

<令和3年度助成>

パン焼成時の非線形膨張現象の解明

—パン生地中のグルテン構造から焼成後のパン内部の空隙を予測する—

小川 剛伸

(京都大学大学院 農学研究科)

背景

小麦粉中のタンパク質の一種であるグルテンは、パン生地の混捏過程でネットワーク構造を形成し、発酵時にイーストが生成する炭酸ガスを生地中に留める。この炭酸ガスが焼成時に膨張し、空隙が形成されることで、パンが膨らむ。このようにパン中に生成された空隙の数や形は、パンのきめ細かさや柔らかさ等の食感といった品質を決定する。しかし、焼成前のパン生地特性（グルテンのネットワーク構造）と焼成後のパン特性（パン中の空隙の数と形）の関係については必ずしも十分にわかっていない。これは、焼成時の空隙の生起が非常に複雑な非線形現象であるため、物性値や定数などを含めた支配方程式系が不明であることに起因する。そのため、製パン熟練技術者の経験に多くを頼っているのが現状であり、理論的に焼成後のパンの品質を予測することは困難である。本研究では、焼成前のグルテンのネットワーク構造と焼成後のパン中の空隙の数や形等との相関を決める支配方程式系を一旦ブラックボックスとして、人工知能（AI）を用いることで、パンの焼成挙動を予測することを目的とした。そのためには、パン生地中のネットワーク構造とパン焼成後の空隙の数や形等についての既知の関係をセットにして、AIに学習させる必要がある。しかし、ここで2つのことが課題となる。1つ目は、AIを活用するには、AIに事前に学習させる高質かつ多量のデータの取得が不可欠となるが、パン生地中のグルテンのネットワーク構造の高質な画像は多量に存在しないことが課題となる。2つ目は、グルテンのネットワーク構造をAIに学習させる際の“教師”として、

空隙に関する詳細な情報の取得が不可欠であるが、既存法では高精度で計測することは困難であることが課題となる。本報告書では、これら2つの課題への取り組みを中心に記載する。

方法

1. パン試料の調製

パン試料は、小麦粉、スクロース、塩化ナトリウム、ドライイースト、水を配合して調製した。パン中の空隙の数や形は、配合により制御した。

2. パン中のグルテンの計測

グルテンを染色する蛍光試薬を添加した SoROCS¹⁾ にパン試料を3日間浸漬して、蛍光染色と透明化処理を実施した。その後、二光子励起顕微鏡 FV1000MPE-IX83、FV1200MPE-BX61W1（オリンパス株式会社）を用いて、グルテンの構造を計測した。

3. パン中の空隙の計測

パン試料に黒色インクを塗布し、イメージスキャナ GT-X830（セイコーエプソン株式会社）および WSE-6370 Luminograph III lite（アトー株式会社）を用いて、クラムの断面画像を取得した。

4. 圧縮試験

パン試料のクラムの中心部から、30×30×5 mm のブロックを採取し、圧縮試験に供した。圧縮試験は、20 N のロードセルを装着したクリープメータ RE2-3305S（株式会社山電）を用い、圧縮速度は 1.0 mm/s で実施した。

5. AI 解析

パン試料中の空隙の認識には、エンコーダとデコーダを持ち、入力画像の特徴を学習できる AI を構築した。また、焼成前のグルテンのネットワーク構造から空隙特性を予測する AI として、164 層からなる畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を構築した。

結果および考察

1. グルテンのネットワーク構造に関する、多量かつ高質の画像データの取得

一般的に、食品内部の微細構造を計測するには、食品試料から、マイクロトーム等を用いて薄層切片を作製し、得られた薄層切片を顕微鏡等で観察する。しかし、試料の物理的な切断による切片の作製は、切断の過程で微細構造が変形や破壊を受ける可能性があるだけでなく、多大な時間と労力を要するという欠点がある。これまでに研究代表者は、透明化と蛍光観察を組み合わせる手法に着目し、新たな物質 (サリチル酸ナトリウム) が光の散乱を劇的に低減できるという発見に基づき、麺等の食品を透明にできる試薬 “SoROCS” を開発した¹⁾。しかし、透明化の際、パン試料を直接、SoROCS 溶液に浸漬すると、透明化過程で試料がゼリー状となり、顕微鏡計測時に取扱が困難になるという問題が生じた。そこで、

パン試料を円柱状の筒に包埋して、SoROCS に浸漬することを考案した。本手法を用いることで、パン内部でグルテンが形成する三次元的なネットワーク構造の計測にはじめて成功した (図 1A)。また、種々の配合で調製したパン試料を計測し、グルテンの凝集塊や分散塊の形成挙動を計測することができた (図 1B, C)。さらに、AI の学習に不可欠な高質かつ多量のデータを取得するため、異なるグルテンのネットワーク構造を有するパン試料から、約 4,400 枚の画像を取得した。

2. パン中の空隙に関する詳細なデータの取得

AI に学習させる際、パン内部の空隙情報は、グルテンのネットワーク構造に対する教師データとなる。空隙を計測する従来の方法として、X 線 CT 法やパンの断面画像のデジタル画像処理法が挙げられる。これらの方法は非常に有用であるが、X 線 CT 法は計測できるパンの大きさと分解能がトレードオフの関係になっており、パンの断面画像のデジタル画像処理法は、汎用的な画像処理アルゴリズムの構築が難しいといった欠点がそれぞれ存在する。まず、本研究では、パン試料の断面を計測した 241 枚の画像 (図 2A) に対して、従来のデジタル画像処理法を実施した。その結果、空隙を認識できない領域が生じる例が多く見られ、3 割程度しか成功しなかった (図 2B)。これは、パン表面が微妙ながら凹凸構

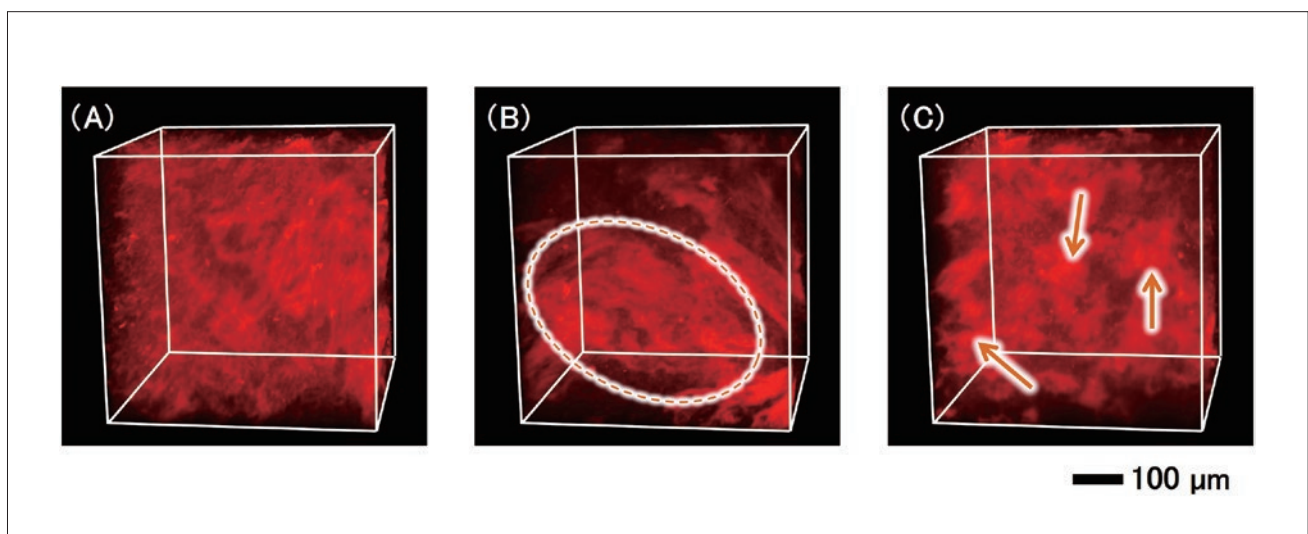


図 1 パン内部におけるグルテンのネットワーク構造
(A) 比較的均一なネットワーク構造、(B) 凝集塊を形成 (図中楕円部)、(C) 分散塊を形成 (図中矢印)。

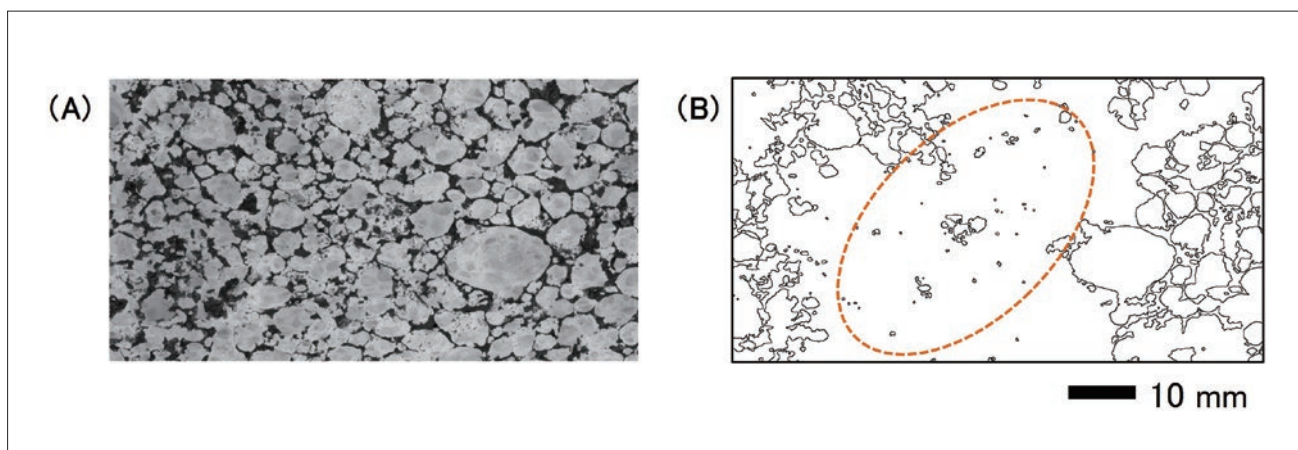


図2 従来法を用いたパン断面の画像解析
 (A) 撮影したパンの断面画像、(B) 従来のデジタル画像処理法により、空隙を解析した画像の例（画像中の点線の領域は、空隙が消失している）。

造をしていること、ならびにパン試料の切断時に僅かな傾斜が生じてしまうことなどにより、画像に輝度ムラが生じてしまうことが原因であると考えられる。そこで、パン試料の断面画像から空隙を識別するためのAIを別途、新たに開発することにした。AIを構築するには、前述したように、AIに学習させる教師データが不可欠である。この場合、パン断面の画像に対する教師データとして、人間が手作業で空隙の位置を画像上にトレース（アノテーション）したものが必要となる（図3A, B）。しかし、数百枚の画像に対してアノテーションを実施するには、非常に多くの労力と時間を要するという課題がある。そこで、本課題に対しては、前項のように計測法の改

良で解決するのではなく、AIにおける学習を工夫することで解決することにした。一般的には、教師データを多量に作成し、AIに学習させることが必要である。一方、本研究では、既に集められた全く異なる（他の研究者が作成した）教師データをAIに予備的に学習させ、そのAIの一部を再利用（転用）することにより、本学習に要する教師データの数を劇的に少なくすることを試みた。ここで研究代表者は、AIに予備的に学習させる他の教師データとして、既に公開されている数百枚の“細胞”の画像データを用いることを考案した。これは、細胞の形状がパンの空隙構造と幾何学的に類似しているため、転用学習が可能なのではないか、という着想に基づいてい

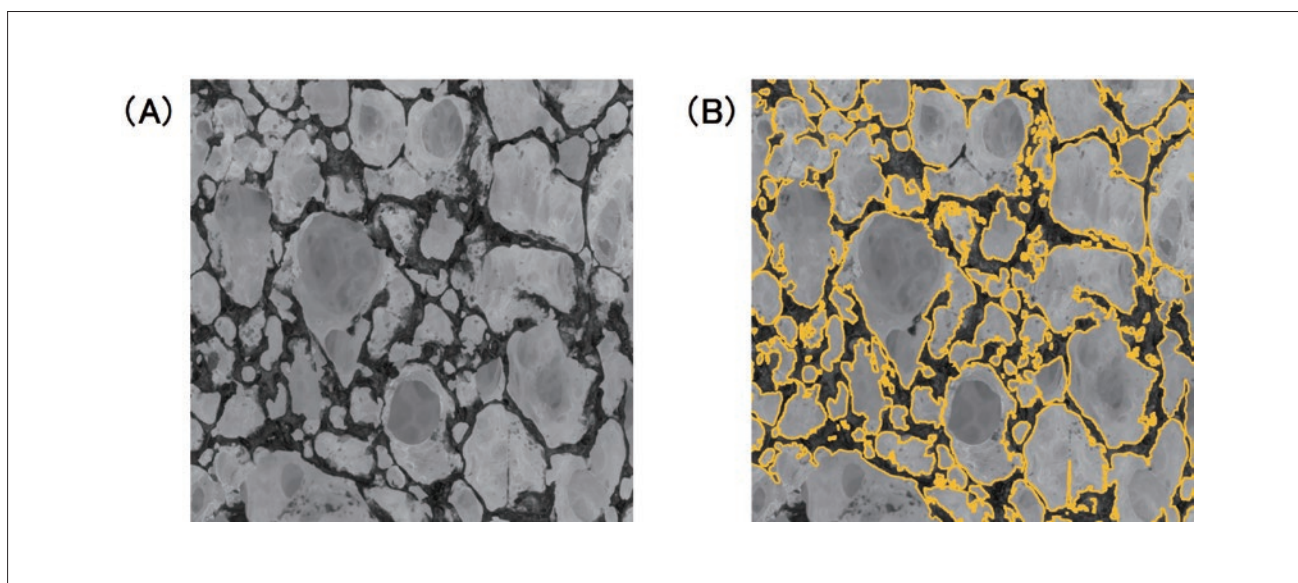


図3 AIを用いたパン断面の解析
 (A) 撮影したパンの断面画像、(B) AIに学習させる教師データとして、空隙を手動でアノテーションした画像の例（画像中の黄色線がアノテーションを示す）。

る。この予備的に学習させたAIを転用した結果、新たに作成するパン画像の教師データ画像を数枚程度と劇的に低減することに成功した。さらに、パンの断面画像、特に、パン全体を撮影した画像においては、パン表面の凹凸構造や切断時の傾斜に起因する輝度ムラの発生を防止することは非常に困難である。しかし、新たに開発したAIを用いることで、輝度ムラの影響を受けることなく、パン全体にわたって空隙構造を認識可能にした(図4A, B)。また、パンの断面画像を基にした空隙構造の認識においては、パンの断面画像に空隙の深部に存在する別の小さな空隙や空隙部の影が写り込んでいる場合、従来

のデジタル画像処理法では、これらに起因する黒色斑点や黒潰れなどが生じることがある(図5A, B)。しかし、本研究で新たに開発したAIでは、高精度に空隙部を認識することが可能となった(図5C)。一方、若干黒色になってしまう箇所が生じており、この点に関しては今後の課題である。

3. パン中の空隙が圧縮挙動に及ぼす影響

空隙構造が食感に及ぼす影響を調べた(図6A, B: 代表的な3種の試料のみ示す)。前項で新たに開発したAIで解析した空隙率と10%圧縮に要する荷重の関係を図6Cに示す。なお、空隙率については、

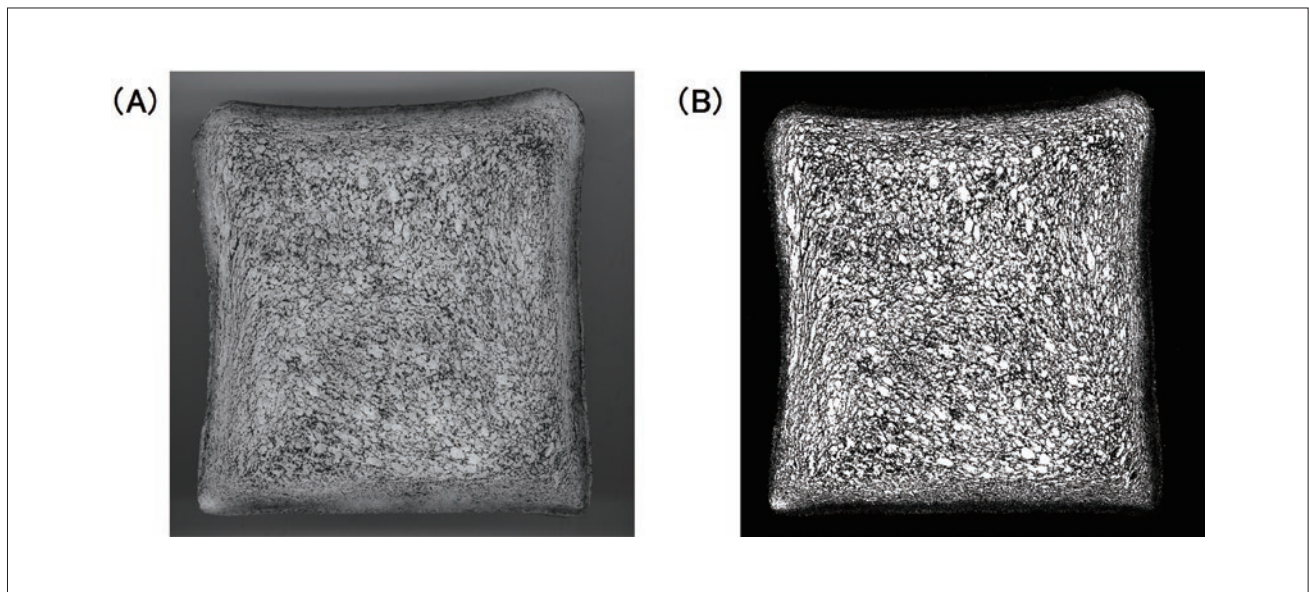


図4 AIを用いたパン全体の解析結果
(A) 撮影したパン全体の画像、(B) 新たに開発したAIで空隙を予測した結果。

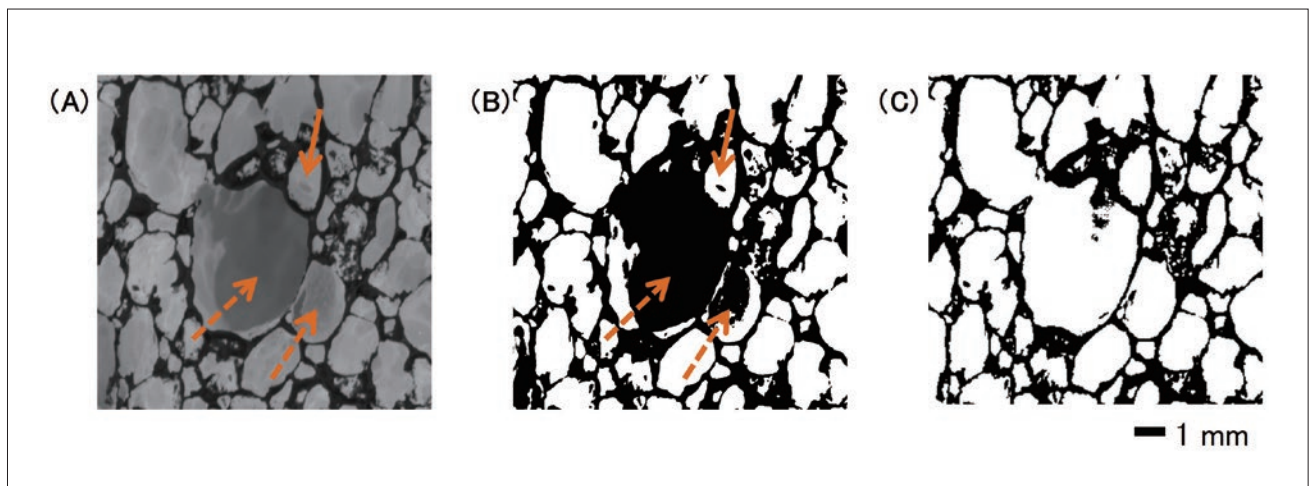


図5 パン中の空隙に対する解析結果の比較
(A) 撮影したパンの断面画像(実線矢印: 深部の空隙の写り込み、点線矢印: 空隙部の影を示す)、
(B) 従来のデジタル画像処理で解析した結果(実線矢印: 黒色斑点、点線矢印: 黒潰れを示す)、(C) 開発した新たなAIで解析した結果。

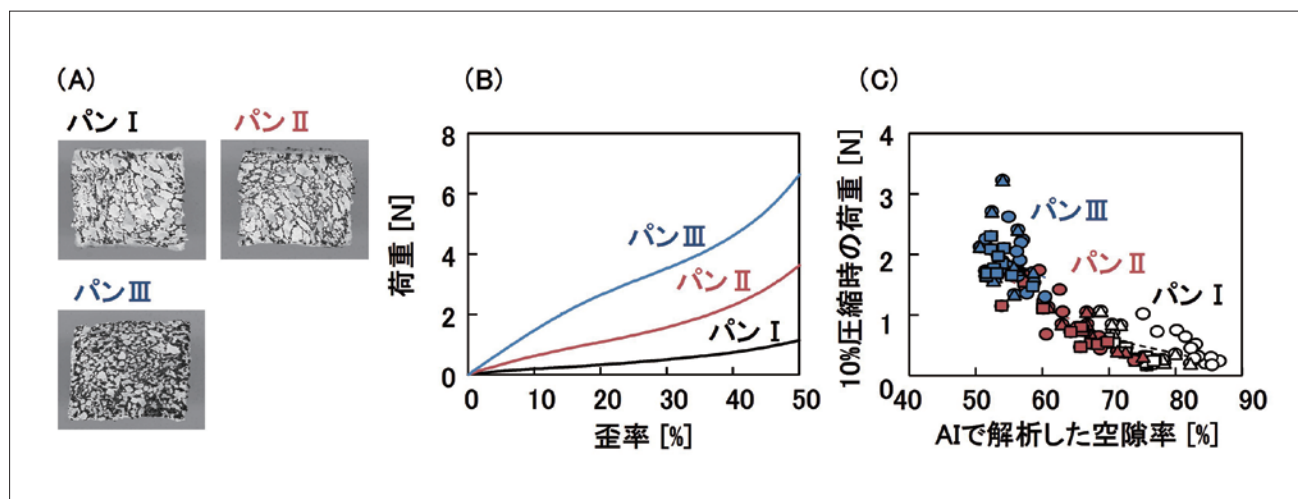


図6 パン中の空隙が圧縮挙動に及ぼす影響
 (A) 撮影した3種のパンの断面画像、(B) 3種のパンの荷重-歪み曲線、(C) AIで解析した空隙率と圧縮挙動の関係 ($N=3$)。

パンの試料片の上面と下面のそれぞれで得られた値の平均値をプロットしている。その結果、空隙の割合が増大するほど、圧縮時の硬さが減少することがわかった。なお、本試験においては、パン片の表面における空隙のみを解析したため、歪率10%とあまり圧縮していない際の荷重を適用したが、パン試料の圧縮時の荷重-歪み曲線においては、歪率が50%程度に増大しても歪率と荷重の関係は、あまり顕著な非線形性を示さないことがわかる(図6B)。つまり、パンの空隙構造の解析においては、X線CT等を用いて三次元解析をしなくとも、高精度に解析すれば、二次元情報からであっても、食感に大きな影響を及ぼす大変形領域の圧縮挙動を十分予測できることがわかる。

4. AIを用いた解析

以上のように、グルテンのネットワーク構造と空隙情報を取得できたため、最後に、これらをAIに学習させた。このAIは空隙を識別するAIとは別のAIとなる。その結果、約90%と高い精度で予測することができた。

結論

本研究では、透明化技術を活用することで、パン中のグルテンのネットワーク構造に関する、高質かつ多量の画像データを取得できるようにした。また、AIを活用することで、パンの断面画像から空隙構造を高精度で識別することに成功した。さらに、上記の新たに開発した方法を用いることで、焼成前のグルテンのネットワーク構造から、焼成後の空隙特性を高精度で予測可能にした。本研究により、AIを用いることで、焼成という複雑な非線形現象を解明できる可能性を示唆した。これらの成果は、パンの合理的な高品質化につながると期待できる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、研究助成を賜りました公益財団法人浦上食品・食文化振興財団に厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) Ogawa et al., *Nat. Commun.*, 12:1708, 2021.

Elucidation of a nonlinear expansion phenomenon during baking: Prediction of voids inside bread after baking from gluten structure in bread dough

Takenobu OGAWA

Graduate school of Agriculture, Kyoto University

Gluten, which is a type of protein in wheat flour, forms a network structure during the kneading process of bread dough, and retains carbon dioxide gas produced by yeast during fermentation in the dough. This gas expands during baking to form voids, thereby swelling the bread. The number and shape of the voids thus created in the bread determine the quality of the bread, such as its fineness. However, the relationship between the network structure of gluten in bread dough before baking and the void characteristics in bread after baking is not well understood. In this study, we aimed to clarify the baking behavior of bread using artificial intelligence (AI). First, the use of AI requires the acquisition of a large amount of high-quality data in advance. Therefore, by improving the optical clearing technology we have developed, we made it possible to acquire such image data on the network structure of gluten in bread dough. Next, we succeeded in identifying the void structure from bread cross-sectional images with high accuracy, as a “teacher” for AI to learn the network structure of gluten. Finally, by using the newly developed method described above, we were able to use AI to predict the void characteristics after baking from the network structure of gluten before baking with high accuracy. This result suggested the possibility of clarifying the complex nonlinear phenomenon of baking through the use of AI.