

## パン内相の気泡構造の特性解析とテクスチャ形成機構の解明 Characterization of Air-Cell Structure of Bread Crumb and Elucidation of the Texture Formation Mechanism

豊田 淨彦<sup>a</sup>, 黒木 信一郎<sup>a</sup>, 寺川 裕也<sup>a</sup>, 浅田 達広<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>, Tatsuhiro Asada<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

SPring-8 ビームライン BL20B2 を利用し、パン生地内の気泡生成から焼成パン内相の網状ネットワーク形成に至る過程を 3 次元トモグラフィ像として可視化し、気泡の形態指標からパン製造の各工程における気泡構造形成の様子を明らかにした。更に、市販食パンの多様な気泡構造を調べ、その気泡形態の分布特性を形態指標により明らかにすることを試みた。

**キーワード：** パン、気泡構造、イメージング、形態指標

### 背景と研究目的：

国内のパン生産量は年間 120 万トン(パン小麦粉用量基準)であり、その 60%は機械化された大規模な工場生産によるものである[1]。しかし、発酵管理の技術には、現在でも作業者の「経験と勘」に頼る部分があり、完全自動化は困難であるとともに、作業者の負担も重く無視できない。一方、ベーカリーショップを中心とした生産では、製品のブランド化が進み、海外の食品コンテストで高い評価を受けるなど、その品質は国際競争力を有し、輸出産業としての潜在性を秘めているものの、その製造は職人的技量に依存している。

そこで、製品品質として重要なパン生地内相の気泡構造について、その形態特徴の抽出により構造の数値化表現を明らかにすると共に、生地発酵から焼成に至る製パンプロセス全体における気泡構造の形成過程を 3 次元 X 線 CT 解析によりトレースし、高品質パンの製造ノウハウに結びつく情報の取得を試みる。

そこで、パン生地内相の気泡生成から網状ネットワーク形成に至る過程を、3 次元トモグラフィ像として可視化し、①気泡の形態指標から発酵進行に伴う気泡形成の機構を明らかにする。更に、②市販食パンの多様な気泡構造について、気泡形態の分布特性を形態指標により明らかにすることを目的とした。

### 実験：

既報[2]にしたがい、ホームベーカリーを用いパン生地を調製した。直捏パン生地(6~10 g)を充填したアクリル円筒容器(内径 34 mm)を、温度制御された発酵チャンバー内に保持した。発酵チャンバーを SPring-8 医学利用研究施設 X 線 CT 装置(ビームライン BL20B2)の測定ステージ上に設置し、供試した。市販食パン製品については、神戸市のベーカリーショップ製品、大手パンメーカー製品を用意した。クラムを变形しないように超音波カッター或いは電動ナイフを用いて、アクリルパイプに収納できる直方体組織を注意して切りだし、アクリル円筒容器に充填した。

エネルギー 25 keV の X 線により、透過像(吸収コントラスト)を撮影した。空間分解能を 25.6  $\mu\text{m}$ 、撮像範囲を 52.4 mm $\times$ 52.4 mm(2048 $\times$ 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 $^\circ$ 、180 $^\circ$ の回転時間内に 900 枚の透過画像を得た。発酵実験では、チャンバー温度を 30 $^\circ\text{C}$ 、撮影間隔を 5~10 min とした。パン製造工程のトレース実験では、発酵開始から 55 min までを一次発酵とし、その後、発酵生地を容器から取り出し、パンチング、成形の後、再度、容器に充填し、二次発酵を 120 min まで行った。更に、二次発酵終了後の生地を、ベーカリーマシンの通常焼成モードを利用し 30 min 焼成し、焼成パンの CT 撮影を行った。

画像解析では、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、matlab、image toolbox を使用し、等面積円相当径、気泡壁厚さ等の形態指標を求めた。

**結果および考察：**

パンの製造は、一般に、混捏、一次発酵、パンチング(ガス抜き)、二次発酵、分割・まるめ、ねかし、成型・型詰、焙炉、焼成、冷却の各工程順で構成される[3]。各工程での処理が気泡形成へ及ぼす影響を調べるため、混捏、一次発酵、パンチング、二次発酵、焼成から成る簡略製造プロセスでのパン製造を再現した。各工程での生地 X 線 CT の横断面画像(図 1)から、気泡構造を調べた。気泡構造に関する形態指標として、等面積円相当径[4]、気泡壁厚さ[5]、気泡のアスペクト比[4]、気泡連結度[6]を求めた。アスペクト比については気泡面積による重付け平均値を求めた。

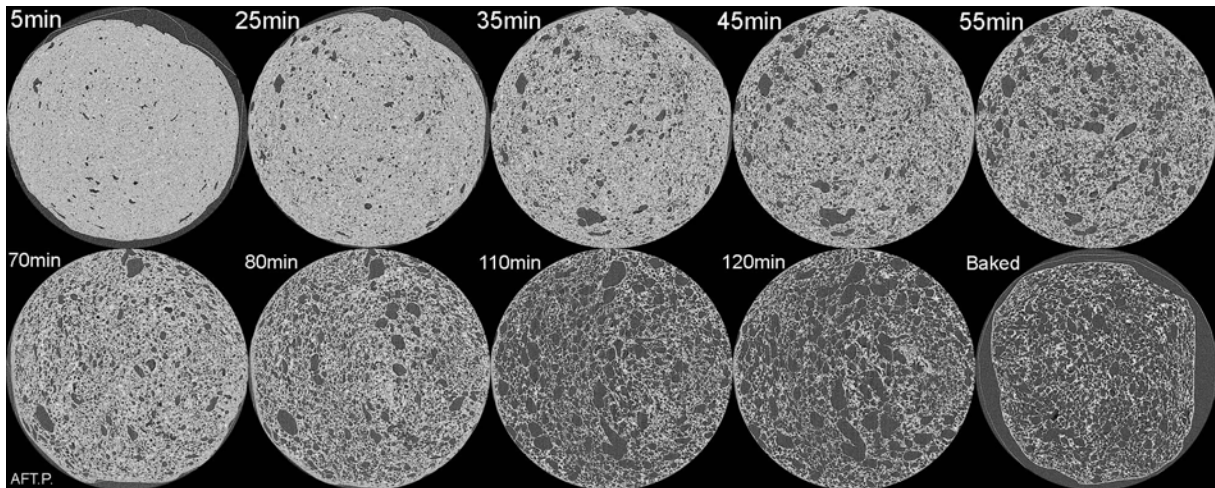


図 1. 製造工程のパン気泡構造の遷移

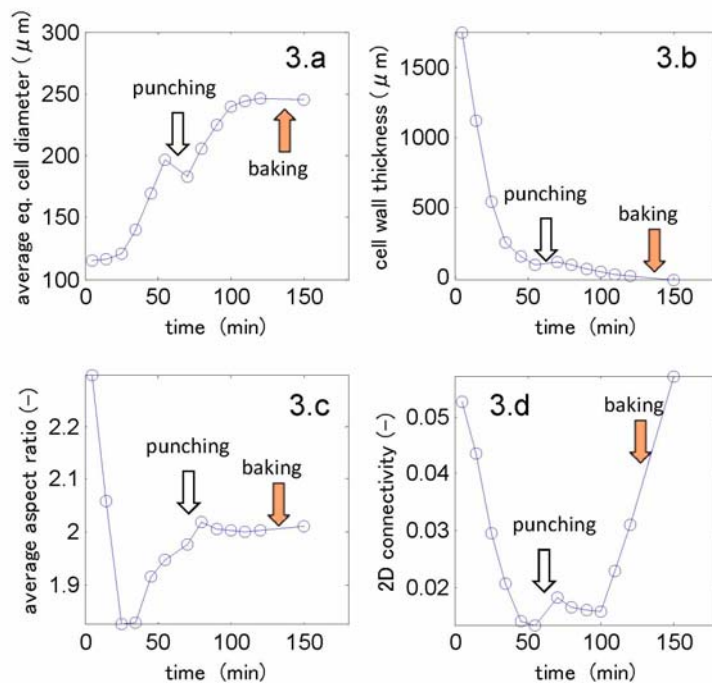


図 2. パン製造プロセスの気泡形態指標遷移

それらの時間変化の結果を図 2 に示す。

図 2.a では、発酵開始直後の平均気泡径は 150 μm 以下であり、気泡核生成期に対応する変化の乏しい停滞期(5~15 min)が確認された。その後、気泡の成長に伴い、一次発酵の終了する 55 min

までに気泡径は 200  $\mu\text{m}$  に達した。一次発酵後のパンチング(55~70 min)により、気泡径は若干減少するが、二次発酵(70~100 min)では急激な増加を示し、100 min 以降では一定値に漸近し、250  $\mu\text{m}$  となった。ホームベーカリーで 30 min 焼成した後の平均気泡径は焼成前とほぼ等しい。気泡壁厚さ(図 2.b)はパンチングの前後で不連続な様子を示すが、全体的に指数曲線状に急減傾向を示し、一次発酵終了時には、最終製品に近い厚さであった。アスペクト比(図 2.c)は、初期に急激な低下を示すが、この期間は気泡核生成期であり、微小な円形気泡の急激な発生に因るものと推測される。その後、気泡の成長と共にアスペクト比は増加し、気泡形状は扁平となる。この傾向はパンチングの前後でも継続して認められる。アスペクト比は 80 min 後に約 2.1 に達すると、それ以降は僅かに減少した後、緩やかな増加を示し、焼成品でのアスペクト比は維持された。図 2.d の 2 次元連結度は一次発酵期間では減少を示した。この期間での気泡の発生と成長が連結度の増加に及ぼす影響は認められない。その後、若干の変動はあるが、100 min までは一定値を示した。その後、急激な増加が見られることから、成長した気泡が近傍の気泡と結合、合一し、より大きな気泡を形成するものと推測される。焼成により、気泡の合一は更に進行し、焼成後の 2 次元結合度は増加した。このように、製パン工程の気泡構造をトレースすることにより、各工程での気泡形成への影響を、より具体的に把握することが可能である。ただし、本研究のトレース実験は、一実験条件下での 3 反復測定のみに限られるため、より一般性を有する結論を得るには、多くの実験検証が今後、必要である。

3 次元 X 線 CT 画像により、パン製造工程の気泡構造をトレースした例は、現在まで見当たらないため、上記の知見は貴重と考えるが、市販パンの一般的な製造工程は、より複雑であり、繊細な製造管理が行われている。そこで、食パンについて、ベーカリーショップ(以下、BS)を中心に大手パンメーカー量産品(以下、BM)、ホームベーカリー製(以下、HB)の食パンの気泡構造を調べた。市販パンでは、神戸市内のベーカリーショップより購入した角食パン 8 点、大手パンメーカー製の角食パン 2 点を用いた。なお、撮影した気泡画像については、紙面の制約から省略する。

パン製品の気泡の形態指標を表 1 に示す。気泡径は両製品ともにおおよそ 200~400  $\mu\text{m}$  の範囲にあるが、BM 製品の気泡径は BS 製品に比べ若干小さい。円形度は本来、値が 1 に近いほど円に近い形状を示すが、両製品とも 0.2~0.4 の範囲にあり、扁平気泡である。気泡壁厚さはほぼ等しいが、BS 品はバラツキが大きく、BS 製品の多様性が推測される。連結度、ポイド率については、両製品間で大きな差異は見られなかった。

表 1. 市販食パンの気泡形態指標

	等面積円相当径 ( $\mu\text{m}$ )	円形度 (—)	気泡壁厚さ ( $\mu\text{m}$ )	連結度 (—)	ポイド率 (—)
ベーカリーショップ製品					
$\bar{x} \pm \sigma$	387 $\pm$ 34	0.33 $\pm$ 0.04	54.1 $\pm$ 21.1	0.04 $\pm$ 0.03	0.72 $\pm$ 0.08
min.~max.	295~456	0.24~0.42	20~118	0.02~0.22	0.55~0.88
大手パンメーカー製品					
$\bar{x} \pm \sigma$	297 $\pm$ 27	0.27 $\pm$ 0.02	53.7 $\pm$ 14.0	0.04 $\pm$ 0.01	0.64 $\pm$ 0.08
min.~max.	231~332	0.24~0.30	33~75	0.02~0.06	0.43~0.77

市販パン製品の気泡構造の特徴を調べるため主成分分析を行った。指標には、①気泡径(等面積円相当径)、②気泡面積、③円形度、④アスペクト比、⑤ポイド率、⑥気泡壁厚さ、⑦連結度を用いた。その結果、95%以上の累積寄与率を得るには、第 4 主成分までを必要とした。第 1 および第 2 主成分による biplot を図 3 に示す。横軸に示される第 1 主成分(PC1)は気泡径、円形度、ポイド率の影響が大きい。同図に付した代表的な気泡画像からも、第 1 主成分と気泡径との関係の強さが理解できる。縦軸に示す第 2 主成分(PC2)については、複数の指標が関係し、影響力の顕著な指標は見当たらないが、気泡の大きさに関係する気泡径、気泡面積、連気泡壁厚さ、連結度が縦軸のプラス側に、気泡形状に関係する円形度、アスペクト比がマイナス側に位置し、気泡の大きさと形状の相反する影響を第 2 主成分は受けると思われる。第 1 および第 2 主成分の寄与率は各々 41%、26%と低いことから特徴的な関係を見出すことは難しい。したがって、本研究の範囲では、供試パンの気泡構造の特性分布を表現するには、第 1 主成分から第 4 主成分までが必要であり、形態指標の中から代表的な形態特徴量を選択することは困難であった。

以上から、市販パンの多様な気泡構造の定量的な把握には、X線CT画像に基づく気泡形態の解析が有効かつ有用である。なお、表題に掲げたテクスチャ形成機構の解明については、現時点で定性的結論が得られていないことから、解析を継続中であり、本報告では省略した。

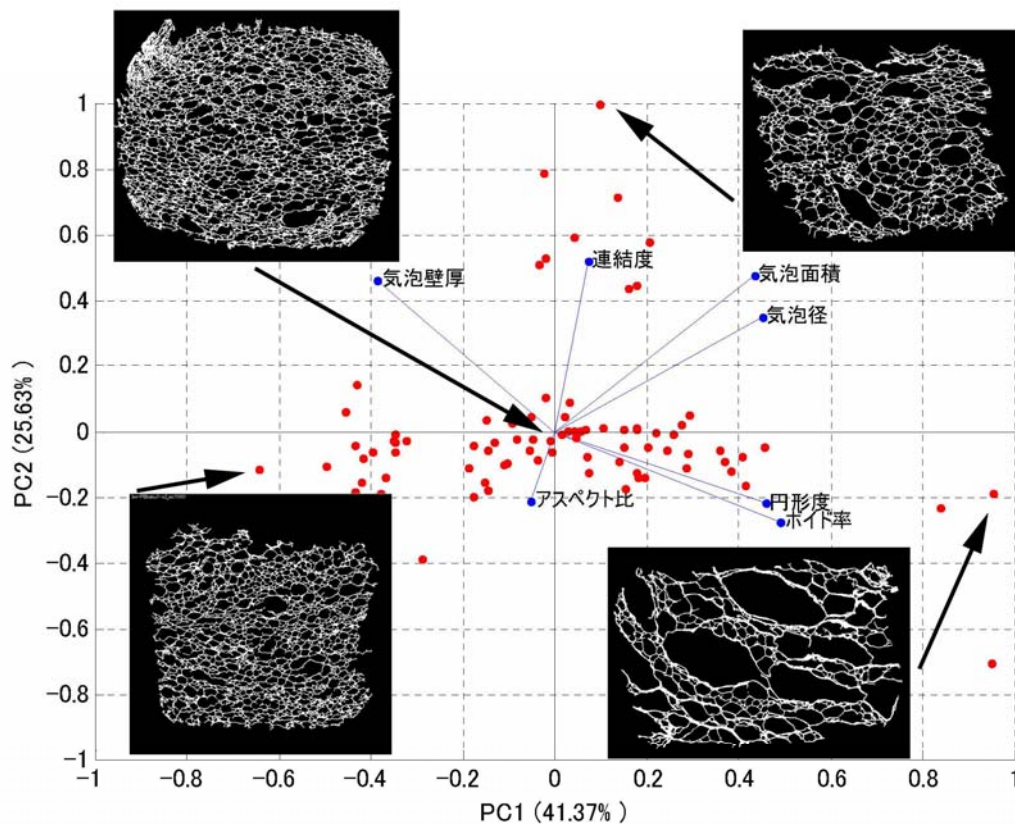


図3. 市販食パン気泡形態指標の主成分分析

#### 今後の課題：

製造過程における気泡構造のトレースと市販パン製品の気泡形態解析にX線CTを適用し、気泡形成の視点から各工程の特徴と市販パンの多様な気泡形態の特徴を明らかにした。ただし、本研究の解析結果は、2次元横断面に限られ、実験数も小数であることから、今後、3次元解析、多数の実験に基づく、より広い適合性の結論の導出が必要である。

#### 参考文献：

- [1] 農林水産省、平成22年度 食料・農業・農村白書(2010).
- [2] 豊田浄彦 他、平成24年度 重点産業化促進課題・一般課題(産業分野)実施報告書(2012B), 2012B1407.
- [3] 田中康夫、松本博、製パンプロセスの科学, P.101, 光琳(1997).
- [4] MathWorks, Image Processing Toolbox for use with Matlab, User's Guide, The Mathworks Inc. (2003).
- [5] P. M. Falcone et al., *J. Food Sci.*, **70**, E265, (2005).
- [6] M. Nakamura et al., *J. Volcan. Geotherm. Res.*, **176**, 302, (2008).