

パン生地発酵における  
気泡の発生・成長・合一過程の3次元トモグラフィ解析  
3D Tomography Analysis of Bubble Evolution, Growth and Coalescence  
during Bread Dough Fermentation

豊田 淨彦<sup>a</sup>, 黒木 信一郎<sup>a</sup>, 寺川 裕也<sup>a</sup>, 八木 直人<sup>b</sup>, 上杉 健太郎<sup>b</sup>, 星野 真人<sup>b</sup>  
Kiyohiko Toyoda<sup>a</sup>, Shinichiro Kuroki<sup>a</sup>, Yuya Terakawa<sup>a</sup>, Naoto Yagi<sup>b</sup>, Kentaro Uesugi<sup>b</sup>, Masato Hoshino<sup>b</sup>

<sup>a</sup>神戸大学, <sup>b</sup>(公財)高輝度光科学研究センター  
<sup>a</sup>Kobe University, <sup>b</sup>JASRI

パン生地の発酵過程における気泡形成要因を明らかにするため、3次元X線トモグラフィ法により、生地中の気泡数、代表径、気泡径分布とその変化を求めた。その結果、気泡構造の形成過程は気泡発生期、成長期、合一期と平衡期から構成されることがわかり、各期間の特徴を明らかにした。同様に、市販パン製品の気泡構造を調べ、評価の高いパン製品に共通した気泡構造の特徴を明らかにし、その形成要因について考察した。

**キーワード：** X線CT、画像解析、気泡構造、投影面積円相当径、気泡径分布

**背景と研究目的：**

国内のパン生産量は年間120万トン(パン用小麦粉使用量基準)、その市場規模は約1兆4千億円(2010年度)とされ、過去20年間ほぼ安定した生産が維持されていることから、パン産業は成熟産業と見なされている。生産量の60%は大規模な工場生産によるものであり、徹底した機械化が図られているが、パン生地の発酵管理には、微生物代謝に関する複雑かつ繊細な操作が要求され、現在でも作業者の「経験と勘」が必要とされている。パン生地の発酵では、イースト菌による糖の分解により炭酸ガスが生成され、生地の多孔化が生じ、最終パン製品のテクスチャが形成される。生地の多孔化をもたらす炭酸ガスの生成はイースト菌の糖代謝に起因するが、発酵の進行と共に反応基質となる糖は、グルコース、フルクトースからマルトースに遷移する。また、それら糖は添加シュクロースや小麦デンプンの加水分解により生成され、その反応にはイースト菌の糖化酵素や小麦の加水分解酵素が関わる。また、発酵の進行とともにイースト菌が増殖し、糖化酵素の生成が増加する。このようにパン生地発酵には多くの反応経路があり、それらが遷移しながら進行する影響因子の多い複雑な糖代謝反応である。そのため、発酵終了時の生地を評価するだけでは、気泡形成の制御に結びつく知見は得られない。そこで、パン生地内での気泡発生から生地内相の網目状ネットワーク形成に至る過程を連続的に3次元トモグラフィ像(吸収コントラスト)として可視化し、①気泡の形態特徴量(気泡の数、形状、代表径および分布)から発酵の進行に伴う気泡形成の機構と支配要因を明らかにすること、②評価の高いベーカリーショップのパン製品の気泡構造を解析し、高品質パンの製造ノウハウに結びつく情報を得ることを目的とした。

**実験：**

**測定試料：**表1の材料配合でホームベーカリーにより調製したパン生地(6~10g)を供試した。パン生地を充填したアクリルパイプ(内径38mm)を温度調節された発酵チャンバー内に保持した。  
**実験条件：**20keVのエネルギー強度のX線を照射し、透過像を撮影した。空間分解能を25.6μm、撮像範囲を52.4×52.4mm(2048×2048ピクセル)とした。回転撮影における投影角度間隔は0.2°、180°の回転時間内に900枚の透過画像を得た。撮影は発酵開始後5~10min間隔で240minまで行った。高品質パンの気泡構造を明らかにするため、市販食パン製品の3次元CT画像を撮影し解析した。試料は、評価の高い神戸市、東京都、大宮市のベーカリーショップを中心に約20品目、大手パン製造会社量産品、研究室ホームベーカリー機製造によるものを用意した。クラムを変形しないように注意しながら超音波カッターを用いて、35mm角の組織を切りだし、円筒容器に充填の上、前述と同様の方法で画像を得た。X線CT撮影には、医学利用研究施設X線CT装置(ビ

ームライン BL20B2) を利用した。

**解析条件:** 3次元 CT 画像の円筒高さ方向 1/2 の位置における横断面画像を対象とし、ImageJ を使用し、気泡数、気泡平均径(投影面積円相当径)、気泡径分布を求めた。

表 1. パン生地の配合材料と分量

配合材料	分量
小麦粉(日清製粉製スーパーカメラヤ)	300 g
砂糖	15 g
食塩	6 g
脱脂粉乳(雪印製スキムミルク)	6 g
バター(雪印北海道バター)	12 g
酵母(日清製粉スーパーカメラヤドライイースト)	3 g
蒸留水	180 ml

### 結果および考察:

#### 1) 3次元再構成画像[1]

測定条件の確認のため、3次元再構成画像を作成した。図 1 より、円筒容器内の生地膨張は円筒軸方向に制限されるため、発酵により形成される気泡も軸方向に長軸をもつ管状となるとことを確認した。そこで、以下の考察では、円柱生地試料の高さ方向中間位置での横断面を対象とした。

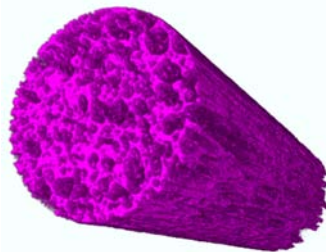


図 1. パン生地 3次元画像

#### 2) 気泡構造の形態特徴量

パン生地円柱試料の横断面における気泡数、気泡径、気泡径分布を求め、その経時変化について考察した。発酵過程の気泡構造の変化の例を図 2 に示す。

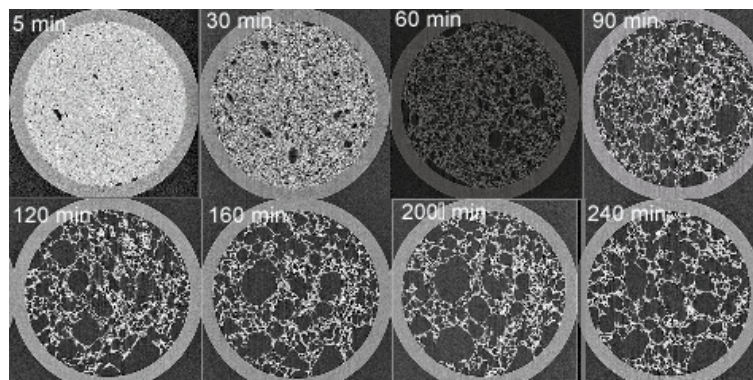


図 2. 発酵過程の気泡構造の変化

気泡数は発酵開始から約 35 min まで急激な増加を示す(図 3)。その大部分は直径 0.1 mm 以下の微小な気泡であった(図 5)。それ故、この期間は気泡の基となる気泡核の発生期間と見なせる。また、気泡径の増加も生じるとから、並行して気泡の成長も生じていると考えられる。気泡数の増加がピークを迎えた後、気泡数は急減するが(図 3)、減少の割合は時間経過とともに次第に

緩やかになり、130 min 以降はほぼ一定値となった。この変化に対応して、気泡径は直線的増加から一定値へ漸近した(図 4)。気泡数の減少と気泡径の増大が同時に生じることから気泡の結合、すなわち、合一が起こっているものと推察された。以上より、発酵での気泡形成には、気泡核の発生、気泡の成長、合一のフェーズがあり、それらは並行に生じているものの、全体として発生-成長-合一へと移行するものと考えられる。合一前の気泡形状は円形に近く、合一後は歪んだ形状になる。合一により生じた大きな気泡が径の小さい多くの気泡群のなかに当初混在するが、次第に径の分布は均平化される(図 1、図 5)。ただし、120 min 以降の安定した気泡構造の画像では規則性や秩序だった構造といったものは明確ではない。気泡数は、発酵開始後に急激に増加し、30~40 min 内で最大値に達した後、急減し、100~130 min 以降は、最大値の3~5分の1程度に達した後、ほぼ一定値を示した。円相当径は120 min 付近まで直線状に増加し、それ以降は一定値に漸近する傾向を示した。更に、気泡径分布から、発酵開始5 min では直径0.1 mm以下の気泡により殆ど占められるが、発酵の進行と共に、分布のピークを示す気泡径の増加とそのピーク高さの減少が見られ、初期の先鋭な分布からブロードなものへと遷移し、直径の大きい側へのテーリングが徐々に減少し、気泡径分布は左右対称形に近づいた。以上より、生地発酵過程は、発酵開始初期に気泡の発生が主となり微小な気泡が急激に生成される気泡発生期、気泡数の増加と気泡径の増大が同時に進行する気泡成長期、気泡の成長が維持されると共に気泡数が減少する気泡合一期および気泡合一後の変化に乏しい平衡期の4つの期間から構成されることが、精度の高い検出にX線CT法の適用により明らかにされた。

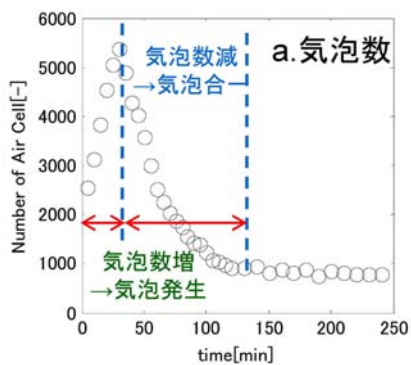


図 3. 気泡数の経時変化

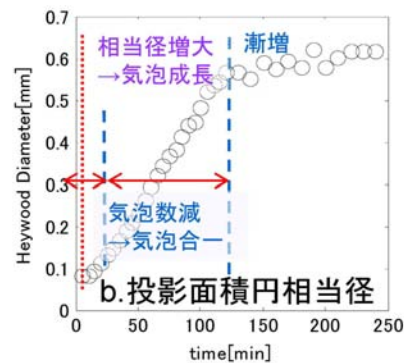


図 4. 気泡径の経時変化

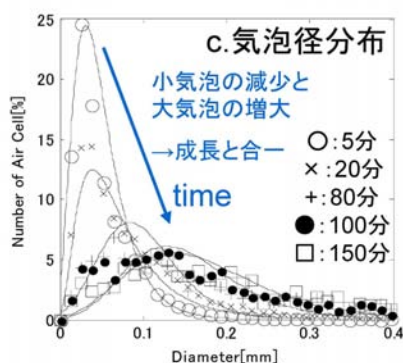


図 5. 気泡径分布の経時変化

### 3) 市販パン製品の気泡構造

パンの製造では、発酵後に空気抜き、分割や丸め・成型、ホイロ、焼成を行うため、発酵で形成された気泡構造がそのまま最終製品のものにはならない。そこで、食感と直結した気泡構造をもつと考えられる市販のパン製品、特に、パンの専門店であるベーカリーショップ(以下、BS)を中心に大手製パンメーカー量産品(以下、MP)、ホームベーカリー機(以下、HB)の食パンの気泡構造を図 6 に示す。図において、BS 製 7 点はそれぞれに相違はあるものの、G を除き共通した以下の性質が見られる。

- ①径の小さい比較的均質な気泡群中に大きな気泡が混在。
- ②大半の気泡の形状は扁平であり、一定方向に配向し、生地全体で非等方性の構造をもつ。
- ③気泡壁の厚さが比較的均一であり、編目状の構造をもつ。

BS 製品の G は、気泡壁が比較的厚く、気泡径も大きな構造をもつ。量産品 H は中程度の径の気泡が多く、気泡径の分布は他の BS 品に比べて小さい。ホームベーカリー製の I は、気泡径の大きい領域と小さい領域が局所的に存在し、気泡分布の均質性が乏しく、気泡壁も他に比べ厚く、円形状の気泡が多い傾向が見られる。気泡は発酵ガス由来のため、小さい気泡の残存は発酵の進行度合いと関連し、一方、気泡の扁平形状はガス抜きなどの発酵後の機械的操作の影響を受けるものと推測される。円形の気泡の残存は不十分な機械操作に因る可能性がある。大小の気泡の局所的な偏りは混合・捏和の不十分なことを示すものと考えられる。このように、発酵条件や混捏、仕上げ操作等の程度や適否が反映される気泡構造は、パン製造工程の履歴を記録したものと見ることが出来る。パン生地内層の高精度画像を得るには、高輝度放射光施設の提供する X 線 3 次元解析は有用な方法であることを確認した。

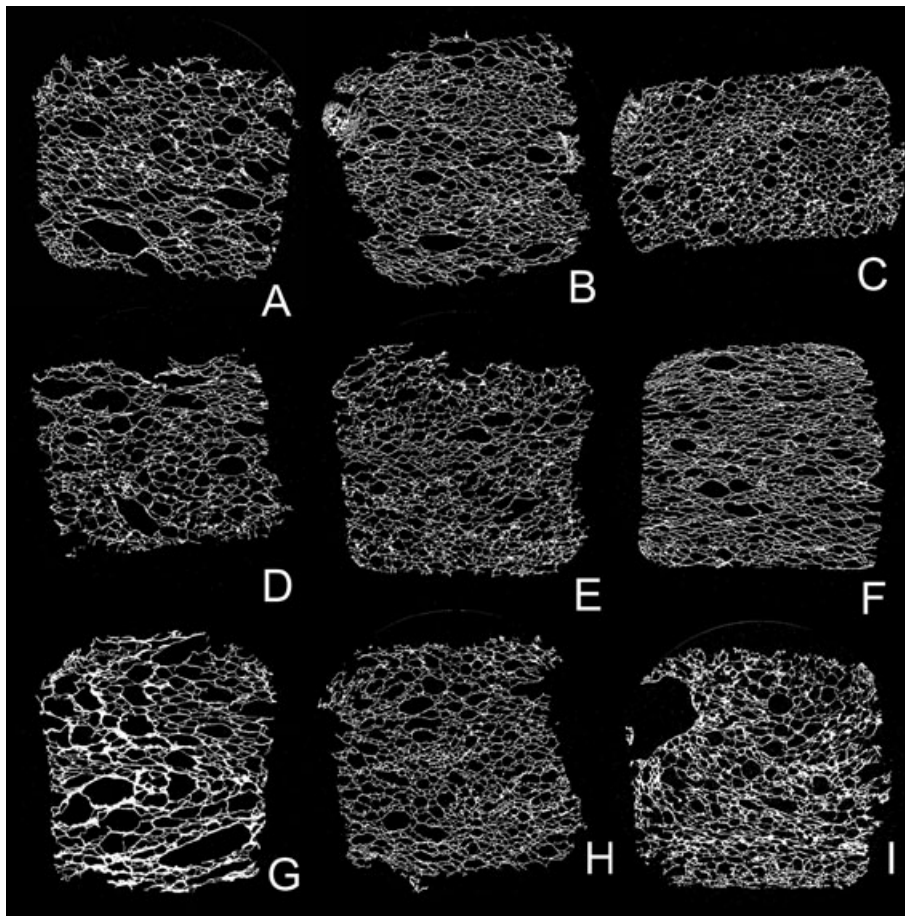


図 6. 市販パン製品の気泡構造

A-G : ベーカリーショップ, H : 量産品, I : ホームベーカリー

参考文献 :

- [1] 寺川裕也 他:日本食品工学会第 13 回(2012 年度)年次大会要旨集, p.55(2012)