

JIBはみだし授業

日本パン技術研究所教育コースの興味深いテーマを解説します。

「仕込み水温の計算式・・・ 何故、その通りにならないの？」 ～ 何故、粉温・室温・ミキサー上昇温で変な数字が出るのか ～

(一社)日本パン技術研究所 研究調査部 原田昌博

かれこれ 25 年前、部署異動により製パンに関する仕事が増えてきた中、製パンの知識を勉強する意味で基本となる本を色々と読みあさっていました。

そのうちにパン生地を仕込む頻度も増え、時には初めて訪問するベーカリーの現場でも生地を仕込まなければならないこともありました。つまり不慣れな現場で行う新製品の試作テストです。

この時、捏ね上げ温度が極端に設定温度から外れないように、必ず仕込み水温の計算を行っていました。特に、ミキサーボウルを下から氷水で冷やせないスパイラルミキサーで生地を仕込むときのプレッシャーは半端なかったという記憶があります。

当時の計算式は昔の職人によって広く提唱されたもので、

『仕込み水温＝

$$\{(\text{捏上希望温度} - \text{ミキサー上昇温}) \times 3\} - (\text{粉温} + \text{室温})』$$
です。

しかし、ご承知の通り、暑い夏場や寒い冬場では、計算した水温で予定通りの捏上温度が得られることは稀でした。

それから年月が経ち、昨年の 8 月の事です。パン学校 100 日コース卒、アドバンスコース修了生の福井県の個人店のオーナーから問い合わせがありました。彼も猛暑の夏、水温計算がうまくいかないことに対するジレンマに陥っていたのです。

結局、彼に個人レッスンすることになったのですが、よくよく考えると同じ問題で困っている方は意外と多いのではないのでしょうか。何も難しい製パン科学や理論のレベルと比べると単なる水温計算です。

しかしパン酵母の発酵速度に温度が関わっているため、想定していた生地温度以上に捏上温度がブレてしまうと、目的の品質から逸脱してしまいます。

パンの基本は昔から「計量・温度・時間」というように温度を制することはとても大切だといわ

れてきました。

そういうこともあってパン学校の授業では、時にはミキサーボウルの下から氷水や温水で生地温度を調整し、捏ね上げ温度が設定通りになるように研修生に指示し、温度管理の重要性を説いています。

一方、製パン現場ではいかがでしょうか。早朝から慌ただしい仕込みの現場では、氷水のボウルを下から当てて生地を冷やしているような時間的余裕はありません。

それならば、生地を仕込む上で基本中の基礎ともいべき、仕込み水温について、改めて考えてみたらどうかと思い、今回のテーマと致しました。

1. 仕込み水温の計算式が正確性に欠けるのは何故？

① 機種ごとに異なる各速度のミキサー上昇温は重要だろうか

100 日コース序盤で、研修生に対して「仕込み水温を計算しておくように！」と指示を出しておく、決まって「先生！このミキサーは低速一分で何度上がりますか？中速は？高速は？」と質問してきます。

その答えですが「私は全てのミキサーを把握している訳じゃない。食パン生地だったら合計 12℃くらい、中種生地だと 5℃くらいで計算してください」と言います。

もちろん、使用するミキサーで若干の誤差はあります。そのざっくりと示したミキサー上昇温が機種間で近似ということに関する根拠を述べます。

ミキシングは低速～中速前半で製パン原料の分散・均一化、溶質（砂糖や食塩）の溶解、小麦粉の水和（A）が成され、中速後半～高速でグルテンの引き伸ばし（B）が成されます。

（A）は水和で僅かながら熱が発生します。

この水和熱は、水分が極端に低下した乾燥小麦粉や枯れきった小麦粉ほど高く発生しますが、



一般にエージング管理された小麦粉の場合は極僅かなので無視して構いません。

(B)はグルテンを所定の薄膜状態になるまで引き伸ばす力、つまりエネルギーであり、ミキサーの混捏力が余程低いミキサー（例えば攪拌子とボウルの隙間が広すぎるなど）でない限りは、強い凝集力を持ったパン用粉（強力粉）のグルテンに対して投入するエネルギー量はほぼ同等のはずで

す。そこで、スパイラルミキサーと横型ミキサーを用いた試験を紹介します。図1はスパイラルミキサー2機種（KがDよりも回転速度が早い、またKのボウルセンターの棒を外した試験区も示しています）を用いて同じ加水量のとき、さらに加水量を大きく増やした時のミキシングカーブを示します。

そしてミキシング終了時の生地状態が近似であることを示すため、写真1に捏ね上げ時の生地膜の状態を表しています。

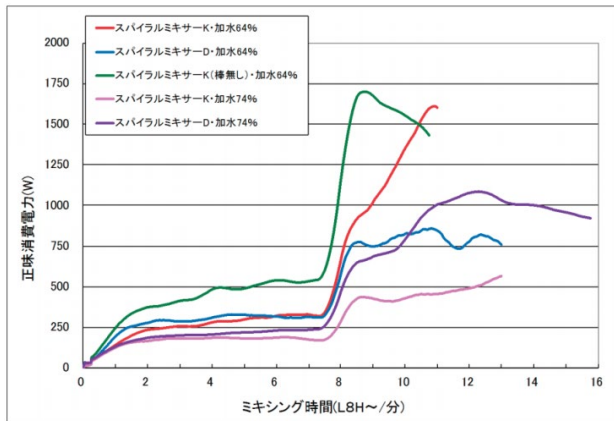


図1. 2種類のスパイラルミキサー、2種類の加水条件における、食パン配合の最適捏上終了時までのミキシング曲線

ミキシング効率（所定の生地膜を得るまでのミキシング時間）の良い順番は、(効率・高)機種K棒無し硬い生地>機種K硬い生地>機種D硬い生地>機種K軟らかい生地>機種D軟らかい生地（低）になり、各条件でミキシング時間にばらつきが生じています。

一方、ミキサー上昇温は図2の通り。ミキサーの回転数が異なるためにミキシング時間が2分以上も差が生じていることに対して、仕込み開始から捏ね上げまでのミキサー上昇温度の差は±1℃（2℃の範囲）に収まっています。

同様に課題研究授業で使用している横型ミキサーの記録データでは、ジャケット（冷水）冷却を行ってないデータを探して比較したところ、食パン生地の仕込み開始からミキシングカーブのピークを僅かに超えるまでの上昇温度は、およそ11℃～12℃になるという結果です。（図3）

（図2のスパイラルミキサーの試験ではL0～L4分までのデータは割愛しています）。

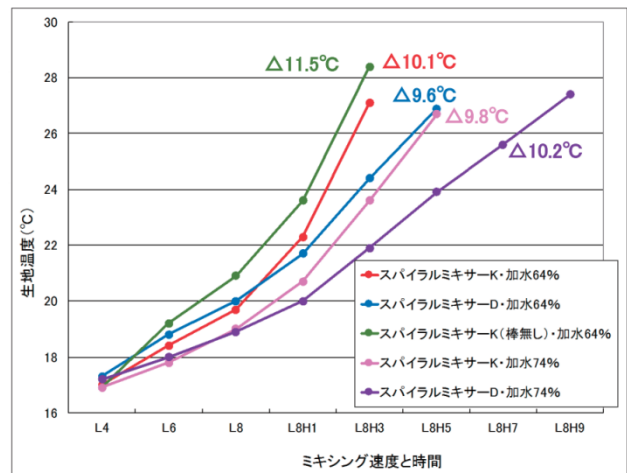


図2. 2種類のスパイラルミキサー、2種類の加水条件における、食パン配合の最適捏上までの生地温度の変化 ※ 数字はL4分とミキシング終了時までの温度差。実際はL4分間の温度上昇を含めると1～2℃程度高い値になる。



写真1. 2種類のスパイラルミキサー、2種類の加水条件における、食パン配合の捏上終了時の生地状態

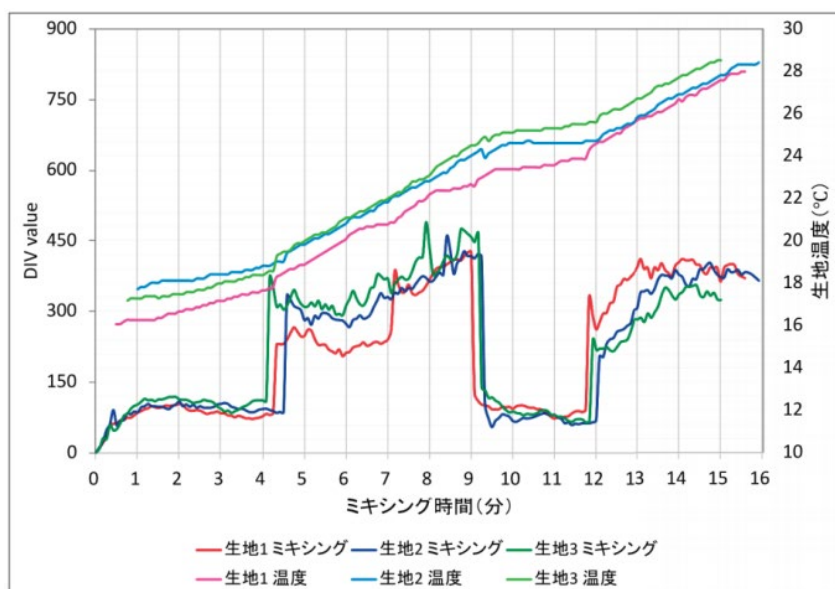


図 3. 横型 1 袋用ミキサーにおける食パン配合の最適捏上までのミキシングカーブと生地温度の変化

※ 生地 1: 16.1°C → 28.0°C (Δ11.9°C)、生地 2: 17.7°C → 28.4°C (Δ10.7°C)
 生地 3: 17.2°C → 28.6°C (Δ11.4°C)

したがって、以上の結果を参酌すると、例えば 3 速変速の縦型ミキサーでミキシングする時、L4M3H1 (油脂投入) L1M3H4 (分) で所定の生地を得たとした場合、L1 分目 (全原料の温度が平均化した時) の温度が 16°C、捏ね上げ時の温度が 27°C と仮定すると、ある 2 速変速ミキサーのミキシングの内訳だと L4H4 (油脂投入) L3H4 (分) で同等の生地ができた と仮定した場合も L1 分目の温度が 16°C、捏ね上げ時の温度が 27°C に近似の筈で、いちいち L1 分当たり何°C 上昇するのか、M1 分当たり何°C 上昇するのかという数値を追い求めても仕方ないという訳です。

つまり、ミキサー上昇温度を知りたいければ、食パンなら食パン生地仕込み時に (各製品ごとに異なるので、各生地ごとに計測が必要)、低速初期の生地がまとまった時の温度を測定し、捏ね上がった時の温度 (ボウル冷却しない) を測定し、その温度差を知っておけばミキサー上昇温度は事足りるということになります。

ただし、季節ごとの僅かな差は出るので、不定期で確認しておくことをお勧めいたします (理由は後述します)。

② 熱を最も伝えにくい空気の温度が計算式に入っている

次に、製パン原料で最も大きな熱 (熱量) を持っているものは、もっとも重たい固体である小麦粉と、次に重たい液体の水です。

そしてミキシング中に発生する加圧と剪断、摩擦によって生じる熱は、生地の温度上昇に現れ、一部は金属のミキサーボウルに伝わり拡散します。

ところで、ミキシングしている最中に、生地の熱が生地をとり囲む室温の空気 (冬場で 20°C ~ 夏場で 30°C 位の室温を想定しています) に伝わって逃げていくのでしょうか？

捏上生地温度は 25~27°C なので、室温と生地温度の温度差は大きく見積もっても 10°C くらいです。温度差が小さいということは、熱の移動も小さいということの意味するので、熱移動がゼロではないとしても水温計算に影響を与える程ではないのではないかと考えます。

私自身が熱の専門家ではないので、正確性に欠く答えしか持ち合わせていませんが、少なくとも空気の熱伝導率は小麦粉や水、ミキサーボウルと比べると極端に低く、現場の室温と生地温度の差は、冷凍生地の解凍開始時や、冷蔵生地の温度回復前の温度差と比べると小さいことはいまでもありません。

また、冷凍生地の解凍や冷蔵生地の温度回復にかかる時間が室温で 1 時間以上に対して、生地のミキシングは 20 分~30 分 (フランスパンやドイツパンのような極端な事例は除く) です。

このため、ミキシング時に生地表面の熱が空気に移る加熱や冷却の程度 (総熱流量) は余り大きくないと言えます。

それなのに、何故、「室温」が仕込み水温の計算式に必要なのか、いまひとつ合点を掴みません。

2. 熱の量を考慮した計算式はどうあるべき？

次に、現場の電卓で簡単に導き出せる仕込み水温の計算方法はどうすべきか。

ミキサー上昇温は1章①記載の通りですが、空気温度の代わりに差し引くべき数字は何が妥当だろうか。

『仕込み水温 = {(捏上希望温度 - ミキサー上昇温) × 3} - (粉温 + 室温)』のうち、

『(捏上希望温度 - ミキサー上昇温)』はミキシング開始初期の温度を表し、仮に食パンで捏上希望温が27°C、ミキサー上昇温 11°Cの場合、小麦粉と水（僅かながらの砂糖・食塩。パン酵母など）が混ざって温度が均一になったときのミキシング開始初期温度は16°Cになります。

この16°Cにするためには仕込み水温は何°Cが良いのかを試算すると、図4の通りとなります。

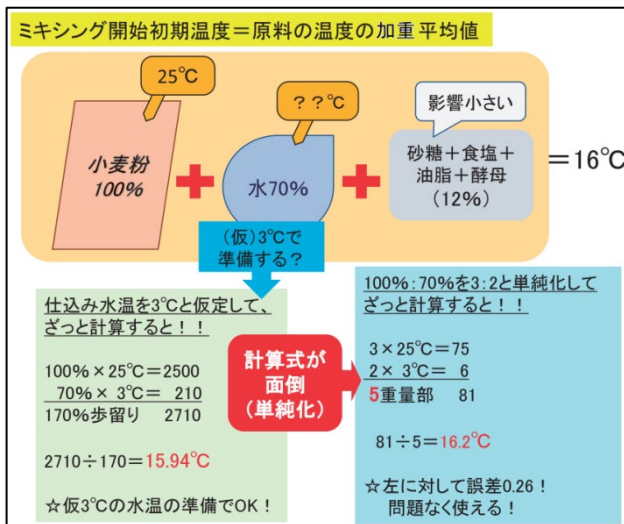


図4. ミキシング開始初期温度の求め方に関する考え方 (ストレート法)

ここでは仮に3°Cで水を準備した場合、100%相当の小麦粉の温度が25°Cだったとし、ざっくりとこの熱の量を考えると100%×25°Cの値となり、70%相当の水3°Cでは70%×3°Cの値となり、これらの加重平均値が15.94°Cとなり、ミキシング開始初期温度は16°Cに近似であるため、仕込み水温3°Cが妥当であるということが言えます。

また、桁数の多い計算は忙しい仕込み現場では敬遠されがちであるため、100:70の重量比を単純化し、3:2とすれば、小さなメモ紙でも計算しやすくなって便利です。

ただ、このような計算方法によると、『(捏上希望温度 - ミキサー上昇温)』に掛ける数字は『3』ではないということになり、係数を『5』で計算することになります。この場合の計算式は次の通りです。

$$\text{『仕込み水温 = } \{ \{ (\text{捏上希望温度} - \text{ミキサー上昇温}) \times 5 \} - (\text{粉温} \times 3) \} \div 2 \text{』}$$

それでは、過去から使われてきた係数『3』は何を根拠にしているのでしょうか。

要するに小麦粉:水が2:1になる場合が係数は『3』となります。例えばTA150 (あるいはDY150) に近い生地硬さで適応できます。その一例としてTA158の中種生地では係数『3』で妥当な数字が得られる筈です。

中種生地(無糖4時間発酵を想定)の場合、横型やスパイラルミキサーのように生地を攪拌子で確実に噛み込む場合はおよそ5~6°Cほど上昇します。

これが縦型ミキサーの棒フックの場合、生地の表面を攪拌子が舐めるようにして動く場合があり、この場合は3~4°C程度しか上がりません。

このようにミキサーの癖もありますが、今回の計算ではミキサー上昇温を5°Cで試算してみました。その結果を図5に示します。

ストレート法よりも誤差は幾分大きくなったものの、使える範囲だと思われます。そして、係数を『3』にした場合の計算式は次の通りとなり、過去から踏襲されてきた計算式と近いものになりました。

$$\text{『仕込み水温 = } \{ (\text{捏上希望温度} - \text{ミキサー上昇温}) \times 3 \} - (\text{粉温} \times 2) \text{』}$$

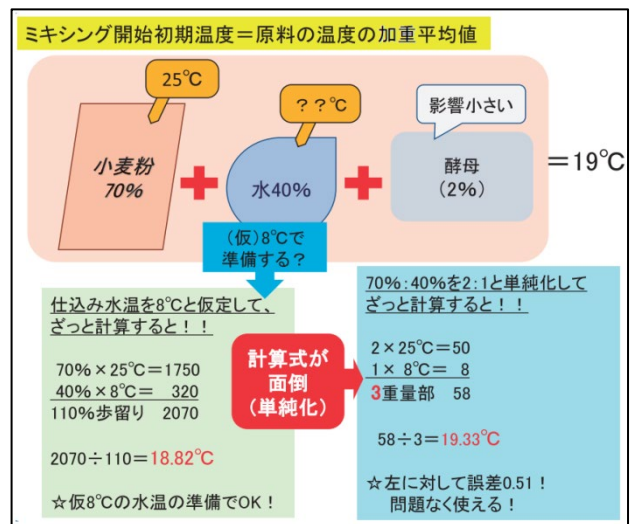


図5. ミキシング開始初期温度の求め方に関する考え方 (中種生地)

3. それでも狂う仕込み水温の計算式

前2章の計算式に基づいて計算するよう色々な授業の場面で指導したにも関わらず、極端に暑い夏場や寒過ぎる冬場では計算通りに生地が捏ね上がってくれない時が多々あります。

職人はこのような場合、経験による勘によって適当に補正し、「ちょっと温度低めで仕込もう！」あるいは「少し温度高めにしておいて！」とあって、仕込み水温を微調整し、何とか所定の捏上温度に近い生地温度で捏ね上げます。

しかし、時折、大きく外れることもあります。もしも、上司の指示で仕込んだにも関わらず、捏ね上げ温度が大きく外れた場合、所定の品質から大きく外れることが予測されるため、現場の上司と仕込み担当者の間に変な冷たい空気が流れます。

冷えるのは部下のキモかもしれません。冗談はさておき、これが授業になると捏ね上げ最終段階で研修生にミキサーボウルの下から氷水あるいは温水を準備させ、体力のある人間が中腰で構えて、タイマーを睨みながら何十秒から数分程度ボウルを持ったまま耐えてもらい、所定の生地温度に調整するという行為がなされます。

そこで、この温度のブレについてさらに考えます。温度に影響するのは、パン生地に触れるもので、且つそれが温度と重さと高い熱伝導率を持ったもの。つまりミキサーボウル（横型ミキサーの場合、ボウル内部に溜まった冷水も含む）です。

縦型やスパイラルミキサーの場合、ボウルは通常は室温に近い温度になっており、夏場は高く、冬場は冷たい。工場の横型ミキサーの場合、一番最初のミキシングは室温に近いブライン（冷却水）がミキサーボウルの中に溜まっており、一旦、冷却を入れつつ連続でミキシングを行っている場合は、冷たいブラインと金属のミキサーボウルが捏ね上げ温度を狂わせる原因となります。

ここで、やっと『室温』という言葉が出てきました。今回の執筆に至るきっかけも、福井県のリテールベーカリーのオーナーからの問い合わせで、内容は次の通りでした。

「同ベーカリーでは冷却の効かないスパイラルミキサーで冷蔵中種生地を仕込んでおり、夏場では氷水だけでは所定の捏上温度を超えてしまうため、小麦粉を前日から冷凍庫に入れて、冷えた小麦粉温度で仕込み水温を計算しているそうですが、それでも計算通りにならない」ということで、困り果てて、問い合わせがあった次第です。

そこで、ミキサーボウルと攪拌子がどの程度重たいのかを確認するために、30コートの縦型ミキサーのボウルと攪拌子の重量を測ってみました。

するとボウルと攪拌子の総重量はおよそ8kgもあります。（写真2）

このミキサーボウルで捏ねる生地の総重量は、食パンの場合、小麦粉5kgにその他の原料を加え得ると生地はおよそ9kgになります。生地重量とボウル重量がほぼ同じです。

このミキサーを使用して暑い夏場にミキシング時間が長くかかる生地を仕込んだ場合、温度が平衡化され生地の温度とボウルの温度は等しくなるということの意味します。

例えば室温29℃の夏場の仕込み現場で、捏ね上げ希望温度24℃のフランスパン生地を捏ねる場合、それもオートリーズをとる場合、放置時間の20分～40分の間に生地をミキサーボウルに入れっぱなしにして生地を調製するとしたら、粉温度とミキサー上昇温だけで仕込み水温を計算したとしても、ミキサーボウルに冷熱が奪われる（ミキサーボウルとの間の熱移動）ため、実際に捏ね上がる生地の温度は、計算上の24℃とミキサーボウルの温度の29℃の平均の温度の約26℃程まで上がってしまうということになります。

しかし平均値で予測できるほど計算は単純ではありません。問題になるのがミキサーボウル自身の温度ムラです。経験された方も多いと思います。ミキシング中にミキサーボウルを外から触ると、常に生地が触れているミキサーボウルの底部の温度は、ミキサーボウルの上端周辺部よりも高いという不均衡状態が生じます。

従って、食パン生地や菓子パン生地のように、常に攪拌子を回転させるミキシングでは、生地総重量とミキサーボウル+攪拌子の総重量による温度の平均で仕込み水温を補正しても、実際に捏ね上がる温度と大きく食い違うということが予測されます。



写真2. 試算に使用したミキサーボウルと攪拌子（7.8kg）

4. 脱着できないミキサーボウルの吸熱量を

試算する。

福井県のリテイルベーカリーのオーナーのところで使用しているミキサーは 1/2 袋サイズのスパイラルミキサーで、ミキサーボウルの脱着ができません。また、メーカーにボウル重量を問い合わせても答えが十分ではありませんでした。

そこで、前3章のように極力誤差の少ない範囲で仕込み水温を計算することができません。苦肉の策として現場で次の温度データをとるように依頼しました。その内容は次の通りです。

「仕込み作業が終わった最後にミキサーボウルに水を入れて洗うでしょうから、その時、

- ① 水を入れる前のミキサーボウルの温度を測ってください。
- ② 5℃の10kgの水を準備して、ミキサーボウルに入れ、5分間低速で攪拌し、5分後の水温とミキサーボウル外壁の温度を測ってください。
- ③ 念のためにさらに5分(合計10分)攪拌し、直後の水温とボウル外壁面の温度を測ってください。」と言いました。

その後、連絡が来ました。その温度測定結果は図6の通りです。

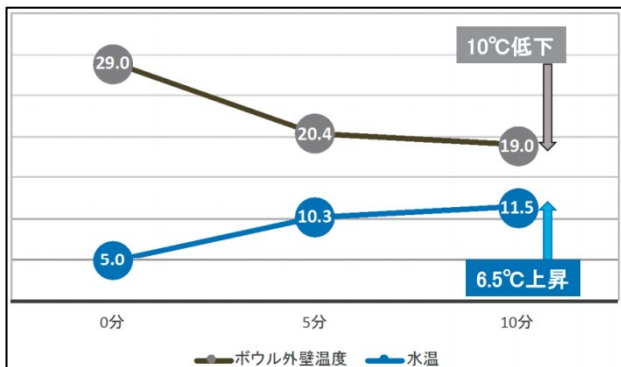


図6. スパイラルミキサーにおける冷水からボウルへの熱の移動

※ ミキサーは1/2袋用、水は10kg使用

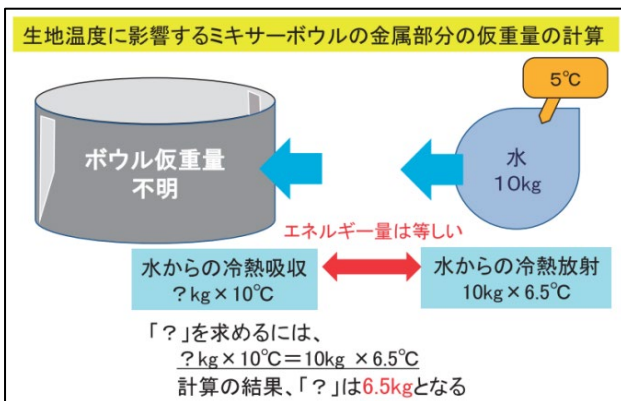


図7. 水温計算に反映させるミキサーボウルの重量相当部分の算出

当然のことですが、熱の移動は温度差が大きい0分から5分が大きく、5分から10分目にかけても僅かに熱が移動していることが判ります。

そこで、10分の温度差を利用して図7のように、捏ね上げ温度に影響を及ぼす金属部分の仮重量を求めました。その結果、6.5kg相当量という数字を得ました。

そこで、前2章の計算式にミキサーボウルの温度を反映させるため、現場の仕込み条件を質問しました。

仕込む生地は冷蔵中種生地で小麦粉数量は12kg、水6kg(ここで、ボウル仮重量計算の時の水の重量を15kgにすればもっと正確だったと後悔する)。捏ね上げ希望温度は22~23°Cとのこと。そして夏場は幾ら冷たい水を使っても、捏ね上げ温度が希望温度を超えてしまうため、小麦粉は前日から冷蔵庫で冷却しているとのこと。

小麦粉の温度を聞いたところ約15°Cとのことなので、この小麦粉温度を使用し、ミキサー上昇温を6°Cとして、小麦粉と水だけの仕込み水温の試算結果と、ボウル仮重量を反映させた試算結果を比べてみました。

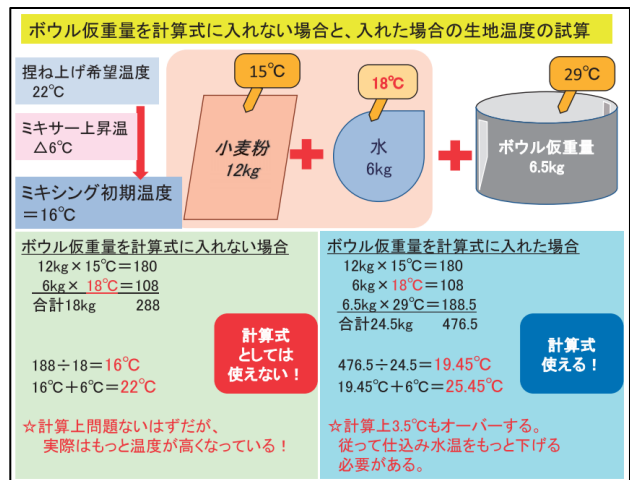


図8. ミキサーボウル仮重量を反映させた仕込み水温の計算式の妥当性について

その結果、図8のように、従来の計算式で試算すると、小麦粉と水の温度だけでは仕込み水温が約18°Cで所定の希望温度の22°C前後に捏ね上がるという結果ですが、ボウル仮重量を加味すると、もっと低い水温で仕込まないと希望温度にならないことが試算でも判りました。

つまりボウル仮重量を加味すると、捏ね上げ温度は25°Cを超えます。この数値は実際の現場の捏上温度と近似とのこと。

次に、ボウル仮重量を想定して仕込み水温を計算しました。

その結果、**図 9** のように仕込み水温 5℃で 16℃のミキシング初期温度が得られ、これにミキサー上昇温を加えると目標の捏上希望温度に達することが試算で出てきました。

さらに、電卓を使わなくても簡単に計算ができるように小麦粉、水、ボウル仮重量の比率を 2:1:1 として計算したところ、桁数の多い実際の重量比率と近似のミキシング初期温度および捏ね上げ希望温度を得ました。

このように重量比の数字を単純化することで、個々の掛け算や、割り算をメモ書き程度の紙の余白で計算できるので大変便利です。

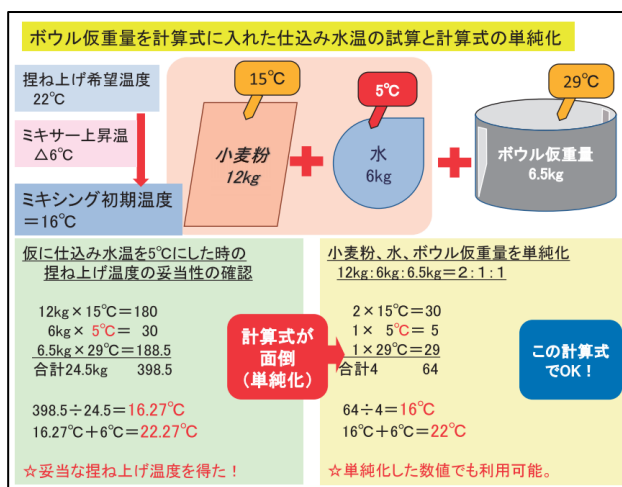


図 9. ミキサーボウル仮重量を反映させた仕込み水温の計算式による試算

この計算方式をベーカリーのオーナーに伝え、実際に検証試験を行ってもらったところ、冷蔵中種生地での捏上温度のコントロールはかなり精度が高まり、精神的にも楽になったとの返事をもらいました。

さらに、それ以外の生地の仕込みにおいても応用し、例えばストレート法食パン生地の場合、重量が小麦粉 12kg:水 8.5kg:ボウル仮重量 6.5kg となるとを単純化し、4:3:2 にするなど、工夫することで、現場の温度管理に幅広く利用できるとの返事を頂きました。

5. 発酵種製法の場合の計算式

最後に中種法について触れておきます。冷蔵しない中種法の場合、中種発酵終点温度が 28~30°C になるため、小麦粉を予め冷蔵あるいは冷凍庫に入れ、かつ 0°C に近い水温で仕込まない限り、所定の 27°C の捏上温度を得ることは困難で、これが常温の小麦粉倉庫や小麦粉サイロに置かれた小麦粉で仕込む場合、

ミキサーボウルに冷却機能が付いてなければ、マイナスの温度帯の仕込み水が必要になります。

つまり氷ごと仕込み水として計り取ることとなります。一方、冷蔵中種の場合は、微妙な温度帯の仕込み水が必要で、仕込み水の温度の計算が必要になってきます。

そこで前章までの計算式を参考にして、中種重量と原料重量、ボウル仮重量をもとに、それぞれの温度で計算した場合の計算式を **図 10** に示します。

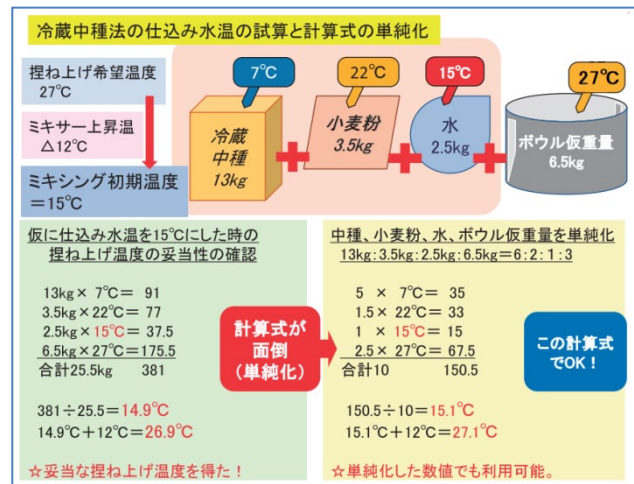


図 10. 冷蔵中種法でミキサーボウル仮重量を反映させた仕込み水温の計算式による試算

中種が 13kg×7°C、小麦粉 3.5kg×22°C、ボウル仮重量 6.5kg×27°C、水 2.5kg の仮の仕込み水温を 15°C とした場合、これらを積算して温度平衡になった時の温度を求めます。その結果、およそ 15°C を得ました。

ミキサー上昇温が 12°C の場合は、仕込み水温 15°C 前後で捏上希望温度を得ること可能ということです。

そして、この重量比を簡単にするために、中種 5、小麦粉 1.5、ボウル仮重量 2.5、水 1 とし、合計が 10 として積算して計算すると、複雑な計算を行わずともメモ紙と電卓を利用して桁数の少ない計算で仕込み水温 15°C が妥当という結果を得ることができます。

6. おわりに

仕込み水温の計算方法は、製パンの幅広い技術的範囲の中では、レベル的に初級の中の初歩的技術に見なされているように感じられます。それ故に今回執筆するにあたって、内容として不適切ではないかと悩みました。

しかし、製パンにおいて仕込み水温が余りにも不適切だと、捏上温度が大幅に設定温度からかけ離れて、品質に大きく影響を及ぼします。

そして、日々変化する気温や粉温度に対して、仕込みスタッフはタダでさえ忙しい中でブレを最低限に抑えようと不必要な作業（冷却の努力）や神経（ミキシング途中の温度測定）を使います。

私自身も若き頃、計算通りにならない生地温度に常に悩まされてきました。そんな折、昔から生地に対して「常に従わせてやろう」と思ってきた「S」な性格の著者です。

本来は「熱力学」という物理の法則を熟知しなければ正確には解けないはずなのですが、そのレベルに至らなくても現場で使える方程式があるはずだと日々悩んで考えてきました。

その結果が今回のオリジナルの計算方法です。このノウハウは10年以上前に確立し、今も授業などで使っています。最近では、授業に就くアシスタントには事前に計算式で仕込み水温を計算させています。

そのような折、パン学校卒業生から質問を受けたということなのです。これがきっかけで、本内容に対して一定のニーズがあるということを確認しました。

今回の内容が、読者の皆様の参考になれば幸いです。