している事を見出した。この構造緩和曲線は

$$(L - L_A) t - C = 0 \dots \dots \dots (3.3)$$

で表はされる。之を開いて整理すると

$$Lt = L_A t + C \dots \dots \dots$$

となり, 直線関係が得られる。よつて構造緩和が直線の傾斜  $L_A$  と截片  $C$  と云う二つの簡単な常数によつて表わされる様になる。又構造緩和を他の異つたパラメーターで表わすことが出来る。

即ち漸近線の交点から両漸近線のなす角の二等分線を引き, 之の二等分線の双曲線の交点から漸近線交点迄の距離を **semi axis constant C**, とし, 之の  $C$  と **asymtotic load** (漸近線となる荷重) の二つのパラメーターを用いられる方法である。(第 4 図 c, d)

註, 直交二軸  $X, Y$  を漸近線とする双曲線は  $xy = k$  で表わされている。又  $Y$  軸と  $y = b$  である直線を漸近線とする双曲線は

$$x (y - b) = k \dots \dots \dots (3.5)$$

移項すると

$$x(y-b) - k = 0 \dots\dots\dots (3.6)$$

ここに於いて  $x=t, y=L, b=L_A, k=C$  と置けば

$$(L-L_A)t - C = 0 \dots\dots\dots (3.3)$$

となり (3.3) 式と同じになる 之を開いて移攻すれば

$$L_A = L_A t + C \dots\dots\dots (3.4)$$

が得られ、 $y=ax+b$  型の直線の方程式となるから荷重とねかし時間の積は、ねかし時間に対して直線関係となる。かくして構造緩和は勾配  $L_A$  と截片  $C$  の簡単なパラメーターで表わされる事になる。

前にも述べた様に  $L_A$  は漸近線に相当する荷重であり、 $C$  は双曲線の形を決定する常数である。構造緩和の知識を得るにはこの二つの常数の中  $C$  の方が重要である。

註、双曲線の一般式は (漸近線は X 軸及び Y 軸)

$$xy = k \dots\dots\dots (3.6)$$

この双曲線が漸近線の二等分線と交わる点では  $x$  と  $y$  とは等しいから

$$xy = x^2 = y^2 = k \dots\dots\dots (3.7)$$

$$\therefore x = y = \sqrt{k^2}$$

semi axis constant  $c$  の自乗は

$$c^2 = \sqrt{k^2} + \sqrt{k^2} = 2k$$

$$\therefore c = \sqrt{2k}$$

となる。即ち  $k$  が大になれば  $c$  は  $k$  の平方根に比例して大となり、 $c$  を用いても双曲線を表わし得るわけである。

Bromate の反応時間と semi axis constant  $c$  の関係は直線状に得られ、structural relaxation に於ける semi axis constant が有用である事を示している。(第4図e)

### 3. 改良剤の効果

化学性改良剤の dough やパンに対する効果は実用上重要なものである。この効果も構造緩和の方法によつてうまく述べて行く事が出来る。反応時間と緩和時間の関係は第4図fに示されるが、未処理の dough は自動的な酵素作用によると見られる緩徐な劣下が起つているに対し Bromate を添加すると初めの一時間位は変化がないが、其の後は反応時間に応じて大に効果を表わして来る。一方沃化物は非常に速みやかに作用して mixer から取り出した瞬間に其の最大の効果を示している。そして反応時間の増加と共に

dough の物理的性質は徐々に劣下して来る。

### 4. Mixing の効果

Dough の製造に於いて混捏法が非常に重大な役目をしている。この方法が違えば色々な現象に明らかに差が現われて来る。この原因は第一は空気中の酸素が dough に結合する為である。構造緩和による研究では酸素は沃化物と臭化物の中間位にあることを示した。其の他の現象として dough の混捏とそのねかし期間に於ける dough の構造の破壊と回復については構造緩和を利用して研究を始めている。

### 5 dough の吸水

dough の吸水を見るのに工場の研究所では以前より Farinograph が使われている。(第4図g) この装置によつて更に基本的な研究を始めた。Farinogram による dough の吸水について dough のかたさの逆数(易動度)を吸水に対して plot すると直接関係が得られる事より、dough の易動度が吸水に支配されている事を確かめた。(第4図h)

## V 結 び

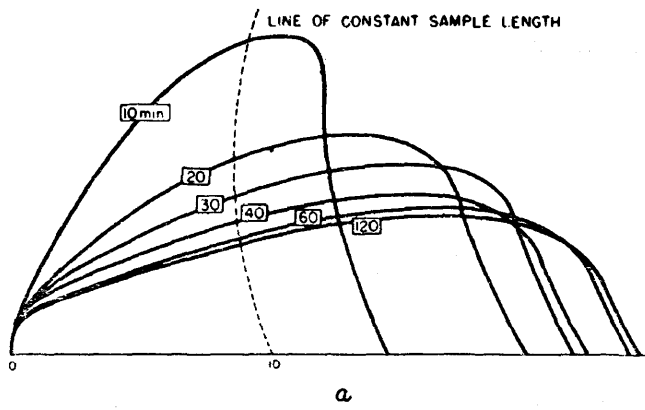
以上が dough のレオロジーに関する概要と Dr. Hlynka の講演の要点である。欧米に於いては dough のレオロジーに関して更に研究が進められている。

人間の感覚と食品のレオロジーの関係や、一般の食品に対するレオロジー的性質の測定法については又機会を改めて述べたい。

## 文 献

本編を記するに当り参考とした主要文献は次の様なものである。

- G. W. Scott Blair, "Foodstuffs their Plasticity, Fluidity and Consistency" (1953)
- I. Hlynka, 講演 "食品のレオロジー" (1958, oct. 17),
- D. Katz, Cereal Chem. 14. 382 (1937)



DERIVATION OF RELAXATION CURVE FROM EXTENSOGRAMS

