

# パン生地中における気泡形状の計測法

日清製粉グループ本社

前田 竜郎

日本大学

都 甲 洙

独立行政法人農研機構・食品総合研究所

杉山 純一・蔦 瑞樹

東京大学大学院

相良 泰行

日本冷凍空調学会論文集 Vol.23 No.3 別刷

社団法人 日本冷凍空調学会

## パン生地中における気泡形状の計測法

### Measuring Technique of Bubble Size Distributions in Dough

前田 竜郎*	都 甲洙**	杉山 純一***
Tatsurou MAEDA	Gab-Soo DO	Junichi SUGIYAMA
相良 泰行****	蔦 瑞樹***	
Yasuyuki SAGARA	Mizuki TSUTA	

\*日清製粉グループ本社 (356-8511 埼玉県ふじみ野市鶴ヶ岡 5-3-1)

Nisshin Seifun Group INC. (5-3-1 Tsurugaoka, Fuziminoshi, Saitama, 356-8511)

\*\* 日本大学生物資源科学部 (252-8510 神奈川県藤沢市亀井野 1866)

College of Bioresource Sciences Nihon University (1866 Kameino, Fujisawa, Kanagawa, 252-8510)

\*\*\* 独立行政法人農研機構・食品総合研究所 (305-8642 茨城県つくば市観音台 2-1-12)

National Food Research Institute (2-1-12 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8642)

\*\*\*\* 東京大学大学院農学生命科学研究科 (113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1)

Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

(1-1-1 Yayoi Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657)

### Summary

A novel technique to recognize bubbles in bread dough and analyze their size distribution was developed by using a Micro-Slicer Image Processing System (MSIPS). Samples were taken from the final stage of the mixing process of bread dough which generally consists of four distinctive stages. Also, to investigate the effect of freeze preservation on the size distribution of bubbles, comparisons were made between fresh dough and the dough that had been freeze preserved at  $-30^{\circ}\text{C}$  for three months. Bubbles in the dough samples were identified in the images of MSIPS as defocusing spots due to the difference in focal distance created by vacant spaces. In case of the fresh dough, a total of 910 bubbles were recognized and their maximum diameter ranged from 0.4 to  $70.5\mu\text{m}$  with an average of  $11.1\mu\text{m}$ . On the other hand, a total of 1,195 bubbles were recognized from the freeze-preserved sample, and the maximum diameter ranged from 0.9 to  $32.7\mu\text{m}$  with an average of  $6.7\mu\text{m}$ . Small bubbles with maximum diameters less than  $10\mu\text{m}$  comprised approximately 59% and 78% of total bubbles for fresh and freeze-preserved dough samples, respectively. The results indicated that the bubble size of frozen dough is smaller than that of unfrozen one. The proposed method can provide a novel tool to investigate the effects of mixing and preservation treatments on the size, morphology and distribution of bubbles in bread dough.

Key words: Bread dough, Bubble, Mixing, Microslicer, Visualization, Image processing

## 1. はじめに

近年、消費者の嗜好向上に伴い、リテールペーカリーパンの鮮度および焼き立の製品が強く求められている。このためには、早朝から何種類もの生地を何回も繰り返し仕込む努力が必要である。これに対応するため、リテールペーカリーのパンづくりの合理化手段として、生地の冷凍および冷蔵による発酵の遅延(長時間発酵)を行っている。パン生地は、発酵により膨らみ、焼成によりふっくらとしたパンに焼き上がる。いわゆる、パンは、多くの気泡を含有しているスポンジ状食品であり、気泡サイズやその分布状況は、パンのボリューム、老化、特に、ソフトな食感に大きな影響を与える。

製パン工程において最も重要なプロセスの一つに、パン生地のミキシングが挙げられる。製パンミキシングの目的は、諸原料を均一に混合、グルテンを十分に形成させること、空気を小気泡として生地中(グルテン膜)に抱き込むことである。この製パンミキシングプロセスにおいて取り込まれた気泡は、発酵、焼成においてパン酵母から産生された二酸化炭素ガス圧によりさらに膨らむ。このように製パンミキシングプロセスにおいて生成される気泡は、パンの最終品質を左右する上で最も重要な要素であり、これを定量的に計測し、最適な生地状態・仕上がり具合などを評価する必要があるが、その気泡のサイズは数 $\mu\text{m}$ 程度で、それを直接に計測することは困難である。

従来、パンにおける気泡の観察は、パン生地、発酵および焼成プロセスにおいて光学顕微鏡、電子顕微鏡、X線、CTなどにより行われていた。パン生地中の気泡は、Campbell et. al<sup>1,2)</sup>によるパン生地の比重を測定する方法が報告されているが、この手法では、パン生地内部の気泡を直接に観察・可視化し、その大きさや形状を定量的に計測することが不可能である。一方、発酵および焼成プロセスにおける数 $\text{mm}$ サイズの気泡は、光学顕微鏡、SEM(Scanning Electron Microscope: 走査型電子顕微鏡)、X線、CT(Computed Tomography: コンピュータ断層撮影装置)およびMRI(Magnetic Resonance Imaging: 核磁気共鳴画像法)による観察<sup>3-7)</sup>が報告されている。しかし、光学顕微鏡で気泡を観察するためには、試料をパラフィンおよび樹脂で固定し、薄片化する必要がある。さらに、

薄片化したパン生地にヨウ素染色し、乾燥後気泡を観察する方法が提案されているが、数 $\mu\text{m}$ 程度の気泡は消失する可能性が指摘されている。SEM観察では、凍結乾燥などの前処理により、気泡の大きさや形状が変化する可能性が考えられる。X線CTやMRIは、空間分解能が $0.5\text{mm}$ 程度であるため、数 $\mu\text{m}$ 程度の気泡の可視化が困難である。いずれにせよ、従来の観察法は、パン生地中の気泡を直接計測する方法ではなく、パン生地の間接的観察、もしくは、発酵、焼成後における観察である。このため、製パンミキシングにより生成されるパン生地中の気泡の評価には、不十分である。

一方、都ら<sup>8)</sup>は、複雑な形態を有する農産物の外観、内部構造および色彩分布などを観察し、その形態に関する定量的情報を得るための計測装置、すなわち、「マイクロスライサ画像処理システム(Micro Slicer Image Processing System: MSIPS)」を開発し、ブロッコリーの個体質量から表面積、比表面積および体積を推算する方法を提案した。

そこで、本研究では、1)試料中の気泡は楕円体状として存在しているため、試料を連続的に切削し、その切断面において気泡サイズの変化、また、気泡の界面は、必ず切断面より凹むことになり、顕微鏡を介したCCDカメラにピントぼけ部分として観察、および、2)試料を連続的に切削し、その露出断面画像から得られた2次元画像からボリュームレンダリング法<sup>9)</sup>により3次元像を再構築するマイクロスライサ画像処理システム、これらの2つの技術を組み合わせることに着目した。これにより、ミキシングにおけるパン生地中のオリジナル気泡構造の直接観察が可能になると考えた。

本研究の目的は、製パンミキシングプロセスを解明するためにマイクロスライサ画像処理システムを用い、パン生地中の気泡を観察し、その大きさおよび形状を定量的に計測する方法を開発する。さらに、その手法を用い、未冷凍および冷凍パン生地における気泡の形状を計測することにある。

## 2. 実験装置

### 2.1 マイクロスライサ画像処理システム<sup>8,10-14)</sup>

図1に本研究用に用いたMSIPSの概念図を示す。MSIPSは対象とする試料を連続的に切削、すなわち、回転刃によりマルチスライシングし、そ

の断面を露出させるマイクロサイサ部, 露出した2次元断面は, 顕微鏡を介し CCD カラーカメラで取り込む断面画像取込部, 取り込んだ元画像をデジタルデータとして記録し, 3次元像を再構築する画像処理部から構成される。

マイクロサイサ部は, 試料をステップモータ駆動の一軸ステージで間欠的に押し上げ, その上端を回転刃により最小切削厚さ  $1\mu\text{m}$ , 最大 90rpm で連続的に切削する。断面画像取込部は, 蛍光顕微鏡 (BX-FLA, オリンパス社) と CCD カメラ (Cool Snap FX, 日本ローバー社) で構成され, 各断面画像を撮影する。画像処理部は, パーソナルコンピュータ (Precision 360, Dell 社) に汎用型画像処理ソフトウェア (Image-Pro PLUS Ver4.0, Media Cybernetics, Inc, U.S.A) を介しハードディスクに記録される。マイクロサイサ部により切削された試料の露出断面は, 断面画像取込部により順次撮影され, 画像処理部に記録される。また, 得られた一連の2次元断面画像は, 画像処理ソフトウェア (TRI/3D-Vol, ラトック社) を用い, ボリュームレンダリング法 (対象物の表面情報のみを処理するサーフェスレンダリングに対し, ボリュームデータに不透明度を与え内部情報を可視化する方法) を適用することにより3次元像を再構築する。また, 切削中の試料の融解を防止するために, マイクロサイサ部を冷却することにより試料の温度は  $-40^{\circ}\text{C}$  に維持される。

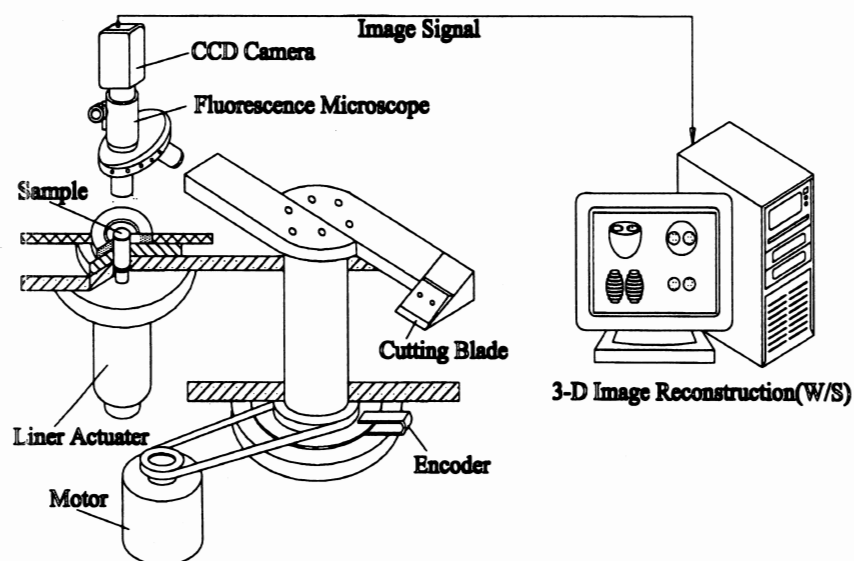


Fig. 1 Micro Slicer Image Processing System

### 3. 供試材料および方法

#### 3.1 供試材料

表1に小麦 100%に対するパン生地材料配合を示す。製パンのミキシングは, 小型ミキサー (Model N50, HOBART Co. U.S.A) を用い, 代表的な食パンミキシングのピックアップ, クリーンナップ, ディベロップメント, ファイナルの4ステージで行い, ファイナルステージの生地を採取した。なお, ショートニングは, クリーンナップとディベロップメントの間に投入した。各ステージにおけるミキサーの回転時間は, ピックアップは (低速 3min), クリーンナップ (中速 3min, ショートニング投入, 中速 3min), ディベロップメント (高速 3min), ファイナル (高速 10min), とした。供試材料用のサンプルホルダは, パラフィンで作られ,  $\phi 8 \times 30\text{mm}$  である。このパラフィン製円筒サンプルホルダの上部に試料包埋用の穴 ( $\phi 4 \times 20\text{mm}$ ) を開け, サンプル包埋用のホルダとして用意した。採取した生地は, 生地内部の構造を固定させるため, 液体窒素に浸して急速に凍結した。凍結した生地を, ドライアイスの上で  $\phi 3 \times 20\text{mm}$  に成形した。これを, 凍結包埋材である OCT (Optimal Cutting Temperature) コンパウンドと共にパラフィン製サンプルホルダに充填し, さらに, OCT コンパウンドを凍結するために, 液体窒素の中で再度凍結し, 供試材料とした。また, 凍結

保存によるパン気泡形状の変化を把握するために, 採取した生地の一部を凍結保存 ( $-30^{\circ}\text{C}$ , 3 ヶ月間) し, 同様の手順でサンプルホルダに包埋して, 冷凍パン生地として実験に供試した。供試材料は, MSIPS のマイクロサイサ部により切削回転数 60rpm, 切削厚さ  $1\mu\text{m}$  にて連続的にスライスし, それと同期させながら顕微鏡を介して CCD カメラにより露出断面の画像を記録した。

Table I Bread formulation

Formulation	Flour basis [%]
Strong flour	100.0
Sugar	5.0
Salt	2.0
Shortening	5.0
Yeast	0.5
Water	65.0
Total	177.5

### 3.2 気泡形状計測法

パン生地中の気泡は、顕微鏡の対物レンズの焦点がずれ、CCDカメラで観察する際、ぼやけた像（ピンぼけ像）として現れることを応用し、識別した。対物レンズの光軸と平行に当てられた光は、対物レンズにより屈折され、レンズ軸のある1点（焦点）に集まる。焦点距離は、レンズの中心から焦点までであり、焦点深度は、レンズと観察面の距離を多少変えても、像がぼやけない範囲である。いわゆる、対物レンズと観察面（サンプル表面）間の距離が対物レンズの焦点距離と焦点深度の範囲であれば結像（ピントが合う）するが、この範囲より短い、あるいは、長い場合は、焦点がずれ結像されず、その結果、顕微鏡（CCDカメラ）には、ピンぼけ像として現れる。すなわち、試料中の気泡は球状として存在しているため、気泡の界面は切断面より高く、あるいは、低くなる。本

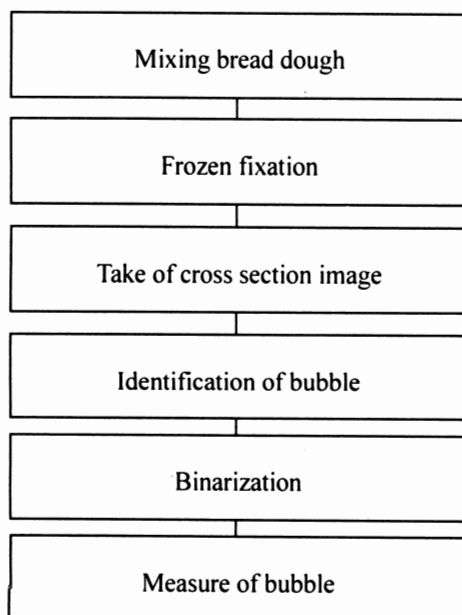


Fig.2 Measure of bubble shape

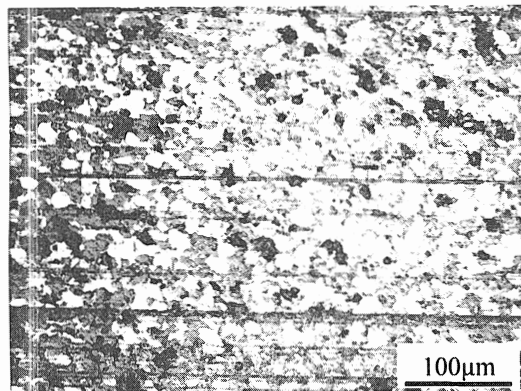
研究では、MSIPSにより試料を厚さ1 $\mu\text{m}$ で連続的に切削し、露出した切断面を観察しているため、ある切断面における気泡の界面は、必ず切断面より凹むことになる。このため、露出した切断面を顕微鏡を介してCCDカメラで撮影すると、パン生地中の気泡は、ピントがずれたぼやけた部分として観察されると考えられる。このようなMSIPSの上で観察される気泡の特徴を応用し、得られた連続2次元断面画像から気泡形状を識別する。気泡の形状は、汎用型画像処理ソフトウェアであるImage-Pro PLUSを用い、気泡面積と等しい面積を持つ楕円体と仮定し、その面積、楕円相当の長軸、短軸、および長短軸比を求めた（図2）。

## 4. 結果および考察

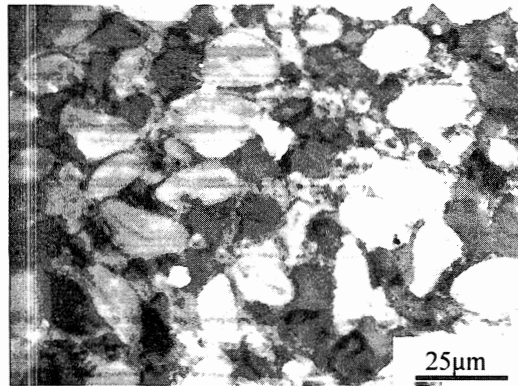
### 4.1 パン生地中の気泡識別

図3a, bに製パンミキシングの最終段階であるファイナルステージパン生地において低倍率(M Plan NUV 20 $\times$ , ミットヨ社)、高倍率(M Plan Apo SL 80 $\times$ , ミットヨ社)で撮影した2次元断面画像を示す。低倍率レンズは、ミキシングにより生成される気泡全体を、高倍率レンズは、詳細な気泡の形状やサイズを計測するために使用した。2次元断面画像の画素数は、1300 $\times$ 1030画素であり、実寸法は、低倍率が500 $\times$ 396 $\mu\text{m}$ 、高倍率が125 $\times$ 99 $\mu\text{m}$ 、面積は、それぞれ198,000 $\mu\text{m}^2$ 、12,375 $\mu\text{m}^2$ であった。これらの断面画像は、ピントが合っている部分とピントが合っていない部分で大別され、さらに、ピントが合う部分は楕円の白い部分と黒い部分が観察された。井上<sup>15-19)</sup>は、パン生地中の気泡膜モデルを提案し、グルテンと呼ばれる複雑な物質が気泡を抱き込みながらパンの骨格を形成し、その中にでんぷん粒や酵母などが分散すると考察している。さらに、気泡数が多く、その大きさが小さいほどパンのボリュームが大きくなり、食感が軽くソフト、老化が遅いと考察している。

このことから図3の2次元断面画像のピントが合っている白い部分は、その大きさから小麦粉由来の小粒澱粉粒もしくは大粒澱粉粒と考えられ、ピントが合っている薄い黒い部分はミキシングにより生成されたグルテンおよび混合されたパンの材料であると推察される。一方、高野ら<sup>7)</sup>はMRIを用い、楕円球状の気泡を深さ方向でスライスし、得られた



a) Low magnification



b) High magnification

Fig.3 Observation of cross section of dough

イメージシグナル強度と検出頻度の関係のヒストグラムを作り、気泡を計測した。本研究のように、MSIPSを用い、試料をある厚さで切削した場合、その断面中に存在する気泡は、必ず、切断面より凹むことになり、撮像された断面画像上の焦点深度範囲外では、ピンボケ像として現れ、そのため、濃い黒になる。したがって、ピントが合っていない部分は、

3.2 に述べた理由により、気泡と考えられる。また、図4の白丸部分に例示したように、この場合には、連続断面においてその大きさを追跡すると、切削が進むに連れて次第に大きくなり(図4a,b,c)、再び小さくなっていく(図4d,e,f)ことが確認できた。これは、図4の右の模式図に示すように、楕円体状の構造を連続して切削し、その切断面を観察したためであると考えられ、このことから、ピントが合っていない部分が気泡であることが強く裏付けられた。以上のことから、MSIPSは、マイクロスライサ部および画像取込み部により得られた連続断面画像からパン生地中の気泡を識別するのに有効な装置であることが確認された。

#### 4.2 気泡形状の定量化

MSIPSにより得られた元画像(図5a)における気泡構造は、目視による識別は可能であるが、画像解析ソフトによる自動識別は困難であった。このため、ペンタブレット(Cintiq 21UX DTZ-2100 WACOM)を用い、個々の気泡界面に白色でマーキングを行った(図5b)。気泡の2値化は、白色でマーキングした気泡について、カラースペクトルをRGBの各軸と輝度値との関係で定義されるカラーキューブ(色空間)に分割し、白色を抽出し、マスク画像を作成(図5c)し、画像の反転(図5d)することで行った。気泡の形状は、未冷凍および冷凍パン生地においてそれぞれ30枚の断面画像を用い、気泡の面積(A)と等しい面積を持つ楕円(相当楕円)の長軸(MA)、短軸(MI)および長短軸比(MA/MI)を求めた(図5e)。図6と表2に未冷

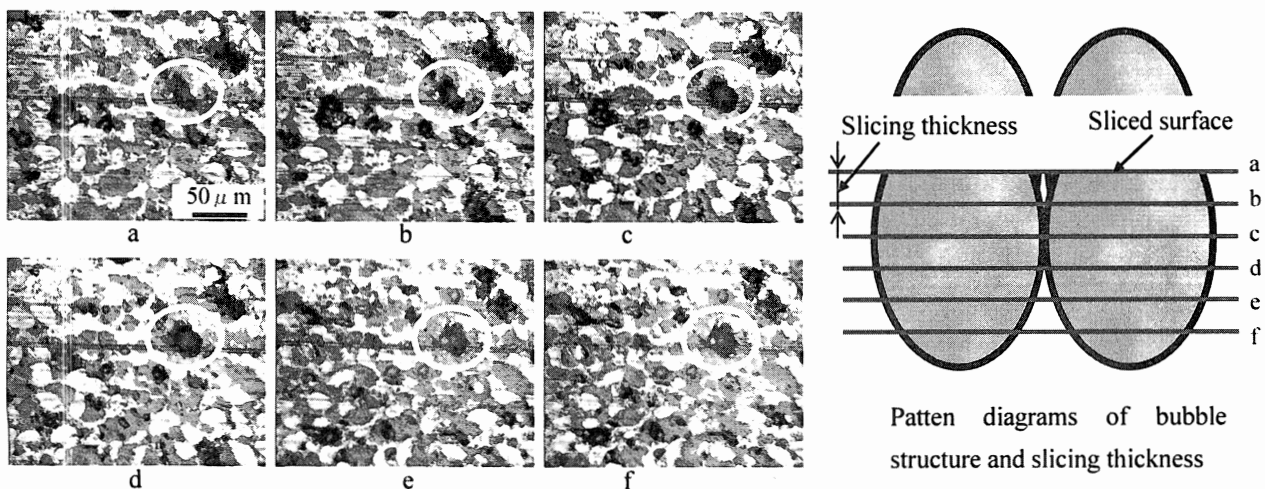


Fig.4 Relationship between bubble structure and slicing thickness in multi-slicing sections (slicing thickness:2 μ m)

凍パン生地における気泡の相当楕円長軸の分布および気泡の形状をそれぞれ示す。2次元断面画像より識別した気泡910個に対し、その形状を計測した結果、気泡の長軸は最大70.5 $\mu\text{m}$ 、最小0.4 $\mu\text{m}$ 、短軸は最大58.7 $\mu\text{m}$ 、最小0.2 $\mu\text{m}$ であった。また、長軸5~10 $\mu\text{m}$ の気泡が42%を占めて最も多く、長軸が10 $\mu\text{m}$ 以下の気泡は全体の59%を占めていることがわかった。図7と表3に冷凍パン生地における気泡の相当楕円長軸の分布および気泡の形状をそれぞれ示す。2次元断面画像から気泡1,195個に対してその形状を計測した結果、気泡の長軸は最大32.7 $\mu\text{m}$ 、最小0.9 $\mu\text{m}$ 、短軸は最大17.7 $\mu\text{m}$ 、最小0.2 $\mu\text{m}$ であった。また、気泡の長軸5~10 $\mu\text{m}$ が44%を占めて、最も多く、気泡の長軸が10 $\mu\text{m}$ 以下の気泡は全体の78%を占めていることがわかった。冷凍パン生地と未冷凍パン生地における気泡の相当楕円長軸の平均を比較した結果、未冷凍パン生地は11.1 $\mu\text{m}$ で、冷凍パン生地は7.4 $\mu\text{m}$ であり、冷凍パン生地の気泡が未冷凍パン生地より小さいことが分かった。

冷却保存中のパン酵母は、休眠状態になってい

るが、この酵母が栄養成分や温度など、生育に適した培地やパン生地の中に置かれた場合は、急速に活性化して活発な生活作用を準備する。これにより、製パンミキシングより生成された気泡の中には、窒素、酸素および二酸化炭酸ガスが含まれる。一方、二酸化炭酸ガスは、水に対する溶解度が高く、温度が低下すると水に対する溶解度が顕著に増大する特性がある。井上<sup>20)</sup>は、生地中の二酸化炭酸ガスは、冷蔵温度が低下すると水に対する溶解度が顕著に増大し、気泡数が減少すると報告している。冷凍パン生地中の水は、完全に凍ることはなく、一部の水が自由水として存在していると考えられる。このため、冷凍パン生地を-30 $^{\circ}\text{C}$ で一定期間保管した場合、溶存ガスが減少することとなり、本研究結果のように気泡サイズが小さくなることが推察された。

製パンの基本的な製法（ミキシング、発酵、焼成）でも、特に、ミキシングは気泡の抱き込み、グルテンの形成、材料の均一化を行い、パン品質を左右する最も重要なプロセスである。これまでは、製パンミキシングプロセスを定量的に評価す

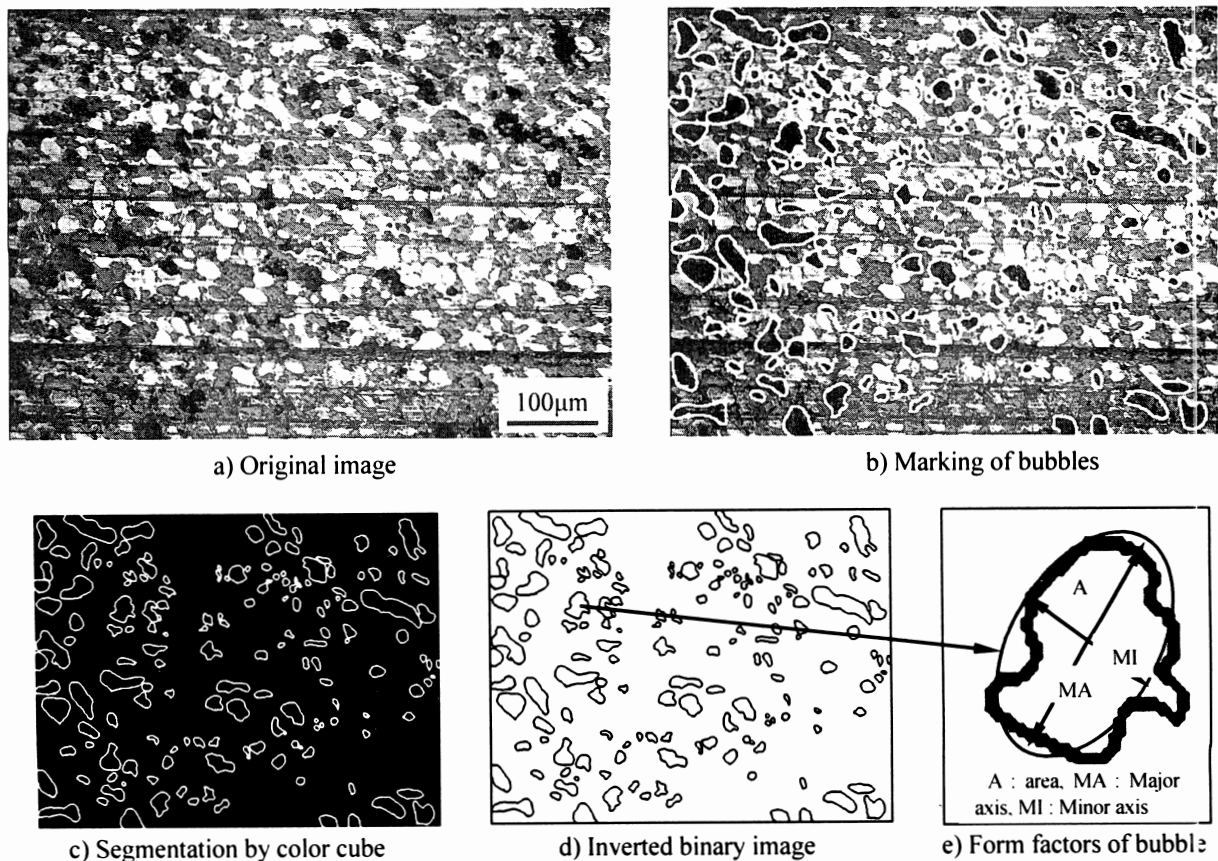


Fig. 5 Measurement of form factors of bubble

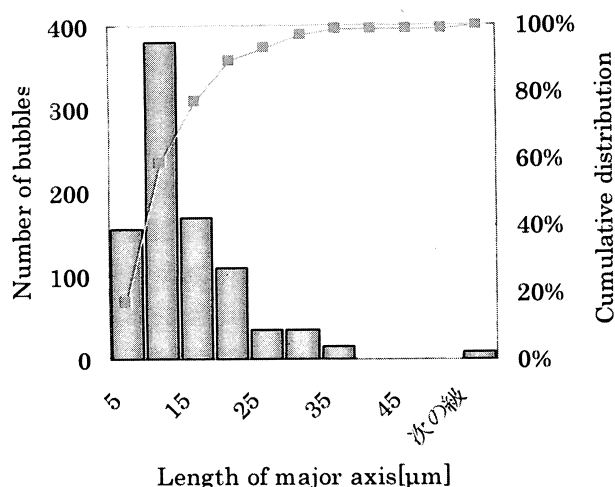


Fig. 6 Distribution of length of major axis in fresh dough

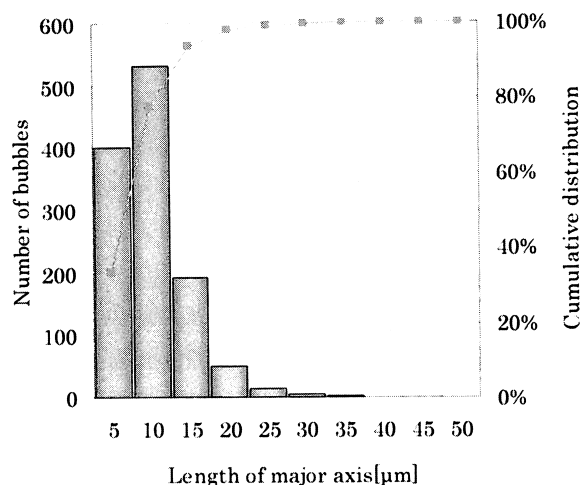


Fig. 7 Distribution of length of major axis in freeze-preserved dough

Table 2 Form factors of bubble in fresh dough

	Area [ $\mu\text{m}^2$ ]	Major axis(MA) [ $\mu\text{m}$ ]	Minor axis(MI) [ $\mu\text{m}$ ]	Ratio (MA/MI)
<b>Maximum</b>	2614.0	70.5	58.7	7.5
<b>Minimum</b>	0.2	0.4	0.2	1.0
<b>Average</b>	89.6	11.1	6.7	1.8
<b>Standard deviation</b>	239.3	8.7	6.3	0.9

Table 3 Form factors of bubble in freeze-preserved dough at  $-30^\circ\text{C}$  for three months

	Area [ $\mu\text{m}^2$ ]	Major axis(MA) [ $\mu\text{m}$ ]	Minor axis(MI) [ $\mu\text{m}$ ]	Ratio (MA/MI)
<b>Maximum</b>	303.8	32.7	17.7	12.7
<b>Minimum</b>	0.2	0.9	0.2	1.0
<b>Average</b>	25.3	7.4	3.6	2.5
<b>Standard deviation</b>	36.1	4.5	2.5	1.4

る技術がなく、最適な生地状態・仕上がり具合などの評価は、パン職人の経験と勘に頼っているのが現状である。

本研究の手法は、従来のような製品であるパンクラムの気泡形状の計測ではなく、ミキシングにおけるパン生地中の気泡を直接観察できる大きな特徴がある。また、本手法は、パン職人の経験と勘に頼ってきたミキシング状態を定量的に解明する新しいツールとして有効に应用されると考えられる。さらに、製パンの発酵、焼成、新しいパンミキサーの設計、製パン工場の設計、特に、冷凍パン生地の最適凍結保存法などにその応用が考えられる。この製パンミキシングプロセスの解析は、

製パン分野のみではなく、アイスクリーム、食品材料のミキシングおよび全て冷凍食品産業分野で応用されると考えられる。

## 5. 摘要

製パンミキシングプロセスを解明するために、マイクロライサ画像処理システムを用いたパン生地中の気泡を直接観察し、さらに、その手法を用い、未冷凍および冷凍パン生地全体における気泡形状を計測する手法を開発した。

試料の断面中に点在する気泡は、切削面に対して凹面となるため、CCDカメラを用いる際、焦点



深度範囲外の部分がピンぼけ像として現れる。これを応用し、パン生地中の気泡を識別した。また、試料中の気泡は、MSIPS から得られた等間隔の連続断面画像からその大きさを追跡すると、切削が進むに連れて次第に小から大へ、また、大から小へ変化することが確認された。これらによりピンぼけ部分が気泡であることを強く裏付けられた。

未冷凍パン生地において気泡 910 個に対してその形状を計測した結果、気泡の長軸は最大 70.5 $\mu\text{m}$ 、最小 0.4 $\mu\text{m}$ 、短軸は最大 58.7 $\mu\text{m}$ 、最小 0.2 $\mu\text{m}$  であった。また、5~10 $\mu\text{m}$  の気泡が 42% を占め、最も多く、気泡の長軸長さが 10 $\mu\text{m}$  以下の気泡は全体の 59% を占めていることがわかった。一方、冷凍パン生地において気泡 1,195 個に対してその形状を計測した結果、気泡の長軸は最大 32.7 $\mu\text{m}$ 、最小 0.9 $\mu\text{m}$ 、短軸は最大 17.7 $\mu\text{m}$ 、最小 0.2 $\mu\text{m}$  であることが分かった。また、長軸 10 $\mu\text{m}$  以下の気泡が 78% を占めた。冷凍パン生地と未冷凍パン生地における気泡の相当楕円長軸長さの平均を比較した結果、未冷凍パン生地は 11.1 $\mu\text{m}$  で、冷凍パン生地は 7.4 $\mu\text{m}$  であり、冷凍パン生地の気泡が未冷凍パン生地より小さいことが分かった。

#### 参考文献

- 1) Campbell, G. M. and Mougeot, E. : Creation and characterization of aerated food products. Trends Food Sci. Technol., **10**, 283(1999).
- 2) Campbell G. M., Rielly C. D., Fryer P. J and Sadd P. A.: Measurement of dynamic dough density and effect of surfactants and flour type on aeration during mixing and gas retention during proofing. Cereal Chem., **78**, 272(2001).
- 3) Campbell G. M., Rielly C. D., Fryer P. J and Sadd P. A.: Measurement and interpretation of dough densities, Cereal Chem., **70**, 517(1993).
- 4) Campbell, G.M., Rielly, C.D., Fryer, P.J., and Sadd, P.A.: The measurement of bubble size distributions in a opaque food fluid, Trans. I Chem. E, PartC, Food Bioprod. Proc., 69:67-76(1991).
- 5) G. M.Campbell, C. Webb, and S. S. Pandiella : "Bubbles in food", pp. 221-231, Am. Assoc. Cereal Chem.: St. Paul, NY (1991).
- 6) John, P.M. et al : Quantitative assessment of gas cell development during the proofing of dough by magnetic resonance imaging and image analysis. Cereal Chem. **80**(4), 390 (2003).
- 7) 高野博幸, 内藤成弘, 石田信昭, 狩野広美 : MRI で見たパン内相の網目構造, 食品工業, **45**(8), 55(2002).
- 8) 都 甲洙, 相良泰行, 工藤謙一, 横田秀夫, 樋口俊郎 : マイクロスライサ画像処理システムによるブロッコリー (*Brassica oleracea L. var.italica PLEN.*) の表面積および体積の計測, 農業施設, **28**(1), 21(1997).
- 9) 周藤安造 : 医用画像の 3 次元可視可技術, 可視化情報, **12**(45), 13(1992).
- 10) 都 甲洙, 相良泰行, 田畑みづほ, 工藤謙一, 樋口俊郎 : 生体材料内 3 次元氷結晶構造計測システムの開発, 冷凍, **19**(4), 375(2002)
- 11) 都 甲洙, 葛 瑞樹, 杉山純一, 上野茂昭, 相良泰行 : 近赤外分光イメージングによる生体材料内の 3 次元氷結晶構造の可視化, 冷凍, **22**(2), 185(2005).
- 12) 上野茂昭, 都 甲洙, 相良泰行, 工藤謙一, 樋口俊郎 : 凍結ゼラチンゲル内氷結晶の非破壊計測法に関する研究—誘電特性を利用した氷結晶構造の推定—, 冷凍, **19**(4), 381(2002).
- 13) 横田秀夫, 工藤謙一, 樋口俊郎, 相良泰行, 都 甲洙 : 3 次元内部構造顕微鏡による凍結生体試料の観察と計測, 低温生物工学, **44**(1), 1(1997).
- 14) 小林賢知, 樋口俊郎, 青木 勇, 工藤謙一 : 三次元内部構造顕微鏡の開発, 精密工学会誌, **61**(1), 99(1995).
- 15) 井上好文 : パンづくりの基本 1, B&C11-12, 77-81(2002).
- 16) 井上好文 : パンづくりの基本 2, B&C1-2, 56-60(2003).
- 17) 井上好文 : パンづくりの基本 3, B&C3-4, 36-42(2003).
- 18) 井上好文 : パンづくりの基本 4, B&C5-6, 87-91(2003).
- 19) 井上好文 : パンづくりの基本 5, B&C7-8, 75-80(2003).
- 20) 井上好文 : 生地冷蔵によるパンづくりの合理化, B&C11-12, 85-90(2005).